



INSTITUTO
DE ECOLOGIA
UNAM

Oikos=

25

Enero 2021

El suelo



DIRECTORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Enrique Luis Graue Wiechers
Rector

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General

Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez
Secretario Administrativo

Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa
Secretario de Desarrollo Institucional

Mtro. Javier de la Fuente Hernández
Secretario de Atención a la Comunidad Universitaria

Dra. Mónica González Contró
Abogada General

Dr. William Lee Alardín
Coordinador de la Investigación Científica

M. en C. Néstor Enrique Martínez Cristo
Director General de Comunicación Social

INSTITUTO DE ECOLOGÍA

Dr. Constantino Macías García
Director

Dr. Juan Enrique Fornoni Agnelli
Secretario Académico

Ing. Ulises Martínez Aja
Secretario Administrativo

Dr. Luis Enrique Eguiarte Fruns
Editor

Dra. Clementina Equihua Z.
Dra. Erika Aguirre Planter
Asistentes editoriales

Dra. Rosa Jimena Rey Loaiza
Corrección de estilo

Dr. Daniel Piñero Dalmau
Dr. Julio Campo Alves
Dr. Fernando Álvarez Noguera
Consejo editorial

L. D. G. Abril Luz María Ángeles Trujillo
Diseño original

Samara Kuri Lazcano y Dra. Erika Aguirre Planter
Diseño editorial y formación

OIKOS=, Año 6, No. 25 (enero 2021) es una publicación cuatrimestral, editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Unidad de Divulgación y Difusión del Instituto de Ecología, Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México, Tel. (55)5622-9002, correo electrónico: oikos@ieciologia.unam.mx, <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/>. Editor responsable: Luis Enrique Eguiarte Fruns. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-111710202000-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Certificado de Licitud de Título y Contenido: en trámite, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa por Grupo Impreso, Domicilio Monrovia 1101 Bis, Portales, Ciudad de México, 03300. Este número se terminó de imprimir el día 30 del mes de junio de 2018, con un tiraje de 500 ejemplares, impresión tipo offset.

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja el punto de vista de los árbitros, del Editor o de la UNAM. Se autoriza la reproducción de los artículos (no así de las imágenes) con la condición de citar la fuente y se respeten los derechos de autor.

Distribuido por: Instituto de Ecología, Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, C.P. 04510. Ejemplar gratuito.



DECENIO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE LA
**RESTAURACION DE
LOS ECOSISTEMAS**
2021-2030



INSTITUTO
DE ECOLOGIA
UNAM

Enero 2021

CONTENIDO

DE LOS EDITORES

El suelo, la última frontera

Clementina Equihua Z. y Luis E. Eguiarte..... 4

ARTÍCULOS

Un vecino voluble: plantas y aluminio en el suelo

Joselin D. Morales-Moreno, Verónica M. Rodríguez-Sánchez y Rocío Cruz-Ortega..... 7

El halo infinito de la química: los hongos del suelo y los ciclos biogeoquímicos

Carolina Casillas, Laura Espinosa Asuar y Patricia Vélez 11

Ácaros del suelo y bacterias: amigos inseparables

Daniel Isaac Sánchez Chávez 17

Una microscópica mirada a los suelos de los ecosistemas tropicales

América Baleón-Sepúlveda..... 20

Pandemia - Lecciones en retrospectiva desde el 2050

Fritjof Capra y Hazel Henderson; traducción Rodrigo García-Herrera..... 24

¿Cómo podemos ayudar a conservar la vida?

David Brailovsky Signoret 29

El suelo, la última frontera

Clementina Equihua Z. y Luis E. Eguiarte

Recientemente el conocimiento de los seres vivos de nuestro planeta ha avanzado a pasos agigantados, en particular desde hace unos 20 años, cuando se implementaron los diferentes métodos de la llamada “ecología molecular”, donde se extrae y se analiza el ADN de diferentes muestras ambientales. Así, se ha encontrado una diversidad inimaginada previamente de microorganismos y virus, incluyendo grupos antes desconocidos de arqueas y bacterias. Ahora vemos constantemente nuevos reportes sobre los microbiomas de la piel y del intestino en diferentes tipos de animales y en toda clase de tejidos en plantas, y se habla de cómo los microbios ayudan y/o afectan —o cuando menos se correlacionan— con la ecología de los macro-organismos. Incluso en el caso de humanos y otros animales se ha propuesto al microbioma como la causa —o un síntoma— de muchas enfermedades y padecimientos, incluyendo conductas y diversos aspectos de salud mental.

Pero lo más notable ha sido el descubrimiento de una increíble diversidad de microorganismos en el suelo que se detectó desde los primeros análisis de ADN ambiental, hasta los detallados estudios metagenómicos más recientes, en donde se pretende analizar el genoma de todos los organismos de una muestra ambiental. Hasta hace relativamente poco se comprobó que el suelo es el ambiente con mayor diversidad de microorganismos en nuestro planeta, y que muchos de ellos son muy poco comunes y no sabemos lo que hacen, ni su papel ecológico, constituyendo la llamada “materia oscura”, o *dark matter*, de los ecosistemas.

Para los ecólogos, el suelo ha sido generalmente un aspecto olvidado o relegado, ya que lo pisamos cuando vamos al campo, pero no lo vemos... aunque algunos científicos nos recuerdan todo el tiempo que las raíces de las plantas representan una buena parte de su biomasa, que son complejas y dinámicas, y que mucha de la distribución geográfica de las plantas se debe al tipo del suelo. Pero para muchos ecólogos es muy fácil olvidarse de lo que no vemos, y nos concentramos en lo que podemos ver y tocar sin escavar: medir troncos, contar hojas, ver flores, polinizadores y herbívoros y quizá sin querer, evitamos pensar en el suelo como parte esencial del ecosistema. En el suelo no sólo hay microorganismos de vida libre, sino que hay muchos microbios asociados a las raíces que son críticos para la sobrevivencia de la planta, porque mejoran o permiten el acceso a ciertos nutrientes e inclusive porque funcionan como un sistema de comunicación entre raíces que coexisten y que parecen cooperar en el suelo.

En el suelo no sólo hay arqueas y bacterias; también tenemos todo tipo de hongos que pueden ser vitales para que la planta pueda adquirir nutrientes como el fósforo, pero que al mismo tiempo pueden provocar o ayudar a combatir enfermedades. Hay que agregar a esta diversidad una plétora de animales microscópicos que interactúan en el suelo con las raíces y con los otros microorganismos, depredan bacterias o, fragmentan la materia orgánica, ayudando así a su descomposición. Estos pequeños animales van desde protistas hasta microartrópodos, pasando por muchos tipos de invertebrados (lombrices y nematodos, por ejemplo) así como ciertos vertebrados pequeños que, al moverse en el suelo, facilitan las interacciones biológicas que ahí ocurren y ayudan a mantener su estructura funcional.

Aunque siempre pensamos en cosas épicas como “la última frontera”, como conquistar el espacio (que realmente no lo es para la biología, donde solo tenemos especulaciones, que esperamos discutir en un futuro número de *Oikos*=), y el mar que sí, es muy basto e inexplorado, pero usualmente, aunque diverso, no se compara con la diversidad del suelo, y menos con su heterogeneidad. En otras palabras, de los estudios que se han realizado se ha visto que casi todas las muestras marinas del mundo son muy parecidas entre sí, y sí, tal vez no hayamos visitado muchas trincheras marinas, pero, aunque de muy difícil acceso, son básicamente desiertos pobres en vida. El suelo, que la mayoría de la gente percibe como sucio y parecería mucho menos épico, romántico y remoto, es la base de la ecología de todos los ecosistemas terrestres. También del suelo depende la mayor parte de los alimentos que cultivamos en todo el mundo. Aún así el suelo es un ambiente subvalorado y subexplorado pero que al mismo tiempo representa el ambiente más diverso del planeta.

Por otro lado, el suelo se pierde y se degrada debido a los problemas de deforestación y mal manejo agrícola, constituyendo uno de los principales problemas ambientales del mundo. Los nutrientes del suelo, en particular el nitrógeno y el fósforo, son las principales limitantes de la productividad de los suelos. En México, en general, tenemos graves problemas de deficiencia de nutrientes en el suelo debido a que la mayoría de sus suelos son jóvenes, es decir que cuentan con poca materia orgánica y por lo tanto, la falta de nutrientes esenciales limita el crecimiento de todas las plantas de esos ecosistemas. No olvidemos tampoco la contaminación generada por el uso excesivo de agroquímicos,

ya que representa otro de los grandes problemas ambientales que atentan contra el funcionamiento no solamente de los sitios en donde se aplican, sino que también de los mares, ríos y lagos, a donde llegan los desechos de todo el planeta. Mantener la salud y productividad de los grandes cuerpos de agua es garantía de la sobrevivencia misma de la humanidad. Y desde el siglo XIX sabemos que hay microbios útiles e importantes para la agricultura, ya que nos pueden ayudar tanto a fijar nitrógeno como a hacer más disponible y eficiente la captura y el uso de fósforo, por ejemplo. En este momento se convierte en una prioridad impulsar prácticas sustentables que promuevan los suelos sanos.

Por ser la última frontera de la ecología y un vasto reservorio de organismos, de genes y de interacciones poblacionales, en este número de *Oikos=* presentamos una colección de artículos que tratan sobre diferentes aspectos de la ecología del suelo. Así, las estudiantes Joselin D. Morales-Moreno y Verónica M. Rodríguez-Sánchez junto con Rocío Cruz-Ortega, investigadora de nuestro Instituto, nos platican sobre la compleja interacción entre el aluminio del suelo y las plantas, y como la acidez del mismo afecta la solubilidad de este elemento y los efectos tóxicos que tiene en las plantas. Nos detallan cómo el trigo sarraceno, un organismo modelo, interactúa y puede lidiar con este elemento, tan común en suelos tropicales.

Un grupo fundamental de organismos del suelo con formas tanto micro como macroscópicas son los hongos, que con sus complejas características bioquímicas pueden degradar y mover muchos nutrientes, y al mismo tiempo, producir todo tipo de compuestos para competir o para coexistir con otros organismos. Carolina Casillas y Patricia Vélez del Instituto de Biología de la UNAM, junto con Laura Espinosa Asuar de nuestro Instituto, nos dan una perspectiva global de su importancia a lo largo de la historia de la vida en la Tierra. También nos cuentan sobre su crucial papel en los ciclos biogeoquímicos y de sus complejas interacciones, particularmente con plantas, resaltando así la relevancia ecológica de los hongos en todos los ecosistemas de la Tierra.

Como mencionamos, la hiperdiversidad del suelo que los científicos de todo el mundo están describiendo no se debe solamente a hongos y microbios, ya que también hay diferentes y diversos grupos de animales. Daniel Isaac Sánchez Chávez, del posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM nos platica de un grupo poco estudiado, los micro -ácaros del suelo, y cómo sus bacterias endosimbióticas les permiten degradar una serie de compuestos

del suelo, de los que se alimentan, y como gracias a esta simbiosis juegan un papel importante en el reciclaje de la materia orgánica, contribuyendo así a poner a disposición de otros organismos una serie de nutrientes que de otra manera les sería difícil de obtener.

Para terminar esta colección de artículos sobre las nuevas fronteras en la ecología del suelo, América Baleón Sepúlveda, también estudiante del posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, nos platica sobre la relevancia de los organismos microscópicos en la dinámica y ecología de las selvas tropicales, abarcando desde las arqueas y bacterias a hongos, algas, protistas, microartrópodos y otros animales. En su artículo, América describe el papel biológico de estos organismos en el suelo para la regeneración y conservación de las selvas, así como los factores que a su vez, afectan estas poblaciones de organismos microscópicos y recalando que urge realizar investigación al respecto a diferentes niveles.

Además, en este número incluimos dos artículos relevantes para la salud ambiental. Gracias a las gestiones y la traducción de Rodrigo García Herrera de nuestro Instituto, Fritjof Capra y Hazel Henderson nos exponen una interesante perspectiva narrada en el futuro, en el año 2050, sobre los cambios que representan esta pandemia para la ecología, el medio ambiente y las sociedades humanas. Fritjof Capra es un conocido intelectual, director fundador del Center for Ecoliteracy de Berkeley, California. Sólo debemos señalar que no estamos de acuerdo cuando mencionan a los murciélagos como el origen de la pandemia de COVID-19, ya que la información es insuficiente en este momento y seguramente entender el origen de esta pandemia es mucho más complicado; en otras palabras: “*los murciélagos no tienen la culpa*” como ha señalado incansablemente Rodrigo Medellín, investigador de nuestro Instituto (recomendamos complementar la lectura del artículo de Fritjof Capra y Hazel Henderson con Murciélagos y SARS-COV2: preguntas y respuestas, en nuestro anterior *Oikos=*).

Por otra parte, David Brailovsky Signoret, un biólogo independiente, asesor de diversos proyectos ambientales, nos habla de forma concisa de las múltiples problemáticas ambientales en el mundo y da una serie de recomendaciones para reducir nuestro impacto ambiental.

Por último, queremos felicitar a nuestra nueva directora, la Dra. Ana Escalante y agradecer al Dr. Constantino Macías por todo su apoyo en los últimos cuatro años al proyecto editorial que representa *Oikos=* y les pedimos a los lectores que hagan un esfuerzo y se queden en casa, mientras esperamos las vacunas.

Un vecino voluble: plantas y aluminio en el suelo

Joselin D. Morales-Moreno, Verónica M. Rodríguez-Sánchez y Rocío Cruz-Ortega.

El aluminio (AL) es el [tercer elemento químico más abundante en la corteza terrestre](#). Este elemento generalmente se encuentra unido con otros como por ejemplo silicio, oxígeno, calcio, etcétera, formando diferentes minerales que son parte del suelo. Es importante señalar que el aluminio es un elemento voluble ante los cambios de pH en el suelo ([para conocer más](#)). Cuando el pH del suelo disminuye o se acidifica, se dice que los suelos son ácidos. En estos el aluminio deja de ser parte de los minerales, debido a que el exceso de acidez provoca que se disuelva en la solución del suelo y forme cationes de aluminio (AL^{3+}). Entonces, si el aluminio se encuentra disuelto en el suelo, las plantas lo pueden absorber por sus raíces, y como este elemento no es un nutriente, es tóxico para la mayoría de las plantas.

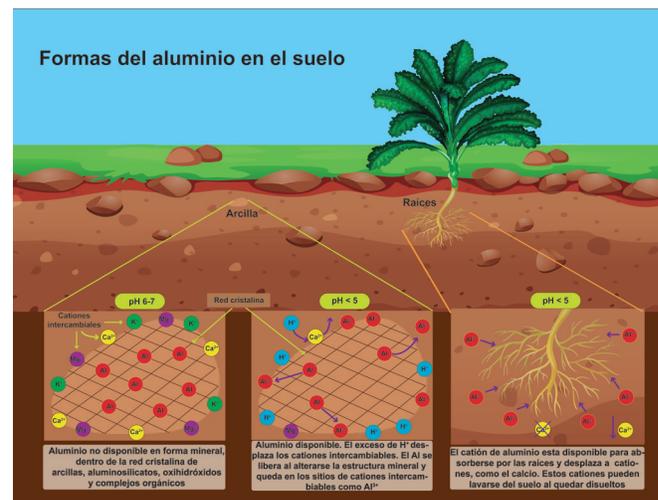
Aluminio en un suelo ácido

La problemática de los suelos ácidos ha ido en aumento en todo el mundo, principalmente por la creciente demanda en la agricultura, lo que lleva al uso desmedido de fertilizantes que favorecen la acidificación del suelo, lo que a su vez origina altas tasas de extracción de nutrientes. Esto ocasiona que el crecimiento, y por lo tanto, la productividad de los cultivos disminuya con el tiempo, lo cual representa un grave problema ecológico al aumentar la demanda de suelo para la agricultura. En el mundo, aproximadamente, el 30% de la superficie agrícola y el 50% de la superficie arable comprende suelos ácidos, y de esta última cifra, el 41% está en nuestro continente. Por el creciente incremento de los suelos ácidos, y como consecuencia el aumento en la abundancia de cationes de aluminio (AL^{3+}), la forma tóxica del elemento, es importante realizar estudios sobre sus efectos tóxicos en las plantas.

Algo importante que ocurre en los suelos ácidos, es que el aluminio desplaza o sustituye a otros elementos que son indispensables como nutrientes, los cuales al igual que el aluminio en su forma catiónica (AL^{3+}), también tienen carga positiva. Algunos ejemplos son el calcio (CA^{2+}), el magnesio (MG^{2+}) y el potasio (K^{+}). En estas condiciones, lo único que pueden absorber las plantas es el aluminio, y por lo tanto, muestran síntomas de deficiencia de nutrientes. Es decir, cuando las plantas absorben el aluminio por las raíces, éste inhibe de manera severa su crecimiento. Pero esto solo es el reflejo de los cambios que provoca el aluminio en las funciones metabólicas de la planta, principalmente en la raíz, ya que es el primer órgano que tiene contacto directo con este metal.

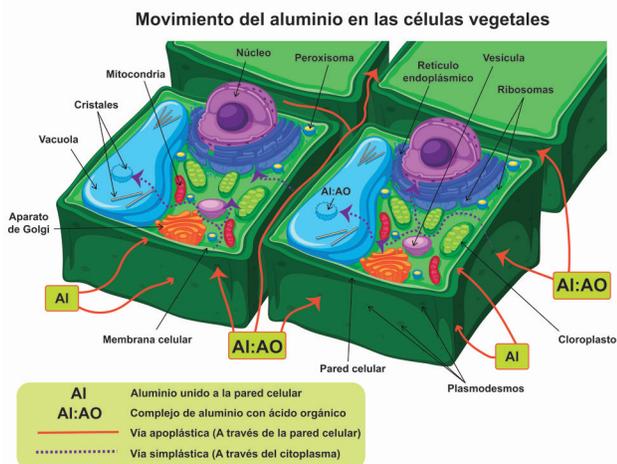
Además de inhibir el crecimiento longitudinal de la raíz, el aluminio las deforma, haciendo a las raíces pequeñas y muy gruesas, lo que además disminuye su capacidad de absorber el agua y los pocos nutrientes disueltos en los suelos ácidos.

En la rizosfera, el 95% del aluminio asociado a las raíces de las plantas se encuentra entre la pared celular y el apoplasto de las células epidérmicas de la raíz. Desde la perspectiva molecular, se ha propuesto que el aluminio se puede absorber a través de los canales por donde se mueve el calcio en su forma CA^{2+} , debido a que ambos elementos son de carga positiva y de diámetro similar; además de que el aluminio puede desplazar al calcio de la pared celular y de la membrana plasmática. Cuando el aluminio sustituye al calcio, la pared celular se hace rígida y se alteran sus funciones de alargamiento o elongación, que son necesarias para el desarrollo de la célula. En la membrana plasmática, el aluminio inhibe la actividad de enzimas tan importantes como la bomba de protones denominada H^{+} -ATPASA. Estas enzimas controlan, como su nombre lo indica, el flujo de los protones (H^{+}), y por lo tanto alteran el valor del pH afuera y adentro de la célula, así como la absorción activa de los nutrientes responsables del desarrollo celular.



Formas del aluminio en el suelo. El aluminio no disponible, es el que se encuentra dentro de los minerales. El aluminio intercambiable y soluble es tóxico para la mayoría de las plantas.

Esta figura se obtuvo a partir de imágenes modificadas de [brgfx](#)



Movimiento del aluminio dentro de las células vegetales. El aluminio sigue dos vías de transporte: por la vía apoplástica (línea anaranjada), el aluminio se mueve entre las células por la pared celular, y puede ingresar a las células vía los plasmodesmos de la pared celular. Por la vía simplástica (línea punteada morada) el aluminio ingresa al citoplasma y se mueve hacia los distintos organelos de la célula.

Esta figura se obtuvo a partir de imágenes modificadas de [brgfx](#)

Cuando el aluminio está en el citoplasma de una célula, interfiere con la regulación o concentración de los iones de hidrógeno (H^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), provocando alteraciones en el funcionamiento de organelos celulares como las mitocondrias y los cloroplastos. Las alteraciones son principalmente, en la cadena de electrones, dando como resultado el aumento en el número de moléculas altamente reactivas, denominadas especies reactivas de oxígeno (ERO), las cuales pueden causar daños irreversibles a las proteínas e incluso al material genético de las células de las plantas.

Por otro lado, una respuesta de la raíz ante la presencia de aluminio, es que las células de la epidermis pueden producir un polisacárido o azúcar de cadena larga, conocido como calosa, que se acumula en el espacio intercelular (apoplasto) que existe entre las células de las raíces. Esta acumulación de calosa, es un intento de las células vegetales para impedir que el aluminio ingrese a los tejidos.

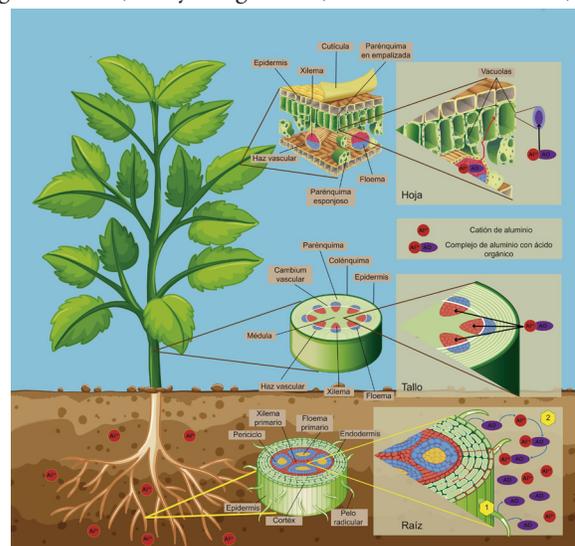
Tolerancia de las plantas al aluminio

La mayoría de las plantas son sensibles al efecto tóxico del aluminio, pero hay algunas especies que han adquirido mecanismos de tolerancia. Existen en las plantas tres mecanismos para excluir o evitar la entrada de aluminio a sus tejidos. Uno es el aumento del pH en la rizósfera, otro es por la producción de mucílago, y el tercero es por la exudación de ácidos orgánicos (AO) o compuestos químicos, como los fenoles (un ejemplo de fenoles es el resveratrol que se encuentra en la piel de las uvas y, en algunas variedades, en las semillas), cuyas moléculas atrapan o, mejor dicho, secuestran al aluminio.

Algunas especies que disminuyen la acidez de la rizósfera aumentando el pH por medio de producir exudados de diferentes tipos son: el trigo (*Triticum aestivum*), el arroz (*Oryza sativa*) y los maíces híbridos (*Zea mays*), así como la planta mutante y modelo de laboratorio *Arabidopsis alr-104* (*Arabidopsis thaliana*). Entre las que exudan ácidos orgánicos para secuestrar al aluminio e impedir que entre a las raíces están el trigo, el maíz y el frijol común (*Phaseolus vulgaris*), las cuales son ejemplos de plantas que liberan ácido málico y/o cítrico. Ejemplos de plantas que liberan ácido oxálico son la acederilla (*Rumex acetosella*), la planta del té (*Camellia sinensis*) y el trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*).

Por otra parte, existe el mecanismo de secuestro del aluminio, que sucede cuando este metal forma un complejo con un ácido orgánico e ingresa a la raíz, se transporta por el apoplasto o espacio entre las paredes celulares, hasta el simplasto o citoplasma de las células, para almacenarse en las vacuolas. En éste organelo el aluminio continúa formando un complejo con el citrato, malato u oxalato.

Existen plantas llamadas acumuladoras que pueden aprovechar este mecanismo de secuestro y acumular el aluminio en las partes aéreas (principalmente en las hojas), es decir, el aluminio se transporta a través del xilema del tallo hasta las hojas, donde se almacena en las vacuolas. Existen alrededor de 100 especies con estas características dentro de 30 familias, entre las que se encuentran las Asteraceae (familia de la margarita), Euphorbiaceae (familia de la nochebuena), Melastomataceae (familia de la Tibouchina), Rubiaceae (familia del café), Polygonaceae (familia del trigo sarraceno) e Hydrangeaceae (familia de las hortensias). Un



Mecanismos de exclusión y acumulación del aluminio en las plantas. En la raíz: 1) Se liberan ácidos orgánicos, 2) los ácidos orgánicos se unen con el aluminio e ingresan dentro de la raíz. El complejo de Aluminio - Ácido Orgánico se mueve por las dos vías de transporte (apoplasto y simplasto). El aluminio puede quedarse en la pared celular o en las vacuolas de todos los tejidos de la raíz. En el tallo, el complejo de aluminio-Ácido Orgánico se transporta por el xilema hasta llegar a las hojas. En la hoja, el complejo de Aluminio-Ácido Orgánico sale del xilema y se mueve por el interior de las células hasta las células del parénquima en empalizada, donde el aluminio es almacenado en las vacuolas. Figura modificada de Shen et al., (2002) y Klung y Horst, (2010).

Para obtener la figura se modificaron imágenes de [brgfx](#)

tal *Botany*, también identificamos a nivel molecular, un posible transportador de aluminio, nombrado FEALS³, cuyos niveles de transcripción (aumento en la síntesis del ácido ribonucleico o ARN) eran mayores con relación al aumento del ABA. Este estudio mostró que ésta fitohormona (ABA), la cual está involucrada en la respuesta y la adaptación a factores de estrés (como por ejemplo el estrés hídrico o sequía), también puede jugar un papel en inducir los mecanismos de defensa contra el aluminio, como por ejemplo exudar ácido oxálico en la etapa de plántula.

Recientemente, en [un estudio que publicamos](#) en la revista *Plant Physiology and Biochemistry* demostramos que durante las primeras horas de exposición a aluminio, se incrementa la actividad de las enzimas antioxidantes como la catalasa, la glutatión reductasa y las ascorbato peroxidasa, las cuales están encargadas de remover a las ERO, que como mencionamos, son producidas por el efecto tóxico del aluminio.

Asimismo, Alma Y. Martínez Rendón, como parte de [su proyecto de maestría](#) en nuestro laboratorio, comprobó que la planta del trigo sarraceno expuesta al aluminio, puede sobreponer la inhibición radicular de las primeras etapas, y recuperar totalmente su crecimiento durante todo su ciclo de vida, sin mostrar efectos adversos por su toxicidad.

Conclusión

Considerando que la acidificación de los suelos es un proceso que avanza rápidamente y que representa una disminución de las tierras cultivables en todo el mundo, las investigaciones relacionadas con el estudio de los mecanismos de defensa, detoxificación y acumulación en las plantas tolerantes, son necesarias para identificar o proponer cultivos alternos que puedan crecer en condiciones de toxicidad por aluminio, sin causar efectos dañinos a la salud humana y animal.

Para saber más

- Bojórquez-Quintal E., Escalante-Magaña C., Echevarría-Machado I. y Martínez-Estévez M. (2017). Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. *Frontiers in Plant Science*. 8:1767.
- Carreño, A., Chaparro-Giraldo, A. (2013). Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Universitas Scientiarum* 18: 283-310.
- Imadi, S.R., S. Waseem, A.G. Kazi, M.M. Azooz, P. Ahmad. (2016). Chapter 1. Aluminum Toxicity in Plants: An Overview. Editor(s): P. Ahmad. *Plant Metal Interaction*. Elsevier. Pages 1-20.
- Schreiber H. 2014. Curious Chemistry Guides Hydrangea Colors. *American Scientist* 102: 44. <http://bit.ly/3HjwL7M>

Joselin Damaris Morales-Moreno. Egresada de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Servicio social y tesista en el Laboratorio de Alelopatía del Instituto de Ecología, UNAM.

Verónica M. Rodríguez-Sánchez. Estudiante de doctorado del Laboratorio de Alelopatía del Instituto de Ecología UNAM. Actualmente se encuentra estudiando los sitios de acumulación del Al en *Fagopyrum esculentum*.

Rocío Cruz-Ortega. Investigador Titular en el Departamento de Ecología Funcional del Instituto de Ecología, UNAM. Sus líneas de investigación incluyen la respuesta al estrés en las plantas, con énfasis en los mecanismos de tolerancia a metales.

El halo infinito de la química: los hongos del suelo y los ciclos biogeoquímicos

Carolina Casillas, Laura Espinosa Asuar y Patricia Vélez

Los ciclos biogeoquímicos que suceden en la Tierra son una serie de procesos que vinculan a los organismos con los elementos químicos más importantes para la vida. Es por ello, que el entender los mecanismos por los cuales estos elementos peregrinan en ciclos más allá de nuestra percepción, es de utilidad para comprender el funcionamiento de nuestro planeta.

Después de la “gran explosión” que ocurrió hace aproximadamente 13,800 millones de años (M.A.), se originó el Universo. Los primeros átomos que se formaron, fueron los del hidrógeno (H) y los del helio (HE). Transcurridos unos 550 millones de años más, surgió la primera generación de estrellas. Después de un tiempo, estrellas súper masivas de vida corta generaron altas presiones y temperaturas extremas, lo que hizo que estallaran como supernovas. Esto, dio lugar a la [formación de sistemas estelares](#) donde elementos básicos tales como el carbono (C), el oxígeno (O), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S) ya se encontraban presentes. Dentro de estos sistemas estelares se formó nuestro Sistema Solar, y la Tierra, donde la presencia de C, H, O, N, P Y S, representó una pieza clave para el inicio y desarrollo de la vida (ver los artículos sobre el carbono, oxígeno, nitrógeno,

fósforo y azufre en *Oikos=* 16). A pesar de que sólo representan una pequeña porción de la totalidad de elementos químicos que existen en el Universo, estos elementos son los más abundantes.

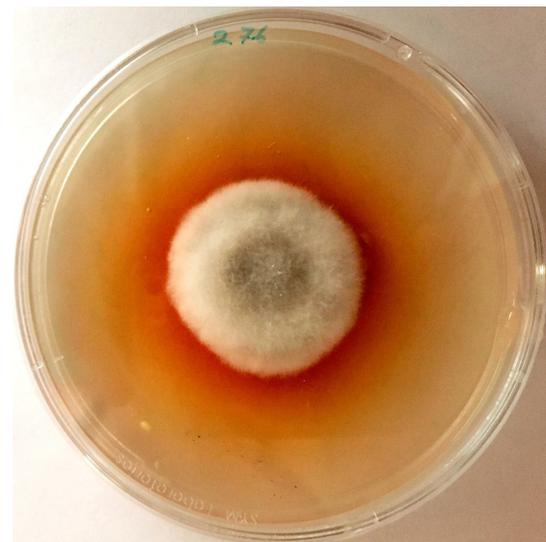
Más allá de los elementos CHONPS, los científicos han identificado a la amplia variedad de elementos químicos que también son importantes para la vida y cuyo papel varía entre los diferentes organismos. Esto es de llamar la atención, ya que la relación existente entre los seres vivos y los elementos químicos está estrechamente vinculada a sus procesos evolutivos y a la historia geológica de nuestro planeta. Es por ello que estudiar todos los elementos químicos relacionados con la vida es de gran interés para la ciencia, ya que ayuda a comprender cómo se transforma e intercambia la energía y la materia entre los organismos vivos y su ambiente (ver sobre los ciclos biogeoquímicos en *Oikos=* 16).

Los elementos químicos se unen entre sí por medio de enlaces que requieren de una gran cantidad de energía para formarse y, a su vez, los compuestos químicos que forman se descomponen en moléculas más simples mediante la ruptura de estos enlaces, liberando mucha energía durante el proceso. En suma, la energía que se mueve durante todas estas reacciones aporta estructura y funcionalidad a los organismos vivos.

ELEMENTOS QUÍMICOS QUE CONFORMAN LA VIDA

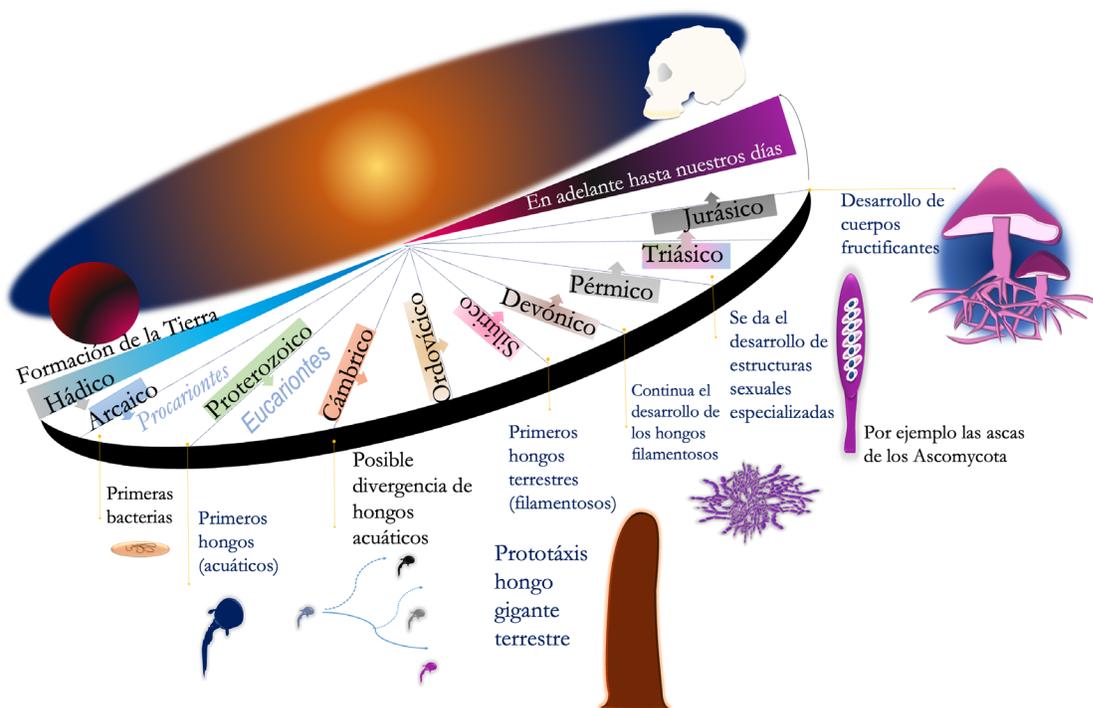
<p>PRIMER NIVEL Esenciales para la vida Son los más abundantes y están presentes en todos los organismos</p>	<table border="1"> <tr> <td>C Carbono</td> <td>H Hidrógeno</td> <td>O Oxígeno</td> <td>N Nitrógeno</td> </tr> </table>	C Carbono	H Hidrógeno	O Oxígeno	N Nitrógeno								
C Carbono	H Hidrógeno	O Oxígeno	N Nitrógeno										
<p>SEGUNDO NIVEL Menos abundantes pero también están presentes en todos los organismos</p>	<table border="1"> <tr> <td>P Fósforo</td> <td>S Azufre</td> <td>Ca Calcio</td> <td>Mg Magnesio</td> </tr> <tr> <td>Na Sodio</td> <td>Cl Cloro</td> <td>K Potasio</td> <td></td> </tr> </table>	P Fósforo	S Azufre	Ca Calcio	Mg Magnesio	Na Sodio	Cl Cloro	K Potasio					
P Fósforo	S Azufre	Ca Calcio	Mg Magnesio										
Na Sodio	Cl Cloro	K Potasio											
<p>TERCER NIVEL Son necesarios en algunos organismos en cantidades mínimas</p>	<table border="1"> <tr> <td>Cu Cobre</td> <td>Co Cobalto</td> <td>Mn Manganeso</td> </tr> <tr> <td>Zn Zinc</td> <td>Fe Hierro</td> <td></td> </tr> </table>	Cu Cobre	Co Cobalto	Mn Manganeso	Zn Zinc	Fe Hierro							
Cu Cobre	Co Cobalto	Mn Manganeso											
Zn Zinc	Fe Hierro												
<p>CUARTO NIVEL Metales presentes en pequeñas cantidades en todos los organismos</p>	<table border="1"> <tr> <td>Ni Níquel</td> <td>B Boro</td> <td>I Yodo</td> <td>Ga Gallo</td> <td>Br Bromo</td> <td>Mo Molibdeno</td> </tr> <tr> <td>F Flúor</td> <td>Se Selenio</td> <td>Si Silicio</td> <td>Cr Cromo</td> <td>V Vanadio</td> <td>W Wolframio</td> </tr> </table>	Ni Níquel	B Boro	I Yodo	Ga Gallo	Br Bromo	Mo Molibdeno	F Flúor	Se Selenio	Si Silicio	Cr Cromo	V Vanadio	W Wolframio
Ni Níquel	B Boro	I Yodo	Ga Gallo	Br Bromo	Mo Molibdeno								
F Flúor	Se Selenio	Si Silicio	Cr Cromo	V Vanadio	W Wolframio								

Elementos químicos que conforman la vida. Representación por sus niveles de importancia y abundancia en los seres vivos. Imagen modificada de Mathews et al. 2002 Bioquímica. 3ª. Ed. Edit. Pearson, España, pp. 11



Cryptosporiopsis sp. aislado de residuos mineros produciendo un pigmento color naranja intenso. Ejemplar y fotografía cortesía de Andrés López-Reyes





Línea del tiempo indicando la aparición de los hongos en la historia geológica de la Tierra. Imagen modificada de [http://www.davidmoore.org.uk/21st_Century_Guidebook_to_Fungi PLATINUM](http://www.davidmoore.org.uk/21st_Century_Guidebook_to_Fungi_PLATINUM)

En los ecosistemas existen ciertos grupos taxonómicos de microorganismos, que al ser muy abundantes y poseer metabolismos únicos, desempeñan un papel indispensable en los ciclos de nutrientes. Algunos de estos microorganismos son hongos de delicadas hifas, estructuras celulares filamentosas, que llegan a formar halos de colores al observarlos con un microscopio.

Los hongos microscópicos tienen una amplia variedad de formas y estructuras. Pueden ser unicelulares, como algunas levaduras, o que desarrollen hifas, las estructuras filamentosas mencionadas previamente, y que forman un entramado de redes que recibe el nombre de micelio. Debido a su estructura y metabolismo las hifas pueden transportar, por medio del micelio, diferentes compuestos y elementos químicos de un lado a otro, como si fueran una gran vía distribuidora.

Los hongos y los ciclos biogeoquímicos

La aparición de los hongos, o sea del llamado reino Fungi, se remonta al Precámbrico medio y tardío, hace unos 1,430-1,542 millones de años. Sin embargo, no fue hasta el Devónico, hace 419 millones de años, que se diversificaron los principales grupos taxonómicos.

A lo largo de la historia geológica y con base en el registro fósil, sabemos que los hongos siempre han desempeñado un papel crucial en los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas terrestres. Se cree que el establecimiento de asociaciones simbióticas

con las primeras plantas terrestres le permitió a los hongos colonizar estos ambientes a finales del Ordovícico y principios del Devónico, es decir entre 485 y 419 millones de años. Las primeras plantas terrestres parecidas a briofitas, a principios del Devónico (hace 400 millones de años), tenían asociaciones endofíticas que se asemejan a las micorrizas vesiculares-arbusculares (VAM, hablaremos de las micorrizas más adelante) incluso antes de que las raíces evolucionaran. Se ha formulado la hipótesis de que el desarrollo del mutualismo planta-hongo precedió al desarrollo de las raíces, un evento que fue crucial para que las plantas pudieran colonizar la tierra. Lo anterior se sustenta en que las raíces evolucionaron gradualmente a partir de los rizomas proporcionando así hábitats más adecuados para los hongos micorrízicos, y las plantas ganaron ramificaciones complejas que beneficiaron a las hojas en la obtención de agua y nutrientes. También se han formulado hipótesis de que cuando las plantas terrestres colonizaron la tierra, transformaron los hábitats dando lugar a ambientes que pudieron ocupar los hongos como organismos heterótrofos. Es decir, cuando las plantas desarrollaron estructuras como las hojas, troncos y raíces, con compuestos como la cutina y la suberina los hongos los aprovecharon como un sistema protector contra la desecación y la radiación característicos de los ecosistemas terrestres. La cutina y la suberina son compuestos químicos que proveen a la cutícula de las plantas una barrera de protección que reduce la pérdida de agua y difusión de gases. Es muy posible que

este mismo sistema también fuera benéfico para microorganismos descomponedores terrestres. Otras estimaciones, que han utilizado relojes moleculares, sugieren que, gracias a la interacción entre algas y bacterias, ocurrió una colonización anterior, hace alrededor de 600 millones de años.

Posteriormente, durante el Carbonífero (entre 359 millones y 299 millones de años), hubo una gran acumulación de carbono en el suelo, atribuida en gran medida a la poca descomposición de la **lignina**, un polímero que producen las plantas leñosas primitivas. Existen tres posibles explicaciones de esta acumulación:

1. Los hongos de este periodo no habían aún desarrollado por completo mecanismos de degradación eficientes para este tipo de compuestos.
2. A pesar de tener capacidades para degradar la lignina, los hongos no eran lo suficientemente abundantes en los ambientes terrestres como para degradar la gran cantidad de material orgánico disponible.
3. Debido a factores climáticos, como fueron principalmente, las bajas temperaturas que provocaron que los procesos de degradación fueran deficientes.

Por ello, los paleobotánicos consideran que no fue hasta el Pérmico (entre 299 y 251 millones de años), posiblemente debido a la degradación fúngica eficiente de la lignina, principalmente por hongos que pertenecen a la división Basidiomycetes, es cuando se observa la disminución de la acumulación de carbono orgánico en el registro fósil de suelos durante el Carbonífero. De hecho, [estudios sobre la evolución de las vías metabólicas para la degradación de lignina](#), en gran medida restringida a los hongos en las divisiones Basidiomycota y Ascomycota, sostienen que éstas [se originaron entre finales del Carbonífero y principios del Pérmico](#). También es posible que ya existieran algunas bacterias degradadoras de lignina que intervinieran en el proceso, ya que en

algunas de ellas evolucionó la capacidad para utilizar productos liberados de sustratos orgánicos complejos que son el resultado de la actividad de enzimas extracelulares de hongos.

En la actualidad, los hongos siguen influyendo de forma significativa en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos de todos los ecosistemas. Ya sea alimentándose de la materia orgánica en descomposición, los hongos saprobios que adquirieron importantes cantidades de elementos químicos CHONPS, estableciendo relaciones mutualistas en las que se benefician dos o más organismos e involucran el intercambio de nutrientes con otros organismos vivos (hongos simbiotes; ver "Ácaros del suelo y bacterias: amigos inseparables" *Oikos= 25*) o como parásitos, que se nutren consumiendo partes de otros organismos vivos y, en casos extremos, provocándoles la muerte.

Por otra parte, actualmente algunos hongos representan un alimento para diversos organismos tales como protozoarios, artrópodos, nematodos, bacterias e incluso macroorganismos como el humano. También pueden establecer relaciones de competencia con otros hongos, así como con bacterias y otros microorganismos. Es decir, los hongos son importantes eslabones de las cadenas alimenticias.

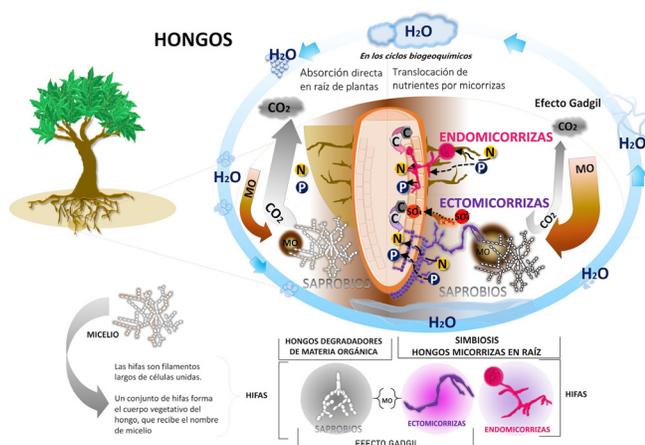
Hongos descomponedores

Los hongos saprobios poseen la habilidad para degradar compuestos ricos en carbono provenientes principalmente de materia vegetal en descomposición, como la hojarasca, la corteza y las ramas que caen al suelo.

Con base en su capacidad de convertir la lignocelulosa, que es un material de origen vegetal, en azúcares simples por vías metabólicas en las que se libera agua (hidrólisis), este gran grupo de hongos se puede dividir en tres categorías: los hongos de la pudrición blanda, los hongos de la pudrición blanca y los hongos de la pudrición marrón de la madera. Durante los procesos de degradación, el carbono obtenido se distribuye en diferentes fracciones: una parte puede ser aprovechada por los mismos hongos, para generar sus propios compuestos y materiales celulares, otra puede ser liberada a la atmósfera en forma de CO_2 , y la última queda disponible en el ambiente al morir estos hongos, integrándose al metabolismo de los organismos que los consuman.

Los hongos saprobios también pueden intervenir en el ciclo del azufre, elemento muy abundante en el medio ambiente desde la formación de la Tierra (ver Azufre: elemento incomprendido de la Tierra, *Oikos=16*). Este elemento es de suma importancia para el desarrollo de todos los seres vivos, ya que llegan a formar parte de algunos de los aminoácidos multifuncionales, indispensables para el metabolismo celular. De hecho, más del 95% del azufre en el suelo se manifiesta como compuestos orgánicos provenientes de residuos biológicos acumulados en el suelo.

Los hongos filamentosos, incluidos algunos del grupo de los Basidiomycota, gracias a la actividad de enzimas especializadas, liberan el azufre de compuestos que lo contienen (por ejemplo ésteres-sulfatos y tioles) en la madera, las raíces y materia orgánica del suelo. Este proceso a menudo es benéfico para las plantas cercanas, ya que la fragmentación de las moléculas grandes, (la



Hongos saprobios y micorrizas (der.) y su relación con los ciclos biogeoquímicos y el efecto Gadgil. Imagen modificada de <http://www.davidmoore.org.uk/21st-Century-Guidebook-to-Fungi-PLATINUM>

Organismo endófito: Bacterias, hongos y algas que habitan dentro de los tejidos vegetales sin causar síntomas de enfermedad (endon: dentro, phyton: planta).

Pudrición blanda de la madera: Causada principalmente por hongos del phylum Ascomycota. Estos organismos degradan la celulosa presente en la pared celular de las plantas, produciendo un reblandecimiento superficial.

Pudrición blanca de la madera: Ocasionada por hongos de los phyla Acomycota y Basidiomycota con la capacidad para degradar y mineralizar la lignina. Como resultado, la madera se decolora tomando un aspecto blanco-pálido en los últimos estadios del proceso de pudrición.

Pudrición marron de la madera: Se genera por hongos del phylum Basidiomycota que descomponen la celulosa y la hemicelulosa, sin afectar severamente la lignina. Debido a esto, la madera adquiere un color pardo oscuro y se cuartea.

despolimerización) facilita que las raíces de las plantas aledañas tomen del suelo los compuestos de azufre más sencillos.

Las levaduras también poseen vías metabólicas implicadas con el ciclo del azufre. Estos hongos diminutos y unicelulares tienen la capacidad de utilizar compuestos orgánicos con ácido sulfónico (SO_3), para impulsar su metabolismo. Sin embargo, también existen casos en los cuales los hongos saprobios no liberan azufre inorgánico al romper algunas moléculas sulfonadas. Por ejemplo, *Phanerochaete chrysosporium* y *Geophyllum trabeum*, son hongos que crecen en madera en descomposición, que sí pueden transformar los sulfonatos pero no liberan el azufre.

Micorrizas

Estos hongos se caracterizan por ser simbioses de las raíces de las plantas y se clasifican en dos grupos principales: las endomicorrizas y las ectomicorrizas. Se estima que más del 80% de las plantas vasculares tienen endomicorrizas, cuya característica es la de penetrar las células de las raíces de las plantas, formando arbuscúlos que son agrupamientos de hifas divididas en pequeñas estructuras elipsoidales. Mientras que las ectomicorrizas crecen en una región parcial del hospedero, sin llegar a penetrar al interior de las células de las raíces, y sólo forman un manto de células rodeando su superficie. Se calcula que aproximadamente el 3% de las plantas vasculares están asociadas a ectomicorrizas. Esta estrecha relación simbiótica es muy antigua y data de hace aproximadamente 460 millones de años.

Ambas clases de micorrizas suelen ser específicas para ciertos grupos de plantas. Su funcionalidad radica en que las hifas de estos hongos micorrízicos se proyectan desde la raíz de las plantas, alcanzando zonas que les son inaccesibles. De esta manera las hifas captan más nutrientes, por ejemplo, nitrógeno y fósforo, que aprovecha la planta hospedera. Por debajo del suelo estas estructuras finas llegan a formar redes de comunicación inmensas, entre hongos, otros microorganismos y plantas cercanas.

Las micorrizas proveen a las plantas con grandes cantidades de nitrógeno y fósforo del suelo, que de otra manera les sería difícil de obtener. Al ser una relación mutualista, las plantas proveen a los hongos con compuestos ricos en carbono. Las formas inorgánicas del fósforo y las formas orgánicas del nitrógeno (como amonio, nitrato y aminoácidos), o minerales llegan a las células de las plantas por transportadores especializados en la membrana de los hongos. En las plantas se estimula su maquinaria metabólica para transportar azúcares que finalmente les llegan a los hongos.

Las micorrizas también intervienen en el ciclo del azufre benéfico para las plantas, ya que sólo pueden adquirirlo a través del ion sulfato. En el suelo este elemento se encuentra en gran medida en formas orgánicas, por lo que los hongos juegan un papel crucial al liberarlo de moléculas complejas facilitando así su acceso a otros organismos. La presencia de las hifas de los hongos también incrementa la toma de azufre, ya que inducen en la raíz de la planta hospedera la expresión de transportadores de sulfato.

Líquenes

Posiblemente los líquenes fueron de los primeros organismos microbioses en colonizar los ambientes terrestres, gracias a que viven como simbioses entre algas verdes (principalmente *Trebouxia*) o cianobacterias (como *Nostoc*) y hongos (tanto filamentosos como levaduras), primordialmente del filo Ascomycota. En el ambiente terrestre, gracias a esta antigua asociación de hace aproximadamente 450 millones de años, surgió la fijación del nitrógeno y la fotosíntesis.

Actualmente, los líquenes están confinados a las llamadas costras biológicas, que son un conjunto de organismos presentes en las partes superficiales de las rocas, corteza de árboles y superficies del suelo. Estos simbioses pueden llegar a dominar alrededor del 8% de los ecosistemas terrestres, como en los árticos, boreales y áridos. Cada uno de sus diminutos integrantes realiza funciones que son indispensables para los demás miembros del ecosistema y en definitiva están ligadas a los ciclos biogeoquímicos. Las hifas, que corresponden al componente fúngico de los líquenes, producen [ácidos orgánicos que aceleran el intemperismo](#) y son capaces de disolver los agregados del suelo. Los agregados del suelo se forman a partir de las partículas más pequeñas que se conjuntan unas con otras y que a menudo provienen del limo, la arcilla y la arena. De esta manera, al ser disueltos los agregados del suelo, se puede aprovechar como nutriente, cada rastro de carbono o de sustancia mineral del ambiente.

Por otra parte, las cianobacterias y las algas, los simbioses fotosintéticos, fijan el carbono a partir del CO_2 que está pre-

sente en la atmósfera, produciendo azúcares y alcoholes, los cuales entre un 70-80% son incorporados al metabolismo del hongo simbiote, incrementando su biomasa y produciendo oxígeno. Particularmente, las cianobacterias tienen la capacidad de fijar el nitrógeno (N_2) atmosférico.

En cuanto al ciclo del azufre, los líquenes lo incorporan a partir de determinados compuestos que pueden estar presentes en la atmósfera como por ejemplo el ácido sulfhídrico. Muchos de los compuestos con azufre que llegan a la atmósfera se [depositan en las superficies en condiciones húmedas y secas](#). Cuando están en condiciones húmedas, se acidifican y pueden incorporarse al ciclo hidrológico, formando parte de la [lluvia ácida](#) y cuando hay condiciones secas, en su estado sólido o gaseoso, pueden formar parte de los flujos cíclicos del viento. En ambos casos llegan finalmente a caer en la litósfera, la hidrósfera y la biósfera, en ésta última los líquenes son un elemento que puede absorber los componentes de azufre. Gracias al entramado que se teje entre las hifas fúngicas y los fotosimbiontes (los microorganismos fotosintéticos que forman el talo), los líquenes hidratados adecuadamente, son capaces de captar el sulfuro de carbonilo (COS).

Los líquenes también pueden captar compuestos de azufre acumulándose en forma de dióxido de azufre. En ocasiones esto afecta a algunas de sus funciones vitales, como puede ser el flujo de nutrientes, sobre todo en la ruta metabólica de carbohidratos. Más hay líquenes que pueden liberar el azufre, al emitir cantidades significativas de compuestos, como por ejemplo el ácido sulfhídrico, a la atmósfera. Esta capacidad de sensibilidad y acumulación en los líquenes es a menudo utilizada como un [indicador de contaminación](#), pues estos compuestos suelen estar en el ambiente debido a que se usan como fungicidas para cultivos.

Hongos, suelo y captura de carbono: el efecto Gadgil

La relación evolutiva entre micorrizas y hongos saprobios es muy estrecha y juegan un papel central en la degradación de la materia orgánica del suelo. De hecho, ambos grupos ecológicos de hongos poseen enzimas especializadas — entre ellas las carbohidrolasas y fosfatasas — que se encargan de desintegrar compuestos complejos para obtener carbono y fósforo. Al explotar el mismo recurso y tener una capacidad metabólica semejante, estos dos tipos de hongos llegan a competir entre sí. A este fenómeno se le llama “[efecto Gadgil](#)” en honor a sus descubridores Ruth y Peter Gadgil.

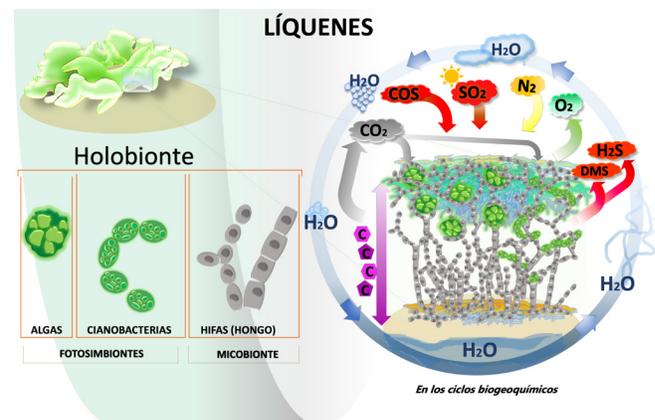
La competencia generada entre hongos saprobios y micorrizas, ocasiona que ambos organismos liberen diversos metabolitos secundarios en el medio para combatir al opuesto. Por ejemplo, ectomicorrizas como *Tuber melanosporum* y *Suillus bovinus* pueden secretar sustancias antibióticas o antifúngicas, así como compuestos volátiles orgánicos (COV) que llegan a reducir o inhibir la actividad o el crecimiento de los hongos saprobios que existan en su área de influencia. Curiosamente, esto conlleva a que se limite el proceso de descomposición de la materia orgánica en el suelo y, por lo tanto, que no se libere el carbono que se queda almacenado de forma indefinida, rompiendo parcialmente el ciclo de este nutriente. Esto repercute también en el ciclo del nitrógeno,

ya que se limita la capacidad de degradación que tienen los saprobios para descomponer materiales ricos en nitrógeno.

De halos de evolución a hifas ambientalistas y la biotecnología

A lo largo de la historia evolutiva de los hongos, estos han adquirido una versatilidad y diferentes estilos de vida, por lo que presentan numerosas estrategias ecológicas ligadas a la adquisición de nutrientes y a tener un papel muy importante dentro de los ciclos biogeoquímicos. Estudiar los procesos asociados a estas estrategias nos permitirán entender mejor su historia evolutiva y su participación en los procesos ecosistémicos a diferentes escalas, en nuestro planeta (ver Biogeoquímica en Cuatro Ciénegas: mundos dentro de mundos y miradas a escala <https://bit.ly/3OAxkZJ>).

El complejo y diverso metabolismo de los hongos y sus relaciones con los ciclos biogeoquímicos brindan grandes oportunidades en las ciencias ambientales, para su uso en la biotecnología y en otras áreas. Algunas transformaciones fúngicas tienen aplicaciones beneficiosas en biotecnología ambiental, por ejemplo, en ambientes que se necesitan recuperar y desintoxicar de metales, así como en la degradación de contaminantes orgánicos que afectan el medio ambiente y a otros organismos vivos. También al entender a los hongos es posible lograr un manejo más integral de los ecosistemas. Hongos saprobios, líquenes, micorrizas y levaduras y sus moléculas, seguirán circulando y evolucionando a través de los ciclos biogeoquímicos de la Tierra.



Líquenes (izq.) y su relación con los ciclos biogeoquímicos. Los líquenes son microorganismos estrechamente asociados (holobiontes), conformados por hongos (micobiontes) y organismos fotosintéticos (fotobiontes), tales como las algas o las cianobacterias. Los líquenes participan de manera importante en los ciclos biogeoquímicos. Imagen modificada de http://www.davidmoore.org.uk/21st_Century_Guidebook_to_Fungi_PLATINUM

Para saber más

- Aguilera, J. A. (2019). El origen de la vida: La aparición de los primeros microorganismos. *RBA Libros*. 114 pp.
- Fernandez, C. W., y Kennedy, P. G. (2016). Revisiting the ‘Gadgil effect’: do interguild fungal interactions control carbon cycling in forest soils? *New phytologist*, 209:1382-1394.
- Marín, C. (2018). Conceptos fundamentales en ecología de hongos del suelo: una propuesta pedagógica y de divulgación. *Boletín Micológico*, 33, 32-56. <http://bit.ly/3VDKPxh>
- Unidad de apoyo para el aprendizaje. (n.d.). Ciclos Biogeoquímicos. <http://bit.ly/3Y2EKMn>

Carolina Casillas. Es estudiante de la maestría del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. Fue becaria del laboratorio C-121 de Micromicetes en el Instituto de Biología, UNAM. Tiene interés en la ecología de la restauración, los sistemas complejos, las ciencias ambientales y los ciclos biogeoquímicos.

Laura Espinosa Asuar. Fue editora asociada de *Oikos=*. Realizó estudios de licenciatura y posgrado en Ciencias Biomédicas, UNAM. Actualmente trabaja en el Instituto de Ecología de la misma universidad. Su área de investigación es la ecología de comunidades microbianas. Se involucra en la divulgación de la ciencia impartiendo múltiples conferencias y publicando artículos.

Patricia Vélez. Es investigadora de Tiempo Completo y está a cargo del laboratorio C-121 de Micromicetes en el Instituto de Biología, UNAM. Estudia la ecología evolutiva y genética de la conservación de hongos microscópicos que habitan en ambientes amenazados de México.

Ácaros del suelo y bacterias: amigos inseparables

Daniel Isaac Sánchez Chávez

Imaginemos un mundo donde las hojas, los frutos y las flores que caen al suelo de cualquier bosque, selva y pradera permanecieran sin degradarse, acumulándose a montones, al igual que los animales muertos intactos. ¿Qué pasaría? ¿Cómo nos afectaría? Es difícil imaginarse los efectos de manera directa, pero habría muchísimos problemas.

Pongamos un ejemplo: supongamos que tienes mucha hambre y tu comida favorita, por alguna extraña razón, está dentro de una alacena cerrada con llave. Sabes que está ahí, pero sin una llave no se puede tener acceso a ella y morirías de hambre esperando a que la puerta se abriera milagrosamente o a menos que busques la llave para hacerlo. Eso es lo que pasaría si los restos de plantas y animales se acumularan en el suelo y no se pudieran descomponer. Los nutrientes que están ahí, atrapados en esos restos, no podrían ser accesibles para que otros organismos, como las bacterias, los hongos, los artrópodos e incluso las mismas plantas los pudieran utilizar. Entonces sus poblaciones irían disminuyendo y tal vez desaparecerían por falta de nutrientes.

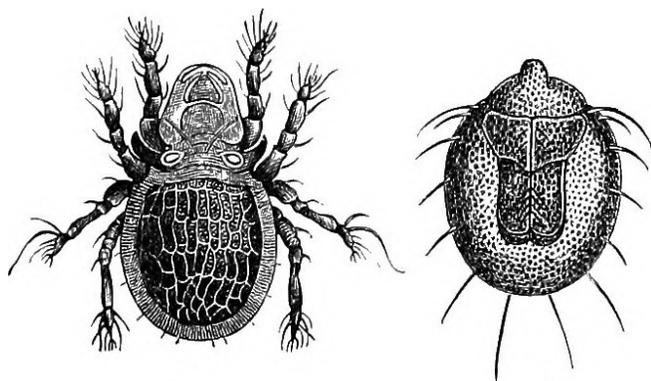
Afortunadamente, el suelo posee la llave para tener acceso a los nutrientes que están contenidos en los restos de plantas y ani-

males. De hecho, existen dos vías para llegar a ellos. La primera consta de lo que voy a llamar un juego de gonzúas para abrir la puerta y, aunque este método es el más lento, garantiza el acceso a ellos a largo plazo. Este proceso se da por diversos elementos ambientales como la radiación solar, el viento o la lluvia, que van fragmentando todo el material que fue depositado. Sin embargo, debido a su lentitud, puesto que dependen del ambiente, se aprovecha una segunda llave, siempre y cuando exista: los artrópodos y otros animales que viven en el suelo y que desmenuzan la hojarasca, es decir los restos de hojas y otras partes de las plantas, facilitando así su colonización por microorganismos como hongos y bacterias y posteriormente su descomposición.

Dentro de la gran diversidad de artrópodos que viven en este medio existe un grupo dominante en muchos tipos de suelo y que juega un papel muy relevante en el reciclaje de los nutrientes. Estos microartrópodos, son ácaros diferentes a los que viven en nuestra cama, en nuestra piel y que se alimentan de nuestras células muertas, de la grasa que producimos a través de nuestros poros o de otros desechos. La importancia de los ácaros que viven en el suelo no solo radica en el hecho de que parti-



Ácaro orbátido en la familia Euphthiracaridae family.
Fotografía: Andy Murray del *German Centre for Integrative Biodiversity Research Halle-Jena-Leipzig*



Los ácaros del suelo en el orden Oribatida viven en el suelo. Parecen pequeños escarabajos, apariencia que obtienen por la dureza de sus integumentos. Estos pequeños ácaros se alimentan de vegetales y se encuentran en madera muerta o restos vegetales, debajo de la corteza o entre musgos y líquenes.

Imagen: *The Cambridge natural history*, digitalizada por la Universidad de Cornell, EUA.

cipan en el desmenuzamiento de la hojarasca y así les facilitan a otros microorganismos —principalmente hongos y bacterias—, su función descomponedora, sino también en la relación que se establece entre los ácaros y su potencial alimento, generando una red trófica compleja. Así, se han observado ácaros consumiendo una gran variedad de alimentos como hojas, troncos y raíces de plantas muertas, hongos, bacterias, algas, polen, líquenes, musgos, otros microartrópodos, como algunos colémbolos, e inclusive larvas de pequeños insectos.

Sin embargo, los ácaros no serían capaces de consumir y utilizar toda esta materia orgánica sin la ayuda de unos organismos que viven en su interior que incluyen protozoos, hongos y principalmente bacterias, y son los encargados de proporcionar al ácaro las enzimas necesarias para degradar el alimento ingerido y de este modo adquirir nutrientes y producir energía. Los ácaros dependen de estos microorganismos llamados endosimbiontes para poder sobrevivir.

Vida de endosimbionte

¿Y qué beneficio obtienen los endosimbiontes de los ácaros? Bueno, además de utilizar el alimento que ingiere el ácaro, los endosimbiontes, como lo dice el vocablo endo, viven en el interior del organismo, un lugar menos estresante, en donde las condiciones son óptimas para su desarrollo, lejos de depredadores.

Dentro de cada especie de ácaro habitan especies diferentes de endosimbiontes, cada una de estas especies puede producir las enzimas necesarias para degradar un alimento en particular, así, los ácaros pueden aprovechar distintos nutrientes incluso de la misma fuente. Por ejemplo, los [endosimbiontes de los animales rumiantes](#) les ayudan a degradar y generar distintos nutrimentos necesarios para su crecimiento y desarrollo, a partir de la celulosa, componente estructural de las plantas. Por otro lado, nosotros somos capaces de consumir alimentos que un rumiante no puede

asimilar, y lo podemos hacer, entre otros factores, por la presencia de los diferentes endosimbiontes que viven en nuestro tracto digestivo y nos permiten aprovechar distintos recursos.

Vida de ácaro en el suelo

Regresando a los ácaros del suelo, en 2010 [Jaroslav Smrř y Vlasta Čatská](#) de la Universidad de Charles en la República Checa, observaron que *Tyrophagus putrescentiae*, un ácaro que vive en todo el mundo, era capaz de consumir diferentes especies de hongo, cada una con un arreglo molecular distinto en su pared celular. La pared celular de los hongos está hecha de quitina, entre otras moléculas. La quitina es un azúcar que también forma parte del exoesqueleto de los artrópodos, y que le brinda soporte a dicha estructura. Sin embargo, existen muchos tipos de quitina, todas ellas están compuestas por la misma molécula, pero con ligeras modificaciones en su estructura molecular: sería como las piezas de lego de distintos colores que se usan para construir una misma casa. Volviendo al estudio de los científicos checos, ellos observaron que los ácaros podían degradar los diferentes tipos de quitina gracias a sus endosimbiontes, ya que cada uno era capaz de degradar específicamente una molécula, en este caso la quitina. Por lo tanto, concluyeron que la capacidad de un ácaro de alimentarse de un hongo en particular depende de la presencia del endosimbionte que pueda degradar la quitina que contiene su pared celular.

Esto también pasa con la capacidad de los ácaros para desmenuzar un tipo de hojarasca en particular. En [The effect of microarthropods on litter decomposition depends on litter quality](#) de Veronika Gergőcsa y Levente Hufnagelb de la Academia de Ciencias de Hungría observaron que el tipo de hojarasca que consumen los ácaros va a determinar el tipo de endosimbionte que formará parte de su microbioma. Vieron que una de las primeras variables son las condiciones bajo las cuales caen las hojas ya que no siempre son las mismas. Es decir, puede ser que unas caigan cuando ya están marchitas, mientras que otras caen cuando todavía están verdes. Otra variable son las características de la celulosa. Ésta, al igual que la quitina, posee arreglos moleculares diferentes dependiendo de la planta o la edad de la hoja. Además, observaron que algunos ácaros se alimentan de hojarasca en distintos grados de descomposición y algunas hojas ya pueden tener bacterias y

Cadena trófica: Cualquier organismo necesita de alimento para sobrevivir. Una cadena trófica describe quién se come a quién en el medio silvestre e implica el trayecto de energía y nutrientes en un ecosistema. El proceso de transferencia de energía y nutrientes se relaciona con las redes de alimentación (o redes tróficas).

Exosqueleto: Estructura rígida y articulada que rodea y protege el tejido suave de los artrópodos.

hongos que consumen al mismo tiempo. Al principio se pensaba que, en este último caso, la presencia de bacterias y hongos hacía que la hojarasca fuera más fácil de digerir puesto que había un avance en el estado de descomposición. Sin embargo, los mismos investigadores demostraron que los ácaros prefieren esta hojarasca y que los microorganismos pasan a formar parte de su comunidad endosimbiótica.

Por otra parte, se ha observado que el tipo y abundancia de endosimbiontes no es la misma entre los individuos ni entre las diferentes etapas de su ciclo de vida. Por ejemplo, entre 1971 y 1976 los polacos O. Stefaniak y Stanisław Seniczak encontraron que durante los estadios juveniles los ácaros poseen una mayor abundancia y variedad de endosimbiontes con respecto a los adultos y que también cambia, dependiendo de la estación del año, el tipo de endosimbiontes. Su investigación, publicada en la [revista Pedobiología](#) nos podría indicar, primero, que durante los estadios juveniles los ácaros serían capaces de explotar una diversidad mayor de recursos alimenticios, y segundo, que la estacionalidad juega un papel muy importante como modulador en las redes alimenticias tanto de los microorganismos como de los ácaros en función de la disponibilidad y aprovechamiento de los recursos.

¿Cómo adquiere el ácaro a un endosimbionte?

Se sabe que en los ácaros y en muchos otros organismos, existen dos tipos de endosimbiontes: intracelulares y extracelulares. Los primeros mantienen una relación tan íntima con el ácaro y llevan a cabo funciones tan importantes que, si no están juntos, ambos mueren. En contraste, se ha observado que los endosimbiontes extracelulares, aunque también realizan funciones de importancia en el hospedero son capaces de sobrevivir en ocasiones fuera del mismo. Para responder a la pregunta necesitamos pensar en términos de [coevolución](#) ya que como muchos factores están en juego, el mecanismo de endosimbiosis puede ser muy lento y puede abarcar muchas generaciones tanto del hospedero como del endosimbionte.

Diversos estudios han demostrado que cuando un ácaro se alimenta, también puede ingerir de forma fortuita, al microorganismo que consume el mismo recurso, de modo que la endosimbiosis puede ser un “accidente”. Es necesario señalar que para que la endosimbiosis sea exitosa, se necesitan cumplir ciertas condiciones para que el proceso se lleve a cabo, por ejemplo, que los mecanismos de defensa de ambos organismos no ocasionen un daño al otro. En este tipo de asociación el ácaro no busca in-

tencionalmente al microorganismo para que le ayude a asimilar su alimento, simplemente se dan las condiciones propicias de dicho mecanismo. Una vez que se dan estas condiciones es posible que se establezca una relación permanente donde por ejemplo, el endosimbionte llegue a ser transmitido de padres a los hijos, o mejor dicho de madres a hijos, ya que cuando ella deposita los huevecillos también deposita a los microorganismos en su superficie. Cuando la larva eclosiona adquiere entonces a los endosimbiontes que se encuentran en la superficie.

Conocer los mecanismos que permiten a las diferentes especies de ácaros explotar los distintos recursos, incluyendo la gran diversidad de endosimbiontes que pueden albergar a lo largo de su ciclo de vida, permite: 1. reconocer su papel e impacto en el suelo como iniciadores del proceso de la descomposición de la hojarasca, y 2. determinar cómo la presencia de un endosimbionte en particular puede afectar la explotación de un recurso, el ciclo de vida y la supervivencia de los ácaros en el suelo.

Finalmente, aunque en México el estudio de endosimbiontes en ácaros no es tan difundido, algunos laboratorios realizan estudios para entender el efecto de moléculas tóxicas sobre los endosimbiontes de ácaros plaga de cultivos, debido a la resistencia de los propios ácaros a algunas moléculas tóxicas. Entonces, la manera de controlar a los ácaros es optando por matar al endosimbionte, para que el hospedero, en este caso el ácaro, también muera a causa de una pobre asimilación de nutrientes.

Para saber más

- Hoffmann, A. (1996). Animales desconocidos. Relatos acarológicos. *FCE*. México. <http://bit.ly/3h2bKDW>
- Shapira, M. (2016). Gut microbiotas and host evolution: scaling up symbiosis. *Trends in Ecology and Evolution* 31: P 539-549.
- Siepel, H. y E.M. de Ruiter-Dijkman. (1993). Feeding guilds of oribatid mites based on their carbohidrase activities. *Soil Biology and Biochemistry* 25: 1491-1497. <http://bit.ly/3F7A4fz>

Daniel Isaac Sánchez Chávez es biólogo egresado de la FES Iztacala. Tiene una maestría en Ciencias Biológicas por la UNAM. Actualmente se encuentra terminando su tesis doctoral en el mismo posgrado de la UNAM sobre preferencias alimentarias de ácaros oribátidos en zonas áridas.



Una microscópica mirada a los suelos de los ecosistemas tropicales

América Baleón Sepúlveda

La diversidad biológica de la Tierra es el resultado de grandes procesos evolutivos que llegan a durar hasta miles de millones de años. La historia evolutiva de los microorganismos de nuestro planeta es una de las más antiguas: su presencia en cada ecosistema pareciera invisible, pero los podemos percibir por sus variadas funciones entre un sitio y otro. Las comunidades de seres vivos son muy diferentes en distintas partes del planeta debido a esos procesos. Por ejemplo, los ecosistemas como los desiertos albergan una diversidad de vida menor a la de una selva y entre selvas diferentes hay diferencias que podrían ser perceptibles sólo para el ojo experto. Entre las muchas ideas que surgen de la mente de los ecólogos y las ecólogas, algunas son entender cómo y por qué las comunidades de seres vivos pueden ser diferentes entre sí, por qué la diversidad es mayor en algunos sitios con respecto a otros, y cómo afecta esto a los procesos que en ellos se desarrollan. En este artículo voy a abordar este tema desde la perspectiva de los ecosistemas tropicales.

Las selvas húmedas, también conocidas como bosques tropicales o selvas altas perennifolias, son consideradas de los [biomas terrestres](#) más diversos. Se caracterizan principalmente por su gran complejidad y variedad de nichos ecológicos que permiten a su vez, una enorme riqueza de formas de vida. Esta alta complejidad y variedad está relacionada con la forma en la que las especies se desarrollan e interactúan entre ellas en el ecosistema.

Este bioma se encuentra bajo amenaza constante debido a la explotación no sustentable de sus recursos y a presiones de tipo antropogénico, por ejemplo, la deforestación para actividades agrícolas, ganaderas y diversas actividades relacionadas con la infraestructura urbana. En México, se ha reducido la cobertura de selvas húmedas a un ritmo del 0.76% anual, según [un estudio publicado](#) por Maass y colaboradores en el 2009 .

[Un estudio](#) de Danaë M. A. Rozendaal y colaboradores de 2019 determinó que la recuperación tras un disturbio de mucha intensidad como la deforestación de estos lugares es un proceso largo y complejo. En su artículo, publicado en *Science Advances*, estiman que para recuperar al 80% de las especies eliminadas de estos ambientes al menos se necesita que transcurran 20 años en un proceso de sucesión, es decir que la vegetación se recupere de manera natural, sin intervención humana. Sin embargo, para recuperar la composición inicial, es decir, para volver a tener las mismas especies que existían en el ecosistema antes de

la perturbación, son necesarios más de 600 años. Estos datos son estremecedores y, aunque aparentemente estos ecosistemas tienen una alta capacidad de resistir y recuperarse, el impacto real que las actividades antropogénicas tienen sobre ellos, aún no ha sido observado.

¿Por qué es necesario conservar los ecosistemas tropicales?

Además de su gran diversidad, ¿por qué son tan especiales los ecosistemas tropicales?, ¿por qué conservarlos? En estos ecosistemas se llevan a cabo una gran cantidad de procesos importantes que mantienen principalmente el ciclaje de materia y el flujo de energía de nuestro planeta, lo que se conoce como ciclos biogeoquímicos (ver Azufre: elemento incomprendido de la biogeoquímica



Estudiar los microorganismos edáficos es complejo pero conociendo más sobre nuestros suelos entenderemos más sobre el correcto funcionamiento de los ecosistemas.

Imagen Roddelgado, CC BY-SA 4.0, vía [Wikimedia Commons](#)



Los microartrópodos y hongos pueden modificar la estructura del suelo.
Fotografía: A. Baleón Sepúlveda.

planetaria en *Oikos= 16*). Estos ciclos químicos llevan el vocablo bio porque en ellos participa activamente la biota del sistema y la palabra geo porque son de alcance planetario.

Es importante recalcar que la materia orgánica que contienen los suelos de los ecosistemas tropicales es el segundo almacén más importante del mundo de un elemento fundamental para la vida: el carbono.

Los microorganismos edáficos son aquellos que habitan en el suelo y cuyo tamaño se mide en unidades de micrómetros (1 micrómetro equivale a 0.001 mm y, por lo tanto, son sólo visibles con un microscopio). Incluyen hongos, bacterias, algunas algas, protistas y microartrópodos (por ejemplo, ácaros). Aún cuando éstos últimos no son reconocidos como microorganismos por muchos autores debido a que su tamaño puede ser mayor, son un grupo muy diverso y algunos de ellos cumplen con esta definición. Además, tienen una importante participación en diversos procesos, como la fragmentación de la materia orgánica y las interacciones que establecen con otros microorganismos edáficos, especialmente con hongos y bacterias.

Todos los microorganismos edáficos son reconocidos principalmente por el papel que juegan en el ciclaje de nutrientes como el carbono (C), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), entre otros (para saber más sobre ciclaje de nutrientes, recomendando consultar el número 16 de *Oikos=*). Uno de los ciclos más conocidos es el del C, en el cual hongos y bacterias principalmente, participan activamente en la descomposición de la materia orgánica y en su incorporación en la cadena trófica.

Por otra parte, algunos hongos establecen relaciones simbióticas que permiten el transporte de nutrientes del suelo a las plantas. En las micorrizas, como se le denomina a este tipo de relaciones, los hongos les facilitan a las plantas la obtención de recursos como fósforo y nitrógeno y, a su vez, las plantas les aportan energía a los hongos en forma de carbohidratos. Sumado a esto, algunos microorganismos son capaces de modificar la estructura

del suelo, y con ello su capacidad de retener nutrientes. Por ejemplo, los microartrópodos edáficos y los hongos al desarrollarse y moverse en el suelo pueden modificar el espacio poroso y por lo tanto la capacidad del suelo de retener agua y, en consecuencia, nutrientes.

¿Cómo es la vida microscópica en los suelos de los sistemas tropicales?

Se ha desarrollado muy poco el estudio de los microorganismos edáficos en los sistemas tropicales debido principalmente a la complejidad que supone su estudio. Sin embargo, conocer aspectos ecológicos básicos sobre ellos ha permitido entender su papel en diversos procesos esenciales para mantener el correcto funcionamiento del ecosistema. De manera tradicional, se ha abordado el estudio de los microorganismos edáficos en los ecosistemas tropicales clasificándolos según el papel que desempeñan, es decir en grupos funcionales. Dentro de los organismos más estudiados tenemos a las bacterias fijadoras de N, a los hongos que forman micorrizas, a los organismos fragmentadores de la materia orgánica y a los descomponedores.

Dentro de las principales aportaciones al conocimiento de estas comunidades se han identificado factores que pueden afectar su abundancia, distribución y permanencia en los ecosistemas. Por medio de diversos estudios, se han encontrado patrones definidos en algunos de estos factores como pueden ser distintas variables ambientales:

1. La temperatura: algunos organismos principalmente las bacterias, dependen de ella para desarrollar actividades metabólicas como por ejemplo la respiración. En ecosistemas tropicales el rango óptimo de funcionamiento oscila entre 20 y 24°C.
2. La humedad: es indispensable para el proceso de descomposición y el desarrollo de los hongos. Por el calentamiento global, existe un incremento de la temperatura lo que disminuye la humedad en los ecosistemas tropicales, afectando así las funciones que realizan las comunidades de hongos.
3. La disponibilidad de nutrientes: es decir, la facilidad para un organismo de encontrar un recurso. Dependiendo del tipo de nutrientes disponibles podemos encontrar más organismos de un grupo que de otro. Por ejemplo, en suelos en donde el P es un recurso limitante, los hongos que forman micorrizas serán más abundantes.
4. El pH: esta variable se mide en un gradiente en donde los valores más bajos son ácidos y los más altos son básicos. Se ha determinado que es un factor capaz de alterar la dominancia de un grupo sobre otro. Por ejemplo, a valores ácidos (como los encontrados en los bosques tropicales) hay más hongos en el suelo, mientras que a valores básicos dominan las comunidades de bacterias.

A pesar de que en los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo por entender cómo se comportan estas comunidades en distintos ecosistemas, el desarrollo de nuevas tecnologías que sean capaces de facilitar el trabajo de campo para estudiar estos grupos resulta de vital importancia.



Procesos evolutivos: es el desarrollo continuo de cambios y adaptaciones por el que atraviesan las poblaciones y especies como respuesta a las presiones del medio en el que habitan.

Biomás: son regiones definidas por condiciones climáticas y geográficas. Los biomas no están definidos por similitud histórica o taxonómica.

Nicho ecológico: son las condiciones y recursos necesarios para que un organismo sobreviva.

Cadena trófica: es el proceso por el que se transfiere materia y energía entre los organismos de un sistema, típicamente relacionado con las redes de alimentación.

Recientemente se han incorporado [técnicas que permiten analizar el material genético](#) que nos permiten conocer la identidad de los organismos, así como sus posibles funciones en el ecosistema. Además, se han comenzado a llevar a cabo [experimentos para evaluar la respuesta de estas comunidades](#) ante el cambio de las condiciones ambientales; estas simulaciones pretenden generar información útil para desarrollar alternativas como la introducción de especies que realicen funciones similares ante escenarios desfavorables como el calentamiento global, que podrían provocar un cambio en las funciones que los organismos desempeñan de manera natural. Los principales resultados de estas simulaciones sugieren que el aumento en la temperatura y en la concentración de elementos como el N son capaces de alterar la composición de especies en los ecosistemas tropicales, lo que podría afectar también cómo se desarrollan sus funciones.

Es importante señalar que la actividad de estas comunidades influye directamente en el desarrollo y actividad de otros grupos de biota. Por lo tanto, tener información en un punto de referencia inicial sobre la diversidad taxonómica y genética de los grupos de microorganismos resulta fundamental para entender la composición de sus grupos asociados, información que no ha sido ampliamente explorada en la actualidad.

¿Qué podemos hacer?

Las fuerzas de presión que se ejercen directa e indirectamente sobre las selvas húmedas o bosques tropicales están provocando el deterioro y una pérdida acelerada de estos ecosistemas, de los recursos y de las especies que en ellos se desarrollan. En México, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), estos ecosistemas abarcan una superficie total de aproximadamente 4.6% del territorio nacional y han sido [ampliamente estudiados](#)

en términos de organismos como plantas y animales. Sin embargo, son muy escasos los estudios que se han enfocado en conocer la gran diversidad y función que desarrollan los microorganismos del suelo de esos ecosistemas.

¿Hacia dónde vamos? Es necesario establecer prioridades para desarrollar de manera más eficiente las técnicas que nos permiten entender el estado actual de las comunidades de microorganismos en suelos tropicales. Pero también es necesario fortalecer la poca investigación usando herramientas que incorporen modelos matemáticos que ayuden a entender los posibles escenarios que ilustren cómo cambian las dinámicas de funcionamiento de estas comunidades de microorganismos como respuesta a las condiciones de cambio a las que se enfrentan y que, a largo plazo, se verán reflejadas en los procesos en los que están involucrados en los ecosistemas; entre ellos los ciclos biogeoquímicos. Las alteraciones en los ambientes de los microorganismos del suelo pueden tener un impacto global.



Los bosques tropicales son considerados de los biomas terrestres con mayor diversidad de vida.

Fotografía: A. Baleón Sepúlveda.

Para saber más

- Ciclos biogeoquímicos: <https://bit.ly/3BjNHXU>
- Bosques tropicales: <https://bit.ly/3Y4jR3c>
- Áreas naturales protegidas: Una incursión en las selvas húmedas tropicales en la región de Los Tuxtlas: <https://bit.ly/2PRGfy7>
- La regeneración de las selvas: <https://bit.ly/3W0DuHH>
- Selvas húmedas: <https://bit.ly/3PdvEIK>

América Baleón Sepúlveda es bióloga por la Facultad de Ciencias y estudiante de Maestría en el Posgrado en Ciencias Biológicas. Su principal área de interés es la ecología microbiana del suelo. Actualmente estudia la respuesta de la comunidad de microbios del suelo durante la regeneración en claros del bosque tropical perennifolio.

Pandemia - Lecciones en retrospectiva desde el 2050

**Original de Fritjof Capra y Hazel Henderson
Traducción Rodrigo García-Herrera**

Imagina que es el año 2050 y miramos hacia el pasado, al origen y la evolución de la pandemia de coronavirus a lo largo de las últimas tres décadas. Extrapolando de sucesos recientes, ofrecemos el siguiente escenario para esa vista desde el futuro.

Al pasar a la segunda mitad del siglo XXI, podemos finalmente entender el origen e impacto del coronavirus que azotó al mundo en 2020 desde un punto de vista evolutivo y sistémico. Hoy, en 2050, mirando atrás a los últimos 40 turbulentos años en nuestro planeta, parece obvio que la Tierra se hizo cargo de educar a la familia humana. Nuestro planeta nos enseñó la primacía de entender nuestra situación en términos de sistemas enteros, algunos ya identificados por pensadores visionarios desde la remota segunda mitad del siglo XIX. Este ensanchamiento de la conciencia humana reveló cómo funciona el planeta, su biosfera energizada por el flujo diario de fotones de nuestra estrella madre, el Sol.

Al cabo, esta conciencia expandida superó las limitaciones cognitivas, los supuestos e ideologías incorrectas que habían creado las crisis del siglo XX. Falsas teorías de progreso y desarrollo humano, medidas miopemente por precios, y métricas basadas en dinero como el PIB, culminaron en crecientes pérdidas sociales y ambientales: contaminación de aire, agua y tierra; destrucción de diversidad biológica; pérdida de servicios ecosistémicos, todo exacerbado por el calentamiento global, aumento de nivel del mar y perturbaciones climáticas masivas.

Estas políticas miopes también habían causado descomposición social, inequidad, pobreza, enfermedad mental y física, adicciones, pérdida de confianza en instituciones –incluyendo medios de comunicación, academia y la ciencia misma– además de pérdida de solidaridad comunitaria. Todo esto condujo a las pandemias del siglo XXI: SARS, MERS, SIDA, influenza, y el conjunto de coronavirus que surgieron en 2020.

Durante las últimas décadas del siglo XX, la humanidad excedió la capacidad de carga de la Tierra. La familia humana había crecido a 7.6 miles de millones de personas hacia el 2020 y seguía obsesionada por el crecimiento económico, corporativo y tecnológico que había creado las crecientes crisis existenciales que amenazaban la supervivencia de la humanidad. Al impulsar este crecimiento con combustibles fósiles, los humanos calentaron la atmósfera al punto de que el consorcio de ciencia climática de las Naciones Unidas publicó en su reporte del 2020 que a la humanidad le quedaba sólo diez años para revertir la situación.

Ya desde el 2000 se disponía de todos los medios: teníamos el conocimiento, habíamos diseñado tecnologías renovables eficientes y sistemas económicos circulares, basados en los principios ecológicos de la naturaleza. Por entonces las sociedades patriarcales estaban perdiendo control sobre sus poblaciones femeninas, debido a las fuerzas de urbanización y educación. Las mujeres habían comenzado a tomar control de sus cuerpos, las tasas de fertilidad habían caído aún antes de que empezara el siglo XXI. La extensa rebeldía contra el estrecho modelo económico jerárquico de la globalización y sus élites masculinas condujo a la ruptura de esas trayectorias insostenibles de desarrollo impulsado por combustibles fósiles, energía nuclear, militarismo, lucro, codicia y liderazgo egocéntrico.

Los presupuestos militares que descubijaban necesidades de salud y educación para el desarrollo humano gradualmente se desplazaron de tanques y portaaviones a las menos onerosas y menos violentas guerras de información. Ya al principio del siglo XXI la competencia internacional por el poder se enfocaba más en propaganda social, tecnologías de persuasión, infiltración y control de la internet. En 2020 las prioridades de la pandemia de coronavirus competían con otras víctimas en salas de emergencia de los hospitales, ya fueran heridos de bala o pacientes con otras condiciones delicadas. En 2019, un movimiento nacional de niños



en Estados Unidos se había aliado con la profesión médica para denunciar la violencia armada como una crisis de salud pública.

Gradualmente se ratificaron leyes estrictas de control de armas de fuego, junto con la cancelación de la participación en fondos de retiro de los fabricantes de armas, lo que paralizó a sus partidarios y, en muchos países, los gobiernos compraron las armas de fuego a sus ciudadanos y las destruyeron, como había hecho Australia en el siglo xx. Esto redujo enormemente la compra-venta global de armas, junto con leyes internacionales que requerían costosas licencias y seguros, mientras que impuestos globales reducían el despilfarro de las carreras armamentistas de siglos anteriores. Los conflictos entre las naciones ahora se resuelven en su mayor parte de manera transparente por tratados internacionales. Ahora en 2050, es raro que un conflicto involucre medios militares, desplazados por el uso de propaganda en internet, espionaje y guerra cibernética.

En el 2020 estas revueltas ya exhibían las fracturas en las sociedades humanas: desde racismo e ignorancia, teorías de conspiración, xenofobia y hacer de los “otros” un chivo expiatorio debido a diversos sesgos cognitivos: determinismo tecnológico, ceguera inducida por teorías y el malentendido tan fatal como extenso de confundir dinero con riqueza. Ahora tenemos claro que el dinero fue un invento útil: todas las monedas son simplemente protocolos sociales (prendas de confianza, físicas o virtuales), que operan sobre plataformas sociales con efectos de red; que sus precios fluctúan en la medida de que sus diferentes usuarios confían en ellas y las usan. Aún así, países y élites en todo el mundo estaban cautivadas por el dinero y los juegos del “casino de las finanzas globales”, fomentando aún más los siete pecados capitales, en vez de los valores tradicionales de cooperar, compartir, ayuda mutua y la [Regla Dorada](#).

Por décadas, científicos y activistas ambientales habían advertido de las graves consecuencias de estas sociedades insostenibles con su sistema de valores retrógrada, pero hasta la pandemia de 2020 los líderes corporativos y políticos, junto con otras élites, obstinadamente se resistían a cambiar. Incapaces de superar esa intoxicación de lucro financiero y poder político, fueron los mismos ciudadanos quienes se enfocaron en el bienestar y supervivencia de la humanidad y la comunidad de los seres vivos. Con el colapso de los precios de gas y petróleo, las industrias fosilizadas pelearon para retener sus exenciones de impuestos y subsidios en todos los países. Pero pudieron comprar pocos favores políticos y apoyo a sus privilegios. Hizo falta la reacción global de millones de jóvenes, comunidades de base globalistas, pueblos indígenas, que entendían los procesos sistémicos de nuestro planeta Gaia: la biosfera autorregulada y autoorganizada que por miles de millones de años había soportado toda la evolución planetaria sin interferencia de humanos de cognición limitada.

En los primeros años de nuestro siglo XXI, Gaia respondió de manera inesperada, como había hecho tantas veces durante la larga historia de la evolución. La deforestación de grandes áreas de bosque tropical, junto con las invasiones masivas a otros ecosistemas por todo el mundo habían fragmentado estos ecosistemas autorregulados, desgarrado la trama de la vida. Una de las muchas



consecuencias de estas acciones destructivas fue que algunos virus que habían vivido en simbiosis con ciertas especies animales, saltaron de esas especies a otras y a humanos, para quienes fueron sumamente tóxicos o letales. Personas en muchos países y regiones, marginalizados por la estrecha globalización económica orientada al lucro, calmaban su hambre buscando carne de monte en estas áreas naturales recién expuestas, matando monos, civetas, pangolines, roedores y murciélagos como fuentes adicionales de proteína. Estas especies salvajes, portadoras de una variedad de virus, también se vendían en “mercados húmedos”, exponiendo a aún más poblaciones urbanas a estos virus nuevos.

Antes, en la década de 1960, por ejemplo, un virus raro saltó de una especie de mono matada como carne de monte y consumida por humanos en África Oriental. De ahí se propagó a los Estados Unidos, donde se identificó como el VIH que causó la epidemia de SIDA. A lo largo de cuatro décadas se calcula que mató a 39 millones de personas en todo el mundo, aproximadamente medio punto porcentual de la población planetaria. Cuatro décadas después, el impacto del coronavirus fue veloz y dramático. En 2020 se dijo que el virus saltó de una especie de murciélago a humanos en China, y de ahí se propagó por todo el mundo, diezmando la población de unos 50 millones en sólo una década.

Desde el punto de vista de nuestro año 2050, podemos recapitular la secuencia de estos virus: SARS, MERS, y el impacto global de las varias mutaciones del coronavirus que empezaron por el 2020. Al cabo estas pandemias se estabilizaron, en parte por la prohibición de los mercados húmedos en toda China en 2020. Estas prohibiciones se extendieron a otros países y mercados globales, eliminando el comercio de animales salvajes y reduciendo vectores, junto con mejores servicios de salud, salud preventiva y el desarrollo de medicinas y vacunas eficaces.

Las lecciones básicas para la humanidad en estos trágicos 50 años de crisis globales autoinflingidas –pandemias, ciudades

inundadas, incendios forestales, sequías y otros desastres climáticos cada vez más violentos— fueron simples, muchas basadas en los descubrimientos de Charles Darwin y otros biólogos durante los siglos XIX y XX:

1. Los humanos somos una especie con muy poca variación en nuestro ADN.
2. Evolucionamos junto con otras especies en la biosfera planetaria a través de selección natural, respondiendo a cambios y estreses en los diferentes ambientes y hábitats.
3. Somos una especie global, emigramos desde el continente africano a todos los demás, compitiendo con otras especies, causando muchas extinciones.
4. Nuestro éxito y colonización del planeta, en este Antropoceno del siglo XXI, se debe en gran parte a nuestra capacidad de conectar, cooperar, compartir y evolucionar en poblaciones y organizaciones cada vez más grandes.
5. La humanidad pasó de ser bandas errabundas de nómadas a establecerse en aldeas agrícolas, pueblos y al cabo las mega-ciudades del siglo XXI, donde vivía más del 50% de nuestra población. Hasta las crisis climáticas y las pandemias en los primeros años del siglo XXI, todas las proyecciones predecían que estas mega-ciudades seguirían creciendo y que la población humana llegaría a diez mil millones para nuestros tiempos, en el 2050.

Ahora sabemos por qué la población humana alcanzó su máximo con 7.6 mil millones, en el 2030, como se esperaba en los escenarios más optimistas del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, así como en [Empty Planet](#) (2019), una serie de encuestas urbanas globales realizadas por sociólogos, que documentaron la disminución de la fertilidad. Las nuevas comunidades de base globalistas, ejércitos de niños de escuela, ambientalistas globales y mujeres empoderadas se unieron a inversionistas verdes, éticos y emprendedores en mercados locales. Millones contrataron los servicios de micro-redes operadas por cooperativas, energizadas por electricidad renovable, sumándose a otras empresas cooperativas que ya en 2012 empleaban a más personas en el mundo que todas las compañías privadas con fines de lucro juntas. Abandonaron falsas medidas monetarias como el PIB, y desde 2015 para la dirección de sus sociedades adoptaron los [Objetivos de Desarrollo Sustentable de la ONU](#), con sus 17 objetivos de sostenibilidad, restauración de ecosistemas y de la salud humana.

Con estos nuevos objetivos y métricas sociales se enfocaron todos en cooperar, compartir y adquirir conocimiento, formas más ricas de desarrollo humano, usando recursos renovables y maximizando la eficiencia. Esta sostenibilidad de largo plazo, equitativamente distribuida, beneficia a todos los miembros de la familia humana dentro de las tolerancias de las demás especies que habitan nuestra biosfera. Florecen la competencia y la creatividad pues las mejores ideas desplazan a las menos útiles, junto con estándares éticos basados en conocimiento científico, y conocimiento cada vez más profundo acerca de sociedades autosufi-

cientes, y más conectadas en todos niveles, desde los locales hasta los globales. Cuando azotó el coronavirus en 2020, la respuesta de la humanidad fue al principio caótica e insuficiente, pero pronto se volvió coherente e incluso dramáticamente diferente. El comercio global se encogió a sólo transportar mercancías raras, sustituido por comercio de información. En vez de enviar pasteles y galletas por todo el planeta, pasamos a enviar sus recetas, y todo tipo de recetas para preparar alimentos y bebidas basados en vegetales; y de manera local instalamos tecnologías: fuentes de energía solar, eólica, geotérmica, iluminación LED, vehículos eléctricos terrestres, marinos e incluso aéreos.

Las reservas de combustible fósil permanecieron seguras bajo tierra, considerando el carbono como un recurso demasiado preciado como para quemarlo. El exceso de CO₂ en la atmósfera de tanto quemar combustibles fósiles fue capturado por bacterias del suelo, plantas de raíces profundas, miles de millones de árboles plantados, y en el amplio re-balanceo de los sistemas alimentarios de la humanidad, otrora basados en agroquímicos industrializados, publicidad, y comercio global de algunos monocultivos. Esta dependencia de combustibles fósiles, pesticidas, fertilizantes, antibióticos en dietas cárnicas, estaban todos basados en las menguantes reservas de agua potable y eran insostenibles. Hoy, en el 2050, los alimentos se producen de manera local, incluyendo muchos cultivos autóctonos antes ignorados, agricultura en aguas saladas de cultivos comestibles de plantas halófitas cuyas proteínas son más saludables para la dieta humana.

El turismo masivo y los viajes en general, decrecieron radicalmente, junto con el tráfico aéreo, reduciendo el uso de combustibles fósiles. Comunidades por todo el mundo se estabilizaron en centros poblacionales pequeños o medianos, que se volvieron mayormente autosuficientes con producción local y regional de alimento y energía. El uso de combustibles fósiles desapareció virtualmente, pues ya para el 2020 no podía competir con las fuentes de energía renovable y sus tecnologías correspondientes que fueron reciclando recursos antes desperdiciados y actualizándolos para incorporarlos a las economías circulares de hoy en día.

Debido al riesgo de infección, fueron desapareciendo todo tipo de reuniones masivas, junto con maquiladoras, plazas comerciales y eventos deportivos o entretenimiento en arenas grandes. Las democracias se volvieron más cuerdas, pues los demagogos ya no podían dirigirse a miles de personas durante sus campañas. Sus promesas huecas también se frenaron en internet, pues las redes sociales dejaron de ser monopolios con fines de lucro y fueron desarticuladas cerca del 2025. Ahora en 2050 se las regula como servicios públicos en todos los países.

El casino global de los mercados financieros se colapsó. Las actividades económicas volvieron del sector financiero a bancos públicos y otras cooperativas de ahorro y crédito, que funcionan con otros sectores cooperativos de nuestros tiempos. La fabricación de productos y nuestras economías de servicios revivieron sistemas tradicionales de trueque, sistemas informales de voluntariado, monedas locales y numerosas formas de transacciones no monetarias que se habían desarrollado durante las etapas más agudas de la pandemia. Como consecuencia de

la amplia des-centralización y del desarrollo de comunidades autosuficientes, nuestras economías del 2050 son regenerativas en vez de extractivas, y las brechas de pobreza e inequidad de los modelos basados en explotación y obsesión por el dinero, prácticamente han desaparecido.

La pandemia de 2020 que colapsó mercados globales, finalmente revirtió las ideologías del fundamentalismo del mercado y del dinero. Las herramientas de los bancos centrales dejaron de funcionar, mientras que los pagos directos a familias necesitadas y otras formas de “dinero por helicóptero”, de las que Brasil fue pionero, se volvieron la única forma de mantener el poder adquisitivo para lograr transiciones económicas suaves y ordenadas a sociedades sostenibles. Esto emplazó a las autoridades de EEUU y Europa a imprimir dinero. Estas políticas de estímulo reemplazaron las “austeridades” y fueron rápidamente invertidas en infraestructura renovable en los respectivos Nuevos Planes Verdes.

Nuestros animales domésticos también se contagiaron de coronavirus, incluyendo vacas, borregos y otros rumiantes, y algunos eran portadores asintomáticos de la enfermedad. En consecuencia, la matanza y consumo de carne se redujo dramáticamente en todo el mundo. El pastoreo y las granjas-fábrica generaban casi el 15% de los gases de efecto invernadero. Las grandes corporaciones internacionales cárnicas perdieron el apoyo de inversionistas renuentes a adquirir “activos varados”, lo mismo que las compañías de combustibles fósiles. Algunas cambiaron totalmente a alimentos basados en vegetales, produciendo análogos de carne, pescado y queso. La carne de res se volvió carísima y excepcional, sólo en granjas pequeñas, operadas por familias, hay a veces una vaca para tener leche y queso, junto con huevos de sus gallinas.

Tras la disminución de la pandemia, cuando se habían ya desarrollado costosas vacunas, el viaje global se permitió sólo con los certificados de vacunación que hoy conocemos, en uso sobre todo por comerciantes y personas adineradas. La mayoría de las poblaciones del mundo prefieren los placeres de sus comunidades y de formas de comunicación virtual, junto con viajes locales en transporte público, autos eléctricos y por barco solar o de vela. Como consecuencia, ha disminuido dramáticamente la contaminación del aire en todas las grandes ciudades del mundo.

Con el desarrollo de comunidades autosuficientes, han surgido las llamadas “aldeas urbanas” en muchas ciudades, vecindarios rediseñados con estructuras de gran densidad combinadas con espacios verdes amplios y compartidos. Estas áreas representan ahorros energéticos sustanciales y son también saludables, seguras y crean ambientes comunitarios con niveles de contaminación drásticamente reducidos.

Las eco-ciudades de hoy incluyen alimentos cultivados en rascacielos con techos solares, jardines verticales y transporte público eléctrico, pues los automóviles fueron mayormente prohibidos en las calles urbanas cerca del 2030. Las calles fueron tomadas por peatones y ciclistas, comprando en tiendas locales, bazares de artesanías y tianguis de campesinos. Vehículos eléctricos solares para viajes más largos cargan y descargan sus baterías de noche para balancear la electricidad en casas donde vive una sola familia.

Existen cargadores solares para vehículos eléctricos en todos lados, que reemplazan el uso de electricidad generada con combustibles fósiles de plantas obsoletas, que quebraron cerca del 2030.

Después de todos los cambios dramáticos que gozamos hoy, nos damos cuenta de que nuestras vidas son menos estresantes, más saludables y más satisfactorias. Nuestras comunidades planifican futuros a largo plazo. Para estar seguros de la sostenibilidad de nuestro sistema de vida nuevo, nos damos cuenta de que restaurar ecosistemas en todo el mundo es crucial, de modo que los virus que representan peligro para la humanidad sigan confinados otra vez en otras especies animales donde no hagan daño. Para restaurar ecosistemas por todo el mundo, el cambio global a alimentos orgánicos y regenerativos floreció, junto con alimentos y bebidas basadas en plantas y todos los ingredientes basados en algas y cultivados en aguas saladas que disfrutamos hoy día. Los miles de millones de árboles que sembramos por todo el mundo después del 2020, junto con mejoras a nuestras prácticas agrícolas, poco a poco restauraron los ecosistemas.

Como consecuencia de todos estos cambios, el clima global finalmente se ha estabilizado, las concentraciones de CO₂ de estos días han regresado a valores seguros cercanos a 350 partes por millón. El nivel del mar seguirá elevado por un siglo más, pero muchas ciudades ahora florecen en terreno más alto y más seguro. Las catástrofes climáticas son raras, aunque muchas eventualidades climáticas aún perturban nuestras vidas, lo mismo que ocurría en siglos pasados. Las múltiples crisis y pandemias, debidas a nuestra previa ignorancia de procesos planetarios y bucles de realimentación, tuvieron extensas consecuencias trágicas para comunidades e individuos. Sin embargo, como humanidad, hemos aprendido las dolorosas lecciones. Hoy, en retrospectiva desde el 2050, nos damos cuenta de que la Tierra es nuestra más sabia maestra, y sus terribles lecciones quizá salvaron de la extinción a la humanidad y a gran parte de la comunidad planetaria de seres vivos.

Frijof Capra es un científico, divulgador, activista y autor de bestsellers internacionales donde conecta cambios conceptuales en la ciencia con cambios más amplios en la cosmovisión y el paisaje de valores de la sociedad. Es físico y teórico de sistemas y fue por primera vez, ampliamente reconocido por su libro *El Tao de la Física* y su libro más reciente es *The Systems View of Life* (Cambridge University Press, 2014). Capra es fundador y director del Centre for Ecoliteracy, en Berkeley, California, Estados Unidos.

Rodrigo García Herrera estudió Ingeniería Cibernética y Sistemas Computacionales en la Universidad La Salle y la Maestría en Ciencias de la Complejidad en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM). Ha publicado software en el Python Package Index y es coautor de artículos publicados en diversas revistas científicas. Es miembro de la Free Software Foundation y técnico académico en el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad del Instituto de Ecología de la UNAM.

¿Cómo podemos ayudar a conservar la vida?

David Brailovsky Signoret

La vida y la problemática ambiental

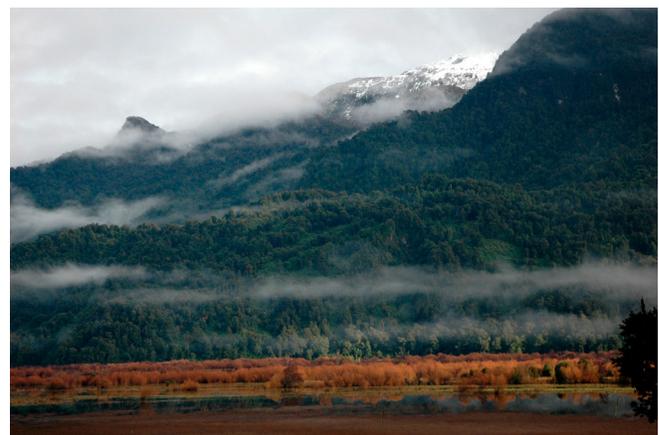
Las formas vivientes que nos rodean y con las que compartimos el planeta Tierra, están estrechamente relacionadas con nuestras propias vidas aún en formas de las que no nos percatamos. Las formas vivas son los organismos bien conocidos y observables (macroscópicos): las plantas y algas, muchos animales, algunos hongos; pero también incluyen multitud de organismos invisibles a nuestros ojos (microscópicos), entre los cuales tan sólo las bacterias superan en biomasa al resto de la biósfera. Todas ellas conforman lo que ahora conocemos como biodiversidad y a nivel planetario, se les denomina biósfera. Nuestras sociedades interactúan de forma continua con la biosfera, la influyen, se alimentan de ella, la alteran y algunas de nuestras actividades la nutren, como sucede con los desechos que se dispersan por ecosistemas que fluyen en ríos hacia el mar. No hay duda de que la humanidad ha tenido un fuerte impacto sobre el estado de conservación del medio natural porque por ejemplo requiere de maderas para la construcción, la mueblería, el arte y otros usos; así como para obtener carbón, leña y combustibles diversos. También necesita de grandes cantidades de materiales obtenidos a través de la minería (ver más información en la síntesis de la [Evaluación de los Ecosistemas](#) del Milenio de 2005).

En este artículo veremos aspectos generales y ejemplos de los problemas principales, aplicables a escala mundial, pero enfocados a nuestro país. En nuestro país la problemática ambiental ha sido extensamente investigada y abordada desde distintos puntos de vista (por ejemplo, ver [Reservas de la biosfera y otras áreas naturales protegidas de México](#) coordinado por Arturo Gómez-Pompa y Rodolfo Dirzo) y enfrentada desde ángulos biológicos, ecológicos, antropológicos, sociológicos y económicos, entre otros. Además de los avances notables desde la perspectiva científica, se ha progresado en la legislación y México cuenta con estructuras legales que permiten la constitución y ordenamiento de Áreas Naturales Protegidas, reglamentos para el uso de recursos, normas de especies protegidas y en riesgo, programas de manejo y normativas para la protección al ambiente, pero falta mucha inversión económica para la restauración ecológica de los ecosistemas y para poner en marcha muchos de los programas de manejo de las Áreas Naturales Protegidas. En este artículo abordo ideas y aspectos generales sobre los problemas más graves que afectan a la biósfera, doy ejemplos de los problemas principales enfocados

a México, y hablo de la forma en que los ciudadanos podemos contribuir a la conservación de la naturaleza y sus recursos.

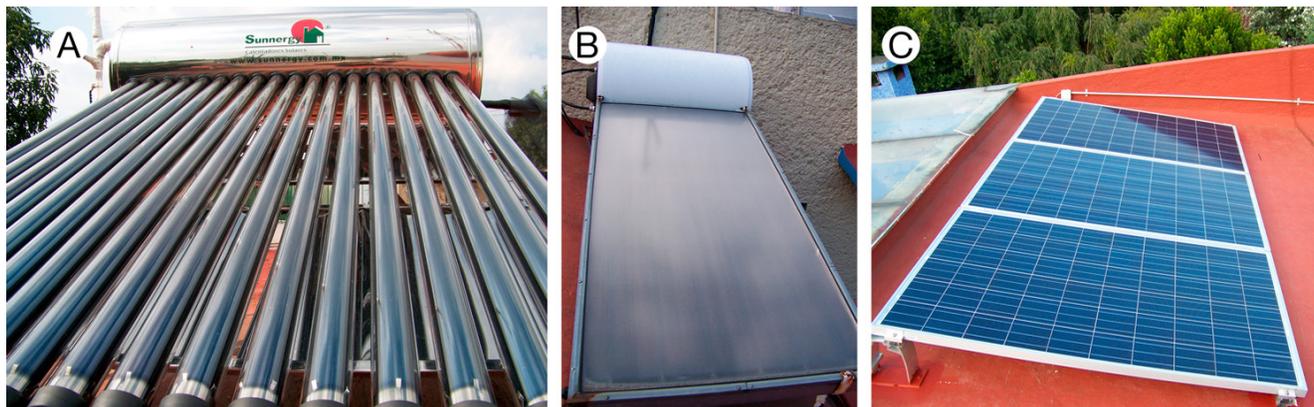
Principales problemas que afectan a la biodiversidad en México

En nuestro país los problemas más graves a los que se enfrenta el ambiente natural y los ecosistemas, incluyen: 1. la elevada deforestación, y la velocidad a la que ocurre, para el abasto de maderas y 2. el cambio de uso de suelo para desarrollar actividades agropecuarias, específicamente para la agricultura extensiva y la ganadería (por ejemplo muchos de estos temas se abordan en la [síntesis del Capital natural de México](#)). Ejemplos notables de ambos, incluyen: la desaparición de las selvas que abarcaban desde el sur de Tamaulipas hasta el norte de Tabasco (por ejemplo ver el [caso de Uxpanapa, Veracruz](#)), de las cuales ahora sólo quedan relictos en Los Tuxtlas, la acelerada deforestación de las selvas chiapanecas por la introducción de la palma de aceite, la desaparición de la mayor parte de la superficie forestal del Eje Neovolcánico Transversal y la extinción de especies de macrofauna (por ejemplo el oso pardo y el lobo mexicano) por la fragmentación de los hábitats. A causa de estos dos grandes problemas, y por otros más



El Parque Nacional Nahuel Huapi está en el límite entre Argentina y Chile, en la región de los Lagos. Grandes glaciares socavaron la cordillera de Los Andes durante las glaciaciones, formando amplios fiordos ahora ocupados por profundos lagos, que junto a fracturas inmensas y numerosos volcanes dan fisonomía a la región. Los enormes y longevos Alerces de hasta 3,000 años se han conservado a salvo de la industria de la construcción de casas en las vertientes semifrías de estas

montañas.
Fotografía: D. Brailovsky.



Sistemas de energía solar. A y B. Los colectores solares para calentar el agua se inventaron hace más de medio siglo, inicialmente eran planos y variantes de ellos, pero ahora los hay de muchos tipos. Una variante particularmente eficiente consta de dobles tubos de borosilicato, pintados con aluminatos en el interior. Para uso industrial los colectores se rellenan con aceite. C. Las fotoceldas de generación de energía eléctrica llevan años en desarrollo, pero apenas se hicieron más accesibles hace dos décadas. Actualmente se están investigando formas de emplear materiales menos costosos y más amigables con el ambiente y para la gente que trabaja en la industria. Fotografías: D. Brailovsky.

que veremos, nos encontramos en la sexta extinción masiva, que implica la pérdida de especies por causas antropogénicas. La sexta extinción masiva representa el tercer problema y debiera de ser considerado el primer gran problema y reto para la sobrevivencia de la humanidad. Otros problemas ambientales son: 4. el desa-

rollo de actividades mineras mal planificadas, que alteran el paisaje de manera drástica y producen muchos contaminantes que permanecen por largo tiempo en el ambiente, 5. la construcción de presas medianas, grandes y gigantescas, 6. la desertificación y pérdida de suelos por erosión y otras causas, 7. la sobreexplotación

Instituciones nacionales que participan en la sustentabilidad.

En México es responsabilidad de los gobiernos federal y estatales enfrentar estos problemas desde diversas perspectivas pero también contribuyen a ello algunos organismos no gubernamentales.

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) <http://www.gob.mx/semarnat>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) <http://www.gob.mx/conanp>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) <http://www.conabio.gob.mx> y <http://www.biodiversidad.gob.mx/>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) <https://www.gob.mx/inecc>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) <https://www.gob.mx/conafor>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) <https://www.gob.mx/conagua>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGARPA) <https://www.gob.mx/agricultura>
- Captación de agua de lluvia novedosa y económica en México (Isla Urbana) <https://islaurbana.org/que-es-un-tilaloque/>

Fundaciones públicas y privadas, instituciones internacionales y organizaciones no gubernamentales que también contribuyen en la búsqueda de soluciones.

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, UNEP) <http://www.unep.org>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) <https://www.mx.undp.org/>
- *International Renewable Energy Agency* (IRENA) <https://www.irena.org/newsroom>
- *Stockholm Resilience Centre* <https://www.stockholmresilience.org/>
- Convenio Internacional para el Tráfico de Especies Silvestres (CITES) <https://cites.org/esp>
- *World Wildlife Fund* (WWF) <https://wwf.org/>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (lista roja de la UICN) <http://www.iucnredlist.org>
- *The Nature Conservancy* <https://www.nature.org/en-us/> y <https://www.tncmx.org/>
- *National Geographic Society* <https://www.nationalgeographic.org/>

de los mantos acuíferos, y 8. la contaminación del aire, el agua y el suelo.

Por ejemplo, algunas presas han contribuido a la extinción de especies, como es el caso de la biznaga de barril (*Echinocactus grusonii*) una especie que, de acuerdo con la [NOM.059-ECOL-2001](#) está en peligro de extinción en el medio silvestre. Se sabe que muchos ejemplares de este cacto se perdieron a partir de 1997, cuando se llenó la presa de Zimapán en el estado de Hidalgo. De manera independiente ciertos lagos, como Chapala y Cuitzeo, se han desecado parcialmente por periodos anormalmente largos; otros, como los de la cuenca de México y los de la comarca lagunera, casi han desaparecido. Los ríos del centro del país han sido los más afectados por contaminantes industriales, debido al exceso de materia orgánica y afectaciones por especies exóticas que vienen de otros países.

Algunos avances y soluciones para la problemática ambiental

En México es responsabilidad de los gobiernos federal y estatales, así como de sus diversas instituciones, enfrentar estos problemas desde diversas perspectivas. También contribuyen en la búsqueda de soluciones las fundaciones públicas y privadas, instituciones internacionales y organizaciones no gubernamentales. Cada una de ellas participa activamente en la resolución de los problemas ambientales y en la protección de la biodiversidad.

Todos podemos tener un impacto significativo en el uso racional de los recursos bióticos, la deforestación y la conservación del ambiente. Por ejemplo, si economizamos energía eléctrica estaremos reduciendo la presión sobre el ambiente. Algunas de las actividades que más consumen energía son los sistemas de enfriamiento y calefacción y la iluminación de viejas tecnologías. Cuando se disminuye el consumo eléctrico, se emite menos CO₂, metano y otros gases con efecto invernadero (ver El carbono ¿es inocente? en *Oikos=16*). Si tomamos conciencia y reducimos la cantidad de materiales consumidos, emisiones de contaminantes y costos por traslados de energía y productos, veremos que cada persona puede contribuir de muchas maneras aún en pequeña escala. Las energías alternativas con mayor potencial incluyen a la energía solar y a la del viento (eólica), por ejemplo, para el abasto de agua caliente en instalaciones domésticas podemos instalar calentadores o colectores solares para reducir hasta en un 80% el uso de gas natural. Ya se emplean sistemas similares en espacios públicos como centros deportivos, albercas y hospitales. También es bueno optimizar nuestro uso del agua y si es posible, captar agua de lluvia colocando sistemas sencillos, como los “*Tlaloques*” de Isla Urbana.

Cuando separamos los residuos orgánicos del resto de la basura para convertirlos en composta, nosotros o las autoridades de la ciudad, reducimos las emisiones de gases contaminantes o con efecto invernadero. Esta iniciativa puede contribuir también al ahorro de fertilizantes químicos que podrían implicar más emisiones, contaminación del aire, agua y suelo. Optando por menos papel y cartón, reducimos la necesidad de talar bosques.

El reciclaje y el consumo responsable son las formas que tenemos más a mano los ciudadanos de las urbes para ayudar

a la conservación de los entornos naturales, ya que al reutilizar productos, reparar aparatos, evitar viajes demasiado distantes, emplear medios de transporte amigables y adquirir solamente lo necesario para llevar una vida sana y feliz, disminuimos nuestro impacto sobre la naturaleza. En las ciudades generalmente existen centros de reciclaje de plásticos, vidrio, aluminio, fierro y otros materiales. Si no los hay, una buena iniciativa es contribuir a fundar uno y así, organizados con amigos o vecinos, pueden llevar todos los materiales a un centro más grande. Todos estos materiales clasificados pueden llegar a las distintas industrias, que los incorporarán a sus procesos. Por ejemplo, los vidrios se funden para hacer nuevas botellas, el fierro se emplea en la industria para hacer máquinas y para la construcción, el aluminio se puede convertir en contenedores, y el plástico tiene muchas opciones de uso, o el cobre se reutiliza para elaborar tuberías, cables y alambres. Un ejemplo de reutilización del plástico PET y las redes de pesca, es la fabricación de botellas de agua, bancas para parques, platos y equipo deportivo. Las llantas usadas se están empleando como impermeabilizantes y para hacer cubiertas.

La humanidad y la naturaleza

A lo largo de su historia, el ser humano ha interactuado con la naturaleza. Como vimos antes, las sociedades lo siguen haciendo de diversas maneras. Aunque muchas personas viven ahora en ciudades, siempre llevamos dentro ese vínculo especial y necesitamos pasear, recrearnos, convivir y experimentar al aire libre.

El concepto de “Huella ambiental”

Me refiero a la huella ambiental como la cantidad de recursos naturales, tanto bióticos como abióticos (e impacto ambiental) que una persona, grupo de personas o instituciones requiere(n) para poder vivir. Dentro de esta huella, también figuran los efectos secundarios de la producción, generación, caza, pesca o cosecha de los recursos consumidos de manera continua o invertidos en la generación de infraestructura y vivienda a más largo plazo. Actualmente las huellas ambientales se miden en términos de consumo de recursos y energía, pero también debieran considerar las externalidades poco conocidas y muchas veces no estudiadas de la contaminación y la alteración de los sistemas naturales y las cadenas tróficas. Diversas instituciones han realizado ejercicios para calcular las huellas ambientales de procesos específicos, destaca el Instituto de Resiliencia de Estocolmo, Suecia y diversas universidades.



Hay diferentes maneras de entrar en contacto con la naturaleza. Una puede ser aprovechar cualquier espacio para cultivar un huerto propio y reducir el impacto ambiental por demanda de alimentos. Otra es salir de excursión a visitar las áreas naturales cerca de las ciudades o incluso parques urbanos, además existen zoológicos y jardines botánicos, e instituciones y museos en donde podemos aprender sobre ella. La naturaleza y todos nos beneficiaremos cuando visitamos un sitio causando el menor daño posible, respetando a todas las criaturas, las flores, los árboles, el agua y el suelo. Evita alimentar a la fauna local o llevar especies de animales y plantas no pertenecientes al lugar.

Es importante evitar el empleo de sustancias tóxicas o dañinas para un ambiente dado, —por ejemplo, al nadar en un río, lago o en el mar, usar sólo bloqueadores amigables con el ambiente— y al acampar es importante, reducir las fuentes de incendio, apagando bien las fogatas y cubriéndolas con tierra. También convivimos con la naturaleza al tener mascotas y muchas de ellas disfrutan saliendo de excursión responsablemente; podemos elegir adquirir animales y plantas en centros autorizados y siempre evitar las especies silvestres de origen desconocido, porque muchas de ellas son objeto de tráfico ilegal o bien pueden convertirse en especies exóticas invasoras. Cuidar el entorno natural es una manera práctica y divertida de disfrutarlo a la vez.

Conclusiones

En el mundo existen múltiples problemáticas ambientales, cuya responsabilidad de abordarlas no abarca solamente los ámbitos institucionales, científicos y gubernamentales, si no que la sociedad entera puede contribuir a su solución. En México, se requiere de la participación ciudadana para disminuir el consumo de productos que requieren tantos recursos naturales, lograr conservar los bosques, selvas, desiertos y todo tipo de áreas naturales, tanto protegidas como aquellas en otras manos, y evitar la extinción de

especies. Las ideas aquí presentadas no sólo ayudan a reducir la huella ambiental de cada uno, sino la de toda la sociedad. A la vez es posible obtener retribuciones económicas, mentales y espirituales al convivir en armonía con el ambiente natural. Me parece importante recalcar la importancia de participar activamente a través del consumo responsable, el cuidado de las áreas protegidas, la reducción de la contaminación, el cuidado de la flora y la fauna, así como el aprendizaje sobre el medio natural y su relación con la sociedad.

Para saber más

- Brailovsky Signoret, D. 2018. La conservación de la naturaleza. *Ciencia* 69:78-86. AMC, México.
- Diamond, J. 2005. Colapso: Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen. *Penguin Random House*. Grupo Editorial; Edición 1st (1 febrero 2020).
- Dirzo, R. 1990. La biodiversidad como crisis ecológica actual ¿Qué sabemos? *Revista Ciencias* (Número especial) 4:48-55.
- Primack, R.B. y O. Vidal. 2014. *Essentials of conservation biology*. 6a Edition. Sinauer Associates Inc. MA, USA. ISBN 978-1605352893.

David Brailovsky Signoret Es biólogo y maestro en ciencias biológicas por la UNAM. Se dedica a temas ambientales, estudios sobre conservación de la flora y asesoría de proyectos. Participó en el diseño y desarrollo del Jardín Botánico de Plantas Medicinales y Aromáticas de Cuemanco, UAM-Xochimilco y en el diseño e instalación del jardín botánico y sistemas acuáticos de El Humedal, Valle de Bravo, México.