



Año 18 | Número 36 | 31 de Diciembre 2021 |

| Hermosillo, Sonora, México. |

NUESTRA TIERRA

Órgano de divulgación de la Estación

Regional del Noroeste, UNAM

**BARNIZ DEL DESIERTO EN SONORA Y
CHIHUAHUA: UN ESCENARIO ANÁLOGO A**

MARTE

**¿ESTÁ EN EL ESPACIO LA CLAVE DEL ORIGEN DE LA VIDA
EN LA TIERRA?**

LOS BOSQUES TAMBIÉN SE MUEVEN

**LA LEY DEL EQUILIBRIO GENÉTICO Y SU IMPORTANCIA
EN LA CONSERVACIÓN**

**TRAYECTO DE LOS CONTAMINANTES DESDE EL RESIDUO
MINERO HISTÓRICO HASTA LOS ORGANISMOS**

EDITORIAL

Estimados lectores, en nombre del equipo de trabajo de esta revista, es un placer presentarles el ejemplar No. 36 de "Nuestra Tierra", publicación que es órgano de divulgación de la Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.



En esta edición comenzamos con la búsqueda de la vida en el espacio, Martínez-Pabello y Sedov, nos explican cómo el estudio de escenarios en la Tierra, que asemejan aquellos en Marte, permite buscar pistas sobre la vida Marciana. El magnífico escenario de los desiertos de Sonora y Chihuahua, alberga al "barniz del desierto"; una capa delgada y oscura que recubre a una roca y que está formado de minerales de arcilla y óxidos de hierro y manganeso. El barniz del desierto posee la capacidad de conservar el material orgánico y es por ello por lo que la búsqueda de estos recubrimientos en rocas en Marte, puede arrojar evidencias importantes sobre la vida en este planeta rojo. Pero ¿qué hay de la vida en la Tierra? para responder esta pregunta, Colin-García y colaboradores nos presentan un texto sobre el origen de la vida en la Tierra; cómo los cuerpos como cometas, meteoritos y polvo interplanetario, pudieron haber contribuido con moléculas orgánicas, que intervinieron en la evolución química en la Tierra y con ello en la aparición de la vida en este planeta azul.

Después de entender un poco sobre el origen de la vida, Peñalba y colaboradores, nos presentan un trabajo sobre los bosques y como el escenario del cambio climático puede producir que estos se muevan. La historia nos enseña que la vegetación no siempre ha estado en el mismo lugar, y que las plantas migran para establecerse en lugares con mejores condiciones. Las evidencias históricas proveen entonces las claves que permiten suponer lo que sucederá con el cambio climático. Después, Barájas-González y colaboradores nos presentan la Ley del equilibrio genético, un principio utilizado para describir la variación de las características genéticas de una población y que puede ayudar a comprender su afectación por las actividades humanas, planear y aplicar medidas de conservación de las especies. Finalmente, Moreno-Rodríguez y colaboradores nos narran cómo y cuán complejo es el camino de los elementos tóxicos desde los residuos mineros históricos hacia los organismos, un ejemplo de cómo los elementos también se mueven en esta Tierra y cómo potencialmente pueden afectar a los organismos.

Esperando que este número sea de su agrado, me despido en nombre del equipo de "Nuestra Tierra".

Dr. René Loredo Portales
Editor en Jefe de Nuestra Tierra

CONTENIDO

- 2 EDITORIAL
- 3 BARNIZ DEL DESIERTO EN SONORA Y CHIHUAHUA: UN ESCENARIO ANÁLOGO A MARTE.
- 6 ¿ESTÁ EN EL ESPACIO LA CLAVE DEL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA?
- 10 LOS BOSQUES TAMBIÉN SE MUEVEN
- 13 LA LEY DEL EQUILIBRIO GENÉTICO Y SU IMPORTANCIA EN LA CONSERVACIÓN
- 16 EL TRAYECTO DE LOS CONTAMINANTES DESDE EL RESIDUO MINERO HISTÓRICO HASTA LOS ORGANISMOS

Fotografía de portada: vista generada por computadora muestra, parte de Marte en el límite entre la oscuridad y la luz del día. Original de la NASA. Mejorada digitalmente por rawpixel.

DIRECTORIO UNAM

DR. ENRIQUE LUIS GRAUE WIECHERS
Rector

DR. LEONARDO LOMELÍ VARGAS
Secretario General

DR. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ ICAZA LONGORIA
Secretario Administrativo

DR. WILLIAM HENRY LEE ALARDÍN
Coordinador de la Investigación Científica

DR. RICARDO BARRAGÁN MANZO
Director del Instituto de Geología

DR. THIERRY CALMUS
Jefe de la Estación Regional del Noroeste

DIRECTORIO DE NUESTRA TIERRA

No. de Reserva de Derechos al uso exclusivo
del título 04-2004-050610455400-102
ISSN 1665-935X

DR. RENE LOREDO PORTALES
Estación Regional del Noroeste, Instituto de
Geología, UNAM
Editor Responsable

DRA. CLARA L. TINOCO OJANGUREN
Estación Regional del Noroeste, Instituto de
Ecología, UNAM

DRA. MA. CRISTINA PEÑALBA GARMENDIA
Depto. de Investigaciones Científicas y
Tecnológicas, Universidad de Sonora

DRA. AURORA MARGARITA PAT ESPADAS
Estación Regional del Noroeste, Instituto de
Geología, UNAM

DRA. BLANCA GONZÁLEZ MÉNDEZ
Estación Regional del Noroeste, Instituto de
Geología, UNAM

DRA. DENISSE ARCHUNDIA PERALTA
Estación Regional del Noroeste, Instituto de
Geología, UNAM

Editores Asociados

Para recibir esta revista vía internet escribir a:
rloredop@geologia.unam.mx
Enviar contribuciones a René Loredo Portales:
rloredop@geologia.unam.mx

BARNIZ DEL DESIERTO EN SONORA Y CHIHUAHUA: UN ESCENARIO ANÁLOGO A MARTE

Pável Uliyanov Martínez-Pabello^{1*}, Sergey Sedov¹

¹Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, CDMX.

*pavelm@geologia.unam.mx

La búsqueda de vida en Marte ha significado uno de los mayores retos científicos a lo largo de la historia de la humanidad; desde los experimentos biológicos de la misión *Viking* en 1976 hasta la misión *Perseverance* de la NASA puesta en el cráter *Jezero* en febrero de este año, se ha intentado buscar evidencia de vida pasada o presente en el planeta rojo. Sin embargo, debido a que no tenemos muestras intactas de Marte en la Tierra, es necesario estudiar lugares terrestres que se le parezcan: es el caso del desierto de Atacama en Chile, los valles secos de la Antártida, el río Tinto en España, el desierto de Mojave en E.U., el basalto de Hawaiki, etc. Entender estos escenarios análogos a Marte en nuestro planeta, es fundamental para poder buscar pistas de vida marciana que haya existido en el pasado del planeta rojo. En México los barnices del desierto de Sonora y Chihuahua pueden ser considerados un escenario análogo a Marte (Figura 1).

¿Qué es el barniz del desierto?

En 1800 el astrónomo, explorador y naturalista multidisciplinario prusiano Alexander von Humboldt, en una de sus tantas expediciones por el mundo, recorrió los caminos acuosos del río Orinoco en Venezuela. Fue durante esta travesía donde observaría y describiría por primera vez al barniz de roca: "... las rocas graníticas, se volvieron delgadas oscuras y con un recubrimiento de plumbagina..." "...poseen una riqueza en óxidos de hierro (Fe) y manganeso (Mn), si estas costras negras se formaron por una lenta descomposición de la roca granítica, bajo la doble influencia de la humedad y el sol tropical, ¿Cómo se puede concebir que estos óxidos se extiendan de manera tan uniforme en toda la superficie de las masas pedregosas y no sean más abundantes alrededor de un cristal de mica u hornblenda que en el feldespato y el cuarzo?..." (Von Humboldt, 1812). Más tarde en 1832, Charles Darwin los volvería a encontrar y describir en su viaje por Brasil, refrendando las preguntas realizadas por Humboldt décadas atrás. Pero ¿qué es este recubrimiento negro/rojizo que se forma en las rocas y que pareciera conservar su grosor con el tiempo?

El barniz del desierto (también conocido como recubierta, costra, pátina y /o carcasa), es una capa delgada y oscura de aproximadamente 200 μ de espesor que recubre a una roca principalmente en ambientes áridos. Se encuentra clasificado dentro del barniz de roca, que también puede observarse en otro tipo de ambientes más húmedos (como los encontrados por Humboldt y Darwin). El 70% de este barniz son minerales de arcilla como los filosilicatos, mientras que el 30% son óxidos de Fe y Mn; dependiendo de la proporción de estos elementos, el barniz puede tener un color más rojizo (con más Fe) o más oscuro (más Mn). Los espesores del barniz son quizás una de las más grandes incógnitas, pues se ha determinado que su tasa de crecimiento es de 1 a 40 μ ¡cada mil años! (Liu y Broecker, 2000), pudiendo guardar un registro ambiental, biológico y mineralógico de hace varios miles de años. Por otro lado, también han servido como lienzos para petrograbados que algunos grupos humanos realizaron hace milenios, haciendo que el interés por ellos se extienda a nivel antropológico.

Barniz del desierto, una herramienta en la búsqueda de vida en Marte

En la Tierra, el barniz del desierto se ha encontrado en las zonas más áridas de todos los continentes y los estudios realizados en todas las muestras recolectadas mostraron la presencia de bacterias, líquenes, polen y estructuras fúngicas, además de moléculas orgánicas como: péptidos, ácidos grasos, aminoácidos y β -carotenos, etc. Estas huellas biológicas parecen conservarse bien dentro del barniz, protegiéndose de la radiación y el intemperismo. En Marte, las misiones *Spirit*, *Opportunity* y recientemente *Curiosity* han encontrado depósitos con grandes concentraciones de Mn en lo que parecían ser recubrimientos de roca marciana (Lanza *et al.*, 2014) (Figuras 1 y 2); además, estas altas

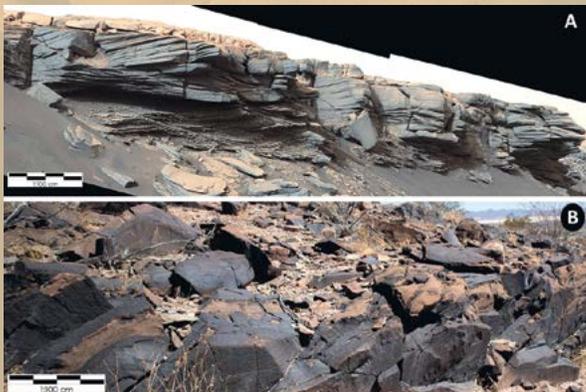


Figura 1. A. Fotografía real panorámica compuesta por 4 fotografías en la ladera llamada "Greenheugh Pediment" en Marte, la imagen tomada por el robot *Curiosity* en el 2020, muestra rocas oscuras. Imagen de NASA/JPL-Caltech/MSSS. B. Fotografía de un afloramiento en la Sierra de Samalayuca en el Estado de Chihuahua, México, en la que se observan rocas con cantidades importantes de barniz negro. Fotografía Pável Martínez.

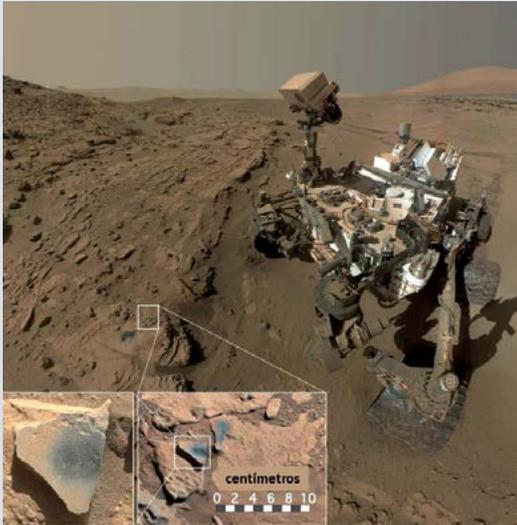


Fig. 2. Fotografía del robot *Curiosity* en la localidad de Windjana en Marte después de analizar una roca oscura donde encontró una gran cantidad de óxidos de manganeso en 2016. Imagen de NASA/JPL-Caltech/MSSS.

concentraciones de Mn también se observaron en meteoritos marcianos. No resulta complicado suponer que la formación de barnices sucedió en Marte, pues se sabe que los fenómenos eólicos y radiación predominan en todo el planeta, además de existir trazas de agua en vapor. En cambio, la capacidad de conservación de material orgánico que parece poseer el barniz ha hecho que uno de los objetivos principales de la misión *Perseverance* sea la búsqueda de recubrimientos de roca y depósitos de Mn, ya que se piensa que posibles comunidades bacterianas fijadoras de Mn y Fe pudieron habitar y formar dichas pátinas marcianas hace miles de millones de años. Una de las técnicas que el robot utilizará en Marte es la espectroscopía de plasma inducida

por láser (LIBS por sus siglas en inglés), que se encuentra en el instrumento *SuperCam* del robot; este le permitirá estudiar la composición química elemental de una roca marciana. En la Tierra, el instrumento fue calibrado utilizando los barnices del desierto como un *micropaleosuelo*, simulando los posibles barnices que *Perseverance* encontraría en Marte (Figura 3).

En México, particularmente en los desiertos de Sonora y Chihuahua, se encuentran grandes reservorios de rocas sedimentarias y graníticas cubiertas por barniz. Se sabe que de manera general poseen las mismas proporciones de arcillas y óxidos de Fe y Mn (70 y 30% respectivamente) que los barnices encontrados en otros desiertos del mundo (Martínez-Pabello *et al.*, 2021) (Figura 4); sin embargo, desde el punto de vista astrobiológico nunca han sido estudiadas. Es por esto por lo que los barnices de estos desiertos se pueden sumar a la lista de escenarios y ambientes análogos a Marte, proyectando a nuestro país y territorio como un sitio importante en el desarrollo de tecnología aplicada al estudio del espacio y de Marte.

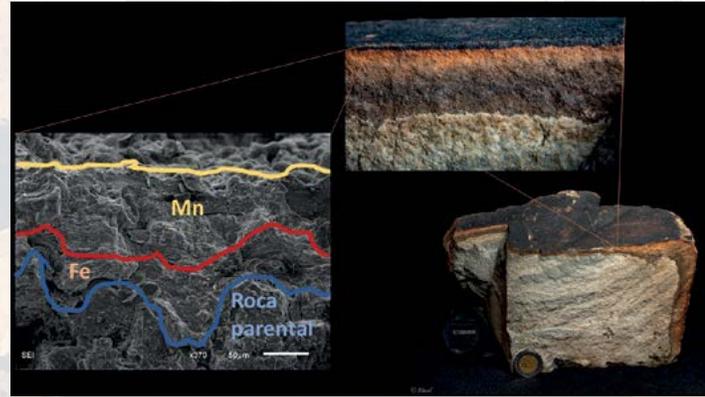


Fig. 4. A la derecha fotografía de una muestra de barniz del desierto en Sonora y a la izquierda microfotografía en corte transversal con Microscopía Electrónica de Barrido con Microsonda (SEM-EDS). Entre línea amarilla y roja se indican concentraciones importantes de manganeso (pátina oscura), entre la línea roja y azul (mayor profundidad), presencia de hierro y, finalmente, el contacto con la roca parental (línea azul). Fotografías de Pável Martínez.

Mecanismos de formación: un enigma de más de 200 años

Cuando Humboldt tomó muestras frescas de los barnices del río Orinoco, observó que no había una degradación aparente y visible de la roca original sobre la que se desarrollaba el barniz; además, los análisis geoquímicos indicaban concentraciones altas de Fe y Mn comparadas con el entorno de la roca misma. Ello le llevó a cuestionarse: ¿cómo se había concentrado tanto Fe y Mn en estos recubrimientos?, ¿qué factores físicos (temperatura, humedad, radiación, etc.) influían en la formación de estas costras?, ¿la actividad microbiana jugaba un papel importante en la formación de estas pátinas oscuras y rojizas? Sorprendentemente estas interrogantes siguen vigentes en el 2021. Durante más de 100 años, diferentes grupos científicos han intentado explicar su mecanismo de formación, agrupando hoy en día varias teorías y modelos que involucran diferentes factores. Uno de los primeros propone un proceso geoquímico abiótico para justificar las concentraciones de Fe y Mn (migración de estos elementos desde la roca parental); sin embargo, las condiciones ambientales (pH, humedad, potencial de oxidación (Eh), etc.) en las que los barnices se encontraron hacen que este modelo no sea del todo viable. Otro modelo abiótico propone que la radiación ultravioleta (UV), principalmente en ambientes áridos, oxida al Fe y Mn para después depositarse y acumularse en capas y formar el barniz. Otra propuesta inorgánica considera la disolución de silicio proveniente del polvo y otros materiales minerales, haciendo que se genere una especie de *gel* que se endurece por la radiación y se acumula; sin embargo, el problema con este modelo es que la presencia de luz es necesaria, lo cual es inconsistente con barnices encontrados en cuevas oscuras y húmedas. Con este último modelo, la formación de barniz tomaría solamente algunas décadas y no milenios, además de que la cantidad de minerales de arcilla tampoco concuerda con lo observado.



Fig. 3. Ilustración del funcionamiento del instrumento *SuperCam* (ablación láser en rocas) de la misión *Perseverance* de la NASA y fotografía del mismo instrumento durante su ensamblaje. Imagen de CNES (Centre National d'Études Spatiales, Francia).

Desde el punto de vista biológico existe un modelo que propone que el metabolismo de algunos microorganismos juega un papel importante en la acumulación de Fe y Mn. Se han observado microorganismos que crecen dentro, debajo y sobre el barniz (Proteobacteria, Cianobacteria y Actinobacteria); sin embargo, las cantidades acumuladas de Fe y Mn no concuerdan con las observadas *in situ*. Quizás el mejor modelo es uno híbrido entre los bióticos y abióticos, en donde se propone que las bacterias e incluso hongos, acumulan Fe y Mn para después ser fijados y oxidados por procesos físicos abióticos. Cabe señalar que prácticamente todos los modelos coinciden en que la actividad eólica y la radiación juegan un papel importante en la formación del barniz. Un enigma recientemente se incorporó a la discusión de las tasas de formación de esta pátina, pues se observó que se formó un barniz de 15 mm de espesor en un canal de Nueva York en ¡tan solo 100 años!. Esto provoca tener que replantear las teorías antes mencionadas y las tasas de formación propuestas hasta el momento.

Como se puede observar, el barniz parece ser formado por una mezcla de radiación, humedad, viento, minerales, polvo, tiempo y microorganismos; todos estos elementos, a excepción del último, sin duda predominan en Marte desde hace miles de millones de años. La participación de la vida en la construcción del barniz en la Tierra parece indiscutible y es aquí donde radica su importancia en la búsqueda de vida en Marte.

Barniz del desierto y sus aplicaciones

El barniz del desierto ha sido utilizado como indicador de ambientes del pasado, ya que se ha observado que su formación se puede ver favorecida bajo condiciones de mayor humedad y temperaturas menos extremas. Debido a que en su estructura posee pequeñas *microcapas*, estudiar estas laminaciones puede ayudarnos a entender cómo era el ambiente de ese sitio hace miles o incluso millones de años. Por otro lado, los barnices tienen un gran valor cultural: diferentes grupos humanos que habitaron el desierto mexicano los utilizaron como lienzos naturales para plasmar motivos y figuras que explican cómo eran su comunidad y sus creencias; además, podemos suponer el ambiente y condiciones de temperatura y humedad en los que se desarrollaron estas culturas, favoreciendo su ganadería, agricultura, asentamientos, usos y costumbres. Esta línea antropológica lleva un tiempo considerable siendo estudiada en el país, particularmente en la zona arqueológica de *La Proveedora* en Sonora. Recientemente se han clasificado y contabilizado cerca de 6000 petrograbados; estas figuras y motivos grabados en el barniz se sabe que se hicieron hace miles de años (Martínez-Pabello *et al.*, 2021) (Figura 5). Además de estudiar barnices de Sonora, actualmente nuestro grupo de trabajo estudia también zonas similares que se encuentran a lo largo y ancho de la sierra de Samalayuca en Chihuahua. Estos estudios comprenden la aplicación de diferentes técnicas analíticas usadas en Marte (Difracción de Rayos X (DRX)), LIBS y Pirólisis-Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (Pyr-GC-MS)) para determinar su aplicación en la búsqueda de vida marciana, además de estudiar su potencial antropológico y paleoambiental.

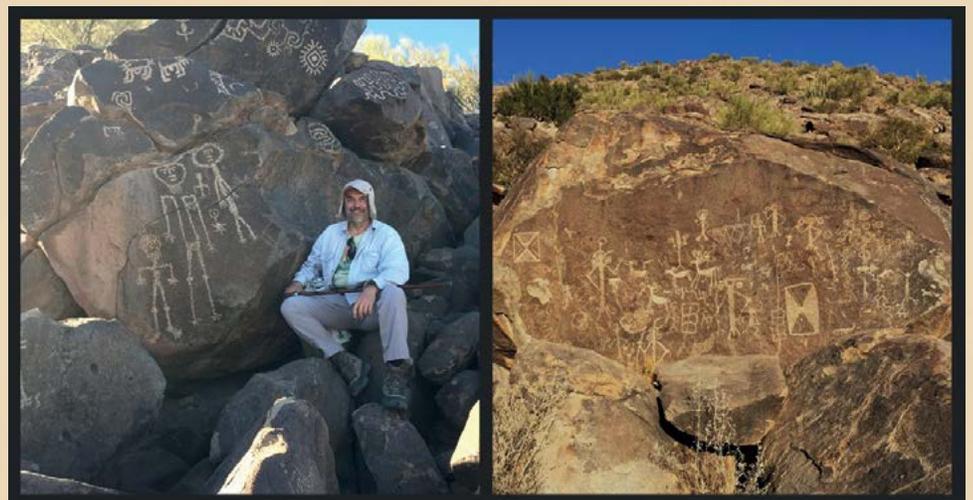


Fig. 5. Petroglifos en el barniz del desierto con diferentes motivos clasificados en zoomorfos, antropomorfos y geométricos en la zona arqueológica *La Proveedora* en el desierto de Sonora, México. Fotografías de Sergey Sedov.

Los barnices del desierto han sido considerados por algunos como el mayor enigma de la geología, con preguntas vigentes establecidas por Humboldt y Darwin hace más de 200 años; representan un nicho de estudio en México desde diferentes áreas de la ciencia. Quizás Humboldt, apasionado del espacio, entre otras cosas, descubrió sin saberlo, las estructuras que deberán ser analizadas para la búsqueda de vida o vestigios de ella fuera de la Tierra; de ser así, será, sin duda, el mayor hallazgo científico de la historia.

Referencias

- Lanza, N. L., Fischer, W.W., Wiens, R.C., Grotzinger, J., Ollila, A.M., Cousin, A., Anderson, R.B., Clark, B.C., Gellert, R., Mangold, N., Maurice, S., Le Mouélic, S., Nachon, M., Schmidt, M., Berger, J., Clegg, S.M., Froni, O., Hardgrove, C., Melikechi, N., Newsom, H.E., Sautter, V., 2014, R.B., 2014, High manganese concentrations in rocks at Gale crater, Mars: *Geophysical Research Letters*, 41, 5755-5763.
- Liu, T., Broecker, W.S., 2000, How fast does rock varnish grow?: *Geology*, 28, 183-186.
- Martínez-Pabello, P. U., Villalobos, C., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, R., Solé, J., Pi-Puig, T., Chávez-Vergara, B., Díaz-Ortega, A.G., 2021, Rock varnish as a natural canvas for rock art in *La Proveedora*, northwestern Sonoran Desert (Mexico): Integrating archaeological and geological evidences: *Quaternary International*, 572, 74-87.
- Von Humboldt, A., 1812. Personal narrative of travels to the equinoctial regions of America during the years 1799-1804, von Humboldt, A., Bonpland, A., (eds.): Escrito en francés por Alexander von Humboldt V. II (Traducido y editado por T. Ross en 1907): London, George Bell & Sons.

¿ESTÁ EN EL ESPACIO LA CLAVE DEL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA?

¹María Colín García, ²Hanna Laura López-Esquível Kranksith, ¹Adriana L. Meléndez López, ¹Pável U. Martínez-Pabello

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

²Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

*mcolin@geologia.unam.mx

Resumen

La hipótesis de la evolución química surgió para explicar el origen de la vida en la Tierra a través de procesos físicos y químicos. El estudio en el laboratorio de la síntesis de moléculas orgánicas, su estabilidad, y la formación de moléculas más complejas constituye el área de estudio de la química prebiótica. En la Tierra primitiva la evolución química pudo darse en diferentes ambientes, como la atmósfera o los sistemas hidrotermales, pero los cuerpos extraterrestres pudieron ser cruciales para potenciar el proceso. Se ha comprobado que diferentes cuerpos extraterrestres contienen grandes cantidades de materia orgánica y es muy posible que ésta llegara a la superficie de la Tierra, aumentando el número y la diversidad de las moléculas que se habían generado ya en el planeta. En este trabajo se presenta una breve descripción de la aportación de cuerpos como cometas, meteoritos y polvo interplanetario en la química prebiótica terrestre.

Introducción

La primera hipótesis científica que intentó explicar cómo se originó la vida fue propuesta por Oparin y Haldane a principios del siglo XX. Ambos autores, de manera independiente, propusieron que la vida surgió como resultado de eventos físicos y químicos, durante los cuales se dio la síntesis, acumulación y organización de compuestos orgánicos, a este periodo le llamamos evolución química. De acuerdo con esta hipótesis, las reacciones químicas entre las moléculas orgánicas sencillas fueron las responsables de que se originaran moléculas más complejas (como proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos etc.) que constituyen a los seres vivos actuales. La propuesta permaneció sin ser probada durante varios años, hasta que, a mediados de los años 50, con el experimento de Miller-Urey surgieron los primeros datos experimentales y, con ellos, nació el campo de la química prebiótica. En este experimento, Miller y Urey demostraron la formación de moléculas orgánicas sencillas (aminoácidos) a partir de compuestos inorgánicos simples (Figura 1).

Se puede decir que la química prebiótica es "la disciplina que estudia la síntesis, estabilidad y aumento de la complejidad de las moléculas orgánicas". Este campo científico ha crecido significativamente en los últimos años, los experimentos en laboratorio estudian cómo se generan moléculas orgánicas, reproduciendo diferentes condiciones y ambientes que se encontraban en la Tierra primitiva. Por ello, cuando se simulan las reacciones de síntesis prebiótica, éstas deben ser viables desde el punto de vista geológico; es decir, deben reproducir, hasta donde sea posible, los ambientes que existían en la Tierra cuando ocurrió la evolución química. Este periodo debió presentarse luego de la formación del sistema solar, que dio inicio hace unos 4600 millones de años (Ma), justo cuando la superficie del planeta se enfrió y se consolidó la primera corteza terrestre, una vez que hubo agua en estado líquido.

La evolución química pudo ocurrir en distintos ambientes de la Tierra primitiva. Los principales lugares propuestos son: la atmósfera, en la que abundaban las reacciones en fase gaseosa, promovidas por descargas eléctricas y por la luz UV; el océano, el lugar considerado por Oparin y Haldane como el sitio clave para la síntesis de moléculas orgánicas y la difusión de éstas; los manantiales hidrotermales, sitios con abundante energía y moléculas orgánicas; y las interfases, formadas por los puntos de contacto entre las diferentes geosferas. Existen fuertes razones para sugerir

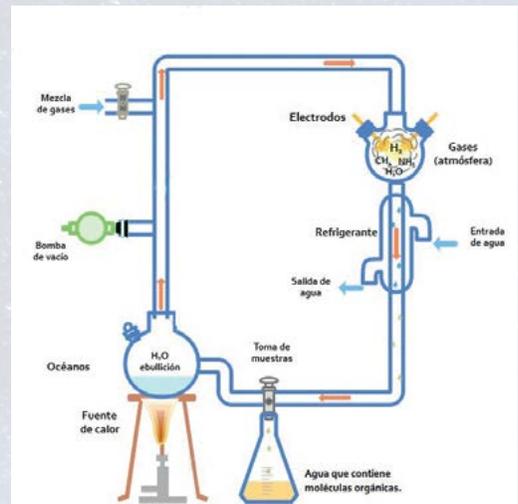


Figura 1. Experimento de Miller-Urey. Éste representa la primera evidencia de la formación de moléculas orgánicas a partir de precursores muy sencillos. En el experimento se simulaba el océano y la atmósfera de la Tierra primitiva. Luego de que los gases que representaban la atmósfera (H₂, CH₄, NH₃ y H₂O) se sometían a descargas eléctricas se formaban moléculas orgánicas, que se condensaban y podían ser recuperadas. La identificación se realizó mediante cromatografía de papel.

que los minerales, en particular los filosilicatos, desempeñaron un papel catalizador crítico en la síntesis orgánica de compuestos prebióticos en diferentes ambientes; además, los minerales pudieron servir como moldes, para el ensamblaje de moléculas, o bien como escudos, protegiendo a las moléculas orgánicas de la descomposición causada por distintas fuentes de energía. Los filosilicatos pudieron ser muy abundantes en la superficie de la Tierra primitiva durante una época llamada el Hadeano, debido a la alteración hídrica de silicatos.

Sin embargo, la evolución química, no sólo debió ocurrir en la Tierra, ésta pudo presentarse y verse favorecida también en ambientes extraterrestres como cometas, meteoritos y granos de polvo interplanetario. A la fecha, se han detectado diferentes moléculas orgánicas en los meteoritos y cometas, éstas podrían ser consideradas precursoras de moléculas orgánicas más complejas. Además, estos cuerpos están constantemente expuestos a diferentes tipos de energía y contienen gran diversidad de minerales (superficies) capaces de catalizar reacciones.

Durante las primeras etapas de formación del sistema solar, el material que no se integró a los planetas o sus satélites y que permaneció en el espacio, impactó la superficie de los planetas en formación incluyendo a la Tierra. Este material, estaba constituido por cometas, asteroides y el polvo interplanetario (Figura 2). Los impactos fueron tan frecuentes y energéticos que el impacto podía iniciar reacciones químicas, pero estos impactos también trajeron la materia orgánica contenida en ellos. En este trabajo se presenta un panorama general de estos cuerpos y del papel que pudieron jugar en los procesos prebióticos en la Tierra.



Figura 2. Diferencia entre asteroide, cometa, meteoroide y meteorito. Todos son cuerpos que forman parte del sistema solar y se distinguen por su tamaño y composición. Los meteoritos son cuerpos que alcanzan la superficie de un planeta, en nuestro caso la Tierra.

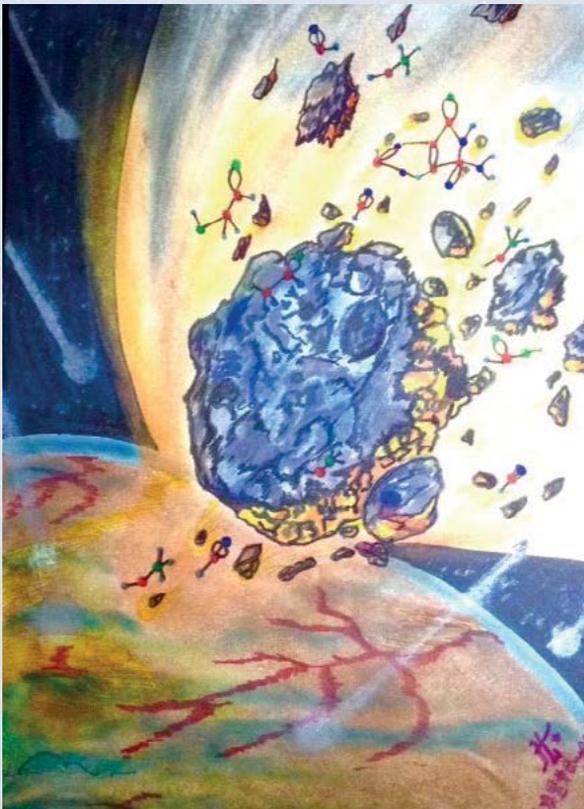


Figura 3. Representación artística del aporte de materia orgánica a la Tierra primitiva por IDPs, cometas y meteoritos. Se muestran algunas moléculas orgánicas (dibujo de HLEEK).

Formación del sistema solar: El origen

El sistema solar se formó hace aproximadamente 4,600 Ma, cuando una porción de una nube interestelar densa comenzó a colapsar, de este proceso surgió el Sol, los planetas, sus satélites, cometas y los precursores de los meteoritos. Estos cuerpos extraterrestres han sido considerados como una fuente importante de materia orgánica para la Tierra primitiva; la evidencia observacional y la identificación del material examinado, confirma que todos ellos son ricos en materia orgánica.

Existen, sin embargo, algunos inconvenientes para esta propuesta. Uno de ellos es que la entrada de estos cuerpos a través de la atmósfera provocaría fricción en los mismos. El calor generado causaría la descomposición de la materia orgánica que tiene bajos puntos de fusión y, por tanto, se destruye a temperaturas más bajas que los materiales inorgánicos. Sin embargo, hay evidencia de que los meteoritos al caer a la Tierra conservan una buena parte de su material intacto. Por ejemplo, cuando se analizó el meteorito de Murchison se detectaron diversas moléculas orgánicas en él. Otro problema es que la fricción podría haber provocado el estallido de los cuerpos más grandes, los cometas, por ejemplo. Sin embargo, esto no ocurre con los cuerpos más pequeños (<1 km) que sí podrían haber depositado su contenido en la superficie planetaria. Por ello, es muy probable que los cuerpos extraterrestres hayan contribuido significativamente a la química prebiótica terrestre. En la siguiente sección hablaremos brevemente de los meteoritos, cometas y polvo interplanetario y discutiremos brevemente su papel específico en la evolución química terrestre (Figura 3).

Meteoritos, memoria del sistema solar

Los meteoritos (también llamados meteoritas) son objetos que se formaron más cerca del Sol que los cometas y están térmicamente más modificados que aquellos. Existen muchos tipos de meteoritos, pero para los estudios de química prebiótica destacan las condritas carbonosas por dos razones fundamentales: 1) contienen una gran cantidad de carbono (>3%), en forma de carbonatos o de compuestos orgánicos; y 2) se formaron junto con el sistema solar, al igual que los cometas y, por tanto, son capaces de contener información sobre el tipo de procesos que ocurrieron en la Tierra primitiva.

Las condritas carbonosas reciben este nombre debido a que contienen mucho material orgánico, mismo que puede ser dividido en: 1) carbono insoluble (entre el 70 y el 90% del material carbonoso total), está constituido mayoritariamente por un componente macromolecular llamado kerógeno, que tiene una estructura química muy compleja; y 2) carbono soluble, éste puede ser extraído con disolventes a partir de muestras de meteoritos pulverizadas. Existen en el mundo grupos de investigación dedicados exclusivamente a entender la naturaleza del carbono en estos cuerpos y analizan sus componentes en el laboratorio.

Los meteoritos más estudiados han sido el de Murchison, el de Murray, el de Orgueil y el meteorito de Allende. Este último meteorito es hasta ahora el más grande que haya sido encontrado en la Tierra y el más antiguo, además, debe su nombre al poblado en donde fue encontrado en el estado de Chihuahua, México.

Hay una diversidad impresionante de moléculas orgánicas en los meteoritos, entre ellas: hidrocarburos, ácidos carboxílicos, aminoácidos, aminas, amidas, polioles, iminoácidos, entre otros. La importancia de los meteoritos en los procesos prebióticos es que muchos de los compuestos orgánicos que han sido detectados en ellos son también comunes

en las biomoléculas terrestres; es decir, en las moléculas que forman a los seres vivos. Dentro de estos compuestos hay una gran variedad de aminoácidos, que son las unidades que integran a las proteínas. Las moléculas encontradas en las condritas carbonosas pueden formarse fácilmente por una síntesis abiótica, de tal forma que no se necesita la intervención de seres vivos. Es curioso que los procesos biológicos que conocemos ocurren con un número limitado de moléculas, mientras que, el número de moléculas orgánicas encontradas en los meteoritos es mucho mayor. Por ejemplo, las proteínas están constituidas por 20 diferentes tipos de aminoácidos, pero en los meteoritos se han identificado más de 80.

Los cometas y la química fría

Los cometas se formaron en las regiones más lejanas del sistema solar, donde las temperaturas son muy bajas. Se formaron a partir de remanentes del sistema solar que condensaron hielos, formando los cometesimales (cuerpos precursores de los cometas). Algunos cometesimales permanecieron cerca

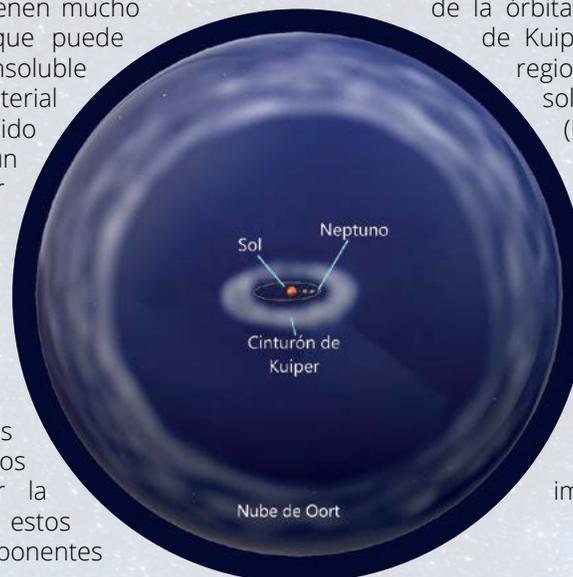


Figura 4. Los cometas se encuentran almacenados en dos reservorios: el Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort. El cinturón de Kuiper se localiza fuera de la órbita de Neptuno, mientras que la Nube de Oort está mucho más alejada, en los límites del sistema solar, a aproximadamente un año luz del Sol. Los astrónomos piensan que los cometas de periodo largo, como el Halley, proceden de la Nube de Oort.

de la órbita de Neptuno, en el cinturón de Kuiper; otros fueron expelidos a regiones más externas del sistema solar, a la llamada Nube de Oort (Figura 4). Los cometesimales aún permanecen en estas órbitas, pero son sensibles a los efectos gravitacionales y pueden ser atraídos hacia el Sol. El acercamiento a la estrella, y el consecuente calentamiento, provoca la vaporización de los hielos contenidos en estos cuerpos; los vapores al desprenderse originan la imagen típica de un cometa.

Los cometas son relevantes para la química prebiótica pues las moléculas orgánicas que se encontraban en la nebulosa solar pudieron conservarse en ellos. Al ser los cuerpos con menor alteración térmica han sido considerados por mucho tiempo como la memoria del sistema solar temprano. Por ello, es sumamente importante conocer la composición y estructura de los cometas. Las diferentes agencias espaciales en el mundo, envían sondas a explorarlos, como la misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea, o la Deep Impact/EPOXI, de la NASA.

Los cometas tienen, como las nubes interestelares, polvo y un componente congelado. La composición de los hielos cometarios se determina por sublimación; cuando el cometa se mueve hacia el interior del sistema solar sus componentes se calientan y se

desprenden. En ese momento, es posible examinarlos por espectroscopía, usando telescopios. La cantidad de moléculas orgánicas que se ha podido identificar en los cometas es mucho menor que la que se encuentra en los meteoritos (aproximadamente 20), dentro de los que se encuentran: alcoholes, amidas, aminas, cetonas e isocianatos. Dado que están constituidos por hielos, las reacciones químicas tienen velocidades menores que las que ocurren a temperatura ambiente o a altas temperaturas. Esto explicaría la baja cantidad de moléculas orgánicas encontrada en los cometas, comparada con la hallada en meteoritos.



Partículas de polvo interplanetario

Las partículas de polvo interplanetario (IDPs) son fracciones diminutas de cometas y asteroides, éstas se estudian cuando son colectadas en la estratósfera. Los análisis en el laboratorio indican que las IDPs representan el material más primitivo del sistema solar. Además de ser muy antiguas, las IDPs son relevantes para la química prebiótica terrestre por su pequeño tamaño. Como explicamos antes, los cuerpos pequeños sufren poca alteración al entrar en la atmósfera. Por ello, las IDPs conservan la materia orgánica que contienen y pueden depositarla en la superficie terrestre. Aunque las técnicas analíticas para estudiar estas partículas todavía no son lo suficientemente sensibles, se ha determinado que el contenido de carbono es alto, aproximadamente un 12% en peso.

No se conoce todavía la composición de la materia orgánica en las IDPs, pero se sabe que pueden contener carbón amorfo. Por su origen, se piensa que los compuestos orgánicos en las IDPs son similares a los encontrados en meteoritos. Además, mediante experimentos que simulan la materia orgánica de las IDPs se han sintetizado moléculas orgánicas semejantes a las de las condritas carbonosas y sus características son muy similares a las de los meteoritos. Esto implicaría que los meteoritos de una forma muy sutil depositaron sus componentes en la superficie de la Tierra.

Conclusión

Las moléculas orgánicas se sintetizan en diferentes cuerpos del sistema solar, incluyendo las regiones cálidas y las frías; los cuerpos grandes y los pequeños. De hecho, la evolución química pudo llevarse a cabo en cualquier sitio que contara con los elementos básicos: materia, energía, superficies sólidas y tiempo. Los cuerpos extraterrestres están llenos de materia orgánica y se encuentran expuestos a diferentes fuentes de energía, por esta razón cada vez hay más estudios para entender el papel que jugaron en el proceso de evolución química en la Tierra. La contribución de los cuerpos extraterrestres a la química prebiótica es una idea vigente, en la que se necesita seguir trabajando para entender cómo están hechos estos cuerpos, cuál es su estructura y composición y cómo pudieron aportar elementos básicos para que ocurriera uno de los eventos más maravillosos en el Universo: la aparición de la vida.

Lecturas recomendadas

- Bernstein M., 2006, Prebiotic Materials from on and off the Early Earth: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361, 1689-1702.
- Glassmeier K.H., Boehnhardt H., Koschny D., Kührt E., y Richter I., 2007, The Rosetta Mission: Flying Towards the Origin of the Solar System: *Space Science Reviews*, 128, 1-21.
- Greenberg J.M., y Mendoza-Gómez C. X., 1992, The Seeding of Life by Comets: *Advances in Space Research*, 12, 169-180.
- Irvine W.M., 1998, Extraterrestrial Organic Matter: A Review: *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 28, 365-383.
- Pizzarello S., Cooper G., y Flynn G., 2006, The Nature and Distribution of the Organic Material in Carbonaceous Chondrites and Interplanetary Dust Particles: *Meteorites and the Early Solar System II*, 1, 625-651.



LOS BOSQUES TAMBIÉN SE MUEVEN



M. Cristina Peñalba^{1*}, Iván Rosario Espinoza-Encinas² y Carlos Alberto Galaz-Samaniego³

¹Universidad de Sonora, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Av. Luis Donaldo Colosio s/n, Edificio 7G, Col. Centro, Hermosillo, Sonora 83000

²Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Edificio 3C, Col. Centro, Hermosillo, Sonora 83000

³Universidad de Sonora, Doctorado en Biociencias, Av. Luis Donaldo Colosio s/n, Edificio 7G, Col. Centro, Hermosillo, Sonora 83000

*cristina.penalba@unison.mx

Uno se pregunta qué ocurrirá con los bosques en un escenario de cambio climático. Los bosques (Figura 1) son reservorios de la diversidad del planeta y nos ofrecen múltiples servicios, entre ellos, el mantenimiento del suelo y el equilibrio del ciclo del agua. Además, los árboles tienen la capacidad de absorber el CO₂ atmosférico y asimilarlo para desarrollar sus hojas, ramas, troncos y raíces, contribuyendo con ello a la disminución de la concentración de este gas de efecto invernadero en la atmósfera, regulando así la temperatura de la Tierra.

En Sonora, en lo alto de las sierras, por encima de los 1000 m de altitud, se extienden ahora bosques de encino, bosques mixtos de pino y encino, y bosques de coníferas (pinos, pinabetes, abetos...) que crecen en climas templados a fríos. ¿Qué será de ellos si cambia el clima y se vuelve más cálido? Los árboles no pueden desplazarse como lo harían los animales, provistos de capacidad de movimiento. Estos últimos podrían trasladarse a lugares más favorables y mantenerse vivos. Pero ¿cómo podría un árbol desprenderse de sus raíces y partir a otro lugar? Quizá debamos buscar la respuesta en el pasado.



Figura 1. Bosque de pinos (*Pinus sylvestris*) en Peña Lisa, Acebedo (Álava, País Vasco). Fotografía de Manuel M. Uribe-Etxebarria Garmendia.

¿Qué nos dice la historia de los bosques?

El clima siempre ha sido variable y los árboles han tenido que adaptarse numerosas veces a los cambios climáticos. Además, es interesante saber que en la naturaleza existe un registro de los cambios que se dieron y las especies de árboles que se fueron sucediendo en el transcurso del tiempo. Así, gracias a la presencia de fósiles de plantas tropicales o templadas en lugares que hoy muestran un clima diferente, podemos intuir que la vegetación no siempre fue la misma en un mismo lugar (Figura 2).

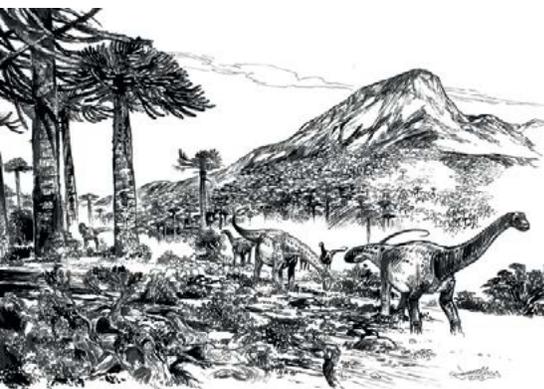


Figura 2. Idealización de bosques de araucarias (*Araucariacites australis*) en la Antártida, hace alrededor de 66 millones de años, antes de que el continente fuera cubierto por hielo. Dibujo del Dr. James McKay (University of Leeds, UK) publicado en el artículo 'Latest Cretaceous-earliest Paleogene vegetation and climate change at the high southern latitudes: palynological evidence from Seymour Island, Antarctic Peninsula' de VC Bowman, JE Francis, RA Askin, JB Riding y GT Swindles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol 408, pp.26 - 47, 2014. Reproducido con el permiso del editor de la revista y del autor del dibujo.



Figura 3. Improntas fósiles de hojas de *Cordaites lungatus*, una de las plantas gimnospermas arbóreas extintas que conformaron los primeros bosques de la Tierra, en los períodos Carbonífero y Pérmico (hace 250 a 350 millones de años). Sus troncos pudieron medir hasta 30 metros de altura y 1 m de diámetro. Fotografía de Jebulon, tomada en 2010 del ejemplar del 'Jardin des Plantes' de París. Wikipedia.

Cambios ambientales bruscos y extinción

Los cambios ambientales muy intensos y/o muy rápidos llevan a menudo a la desaparición de las especies, por pérdida fatal de los individuos de todas las poblaciones de esas especies, lo que se denomina extinción. Por ejemplo, plantas primitivas como *Cordaites* o *Sigillaria* (Figura 3) dominaron los paisajes del Carbonífero, hace más de 300 millones de años (Ma), pero se extinguieron, dando paso a la expansión de otras plantas arborescentes que ocuparon sus nichos (sus espacios de habitación) y, a su vez, fueron remplazadas sucesivamente por otras especies, hasta llegar a las que conforman los bosques actuales. A lo largo del tiempo geológico hubo muchos eventos de extinción que afectaron a especies de árboles, pero también en el presente hay especies vegetales en peligro de extinción, cuya distribución geográfica es cada vez más restringida.

Cambios lentos, refugios y migración

Cuando las variaciones son más lentas o las especies más resilientes (resistentes a los cambios), permiten que haya una respuesta de las poblaciones de árboles: algunos individuos mueren, pero la población se mantiene, logra permanecer en alguna localidad favorable que denominamos refugio (Rull, 2009), donde persiste mientras duran las condiciones desfavorables alrededor. A veces, cuando las condiciones vuelven a ser favorables después de un cambio climático, la población puede reproducirse, ocupar nuevos lugares, y expandir su área; hablamos entonces de migración.



Imagen: Pixabay

¿Cómo migran las plantas?

Para reproducirse y asegurar la descendencia, muchas plantas (las denominadas espermatofitas o fanerógamas) producen semillas. Éstas, al germinar, dan lugar a una plántula. Cuando las condiciones ambientales son favorables, las plántulas se desarrollan y dan lugar a un árbol, arbusto o hierba, manteniendo la población que conforma el bosque, matorral o pradera. ¿Qué pasa si cambia el clima? Si la población de árboles, por ejemplo, cubre una franja altitudinal (es decir, crece a una determinada elevación, entre dos límites de altitud definidos) y ocurre un calentamiento climático, los árboles tenderán a establecerse a elevaciones mayores, para buscar ambientes que no estén tan cálidos (Figura 4). Para lograrlo, producirán semillas que se depositarán en todas direcciones, pero solo germinarán aquellas que caigan en un medio favorable. Las semillas que germinen junto a los árboles de mayor elevación, en altitudes un poco superiores y protegidas, no sufrirán de tan altas temperaturas y darán lugar

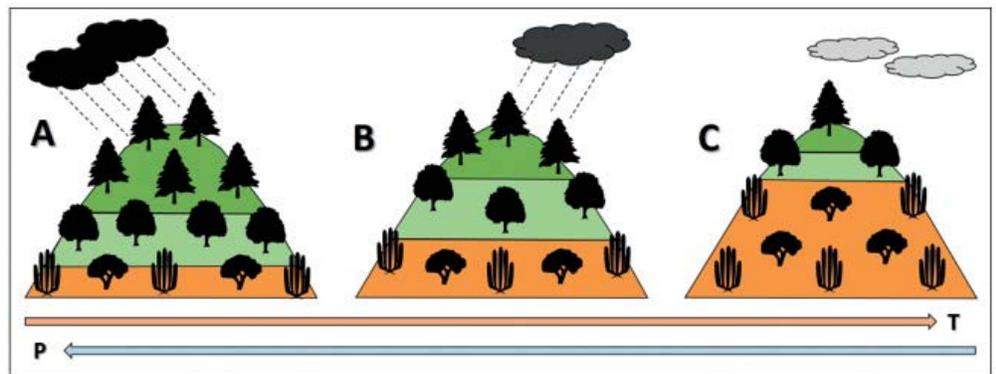


Figura 4. Modelo de migración altitudinal de los bosques (verde oscuro, pino; verde claro, encinar; naranja, matorral tropical) en respuesta a cambios climáticos. De A a C, la temperatura (T) aumenta y la precipitación (P) disminuye. En A, alta precipitación y baja temperatura permiten la expansión de bosques de coníferas y encinares a baja altitud. En C, disminución de la precipitación y aumento de la temperatura, generan una expansión del matorral tropical y pérdida de la superficie boscosa, relegada a las cimas más altas. Entre A y C pueden sucederse múltiples situaciones intermedias (B).

a plántulas, y luego madurarán, generando nuevos árboles un poco más allá del límite anterior del bosque. Esos árboles madurarán a su vez y generarán, ladera arriba, nuevas plántulas y extenderán de nuevo el límite superior del bosque, y así sucesivamente se modificará el área cubierta por la población de esa especie en el bosque.

Al contrario, a baja altitud, en el límite inferior del bosque, el calentamiento ocasionará un ambiente desfavorable para las semillas que se hayan producido, los viejos árboles morirán sin dejar descendencia y sus nichos serán ocupados por otras especies de climas más tropicales. Los límites altitudinales superior e inferior de la población de árboles de dicha especie en el bosque habrán ascendido y la población habrá "migrado" hacia la cima de la montaña. Así, se habla de una migración poblacional, en este caso altitudinal.



Figura 5. Grano de polen de abeto, *Abies*, conífera que fue más abundante en los bosques mixtos de la Sierra Madre Occidental en los últimos miles de años, cuando el clima era más fresco y húmedo en dicha región. Los granos de polen, fosilizados en sedimentos milenarios de ciénegas, muestran que los abetos crecían en esas localidades donde hoy están ausentes. Fotografía de Carlos A. Galaz Samaniego.

ya no se encuentran en esas elevaciones bajas; el matorral tropical se extendió en esos valles y laderas. Con el calentamiento postglaciar, los bosques templados migraron, se retiraron progresivamente hacia mayores altitudes y latitudes, buscando condiciones climáticas más frías y húmedas. Algunas especies están ya muy restringidas en su distribución, con presencia muy puntual, como el abeto *Abies concolor* (Figura 5), especie en riesgo, sujeta a protección especial (NOM-059-SEMARNAT-2010), que crece solo en enclaves muy aislados del bosque mixto de coníferas del noreste de Sonora, en el oeste de Chihuahua y en Baja California.

Cambio climático y deforestación como amenazas

En la actualidad, nos encontramos en un contexto de cambio climático. Desde la denominada Revolución Industrial en el siglo XIX, y particularmente después de los años 80's del siglo XX, la Tierra ha entrado en una dinámica de aumento de la temperatura. Cada década que pasa está siendo más cálida que la década anterior. Todos los modelos climáticos predicen un aumento progresivo de la temperatura del presente al año 2050. Será un cambio muy rápido y afectará a los bosques (Figura 6). ¿Se perderán las especies templadas y templado-frías de las sierras en México que ya solo se encuentran en localizados refugios?

A esta amenaza se añade que grandes extensiones de bosques y selvas se han perdido en las últimas décadas debido a la deforestación. En México, la superficie se ha reducido en una tercera parte en los últimos 30 años. Son urgentes las medidas a tomar, para un buen manejo forestal en el país. Debemos considerar prácticas como la restauración y protección de áreas naturales. Estas últimas nos permitirán conservar la biodiversidad. Se debe pensar también en posibles acciones como la conservación de algunas especies a través de migración asistida (reforestación en áreas cuyo clima vaya a ser favorable para esas especies en un futuro; Sáenz-Romero et al., 2016), pero debemos pensar en otras. Los bosques pueden desplazarse, pero tenemos que ayudarlos a establecerse en los nichos que les serán favorables.

Referencias

- Ortega-Rosas C. I., Peñalba M. C., Guiot J., 2008, Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico, based on modern and fossil pollen data: Review of Palaeobotany and Palynology, 151(1-2), 1-20.
- Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R. A., Joyce D. G., Beaulieu J., Clair J. B., Jaquish B. C., 2016, Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change: Revista Chapingo, 22(3), 303-323
- Rull V., 2009, Microrefugia: Journal of Biogeography, 36(3), 481-484

La migración de los bosques en América del Norte

A partir del análisis de polen fósil (Figura 5, Cápsula 1), se tienen registrados movimientos de poblaciones de plantas en todas las latitudes de la Tierra. Al finalizar el último período glacial, hace 11,700 años, el retiro de los hielos favoreció un avance de los bosques que se calculó en cientos de metros por año en el este de Norteamérica. Recientemente, con base en estudios moleculares y considerando la posibilidad de que hayan existido refugios crípticos (de los que no se tiene una evidencia directa), se ha contemplado que esas velocidades de migración fueran inferiores a 100 metros por año.

Por otra parte, en los siglos XVII y XVIII, ocurrió otro período frío denominado Pequeña Edad de Hielo que hizo descender de nuevo en altitud el límite del bosque en las cordilleras. Esas respuestas se han registrado de manera reiterada, con mayor o menor intensidad a lo largo del tiempo, en todas las latitudes. En regiones del Desierto de Sonora, cubiertas hoy por matorral desértico, el pasado milenario nos indica que hubo bosques templados abiertos. De igual modo, en la Sierra Madre Occidental, los bosques de pino y encino descendieron varios cientos de metros en altitud, cubriendo zonas mucho más extensas que las actuales (Ortega-Rosas et al., 2008). Hoy en día,

La historia centenaria y milenaria de nuestros bosques se conoce a través de los restos de árboles que se conservaron en lugares con características excepcionales como ciénegas, lagos, pantanos, mismos que contienen aún macrorrestos (hojas, frutos, semillas, fragmentos de carbón...), microrrestos (granos de polen), e incluso moléculas orgánicas, que son identificables y nos indican qué comunidades conformaban la vegetación de esos lugares en un pasado remoto.

Cápsula 1.

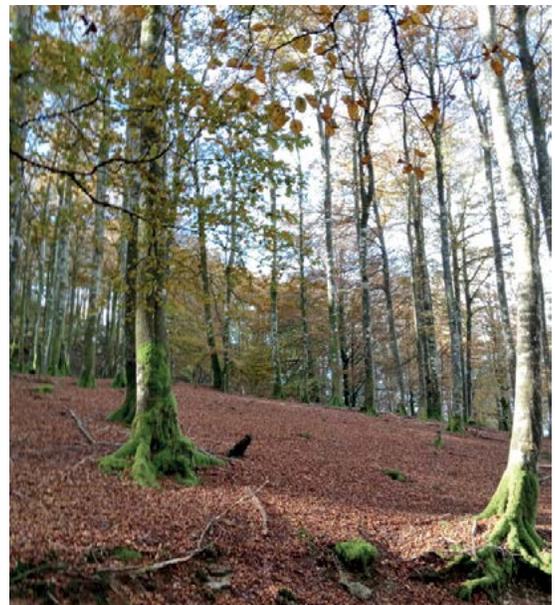


Figura 6. Bosque de hayas, *Fagus sylvatica*, en el puerto de Huitzi, Navarra. Los hayedos requieren un clima templado y húmedo. Un aumento de temperatura en el contexto actual de cambio climático global puede restringir su extensión y área de distribución. Fotografía de Manuel M. Uribe-Etxebarria Garmendia.

LA LEY DEL EQUILIBRIO GENÉTICO Y SU IMPORTANCIA EN LA CONSERVACIÓN

Daniela Barajas-González, Marcela De la Vega-Machado, Marisol Andrea Paredes-Gallardo, Nohelia Pacheco-Hoyos, Alejandro Varela-Romero y José Manuel Grijalva-Chon*.

Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Ave. Colosio s/n, Col. Centro. Hermosillo, Sonora, México CP 83000.

*manuel.grijalva@unison.mx

Las modificaciones ocasionadas al medio ambiente por obra del ser humano fragmentan los hábitats naturales de muchas especies alrededor del mundo. Así como las islas se encuentran aisladas en los océanos, en el medio terrestre hay áreas que están aisladas por obras de infraestructura y modificaciones del entorno natural, como la construcción de autopistas, el crecimiento de las áreas urbanas, el incremento de la superficie dedicada a la agricultura, la deforestación de los bosques, la explotación minera y la contaminación de las aguas y superficies terrestres. Lo anterior tiene fuertes implicaciones que comprometen seriamente la conservación de muchas especies, ya que es común asociar esto a disminuciones poblacionales por la carencia de los medios naturales que dan soporte a la vida, el incremento de enfermedades y la **erosión genética** (ver en el cuadro del glosario la definición de los conceptos marcados en negritas). Además de lo anterior, la pesca y la caza desmedidas vienen a sumarse al listado de las acciones negativas de la especie humana hacia la integridad de la biodiversidad. Si consideramos que México es el quinto país con mayor biodiversidad, el compromiso para conservarla es alto, pero no se ha generado la suficiente información de base para fundamentar los planes de manejo necesarios.

En la conservación de los **recursos genéticos**, el principal objetivo consiste en preservar la variabilidad dentro de las poblaciones, todo esto bajo la hipótesis de la relación entre la variación genética y la viabilidad de la población. Es por ello que se hace necesario cuantificar dicha variabilidad, con el fin de lograr realizar un mejor y más acertado manejo de la conservación. Consecuentemente, una de las principales etapas de un programa de conservación, consiste en la evaluación de la diversidad genética y su distribución en la población (Posdărăscu, 2017). ¿Pero cómo podemos evaluar la magnitud del cambio de la estructura genética poblacional de las especies que puede deberse a las actividades humanas? Aquí es donde entra en juego la **genética de poblaciones** y su concepto fundamental: la Ley del Equilibrio Genético.

La Ley del Equilibrio Genético

En 1908, el matemático inglés Godfrey H. Hardy y el médico alemán Wilhelm Weinberg desarrollaron de manera independiente un modelo teórico partiendo de la base de que la **herencia mendeliana** por sí misma no genera cambio evolutivo. Este modelo es lo que conocemos como la Ley del Equilibrio Genético, o Ley de Hardy-Weinberg (LHW) y ha permanecido hasta hoy como la base para entender la manera en cómo y por qué cambian las **frecuencias alélicas y genotípicas** en una población a lo largo de las generaciones. El modelo supone que para una población de cualquier especie con una abundancia

que tienda al infinito, con reproducción al azar, sin migración, sin mutaciones, sin selección natural y sin traslape generacional, las frecuencias alélicas y genotípicas de la población han de permanecer constantes. Esto implica que tiene que haber una o varias fuerzas evolutivas que actúen sobre la población para que esas frecuencias dejen de ser constantes.

La LHW es representada por dos ecuaciones, tomando como base a un gen con dos formas alternas o **alelos** (por ejemplo, en el chícharo, el gen que controla el color de la semilla tiene dos formas alternas: verde y amarillo). La primera ecuación es:

$$p + q = 1$$

donde la letra p representa la frecuencia del alelo 1 y q la frecuencia del alelo 2. Estas frecuencias alélicas predicen las frecuencias genotípicas, de tal forma que con esos valores podemos determinar las frecuencias de los genotipos con la ecuación:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

donde p^2 representa el **homocigoto** del alelo 1, $2pq$ representa el **heterocigoto** y q^2 representa el homocigoto del alelo 2. Estas frecuencias genotípicas predichas o esperadas por la LHW representan los valores en un estado de **equilibrio genético**, y deben de ser contrastados estadísticamente con los valores observados. Si existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores observados y los esperados, entonces significa que se está violando algunos de los supuestos que fundamentan el modelo del

equilibrio genético (Kolbe, 2010). Por ejemplo, una drástica disminución poblacional de una especie, que sea causada por alguna de las actividades humanas mencionadas en el primer párrafo, puede verse reflejada en el contraste de los valores estadísticos obtenidos a través del modelo del equilibrio genético.

Aplicaciones prácticas

En las especies que se han visto negativamente afectadas por las actividades humanas mencionadas al inicio de este escrito, la abundancia o número de individuos es el atributo poblacional que sufre un impacto directo e inmediato. Esto

rompe el equilibrio genético y el impacto se puede estimar contrastando estadísticamente los valores observados y esperados de los heterocigotos, ya que la heterocigosis es un buen estimador de la diversidad genética. Por ejemplo, en el Alto Golfo de California, la pesca desmedida del chano (*Micropogonias megalops*) hizo colapsar la pesquería en el 2002. Un estudio poblacional con muestras tomadas en 1998 y 1999 en dos localidades del área (Fig. 1) reveló la gran afectación sobre la heterocigosis, ya que de esperarse valores de 7% y 6% de acuerdo a la LHW, se encontraron valores de 1.2% y 0.8% (Varela-Romero y Grijalva-Chon 2004).

Una actividad muy común para establecer pesquerías artesanales y deportivas en las presas de agua dulce es fomentar y mantener especies de peces atractivas para esta actividad, como tilapias, lobinas, bagres, etc. Pero una estrategia mal diseñada puede conducir a un fracaso, como sucedió en la Presa Benito Juárez en el estado de Oaxaca. Los pescadores lugareños se quejaban de la mala condición de la población de tilapia (*Oreochromis niloticus*) ya que notaban bajas capturas, disminución en la talla de los organismos (enanismo) y malformaciones anatómicas, a pesar de que un laboratorio cercano productor de alevines de tilapia hacía repoblamientos periódicos en la presa. Soto Hernández et al. (2009) analizaron genéticamente a tilapias de la presa y del laboratorio de producción y encontraron que los organismos de ambos lugares presentaron un gran desequilibrio genético, evidenciado por grandes diferencias entre los valores esperados y observados de las frecuencias alélicas y genotípicas. Por ejemplo, la frecuencia observada de heterocigotos en organismos de la presa fue de 4.4%, mientras que la esperada era de 22%, encontrándose además valores de **endogamia** sumamente elevados. Fue obvio que la calidad de las tilapias producidas en el laboratorio estaba lejos de ser la óptima y al no haber reportes del origen del pie de cría utilizado por el laboratorio, se sospechaba que utilizaba organismos de la misma presa, haciendo un círculo vicioso.

Otro ejemplo se puede observar en las especies de iguanas del género *Ctenosaura* que habitan las islas del Golfo de California y la parte continental de Sonora y Baja California Sur (Fig. 2). Recientemente, se han registrado altos niveles de variabilidad genética entre dichas especies (Pacheco-Hoyos, 2016). Sin embargo, se han podido identificar poblaciones híbridas ocasionadas por el tráfico de organismos que habitan en las islas y que son llevadas de manera ilegal al continente. Esto pone en riesgo la adecuación, la variabilidad y el acervo genético de las poblaciones naturales por la mezcla de las distintas especies de iguanas.

La conservación puede verse como el intento de proteger la diversidad genética que se ha generado gracias a la evolución en los últimos 4.5 millones de años en la Tierra. Sin embargo, no es raro que se presente la disyuntiva de hacia dónde enfocar los esfuerzos de los programas de conservación: ¿hacia las especies o hacia los hábitats y ecosistemas? Las decisiones no siempre son equilibradas ya que hasta hace unos años los esfuerzos de conservación se habían concentrado más sobre especies



Figura 1. Pesca de *Micropogonias megalops* en el Golfo de Santa Clara, Sonora, en abril de 1998. Foto: José Manuel Grijalva Chon.

individuales, sobre todo en aquellas de alto perfil, mientras que aquellas menos carismáticas fueron dejadas de lado, a la par que se dejó de lado la prevención de deterioro ambiental, la cual podría beneficiar a un mayor número de especies. Se ha considerado el efecto que la diversidad de poblaciones tiene sobre los ecosistemas funcionales y los servicios ofrecidos por los mismos, donde la magnitud de la variación genética dentro de una población juega un importante papel ecosistémico en las relaciones entre especies (Allendorf et al., 2013).

Al valorar la ganancia del conocimiento científico que se ha logrado con base en la LHW, parece extraño que por mucho tiempo hubiese investigaciones que pasaran por alto sus aplicaciones dentro de la biología de la conservación y sus planes de acción. La diversidad genética es pilar de la **diversidad ecosistémica** y su estudio nos ayuda a lograr tres metas básicas: explicar el origen y mantenimiento de la variación genética, explicar los patrones de variación genética de una población y entender los mecanismos que causan los cambios en las frecuencias alélicas (Coker, 2017). Estas a su vez permiten predecir con bases científicas, el posible destino de las poblaciones de interés, ya sea que se encuentren en peligro de extinción, amenazadas o incluso en la categoría de preocupación menor (que a simple vista parecieran no estar bajo riesgo). Además, resalta que la aplicación de los principios de genética poblacional, como es la LHW, nos brinda información cuantificable en la que se puede confiar, por lo que se le puede considerar una herramienta esencial en un vasto número de áreas, incluyendo la conservación de la vida silvestre.

Conclusiones

La descripción de la variación y distribución de las frecuencias alélicas y genotípicas en las poblaciones se realiza con el fin de explicar los fenómenos evolutivos ocurriendo en ellas. Uno de los principios utilizados para estudiar esta variabilidad es la Ley del Equilibrio Genético, por medio de la cual podemos reconocer el estado que poseen las poblaciones, sobre todo de aquellas especies cuya distribución histórica ha sido modificada (ya sea por causas naturales o antropogénicas). De esta manera, el estudio de esta constitución genética, aunado al reconocimiento del cambio evolutivo por las distintas fuerzas nos ayuda a comprender, planear y aplicar medidas de conservación desde un nivel de entendimiento más profundo. Brinda esperanza el saber, que, entre la comunidad científica, es cada vez más común escuchar que nada en la biología de la conservación tiene sentido si no es a la luz de la genética poblacional.

Referencias

- Coker, O.M., 2017, Importance of genetics in conservation of biodiversity: Nigerian Journal of Wildlife Management, 1: 11-18.
- Kolbe, J.J., 2010, Hardy-Weinberg: Evaluating Disequilibrium Forces, en Braude, S., Low, B.S. (eds.): Introduction to Methods and Models in Ecology, Evolution and Conservation Biology: Princeton, New Jersey. Princeton University Press. 107-116.
- Pacheco Hoyos, N.G., 2016. Flujo genético entre las poblaciones de iguanas insulares y continentales en el Golfo de California, Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, 121 pp.
- Posdărăscu, E., 2017, The Hardy-Weinberg law and the distribution of populations on terra: Hyperion International Journal of Econophysics & New Economy, 10: 89-113.
- Soto-Hernández, J., Velasco-Murillo, A., Grijalva-Chon, J.M., 2009, When low genetic variability in feral and hatchery-reared tilapia becomes a vicious circle: *Oreochromis niloticus* from Oaxaca, Mexico. Aquaculture International, 17: 469-478.
- Varela-Romero, A., Grijalva-Chon, J.M., 2004, Allozyme evidence of the bigeye croaker (*Micropogonias megalops*) fishery collapse in the Upper Gulf of California: Bulletin of the Southern California Academy of Sciences, 103: 66-78.



Figura 2. *Ctenosaura macrolopha* hembra de la zona rural del municipio de Guaymas, Sonora. En esa localidad se han reportado casos de especies de iguanas transportadas por pescadores desde la isla San Pedro Nolasco. Foto: Nohelia Pacheco Hoyos.

GLOSARIO

Alelo.

Es cada una de las formas alternativas que puede tener un mismo gen. En una población dada, los individuos pueden compartir alelos o ser portadores de alelos diferentes.

Diversidad ecosistémica.

Abarca a la diversidad de especies de plantas, animales, hongos y microorganismos que viven en un espacio determinado, a su variabilidad genética, a los ecosistemas de los cuales forman parte estas especies y a los paisajes o regiones en donde se ubican los ecosistemas.

Endogamia.

Es la unión o reproducción entre individuos de una misma familia.

Equilibrio genético.

Es la condición donde las frecuencias alélicas y/o genotípicas no cambian de generación en generación. Describe un estado teórico que es la base para determinar si esos valores pueden desviarse y de qué manera.

Erosión genética.

Es cuando una especie pierde alelos o fenotipos y esto la lleva a un estado de riesgo.

Frecuencia alélica.

Es la proporción que se observa de un alelo específico respecto al conjunto de alelos que un gen puede tener en una población.

Frecuencia genotípica.

Es la proporción que se observa de un genotipo específico respecto al conjunto de genotipos de un gen en una población.

Genética de poblaciones.

Es la rama de ciencia que describe la variación y distribución de las frecuencias alélicas y genotípicas entre conjuntos de individuos para explicar los fenómenos evolutivos.

Herencia mendeliana.

Son los principios que describió Gregor Mendel en 1866 y que explican la herencia de los genes de los padres a los hijos.

Heterocigoto.

Se refiere a un individuo que heredó dos formas diferentes (alelos) de un gen en particular, una de cada progenitor.

Homocigoto.

Se refiere a un individuo que heredó dos formas iguales (alelos) de un gen en particular, una de cada progenitor.

Recurso genético.

Es todo aquel material de origen vegetal, animal o microbiano y que representan un valor real o potencial. Los recursos genéticos pesqueros, agrícolas y pecuarios son la materia prima de la que el mundo depende para mejorar la productividad y calidad de las poblaciones de plantas y animales domesticados y para mantener poblaciones saludables de especies silvestres.

EL TRAYECTO DE LOS CONTAMINANTES DESDE EL RESIDUO MINERO HISTÓRICO HASTA LOS ORGANISMOS

Moreno Rodríguez, Verónica ^{1*}, Del Rio Salas, Rafael ², Loredó Portales, René ³

¹Ingeniería en Geociencias, Universidad Estatal de Sonora, Unidad Académica de Hermosillo. Av. Ley Federal del Trabajo s/n, Col. Apolo, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83100.

²Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Luis Donaldo Colosio y Madrid s/n, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83000.

³CONACYT-Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Luis Donaldo Colosio y Madrid s/n, Col. Centro, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83000.



El trayecto de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) desde la fuente (p. ej., jales mineros históricos) hasta el destino (p. ej., los organismos) no es 100% efectivo, ni sencillo (Smith, 2007). En la fuente, el residuo minero histórico, el contenido total y la geodisponibilidad son los principales factores que determinan la porción de EPT liberados al ambiente. Los factores que determinan las condiciones y capacidad de transporte de los EPT en los diferentes medios (agua, suelo, aire, biota) son principalmente la dispersividad física y la movilidad química. Finalmente, las diferentes rutas de ingreso, biodisponibilidad y toxicidad controlan las posibles condiciones adversas que puede sufrir el organismo al exponerse a los EPT.

¿Cuál es la verdadera problemática de los residuos mineros históricos?

La problemática ambiental que representan los residuos mineros a nivel mundial reside principalmente en que concentran las más altas cantidades de elementos potencialmente tóxicos (EPT) que pueden dispersarse al medio (p. ej. agua, suelo, aire, biota) impactando de

Figura 1. Residuos mineros históricos en las afueras de la ciudad de Nacoziari de García, Sonora. Fotografía tomada por René Loredó.

manera negativa a la salud y el medio ambiente (Lottermoser, 2017). Esta concentración anómala de elementos químicos inicialmente es natural, puesto que los EPT originalmente se encuentran en minerales y rocas generados por procesos geológicos, lo que se conoce como depósito mineral. De hecho, si la concentración es suficientemente alta y/o rentable de extraer, el depósito mineral pasa a ser una mina. El objetivo de la actividad minera es recuperar los elementos químicos o minerales de valor económico. Por ejemplo, los depósitos cuya mineralización está asociada a minerales conocidos como sulfuros albergan

cantidades significativas de metales económicamente importantes (de interés) a nivel mundial como el Cu, Ni, Zn, Pb, así como Au y Ag. A pesar de su importancia económica, los sulfuros son también una fuente importante de EPT, como son As, Se, Cd, Sb y Hg. La recuperación de un elemento o mineral de interés económico puede ser un proceso complejo, que consiste en separar el elemento de interés contenido en un mineral del resto del mineral y/o de la roca que lo hospeda. Este proceso genera una gran cantidad de residuos debido principalmente a que el elemento de interés, a pesar de estar “concentrado” respecto a la concentración promedio en la corteza terrestre, se encuentra en pocas cantidades, por lo que se requieren mover toneladas de roca para extraer pocos gramos de elemento de interés. Finalmente, una vez separados y reconcentrados estos elementos se utilizarán para una infinidad de aplicaciones, como la elaboración de cables de electricidad, computadoras, bicicletas, celdas solares, pasta dental, medicinas, tuberías, teléfonos celulares, aviones, automóviles, etc. Es decir, sin la actividad minera no podríamos concebir la humanidad tal y como la conocemos. El problema es lidiar con los residuos generados por la minería, como es el caso de presas de jales, un tipo de residuo minero que representa las infraestructuras industriales más grandes del mundo debido a la inmensa escala de producción. El contenido de dichas presas consiste en material de grano fino que incluye una mezcla de minerales (económicos y no económicos), fragmentos de roca, sedimentos, junto con compuestos químicos utilizados en el proceso de separación y concentración (Lottermoser, 2017).

Presas de jales actuales vs. presa de jales históricas

Las presas de jales contienen residuos mineros que pueden albergar alto contenido en EPT por lo que deben de mantenerse adecuadamente aisladas del medio ambiente. Actualmente existen leyes y normas estrictas que contemplan el confinamiento y mantenimiento de las presas de jales durante la operación y el cierre de mina. A pesar de esto, pueden generar importantes crisis ambientales asociadas al fallo de contención de las presas de jales, conocidos comúnmente como derrame de mina. Una problemática menos conocida surge cuando los residuos asociados a las presas de jales fueron generados durante la minería histórica, cuando las regulaciones ambientales eran inexistentes, de forma que en la gran mayoría de los casos los residuos no fueron aislados, monitoreados, y estuvieron sujetos al deterioro y a la erosión, pasando a ser parte del paisaje por décadas, incluso siglos. Estos residuos mineros históricos se consideran pasivos ambientales debido a que pueden actuar como fuentes importantes de contaminantes por décadas, liberando y dispersando EPT e impactando potencialmente al medio ambiente y a la salud (Figura 1).

El complejo camino de los contaminantes desde la fuente hasta el destino

Estos fenómenos de liberación de EPT en las presas de jales históricas consisten en un conjunto de transformaciones mineralógicas naturales y espontáneas bajo condiciones ambientales (Lottermoser, 2017). Se denomina geodisponibilidad al porcentaje de EPT contenidos en los jales mineros que han sido capaces de liberarse al ambiente mediante procesos mecánicos, químicos y/o biológicos (Smith, 2007). En términos generales, la geodisponibilidad depende de la resistencia del mineral a ser transformado por las condiciones ambientales, del contenido total del elemento y de las condiciones de exposición al ambiente. Es importante tener en cuenta que en términos generales los minerales no suelen liberar fácilmente los EPT. Existen minerales más o menos resistentes y ambientes más o menos favorables para generar transformaciones mineralógicas naturales. Además, estos procesos suelen ser lentos pero constantes y/o intermitentes, tal y como suelen ser muchos procesos geológicos.

Una vez liberados, el factor determinante que va a controlar la distribución y alcance de los EPT es la movilidad. Se entiende por movilidad a la capacidad de un elemento químico para moverse dentro de los fluidos después de estar en solución. Debido a esto la movilidad es un factor crucial a la hora de predecir y evaluar el impacto ambiental de los EPT asociados a los jales mineros históricos (Smith, 2007). Aunque calcular la movilidad es muy complicado en ambientes superficiales debido a que las condiciones son muy cambiantes. Los cambios abruptos en los entornos físicos o químicos en la ruta de migración de los elementos pueden provocar la precipitación. Por lo que una parte de los EPT geodisponibles frecuentemente precipita en minerales preexistentes o neoformados; algunos de estos minerales pueden inmovilizar temporalmente los EPT debido a su inestabilidad, mientras que otros son excelentes para inmovilizar permanentemente, finalizando exitosamente el transporte de los EPT. Estos cambios abruptos en las condiciones se conocen

como barreras geoquímicas y pueden ser de tipo mecánicos, fisicoquímicos, bioquímicos y antropogénicos (o tecnológicos). Es muy común que se superpongan dos o más tipos de barreras, ya que muchos de los procesos mencionados están vinculados, formando lo que se denomina barreras complejas, que dan a su vez como resultado condiciones geoquímicas cambiantes (Smith, 2007).

La movilidad química no es la única manera de dispersar los EPT contenidos en los jales mineros históricos, también pueden dispersarse hacia el medio por procesos físicos. Como es el caso de las partículas de depósitos de jales que son suspendidas en el aire, comúnmente conocidas como polvo (Csavina *et al.*, 2012), o bien las partículas arrastradas por la escorrentía como los sedimentos en los ríos. Independientemente de modo de dispersión de EPT, bien por vía física, química, o una combinación de ambas, una vez en el medio, los seres humanos pueden ser expuestos a los EPT a través de tres posibles rutas: ingestión, vía dérmica y/o por inhalación. En el caso de la exposición por ingestión, esta puede darse por el contacto entre manos y boca, o bien por la ingesta involuntaria de alimentos y/o líquidos. Para el caso de la vía dérmica, la exposición

El camino de los contaminantes

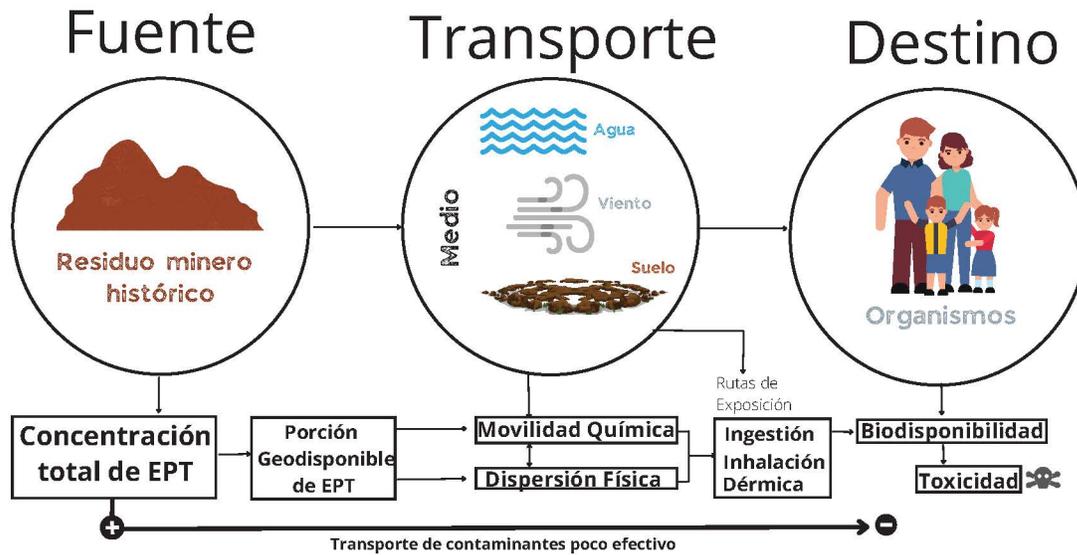


Figura 2. Esquema del camino de los contaminantes desde los residuos mineros históricos a los organismos. Elaboración propia.

puede ocurrir durante el desarrollo de actividades de trabajo (p. ej., minería, industria, jardinería, etc.) o simplemente realizar actividades en áreas donde se encuentren suelos superficiales contaminados (p. ej. De Miguel, 2007). Finalmente, la inhalación de partículas de polvo suspendidas en el aire es una ruta de exposición que puede llegar a ser altamente efectiva en zonas áridas y semiáridas (Csavina *et al.*, 2012).

Está ampliamente demostrado que a pesar del ingreso de EPT al organismo por las diferentes rutas de exposición, algunos pueden ser expulsados del organismo sin ninguna absorción sistémica (p. ej. Yan *et al.*, 2017). La forma en la que los EPT ingresan y actúan en los organismos están estrechamente ligadas a su biodisponibilidad que es el grado en que los EPT pueden ser absorbidos por el organismo una vez que ingrese al cuerpo. La biodisponibilidad depende de diversos factores como la solubilidad del mineral en los diferentes ambientes de los organismos involucrados, la frecuencia con la que el organismo se expone y la concentración de EPT en el medio de exposición (p. ej. De Miguel *et al.*, 2017). Una vez dentro de los organismos la toxicidad, que es el grado en el que un elemento químico genera daño a la salud, depende también de factores como la dosis, duración, ruta de

exposición, forma y estructura química de los elementos químicos involucrados, y factores humanos individuales (ATSDR, 2019) (Figura 2).

Por todo lo anterior, se puede concluir que las altas concentraciones de EPT en los residuos mineros históricos, es una de las mayores problemáticas que representan para el medio ambiente y la salud, y que a la hora de realizar una evaluación del impacto ambiental del residuo, la medida de la concentración total de los EPT solo es un dato inicial de la evaluación que no se sustenta por sí sola. Entender los factores que influyen en la geodisponibilidad, la movilidad y biodisponibilidad de los EPT es fundamental no solo a la hora de determinar si el residuo minero histórico representa un riesgo a la salud y al medio ambiente, sino a la hora de tomar acciones de remediación adecuadas.

Referencias

ATSDR, 2019, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Curso de Toxicología Para Comunidades: Módulo I - Introducción a la toxicología. https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/1/es_lecturenotes.html

De Miguel, E., Iribarren, I., Chacon, E., Ordonez, A., & Charlesworth, S., 2007, Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain): Chemosphere, 66(3), 505-513.

Csavina, J., Field, J., Taylor, M.P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E.A. Sáez, A.E., 2012, A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations: Science of the Total Environment, 433, 58-73.

Lottermoser, B. (Ed.), 2017, Environmental indicators in metal mining: Switzerland, Springer International Publishing.

Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros: Rev Int Contam Ambient 24(2), 43-54

Smith, K. S., 2007, Strategies to predict metal mobility in surficial mining environments: Reviews in engineering geology, 17, 25-45.

Yan, K., Dong, Z., Wijayawardena, M. A., Liu, Y., Naidu, R., Semple, K., 2017. Measurement of soil lead bioavailability and influence of soil types and properties: A review. Chemosphere, 184, 27-42.

“NUESTRA TIERRA”**Revista de divulgación de Ciencias Naturales**

“Nuestra Tierra” es una publicación semestral de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la cooperación del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora; es un medio de difusión de Ciencias Naturales como son las Ciencias de la Tierra y las Biológicas, aunque puede cubrir otras áreas del conocimiento científico. Su objetivo es dar a conocer, de manera sencilla, artículos y/o reportajes sobre investigaciones realizadas en los campos antes mencionados, tanto en México como en otras partes del mundo, así como temas de interés general relacionados con nuestro planeta y el universo. Se sugiere que los autores de las contribuciones sean especialistas o conocedores del tema. No se aceptan, en cambio, artículos de investigación ni informes de trabajo. Esta revista está dirigida no sólo a personas con estudios universitarios, sino también a estudiantes de nivel medio superior. Por esta razón, se pide a los autores que utilicen un lenguaje ágil, claro y sencillo, aunque sin que sea coloquial, limitando los términos especializados, los cuales deben de ir seguidos de una definición corta y clara, ya sea entre paréntesis o comillas, como nota al pie de página o como un cuadro resaltado dentro del texto. Las abreviaturas o acrónimos deben de evitarse hasta donde sea posible, a menos que sean de uso y conocimiento común.

NORMAS EDITORIALES**Texto**

Los artículos deberán estar escritos en español, en “Word”, con letra Times New Roman, 11 puntos, normal, a doble espacio y con márgenes de 2.5 cm. Se recomienda dividir el texto con subtítulos en negritas. Los trabajos deberán enviarse en formato de archivo DOC o RTF (Rich Text Format) con el mínimo de formato posible. El nombre del archivo deberá contener las palabras clave del título, o el tema del mismo.

Imágenes, fotografías, cuadros y figuras

Las imágenes, fotografías cuadros y figuras deben presentarse como archivos independientes, enlistarse en hojas separadas y deben ser numerados en el orden de aparición en el texto. Deberán estar en español y tener los debidos permisos de reproducción cuando no sean originales (producidos por el autor). El número de los mismos no deberá ser mayor de 5, aunque podrían aceptarse hasta 7 en los casos que así lo ameriten. Las imágenes deberán tener una resolución mínima de 300 dpi, con formato JPEG, TIFF o PDF. En el caso de que se adquieran de internet, se recomienda guardarlas con el tamaño más grande para que tengan la mayor resolución.

Los encabezados de cuadros y tablas, y los pies de figura y de foto deben tener la información suficiente para entenderse sin la ayuda del texto principal.

Se publicarán artículos en dos modalidades: 1) textos cortos, con un mínimo de ½ página impresa y un máximo de 2 páginas; 2) textos en extenso, con un mínimo de 3 y máximo de 6 cuartillas con ilustraciones. En el texto no deben incluirse agradecimientos ni dedicatorias.

Los artículos recibidos serán evaluados por el editor en jefe; si éste considera que el artículo puede publicarse, lo pasará a los editores asociados para su revisión, y los comentarios y observaciones serán regresados al autor para correcciones finales. Sin embargo, si fuera necesario hacer correcciones mayores en la versión del manuscrito enviado por primera vez, el editor en jefe enviará el artículo al autor con sus comentarios. Si fuera el caso, se rechazarán aquellos artículos que no cumplan con los objetivos de la revista o que no tengan la calidad adecuada, tanto en la escritura como en el contenido, sin ninguna responsabilidad de la revista.

Citas

En caso de incluir citas de artículos, se sugiere un máximo de 3. Se debe incluir la bibliografía al final con el siguiente formato:

Para un autor: apellido y fecha (Torres, 1997).

Para 2 citas o más de un mismo tema, separar cada cita por un punto y coma (;) y en orden cronológico: (Torres et al., 1987; Barrón, 2006).

Referencias

En el caso de recomendar alguna lectura, la referencia debe ir completa al final del texto con el siguiente formato:

a) Artículos en publicaciones periódicas

Apellido(s), Inicial(es), Año, Título: Título de la revista, volumen, número de la primera y la última página del artículo. Ejemplo:

Barrios D., 1991, El oro y la historia de Perú: Historia Latinoamericana, 100, 35-40.

b) Monografías

Apellido(s), Inicial(es), año, Título de la monografía: Lugar de publicación, editorial, número de páginas. Ejemplo:

Faure, G., 1986, Principles of Isotope Geology: New York, John Wiley, 345 pp.

c) Capítulos en volúmenes editados

Apellido(s), Inicial(es), Año, Título del capítulo, en (Apellido e iniciales del editor o editores del volumen), (ed(s).), Título del volumen editado: Lugar de publicación, editorial, número de la primera y de la última página del capítulo. Ejemplo:

De Cserna, Z., 1968 Geología, en Lorenzo, J.L., De Cserna, Z., Herrera, I. (eds.): Las Ciencias Geológicas y su perspectiva en el desarrollo de México: México, Ediciones Productividad, 41-68.

Los autores podrán enviar sus trabajos a:

René Loredó Portales
Editor en Jefe de Nuestra Tierra
Estación Regional del Noroeste
Instituto de Geología, UNAM
Hermosillo, Sonora
rloredop@geologia.unam.mx



Desierto de Atacama, Chile.