

María de la Luz Avendaño Yáñez y Yareni Perroni Ventura

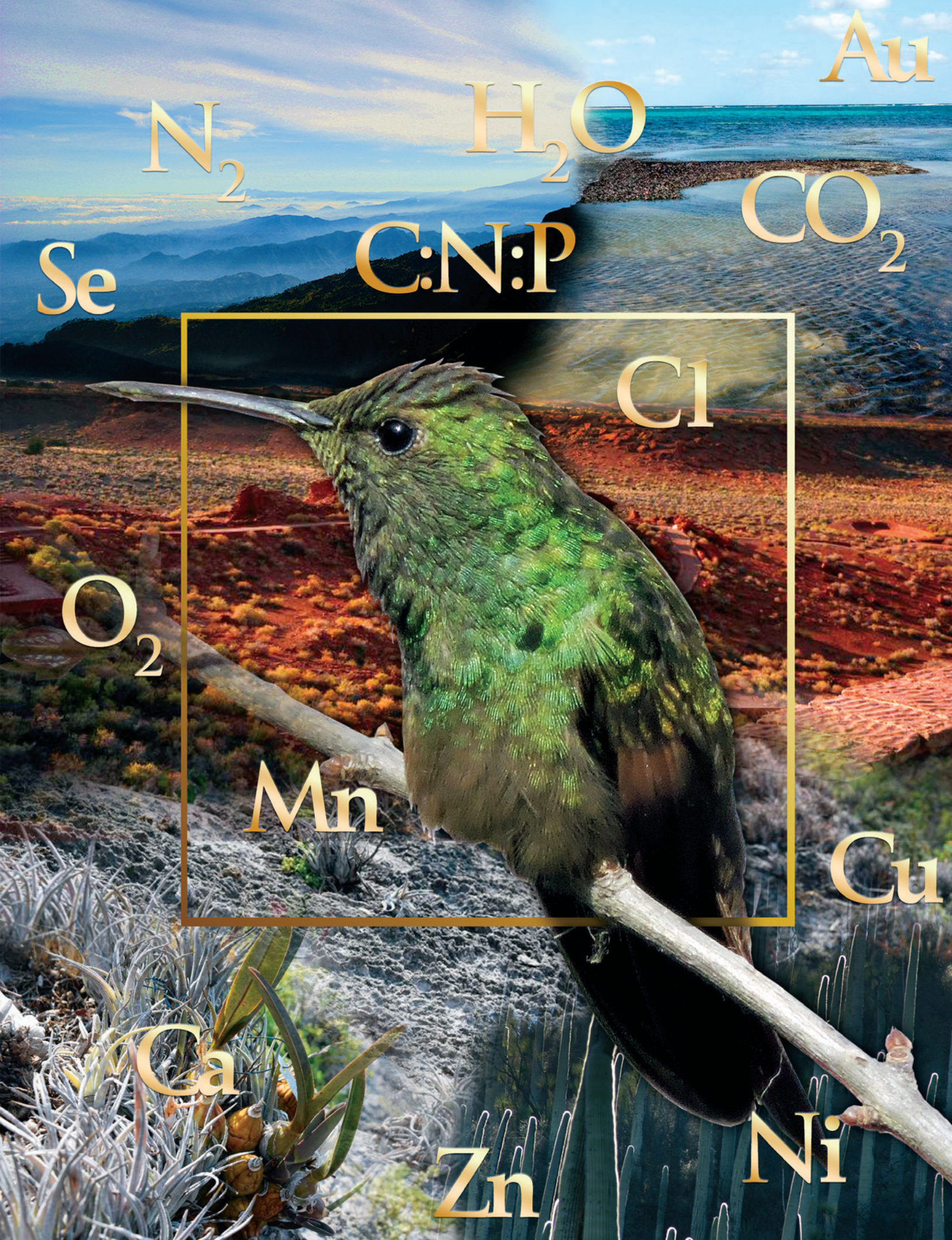
Biogeoquímica, la historia cambiante de un planeta vivo

La historia de la evolución biogeoquímica de la Tierra es larga e interesante. La transformación de pocos elementos y minerales durante la formación planetaria hasta la aparición de la vida generó la biogeoquímica actual e impulsó la coevolución de la geósfera y la biósfera. La fotosíntesis oxigénica cambió las condiciones de la atmósfera y la actividad humana aceleró algunos cambios importantes.

¿Qué es la biogeoquímica?

La biogeoquímica es una disciplina que integra aspectos biológicos, geológicos y químicos de los ecosistemas, con el objetivo de estudiar el transporte y la transformación de la materia y la energía en el planeta. Mediante el enfoque biogeoquímico, podemos conocer cómo los seres vivos modifican la distribución de los elementos químicos en la superficie de nuestro planeta, en un contexto de reacciones de óxido-reducción (redox), en las cuales las sustancias que se combinan intercambian electrones. Asimismo, esta disciplina puede explicar cómo el ambiente químico influye en y dirige la evolución de la vida y la coevolución de la geósfera y la biósfera; es decir, podemos estudiar cómo evolucionaron de manera conjunta la porción sólida de la Tierra (también llamada litósfera) y el espacio en el que se desarrolla la vida y los productos que generan los organismos vivos (véase el Recuadro 1). Además, a partir del supuesto del balance de masas (la materia y la energía no se crean ni se destruyen, sólo se transforman), la biogeoquímica puede entender, proponer y poner a prueba hipótesis respecto a la relación y el funcionamiento de los organismos como sistemas de adquisición y transformación de materia y energía.

Todos los seres vivos estamos constituidos principalmente por 27 elementos, pero seis de ellos son los elementos químicos básicos; a saber, en orden de importancia: hidrógeno (H), oxígeno (O), carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S). Estos seis elementos son capaces de impulsar los ciclos biogeoquímicos globales (Schlesinger y Bernhardt, 2013) y conforman 95% de la masa de la biósfera. Los organismos, por medio de sus procesos metabólicos, alteran las concentraciones de los elementos químicos presentes en su entorno; a su vez, el



Au

N_2

H_2O

Se

C:N:P

CO_2

Cl

O_2

Mn

Cu

Ca

Zn

Ni

Recuadro 1.

Un breve relato de miles de millones de años

La historia de la evolución biogeoquímica de la Tierra inició con la transformación de pocos elementos y minerales durante la formación planetaria, hace aproximadamente 4 500 millones de años, hasta el incremento a miles de minerales generados por eventos como el vulcanismo o las glaciaciones y, sobre todo, por la aparición de la vida en el planeta, hace 4 200 millones a 3 800 millones de años. Rápidamente, la vida transformó los procesos geoquímicos de la Tierra primitiva a procesos biogeoquímicos, los cuales impulsaron la coevolución de la geósfera y la biósfera; desde entonces, han dirigido los principales cambios químicos en nuestro planeta.

El aumento de oxígeno en la atmósfera por la evolución de la fotosíntesis oxigénica aceleró algunos cambios hace poco menos de 2 500 millones de años, con la modificación de las condiciones de una atmósfera reductora, rica en dióxido de carbono,

ácido sulfhídrico y metano, a una atmósfera oxidante, rica en nitrógeno (cerca de 80%) y oxígeno (aproximadamente 20%). A su vez, la oxigenación de la atmósfera terrestre diversificó e intensificó los productos generados por los organismos vivos. Mientras que la transformación química terrestre hacia condiciones oxigénicas duró miles de millones de años, en tan sólo dos siglos la humanidad ha alterado drásticamente los ciclos biogeoquímicos de algunos elementos químicos esenciales, como carbono, nitrógeno, fósforo y azufre; asimismo, ha provocado cambios globales en la química de la atmósfera terrestre. Nuestra conducta como una especie que influye en los flujos globales de los elementos tendría que considerar las consecuencias de los cambios en la biogeoquímica de su propio entorno y tomar nota de la cambiante historia de este planeta vivo.

entorno es capaz de limitar la constitución y los procesos metabólicos de los organismos. En este sentido, desde la aparición de la vida en nuestro planeta, los elementos esenciales se transportan entre los diferentes reservorios bióticos (seres vivos) y abióticos (aire, suelo, agua) de la corteza oceánica y continental del planeta y se van transformando a diferentes velocidades. La biogeoquímica nos ayuda a comprender esa compleja y dinámica interacción entre los organismos y el ambiente químico del planeta. Es decir, podemos conocer la diversidad de formas de adquisición de elementos esenciales y las rutas metabólicas de los seres vivos que evolucionan y, de manera inevitable, modifican la química terrestre, al generarse balances o desbalances temporales.

■ ■ ■ El caótico origen de la Tierra

El origen de nuestro planeta se remonta a unos 4 500 millones de años atrás, cuando sólo era una masa rocosa extremadamente caliente, formada por elementos químicos pesados, como hierro y níquel,

principalmente. Se piensa que hubo una fase temprana de agregación (incremento de tamaño) que integró materiales pesados que eran relativamente abundantes en nuestra galaxia. Posteriormente, en una fase tardía de agregación se integraron elementos ligeros, como carbono, nitrógeno y gases nobles (provenientes de meteoritos y desgasificaciones del manto terrestre), además de silicio, magnesio y oxígeno. Asimismo, se formó una corteza dominada por aluminosilicatos (aluminio y sílice) y feldespatos (aluminio, calcio, sodio y potasio) que flotaban sobre las pesadas rocas semifluidas del manto terrestre. Después de la fase tardía de agregación, nuestro naciente planeta se caracterizó por una liberación masiva de gases (desgasificación del manto), los cuales contenían grandes cantidades de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre. Estos elementos se combinaron para formar compuestos que originaron gradualmente una atmósfera primitiva reductora (sin oxígeno libre), saturada de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua

(H₂O). A medida que el planeta se enfriaba, el vapor de agua se condensaba, con lo cual se formaron los océanos. En este escenario –hostil y dantesco, desde nuestra perspectiva humana– se desencadenaría uno de los eventos más extraordinarios que hacen especial a nuestro planeta en el Sistema Solar: ¡la vida!

■ ¿Cómo surgió la vida en la Tierra?

■ Antes de entrar en detalles es importante mencionar cuáles son las características básicas que tiene un ser vivo: 1) una membrana física en la que pueden aislarse del ambiente los bloques o “ladrillos” que construyen y constituyen la vida, como aminoácidos, péptidos, ribosa, ácidos nucleicos, nucleótidos y oligonucleótidos; 2) una maquinaria metabólica que permite la obtención de materia y energía del ambiente; y 3) una capacidad de replicarse a partir de la información genética contenida en el ADN y el ARN. Ahora sí, hablemos sobre las teorías del origen de la vida, las cuales concuerdan en que surgió en medio de un caos químico y físico (el ambiente abiótico).

Una de las explicaciones más ampliamente conocidas postula que la vida en la Tierra surgió en los primitivos mares terrícolas, en ambientes hidrotermales de ventosas marinas con una atmósfera cálida, reductiva y con abundante CO₂ y CH₄, además de una alta radiación ultravioleta (UV). Estos factores generaron reacciones químicas que dieron origen a las moléculas orgánicas simples y, más tarde, a los organismos vivos. Sin embargo, de acuerdo con Kitadai y Maruyama (2018), la evolución química de la vida no pudo ocurrir en un solo escenario, dado que un sistema tan complejo requiere de ambientes altamente diversos y dinámicos, que están conectados unos con otros y que permiten el transporte con circulación fluida de productos y reactantes originados de las reacciones químicas que se llevan a cabo en estos ambientes.

En ese sentido, la evolución química de la vida incluye: un ambiente con gas reductor (atmósfera primitiva terrestre y vulcanismo), otros ambientes con pH alcalino (océanos salados) y reservorios de agua fresca no salada; además de la presencia de ciclos de temperaturas de congelación (glaciaciones), ciclos de sequía y humedad acoplados a reacciones

de alta energía y ciclos de enfriamiento y calentamiento de agua. Asimismo, para el caso terrestre, incluyó entradas extraterrestres de elementos esenciales, como el carbono y el nitrógeno, de compuestos orgánicos o bloques de construcción de la vida, como los aminoácidos y los péptidos, además de nutrientes reactivos, como el fósforo, provenientes de meteoritos, micrometeoritos, cometas y partículas de polvo interplanetario. Cabe señalar que algunos compuestos orgánicos pudieron haberse originado en los meteoritos y cometas, ya que se han encontrado alrededor de 80 tipos de aminoácidos en algunas **condritas carbonáceas**, lo cual sugiere que la síntesis abiótica de moléculas orgánicas también puede ocurrir fuera de nuestro planeta.

■ Cambios químicos impulsados por la aparición de la vida en el planeta

■ El origen de los primeros fósiles en la Tierra puede rastrearse entre 3 800 millones y 3 500 millones de años atrás. Estos fósiles son estromatolitos (*stroma* = “capas” y *litos* = “roca”), los cuales son comunidades de bacterias y arqueas. No obstante, se estima que la vida pudo haber comenzado hace casi 4 200 millones de años. Los primeros microorganismos, posiblemente procariontes (sin organelos intracelulares y con metabolismo anaerobio), comenzaron a modificar la química terrestre por el simple hecho de tomar elementos del medio (C, H, O, N, P, S, entre otros) en un contexto de reacciones redox para construir sus cuerpos unicelulares e intercambiar compuestos químicos con el exterior a través de su metabolismo. Por ejemplo, una de las rutas metabólicas de los microorganismos primitivos implicaba la producción de metano (CH₄) mediante su transformación redox a moléculas orgánicas simples, como el acetato (C₂H₃COOH). La gran aportación de los procariontes a la química terrestre es la diversidad de rutas metabólicas que desarrollaron, en las que se incluyen varios de los ciclos biogeoquímicos conocidos (véase la Tabla 1).

Otro ejemplo de cambio químico a gran escala impulsado por la vida fue el que hicieron los organismos fotosintéticos que utilizaron la luz para llevar a cabo sus funciones metabólicas en una atmósfera reductora

condritas carbonáceas

Un tipo de meteoritos rocosos, no metálicos, en los que se han encontrado elementos y minerales.

ADN

Molécula que almacena la información genética necesaria para la reproducción de los organismos.

ARN

Molécula implicada en la replicación del ADN y en la síntesis de proteínas específicas.

Tabla 1. Algunas rutas metabólicas asociadas a los cambios químicos en la biósfera (Jelen y cols., 2016).

Ruta metabólica	Producto principal obtenido	Compuesto que recibe los electrones	Organismo que lleva a cabo la ruta metabólica	Condición requerida
Metanogénesis	Metano (CH ₄)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Arqueas (procarionte)	Anaerobia
Acetogénesis	Acetato (CH ₃ COOH)	Metano (CH ₄)	Bacterias (procarionte)	Anaerobia
Fijación biológica del nitrógeno atmosférico	Amoníaco (NH ₃)	Dinitrógeno (N ₂)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Reducción de sulfato	Sulfuro (HS ⁻)	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Reducción de azufre	Sulfuro (HS ⁻)	Azufre (S ⁰)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Fermentación	Ácido láctico (H ₃ C-CH(OH)-COOH)	Piruvato (C ₃ H ₄ O ₃)	Bacterias (procarionte), hongos, algunos animales y protistas (eucarionte)	Anaerobia
Reducción de nitrato	Nitrito (NO ₂ ⁻)	Nitrato (NO ₃ ⁻)	Bacterias y arqueas	Aerobia
Reducción de óxido nítrico	Óxido nitroso (N ₂ O)	Óxido nítrico (NO)	Bacterias y arqueas	Aerobia
Reducción de óxido nítrico	Dinitrógeno (N ₂)	Óxido nitroso (N ₂ O)	Bacterias y arqueas	Aerobia
Respiración oxigénica	Dióxido de carbono (CO ₂) y agua (H ₂ O)	Azúcares (C ₆ H ₁₂ O ₆) y oxígeno molecular (O ₂)	Bacterias (procarionte), plantas y animales (eucarionte)	Aerobia
Fotosíntesis anoxigénica	Carbohidratos (CH ₂ O), azufre (S ⁰) y agua (H ₂ O)	Luz + ácido sulfhídrico (H ₂ S) y dióxido de carbono (CO ₂)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Fotosíntesis oxigénica	Azúcares (C ₆ H ₁₂ O ₆), oxígeno molecular (O ₂) y agua (H ₂ O)	Luz + dióxido de carbono (CO ₂) y agua (H ₂ O)	Bacterias (procarionte), plantas y algas (eucarionte)	Aerobia

Ligando
Molécula (usualmente pequeña) que se une específicamente a una molécula más grande para formar un complejo capaz de producir una señal.

(fotosíntesis anoxigénica) y posteriormente en una atmósfera con incrementos de oxígeno (fotosíntesis oxigénica). Hace aproximadamente 2 700 millones de años se acumuló suficiente oxígeno en la atmósfera a partir de la fotosíntesis oxigénica, lo que llevó al cambio de una atmósfera reductora a una oxidante.

Las cianobacterias, ancestros de las plantas, y su exitoso mecanismo fotosintético modificaron de una manera sin precedentes la química arcaica de la atmósfera terrestre, rica en CO₂ y CH₄, al generar oxígeno, un producto de desecho para ellas. Las altas concentraciones de CO₂ y CH₄ que provocaban un efecto invernadero asfixiante en nuestro planeta decrecieron gradualmente al paso de millones de años, mientras se incrementó el oxígeno atmosférico. La producción de oxígeno llevó a la formación de la capa de ozono (O₃) en la estratósfera, la cual es un manto protector de la radiación UV. Esto permitió aún más la diversificación de la vida y la aparición de organismos capaces de utilizar el abundante oxígeno

atmosférico. Otra característica de las cianobacterias ancestrales y actuales es su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico (N₂), un gas abundante. En la actualidad, la mayor fijación de N₂ en los océanos (80%) se atribuye a las cianobacterias de los géneros *Trichodesmium* y *Crocosphaera*; algunas de estas especies podrían haber sido determinantes para el funcionamiento químico de la atmósfera terrestre en los últimos 2 500 millones de años, debido a su influencia global en el ciclo del carbono y del nitrógeno. Éstos son sólo algunos ejemplos de cómo los organismos pueden modificar a gran escala la química del planeta a lo largo del tiempo; sin duda, la vida tal como hoy la conocemos es posible gracias a los cambios químicos que impulsaron los seres vivos que nos precedieron.

La especie humana como factor de cambio

Homo sapiens es la especie que ha inducido los cambios biogeoquímicos más importantes en la historia

reciente del planeta, en un tiempo relativamente corto en comparación con los cambios a escala geológica. Como señalan Falkowski y cols. (2000), hemos alterado los ciclos biogeoquímicos en al menos +13% para el carbono, +108% el del nitrógeno, +400% en el caso del fósforo, +113% el del azufre, y +16% para el hidrógeno y el oxígeno (ciclo del agua), sólo por mencionar algunos elementos.

Por ejemplo, el CO₂ ha aumentado de 280 ppm (partes por millón) a poco más de 400 ppm en los últimos 200 años, lo que genera el calentamiento global y la acidificación de los océanos. Asimismo, el incremento acelerado del uso de combustibles fósiles está provocando grandes cambios en las condiciones químicas de la Tierra, las cuales se habían mantenido relativamente estables durante los últimos 8 000 años de historia de la sociedad humana organizada. Algunos datos revelan que cada año quemamos el equivalente de la materia orgánica almacenada durante ¡400 años! y hemos duplicado la entrada de nitrógeno por fijación biológica en cultivos como el arroz (60 Tg N por año = 10¹² g N por año) y por fijación industrial (136 Tg N por año), además de las emisiones (25 Tg N por año) por la quema de combustibles fósiles en ciudades y zonas industriales (Schlesinger y Bernhardt, 2013). También hemos utilizado de manera irracional e ineficiente los nutrientes en la agricultura mediante fertilizantes con nitrógeno y fósforo en dosis que las plantas no son capaces de usar en su totalidad (sólo usan entre 40% y 60% del fertilizante; el resto se pierde e incorpora a la atmósfera o a los reservorios de agua, con lo que se contaminan lagos, ríos, mantos freáticos y océanos). Éstas son algunas acciones humanas que han impulsado grandes cambios en la composición química de la atmósfera y de la litósfera, tan sólo en los últimos 200 años.

El conocimiento de los aspectos biogeoquímicos de nuestro entorno puede ayudarnos a reflexionar con mayor profundidad, pero sobre todo a actuar, corregir y cambiar nuestras conductas cotidianas. Por ejemplo, empecemos por usar poca pasta para lavarnos los dientes o consumir menores dosis de hormonas orales; si tenemos un sistema de drenaje, ¿adónde se van el flúor y los compuestos hormona-

les?, ¿qué consecuencias tendrán en los organismos acuáticos? Hoy se nos presenta el reto de buscar las mejores formas de transitar hacia una sociedad que disminuya sus emisiones de CO₂ y CH₄ a la atmósfera. Asimismo, el manejo del suelo es primordial, en especial para elementos como el fósforo, el cual es escaso en la superficie de la corteza terrestre, y no hay forma de sustituirlo. Debemos buscar alternativas para cultivar nuestros alimentos, que impacten lo menos posible en los procesos químicos, físicos y biológicos del suelo. Recordemos que incluso las acciones pequeñas, sumadas, pueden hacer grandes cambios para mantener el balance de los ciclos biogeoquímicos que hacen posible la existencia de las especies que se conservan actualmente en nuestro planeta. El enfoque que ofrece la biogeoquímica nos ayuda a comprender la magnitud de la influencia de la vida en la transformación química de nuestro planeta y los escenarios a futuro, aunque también nos ayuda a rastrear posibles huellas de formas de vida en otras partes del universo.

María de la Luz Avendaño Yáñez

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada,
Universidad Veracruzana.
luzavend@gmail.com

Yareni Perroni Ventura

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada,
Universidad Veracruzana.
yperroni@uv.mx

Referencias específicas

- Falkowski, P. *et al.* (2000), "The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system", *Science*, 290:291-297.
- Jelen, B. I., D. Giovannelli y P. G. Falkowski (2016), "The Role of Microbial Electron Transfer in the Coevolution of the Biosphere and Geosphere", *Annual Review of Microbiology*, 70:45-62.
- Kitadai, N. y S. Maruyama (2018), "Origins of building blocks of life: A review", *Geoscience Frontiers*, 9: 1117-1153.
- Shlesinger, W. H. y E. Bernhardt (2013), *Biogeochemistry: an analysis of global change*, 3.^a ed., Ámsterdam, Elsevier.