

Fernando J Gómez

Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra,  
Universidad Nacional de Córdoba-Conicet

# La biosfera primitiva, la tierra actual y vida extraterrestre

## Geobiología y astrobiología

Las complejas interacciones, desde el distante pasado geológico a la actualidad, entre la *geosfera*, que incluye la Tierra sólida, la *atmósfera* y la *hidrosfera* —o los océanos—, y la *biosfera* —o los seres vivos— constituyen el objeto de estudio de una disciplina relativamente reciente en la Argentina: la *geobiología*.

Los procesos físicos y químicos del mundo natural, controlados por la dinámica interna y externa de la Tierra, fueron el marco en que se originó y evolucionó la vida, la cual, a su vez, modificó su entorno. El estudio de esos procesos e interacciones es fundamental para comprender el funcionamiento de nuestro planeta como un sistema, en las diferentes escalas del espacio y del tiempo. La geología aporta a ese estudio la perspectiva del tiempo distante.

Un ejemplo de enormes consecuencias de estas interacciones fue la aparición de la *fotosíntesis oxigénica*, por la que, hace unos 2500 millones de años, organismos pri-

mitivos convirtieron dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico en materia orgánica, mediante la energía de la luz solar y con liberación de oxígeno, como lo hacen hoy plantas, algas y muchas bacterias. Ello produjo la oxigenación de una atmósfera que originalmente era *anóxica* (es decir, carecía de oxígeno), y cambió para siempre la química de la superficie terrestre. A partir de allí, acontecieron modificaciones como la aparición de organismos multicelulares y, en virtud de la evolución natural, de formas de vida más complejas, incluido el ser humano.

Comprender las condiciones físico-químicas en que se originó la vida, los ambientes extremos en que esta puede desarrollarse y la impronta que deja su presencia en la Tierra proporciona las bases para la búsqueda de vida más allá de nuestro planeta, que constituye el objeto de estudio de la *astrobiología*, disciplina igualmente reciente.

Un recurso para entender los procesos de coevolución de la *geosfera* y la *biosfera* es estudiar ambientes terrestres actuales cuyas condiciones sean, por lo me-

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Cuando hace 3500 millones de años aparecieron los primeros organismos en la Tierra, ciertos ambientes de nuestro planeta tenían semejanzas con el medio de las lagunas altoandinas del noroeste argentino y, posiblemente, con el de planetas como Marte.

nos en algunos aspectos, semejantes a las que existieron durante la historia temprana de nuestro planeta, y que además podrían existir o haber existido en otras regiones del sistema solar, por ejemplo, en Marte.

## La historia temprana de la Tierra

El sistema solar se formó hace unos 4600 millones de años a partir de una nebulosa o nube de gas y polvo. Esto significa que la edad de la Tierra es aproximadamente un tercio de la del universo, originado en el *Big Bang*, que los modelos cosmológicos más aceptados fijan en algo menos de 14.000 millones de años. El polvo cósmico de esa nebulosa constituyó primero pequeños cuerpos sólidos llamados *planetesimales*, que por acción de la fuerza de gravedad se fueron sucesivamente aglomerando y consolidando en masas mayores que eran objeto de frecuentes colisiones. La Luna habría sido producto de una de dichas colisiones, entre nuestro planeta en formación y un cuerpo del tamaño de Marte. Ese también fue el origen, se cree, de la inclinación del eje de rotación de la Tierra. Como otra consecuencia de las mencionadas colisiones, y de un intenso vulcanismo, buena parte de la superficie de aquella primitiva Tierra estaba cubierta por un océano de roca fundida, mientras que su atmósfera, producto de la actividad volcánica, casi no contenía oxígeno.

Con el tiempo, las colisiones cósmicas cesaron, la superficie terrestre se enfrió y solidificó, y los materiales fundidos de su interior se separaron según sus densidades relativas. Así se formó la conocida estructura de nuestro planeta, con tres grandes capas llamadas *núcleo*, *manto* y *corteza*, que indican los textos de geología. Con la disminución de la temperatura se crearon condiciones que permitieron la presencia de agua líquida y la formación de los océanos. La magnitud de estos lleva a suponer que el agua no pudo provenir solo del interior de la Tierra sino, en gran medida, del impacto de meteoritos y cometas, en los que llegó como hielo. Este fue un paso crítico, pues el agua es necesaria para la vida en la forma que la conocemos, al punto que su presencia en forma líquida se toma como un indicio de la posibilidad de que la vida haya aparecido en otros planetas.

Los geólogos suelen denominar a la primera etapa de la historia física de la Tierra, que abarca casi unos 4000 millones de años, es decir, cerca del 85% del tiempo de su existencia, con nombres como Precámbrico, y dividirla en tres eones: el Hadeano (entre 4600 y 3850 millones de años atrás), el Arqueano o Arqueozoico (entre 3850 y 2500 millones de años atrás) y el Proterozoico (entre 2500 y 542 millones de años atrás). Después del Precámbrico se escalonan los períodos más conocidos: el Paleozoico (entre 542 y 250 millones de años atrás), el Mesozoico (entre 250 y 65 millones de años atrás) y el Cenozoico (entre 65 millones de años atrás y el presente).

A diferencia de la atmósfera actual, rica en oxígeno, la del Arqueano estaba formada por gases como  $\text{CO}_2$  y metano ( $\text{CH}_4$ ), cuyo efecto invernadero mantuvo la temperatura ambiental dentro de límites que permitían la permanencia de agua en estado líquido. Como en ese entonces el Sol habría tenido un 70% de su brillo actual, de no haber existido esos gases en la atmósfera, el agua se habría mantenido congelada. En ese contexto comenzó la fotosíntesis oxigénica, la cual alteró radicalmente la composición de la atmósfera y los océanos, y produjo un cambio en los ecosistemas que constituyó un paso crítico en la aparición de organismos multicelulares.

Hoy el interior fundido del planeta se conecta con su parte sólida externa y con la atmósfera y los océanos por el movimiento de las grandes placas relativamente rígidas que forman ese exterior sólido. Esa dinámica terrestre se llama *tectónica de placas* y consiste en el desplazamiento relativo de enormes sectores de corteza, de unos 100km de espesor, que se embisten, se hunden, se deforman y se separan unas de otras. Ello produce una circulación de gran escala de materia y energía entre el interior y el exterior del planeta, por el que la biosfera obtiene nutrientes y energía. Las evidencias sugieren que la tectónica de placas se inició en tiempos tempranos de la Tierra y habría desempeñado un papel central en el desarrollo y la persistencia de la vida.

## El origen de la vida

Si bien hay mucha controversia acerca de la aparición de la vida en la Tierra, en especial sobre cómo, dónde y cuándo se habría originado, la ciencia ha llegado a cierto consenso sobre dos cuestiones fundamentales:

- Dadas las similitudes entre los seres vivos, cuya bioquímica se basa en el carbono, usa solo veinte aminoácidos y opera mediante una cadena de pasos que conducen del ADN a las proteínas pasando por el ARN, se supone que todos los organismos provienen de un ancestro común.
- El origen de la vida se habría producido por un proceso continuo y de complejidad creciente, compatible con las leyes de la física y la química, que avanzó desde la geoquímica a una química prebiótica y a la bioquímica de los primeros organismos.

La reflexión científica sobre el origen de la vida sugiere una pregunta fundamental: ¿se trata de un fenómeno exclusivo de la Tierra o es universal, como consecuencia inevitable de las leyes de la termodinámica? Las fuentes de energía y los compuestos químicos necesarios para construir las partes esenciales de las biomoléculas están en todo el universo. Un ejemplo son los numerosos ami-

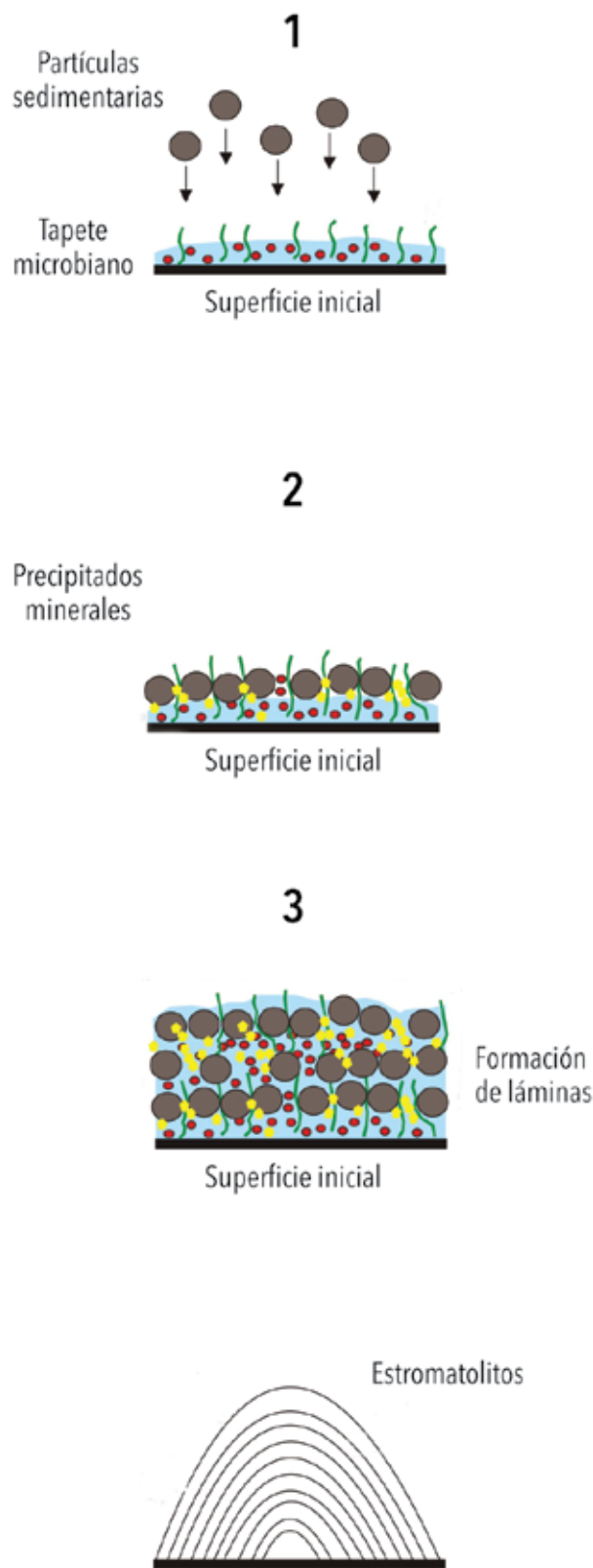
noácidos encontrados en el meteorito Murchison, caído en la localidad de ese nombre en Australia. Asimismo es común la llamada síntesis de Fischer-Tropsch, un proceso que convierte una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno catalizado por ciertos elementos metálicos en hidrocarburos líquidos, es decir, produce una síntesis abiótica de compuestos orgánicos, frecuente en la naturaleza en sistemas hidrotermales.

La siguiente pregunta es cómo sucedió que esos compuestos se concentraran y ensamblaran para formar monómeros primero y luego polímeros más complejos, hasta llegar a las macromoléculas fundamentales para la vida. Una línea de investigación se plantea si el paso inicial pudo haber sido la aparición de un mecanismo de replicación y transferencia de información, similar al actual ADN-ARN; otra línea analiza la posibilidad de que ese primer paso haya sido un primer organismo que, mediante un metabolismo primitivo, explotó las fuentes de energía disponibles, y luego desarrolló un sistema de replicación y transferencia de información.

También se han formulado diferentes hipótesis acerca de dónde ocurrieron esos pasos iniciales, que van desde los sistemas hidrotermales submarinos a ciertas superficies minerales, y desde la tibia sopa primigenia de Darwin a los famosos experimentos realizados en 1952 por Stanley Miller y Harold Urey en la Universidad de Chicago. Estos simularon en laboratorio las hipotéticas condiciones químicas de la Tierra primitiva y obtuvieron aminoácidos de la interacción de componentes inorgánicos más una fuente de energía. Pero ni ellos ni sus seguidores lograron avanzar mucho más allá de ese punto. Tampoco se ha descartado del todo un posible origen extraterrestre de la vida, es decir, que meteoritos o cometas puedan haber traído a la Tierra microorganismos o moléculas esenciales para ella.

El momento en que apareció la vida en la Tierra está también abierto a discusión. Evidencias geoquímicas halladas en rocas de Groenlandia sugieren que ello habría sucedido hace unos 3800 millones de años, pero hay controversia sobre el posible origen biológico y la edad de esas rocas. Otras encontradas en Pilbara, Australia, de unos 3500 millones de años de antigüedad, proporcionan evidencias más firmes. Sugieren que en ese momento habría existido una biosfera microbiana relativamente compleja.

De unos 3500 millones de años atrás son los estromatolitos más antiguos conocidos. Estos son estructuras laminadas que se forman por la interacción de comunidades de microbios que fijan y atrapan sedimentos y precipitan minerales (figura 1). Fueron extremadamente abundantes en los mares del Precámbrico y luego disminuyeron, por cambios en la composición química de los océanos y posiblemente por la aparición de organismos multicelulares que se alimentaban de los microbios que contenían. En el actual territorio argentino hay un am-



**Figura 1.** La formación de los estromatolitos. 1. Sobre una superficie se establece una película o tapete de microorganismos. 2. Estos atrapan y fijan sedimentos y, debido a su actividad metabólica, inducen la precipitación de minerales, generalmente carbonatos. 3. La repetición del proceso genera una estructura laminada. 4. El conjunto (dibujado en distinta escala) se puede conservar como fósil en el registro geológico.

plio registro de estromatolitos fósiles en rocas calcáreas, por ejemplo en las sierras Bayas de la provincia de Buenos Aires, en la precordillera de San Juan (figura 2) y en Salta, entre muchos otros lugares. La puna de Jujuy, Salta y Catamarca está entre los pocos lugares del mundo en que se han encontrado estromatolitos activos y en formación (ver María Eugenia Farías, 'Microorganismos que viven en condiciones extremas en lagunas altoandinas', CIENCIA HOY, 126, pp. 30-37).

De central importancia en esta discusión es que no hay una definición satisfactoria de lo que llamamos vida. ¿Cómo buscar algo que no está definido con precisión? Esto es particularmente relevante para encontrar evidencias de vida primitiva, sea en nuestro planeta o en otros. Para esa búsqueda, la cuestión es dónde poner el límite entre geoquímica y bioquímica. Una definición que goza de razonable aceptación para este propósito es la propuesta en 1994 por un comité especial de la NASA: la vida es un sistema químico autosustentable capaz de evolución en sentido darwiniano. Es cierto que es una definición sesgada hacia el único ejemplo de vida que conocemos, la terrestre.

## La impronta de la vida en la Tierra primitiva

Una de las dificultades del estudio de la biosfera primitiva, extensible a la búsqueda de vida en otros planetas, es que en el Arqueano los seres vivos eran microbios, sin partes duras que se fosilizaran y, por lo tanto, con escaso potencial de dejar rastros en el registro geológico. Además, de haber existido algún rastro, lo más probable es que haya sufrido alteraciones posteriores por cambios químicos, de presión o de temperatura en las rocas o los sedimentos, con lo que resulta aun más improbable que se hubiese preservado. A pesar de esas dificultades, los

científicos han recurrido a diferentes técnicas para escrutar la arcaica biosfera microbiana, entre otras:

- El estudio de fósiles de microbios y sus posibles contrapartes modernos, y de estructuras como los estromatolitos.
- El estudio de compuestos orgánicos relativamente resistentes a la degradación química que pueden preservarse en rocas y sedimentos. Como fueron formados por grupos específicos de microorganismos, aportan información sobre procesos metabólicos de esos microbios y sobre la geoquímica ambiental.
- El estudio de ciertos minerales, como carbonatos, óxidos y otros, así como de algunos isótopos de elementos esenciales para la vida (calcio, azufre, hierro, etcétera), ocasionales productos del metabolismo microbiano, que pueden ser reconocidos en los sedimentos y actúan como señales de los organismos que los originaron (figura 3).

Para poder asegurar que determinado atributo es de origen biótico y, por lo tanto, evidencia cierta de vida, se debe descartar la posibilidad de que pueda haber resultado de procesos abióticos. En los estromatolitos precámbricos, a diferencia de los recientes, la acreción de láminas se produjo principalmente por precipitación de minerales, generalmente carbonatos, que rara vez conservan evidencias directas de actividad biológica y suelen presentar una gran diversidad de formas. Para complicar el panorama, es posible que por procesos abióticos se hayan formado estructuras laminadas con todas las características morfológicas de los estromatolitos. Ello lleva a pensar que, por lo menos, algunos estromatolitos del Precámbrico pueden haber sido el resultado de precipitación química, con una participación marginal o nula de procesos biológicos, lo que pone en dudas su valor

**Figura 2.** Estromatolito fósil con forma de domo fotografiado por el autor en la precordillera de San Juan. Data de hace aproximadamente 500 millones de años. El bandeo irregular se debe a cambios de textura y a la presencia de dos minerales: *calcita*, un carbonato de calcio de color oscuro en la foto, y *dolomita*, un carbonato de calcio y magnesio que se ve claro. Mide unos 25cm de ancho en la base.

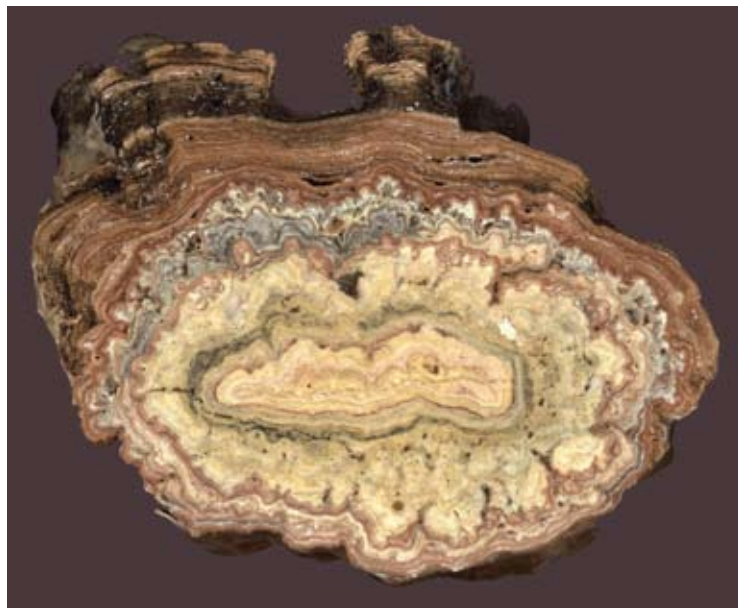


como evidencias de que entonces había vida. La morfología por sí sola no es un buen indicador de la presencia de esta, sobre todo cuando las evidencias primarias resultaron alteradas por cambios ambientales posteriores. Por esta razón, el estudio de análogos modernos constituye una herramienta poderosa, ya que los procesos de formación pueden estudiarse en forma directa y pueden descartarse procesos secundarios de alteración.

## Estromatolitos y búsqueda de vida en otros planetas

Las evidencias morfológicas, sedimentarias, mineralógicas y geoquímicas indican que Marte tuvo una persistente presencia de agua sobre su superficie, particularmente durante su historia temprana, equivalente a cuando apareció la vida en la Tierra. Hay depósitos de, por ejemplo, carbonatos y sulfatos que se formaron por evaporación de agua que contenía esos compuestos en solución. Asimismo hay depósitos silíceos, posiblemente asociados con sistemas hidrotermales, que habrían precipitado al disminuir la temperatura de aguas sobresaturadas de sílice, como sucede hoy en la Tierra.

La importancia de lo anterior para la astrobiología se comprende si se tiene en cuenta que, además de ser el agua un ingrediente esencial de la vida, la presencia de



**Figura 3.** Cara pulida del corte transversal de un estromatolito fósil recogido en las orillas de la laguna Negra, en la puna de Catamarca. Muestra una estructura laminada concéntrica bastante irregular de carbonatos microbianos, común en los estromatolitos de ese lugar. En segundo plano se advierten pequeños estromatolitos columnares (con forma de columna). El color blancuzco de la calcita cambia en determinados lugares por las impurezas contenidas en el carbonato de calcio. Así, los rojizos indican la presencia de hierro. El ancho es de unos 15cm.

**Figura 4.** Laguna Negra, en la puna de Catamarca, cercana al paso de San Francisco que lleva a Chile. En primer plano, estromatolitos y precipitados minerales dejados al descubierto por el agua. Se aprecia que algunos apoyan en sedimentos rojizos, formados por carbonatos.



compuestos disueltos en ella implica la disponibilidad de nutrientes, y amplía el rango de temperaturas en que el agua se mantiene en estado líquido, algo particularmente valioso en la gélida superficie de Marte.

Además, no faltó en Marte la energía electromagnética provista por la luz solar, ni la energía química liberada por reacciones de elementos y sustancias inorgánicas. También es cierto que en Marte, debido a la presencia de agua con compuestos disueltos e intensa evaporación y precipitación, se pudieron formar estructuras morfológicamente similares a estromatolitos. De esto se desprende que es necesario tener cuidado en considerarlos de origen exclusivamente biótico.

## La Tierra arqueana, Marte y los lagos de altura de la puna

Las lagunas de la puna —como la laguna Negra en Catamarca (figura 4), situada no lejos de la frontera con Chile, al oeste de la ruta que conduce al paso de San Francisco y sobre el camino hacia el pie del monte Pisis— se formaron luego de la última glaciación, y desde entonces sufrieron intensa evaporación debido a la extrema aridez, las altas temperaturas diurnas y la gran



**Figura 5.** El autor en la costa de la laguna Negra, en Catamarca. Con la ayuda de una piqueta de geólogo, recoge muestras para analizar en laboratorio y las guarda en una bolsa de plástico.



**Figura 6.** Integrantes del grupo que investiga las condiciones de la laguna Negra en plena labor de campo. Las manchas blancas en primer plano y al fondo son de cloruro de sodio o sal de mesa, que estaba disuelta en agua que resultó evaporada por acción del sol. Además del autor, integran ese grupo Linda C Kah, de la Universidad de Tennessee e integrante del equipo de la NASA que se ocupa de la sonda *Curiosity*, recientemente enviada a Marte; Julie Bartley, del Gustavus Adolphus College, en Minnesota; Ricardo Astini, investigador del Conicet y profesor de la Universidad Nacional de Córdoba, y Martín Argota, estudiante de geología de esa universidad y ayudante en las tareas de campo. Los estudios iniciales fueron financiados con aportes de un programa de pasantías en biología planetaria de la NASA, la American Chemical Society, el Conicet y el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONCYT).

altura sobre el nivel del mar (4500m). Las condiciones ambientales y geológicas de su región tienen marcadas similitudes con las hipotéticas características de ciertos ambientes de la Tierra primitiva y con otras de Marte, lo que convierte a esas lagunas en convenientes laboratorios naturales para la geobiología y la astrobiología. Entre esas condiciones se cuentan:


- Un sustrato rocoso volcánico que sugiere una evolución semejante en cuanto a los procesos de alteración de rocas y sus productos.
- Alta radiación ultravioleta, extremos de temperatura y salinidad, poca lluvia y escasa humedad, baja tensión de oxígeno y ozono en la atmósfera.
- Predominio de vida microbiana asociada con estromatolitos formados por acreción de láminas por precipitación mineral, como los del Precámbrico.
- Aguas saturadas en carbonatos, con pH neutro a ácido y niveles de sulfatos comparables a los océanos del Arqueano.

Una de las particularidades de la laguna Negra es la presencia de comunidades microbianas adaptadas a condiciones extremas, o *extremófilas*, particularmente la hipersalinidad y la intensa radiación ultravioleta. Viven en una zona en que se mezcla agua del lago con otra surgente de acuíferos subterráneos, lo que genera ambientes más favorables, que causan menor estrés salino y crean mejor flujo de nutrientes, entre otras características. En esa zona, también, se producen interacciones químicas que provocan la precipitación de carbonatos y facilitan la mineralización de los tapetes microbianos que son parte de los estromatolitos.

## Consideraciones finales

Los procesos geológicos y los biológicos están estrechamente vinculados y se influyen mutuamente de diversas maneras, tanto sutiles como extremas. Sus interacciones ocurren en escalas espaciales que van desde la microscópica hasta la global, y en escalas temporales que se extienden desde fracciones de segundo a miles de millones de años. La biosfera irrumpió tempranamente en la historia de nuestro planeta y, aunque nuestra comprensión de cómo, cuándo y dónde tuvo lugar avanzó enormemente, los detalles de su aparición están aún poco claros. Pero sabemos que produjo cambios drásticos en la realidad de la Tierra y que, a su vez, estuvo sometida a los vaivenes causados por un interior terrestre térmicamente activo y un exterior dominado por los efectos del Sol, y por los procesos atmosféricos y oceánicos.

La complejidad de las interacciones geológicas y biológicas hace evidente que la línea divisoria entre geolo-

gía y biología es un resultado artificial de nuestro afán por categorizar las cosas para poder comprenderlas, porque, como escribió Carl Sagan, *comprender es una alegría*. La geobiología ocupa una zona gris donde ambas áreas del conocimiento se interrelacionan y constituye, ella misma, una poderosa herramienta para lograr esa comprensión. La astrobiología, por su lado, pone en un contexto cósmico el fenómeno de la vida y algunas de las preguntas fundamentales que le están asociadas. Intentar comprender el origen de la vida y explorar la posibilidad de que esta exista en otros planetas posiblemente sea uno de los desafíos más grandes planteados a la ciencia. Los potenciales beneficios de responder a tan significativa pregunta justifican sin duda los esfuerzos de intentarlo. El estudio de ambientes modernos análogos, como la laguna Negra en la puna catamarqueña, puede darnos algunas pistas fundamentales para saber dónde y cómo enfocar nuestra mirada. 

### LECTURAS SUGERIDAS

- BADA JL**, 2004, 'How life began on Earth. A status report', *Earth and Planetary Science Letters*, 226, pp. 1-15.
- CATLING DC & CLAIRE MW**, 2005, 'How Earth evolved to an oxic state. A status report', *Earth and Planetary Science Letters*, 273, pp. 1-20.
- EHRlich HL & NEWMAN DK**, 2008, *Geomicrobiology*, CRC Press, Boca Ratón-Londres-Nueva York.
- GÓMEZ FJ**, 2007, 'La Tierra primitiva y su transformación en un planeta habitable: evidencias del registro geológico', <http://www.mincyt.cba.gov.ar/site/cordobensis09/ediciones.htm>.
- GROTZINGER J et al.**, 2007, *Understanding Earth*, WH Freeman Co, Nueva York.
- HAZEN RM**, 2007, *Genesis. The scientific quest for life's origin*, Joseph Henry Press, Washington DC.
- KNOLLAH**, 2003, *Life on a young planet. The first two billion years of evolution of Earth*, Princeton University Press.
- KONHAUSER K**, 2007, *Introduction to Geomicrobiology*, Blackwell Publishing, Oxford.
- SÁNCHEZ TM**, 2007, *La historia de la vida en pocas palabras*, Editorial Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.



#### Fernando J Gómez

Doctor en ciencias geológicas, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.  
Investigador asistente del Conicet.  
[fgomez@cicterra-conicet.gov.ar](mailto:fgomez@cicterra-conicet.gov.ar)