

CIENCIAS NATURALES

LA TIERRA



Introducción. El planeta de la vida | ¿Qué tiene en común la Tierra con otros planetas? | Las particularidades de la Tierra | La tectónica de placas | Los arcos volcánicos | Las rocas que conforman la Tierra | Tectónica y vida | La vida "compleja" y la rareza de la Tierra | Tectónica y temperatura

Autores: Dr. Andrés Folguera (UBA y CONICET), Dra. Marcela Cichowols (UBA y CONICET), Dr. Víctor A. Ramos (UBA y CONICET) y Dra. Beatriz Aguirre Urreta (UBA y CONICET) | **Coordinación Autoral:** Dr. Alberto Kornblihtt (UBA y CONICET)

INTRODUCCIÓN. EL PLANETA DE LA VIDA

Cortesía del Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA, Johnson Space Center



A principios de la década de 1970, las teorías más audaces acerca de la presencia de vida tal cual la conocemos en la Tierra y en el universo, influidas por una teoría filosófica no geocéntrica, proponían el siguiente razonamiento: dado que la vida es función de la presencia de agua en estado líquido y de la temperatura superficial del planeta, su desarrollo sólo es factible en planetas que mantengan una distancia a la estrella del sistema planetario similar a la que media entre la Tierra y el Sol. De esta manera, un razonamiento asociado con esa probabilidad sugería que la vida en el universo debía ser un elemento común. Veinte años después, a principios de la década de 1990, surgieron

nuevas teorías que propusieron que la vida en la Tierra depende de una serie de factores más complejos que los pensados previamente. Esos factores parecerían ser exclusivos de la Tierra y se relacionan parcialmente con su particular dinámica interna, al menos respecto de los otros planetas del Sistema Solar. La Tierra, entonces, parece ser progresivamente menos común a medida que se la conoce con más profundidad. No es casualidad que la teoría de la tectónica de placas, un verdadero cambio de paradigma en las ciencias de la Tierra, tenga poco más de treinta años de vida. Esta teoría propone que una serie de placas sólidas que cubren la Tierra poseen movimiento independiente unas de

otras. De esta manera, se ha reformulado el conocimiento de la Tierra como entidad dinámica y se ha relacionado toda una serie de elementos y procesos que previamente eran estudiados por separado, en particular el ciclo del dióxido de carbono y su relación con la erosión de las montañas y el hundimiento del fondo oceánico bajo las masas continentales (subducción), vital para el mantenimiento de una temperatura que posibilita la vida en el planeta. Con el surgimiento y consolidación de la teoría de la tectónica de placas, la Tierra resulta mucho más particular, por lo que la presencia de vida compleja en ella parece ser, paradójicamente, casi una rareza en el universo.

¿QUÉ TIENE EN COMÚN LA TIERRA CON OTROS PLANETAS?

Al menos dos elementos serían comunes a la Tierra y a los demás planetas del Sistema Solar: (a) la estructura interna diferenciada en una serie de capas concéntricas, reflejo de una génesis común, relacionada con procesos de aglutinación por efectos de la gravedad a partir de una nebulosa; (b) la edad, que corresponde a la del sistema planetario en su conjunto, alrededor de 4.570 millones de años (Ma).

La estructura interna de los planetas y satélites extraterrestres se conoce por medio del estudio de los campos magnéticos y gravimétricos respectivos, que son reflejo de las propiedades magnéticas de las rocas superficiales, en el primer caso, y de la masa total del cuerpo, en el segundo. A la vez se realizan modelos en los que se infiere la distribución de masas profundas en función del tipo de rocas supuesto en la superficie y a partir de la señal magnética y de la masa total inferida por la gravedad.

El conocimiento de la estructura interna de la Tierra también es indirecto. Al producirse un terremoto, las oscilaciones generadas a partir de su foco se desplazan por el planeta y son detectadas en superficie por los sismógra-

fos. Al determinar las velocidades de propagación de las ondas en las distintas profundidades de la Tierra, se tiene una idea de las densidades de los materiales atravesados. Cuanto más denso y rígido es el medio en el que una onda sísmica se transmite, mayor es la velocidad con que lo hace. La estructura de muchos planetas, entre ellos la Tierra, corresponde a una serie de capas concéntricas progresivamente más densas, desde la superficie hacia el centro. Se detectan variaciones de densidad abruptas, lo que permite diferenciar seis capas concéntricas. La más superficial corresponde a la atmósfera, única capa gaseosa del planeta. Después se ubica la hidrósfera, correspondiente a los medios líquidos superficiales. Luego se ubican la corteza y el manto litosférico (ambas capas forman la litósfera). Existen dos tipos de cortezas: la continental y la oceánica; esta es levemente más densa que la anterior y se produce en las dorsales centro-oceánicas a medida que las placas se separan.

Los espesores de la corteza son altamente variables: la corteza oceánica posee un espesor relativamente cons-

tante de 6 a 8 km, mientras que la corteza continental es de unos 35 a 40 km en las zonas cercanas al nivel del mar y de hasta 70 kilómetros bajo las montañas más altas.

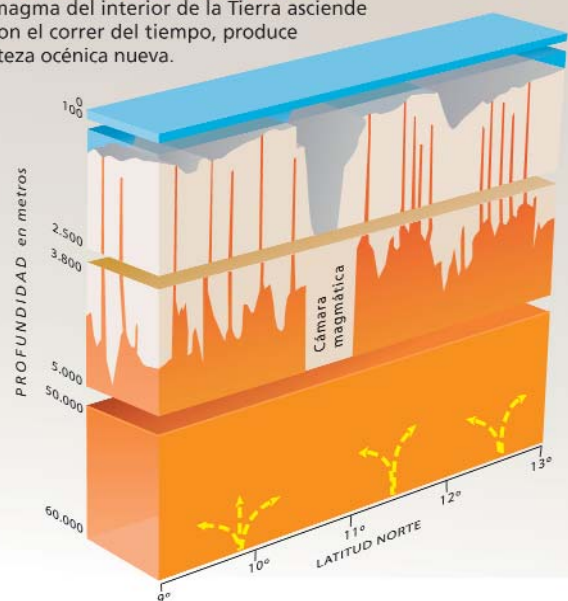
La litósfera en su conjunto representa a las placas que se desplazan, se separan y colisionan. Su base es la isoterma de 1250 °C. Por debajo de ella se desarrolla el manto astenosférico, similar al litosférico, pero no forma parte de las placas móviles de la Tierra. Esta temperatura provoca que un 1,5 % del manto se funda, generando un patín sobre el que las placas litosféricas "navegan" (este es el nivel más superficial donde el progresivo aumento de la temperatura provoca una fusión parcial del manto). Este hecho define un rasgo peculiar de la Tierra relacionado con grandes desplazamientos superficiales de placas litosféricas: los espesores de la litósfera varían entre 100 y 150 km bajo los continentes, y entre 70 y 100 km bajo los océanos.

Finalmente, el núcleo posee dos partes distintivas: la externa es líquida y la interna es sólida; ambas presentan una composición similar y equiparable a una aleación de hierro y níquel.



DORSAL CENTRO-OCEÁNICA

El magma del interior de la Tierra asciende y, con el correr del tiempo, produce corteza oceánica nueva.



LAS PARTICULARIDADES DE LA TIERRA

Ciertas características particulares de nuestro planeta han permitido el desarrollo, la evolución y la permanencia de la vida en él: los océanos, una única luna excepcionalmente grande en relación con la Tierra, la persistencia de un campo magnético y la tectónica de placas. La presencia de los océanos se relaciona con una distancia determinada entre el Sol y la Tierra; si ella fuera modificada, no existiría agua en estado líquido.

El tamaño proporcionalmente grande de la Luna estabiliza el eje de rotación de la Tierra, lo que evita grandes variaciones angulares. En planetas cuyo eje de rotación varía notablemente (por ejemplo, hasta 60° en Marte), los efectos climáticos aparejados son extremos y pueden constituir un obstáculo para la vida. Si la Tierra no tuviera un único satélite proporcionalmente grande, los campos gravitatorios de los planetas “gigantes”, sobre todo de Saturno y Júpiter, habrían producido variaciones desmesuradas en la inclinación de su eje de rotación.

La existencia de un campo magnético alrededor de la Tierra es un elemento común a algunos planetas del Sistema Solar, como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Sin embargo, en es-



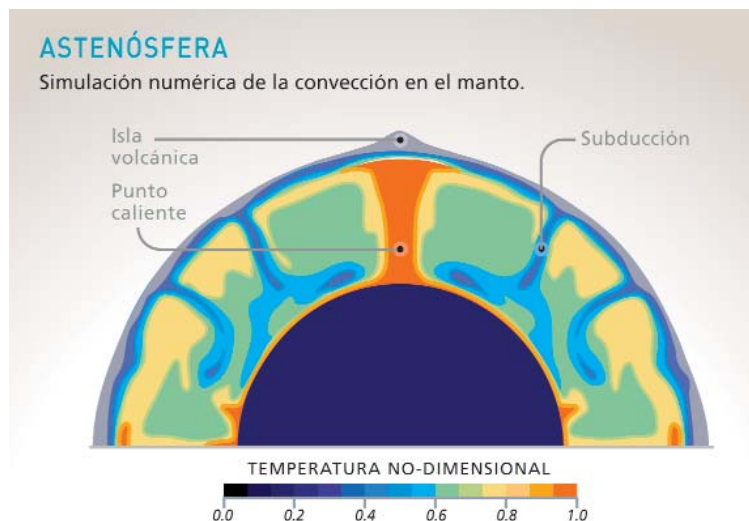
Cortesía de Calvin J. Hamilton

Los océanos cubren la mayor parte de la superficie de la Tierra y son quizá su componente más extraño.

tos el componente rocoso es menor, por lo que no son directamente comparables con la Tierra. La presencia de este campo magnético que envuelve nuestro planeta devela su actividad interna, ya que se trata de un campo bipolar generado por el movimiento de material metálico fundido en el núcleo externo. Si no existiera un núcleo externo líquido, el campo magné-

tico se extinguiría. Al comparar la Tierra con los demás planetas rocosos (Mercurio, Venus y Marte), resulta que su campo magnético y su intensidad relativamente alta constituyen elementos singulares. Mercurio es el único de esos tres planetas que posee campo magnético, pero su intensidad es cien veces menor que el terrestre. Este hecho resulta raro, ya que, a partir de la gravedad respectiva, se infiere un gran núcleo metálico en ese planeta. Sin embargo, el contenido de hierro sería muy inferior al del núcleo terrestre, lo que provocaría un imán electromagnético deficitario en comparación con el de la Tierra. Los otros dos planetas rocosos probablemente hayan tenido campos magnéticos, pero se habrían extinguido. La permanencia del campo magnético en la Tierra quizás esté relacionada con la existencia de un núcleo excepcionalmente grande en comparación con sus dimensiones.

El campo magnético terrestre posee polaridad normal en los períodos en los que las líneas de fuerza correspon-



dientes al campo emergen del Polo Sur y convergen en el Polo Norte, como ocurre en la actualidad. No obstante, presenta reversiones bruscas a lo largo del tiempo geológico y el sentido de las líneas de fuerza se invierte (el origen de este proceso es motivo de constante estudio). Si bien estas reversiones se dan en lapsos variables y sin aparente regularidad, ocurren en períodos que oscilan entre menos de cien mil años y varias decenas de millones de años.

El manto astenosférico, a pesar de ser sólido, posee una dinámica particular de movimiento extremadamente lenta, que consiste en que algunos sectores ascienden y se ubican por debajo de los fondos oceánicos y masas continentales, mientras otros sectores se hunden, describiendo celdas de circulación del material (convección). La

convección es la mecánica causante de la pérdida de calor de la Tierra, superior a la conducción térmica, que sólo impera en niveles superficiales. Sectores del manto más profundo son calentados, por lo que disminuye su densidad y les permite ascender hasta alcanzar niveles superiores, para enfriarse y volver a descender por efecto del aumento de la densidad. De esta manera, la convección refleja un cuadro heterogéneo de distribución de temperaturas en la superficie del núcleo externo de la Tierra, en el que sectores anómalamente calientes generan penachos ascendentes de roca que fluyen durante millones de años. Otros planetas, como Marte y Venus, probablemente hayan tenido convección a nivel del manto, que se habría detenido por la disipación de su calor interno.



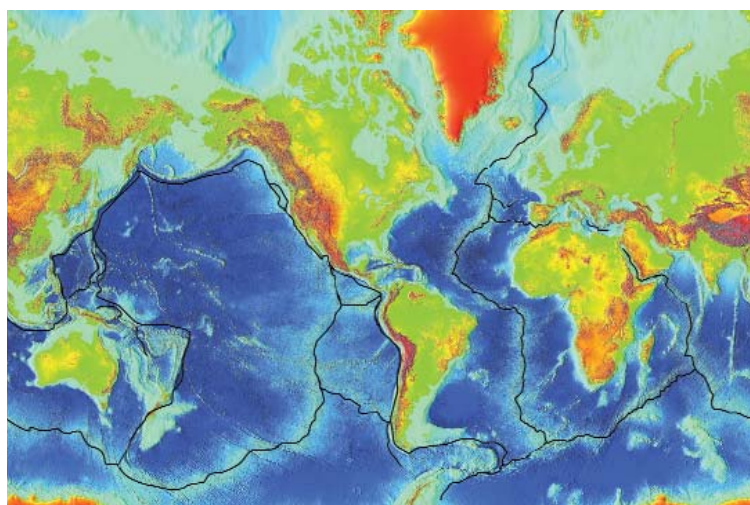
El campo magnético terrestre es un escudo contra las radiaciones cósmicas dañinas y un elemento retenedor de la atmósfera.

Cortesía de Walter S. Kiefer

LA TECTÓNICA DE PLACAS

La tectónica de placas es un elemento particular de la Tierra. La superficie terrestre se divide en catorce placas principales, las que pueden separarse o colisionar. Otros astros como Marte, Venus y dos lunas de Júpiter han tenido formas particulares de tectónica, presumiblemente no activas.

Los sectores en los que dos placas se separan coinciden con los sitios donde el manto astenosférico asciende, abovedando la superficie terrestre. Así, la base de la litósfera se inclina de manera divergente con respecto al flujo de manto ascendente y resbala hacia afuera por efecto de un plano inclinado (el plano correspondiente a la isoterma de 1250 °C); de esta forma se produce la separación de dos placas. Cuando se separan dos placas oceánicas, se forma una fisura entre ellas (llamada dorsal centro-oceánica) de la que emana roca fundida (lava) en forma casi continua. Este es el



Cortesía de NOAA, National Geophysical Data Center, EEUU.

Distribución de placas y masas continentales actuales en la Tierra.

mecanismo de formación del fondo oceánico, por lo cual la edad de las rocas que lo componen es progresivamente mayor cuanto más alejadas están de una dorsal. En el caso de separarse dos zonas continentales, se forma un valle de fractura, que podrá derivar en una dorsal centro-oceánica

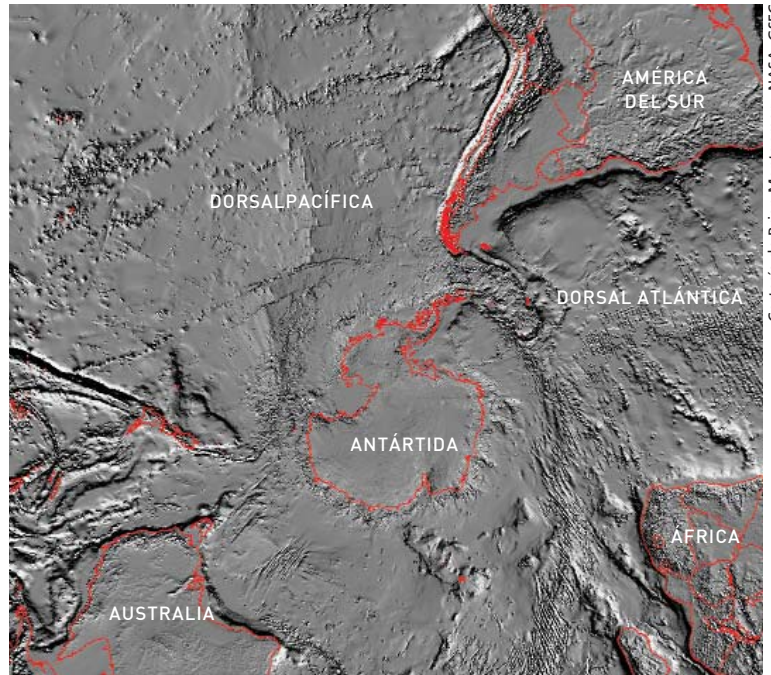
si ocurre la separación total de los continentes y la formación de un océano entre ellos.

Existen también sectores en donde dos placas colisionan. Estas áreas pueden clasificarse en dos tipos: zonas de subducción y zonas de colisión. Las primeras corresponden al caso de una

TEORÍA DE LA TECTÓNICA DE PLACAS

La teoría de la tectónica de placas fue básicamente elaborada a partir de dos grandes impulsos largamente separados en el tiempo. Inicialmente, el meteorólogo y geólogo alemán Alfred Wegener (1880-1930) propuso la teoría de la deriva continental (1911) apoyándose en una serie de evidencias geográficas (similitud geométrica de las costas de Sudamérica y África), paleontológicas (faunas y floras continentales fósiles equivalentes a uno y otro lado de las márgenes), geológicas y paleoclimáticas (depósitos glaciares de edades equivalentes en márgenes continentales enfrentados). Esta teoría debió esperar 50 años para ser aceptada, ya que carecía de una base teórica física para explicar estos fenómenos y de otra serie de hallazgos geofísicos que confirmarían finalmente la

teoría de la deriva continental. Con el surgimiento de la teoría de la tectónica de placas durante la década de 1960, reapareció el concepto de deriva continental. De esta manera, a partir del reconocimiento de la simetría en las anomalías magnéticas del fondo oceánico a ambos lados de una dorsal centro-oceánica, se retoma la idea de que las masas continentales se desplazan horizontalmente. Al separarse dos placas oceánicas a partir de una dorsal centro-oceánica, quedan registradas bandas de magnetización alternadas (generadas por los cambios de polaridad del campo magnético a través del tiempo), simétricas a ambos lados de la dorsal y paralelas a la dirección de ella. Esta observación fue una evidencia decisiva de la expansión del fondo oceánico y, consecuentemente, de la movilidad de las placas.



Topografía de las masas continentales y de las cuencas oceánicas en el hemisferio sur. Se pueden ver las dorsales desarrolladas en los centros de los océanos Pacífico y Atlántico.

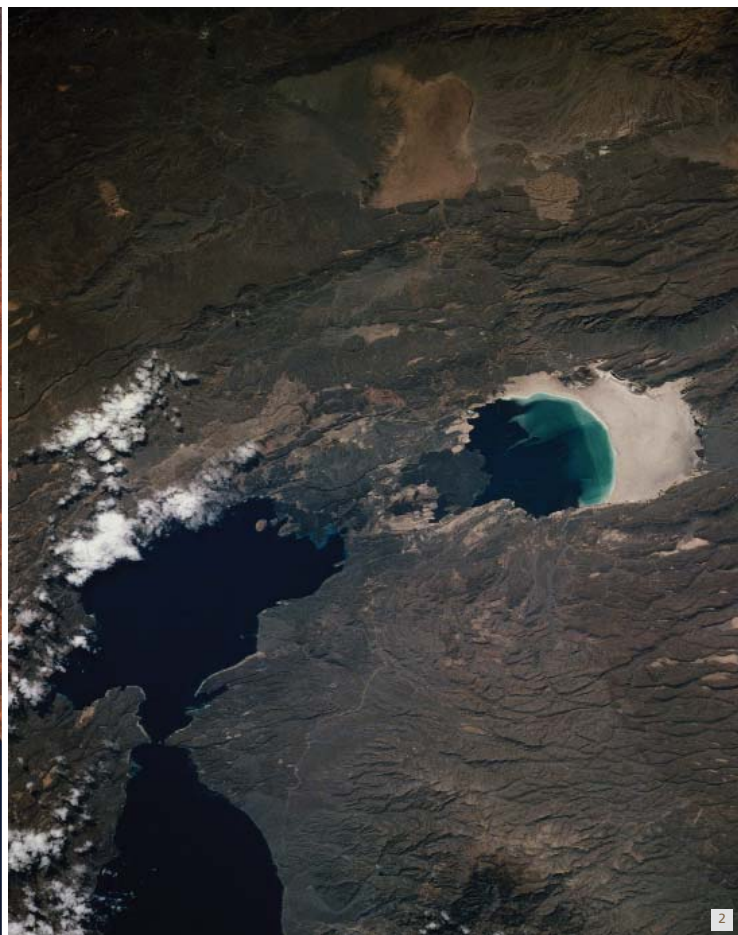
Cortesía de Brian Montgomery, NASA, GSFC

placa oceánica que converge con una continental u oceánica. Para tener una idea de la magnitud de este proceso, el fondo del océano Pacífico se sumerge a una velocidad de 6,8 cm/año por debajo del continente sudamericano. Estos sectores coinciden con zonas en las que el manto astenosférico fluye de manera descendente. En este caso, la placa oceánica se hunde bajo la continental debido a dos efectos: uno de ellos corresponde al empuje desde las zonas de las dorsales, que provoca el movimiento horizontal de la placa oceánica (efecto del plano inclinado desde las dorsales hacia los continentes) y su posterior penetración por debajo del continente. El otro efecto aparece cuando la placa oceánica se sumerge en el manto astenosférico a una profundidad en la que la roca que la compone sufre una compresión derivada de las crecientes condiciones de presión. Estas provocan el aumento de su densidad y un efecto de arrastre en el borde libre de la placa. El segundo tipo de zona de colisión entre dos pla-

cas —o simplemente zona de colisión, como la hemos denominado— corresponde al caso en el que dos placas continentales convergen y una se desplaza por encima de la otra. En este caso, la baja densidad de la corteza continental, en comparación con la corteza oceánica, impide que esta se hunda con facilidad en la astenosfera, por lo que no experimenta cambios de densidad que serían factibles a mayores profundidades y presiones. Al no subducirse la corteza continental, su baja flotabilidad provoca las montañas más altas de la Tierra, cuyo ejemplo activo es el Himalaya.

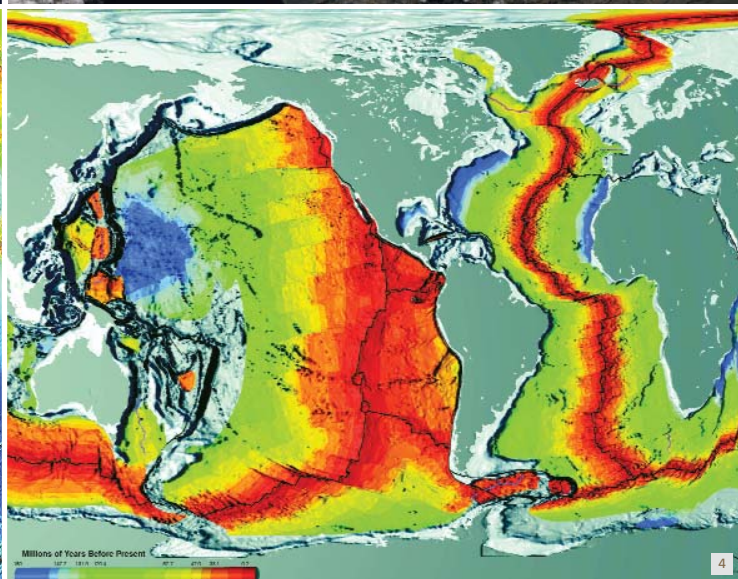
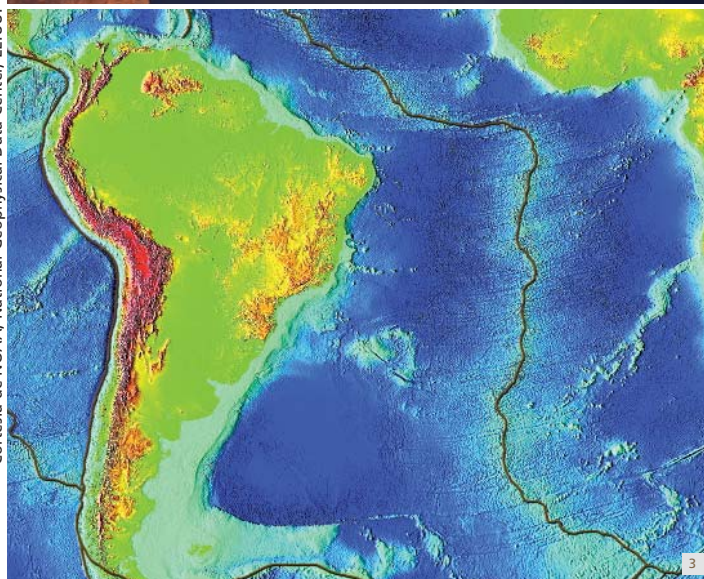
A veces, los bordes convergentes de placas, ya sean continentales o una placa oceánica y otra continental, son áreas en las cuales se forman cordilleras. Todas las cordilleras poseen estructuras similares, con leves diferencias relacionadas con la magnitud de la colisión o con la rigidez de los materiales que conforman las placas. En principio, todas las cordilleras se forman por el apilamiento de segmentos de decenas de kilómetros de

Cortesía del Earth Sciences and Image Analysis Laboratory / NASA, Johnson Space Center



Cortesía del Earth Sciences and Image Analysis Laboratory / NASA, Johnson Space Center

Cortesía de NOAA, National Geophysical Data Center, EE.UU.



Cortesía de NOAA, National Geophysical Data Center, EE.UU.

1. Valle de fractura del Mar Rojo. En su interior ha comenzado el proceso de formación de suelo oceánico, asociado a la separación de las placas Africana y Asiática. Las flechas indican la dirección de desplazamiento del terreno.

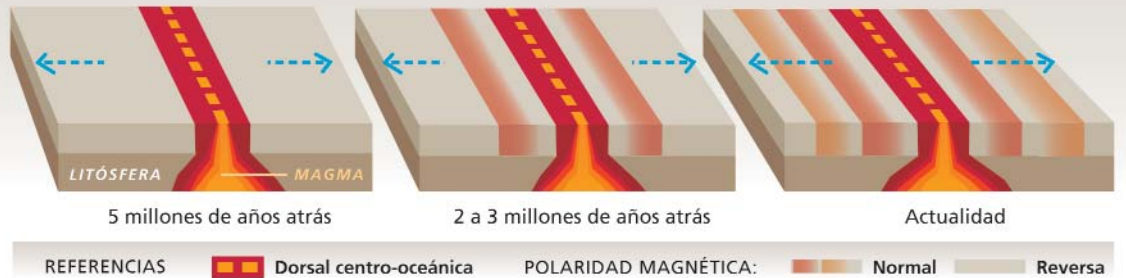
2. Límite occidental del Golfo de Adén. Se pueden ver las fracturas en dirección este-oeste que atestiguan el proceso de fracturación de la placa Africana.

3. La dorsal centro-atlántica genera corteza oceánica a ambos lados desde hace unos 180 millones de años.

4. Edades del fondo oceánico. Se observan bandas paralelas a las dorsales centro-oceánicas en donde se va formando la corteza oceánica.

EXPANSIÓN DEL FONDO OCEÁNICO

Las dorsales centro-oceánicas se expanden en forma paralela a las bandas de edad de la corteza oceánica. En los últimos cinco siglos, el océano Atlántico se ensanchó 30 metros.



espesor de litósfera continental, lo que provoca su engrosamiento. De esta manera, existe una relación entre la magnitud de la colisión entre dos placas y la altura que alcanza el sistema montañoso asociado con ella.

LOS ARCOS VOLCÁNICOS

Un rasgo único de la Tierra (asociado a la tectónica) es la presencia de hileras de volcanes alineados con los lími-

tes de placas, conocidas como arcos volcánicos, en los que el fondo oceánico se sumerge bajo el continente (subducción). Los magmas que alimentan a los arcos volcánicos se originan por efecto de la tectónica de placas. El fondo marino, como hemos visto, está formado por rocas generadas en las dorsales centro-oceánicas. Estas rocas recientemente formadas, al enfriarse la lava que les dio origen los primeros minutos de su ascenso a

la superficie, contienen silicatos magnesianos y férricos, alterados posteriormente por el agua marina. Los minerales resultantes de este proceso de alteración poseen una composición equivalente a sus predecesores, pero, adicionalmente, contienen agua dentro de su estructura cristalina. Estas nuevas formas son perfectamente estables en el fondo marino, pero al ser transportadas por medio de la subducción a mayores profundidades dentro del manto astenosférico, sufren transformaciones mineralógicas a causa de las mayores condiciones de presión y temperatura. Los minerales resultantes expulsan el agua contenida e hidratan el manto astenosférico. De esta manera, el manto astenosférico, que se encuentra en estado sólido debido a la alta presión (ya que en la superficie estaría fundido a las temperaturas en las que se encuentra), se funde parcialmente mediante la acción del agua, lo que origina magmas que ascienden hacia la superficie, formando una barrera de volcanes paralelos a la línea de la costa.

Por lo tanto, sin subducción y sin mar, las rocas del manto astenosférico permanecerían secas permanentemente, por lo que no se fundirían ni se formarían volcanes cerca de los bordes continentales.

LÍMITES DE PLACAS

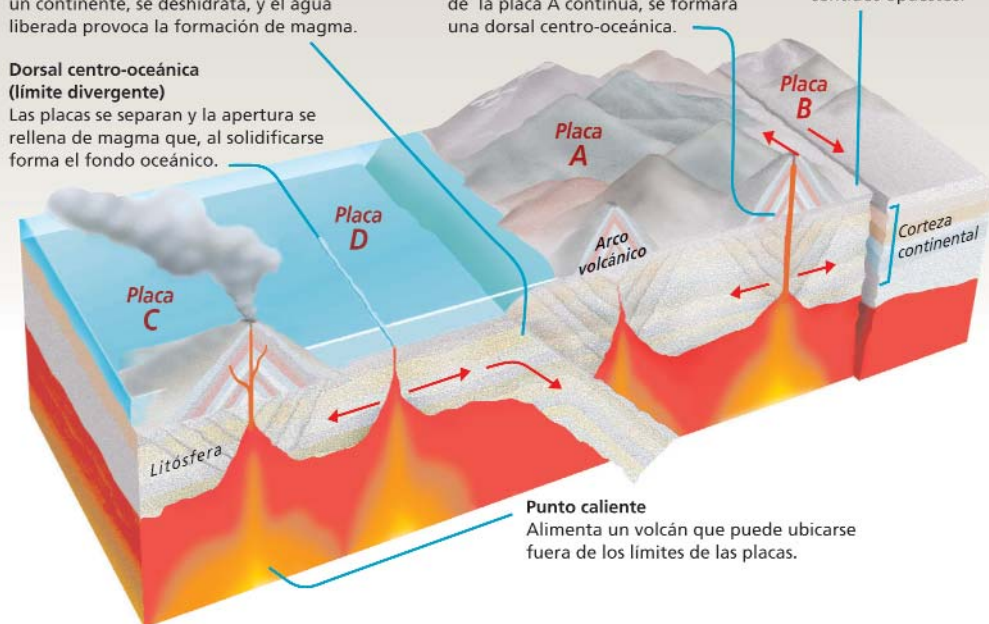
Diferentes mecanismos de formación de cordilleras y rocas volcánicas, por la separación y colisión de dos placas oceánicas.

Zona de subducción (límite convergente)
La corteza oceánica se hunde debajo de un continente, se deshidrata, y el agua liberada provoca la formación de magma.

Dorsal centro-oceánica (límite divergente)
Las placas se separan y la apertura se rellena de magma que, al solidificarse forma el fondo oceánico.

Valle de fractura o Rift
Si la separación entre las dos partes de la placa A continúa, se formará una dorsal centro-oceánica.

Límite transforme
Las placas se mueven horizontalmente en sentidos opuestos.



LAS ROCAS QUE CONFORMAN LA TIERRA

Luego de haber revisado la dinámica de la litósfera, estamos en condiciones de abordar los mecanismos de formación de rocas en la Tierra, su clasificación y la descripción del ciclo que conecta a los diferentes tipos.

Las rocas formadas a partir de lavas correspondientes a magmas (material fundido en tránsito o entrampado dentro de la corteza terrestre) que se derraman en la superficie se denominan rocas volcánicas. Estas rocas se forman en numerosos planetas y lunas del Sistema Solar; en la Tierra sólo algunas de ellas se generan en respuesta a la tectónica de placas. En nuestro planeta hay tres mecanismos formadores de rocas volcánicas:

- La descompresión del manto astenosférico por separación de dos placas oceánicas en las zonas de dorsales o debido a la formación de un valle de fractura en un proceso de frag-

mentación de un continente. Al liberarse la carga que confina las rocas del manto, se produce su fusión parcial, el consecuente ascenso de magmas y su posterior derrame en o cerca de la superficie en forma de rocas volcánicas.

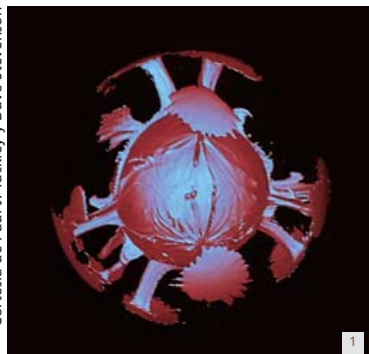
- Grandes volúmenes de magma que ascienden en forma de gigantescos penachos desde la interfaz núcleo-manto (plumas), que alcanzan potencialmente la superficie de los fondos oceánicos y de los continentes, y generan grandes volcanes.

- La fusión parcial del manto astenosférico por hidratación, durante la subducción de una placa oceánica, y el ascenso del magma generado que alimenta los arcos volcánicos.

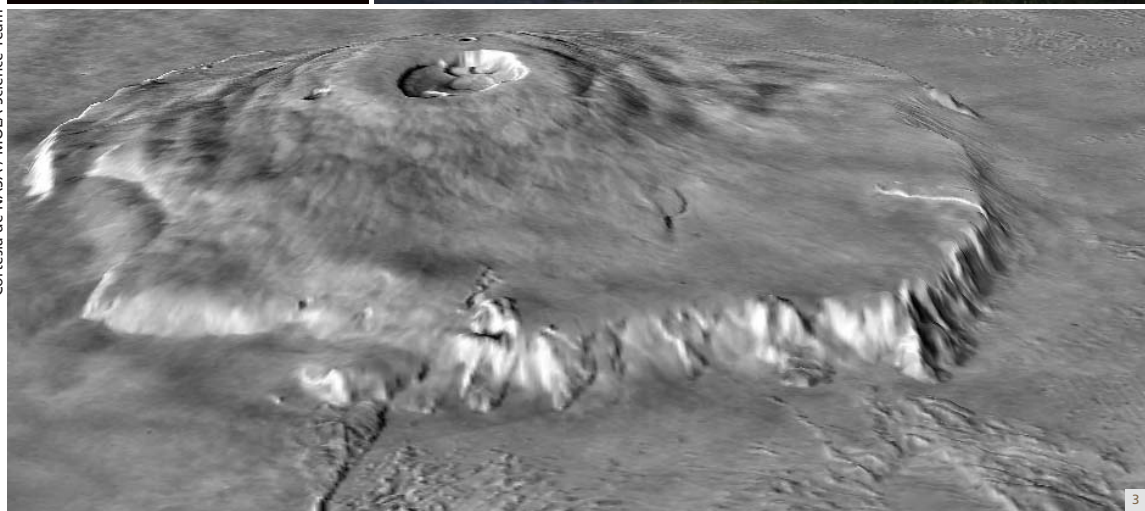
Los dos primeros mecanismos están presentes en otros planetas del Sistema Solar, mientras que el tercero sólo está presente en planetas con procesos de subducción activos. En la Tierra, debido a que las plumas interceptan una litósfera en desplazamien-

to a causa de la tectónica de placas, los magmas respectivos generan cadenas de volcanes que se disponen paralelos a la dirección de movimiento, a diferencia de los arcos volcánicos, que se forman paralelos a los límites de placas. En estas cadenas permanece activo únicamente el volcán ubicado sobre la pluma, que ha sido el último en formarse, como es el caso del volcán Kilauea en las islas Hawai, lo que provoca la formación de una cadena de volcanes extinguidos por detrás del último en formarse, que fueron activos cuando se encontraban ubicados sobre la pluma. En otros planetas, como Marte, que actualmente carecen de tectónica de placas, las plumas no generan cordones volcánicos ya que las placas no se desplazan. El aporte de magma se realiza entonces en un punto fijo a lo largo del tiempo, y así se generan los volcanes más elevados y de mayor diámetro del Sistema Solar.

Cortesía de Paul J. Tackley y Dave Stevenson



Cortesía de NASA / MOLA Science Team



Cortesía de Andrés Folguera



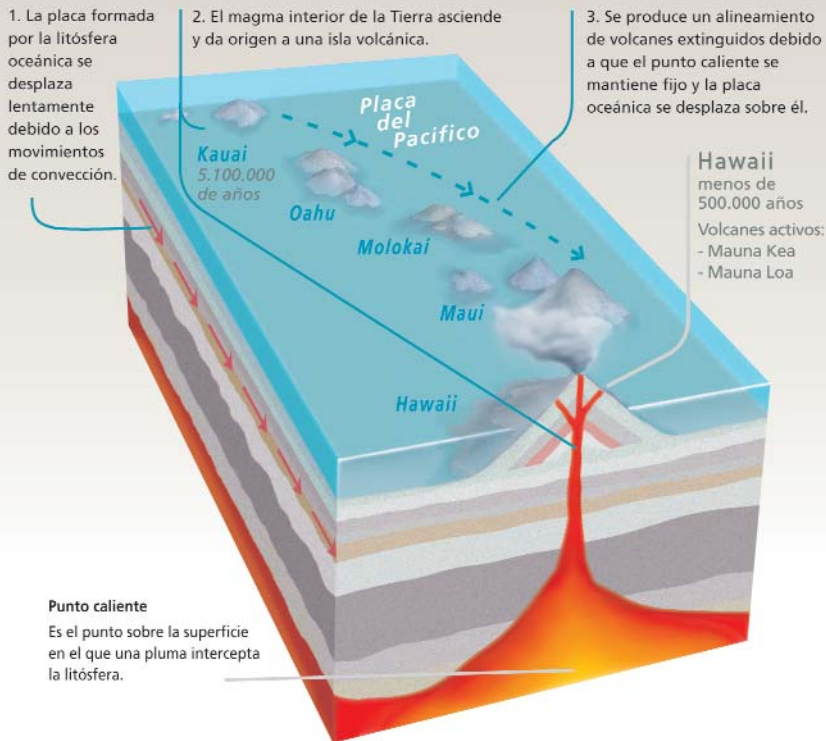
1. Simulación numérica de la convección en el manto en la que se desarrollan plumas que ascienden hacia la superficie desde la interfaz núcleo-manto.

2. Volcán Villarrica, al sur de Chile, generado por la subducción del fondo del océano Pacífico bajo la placa sudamericana, al igual que el resto de la cadena de volcanes activos argentino-chilenos.

3. El Monte Olimpo en Marte se genera a partir de una pluma que asciende desde el manto y que, al no interceptar una placa móvil, genera el volcán más grande del Sistema Solar, con 600 km de diámetro de base y 26,4 km de altura.

PLUMAS Y PUNTOS CALIENTES

Ciertas cadenas de volcanes se forman por la intercepción de la litósfera por parte del magma ascendente desde la astenósfera.



Un segundo tipo de rocas corresponde a las rocas plutónicas, que se forman mediante los mismos procesos descritos para las rocas volcánicas, pero en este caso los magmas a partir de los que se generan no alcanzan niveles superficiales, sino que quedan entrampados en la corteza, y se enfrían lentamente. Luego de su formación, estas rocas quedarán expuestas en la superficie a causa del levantamiento de montañas y su consecuente erosión. Las rocas plutónicas y las volcánicas pertenecen al grupo de las rocas ígneas, que se define como el conjunto de rocas originadas a partir de un material fundido (magma).

Mediante la transformación de distintos tipos de rocas bajo condiciones de presión y temperatura diferentes de las de su formación se origina un tercer grupo: las rocas metamórficas. Estas parecen ser exclusivas de la Tierra, ya que están íntimamente asociadas con la tectónica, y se generan por dos mecanismos principales.

- A partir de la subducción de la corteza oceánica, las rocas del fondo oceánico son transportadas a condiciones de presión y temperatura en las que se produce la transformación de los minerales formados en los niveles superficiales en minerales estables en condiciones de mayor presión y temperatura.

- A causa de la formación de cordilleras, la litósfera continental es apilada por subducción o colisión. De esta forma, sectores superiores de la corteza son transportados a niveles más profundos en donde existen presiones y temperaturas más elevadas, que generan transformaciones metamórficas de las rocas (profundidades superiores a 55 kilómetros).

Un cuarto grupo es el de las rocas sedimentarias, que se forman exclusivamente en la superficie terrestre por acumulación (sedimentación) y consolidación de partículas provenientes de la desagregación de rocas preexistentes (meteorización) o por la precipitación de sales a partir de soluciones (aguas con sales disueltas). El proceso



Sedimentos acumulados en forma de delta, en el mar Mediterráneo, en la desembocadura del río Nilo.

de desagregación de las rocas ocurre por alteración en climas particularmente húmedos, por ciclos de congelamiento y descongelamiento en sectores de montañas y desiertos, por arranque de bloques por la acción de glaciares o por derrumbes en sectores escarpados. También hay rocas sedimentarias que se forman a partir de la agregación de conchillas de organismos, que se consideran partículas aunque no provengan de la desagregación de rocas. El transporte de las partículas desde los sectores montañosos hacia el mar, o desde sectores someros (playas y plataformas) hacia otros más profundos en los océanos, se efectúa por medio de los ríos, los glaciares, las avalanchas submarinas y los vientos. Las partículas se acumulan en áreas deprimidas (cuencas) que, al consolidarse, forman secuencias de rocas distintivas. Se pueden

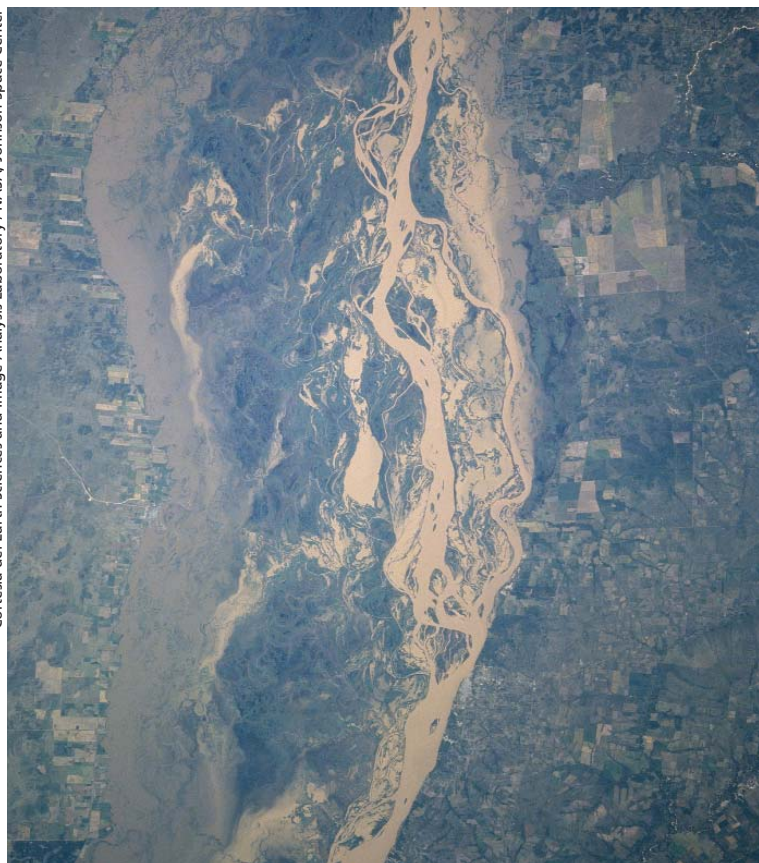
identificar secuencias de rocas sedimentarias acumuladas en el fondo del mar, deltas, plataformas marinas, playas, lagos, ríos, desiertos de arena y sectores adyacentes a las bases de las montañas. Estas, en la gran mayoría de los casos, son expuestas en la superficie a partir de los dos procesos principales formadores de montañas, ligados a colisiones entre dos masas continentales o a causa de la subducción de la litósfera oceánica bajo la litósfera continental. De esta manera, acumulaciones sedimentarias formadas a miles de metros de profundidad en los océanos pueden terminar expuestas a miles de metros de altura sobre el nivel del mar en unos pocos millones de años.

El otro subconjunto de rocas sedimentarias no se forma a partir de la agregación de partículas provenientes de la desintegración de rocas previas,

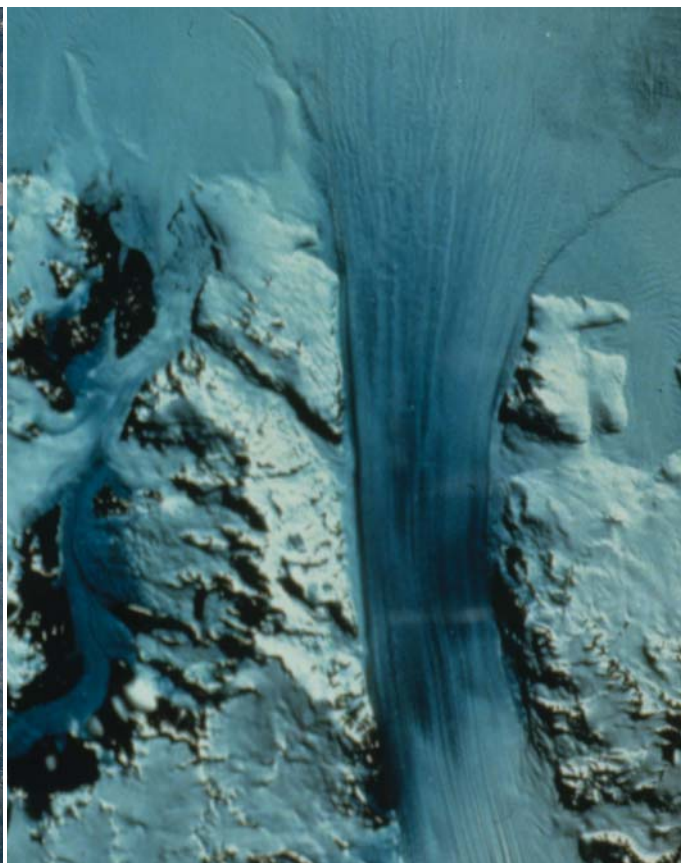
sino de la cristalización de aguas salobres. Dos procesos principales provocan la precipitación de estas sales: uno corresponde a la evaporación total o parcial de un cuerpo de agua en zonas áridas y la consecuente formación de salinas; el otro resulta de los cambios en las condiciones químicas de un cuerpo de agua, básicamente acidez y contenido de oxígeno disuelto.

Un tipo particular de rocas sedimentarias se asocia con la acumulación de materia orgánica de origen animal y vegetal que derivará en la formación de los yacimientos de hidrocarburos, particularmente petróleo y carbón. Las secuencias sedimentarias con mayor potencialidad para formar reservorios de este tipo corresponden a grandes deltas de climas húmedos, plataformas marinas, lagos, pantanos ribereños y costaneros, entre otros.

Cortesía del Earth Sciences and Image Analysis Laboratory / NASA, Johnson Space Center



Sedimentos acumulados en la planicie del río Paraná.



Transporte de sedimentos desde un área de montañas hacia el mar a través de glaciares en la Antártida.

Cortesía del U.S. Geological Survey / Woods Hole Science Center

ROCAS PARTICULARES

Existe otro tipo de rocas que merece ser descripto, no por su ocurrencia en la Tierra, la cual es relativamente despreciable, sino por su interés económico y energético. Ciertos minerales, algunos de ellos correspondientes a elementos puros, son concentrados anómalamente en la corteza terrestre. Ejemplos de ello son el oro, la plata, el

cobre, el molibdeno, el manganeso, el plomo, el zinc, el níquel, el cobalto, el mercurio y el arsénico. Si bien estos minerales resultan muy conocidos debido a su valor económico, constituyen verdaderas rarezas en la Tierra, ya que están presentes en ciertas rocas en concentraciones mínimas y se hallan sólo en formas apreciables, y por lo tanto

explotables, luego de su concentración por medio de agentes naturales. El proceso principal que las provoca es su redistribución por medio de corrientes de aguas calientes (hidrotermalismo). Esto sucede a partir de la extracción de estos minerales por disolución parcial de rocas preexistentes, transporte en solución y

resedimentación a causa de cambios en la temperatura y en las propiedades químicas del agua que los transporta, como la acidez y el contenido de oxígeno. Estas aguas pueden originarse a partir de la deshidratación de magmas o a partir de agua de lluvia y de deshielo calentada en sectores volcánicos o en fracturas profundas en las que se infiltra.

TECTÓNICA Y VIDA

Se estima que cada 200-300 Ma los continentes colisionan y conforman una gran masa continental denominada "supercontinente", con consecuencias catastróficas para la vida. Una serie de efectos se desencadenan a partir de este proceso.

Como resultado de la formación de un supercontinente, disminuyen drásticamente las áreas de plataformas marinas, en donde se concentra preferentemente la vida en los océanos, al cerrarse los mares entre las piezas que colisionan. Además, las plataformas marinas quedan expuestas por fenómenos relacionados con la pérdida del calor interno de la Tierra, que se realiza más eficientemente a través de la corteza oceánica, que es mejor conductora térmica que la corteza continental. De esta manera, el calor se acumula bajo el supercontinente, que actúa como un gigantesco escudo para la disipación térmica, lo que resulta en un abovedamiento de la superficie. Así mismo, las montañas generadas en las múltiples zonas de colisión que dieron origen al super-

continente representan áreas en las que se desarrollan grandes masas glaciarias que enfrían la atmósfera en forma directa y aumentan la reflectividad del planeta, disminuyendo la retención de la radiación solar. El congelamiento de gran parte del agua continental provoca una disminución del agua fluvial y la generación de grandes desiertos interiores. En estos desiertos se produce la evaporación del agua antes de llegar al mar, con la consecuente precipitación de las sales disueltas en el interior continental. Así, los mares reciben un menor aporte salino durante estos períodos que afecta a gran parte de la vida marina.

Los supercontinentes son configuraciones inestables en el tiempo. Una vez formados, apenas subsisten unas pocas decenas de millones de años. La inestabilidad supercontinental radica en la forma en que el calor interno de la Tierra se elimina a través de la corteza hacia la atmósfera.

Al formarse un supercontinente, el calor acumulado en la base de la litósfera genera bolsones térmicos que no

son efectivamente desagotados debido al enorme tamaño de la masa continental. Estos "puntos calientes" finalmente provocan el endomamiento de la superficie del supercontinente y la generación de grietas que derivan en valles de fracturas, comenzando así el proceso de ruptura. Algunos de estos valles finalmente desarrollan fondos oceánicos y se reanuda el proceso de deriva continental, que conlleva a la fragmentación del supercontinente. Luego, los continentes resultantes de la desagregación se separan progresivamente a lo largo de dos a tres centenas de millones de años hasta encajar otra vez en una nueva configuración supercontinental. En cambio, cuando las masas continentales se encuentran fragmentadas (períodos en los cuales no existe un supercontinente), el calor interno del planeta se elimina principalmente a través del fondo de los océanos y de los volcanes. El calor que se acumula bajo los continentes se elimina en forma deficitaria por su superficie, ya sea por medio de los arcos volcánicos y los volcanes relacionados

con plumas, o a lo largo de sus bordes, ya que el calor fluye hacia la periferia de estos hasta encontrar corteza oceánica.

El final del Paleozoico (hace 250 Ma) estuvo marcado por la mayor extinción masiva de la historia de la Tierra, que actuó tanto en el continente como en los mares. Las causas probables de esta crisis se asocian a la formación del último supercontinente de la historia terrestre, denominado Pangea. En ese momento, todas las masas continentales se unieron en una sola unidad; esto trajo aparejada la disminución de las áreas de plataforma, que afectó a la vida marina que habitaba en ellas. En las partes centrales de Pangea, debido a la lejanía del mar, se formaron desiertos en los que la temperatura fluctuaba entre extremos muy fríos y muy cálidos. La disminución de áreas habitables y los cambios climáticos de orden mayor son las razones más convincentes para las causas de esta extinción, que significó la desaparición del 95 % de las especies existentes en ese momento. Pangea comenzó a agrietarse en numerosos valles de fractura hace 250 Ma y finalmente, hace 180 Ma, se desintegró al desarrollarse completamente el océano Atlántico. En la actualidad estamos transitando esta última gran desintegración supercontinental que no ha cesado aún, en la cual los fragmentos que componían Pangea se alejan unos de otros. Sudamérica se está alejando de África a una velocidad de 2 cm por año.

En contraposición con las extinciones asociadas con la formación de supercontinentes, los períodos de fragmentación parecen ser momentos óptimos para la proliferación y diversificación de la vida. Algunas teorías relacionan el fenómeno conocido como "Explosión del Cámbrico" (hace aproximadamente 540 Ma), que consistió en una gran diversificación de formas de vida animal, con la fragmentación de un supercontinente llamado Rodinia que existió al final del Proterozoico (hace unos 900 Ma). Esta fragmentación, ocurrida hace 700 Ma, generó un aumento considerable de áreas de mares

someros, prósperas para la vida, y ofreció nuevas oportunidades evolutivas.

LA VIDA "COMPLEJA" Y LA RAREZA DE LA TIERRA

Muchos científicos parecen haber comenzado a tener dudas acerca de la alta probabilidad de presencia de vida "compleja" (multicelular) en el universo. La Tierra, tal como hemos visto, que ha generado estos niveles de vida y los sostiene, parece reunir ciertas características únicas respecto de otros planetas.

Sin embargo, varios investigadores creen que la vida simple (de tipo microbiano), similar a la que habitó la Tierra durante gran parte de su historia (probablemente desde hace 3.500 Ma hasta hace 600 Ma), podría ser altamente probable en numerosos planetas del cosmos. A partir del hallazgo de supuestos fósiles en un meteorito procedente de Marte, algunos científicos proponen que la vida pudo originarse fuera de la Tierra, y que habría llegado aquí y a Marte desde el espacio exterior en meteoritos y cometas. Los restos de organismos encontrados en

este meteorito corresponderían a estructuras mineralizadas de bacterias. Marte posee una baja gravedad debido a su tamaño, lo cual, junto con su tenue atmósfera, favorecería que los impactos de grandes asteroides y cometas contra su superficie salpicaran de esquivas a la vecina Tierra.

Los primeros indicios de vida en la Tierra aparecen en rocas del principio del Arqueozoico (3.600 a 2.500 Ma atrás). Hasta hace algunos años, las primeras evidencias de vida sin cuestionar correspondían a restos preservados en rocas de 3.500 Ma de antigüedad. Estos restos consisten supuestamente en estructuras llamadas estromatolitos, de origen organosedimentario, que hoy en día se forman mediante la acción de cianobacterias fotosintéticas. Junto con estas estructuras se encontraron filamentos microbianos celulares que fueron asignados al grupo de las cianobacterias, constituyendo así los fósiles más antiguos conocidos. Pero actualmente está muy discutida la validez de estas interpretaciones. Aparentemente, estos supuestos fósiles no corresponderían a restos celulares y, por otra parte, el origen

SUPERCONTINENTE PANGAEA

Esta única masa continental se dividió promediando el Mesozoico en las masas terrestres actuales, que derivaron hasta ocupar las posiciones de hoy en día.



EFFECTO INVERNADERO

La cantidad de CO_2 libre en la atmósfera es uno de los factores principales que determina la temperatura en la superficie terrestre por medio del denominado efecto invernadero, fundamental para el mantenimiento de la vida en nuestro planeta, y se relaciona con el balance de las energías emitidas y absorbidas por la Tierra. Todo cuerpo emite un espectro de radiaciones con diferentes longitudes de onda que es característico de su temperatura superficial. El Sol emite una gama de radiaciones que para la temperatura superficial que posee, alrededor de 6.500°C , se ubica preferentemente en el rango del espectro visible. La atmósfera de la Tierra es en gran parte transparente al espectro visible de la radiación solar, por lo que prácticamente toda la energía de la radiación solar incide sobre la Tierra.

Sin embargo, la energía que emite la Tierra, que depende de su temperatura superficial (alrededor de unos 20°C), está desplazada hacia el espectro infrarrojo, que es el correspondiente a la radiación de calor. Las radiaciones infrarrojas son absorbidas diferencialmente por la atmósfera en función de la concentración de ciertos gases, en particular el CO_2 . De esta manera, a más CO_2 atmosférico existirá una dificultad mayor para la eliminación de la radiación infrarroja reflejada por la superficie terrestre hacia el espacio, lo que producirá un calentamiento paulatino de la superficie del planeta. Si no se produjera el efecto invernadero, la superficie de la Tierra no habría alcanzado la temperatura mínima necesaria para la vida.

biogénico de los estromatolitos de esta edad es dudoso. Las dudas respecto de estos hallazgos se relacionan con el debate que existe acerca de la presencia de oxígeno en la atmósfera en esa época.

Los primeros restos indiscutibles de estromatolitos tienen una edad de 2800 Ma (finales del Arqueozoico). El oxígeno liberado por los organismos formadores de estromatolitos habría sido capturado en el agua de los océanos para la oxidación del hierro. De esta manera, se depositaron centenas de metros de sedimentos conocidos como Formaciones Ferríferas Bandeadas, que constituyen la evidencia más contundente acerca de la presencia de este gas en la atmósfera para ese entonces.

Con el incremento de la liberación de oxígeno, y al disminuir la cantidad de hierro potencialmente oxidable, la atmósfera comenzó a enriquecerse en este gas, lo que permitió que muchos organismos evolucionaran hacia formas capaces de respirar este elemento.

Las primeras evidencias de células microbianas aparecen en sedimentos de 2.000 Ma de antigüedad. Para entonces, el oxígeno había alcanzado el 1% del nivel actual, lo que permitió el desarrollo de una delgada capa de ozono que protegía la superficie terrestre de la radiación ultravioleta.

Sin embargo, el mantenimiento de la vida "compleja" que subsecuentemente aparecería en la Tierra no habría sido posible si ciertos ciclos vitales no hubieran estado regulados por la dinámica del planeta y si, además, ciertos efectos propios de su dinámica particular no hubieran ocurrido.

TECTÓNICA Y TEMPERATURA

La tectónica de placas juega un papel decisivo en la regulación de la temperatura superficial del planeta mediante el balance del ciclo del carbono. De esta manera contribuye a evitar las variaciones térmicas extremas que destruirían la vida. El carbono llega a la atmósfera

como dióxido de carbono (CO_2) mediante los siguientes procesos: la respiración de organismos, la liberación de gases a partir de erupciones volcánicas y de manantiales, la alteración de rocas formadas por compuestos de carbono (rocas carbonáticas) expuestas durante la formación de cordilleras y, recientemente (en términos de la historia de la Tierra) la actividad industrial humana. Por otra parte, el CO_2 es extraído de la atmósfera mediante los procesos metabólicos de fotosíntesis por parte de las plantas y las algas verdes, por la formación de compuestos carbonáticos y por su disolución directa en el agua de mar en contacto con el aire. Parte del CO_2 contenido en el mar es utilizado por organismos marinos para formar sus conchillas carbonáticas. Tras la muerte de estos organismos, las conchillas respectivas caen al fondo marino y eventualmente son transportadas hacia el manto astenosférico mediante el proceso de subducción. Posteriormente se incorpora a los magmas que alimentan los arcos volcánicos, y de esa manera el carbono regresa a la atmósfera.

Si se frenara la tectónica de placas, los arcos volcánicos se extinguirían y el CO_2 que estos proveen dejaría de ser aportado a la atmósfera, lo que quebraría este equilibrio y se enfriaría la Tierra.

Otro mecanismo de enfriamiento atmosférico asociado con la caída de la concentración de CO_2 atmosférico estaría relacionado con el azar: debido a la tectónica de placas, los continentes habrían ocupado eventualmente posiciones cercanas al ecuador. En estas circunstancias, casi todas las áreas emergidas de la Tierra habrían tenido climas extremadamente lluviosos típicos de zonas tropicales. Un mecanismo de remoción del CO_2 atmosférico es a través de las aguas de lluvia, por lo que, si las precipitaciones persistieron largamente en el tiempo, las concentraciones de este gas habrían caído a nivel global. Finalmente, la coincidencia de climas muy lluviosos en todos los continentes del planeta pudo desencadenar,

tal como se cree que ocurrió hace 2.000 Ma y 770 Ma, respectivamente, el congelamiento del planeta hasta latitudes cercanas al ecuador. Los extremistas de esta teoría suponen que la Tierra se convirtió en una bola de hielo en estas dos circunstancias, aniquilando casi toda la vida, y que esta habría resistido mayormente en manantiales de aguas y fumarolas submarinas cercanas a las dorsales centro-oceánicas. Muy rápidamente, al haberse congelado por completo el planeta e inhibirse las precipitaciones de agua de lluvia, el CO_2 liberado por los volcanes no habría sido transportado de la atmósfera a la superficie terrestre, y así habría aumentado su concentración, que produjo el calentamiento de la Tierra. En resumen, la distribución instantánea de los continentes, producto de su deriva, influiría en las concentraciones de CO_2 y, por lo tanto, en la temperatura global.

Los momentos en los que la Tierra se habría liberado de su casquete de hielo parecerían ser momentos florecientes para la vida. Poco antes de culminar el Proterozoico y luego del se-

gundo gran congelamiento del planeta, aparecieron los primeros organismos multicelulares (hace alrededor de 600 Ma): la conocida fauna de Ediacara, que consiste en una asociación distintiva de organismos grandes, de cuerpo blando, que caracteriza los estratos del final del Proterozoico de todos los continentes, menos la Antártida. Algunos de estos organismos, aparentemente, fueron la raíz ancestral de la evolución posterior de algunos grupos de animales, mientras que otras formas podrían representar un experimento de vida que fracasó.

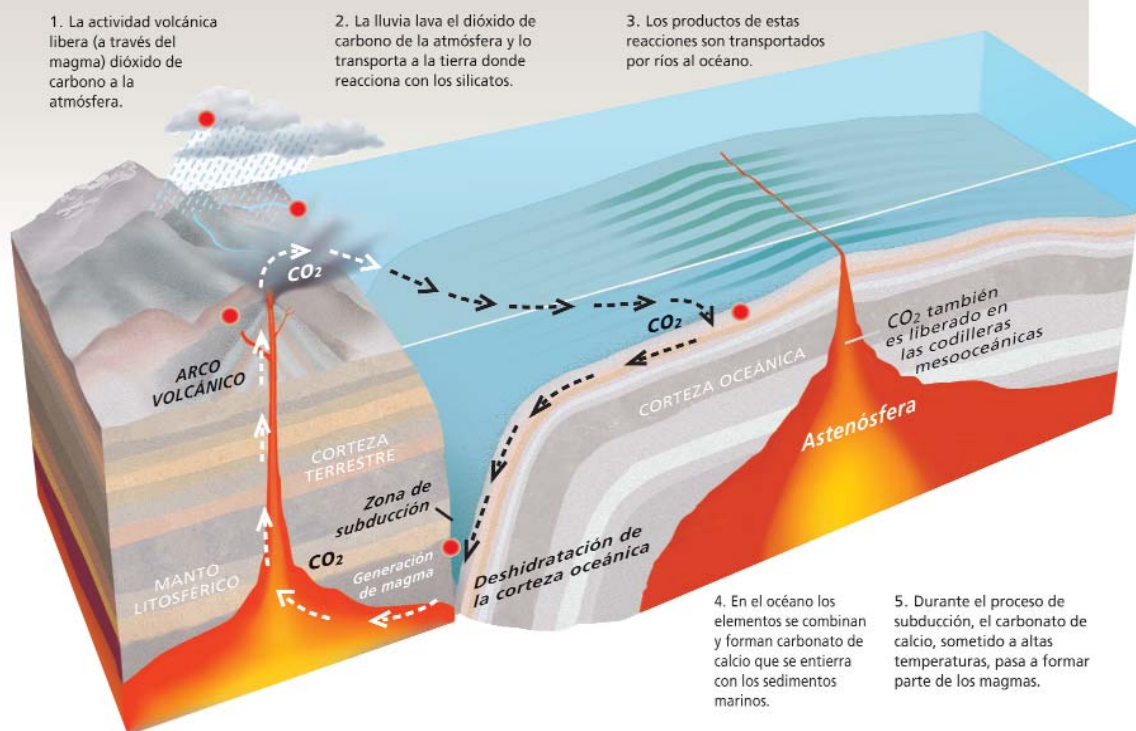
La razón por la cual la vida florecería en el planeta con posterioridad al retiro de los hielos parecería relacionarse con una cadena de procesos. Corrientes de mar ricas en nutrientes, similares a las que se forman en la periferia de la Antártida actualmente, habrían generado un aumento en la cantidad de organismos fotosintetizadores de las aguas superficiales liberadas del hielo. De esta manera se incrementaría la incorporación de oxí-

geno a la atmósfera, lo cual habría permitido el desarrollo de organismos de mayor tamaño y complejidad.

Por otra parte, si no hubiera tectónica, no existirían mecanismos de generación de grandes relieves montañosos, por lo que el relieve terrestre sería paulatinamente arrasado por la erosión hasta el nivel del mar, y desaparecerían las grandes cuencas fluviales. Consecuentemente, los interiores continentales serían invadidos por mares poco profundos o alojarían grandes desiertos en los que se inhibiría la formación de selvas y bosques, y se restringiría la actividad fotosintética al mar. Adicionalmente, el campo magnético confina la atmósfera terrestre, evitando la erosión por el viento solar. Si la dinámica del núcleo externo terrestre cesara, la Tierra perdería su campo magnético y a raíz de ello su atmósfera (como parece haber ocurrido en Marte). Por último, el campo magnético terrestre protege la vida conjuntamente con la atmósfera, y ambos son escudos reflectores de la radiación ultravioleta.

CICLO DEL CARBONO

El movimiento del carbono está regulado principalmente por la influencia de la actividad volcánica y el aporte de las rocas.



EPISTEMOLOGÍA

Agustín Adúriz-Bravo

Cuando los epistemólogos se dedicaron a analizar la estructura del conocimiento científico, consideraron la teoría como la "unidad" que, a modo de ladrillo, conforma el edificio de las ciencias. Desde su significado más literal, una teoría científica constituye una visión del mundo. Es decir que los científicos, por medio de las teorías, interpretan la información que proviene de la realidad, transformándola en hechos científicos.

Mediante la teoría se seleccionan y conectan evidencias, se interviene en el mundo, se genera lenguaje especializado.

Una teoría representa una organización particular del conocimiento, sumamente elaborada y compleja. La teoría es una auténtica red de conceptos conectados en enun-

ciados que expresan regularidades en el mundo de los fenómenos. En toda teoría se puede ver un núcleo de conocimiento que es fundamental y no puede ser cuestionado sin poner en peligro todo el edificio conceptual. En este texto se habla de la aparición de la tectónica de placas como un cambio de paradigma; con ello se quiere significar que las teorías anteriores sobre la estructura y la dinámica de la Tierra fueron descartadas al ponerse en duda su núcleo de suposiciones básicas. Fuera del núcleo, otros elementos de la teoría están en constante revisión con el fin de "perfeccionarlos", es decir, de ajustarlos cada vez más a las evidencias que se van obteniendo. Hablamos de modelos para referirnos a estas explicaciones hipotéticas, por ejemplo, cuando se le atribuye una determinada estructura interna a algún planeta del Sistema Solar, porque con esta

suposición se puede dar cuenta de la información (magnética y gravimétrica) de que se dispone.

También se habla de teorías "fronterizas" para designar el conocimiento en progreso, sobre el que aún no hay consenso entre todos los científicos. Por ejemplo, en el momento de su surgimiento, la idea de la deriva continental podía ser considerada una "conjetura audaz", dada la escasez de evidencia para sostenerla. Con la introducción de nuevos hechos científicos (la simetría de las bandas magnéticas a ambos lados de la dorsal centro-océnica) mirados desde la teoría geofísica, las ideas de Wegener son rescatadas y cobran aceptación generalizada en la comunidad científica. La idea de la procedencia extraterrestre de la vida en nuestro planeta es otra de estas teorías fronterizas: constituye una explicación válida, pero compite con otras, y la evaluación de las

evidencias a favor y en contra no es sencilla. Otro tanto sucede con la interpretación de la naturaleza de los estromatolitos: un mismo "dato" puede leerse desde varias posturas teóricas, a veces contradictorias. Por ello hablamos de una construcción del hecho científico, realizada desde el marco de la teoría.

Una teoría permite explicar los fenómenos encadenando hechos mediante mecanismos causales. Así, la presencia de dióxido de carbono en la Tierra en la proporción adecuada para las formas de vida complejas puede ser explicada con el apoyo de un modelo geológico. La teoría también nos permite predecir qué sucedería si se alteraran las condiciones actuales del planeta: "Si la dinámica del núcleo externo cesara, la Tierra perdería su campo magnético y su atmósfera". Estas son, entonces, las dos funciones principales de la teoría científica: explicar y predecir.

Bibliografía

- Briggs, D., P. Smithson, K. Addison y K. Atkinson: *Fundamentals of the Physical Environment*, Londres y Nueva York, Routledge, 1995.
- Gould, S. J. (ed.): *El libro de la vida*, Barcelona, Crítica, 1993.
- Gould, S. J.: "La evolución de la vida en la Tierra", *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1994.
- Lowrie, W.: *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- Murphy, B. y D. Nance: *Earth Science Today*, Pacific Grove, Brooks/Cole-Wadsworth, 1999.
- Pickering, K. T. y L. A. Owen: *An introduction to Global Environmental Issues*, Nueva York, Routledge, 1997.
- Ridley, M.: *Evolution*, Boston, Blackwell Science, 1996.
- Stanley, S.: *Exploring Earth and Life through Time*, Nueva York, W. H. Freeman, 1993.

- Strain, P. y F. Engle: *Looking at Earth*, Atlanta, Turner, 1996.
- Tarback, E. y F. Lutgens: *Ciencias de la Tierra*, Madrid, Prentice Hall, 2000.
- Ward, P. D. y D. Brownlee: *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*, Nueva York, Copernicus, 2000.

Agradecimientos

El equipo de Publicaciones de la Dirección Nacional de Gestión Curricular y Formación Docente agradece a las siguientes instituciones y personas por permitirnos reproducir material fotográfico y colaborar en la documentación de imágenes: Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center (EE.UU.); Space Environment Center, NOAA (EE.UU.); NOAA- National Geophysical Data Center (EE.UU.); NASA/ MOLA Science Team (EE.UU.); Geological Survey, Woods Hole Science Center (EE.UU.) y Walter S. Kiefer.



Ministro de Educación, Ciencia y Tecnología, Lic. Daniel Filmus
Secretario de Educación, Lic. Juan Carlos Tedesco
Subsecretaria de Equidad y Calidad, Lic. Alejandra Birgin
Directora Nacional de Gestión Curricular y Formación Docente,
 Lic. Laura Pitman

Coordinadora del Área de Ciencias Naturales, Lic. Nora Bahamonde
Coordinadora del Área de Desarrollo Profesional, Lic. Silvia Storino
Coordinadora del Programa de Capacitación Explora, Lic. Viviana Celso
Coordinadora de Publicaciones,
 Lic. Raquel Franco

Coordinación y documentación,
 Lic. Rafael Blanco
Edición, Lic. Gonzalo Blanco
Diseño y diagramación,
 DG María Eugenia Más
Corrección, Norma A. Sosa Pereyra

www.me.gov.ar