

## EL AÑO DEL PLANETA TIERRA: LO QUE CONOCEMOS Y LO QUE DESCONOCEMOS DE NUESTRO PLANETA

G. Gutiérrez Alonso, J. Brendan Murphy y J. Fernández-Suárez

«La Tierra, en vez de actuar como un estatua inerte, es un ser vivo y en movimiento».

«The earth, instead of appearing as an inert statue, is a living, mobile thing».

J. Tuzo Wilson, 1968

### Introducción

**B**ajo los auspicios de la UNESCO y la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS), el «Año Internacional del Planeta Tierra» comenzó en Enero de 2007, y se extenderá hasta diciembre de 2009, con el objetivo de conseguir un mayor y más efectivo uso, por parte de la sociedad, del conocimiento desarrollado por los más de 400.000 científicos dedicados al estudio de la Tierra existentes en el mundo. El objetivo global del «Año Internacional del Planeta Tierra», es construir una sociedad global más segura, sana y desarrollada, tal y como se expresa en el subtítulo de su logo «Ciencias de la Tierra para la sociedad». El año central del trienio, 2008 «El Año Internacional», ha sido proclamado por la Asamblea General de las Naciones Unidas como el su año internacional. Las Naciones Unidas proponen este año internacional como una importante contribución al desarrollo sostenible, ya que promueve el uso razonable (sostenido) de los recursos de la Tierra y anima a realizar una mejor planificación y un mejor desarrollo para reducir los riesgos ambientales para los habitantes del planeta.

Para esforzarse en conseguir estos nobles objetivos, debemos de hacer una sincera valoración sobre lo que conocemos de nuestro planeta. Aunque las Ciencias de la Tierra sea una disciplina muy joven, su cuerpo de conocimiento ha sido aumentado recientemente de manera

ímproba, especialmente cuando se trata de entender las interacciones entre la Tierra sólida, la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera, y las relaciones entre estas interacciones y aspectos medioambientales como el calentamiento global, la biodiversidad o la pérdida de ozono.

La mayoría de los recursos que necesita nuestra civilización, tales como la energía, materias primas y aguas subterráneas son el resultado de procesos geológicos que, en algunos casos aún no comprendemos completamente. La sociedad no esa concienciada de que la demanda de los materiales de consumo básicos es lo que condiciona la búsqueda de diferentes metales, a menudo escasos, que necesitamos en nuestra vida cotidiana en la forma, por ejemplo, de complejas aleaciones presentes en los teléfonos móviles o en las televisiones con tecnología digital. La sociedad siempre ha demandado estos recursos sin tener en cuenta la necesidad de entender los procesos involucrados en su formación. La economía relacionada con la extracción de hidrocarburos fósiles, minerales y aguas subterráneas ha determinado que nuestros recursos más importantes estén al borde del agotamiento sin haber extraído de ellos el conocimiento necesario para ayudar a nuestra sociedad a



encontrar más recursos. Esta miope aproximación a cómo explotamos nuestros recursos se ve favorecida por la falta de comprensión de la sociedad y de los estamentos políticos sobre el papel de los científicos dedicados a las Ciencias de la Tierra en el hallazgo de los recursos que sostienen la riqueza de nuestra sociedad. Esta condición de incompreensión nace de la falta de educación geológica en los niveles preuniversitarios en la mayor parte de los planes educativos de la mayor parte de los países del mundo. Además, donde se enseña geología, los contenidos que se imparten están casi siempre anticuados y son comunicados por personal docente que carece de formación y de la pasión necesaria para impartir estos conocimientos.

### Las capas de la Tierra

La Tierra se compone de varias capas concéntricas con distintas composiciones químicas y propiedades químicas. Por lo general, el planeta tiene capas ordenadas de acuerdo con su densidad, de manera que las moléculas más ligeras, se encuentran mayoritariamente en la atmósfera, mientras que los elementos más densos (por ejemplo el hierro y el níquel) son más abundantes en el núcleo (figura 1). El conocimiento que tenemos de la parte gaseosa de nuestro planeta ha sido intensamente acopiado por distintos tipos de aeronaves, naves espaciales, cohetes balísticos, globos y aviones, que han surcado la misma en toda su extensión. El límite exterior de nuestra atmósfera se define en el límite del campo gravitatorio de la Tierra. Este límite se encuentra aproximadamente a 10.000 km por encima de la superficie de la Tierra donde la atmósfera se compone de unos pocos protones y electrones libres y algunos átomos de Helio bombardeados por la radiación solar. Lo que se conoce como la atmósfera superior se extiende desde los confines superiores hasta aproximadamente 640 km por encima de la superficie terrestre y recibe el también el nombre de Exosfera. Por debajo de ella, hasta los 80 o 85 km de altitud, se encuentra la Termosfera, compuesta de unas pocas moléculas de gases y donde la ISS orbita nuestro planeta. La presión atmosférica es muy baja y su temperatura varía de 1.300°C a 300°C en ciclos de 11 años que se corresponden con los ciclos de las manchas. Dentro de la Termosfera se encuentra una subcapa que se denomina Ionosfera situada entre unos 100 y 200 km de altura que está formada por una concentración de electrones y que es fundamental para la transmisión de ondas de radio. La interacción de la Ionosfera, el campo magnético terrestre y el viento solar es la responsable de la existencia de las auroras que se observan en zonas localizadas en latitudes elevadas. Por debajo de la Termosfera se encuentra la Mesosfera hasta una altura de 50 km de altura y es donde la mayor parte de los bólidos y meteoritos se destruyen, protegiéndonos de esta manera del impacto de los mismos. Por debajo, la Estratosfera se extiende hasta entre 12 a 8 km por encima de la superficie (dependiendo de la latitud que se considere), e incluye otra importante subcapa cerca

de su límite inferior, la capa de ozono, que nos protege de las mortíferas radiaciones ultravioletas. Los cambios anuales en la capa de ozono localizada sobre los polos terrestres causan cambios dramáticos en la cantidad de radiación ultravioleta que reciben esas regiones y que pueden amenazar la vida en la Tierra. Por debajo de la estratosfera se encuentra la troposfera que se extiende hasta la superficie de la Tierra. El nombre de troposfera deriva del griego *tropos*, que significa «girar o mezclar», es una capa turbulenta en la que se concentra la circulación atmosférica que depende en su mayoría de los contrastes de temperatura, presión y humedad del aire que se encuentra cerca del ecuador o de los polos. Estos contrastes, junto con el giro terrestre que causa la fuerza de Coriolis, son los responsables de los cambios locales del tiempo, de los distintos climas y de que la vida se mantenga en la Tierra.

Por debajo de la atmósfera, pero por encima de la Tierra sólida, la Hidrosfera cubre más del 70% de la superficie de nuestro planeta. La Hidrosfera es un sistema global que regula el clima de nuestro planeta y permite la vida. En la actualidad, el 97,2% del agua existente en la superficie de la Tierra se encuentra en los océanos, el 2,15% en los glaciares y el 0,63% en las aguas subterráneas (aunque de hecho la mayor parte del agua de la Tierra se encuentra en el manto, formando parte de algunos de los minerales que lo componen). La cantidad de agua almacenada en los glaciares ha variado sustancialmente a lo largo de la historia geológica de acuerdo con la extensión de los casquetes glaciares. La Hidrosfera tiene  $1.35 \times 10^{21}$  kg de agua (que representa aproximadamente  $1/4.500$  de la masa total de la Tierra) tanto en forma líquida como sólida). La presencia de la Hidrosfera convierte a nuestro planeta en algo único dentro del Sistema Solar y su existencia es de crucial importancia para el mantenimiento y desarrollo de la vida tal y como la conocemos en la actualidad. La circulación global de los océanos se describe en la actualidad mediante un concepto dinámico que se conoce como la circulación «termohalina» (término que proviene de combinar temperatura y salinidad del agua del mar), un concepto desarrollado a finales del siglo XX que considera que la temperatura, la salinidad y los contrastes de densidad del agua del mar entre las regiones ecuatoriales y polares son las causas de las corrientes globales que transportan calor y nutrientes por toda la hidrosfera. La presencia de casquetes polares es un componente esencial de este modelo, ya que se encargan de mantener los contrastes térmicos y de densidad que causan la circulación termohalina. Como es bien sabido, la monitorización a través de satélites ha documentado el progresivo aumento de las tasas de desaparición de hielo en latitudes elevadas, y los modelos y simulaciones informáticas muestran que una continuada pérdida del hielo de los casquetes polares afectará la estabilidad de la circulación global termohalina.

La Tierra sólida, conocida también como Geosfera, es un cuerpo casi esférico que tiene un radio medio de 6370 km y una masa aproximada de  $6.0 \times 10^{24}$  kg. Tiene un

poco más de diámetro en el ecuador que en los polos. Su densidad es de  $5515 \text{ kg/m}^3$ , la mayor de todos los planetas del Sistema Solar. La observación directa del interior de la Tierra está limitada por la profundidad a la que pueden llegar los sondeos mecánicos. El sondeo más profundo realizado en el mundo alcanzó los 12.262 km de profundidad y fue realizado en 1994 en la península de Kola (situada al norte de Rusia). Esta profundidad apenas constituye el 0,2% del radio de nuestro planeta, lo que nos indica que la mayor parte del conocimiento de las capas que forman el interior de la Tierra es indirecto.

Las diferentes capas que forman el interior de la Tierra sólida se pueden clasificar de acuerdo con dos criterios, su composición química y sus propiedades mecánicas. De la misma manera que los rayos X pueden revelarnos la estructura y composición interna de un paciente humano, el estudio sistemático de las trayectorias de las ondas sísmicas a través de la Tierra ha permitido la división de la Tierra en capas que se distinguen en función de sus diferentes propiedades mecánicas. Estas capas son (desde la superficie hacia el centro):

- (i) La Litosfera, es la cascara externa y dura de la Tierra. Excepto cerca de las «dorsales centro oceánicas», esta cascara esférica rocosa se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 100 a 150 km e incluye la corteza oceánica (de entre 5 y 9 km de espesor y compuesta fundamentalmente por rocas volcánicas de tipo basalto) y la corteza continental (con un grosor de entre 25 a 70 km y formada por rocas con abundantes silicatos de aluminio cubiertas por una delgada capa de sedimentos). Por debajo de la corteza se encuentra el manto superior, formado fundamentalmente por peridotita (una roca relativamente densa, en la que predominan minerales con composición de silicato de hierro y/o magnesio, como el olivino y el piroxeno, y que tiene menos sílice que la corteza). La resistencia mecánica de la peridotita, que se comporta de manera rígida hasta profundidades de 100 a 150 km y a temperaturas por debajo de los  $1.100^\circ\text{C}$ , define la base de la litosfera.
- (ii) La Astenosfera (el nombre proviene del griego *asthenos*, que significa débil) es parte del manto, se extiende hasta 250 a 400 km por debajo de la superficie y fluye de manera plástica en la forma de células de convección disipando el calor del interior de la Tierra. La astenosfera contiene una pequeña cantidad de magma, en torno al 5%, que hace que se comporte mecánicamente de manera débil, lo que permite que la litosfera suprayacente se pueda mover en la forma de grandes placas rígidas (ver más adelante). La astenosfera junto con el resto de rocas del manto hasta los 660 km de profundidad es lo que conocemos como el Manto Superior.
- (iii) El Manto Inferior se extiende hasta una profundidad de 2.890 km, Aunque es sólido, sus elevadas

presiones y temperaturas hacen que se encuentre en unas condiciones muy próximas a su fusión, lo que le permite fluir muy lentamente.

El manto en su conjunto incluye la parte inferior de la litosfera, la astenosfera y el manto inferior. Aunque en todo él su composición predominante es de silicatos de hierro y magnesio, los minerales que tienen esta composición son distintos en función de los cambios en presión y temperatura con el incremento de la profundidad. Este cambio de mineralogía afecta las propiedades mecánicas del interior de la Tierra y juega un papel fundamental en la definición de las capas del interior terrestre. La parte superior del manto está compuesta por unos minerales que se llaman olivino y piroxeno, pero a unos 400 km de profundidad (en torno a la base de la astenosfera), la estructura de esos minerales cambia para convertirse en otros llamados espinelas de tipo beta y gamma. A mayor profundidad, entre 650 y 670 km, se genera otro mineral, con la misma composición y distinta estructura atómica, que se denomina perovskita y cuya formación nos indica el límite entre el manto superior y el inferior. En la base del manto, alrededor del núcleo terrestre se encuentra una fina capa

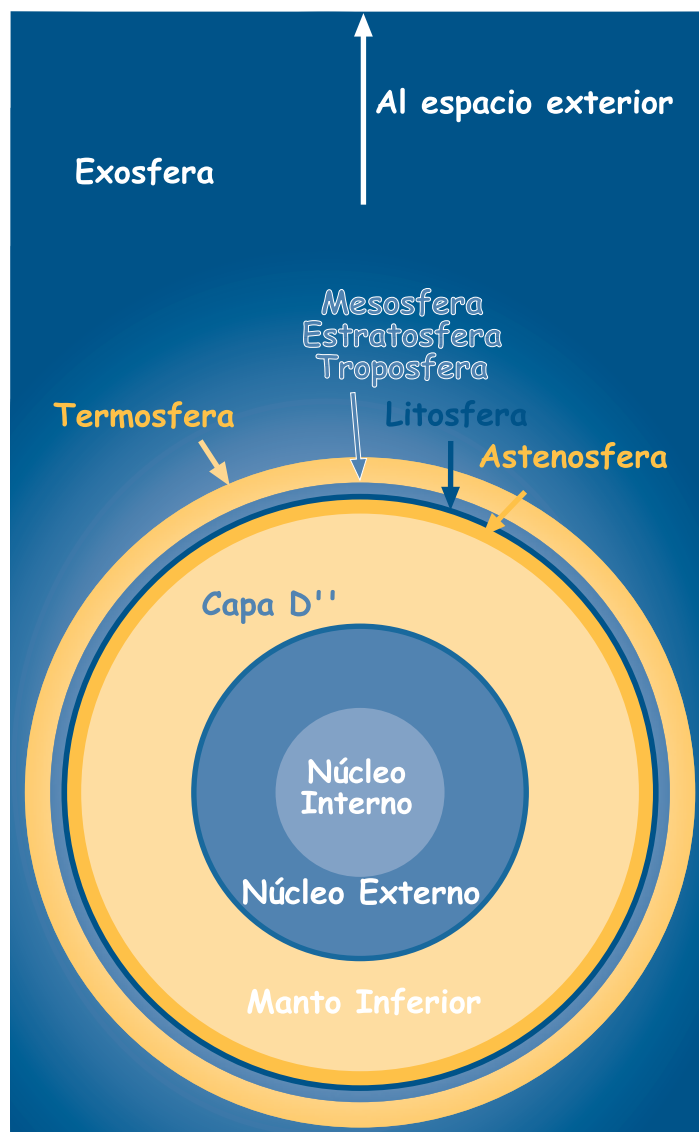


Figura 1. Las capas de la Tierra. Ver texto para su explicación.



diferente (conocida como D") cuyas características se encuentran en la actualidad sometidas a un intenso debate al que nos referiremos más adelante.

- (iv) El núcleo se extiende, por debajo del manto hasta el centro de la Tierra. Esta subdividido en un núcleo externo, líquido, compuesto por una aleación compleja de hierro, níquel y azufre y/o oxígeno; el núcleo interno (con un radio de 1220 km) es sólido, compuesto por una aleación de hierro y níquel, y su comportamiento ha sido recientemente interpretado como perteneciente a un único cristal (aunque esta interpretación se debate en la actualidad). La masa del núcleo, enriquecida en hierro, es la responsable de la anómala densidad global de nuestro planeta. Su origen ha sido interpretado recientemente como el resultado de una gran colisión con otro planeta en los episodios más tempranos de la evolución de la Tierra (hace aproximadamente 4.500 millones de años). En esta colisión el núcleo del otro planeta fue transferido a la Tierra. Según este modelo, los materiales ligeros desprendidos en la gigantesca colisión fueron lanzados al espacio, donde parte de ellos se amalgamaron para formar a nuestra compañera la Luna, que tiene una densidad media de  $3.300 \text{ kg/m}^3$ . Existen otros modelos para la formación del núcleo, los cuales argumentan la acreción heterogénea de material durante la formación de la Tierra que culminó con la diferenciación gravitacional del núcleo en el que se concentraron los elementos más pesados. Independientemente de cómo se formó el núcleo, la circulación del núcleo externo, que es líquido, crea una dinamo que es la responsable del intenso campo magnético que podemos reconocer cuando usamos una brújula para orientarnos. El campo magnético nos protege de las radiaciones cósmicas y solares, que pueden resultar letales, y las investigaciones más recientes apuntan a que la mayor velocidad angular del núcleo interior respecto al núcleo exterior es la causa de las especiales características de la dinamo, incluyendo la persistencia e intensidad del campo magnético que disfrutamos en nuestro planeta en contraste con otros planetas del sistema solar.

La estructura en capas de nuestro planeta se inició muy temprano respecto a la evolución de la Tierra y refleja, de alguna manera, la historia de los procesos dinámicos que han sucedido a lo largo del tiempo geológico. Podemos observar y medir muchos de los procesos dinámicos que ocurren en la atmósfera y la hidrosfera modernas (por ejemplo sistemas meteorológicos y corrientes oceánicas) pero la situación que observamos en la actualidad no es más que un fotograma en una película de acción que se extiende durante miles de millones de años. Con un conocimiento correspondiente a un periodo temporal tan pequeño es muy difícil predecir cuál será la evolución de estos procesos con el tiempo. Afortunadamente, las inte-

racciones entre la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera a lo largo de todo el tiempo geológico han quedado preservadas en el registro rocoso. Por ejemplo, el análisis detallado de los diferentes tipos de roca y de su contenido en fósiles ha permitido la reconstrucción de los cambios del nivel del mar en los últimos 550 millones de años, así como algunos periodos en los que la actividad volcánica fue particularmente intensa se pueden correlacionar con cambios en la composición de la atmósfera y del agua de los océanos, lo que tuvo consecuencias muy importantes en la evolución de la biosfera.

Los procesos que tienen lugar bajo la superficie de la Tierra tan tenido un papel por lo menos tan importante en la evolución de nuestro planeta, como su relación con aquellos que suceden en la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera. Por ejemplo, la distribución de continentes, siempre cambiante cuando se considera la escala de tiempo geológico, se debe a la convección que tiene lugar en el manto. La geografía permanentemente cambiante de la Tierra tiene consecuencias muy profundas en la circulación de la atmósfera y la hidrosfera y por tanto es la causa más importante de los cambios climáticos que se producen de manera natural.

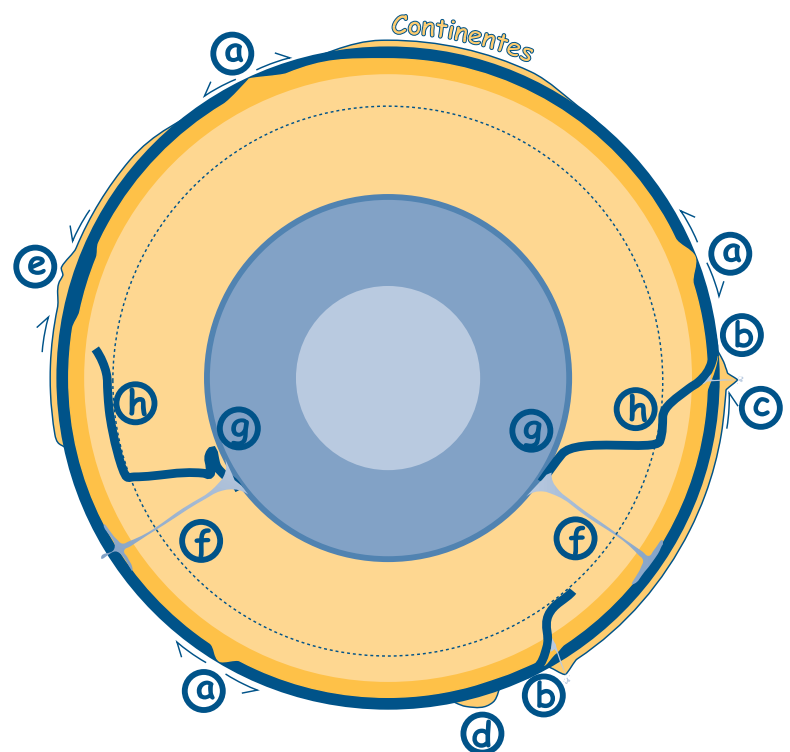


Figura 2. ¿Cómo funcionan las placas tectónicas? Una sección hipotética de la Tierra que ilustra algunos de los procesos tectónicos que ocurren en su interior (la escala vertical en la parte superior de la Tierra está exagerada): a- Dorsales centro oceánicas- Creación de nueva litosfera en los océanos; b- Subducción, la placa más densa es arrastrada bajo otra más ligera y vuelve a entrar en el manto; c- El magma asciende, produciendo volcanes y calienta la corteza haciendo que se levanten montañas; d- Los terrenos colisionan con un margen continental cuando la litosfera oceánica entre ambas masas continentales es consumida; e- Colisión continental- Si la placa que subduce contiene corteza continental, la colisión entre dos continentes tiene lugar cuando la corteza oceánica existente entre ambos es consumida (subducida); f- Penachos mantélicos- existen donde el material del manto asciende; g- el cementerio de la litosfera oceánica, que se recicla en el manto y vuelve a fundirse; h- cambio mineral en el manto que le hace más rígido y más difícil de ser atravesado por las placas que subducen.

Es muy difícil para la mayoría de las personas entender el inmenso efecto que tienen los procesos geológicos que han construido la Tierra tal y como la conocemos dado que la mayoría de estos procesos actúan con tal lentitud que su escala temporal es varios órdenes de magnitud más extensa que la vida de un ser humano o incluso de toda la existencia de la humanidad. Sin embargo, es esencial darse cuenta que estos procesos, actuando a lo largo de millones, o miles de millones de años, son los responsables de haber proporcionado a la humanidad de un medio ambiente y de unos recursos que han permitido el avance de la civilización. Muchos de los científicos que se dedican al estudio de las Ciencias de la Tierra piensan que la mayor parte de los problemas medioambientales modernos son el resultado del desconocimiento fundamental de estos procesos. Los recursos tales como los combustibles fósiles y los metales se formaron según una cadencia propia de los procesos geológicos, pero están siendo consumidos por nuestra sociedad a las velocidades que demanda nuestra sociedad. Desde la perspectiva de los geólogos, es el enorme contraste entre estas dos cadencias lo que hace que nuestro medio ambiente esté sometido al desequilibrio que observamos en la actualidad y, por tanto, para entender el mismo, debemos aprender más de los procesos que formaron los recursos que utilizamos. La falta de educación sobre las ciencias de la Tierra en nuestra sociedad, que incluso ha sido eliminada de las escuelas en la mayor parte del mundo, impide que entendamos nuestro planeta y nuestro papel como guardianes del medio ambiente de la Tierra. Es más, prácticamente no existen políticos ni administradores que tengan formación relacionada con las ciencias de la Tierra.

En este ensayo, exploramos que es lo que conocemos y que es lo que no conocemos acerca de los procesos que gobiernan la lenta e inexorable evolución del Planeta Tierra, y discutimos la necesidad que tenemos de una ciudadanía más consciente de la importancia de las Ciencias de la Tierra.

### Lo que conocemos: la tectónica de placas, el paradigma

En la segunda mitad del siglo XX, las Ciencias de la Tierra sufrieron una revolución científica que culminó en el paradigma de la tectónica de placas. El concepto de tectónica de placas está tan afianzado en la literatura geológica como la evolución en la biológica o el «Big Bang» en la astrofísica. El paradigma de la tectónica de placas es el resultado de la integración de varios conceptos que se desarrollaron a lo largo del siglo XX, comenzando por el concepto de deriva continental cuyo valedor fue Alfred Wegener en 1912. A renglón seguido, Arthur Holmes en 1929 propuso un mecanismo que podía servir para explicar el motor de la deriva continental, algo que Wegener no había sido capaz de hacer, a partir de hipotéticas corrientes de convección en el interior de la Tierra. Estas ideas fueron rescatadas en los años 60 por R. Dietz y H. Hess

para proponer uno de los conceptos más importantes de la tectónica de placas, la expansión del fondo oceánico. Estos conceptos fueron integrados y sintetizados en 1967-68, fundamentalmente por D.P. McKenzie, R.L. Parker, J. Morgan, X. Le Pichon, y J.T. Wilson entre otros, en lo que ahora conocemos como el paradigma de la tectónica de placas. Desde entonces un gran número de datos se han sumado a esta teoría, aunque muchos de los detalles de la misma aún necesitan ser estudiados. A continuación exponemos un resumen de los fundamentos de esta teoría.

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, la capa rígida más externa de la Tierra, que tiene entre 100 y 150 km de espesor, la litosfera, viaja sobre la astenosfera, más caliente y plástica (en el sentido de que se puede deformar) tal y como se ha descrito anteriormente. Como una cascara de huevo agrietada, la litosfera está rota en unos 20 fragmentos, o placas, que se mueven lentamente alrededor del globo a velocidades que no llegan a los 10 centímetros por año. A medida que se mueven, las placas pueden chocar unas con otras, separarse entre ellas, o deslizarse una con respecto a otra y los efectos de estos movimientos son más evidentes cerca o en los mismos límites de las mismas. A corto plazo, las interacciones entre las placas crean esfuerzos en las proximidades que son disipados por terremotos. Sin embargo, a largo plazo, estos esfuerzos hacen que se generen cadenas montañosas donde las placas colisionan y se creen océanos encima de la corteza recién nacida entre placas que se separan. Los continentes están embebidos de forma pasiva en las placas junto con parte de los océanos que los rodean, moviéndose de unos y otros de manera solidaria. Su movimiento durante millones de años es capaz de abrir y cerrar completamente cuencas oceánicas. Por ejemplo, el alejamiento de América de Europa y África durante los últimos 180 millones de años ha abierto el océano Atlántico, el cual continúa creciendo en la actualidad. Es de esta manera como el mapamundi que reconocemos como único en la actualidad no es más que el mencionado fotograma de una apasionante película. Las fuerzas que mueven los continentes se generan debajo de las cordilleras submarinas que recorren el centro del océano Atlántico y del resto de la red de cordilleras submarinas que se extienden por más de 60.000 km. En estas cordilleras, el magma caliente que surge desde el manto, se enfría y solidifica creando la nueva litosfera oceánica y, por tanto, ampliando el tamaño de ese océano. A medida que se va creando nueva litosfera, las placas situadas a ambos lados de la cordillera oceánica son empujadas y separadas una de otra (figura 2a). Dado que la tierra tiene una superficie constante, la creación de nueva litosfera debe de compensarse con la destrucción de litosfera más antigua en alguna otra parte, lo que sucede en un proceso que se denomina subducción. De la misma manera que el Atlántico, usando el mismo ejemplo anterior, se ha ido abriendo durante los últimos 200 millones de años, el movimiento relativo de América hacia el Oeste ha hecho que la placa, o grupo de placas, que forman la mayor parte del océano

pacífico haya convergido hacia el continente americano y haya sido subducida, bajo él. En este caso, cuando las placas convergen, la placa más densa es subducida por debajo de la más ligera, y es reintroducida en el manto, donde es parcialmente consumida y reciclada (figura 2b). Por lo general, la corteza oceánica es más densa que la corteza continental, así las partes de las placas que contienen corteza continental normalmente se hunden por debajo de las que tienen corteza continental. Además, donde dos placas convergen, las que poseen una litósfera más antigua y más fría (y por lo tanto, más densa) son las que son subducidas preferentemente. Si se consideran en conjunto los procesos mencionados, será habitualmente la litósfera oceánica más antigua la que será subducida. Así se puede entender como casi la totalidad de la litósfera oceánica tiene menos de 180 millones de años de antigüedad, mientras que en los continentes se preservan rocas que tienen hasta 4000 millones de años.

La subducción es uno de los procesos responsables de la generación de cadenas montañosas, de las *orogénias* (del griego *oros*, montañas). Cuando las placas oceánicas, más densas, se introducen hacia el interior de la tierra, el agua que contienen hace que su composición sea inestable, lo que hace que ocurran cosas por encima de la zona de subducción, sobre todo la generación de rocas fundidas, *magma*, con menos densidad, que tienden a salir hacia la superficie de la Tierra. Cuando este magma asciende, alimenta los volcanes y calienta la corteza suprayacente creando montañas (figura 2c). Los Andes son un ejemplo clásico de cómo se construyen este tipo de cadenas montañosas, ya que durante los últimos 200 millones de años, al menos desde que se comenzó a desmembrar Pangea, la litósfera oceánica de diferentes placas tectónicas ha subducido debajo del margen occidental de la placa sudamericana.

Por otro lado, todos los océanos modernos contienen complejos de islas, como Nueva Zelanda o Filipinas (que en conjunto reciben el nombre de terrenos) (figura 2d). La mayor parte de estos terrenos colisionarán, en algún momento determinado, con un margen continental, activo o pasivo, cuando se consuma el fondo oceánico existente entre las dos masas continentales debido a la subducción. La colisión producirá actividad magmática y deformación, y constituirá otro tipo de orogenia. Este es el caso del oeste de Norteamérica, donde las colisiones de un gran número de terrenos durante los últimos 200 millones de años han añadido más de 500 kilómetros de litósfera continental al margen occidental de la placa norteamericana.

Por último, un tercer tipo de orogenia sucede cuando la placa que subduce arrastra corteza continental. En este caso la colisión entre masas continentales sucede cuando la corteza oceánica entre ellas ha sido subducida. Cuando la corteza continental, que es relativamente ligera, llega a la zona de subducción, no puede introducirse en el manto lo que provoca el fin de este proceso. Aunque existen datos recientes que indican que la corteza continental puede ser arrastrada dentro del manto hasta profundidades

de 100 kilómetros, en algún momento la subducción tiene que finalizar. Es obvio que el proceso de subducción debe de preceder al de colisión, lo que implica que esta tercera clase de orogenia debe de superimponerse a una orogenia previa de tipo andino. El resultado final es la construcción de una litósfera engrosada que produce enormes montañas y raíces continentales, tales como el Himalaya, que es el resultado de la colisión entre la India y Asia meridional, y los Alpes que resultaron de la colisión de parte del norte de África contra Europa (figura 2e).

### Algunas cosas que desconocemos (y deberíamos saber)

En esta sección vamos a explorar algunas de las importantes cuestiones que aún no están respondidas, no están explicadas o son controvertidas en las Ciencias de la Tierra, especialmente aquellas que están relacionadas con procesos que tienen lugar en el interior del planeta y mostraremos su especial importancia para entender la evolución de nuestro dinámico planeta y para la génesis de muchos de los recursos que necesita la humanidad. Por supuesto que hay más temas que son importantes, y no pretendemos ser exhaustivos en su enumeración y descripción. Nuestras opiniones son personales y tendenciosas, de acuerdo con los temas en los que centramos nuestro trabajo y nuestra experiencia investigadora.

### ¿Cuáles son las fuerzas que mueven las placas?

Incluso después de que la Tectónica de placas haya sido universalmente aceptada, el origen y la causa de las fuerzas que mueven las placas ha sido objeto de un intenso debate. Antes de este debate, Arthur Holmes había postulado que la deriva continental había sido causada por el lento movimiento del manto, que caliente y fluido circulaba por debajo de los mismos desplazándolos pasivamente como una cinta transportadora. El origen de ese movimiento del manto se origina en la convección, un proceso similar al bullir de una cazuela llena de sopa a medida que se va calentando, pero que sucede a una velocidad infinitamente más baja. Aunque ahora sabemos que los continentes forman parte de las placas, en una primera aproximación el concepto propuesto por Arthur Holmes puede ser aplicado al movimiento de las placas litosféricas que forman la Tierra. La convección está causada por el calor que se halla en el interior de la Tierra. Este calor se origina principalmente a partir de dos causas; el calor residual que se disipa progresivamente desde la formación de la Tierra y el calor que se genera por la constante transmutación de los elementos radioactivos (fundamentalmente Uranio, Torio y Potasio) que se hallan en el interior de la Tierra. En los años 90 se postularon dos nuevos conceptos que añadían otras fuerzas alternativas a las que se podían entender a partir únicamente de la convección en el manto





terrestre. El «empuje de la dorsal oceánica» (*Ridge push*) nos propone que la intrusión de magma en las dorsales centro-oceánicas es la fuerza que impulsa y mantiene el movimiento de las placas. Así mismo, se postuló el «tirón de la placa» (*slab pull*), que quiere decir que la fuerza que mueve las placas se deriva de la litosfera oceánica, más antigua y más densa que se hunde, arrastrada por la gravedad, por debajo de las zonas de subducción arrastrando con su peso al resto de la placa, incluidos los continentes que pueda incluir. Recientemente, este último mecanismo (*slab pull*) ha sido considerado como el causante de las fuerzas que mantienen la dinámica de las placas tectónicas. Los avances más recientes en la tomografía sísmica (una técnica que permite visualizar el recorrido de las placas que subducen dentro del manto terrestre), parecen indicar que la subducción de litosfera fría y densa, que es capaz de atravesar todo el manto y llegar hasta el límite de éste con el núcleo, es lo que condiciona y causa la existencia y forma de las corrientes de convección dentro del manto. Muchos geodinámicos creen que las fuerzas causadas por la litosfera, fría y densa, mientras se hunde en el manto son las responsables de aproximadamente el 90% de la energía necesaria para mantener la dinámica de la Tectónica de Placas.

Como se puede ver, tenemos algunas ideas de cómo son las fuerzas que trabajan en el interior de la Tierra y conducen el movimiento de las placas, pero necesitamos un conocimiento más profundo de las mismas para poder entender todos los detalles y conocer cuál es el equilibrio entre todas las fuerzas que actúan para mantener la Tectónica de Placas. En la actualidad, ninguno de los mecanismos que se han propuesto explican por sí mismos los detalles implícitos en el movimiento de las placas; las fuerzas involucradas son difícilmente medidas y estudiadas y, además, los posibles mecanismos que puedan actuar no pueden ser sometidos a una experimentación directa. El hecho de que las placas tectónicas se han movido en el pasado, y se estén moviendo en la actualidad no admite discusión, tal y como se puede comprobar con los modernos sistemas geodésicos, como el GPS, pero los detalles de cómo y porque nos movemos continuarán fascinando a los científicos hasta un futuro no muy próximo.

### ¿Han funcionado las placas tectónicas desde las épocas más tempranas de la evolución terrestre?

Como se ha indicado previamente, la tectónica de placas se considera en la actualidad el paradigma que explica la mayor parte de los procesos que suceden en la parte sólida de la Tierra y que configuró su cambiante geografía a lo largo del tiempo, también se considera que no existe un mecanismo similar que esté operando actualmente en otros planetas de nuestro Sistema Solar. No obstante, existe una gran controversia acerca de cómo y cuándo la tectónica de placas comenzó a funcionar en la Tierra. La mayor parte de los científicos que se dedican a las Ciencias de la Tierra piensan que la manera de funcionar de la tectónica

de placas ha cambiado a medida que la Tierra se ha ido enfriando a lo largo del tiempo. Dado que el flujo de calor es la principal energía que alimenta la tectónica de placas, es más que posible que la Tierra primigenia, más caliente, tuviese un equilibrio de fuerzas diferente al que observamos en la actualidad.

La discusión de cómo o cuando comenzó la tectónica de placas se encuentra limitada por el escaso registro rocoso existente, y del que se puedan extraer datos acerca de la historia temprana de la Tierra. Entre los geólogos y geofísicos hay acuerdo acerca de que el manto durante la era Arcaica (hace más de 2.500 millones de años) estaba más caliente que en la actualidad, pero no hay acuerdo en si estaba mucho más caliente o no. La pregunta más importante aún se mantiene sin respuesta y es si el proceso de subducción tenía las mismas características que en tiempos más recientes, o si la inclinación de las placas oceánicas que subducen lo hacían con una inclinación menor debido a su mayor flotabilidad y grosor, que impedía que pudiese subducir hasta las profundidades que lo hacen hoy en día, como veremos a continuación. Otra de las discusiones existentes es si la tectónica de placas empezó y se paró varias veces a lo largo de la historia de la Tierra (de la misma manera que puede haber sucedido a la vida). Esta pregunta aún está abierta, y parte de los científicos piensan que la tectónica de placas comenzó hace unos 700 millones de años, a la vez que se produjeron una serie de dramáticas eras glaciares que llegaron a congelar completamente la superficie del planeta. En el otro extremo, otros piensan que el «estilo moderno» de la tectónica de placas ha estado funcionando desde hace por lo menos 3.100 millones de años, e incluso desde hace 4000, tal y como sugieren las rocas volcánicas de esa edad, muy similares químicamente a las que se producen en la actualidad en las proximidades de zonas de subducción modernas, y la geoquímica y los isótopos registrados en los circones (un silicato de circonio, Zr, que está presente en la mayor parte de las rocas terrestres. La relación de la concentración de los distintos isótopos de hafnio, Hf, y oxígeno, O, de los circones formados hace entre 4000 y 4400 millones de años apuntan a la existencia de una corteza continental «fría» y evolucionada en los albores de la evolución terrestre, lo que ha hecho asumir a muchos científicos que un mecanismo similar a la actual tectónica de placas ha podido existir desde los tiempos primigenios de la existencia de nuestro planeta.

### ¿La capa D' es un cementerio de placas tectónicas?

Una de las características más discutidas acerca de la naturaleza del interior de la Tierra es qué es y qué significa la capa D', situada unos 29.00 km de profundidad. Esta capa de la Tierra, tiene unos 200 km de espesor, y se sitúa en el límite entre el manto y el núcleo (figura 1). Fue nombrada por el geofísico Keith Bullen, quién dividió el interior de la Tierra en varias capas, de A hasta G, siendo la



capa D lo que conocemos en la actualidad como manto inferior, basándose en el estudio de las características de las ondas sísmicas que las atraviesan, como ya se ha mencionado. Más adelante, Bullen dividió la capa D en dos a las que denominó D' y D". Lo que resulta llamativo de la capa D" es que presenta una topografía muy irregular y, además, es el lugar donde se cree que se generan los penachos mantélicos (*mantle plumes*, figura 2f). La naturaleza de esta capa es controvertida. Algunos autores piensan que está compuesta del mismo material que el resto del manto, pero cuyo mineral más abundante es uno que se denomina post-perovskita, que es únicamente estable bajo presiones y temperaturas muy elevadas, más allá de nuestra imaginación. Otros autores consideran que esta capa constituye una especie de «cementerio», donde termina la litosfera oceánica que subduce, la cual es reciclada y se vuelve a fundir completamente (figura 2g) produciendo los penachos mantélicos. Sabemos, por el estudio de los isótopos de las rocas volcánicas que se producen encima de las islas oceánicas sugieren que los magmas que las originaron estaban contaminados por componentes derivados de su paso por zonas de subducción.

El destino de la litosfera oceánica subducida se conoce bien hasta que llegan aproximadamente hasta unos 650 km de profundidad (la base del manto superior), donde un cambio en las fases minerales que lo componen lo hacen más duro y más resistente a que la litosfera oceánica lo atraviese (figura 2h). Este cambio mineralógico produce que el manto de composición peridotítica, es decir, predominantemente formado por un silicato de magnesio denominado olivino, se convierta en un manto compuesto por un mineral con una estructura del tipo de la perovskita, el cual tiene una composición similar a la del olivino pero un empaquetamiento más denso de los iones que lo constituyen. Tal y como se desprende de la discusión anterior, existen muchas incertidumbres acerca de como son y cómo se comportan los materiales que se encuentran en el manto. Los avances más recientes que se han realizado en técnicas de análisis químicos permiten que seamos capaces de analizar isótopos que nunca habían sido analizados previamente. Además, los análisis realizados usando las modernas celdas de presión de diamante pueden replicar las presiones y temperaturas que existen dentro del manto e investigar los cambios mineralógicos que se producen bajo las mismas. Es más, las modernas técnicas de tomografía sísmica y su mejor resolución pueden permitir resolver y establecer la geometría y trayectoria de las placas que subducen a través del límite mineralógico correspondiente a los 650 km de profundidad, y pueden ayudar a desvelar la arquitectura de las células de convección del manto.

### ¿Cómo funciona el manto?

Como el núcleo de nuestro planeta es más inaccesible que el manto, aún existen más incertidumbres acerca de su composición y estructura. En el núcleo, las técnicas

geofísicas que investigan el interior de la Tierra, están sometidas a incertidumbres mucho mayores que en el resto del interior de la misma. La naturaleza líquida del núcleo exterior impide la transmisión de algunas de las ondas sísmicas (ondas «s» o de cizalla) que se utilizan para conocer las características de las distintas capas que configuran el interior de la Tierra. La composición del núcleo es conocida a partir de estudios indirectos que incluyen el conocimiento de la masa de la Tierra y su momento de inercia y la naturaleza de los meteoritos metálicos (*irons*), cuya composición se interpreta como similar a la del núcleo de la Tierra. Estos meteoritos están compuestos de una aleación de hierro y níquel que puede incluir un pequeño porcentaje de azufre, menor del 10% en forma de un sulfuro denominado troilita, y oxígeno.

El núcleo de la Tierra es el responsable de su campo magnético, el cual nos protege de las radiaciones mortales que emite nuestro Sol. La modelización de la composición, estructura y organización de nuestro núcleo ha despertado incontables preguntas acerca de cómo está organizado internamente y de cómo son los movimientos relativos entre el manto externo e interno que causan nuestro campo magnético. Los estudios más recientes nos indican la existencia de corrientes toroidales en el núcleo externo siguiendo un eje aproximadamente Norte-Sur. Además el núcleo interno se comporta como si estuviese compuesto por algo parecido a un cristal único (o una multitud de cristales que están alineados unos a otros) y algunos científicos postulan que esta configuración puede explicar las causas de la alta intensidad del campo magnético terrestre.

La historia de el campo magnético de nuestro planeta está registrada en la superficie de la Tierra, fundamentalmente en las lavas rica en hierro (por ejemplo los basaltos), en las cuales queda registrado cuando éstas se enfrían por debajo del punto de Curie (en torno a los 500°C). Ya que el basalto es una roca muy abundante, que se forma en todas las dorsales centro oceánicas, poseemos un extraordinario catálogo de cómo han cambiado las propiedades del campo magnético de la Tierra a lo largo de su historia, y con más precisión durante los últimos 200 millones de años. Estos estudios muestran de manera irrefutable como el campo magnético de la Tierra ha invertido su polaridad innumerables veces a lo largo de la historia geológica. De hecho, el estudio de estas inversiones fueron, en su momento, la piedra angular sobre la que se construyó la doctrina que permitió establecer la tectónica de placas, la deriva continental y la expansión del fondo oceánico. A pesar de su gran importancia, aún desconocemos cuales son las causas de estas inversiones.

### De la nébula solar al aire que respiramos

Por mucho que valoremos nuestro conocimiento de los procesos que ocurren en el interior de nuestro planeta,

es la existencia de una atmósfera «respirable» la que confiere a la Tierra su carácter único en el sistema solar (y en la medida en que sabemos, más allá del mismo). Esta atmósfera es la que ha permitido la existencia de vida durante al menos 3000 millones de años. Sólo por ese hecho, el origen de nuestra atmósfera merece unas líneas en este ensayo, las cuales únicamente pretenden llamar la atención del lector sobre la complejidad inherente al estudio del origen y posterior evolución de la atmósfera.

*El origen.* Se considera que la atmósfera terrestre tiene un origen secundario, lo que lleva implícita la existencia de una hipotética atmósfera primigenia «capturada» gravitacionalmente de la nube de gas a partir de la cual se formaron el sol y los planetas. Existen numerosas evidencias en contra de un origen primario para la atmósfera actual, aquí citaremos un ejemplo ilustrativo: el cociente entre las concentraciones de Nitrógeno y Neón (N/NE) es aproximadamente 1 en el Sol mientras que en la atmósfera terrestre esta relación está en torno a 86.000. Si esto es así, o bien el Neón escapó de la atmósfera terrestre de una manera 86.000 veces «más eficiente» que en el Nitrógeno (y no existe ninguna razón para asumir o explicar tal situación) o bien en Nitrógeno fue introducido con posterioridad en algún tipo de condensado y por lo tanto tiene un origen secundario.

La idea actualmente aceptada es que la atmósfera (secundaria) se formó con posterioridad al evento de formación de la Luna como consecuencia de la colisión entre la Tierra y otro planeta durante los primeros 50 millones de años de historia de la Tierra.

El impacto posiblemente fundió una importante proporción del manto terrestre creando una nube de vapor de silicatos alrededor de la Tierra. A medida que de esta nube caía una «lluvia de silicatos», la parte volátil de la nube incrementaría su abundancia relativa, eventualmente dando lugar a una proto-atmósfera de  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2$ , con la mayor parte del agua aún disuelta en el manto. Las temperaturas calculadas para la superficie de la Tierra después de este «diluvio primigenio» dependen de la cantidad de  $\text{CO}_2$  en la misma, pero podrían haber alcanzado los 500K. La manera en que la atmósfera evolucionó a partir de este estadio inicial depende severamente de cómo la corteza y el manto han evolucionado química y térmicamente (nótese que dependiendo del modelo utilizado, durante los primeros 100 millones de años la superficie de la Tierra podría haber sido infernalmente caliente o polarmente fría, o bien se fueron alternando ambos episodios).

Desde la perspectiva humana (y de otras especies) hay un aspecto que consideramos interesante mencionar: se sabe que la atmósfera más temprana contenía muy poco oxígeno pero la abundancia actual de dicho elemento en la atmósfera es del 21%. La mayoría de los especialistas están de acuerdo que el cambio de una atmósfera esencialmente anóxica a una atmósfera óxica tuvo lugar hace aproximadamente 2500 millones de años (al final del Eón Arcaico).

Las evidencias de este cambio se encuentran en las rocas que registran la aparición de sedimentos «rojizos», que reflejan la oxidación del hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) a hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Como cabe esperar, la propia evolución del oxígeno en la atmósfera esta condicionada por la evolución de otros elementos y compuestos, tales como el azufre y el metano.

Finalmente, es evidente, como ocurre con otros procesos de evolución de la Tierra a todas las escalas y «profundidades», el conocimiento parcial que tenemos de los mismos hacen muy difícil predecir futuros cambios significativos en el funcionamiento de nuestro planeta y en particular de nuestra atmósfera. En la medida en que los datos nos permiten interpretar, la atmósfera ha tenido una composición más o menos constante durante los últimos 540 millones de años (a partir del inicio de la Era Paleozoica). Esto se debe en gran medida a la acción combinada de la tectónica de placas y procesos superficiales que han permitido un balance más o menos estable del  $\text{CO}_2$ , expulsado hacia la atmósfera por la actividad volcánica y «secuestrado» por la precipitación de rocas carbonatadas y la formación de combustibles fósiles. Nuestra actividad industrial, la quema de dichos combustibles altera de manera artificial dicho balance, añadiendo una incógnita más a la ya complicada ecuación que gobierna la evolución de la cubierta gaseosa de nuestro planeta.

### Los supercontinentes, ¿ciclos o accidentes?

Los supercontinentes se pueden definir como masivas aglomeraciones continentales que aglutinan a la mayor parte de la litosfera continental de la Tierra a lo largo de un periodo de tiempo determinado de la historia geológica de nuestro planeta. Los supercontinentes se hayan siempre rodeados por superocéanos.

La pasada existencia del supercontinente conocido como Pangea, rodeado por el superocéano llamado Pantalasa (figura 3a) es uno de los dogmas de la tectónica de placas. Esta geografía global formada por un supercontinente fue protagonista del mundo desde el fin del Carbonífero (hace 299 millones de años) hasta 100 millones de años después, cuando Pangea comenzó a disgregarse y dispersarse entre hace 200 y 100 millones de años dando lugar a la existencia del Océano Atlántico y cambiando progresivamente hacia nuestra geografía actual.

Pangea se formó por la convergencia de varios continentes que, debido a la subducción de la litosfera oceánica que los separaba, sufrieron la consiguiente colisión continental que se produce una vez consumida esta. El resultado de esta amalgama continental es un periodo de tiempo en el que se crearon grandes cadenas montañosas en todo el planeta entre hace 400 y 300 millones de años. A medida que la datación geocronológica de eventos geológicos se va haciendo más precisa se va poniendo claramente de manifiesto que los grandes episodios en los que se generaron cadenas montañosas se hallan concentrados en

intervalos temporales relativamente cortos, separados en el tiempo entre 500 y 350 millones de años y que ocurrieron a escala global. Los episodios de generación de cadenas montañosas que precedieron la formación de Pangea se concentran en épocas en torno a hace 650-600, 1.100-1.000, 1.600, 2.100 y 2.600 millones de años. Similarmente a lo que ocurre con la formación de Pangea, estos episodios son interpretados comúnmente como épocas en las que se produjo la amalgamación de un supercontinente y la mayor parte de los científicos sostienen que Pangea no es más que el último de la serie de los supercontinentes que se han amalgamado y posteriormente dispersado en los últimos 3.000 millones de años. La rotura y dispersión de los continentes se encuentra marcada por la inyección de rocas fundidas, magma, en fracturas, seguida de la generación de antiguos márgenes continentales a lo largo de las costas de los continentes en dispersión.

Los continuos y repetidos ciclos de generación y destrucción de los supercontinentes han tenido un profundo efecto en la actividad magmática, y por tanto, en la evolución de la corteza terrestre y de la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y su consiguiente efecto en el cambio climático y en los efectos del mismo sobre la vida. Existe un intenso debate en la comunidad científica acerca de si la amalgamación de continentes no es más que el resultado inevitable de la deriva de la litosfera continental, que flota sobre la astenosfera, o si, por el contrario, son los patrones de las corrientes presentes en el manto los que dirigen a los continentes hasta juntarlos en un único lugar para posteriormente separarlos de nuevo y volver a juntarlos una y otra vez. El geofísico americano Don Anderson atribuye la rotura de los supercontinentes a la capacidad aislante de los mismos, que impide la disipación del calor generado en el manto. De esta manera, el manto bajo los supercontinentes se calentaría anormalmente lo que originaría la presencia de grandes volúmenes de fundidos de naturaleza basáltica debajo del supercontinente a medida que el manto se va fundiendo. Este calor hace que el supercontinente sea levantado ligeramente en su centro y se arquee, fracturándose e iniciando la rotura de los continentes a medida que el magma aprovecha las fracturas para ascender a la superficie. A medida que este proceso progresa, los continentes se hacen progresivamente más finos hasta que se separan uno de otro completamente y nace un Nuevo océano entre ellos. En este modelo el creciente calor del manto bajo los supercontinentes hace que su rotura sea inevitable. Recientemente se han datado grandes enjambres de diques basálticos que tienen edades que se corresponden con momentos en los que los continentes fueron fracturados, lo que apoyaría la idea de que la rotura y dispersión de los supercontinentes pueden estar relacionados con la acumulación de calor bajo los mismos.

Por otro lado, reunir de nuevo los continentes para formar un supercontinente requiere que se generen zonas de subducción en los océanos situados entre los mismos. Sin embargo los procesos que llevan al inicio de una zona

de subducción no están bien establecidos. Una teoría propone que cuando la litosfera oceánica es lo suficientemente antigua, es más densa y por tanto es inestable gravitacionalmente, deja de flotar sobre la astenosfera y comienza a subducir espontáneamente, de manera especial en zonas de fractura, más débiles. Las zonas de subducción en el Pacífico occidental son interpretadas como un ejemplo de este proceso, ya que la mayoría de la litosfera oceánica que ha subducido tiene más de 150 millones de años de antigüedad. La subducción de la litosfera oceánica puede arrastrar (*slab pull*, ver más arriba) a la litosfera continental presente en la misma placa tectónica hacia la zona de subducción. Así, de manera general, la mayor parte de la corteza continental hoy en día deriva hacia las zonas de subducción que rodean el Océano Pacífico y si este movimiento no cesa, en el futuro existirá un nuevo supercontinente, denominado «Amasia» por Paul Hoffmand, de la Universidad de Harvard (figura 3b). Por el contrario, a medida que el Océano Atlántico se hace más ancho y su litosfera oceánica se hace más antigua, es posible que en sus márgenes se puedan iniciar una o varias zonas de subducción a lo largo de zonas de fractura más débiles, como indican algunos modelos geodinámicos recientes. Si sucediese esto, una posibilidad factible es que el Océano Atlántico se cierre de nuevo, generando un nuevo supercontinente que se parecería a Pangea y que Chris Scotese, de la Universidad de Texas, ha llamado «Pangea Ultima» (figura 3c).

### ¿Cómo y cuándo cesará la tectónica de placas? ¿Existe una geografía final de la Tierra?

Dado que hay muchos aspectos desconocidos acerca de como ha funcionado nuestro planeta en el pasado, es difícil hacer predicciones de cómo funcionará en el futuro. Sin embargo, se han hecho algunos intentos de predecir como la tectónica de placas configurará nuestra geografía en el futuro. Los modelos que se construyen en la actualidad mantienen las direcciones y velocidades de movimiento de las placas, lo que es una aproximación extremadamente simplista. Esta limitada forma de predecir nuestra geografía futura nos muestra fehacientemente la falta de entendimiento que tenemos de las causas primarias de los movimientos de las placas y de que no podemos anticipar de ninguna manera los posibles cambios en los patrones de movimiento al desconocer completamente el delicado equilibrio de fuerzas que conducen la dinámica de la Tierra.

La dificultad a la hora de predecir si las dos mayores masas continentales del planeta continuarán con su movimiento actual para cerrar el océano Pacífico, formando Amasia, o si van a invertir su movimiento relativo para, por el contrario, cerrar el Océano Atlántico amalgamándose en Pangea Ultima (ver más arriba y figura 3) es un ejemplo clarísimo de las investigaciones de primer orden que aún han de ser realizadas. Por otro lado, sabemos que si nuestro conocimiento de las geografías pasada, la paleogeografía de nuestro planeta, es válido entonces la figuración



del próximo supercontinente será, seguramente, muy diferente de cualquier configuración que podamos predecir a partir de la geografía moderna.

Las preguntas más importantes que podemos hacernos son posiblemente: A medida que la Tierra continúa enfriándose ¿Cuándo llegará el momento en que el calor interno de la tierra sea insuficiente para servir de combustible a la tectónica de placas? y ¿Cuánto tiempo tardarán los procesos externos en lograr una configuración estable para nuestro planeta una vez que desaparezca nuestro motor interno?

Estas cuestiones meramente retóricas sirven para ilustrar algunos aspectos de las importantes investigaciones que aún quedan por hacer para conocer nuestro planeta. De la misma manera que estudiamos la historia humana, creyendo que saber de dónde venimos es una guía para saber a dónde vamos, cuanto mejor entendamos la historia de nuestro planeta, estaremos mejor preparados para poder utilizar los recursos que nos proporciona nuestra generosa Tierra de una manera más responsable y respetuosa con el medio ambiente, de manera que comprometamos nuestro futuro sobre la misma. Citando a Winston Churchill: «Cuanto más atrás seas capaz de mirar, más adelante podrás ver».

### ¿Está la Tierra en medio de una autopista intergaláctica?

Usando el hilo conductor de la novela de Douglas Adams *Guía del autoestopista galáctico*, podemos prever la existencia de posibles situaciones en las que eventos accidentales, catastróficos e instantáneos puedan alterar cualquier secuencia de hechos que hayamos podido predecir.

Hasta ahora hemos discutido acerca de procesos que no entendemos completamente pero que podemos estimar, intuir o convertir mediante hipótesis en patrones que en ocasiones pueden ser razonablemente predecibles. De nuestro conocimiento del registro geológico sabemos que algunos de los eventos más importantes en la historia de nuestro planeta (por ejemplo la formación del sistema Tierra-Luna, las abundantes extinciones biológicas masivas, por no mencionar el posible origen de la vida en sí o el reinicio del reloj evolutivo mediante las mencionadas extinciones) fueron causados por procesos que no están relacionados con la tectónica de placas y que pueden haber tenido causas extraterrestres, como el impacto de grandes bólidos espaciales o grandes erupciones de la corona del Sol.

Estas incertidumbres imprevisibles añaden más «especies» a al caldo de la falta de linealidad de los procesos impredecibles, que conocemos únicamente de manera parcial. Como se cita en la *Guía del autoestopista galáctico*, nuestro planeta es únicamente un pequeño punto en un océano galáctico de posibilidades.

### Algunas reflexiones acerca de las Ciencias de la Tierra y sus científicos

Nuestra sociedad percibe, y en gran medida cree, que los científicos dedicados a las Ciencias de la Tierra son románticos coleccionistas y recolectores de fósiles o viajeros empedernidos en busca de extrañas rocas y minerales. En el caso de que esta imagen haya sido fiel reflejo de la realidad alguna vez, en la actualidad está absolutamente desfasada. Los geólogos y geofísicos acarrean la tarea de conocer, desarrollar y entender los procesos que ocurren en nuestro planeta, de cómo estos han cambiado a lo largo del tiempo y de cómo usar el conocimiento obtenido para encontrar los recursos necesarios para mantener a la humanidad, al mismo tiempo que promueven la responsabilidad de mantener en buenas condiciones nuestro medio ambiente.

Los gobiernos de la mayor parte del mundo destinan a las Ciencias de la Tierra, presupuestos que son claramente insuficientes, especialmente si se tiene en cuenta o se el valor que tienen los recursos obtenidos para nuestra economía o cuando se comparan con la financiación de otras ciencias cuya aplicación inmediata se aleja mucho de los beneficios que se obtienen mediante el desarrollo de las Ciencias de la Tierra.

Sin embargo, es necesario decir que la reciente inquietud de los gobiernos acerca de las posibles amenazas medioambientales, tales como el calentamiento global, ha servido para aumentar los recursos destinados a las Ciencias de la Tierra, aunque la mayor parte de ellos sólo hayan sido destinados a aquellos equipos cuya especialidad se relaciona directamente con el registro de los cambios climáticos recientes. Desde nuestra perspectiva humana como especie, entender los mecanismos íntimos de los procesos que conforman nuestro planeta en conjunto es crucial para entender los ciclos naturales del mismo, y estos ciclos ocurren de acuerdo con la escala del tiempo geológico, muy distinta de la que estamos acostumbrados a percibir.

Como colofón, nos gustaría hacer énfasis en que el abandono de la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en muchos sistemas educativos de todo el mundo, hecho que puede ser perfectamente ejemplificado en por el caso español, donde no se imparte la asignatura de geología en ningún curso de su sistema educativo, es extremadamente peligroso, ya que estamos construyendo una sociedad que no se preocupa de los procesos que han construido la arquitectura actual del planeta en que vive. De esta manera es mucho más difícil ser consciente de los problemas medioambientales, que están profundamente enraizados en el desacoplamiento del ritmo que tienen los procesos geológicos naturales y el del desarrollo de la humanidad. Así, ¿nos encontraremos alguna vez en una situación en la que se nos pida que respetemos y protejamos a un planeta que desconocemos casi completamente?, ¿sabremos que hacer en ese caso?