

## ¿Qué hizo de la Tierra un planeta habitable?

### *What Makes the Earth a Habitable Planet?*

**EMILIO PEDRINACI**

*IES de Gines, Sevilla. C/e: pedrinaci@telefonica.net*

**Resumen** En los últimos años se han aportado algunos datos sobre la génesis planetaria que han cambiado nuestro modo de entender las condiciones en que se formó la Tierra y los procesos que le proporcionaron la configuración que debió tener al cabo de unos cientos de millones de años de existencia. Es, por otra parte, una cuestión cuyo tratamiento exige un enfoque sistémico y que concita especial interés porque define el escenario en que apareció la vida. Por todo ello debería prestársele mayor atención en la enseñanza. En este trabajo se sintetiza el estado del conocimiento acerca del origen de la Tierra y se ofrecen algunas ideas para su tratamiento en el aula.

**Palabras clave:** génesis planetaria, formación del sistema solar, acreción, historia de la Tierra, Tierra joven, naturaleza de la ciencia.

**Abstract** *Scientists have provided new data concerning the planetary genesis Over the last years. These new insights have altered our understanding of the conditions in which the Earth was created as well as the understanding of the processes that led to what we believe was its configuration after a few hundreds of millions of years of existence. This is a question that requires a systemic approach and that has gathered a particular interest since it defines the scenario in which life appeared. For these very reasons this topic should be given a greater attention in education. In this work we synthesize the state of knowledge regarding the origin of the Earth and we propose few ideas about how to apply this topic in classrooms.*

**Keywords:** *Planetary genesis, Solar system formation, Accretion, History of the Earth, Early Earth, Nature of Science*

### INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta posee una atmósfera protectora, agua en estado líquido, una temperatura media agradable y un campo magnético que nos cubre del viento solar. Son características que se asocian con la aparición y el desarrollo de la vida tal y como la conocemos. Para explicar estas condiciones suele recurrirse a datos tales como la masa de la Tierra, su composición química y su distancia al Sol. Datos que, sin duda, son esenciales pero de los cuales no se derivan linealmente las características referidas que la hacen tan diferente del hirviente Venus con su densísima atmósfera, o del gélido Marte con su tenue cubierta gaseosa. En efecto, la Tierra podría ocupar la misma zona del sistema solar en la que hoy se ubica, poseer idéntica masa y una composición química similar a la que tiene y, sin embargo, disponer de unas condiciones muy diferentes a las que posee y carecer de una especie que se interroga acerca de sus orígenes.

Sostiene Douglas Lin (2008) que si algo están mostrando los descubrimientos de los sistemas

planetarios extrasolares es la extraordinaria diversidad que ofrecen los planetas. De manera que sus características y disposición no encajan con la visión determinista tradicional, según la cual una vez disparado el proceso de formación planetaria las condiciones iniciales predeterminarían todo lo que ocurriría después. El proceso, como veremos, parece ser menos lineal, más caótico, de forma que el producto resultante depende sin duda de las condiciones iniciales pero también de contingencias que, en palabras de Lin, “hacen de cada planeta un caso único”.

Por otra parte, este hecho nada puede sorprender a quienes, como los geólogos, estamos acostumbrados a convivir con una ciencia cuyo objeto de estudio, la Tierra, se encuentra en permanente cambio y, en consecuencia, las situaciones que se suceden son, por definición, singulares. Esta singularidad de cada caso hace, por ejemplo, que el Himalaya sea diferente a los Alpes o a los Pirineos o a cualquier otro orógeno del pasado o que puede haber en el futuro, pero no evita que se procure encontrar patrones comunes que no sólo ayuden a entender lo que sucede sino que permitan descri-

bir pautas generalizables o aplicables a una diversidad de casos. Poco avanzaríamos de no hacerlo así. En esta línea resultan muy ilustrativas las cuatro enseñanzas que, a juicio de David Stevenson, está proporcionando la exploración planetaria y que recogían Castilla y de Pablo (2003): “1) Todos los procesos geológicos que reconocemos en otros cuerpos planetarios pueden ser explicados en último término por principios, leyes y modelos estudiados en la Tierra. 2) La perspectiva histórica es esencial. 3) El medio cósmico influye en la evolución de los cuerpos planetarios. 4) Procesos semejantes en cuerpos parecidos producen distintos resultados”.

El estudio de la génesis planetaria une a su indudable interés científico un interés formativo no menor. Así, en la última década se han introducido modificaciones importantes en nuestras ideas acerca del origen y primera evolución de la Tierra, pero más allá de eso o de que la comunidad científica pueda ofrecer dentro de unos años nuevas hipótesis o teorías más fundadas sobre el origen de nuestro planeta, lo esencial desde la perspectiva educativa es mostrar que las características deben ser explicadas. Esa es la primera función de las teorías, dar sentido a hechos, datos y observaciones relacionándolos de manera coherente y plausible. Y esto vale igual para explicar las sorprendentes similitudes entre el genoma de la especie humana y el de un gusano (más allá de chistes maliciosos) que para explicar por qué la Tierra orbita en el mismo sentido que los demás planetas del sistema solar, o por qué todos ellos lo hacen siguiendo aproximadamente el plano de la eclíptica, o por qué los planetas interiores son pequeños, densos y rocosos, mientras que los exteriores son gigantes y mayoritariamente gaseosos, o por qué los materiales terrestres se encuentran dispuestos en capas concéntricas de densidad creciente, desde la atmósfera hasta su núcleo de hierro, etc.

## CRÁTERES DE IMPACTO

Una de esas características que cualquier teoría sobre la formación de la Tierra debe explicar es la existencia general de cráteres de impacto en los cuerpos rocosos del sistema solar. La superficie de la Luna presenta, en efecto, numerosos cráteres perfectamente visibles con unos prismáticos o un telescopio de aficionado (figura 1). Observando sus características, cuesta creer que hasta mediados del siglo XX fuesen interpretados como calderas volcánicas por no pocos investigadores.

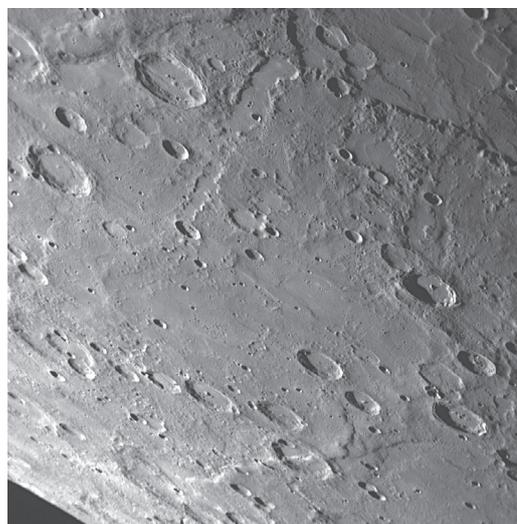
No hay duda de que aunque algunos, los menos, tienen ese origen volcánico, muchos más han sido producidos por el impacto de otros objetos celestes. Los cráteres de la Luna no se distribuyen de mane-



ra homogénea sino que pueden diferenciarse unas zonas densamente craterizadas, son las de tonos claros, de otras oscuras con menor presencia de cráteres. Como cabía esperar, estas últimas, conocidas por su denominación latina, *maria* (plural de *mare*), son las más modernas. Gracias a los 350 kilos de muestras de rocas lunares recogidas por las misiones Apollo, sabemos que las rocas de las tierras altas (zonas claras) tienen edades entre 4400 y 4000 millones de años (m.a.), mientras que las de los *maria* tienen edades comprendidas entre 3900 y 3200 m.a.

Los cráteres de la superficie lunar no son una excepción sino que, lejos de eso, constituyen la norma. Mercurio, por ejemplo, ofrece también una superficie hoyada (figura 2) y lo mismo ocurre con los

*Fig. 1. Superficie lunar. Las tierras altas (zonas claras) tienen edades entre 4400 y 4000 m.a. Las edades de los maria (zonas oscuras) están entre 3.900 y 3.200 m.a. Fuente: NASA*



*Fig. 2. Imagen de los cráteres de Mercurio tomadas por el Messenger. Fuente: NASA.*



Fig. 3. También los asteroides, como Ida, tienen su superficie craterizada. Fuente: NASA

asteroides (figura 3). Venus, más difícil de auscultar por su densa atmósfera, los tiene igualmente (figura 4) aunque, como en la Tierra, su número es mucho menor porque su actividad geológica borra las huellas de los impactos.

En definitiva, en nuestro sistema solar todo aquel objeto celeste que puede tener cráteres de impacto los tiene. Una regularidad como esta no puede ser casual sino que debe haber una causa que la explique. En este caso, la comunidad científica no parece albergar dudas, los cráteres de impacto son huellas de sucesos que debieron ser especialmente frecuentes en los inicios de la configuración del sistema solar y nos hablan de un proceso que resultó clave en la génesis planetaria, la acreción. De manera que cualquier teoría que pretenda explicar el origen de nuestro planeta o del sistema solar debe otorgar un papel fundamental a la acreción.



Fig. 4. Venus. Cráter Dickinson de unos 69 km de diámetro tomada por la misión Magallanes. La distribución de eyectas sugiere un impacto oblicuo procedente del oeste. Fuente: Nasa.

## EL ESCENARIO

La investigación sobre el origen de la Tierra nos remite, inevitablemente, al escenario en que tuvo lugar la formación del sistema solar. Hasta hace tres lustros, nuestras ideas acerca del origen de los planetas estaban basadas exclusivamente en el análisis del sistema solar, y siempre resulta difícil y arriesgado definir procesos generales apoyándose en el estudio de un solo caso, especialmente si este caso ocurrió hace casi 4600 m.a. Afortunadamente, la investigación astronómica cuenta cada día con más datos provenientes de otros sistemas planetarios que están contribuyendo a superar esta limitación, ya que “nadie puede ser testigo de su propio nacimiento pero esperamos aprender viendo otros partos planetarios”, Anguita (2002).

Han sido detectados ya más de 350 sistemas planetarios (Schneider, 2010), de ellos más de 40 son sistemas múltiples que se encuentran en diferentes fases de su proceso evolutivo, y hasta la fecha, abril de 2010, han sido catalogados 446 planetas extrasolares<sup>1</sup>. Conviene recordar que hubo que esperar hasta 1992 para constatar la existencia del primer planeta fuera de nuestro sistema solar. Se halló en torno a un púlsar. Desde entonces el ritmo de descubrimientos se ha disparado y hay algunos datos que han llamado la atención. El primero de ellos es su extraordinaria diversidad; circunstancia que apoya la idea de que la génesis planetaria parece seguir un proceso menos determinista del que se venía proponiendo, de manera que no basta con conocer las características iniciales de la nube interestelar para poder predecir el resultado porque “el juego caótico de mecanismos competitivos conduce a una enorme diversidad de sistemas planetarios”, Lin (2008).

El segundo de los datos relevantes proporcionados por el estudio de estos sistemas planetarios es la frecuencia con que los planetas extrasolares hallados se ubican muy cerca de su estrella, incluso tratándose de planetas gaseosos de masa superior a la de Júpiter. Es, sin embargo, un rasgo que sólo debería sorprendernos parcialmente, porque no parece ser tanto una característica de la mayoría de los sistemas planetarios cuanto un sesgo de la investigación dado que, como apunta Laughlin (2007), con los métodos que hoy se utilizan las posibilidades de detectar un planeta extrasolar son mayores cuanto más cercano a su estrella se encuentra y mayor es su volumen y su masa. En cualquier caso, el sesgo investigativo permite justificar la frecuencia con

1. Resulta muy convincente la crítica que Caballero (2003) hace del término “planeta extrasolar” que literalmente significa “fuera del Sol”: si no hay ningún planeta dentro del Sol, ¿qué sentido tiene que hablemos de extrasolares? Sin embargo, como también ha sido criticado el término exoplaneta, hemos preferido utilizar la denominación más usual: planeta extrasolar.

que se han hallado planetas jovianos periestelares (“Hot Jupiter”) con un radio orbital inferior a 1 unidad astronómica (radio orbital terrestre) pero no sirve para explicar su presencia en un lugar en el que un planeta gaseoso no podría formarse. Lo que, casi inevitablemente, nos conduce a aceptar que estos planetas se han originado en zonas más alejadas de su estrella y han emigrado hasta el lugar en que hoy los vemos (Alibert *et al.*, 2010).

Con todo, para la cuestión que nos ocupa, conviene que seleccionemos aquellos datos proporcionados por la astronomía y la geología planetaria que puedan resultarnos más útiles para inferir el escenario en que debió originarse la Tierra y que los interpretemos desde esa perspectiva.

En nuestra galaxia existen nebulosas constituidas por enormes cantidades de hidrógeno molecular y helio entre los cuales se sitúan granos de polvo (partículas de escala micrométrica que son desechos de anteriores generaciones de estrellas). Cuando una nube alcanza una densidad suficientemente alta a una temperatura suficientemente baja puede producirse un colapso gravitatorio y originar una o más estrellas. Sin embargo, el proceso no siempre ocurre, es más, la mayoría de las nubes de nuestra galaxia no se están contrayendo para formar estrellas. Y esto es así porque cuentan con dos características que les dan estabilidad. La primera de ellas es que se encuentran en rotación. Si fuesen estáticas la gravedad les haría colapsar, como predijo Newton, al menos hasta que alcanzasen cierta temperatura en su interior. La segunda es que en estas nubes suelen encontrarse partículas dotadas de carga en un número mucho mayor que el de átomos neutros y moléculas. La existencia de un campo magnético hace que esas partículas cargadas (iones y electrones libres) se dispongan siguiendo las líneas del campo magnético, configurando una especie de armazón que se resiste al colapso gravitatorio (Laughlin, 2007).

Un acontecimiento puede desestabilizar esta situación y, en nuestro caso, probablemente fue la explosión de una supernova hace casi 4600 m.a., así parecen mostrarlo “la abundancia de isótopos raros encontrados en muestras de meteoritos” (Gribbin, 2007). La onda de choque generada por esta supernova desencadenó el colapso gravitatorio de la nube, lo que condensaría la mayoría del gas en el centro, formando el protosol. Una vez disparado el dispositivo, un proceso de este tipo suele ser rápido, entre cien mil y un millón de años. Puesto que se trata de una nube giratoria, no todos los materiales colapsan hacia la protoestrella sino que parte de ellos lo hacen hacia el plano perpendicular al eje de giro. Alrededor de la protoestrella se origina así un disco de gas y polvo a partir del cual podrán formarse los planetas. Esta disposición explica por qué todos los planetas orbitan en el mismo sentido que, además, debe coincidir con el de la estrella, y por qué sus órbitas se sitúan en el plano ecuatorial de ella.

Los modelos informáticos predicen que las estrellas no se generan de forma aislada sino que las grandes nubes moleculares originan cúmulos de estrellas. Ese debería ser el caso más frecuente, incluso puede que todas se formen así y, en consecuencia, las estrellas aisladas como nuestro Sol es probable que hayan sido expulsadas de su cúmulo (Zwart, 2010). El cúmulo estelar R136, situado en la Gran Nube de Magallanes, parece ofrecer un modelo similar al de aquel en el que pudo formarse el Sol. Se tiene la esperanza de que el satélite europeo GAIA, cuyo lanzamiento está previsto para 2011, ayude a identificar algunas de las estrellas hermanas del Sol.

Otra de las predicciones que proporcionan los modelos informáticos es la formación de discos de gas y polvo en torno a las protoestrellas. El telescopio espacial Hubble ha confirmado esta predicción, detectando la existencia de discos de gas y partículas de polvo alrededor de muchas estrellas jóvenes. Un dato interesante es que de estas estrellas jóvenes, aquellas que tienen edades entre uno y tres m.a. poseen discos con abundante gas, mientras que los discos de las de más 10 m.a. son exigüos y han perdido la mayoría del gas. En consecuencia, ese intervalo de tiempo, entre uno y diez m.a. tras la formación de la estrella, delimitaría el periodo en que deberían formarse los planetas (Lin, 2008).

En el interior del disco los granos de polvo chocan y se adhieren, generando concentraciones irregularmente repartidas que, a su vez, se unirán para formar unos objetos de tipo asteroidal con unas dimensiones de algunos kilómetros de diámetro, los planetesimales. Este proceso es relativamente rápido y, en el caso del sistema solar, pudo concluir en el primer millón de años. El disco protoplanetario debió tener miles de millones de planetesimales, y las características de cada uno de ellos estarían condicionadas por el lugar en que se ubicasen. Así, las temperaturas existentes en las zonas más cercanas a la protoestrella y el viento solar expulsarían los componentes volátiles hacia las zonas más alejadas del disco. La llamada “línea de hielo” delimitaría una parte interna del disco pobre en volátiles y rica en hierro y silicatos, de otra más externa con abundantes volátiles y objetos helados de agua, amoníaco y metano.

En una situación de este tipo, con miles de millones de planetesimales, las colisiones deben ser muy frecuentes, y sus efectos en unos casos supondrán la fragmentación de los cuerpos que intervienen, y en otros su unión o acreción. De este modo, el crecimiento de algunos de los planetesimales se autorrefuerza con la incorporación de otros. Quedaría así una población de embriones planetarios que van barriendo su órbita y “compiten” por los planetesimales restantes. El número de embriones planetarios generados es superior al de planetas que lograrán formarse. Finalmente, quedarán tantos planetas

Fig. 5. Siderita de 780 kilos hallada en Zacatecas (Méjico).



como permita el sistema y hayan sobrevivido a los sucesos locales.

En un modelo como el descrito encajan muy bien los datos y observaciones que tenemos sobre la formación de los planetas interiores, pero se exige un tiempo excesivo para la génesis de los gigantes. Esta circunstancia hace que con frecuencia se defienda un modelo parcialmente diferente, más ágil, para la formación de los gigantes gaseosos (Alibert *et al.*, 2010).

Pero centrémonos en la Tierra. ¿Qué características tenían los planetesimales que participaron en su formación?, ¿cuándo se individualizó el protoplaneta terrestre?, ¿era en sus comienzos un planeta frío o estaba fundido?, ¿la Luna estuvo siempre a su lado?, ¿qué grado de certeza tenemos hoy sobre las respuestas a estas cuestiones?

### LA CONSTRUCCIÓN DE LA TIERRA: INGREDIENTES, PROCESOS Y EDADES

Los objetos que integran el cinturón de asteroides situado entre Marte y Júpiter, denominado *Cinturón Principal*, no son, como a veces se ha conjeturado, los escombros de un planeta que saltó en mil pedazos al producirse una colisión de grandes proporciones, sino que son planetesimales y materiales anteriores a ellos que no terminaron de unirse para formar un planeta (con toda probabilidad, la influencia gravitatoria de Júpiter lo impidió). Esta circunstancia es especialmente relevante porque significa que los asteroides del Cinturón Principal son testigos presenciales de la formación de la Tierra.

Algunos de estos objetos cambian de órbita como consecuencia de perturbaciones gravitatorias o de colisiones y caen en el campo de gravedad terrestre, son los meteoritos. La mayoría de los meteoritos tienen este origen y eso hace de ellos un material muy valioso para entender cómo y cuándo se

originó la Tierra. Otros son esquirlas de la Luna o de Marte extraídas por el impacto de asteroides. Aunque los expertos distinguen entre una gama muy amplia de meteoritos, a los efectos que aquí nos interesan, pueden clasificarse en dos grandes grupos: a) aquellos que no han experimentado transformaciones importantes desde el origen del sistema solar, las condritas; b) aquellos que han experimentado procesos de diferenciación, las acondritas, las sideritas y otros (figura 5).

Los más abundantes son las condritas (86% del total); están compuestas por silicatos de hierro y magnesio con algo de hierro nativo, por tanto tienen una composición similar a la del manto terrestre aunque con un poco más de hierro. La datación radiométrica determina para la mayoría de ellas una edad de  $4560 \pm 10$  m.a. Las acondritas representan el 9% del total, su composición es basáltica y sus edades más frecuentes son entre 50 y 150 m.a. menores que las condritas (aunque también las hay con edades similares a las de estas). Las sideritas representan el 4%, están compuestas mayoritariamente por hierro con algo de níquel y sus edades se sitúan en la misma horquilla que las acondritas. Si consideramos que la suma de la composición química de acondritas y sideritas es similar a la de las condritas, la hipótesis más evidente sería que la fusión de algunas condritas habría propiciado una diferenciación entre unos materiales más densos, fundamentalmente hierro, y otros menos densos que quedarían en la superficie del asteroide (figura 6). La fragmentación de estos asteroides originarían, por tanto, los tipos básicos de meteoritos descritos.

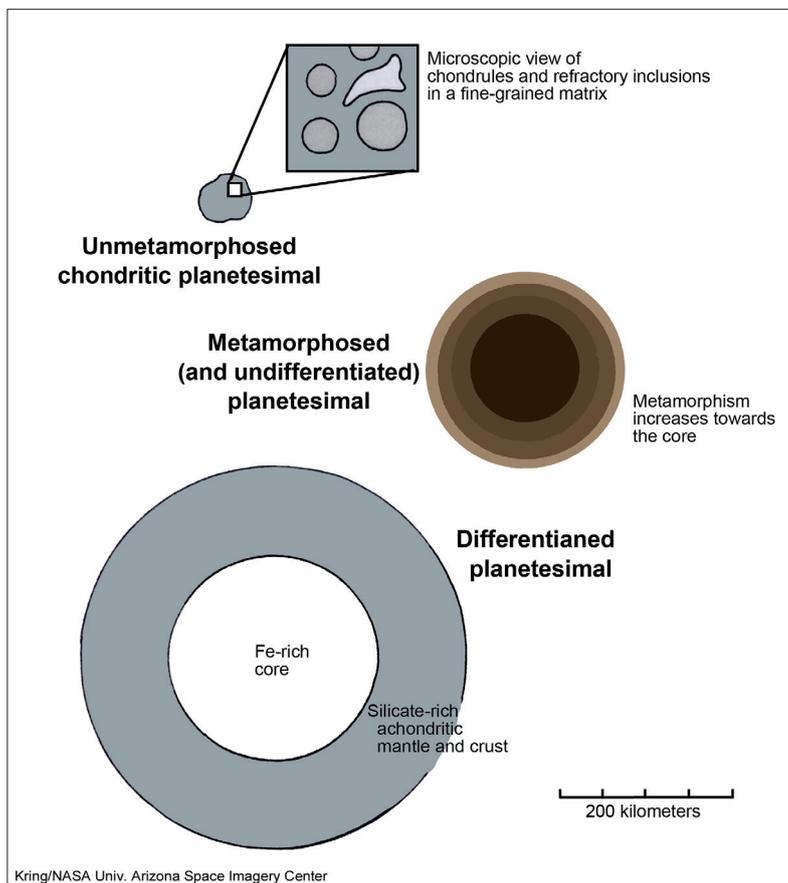
Las condritas nos han proporcionado un conjunto de datos muy interesantes. Así, contienen una cantidad importante de volátiles, fundamentalmente gases nobles y agua (conviene recordar que la mayoría de los planetesimales que contribuyeron a la formación de la Tierra debieron tener una composición condritica). Dependiendo del tipo de

condritas y de su distancia al Sol, la proporción de agua oscila entre el 2% y el 11% y de la masa total, siendo tanto mayor cuanto más alejadas del Sol se encuentran.

La característica más destacable de las condritas, de la cual deriva su denominación, es la de contener pequeñas esferas de escala milimétrica, cóndrulos, que presentan indicios de impactos y de calentamiento, aunque éste siempre quedó por debajo del punto de fusión de los cóndrulos. ¿Qué pudo generar ese incremento de temperatura? Los impactos parecen los candidatos más firmes y, sin duda, su concurso fue necesario, de otro modo resultaría difícil explicar el hallazgo de algunas acondritas -por tanto, objetos diferenciados- de una edad tan temprana como 4566 m.a. (Baker *et al.*, 2005). Pero, en la mayoría de los casos, en estas fases iniciales del proceso de acreción los impactos resultarían por sí solos insuficientes. El otro candidato es algún isótopo radiactivo de vida media lo suficientemente corta como para tener efectos rápidos. Con mucha probabilidad se trata de un isótopo de aluminio, el  $^{26}\text{Al}$ , y puede que también de otro de hierro, el  $^{60}\text{Fe}$ . Estos isótopos se habrían generado en reacciones nucleares de una estrella previa, y dispersado por la explosión de la supernova cuya onda de choque desencadenó el colapso gravitatorio de la nube interestelar que marcó el origen de nuestro sistema solar. La edad generalmente aceptada como “hora cero” del sistema solar es de  $4567 \pm 3$  m.a. (Halliday, 2006).

A medida que los asteroides aumentaron su tamaño, la menor relación superficie externa/volumen redujo la disipación térmica permitiendo que el calor generado por los impactos y la desintegración radiactiva pudiera acumularse y, eventualmente, fundir algunos de ellos, aquellos que sufrieron diferenciación química (Rubin, 2005).

Sostiene el *Board on Earth Sciences and Resources* (BESR) (2008) que hace 4550 m.a. el protoplaneta terrestre tendría ya un 60% de la masa actual y seguiría acumulando materiales por acreción, si bien a un ritmo más irregular. El impacto de los planetesimales y la desintegración de los radioisótopos de vida corta, principalmente el  $^{26}\text{Al}$ , debieron hacer que el protoplaneta terrestre se hallase parcialmente fundido. A partir de ese momento comienza uno de los procesos que mayor trascendencia tendrá en el futuro del planeta, la diferenciación por densidades. Como consecuencia de ella los componentes más densos, fundamentalmente el hierro, comenzarán a desplazarse hacia el interior terrestre, mientras que los de menor densidad, especialmente los volátiles, se irán hacia la superficie. Se acababa de iniciar así el proceso de formación del núcleo terrestre, cuya dinámica dotará a la Tierra de un campo magnético. Simultáneamente comenzará a generarse corteza basáltica, mientras que la desgasificación del interior del planeta proporcionará materiales



para la atmósfera y la hidrosfera. Nada será igual en nuestro planeta tras este proceso de diferenciación.

¿Cuánto tiempo duró la diferenciación por densidades? Hasta hace unos años se ha venido pensando que si bien este proceso es de muy larga duración (aun continúa la desgasificación del manto terrestre en las erupciones volcánicas), en lo fundamental, la diferenciación del núcleo se habría producido en los momentos iniciales de la formación del protoplaneta terrestre de manera muy rápida, incluso catastrófica, dándose al evento la denominación de “catástrofe del hierro”. La distribución de ciertos isótopos radiactivos y otros datos actuales apuntan, sin embargo, a un proceso algo más lento. Así que 50 m.a. después de la formación del sistema solar, la diferenciación de la parte silicatada y la metálica no había concluido (Machetel, 2008). Con todo, en una Tierra joven parcialmente fundida, enormes “gotas de hierro” atravesarían el manto siguiendo un proceso diapírico, obviamente, descendente.

¿Cuánto tiempo más duró la formación del núcleo? Aún se discute pero, en cualquier caso, debió coexistir con la fase más intensa del bombardeo meteorítico y, de ser cierta la hipótesis del origen de la Luna que mayor aceptación tiene hoy, tuvo su momento clave tras el impacto de un planeta de tamaño similar a Marte con el protoplaneta terrestre ocurrido entre hace 4530 y 4500 m.a. Los modelos más fiables sobre el *Gran Impacto* predicen que los materiales de los dos planetas se mezclarían, sus

Fig. 6: La temperatura alcanzada por algunos planetesimales hizo que se diferenciaron, originando un núcleo metálico y una corteza menos densa. En otros, la temperatura no permitió su diferenciación pero bastó para generar metamorfismo. En muchos más, los efectos de los impactos se aprecian en los cóndrulos. Fuente: Kring y The University of Arizona Space Imagery Center

densos núcleos metálicos permanecerían en lo que ya puede denominarse con propiedad planeta Tierra, y los materiales eyectados se condensarían para dar lugar a la Luna. Esto explicaría, de una parte, la diferencia de densidad existente entre la Tierra ( $5,5 \text{ g/cm}^3$ ) y la Luna ( $3,3 \text{ g/cm}^3$ ) y, de otra, que la composición isotópica del oxígeno que hay en las muestras de rocas lunares analizadas y las terrestres sea idéntica, dato que resulta tanto más relevante cuanto que esta composición isotópica es una variable que cambia considerablemente de unas zonas a otras del sistema solar (BERS, 2008). Mientras los materiales eyectados se condensaban para originar la Luna, buena parte del manto terrestre había quedado fundido, circunstancia que permitirá completar con rapidez, ahora sí, la formación del núcleo terrestre (Wood y Halliday, 2005).

## LA TIERRA SE HACE HABITABLE

¿Cuánto duró aquél océano de magma generado tras el *Gran Impacto* que originó la Luna? Tradicionalmente se ha considerado que la Tierra habría tardado unos 600-700 m.a. en disponer de una corteza externa sólida, debido a que el bombardeo meteorítico lo habría impedido. Ello explicaría la ausencia de rocas terrestres de más de 4000 m.a. de antigüedad. Este período se denominó Hadeano (en alusión al Hades) y así, con esa duración y características, figura aun en no pocos manuales universitarios.

En efecto, las rocas más antiguas descubiertas hasta el momento son unos gneises encontrados al noroeste de Canadá, en Acasta. Su edad es de 3960 m.a. Son unas rocas metamórficas formadas a gran profundidad y no nos dicen gran cosa de las condiciones reinantes en la superficie. Las rocas sedimentarias más antiguas se han hallado en Isua (al sur de Groenlandia), tienen 3850 m.a. y se depositaron en un fondo oceánico. La cuestión no sólo ofrece interés geológico sino que tiene gran relevancia biológica, ya que en estas rocas de Isua se han detectado los primeros indicios de vida (concentraciones anormalmente altas del isótopo ligero de carbono que se relacionan con la actividad vital). El dato es importante, de una parte porque si en las primeras rocas que por su génesis están en condiciones de registrar huellas de vida, las poseen, eso autoriza a pensar que en aquél momento la vida podría llevar bastante tiempo medrando en la Tierra. Y de otra porque, de haber existido el océano de magma durante 600 m.a. quedaría extraordinariamente reducido el tiempo disponible para la aparición de la vida en nuestro planeta.

Sin embargo, diversos hallazgos han venido a modificar sustancialmente la hipótesis del dominio del océano de magma durante todo el Hadeano. Los datos más fiables se han obtenido del análisis de pequeños cristales de circón ( $\text{Zr SiO}_4$ ). El circón es un mineral con algunas características especiales, la

primera de ellas es la de ser extraordinariamente resistente a diversos procesos geológicos, de manera que podría destruirse toda la roca madre en la que se generó y, sin embargo, quedar inalterado. Así, puede ser transportado y depositado, entrando a formar parte de una nueva roca mientras lleva en su seno el registro de su pasado. Otra característica de los circones es que contienen trazas de dos isótopos de uranio radiactivo ( $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ ) que se desintegran en otros tantos isótopos de plomo ( $^{207}\text{Pb}$  y  $^{206}\text{Pb}$ , respectivamente) a unas cadencias constantes conocidas. Esto permite utilizar de manera independiente dos relojes, el de la transformación  $^{235}\text{U}$  en  $^{207}\text{Pb}$  y el del  $^{238}\text{U}$  en  $^{206}\text{Pb}$ , circunstancia que los convierte en unos cronómetros perfectos. Nada hay que dé tanta seguridad a una conclusión científica como llegar a ella por más de un camino.

Así, en Jack Hills (Australia occidental) se ha encontrado un gran número de pequeños cristales de circón formando parte de unos conglomerados. Los circones, originados mucho antes, se depositaron junto con el resto de materiales que componen los conglomerados. Los más antiguos de estos circones tienen 4400 m.a. (Valley, 2005) y son los materiales terrestres de mayor edad conocidos.

Una tercera característica poseen los circones que los convierte en verdaderos tesoros, el oxígeno forma parte esencial de su estructura y, como cabe esperar, el isótopo más abundante es el  $^{16}\text{O}$  pero también tiene  $^{18}\text{O}$ . Se trata de dos isótopos estables, por tanto no sufren desintegración radiactiva y sus proporciones no cambian espontáneamente con el tiempo. La relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  es un buen medidor de la temperatura, y el valor que alcanza en los circones de Jack Hills sólo parece compatible con un ambiente relativamente frío, rico en agua y cercano a la superficie, lo que apoyaría la tesis de que hubo agua líquida en la Tierra hace 4400 m.a. (Valley, 2005). De confirmarse estos datos, el tiempo disponible para la aparición de la vida se incrementaría notablemente. Con todo, que existieran en esa fecha océanos no significa, necesariamente, que fuesen estables. El bombardeo meteorítico lo habría dificultado.

¿Cuál sería el origen de esta agua? Tradicionalmente, la respuesta ha sido que, como la protoatmósfera, procedería de la desgasificación del planeta. A fin de cuentas, las condritas contienen un porcentaje de agua suficiente para llenar varias veces los océanos actuales. Sin embargo, el vapor de agua liberado cuando la superficie terrestre estaba a temperatura muy alta habría ascendido en la atmósfera lo suficiente como para que las radiaciones ultravioleta rompieran su molécula y el hidrógeno escapase al espacio, de manera que aquella agua se habría perdido (Anguita, 2002). Por otra parte, la mayoría de los volátiles habrían escapado tras el Gran Impacto que dio origen a la Luna. Un nuevo dato hizo que se apuntase en otra dirección: hace 3900 m.a. la Luna sufrió un intenso bombardeo que

causó la formación de los *maria*, se ha denominado *Gran Bombardeo Terminal*, pero para esa época los planetas deberían tener ya suficientemente limpias sus órbitas de planetesimales, ¿cómo explicar, entonces, este tardío bombardeo? Podrían ser objetos del cinturón de asteroides, aunque no parece fácil justificar esta repentina actividad dispersora.

Más explicable resultaría una lluvia de cometas similar a la que se está produciendo en la actualidad hacia la estrella Beta Pictoris. De haber ocurrido algo similar en el sistema solar habría afectado a la Luna y con más motivo también a la Tierra, ya que sería difícil justificar que nuestro planeta, con un campo gravitatorio mayor, se hubiese librado. Los cometas son objetos del cinturón transneptuniano, *Cinturón de Kuiper*, o de la más lejana aún Nube de Oort. Como los asteroides del Cinturón Principal, son testigos de la formación del sistema solar pero con la tecnología actual sólo resultan observables cuando alguna perturbación gravitatoria les hace cambiar su órbita habitual y adoptan otra, más elíptica, con un tramo cercano al Sol. Dado que los cometas están compuestos básicamente por hielo de agua, amoníaco y metano con pequeñas cantidades de silicatos poco procesados (por eso suelen denominarse “bolas de hielo sucio”) constituyen una excelente fuente para el suministro de agua.

No obstante, el asunto ha vuelto a complicarse. El análisis de cometas como el Halley, el Hale-Bopp o el Hyakutake ha mostrado que su agua contiene un porcentaje de deuterio (el isótopo pesado de hidrógeno) dos veces mayor que el agua terrestre (Brahic, 2006). Por otra parte, como señalan Alibert *et al.*, (2010), la presencia de planetas gigantes como Saturno y sobre todo Júpiter reducen notablemente las posibilidades de que la Tierra sufriera un bombardeo masivo de cometas.

Existe, finalmente, un tercer candidato cuya ventaja consiste en que no necesita superar la “barrera” de los planetas gigantes para impactar en la Tierra. Está integrado por asteroides que se sitúan en la zona más externa del Cinturón Principal. En esta zona, situada entre 2,5 y 4,5 unidades astronómicas hay un tipo de condritas, las condritas carbonáceas, que tiene abundante materia orgánica, incluso aminoácidos, y un contenido en agua muy superior al de los asteroides más cercanos a la Tierra. Agua que, por otra parte, tiene un porcentaje de deuterio similar al de nuestros océanos (Alibert *et al.*, 2010). Se han descubierto también en esta zona externa del Cinturón Principal cuerpos con una composición intermedia entre condritas y cometas, son objetos rocosos con un alto contenido en hielo. El más conocido de estos objetos de transición asteroide-cometa es *133P/Elst-Pizarro* (Hesieh *et al.*, 2004). El alto contenido en agua de estos candidatos los convierte en una buena fuente de nuestros océanos.

En definitiva, aunque la cuestión sigue sin estar resuelta, un origen mixto de los océanos (desgasi-

ficación, condritas carbonáceas más objetos transicionales y cometas) puede que sea lo que mejor se ajuste a los datos disponibles. En todo caso, quizá convenga apuntar que para algunos investigadores, como Albarède (2009), el bombardeo de objetos ricos en volátiles no sólo fue fundamental para la formación de los océanos y la creación en nuestro planeta de unas condiciones que lo hicieron habitable, sino también para proporcionar a la Tierra el agua que parece desempeñar un papel clave en la tectónica de placas.

En cuanto a la atmósfera, las dudas y certezas son de naturaleza parcialmente distinta. La atmósfera actual es secundaria y su composición, muy modificada por la interacción con los seres vivos, es claramente diferente a la que debió existir hace 4000 m.a. (protoatmósfera), pero también aquella era una atmósfera secundaria. En efecto, mientras que las atmósferas de los planetas gigantes (formadas mayoritariamente por hidrógeno y helio) son las que se generaron con el gas dominante en la nube protosolar, no ocurre lo mismo con las que se formaron en la Tierra o en Venus. El hidrógeno y el helio que pudiera tener la prototierra habrían sido expulsados por el viento solar hacia lugares más alejados y fríos del sistema y, en cualquier caso, si algo hubiese quedado se habría disipado tras el impacto que originó la Luna, ya que incluso gases nobles pesados como neón y kriptón abandonaron aquella atmósfera. Fue necesaria la creación de un campo magnético que desviase las partículas cargadas del viento solar para que los gases pudieran permanecer en la envuelta terrestre.

Si la atmósfera prebiótica terrestre se formó en buena medida por la desgaseificación del interior terrestre (más las aportaciones de volátiles que realizasen los objetos impactores), un referente obligado sobre su composición serán las emanaciones volcánicas actuales. En ellas los gases dominantes son vapor de agua y dióxido de carbono, además contienen dióxido de azufre, monóxido de carbono, cloruro de hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. El otro referente obligado debe ser el de las atmósferas de los planetas rocosos. Las diferencias entre la atmósfera de Venus y la de Marte tienen más que ver con su densidad que con su composición cualitativa, que son muy similares: el CO<sub>2</sub> supone algo más del 95%, el N<sub>2</sub> está en torno al 3%, le sigue el Argón, mientras que los demás componentes (O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>...) son minoritarios. No hay duda de que el oxígeno molecular, que hoy representa el 21% de nuestra atmósfera, es una aportación biológica, si bien en los primeros tiempos la fotólisis del agua producida por las radiaciones ultravioleta proporcionaría oxígeno. Tampoco la hay acerca de que la casi totalidad del CO<sub>2</sub> de la protoatmósfera terrestre se encuentra petrificada integrando las rocas carbonatadas. Tan es así que si se liberase este CO<sub>2</sub> nuestra atmósfera alcanzaría una presión 50-70 veces superior a la actual (similar a la de

Venus). También parece claro que a los gases de las emanaciones volcánicas debieron sumarse los aportados por la lluvia de asteroides y cometas. Sería, en definitiva, una atmósfera constituida mayoritariamente por dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua (para más detalle ver en este monográfico el artículo de Mediavilla, 2010).

En síntesis, tras la acreción planetesimal una serie de procesos debieron producirse para que la Tierra se convirtiera en un planeta habitable: diferenciación por densidades con la formación de un núcleo metálico, una corteza y una protoatmósfera, desarrollo de un campo magnético, formación de océanos y bombardeo de objetos ricos en volátiles. Probablemente hace 4.400-4.300 m.a. la Tierra reunía las condiciones para que la química prebiótica fuese posible, lo que no significa necesariamente que la vida estuviese presente en una fase tan temprana de la historia de la Tierra.

## ALGUNAS SUGERENCIAS PARA EL AULA

A pesar de su indudable interés, el origen de la Tierra no recibe la atención que se merece en la educación secundaria, tampoco en la universitaria. Esta desatención puede que se deba a que se considera un terreno lleno de interrogantes por el que resulta difícil moverse con seguridad. Es, sin embargo, una situación que ofrece un indudable interés formativo desde diversas perspectivas. Así:

### **Proporciona excelentes ocasiones para favorecer un aprendizaje de la naturaleza de la ciencia.**

Diversos estudios han evidenciado las ideas deformadas que no pocos titulados universitarios tienen acerca de la naturaleza de la ciencia (Lederman, 1999; Akerson *et al.*, 2000; Fernández *et al.*, 2002). De manera que sus ideas sobre cuestiones tan importantes como diferenciar la ciencia de lo que no lo es, o saber cómo se construye la ciencia, están plagadas de visiones dogmáticas y desajustadas adquiridas durante su preparación universitaria que son transmitidas posteriormente al alumnado de educación secundaria. El tratamiento de la génesis planetaria no sólo permite acercarse al conocimiento que hoy se tiene sobre una cuestión tan relevante sino que proporciona buenas oportunidades para conocer qué son las teorías, cómo se construyen y sustituyen unas por otras, qué diferencias hay entre una teoría y una hipótesis, qué papel desempeña la hipótesis, la observación, la experimentación o la imaginación en la construcción del conocimiento científico. Igualmente, puede ayudar a entender que un conocimiento científico no es necesariamente cierto pero que tiene que estar fundado; o que la contrastación no siempre es empírica sino que en muchas ocasiones debe basarse en la observación.

El tratamiento de la génesis planetaria permite, además, mostrar qué son los modelos, por qué se recurre a ellos, cuáles son sus limitaciones y virtudes. Todas estas cuestiones son tan importantes como poco tratadas y, aunque pueden ser planteadas en relación con el análisis de cualquier tópico científico, un tema como el que nos ocupa proporciona situaciones que no sólo lo permiten sino que casi exigen abordar este conocimiento acerca de la naturaleza de la ciencia.

### **Ofrece cuestiones interesantes para debatir y argumentar.**

Debatir supone contrastar ideas, confrontarlas, y es un tipo de actividad que está en la esencia misma de la ciencia. Implica argumentar basándose en datos, en evidencias, en experiencias o en otros conocimientos fundados (en Jiménez Aleixandre, 2010, puede encontrarse abundante información y propuestas al respecto). Un debate interesante requiere que lo sea la cuestión que se aborda pero también que no haya una sola respuesta correcta, que obligue a buscar argumentos, a relacionarlos, a compararlos. Son características que reúnen cuestiones como: ¿Cuál es el origen del agua terrestre? ¿Tuvo Marte océanos?, ¿y Venus? ¿Cuánto duró el océano de magma terrestre? ¿Pudo la Tierra haber seguido una evolución similar a la de Marte o a la de Venus? ¿Es consistente la propuesta del Gran Impacto como origen de la Luna?, ¿lo es con los principales cambios en la Tierra joven?

### **Ayuda a aprender geología**

La geología planetaria y el análisis comparativo de la geología terrestre y la de otros objetos celestes proporciona buenas ocasiones para poner a prueba el conocimiento geológico que se posee, para valorar si es generalizable o no y, en cualquier caso, para enriquecerlo. Esta revista dedicó monográficamente su volumen 11.3 a las ciencias planetarias (Anguita, 2003) y en él pueden encontrarse actividades y sugerencias de gran interés. A ellas remitimos.

## BIBLIOGRAFÍA

Akerson, L., Abd-El-Khalick, F. y Lederman, N.G. (2000). Influence of a Reflective Explicit Activity-Based Approach on Elementary Teachers' Conceptions of Nature of Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(4), 295-317.

Albarède, F. (2009). Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature*, 461, 1227-1233.

Alibert, Y.; Broeg, C.; Benz, W.; Wuchterl, G.; Gasset, O.; Sotin, C.; Eiroa, C.; Henning, T.; Herbst, T.; Kaltenegger, L.; Léger, A.; Liseau, R.; Lammer, H.; Beichman, Ch.; Danchi, W.; Fridlund, M.; Lunine, J.; Paresce, F.; Penny, A.; Quirrenbach, A.; Röttgering, H.; Selsis, F.; Schneider, J.; Stam, D.; Tinetti, G. y White, G. (2010). Origin and Formation of Planetary Systems. *Astrobiology*, 10(1), pp. 19-32. Consultado (24/02/2010) en: <http://www.liebertonline.com/doi/pdf/10.1089/ast.2009.0372>

- Anguita, F. (2002). *Biografía de la Tierra*. Ed. Aguilar. Madrid.
- Anguita, F. (Coord) (2003). Ciencias planetarias. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 11.3, pp. 157-235.
- Baker, J.; Bizzarro, M. Wittig, N.; Connelly, J. y Haack, H. (2004). Early planetesimal melting from an age of 45662 Gyr for differentiated meteorites. *Nature*, 436, pp. 1127-1131.
- Board on Earth Sciences and Resources (BESR) (2008). *Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet*. The National Academies Press. Washington, D.C. Consultado (14/02/2010) en: [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12161](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12161)
- Brahic, A. (2006). *La Terre, planete du système solaire*. (En Brahic, A.; Hoffert, M.; Maury, R.; Schaaf, A. y Tardy. M.: *Sciences de la Terre et de l'univers*. Vuibert. París).
- Caballero, J.A. (2003). Exoplanetas: la promesa de una planetología comparada. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 11.3, pp. 187-193.
- Castilla, G. y de Pablo, M.A. (2003). De puntos en el cielo a paisajes exóticos: el origen de las ciencias planetarias. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 11.3, pp. 163-169.
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20.3, 477-488.
- Gribbin, J. (2007). *Biografía del universo*. Crítica. Madrid.
- Halliday, A.N. (2006). The origin of the Earth. What's new? *Elements*, 2, 205-210.
- Hsieh, H.; Jewitt, D. y Fernández, Y. (2004). The strange case of 133P/ELS Pizarro: a comet among the Asteroids. *The Astronomical Journal*, 127, pp. 2997-3017. Consultado (10/04/2010) en: <http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/papers/2004/HJF2004.pdf>
- Jiménez Aleixandre, M.P. (2010). *Competencias en argumentación y uso de pruebas*. Graó. Barcelona.
- Laughlin, G. (2007). Sistemas planetarios extrasolares. *Investigación y Ciencia*, enero, 2007, pp. 78-87.
- Lederman, N.G. (1999). Teachers' understanding of the nature of science: Factors that facilitate or impide the relationship. *Journal of Research in Science Teaching*, 36. 8, pp. 916-929.
- Lin, D. N. C. (2008). La génesis de los planetas. *Investigación y Ciencia*, julio, 2008, pp. 14- 23.
- Machetel P. (2008). *Les pulsations de la Terre*. Société Géologique de France. Vuibert. París.
- Rubin, A.E. (2005). Qué calentó los asteroides. *Investigación y Ciencia*, julio, 2005, pp. 67-73.
- Schneider, J. (2010). *L'Encyclopédie des Planètes Extrasolaires*. CNRS/LUTH - Observatorio de París. Consultado (14/04/2010) en: <http://exoplanet.eu/index.php>.
- Valley, J. W. (2005). Una Tierra primigenia fría. *Investigación y Ciencia*, diciembre, 2005, pp. 23- 29.
- Wood, B. y Halliday, A. (2005). Cooling of the Earth and Core formation after the giant impact. *Nature*, 437, pp. 1345-1348.
- Zwaer, S. P. (2010). Las hermanas del Sol. *Investigación y ciencia*, enero, pp. 13-19. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de diciembre de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 5 de mayo de 2010.*