

LA EDAD DE LA TIERRA, LOS METEORITOS Y LA LUNA

Primero debemos estar de acuerdo en qué queremos decir por "edad de la Tierra". La Tierra, desde luego, no apareció de pronto sino que fue el resultado de un largo proceso del cual se desconocen los detalles y que no sólo dio origen a nuestro planeta sino también a los otros cuerpos del Sistema Solar. Es importante notar que la generación de nuestro sistema planetario comenzó por la síntesis misma de los elementos que se observan en su constitución. En efecto, en nuestro planeta, por ejemplo, observamos que existen elementos muy pesados como el uranio, que es además radiactivo. Entonces, debió existir un evento durante el cual, a partir de átomos livianos, se formaron átomos más pesados.

Este evento debió ocurrir en algún "momento", pues de lo contrario no existirían en el Sistema Solar elementos radiactivos como el uranio: todo el uranio habría decaído en plomo. El tiempo transcurrido entre aquel momento y el presente puede ser determinado puesto que en el Sistema Solar aún existe uranio sin decaer. Esta edad es la llamada edad de la nucleosíntesis o edad de los elementos.

Luego de complicados procesos aún no bien entendidos, nuestro planeta se aisló del resto del Sistema Solar y se convirtió en un cuerpo cerrado. A través de tiempos muy largos adquirió una diferenciación interna y no fue sino mucho después que aparecieron las primeras rocas.

Conociendo la edad de las rocas más antiguas podemos entonces estimar la edad en que la Tierra era ya un planeta con una corteza formada. El siguiente cuadro nos da la edad y procedencia de algunas de las rocas más antiguas que se han encontrado y nos indica la forma en que fueron determinadas sus edades:

CUADRO 1. Edad de algunas de las rocas y minerales más antiguos de la Tierra

Lugar de origen	Método	Muestra	<i>Edad</i> (en millones de años)
Península de Kola, URSS	K-Ar	Mica biotita	3.46
Ucrania, URSS	K-Ar	Biotita	3.05
Swazilandia, Sudáfrica	Rb-Sr	Roca completa	3.07
Transvaal, Sudáfrica	Rb-Sr	Roca completa	3.20
Congo	Rb-Sr	Microclina	3.52
Minnesota, EUA	U-Pb	Zircón	3.30
Montana, EUA	U-Pb	Zircón	3.10
Groelandia	Rb-Sr	Roca completa	3.98
Groelandia	Pb-206/Pb-207	Roca completa	3.62

Table 1.

De manera que la edad de nuestro planeta, a juzgar por las rocas más antiguas, es de al menos unos 4 000 millones de años.

Esta cantidad representa un límite inferior de la edad de la Tierra; sin embargo una estimación más exacta nos es proporcionada por los isótopos del plomo. En efecto, el material sideral de que se formó el planeta tenía una composición que incluía átomos pesados de plomo y uranio. La composición isotópica original del plomo en la Tierra era diferente de la actual puesto que se han ido añadiendo, con el tiempo, átomos de plomo que provienen del decaimiento radiactivo del uranio y el torio. Este hecho fundamental fue utilizado para obtener la edad de la Tierra desde que ésta se convirtió en un sistema cerrado.

En 1946 A. Holmes y F. G. Houterman, trabajando independientemente, obtuvieron una estimación de esta edad siguiendo un método basado en las edades de los minerales ricos en plomo; pero no fue sino hasta 1955, cuando Claire C. Patterson determinó la edad de los meteoritos, que pudo a su vez obtenerse una edad más precisa para la Tierra. Veamos cuál fue el procedimiento.

Si recordamos las ecuaciones de los relojes de plomo antes mencionados y dividimos la primera ecuación entre la segunda, obtendremos una ecuación en la que hemos asignado el valor $t = 0$ para el tiempo en que la Tierra se convierte en un sistema cerrado:

$$\left[\frac{\text{Pb} - 207}{\text{Pb} - 206} \right]^* = \frac{1}{137.8} \frac{(e^{\lambda_2 t} - 1)}{(e^{\lambda_1 t} - 1)}$$

Consideramos ahora que t es el tiempo transcurrido desde que se formaron los cuerpos celestes de donde provienen los meteoritos y de los cuales es razonable pensar que se formaron al mismo tiempo que la Tierra. Estos cuerpos sufrieron una evolución geoquímica durante la cual se separó una fase de sulfuro de hierro conocida como troilita, que tiene cantidades apreciables de plomo pero prácticamente nada de uranio o torio. En otras palabras, es el plomo menos radiogénico que se conoce y el mejor representante del plomo original. Si utilizamos las concentraciones de plomo en troilita como el plomo original, es decir, como los cocientes $(\text{Pb}-206/\text{Pb}-204)_o$ y $(\text{Pb}-207/\text{Pb}-204)_o$, y determinamos asimismo las razones $(\text{Pb}-207/\text{Pb}-204)_t$ y $(\text{Pb}-206/\text{Pb}-204)_t$ en otras fases de los meteoritos, tendremos que la ecuación anterior es una ecuación del tipo:

$$\frac{y - a_0}{x - b_0} = m$$

que es la ecuación de una recta que pasa por a_0 y b_0 (las cantidades originales de los cocientes de plomo) y tiene una pendiente:

$$m = \frac{1}{137.8} \frac{(e^{\lambda_2 t} - 1)}{(e^{\lambda_1 t} - 1)}$$

Los valores obtenidos en cinco meteoritos, al ser graficados, se ajustaron extraordinariamente bien a una línea recta justificando ampliamente las suposiciones hechas al principio (Figura 10).

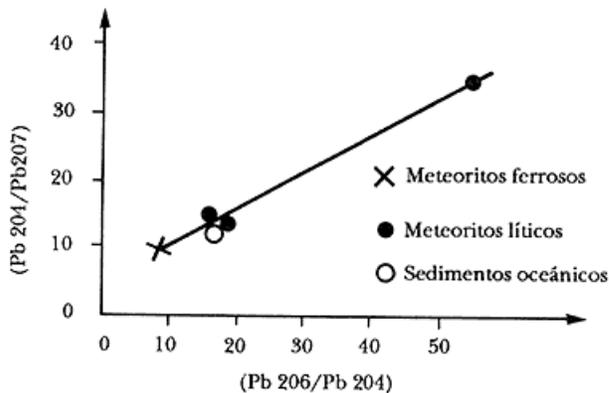


Figura 10. Isócrona de plomo para varios tipos de meteoritos y sedimentos terrestres.

La pendiente de la recta arrojó un valor de $4.55 \pm 0.07 \times 10^9$ años. Análisis posteriores dan resultados que varían sólo en unos 50 millones de años, de manera que en una primera aproximación puede decirse que los meteoritos tienen una edad aproximada de 4 600 millones de años.

Pero la importancia de estos resultados se puso en evidencia en 1956, cuando Patterson publicó sus resultados sobre la composición isotópica del plomo en sedimentos oceánicos. Este material constituye la muestra más representativa del plomo terrestre por el alto grado de mezcla a que ha sido sometido. Los datos obtenidos por Patterson (y confirmados sistemáticamente desde entonces) caen dentro de la recta ajustada para los meteoritos. Esto demuestra sin lugar a dudas que la edad de la Tierra es la misma de los meteoritos, es decir, de unos 4 600 millones de años, e indica asimismo que el plomo de la troilita contenida en algunos meteoritos es una buena aproximación de la composición original del plomo.

Este último hecho permite la estimación de edades por medio de la determinación del plomo común y hace posible el estudio de la evolución de la Tierra.

Hemos dado un gran rodeo para contestar nuestra pregunta inicial; sin embargo, podemos ahora no sólo responderla sino también conocer la metodología que permite obtener los valores señalados. Podemos concluir esta sección con el siguiente cuadro que nos resume lo discutido hasta este punto:

CUADRO 3. Edad de la Tierra

Método	Edad en millones de años
Salinidad del océano	100
Razones de sedimentación	80 - 120
Enfriamiento de la tierra	20 - 100
Roca más antigua	3 980
Plomo en minerales terrestres	4 600
Plomo en meteoritos	4 600

EDAD DE LA LUNA

A partir del primer viaje a la Luna se pudieron obtener muestras de rocas lunares. Uno de los estudios que despertó mayor interés fue la determinación de su composición petrológica y su edad. Los resultados que estos estudios han dado han contribuido grandemente a entender el origen tanto de la Luna como del Sistema Solar. El siguiente cuadro, que comentaremos en seguida, nos presenta resultados típicos de algunas rocas lunares:

CUADRO 4. Edad de algunas rocas lunares

Material	Edad (miles de millones de años)	Método
Polvo lunar	4.6*	Rb/Sr
Rocas cristalinas		U/Pb, Pb/Pb
Basaltos (Apolo 11, Mar de la tranquilidad)	3.76*	Rb/Sr
Basaltos (Apolo 12, Mar de las tormentas)	4.6*	Rb/Sr
Granitos (Apolo 12)	4.52*	Rb/Sr

* Las edades están referidas a BABI.

Estos resultados son típicos, como hemos dicho, pues se refieren a muestras de las diferentes regiones en que descendieron las misiones Apolo 11 a 17 y fueron analizadas en diferentes laboratorios. Los resultados son consistentes y han permitido entender la evolución lunar.

Con referencia al cuadro anterior, notaremos que el polvo lunar que ha sufrido un amplio mezclado tiene una edad igual a la terrestre. La misma edad tienen las rocas, excepto algunas que debieron cristalizar más tardíamente. Como mencionamos anteriormente, las isócronas de roca completa se obtuvieron del análisis de muestras completas de roca. Las isócronas internas se refieren a edades de conjuntos de minerales. Como vimos en la sección del reloj de rubidio-estroncio, para poder ajustar nuestros datos a una recta es necesario contar con el valor inicial de la razón Sr-87/Sr-86. Siguiendo un razonamiento similar al discutido con los isótopos de plomo, se ha determinado esta razón en ciertos meteoritos de tipo lítico conocidos como acondritas. Estos meteoritos poseen las razones más bajas de Rb/Sr y representan por lo tanto las mejores estimaciones de las razones Sr-87/Sr-86 existentes en el origen de nuestro Sistema Solar. Un valor de esta razón fue obtenido por D.A. Papanastassiou y G. J. Wasserburg del análisis de siete acondritas basálticas. Tal valor es:

$$\left(\frac{\text{Sr}-87}{\text{Sr}-86}\right) = 0.69897 \pm 0.00003$$

y es llamado BABI por su nombre en inglés: Basaltic Achondrite Best Initial, que traducido con cierta libertad quiere decir: mejor valor inicial en acondritas basálticas (Figura 11). Existen valores estimados de otros meteoritos pero no difieren marcadamente del anterior (por ejemplo, el obtenido del meteorito acondrita de Agra Dos Reis, Brasil, conocido como ADOR, tiene un valor de 0.6988 ± 0.00004).

En la Luna no se han encontrado rocas de menos de 3 100 millones de años de edad, edad a la que probablemente terminó el vulcanismo lunar que creó esas rocas.

Por lo que respecta al plomo en las rocas lunares, las edades son concordantes, pero los valores de las razones de Pb-207/Pb-204, Pb-206/Pb-204 y U-238/Pb-204 son mucho más altas que en la Tierra, de donde se deduce que el plomo lunar es extremadamente radiogénico.

Podemos concluir esta sección resumiendo que la Tierra, la Luna, los meteoritos y casi seguramente todos los cuerpos del Sistema Solar tienen la misma edad: unos 4 600 millones de años.

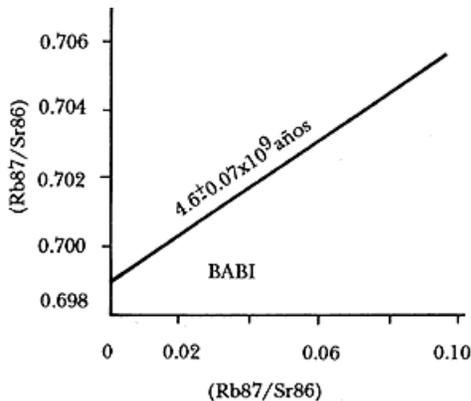


Figura 11. Isócrona de rubidio-estroncio para varios meteoritos cuya intersección con las abscisas nos muestra una estimación del valor original de la razón de rubidio-87 a estroncio-86.

EDAD DE LA NUCLEOSÍNTESIS

Como mencionábamos con anterioridad, la formación del Sistema Solar fue precedida por la formación de los elementos que lo componen. La edad de este evento es de más de 4 600 millones de años, pero qué tanto más?

Podemos hacer un cálculo aproximado considerando las abundancias naturales de uranio. Hemos visto que en el presente:

$$\left(\frac{U\ 238}{U\ 235}\right)_{\text{actual}} = 137.8$$

Podemos establecer un límite inferior si suponemos que:

$$\left(\frac{U\ 238}{U\ 235}\right)_{\text{inicial}} = 1$$

Esto significa que ambos isótopos se sintetizaron en la misma proporción. Esto probablemente es incorrecto puesto que se observa que los isótopos pares son más abundantes que los impares, y en $Z=33$ los isótopos pesados son más abundantes que los ligeros; sin embargo, a falta de una estimación confiable de la razón inicial y para establecer un límite inferior tomaremos el valor de ésta como la unidad.

De las ecuaciones de decaimiento del uranio tenemos que:

$$\left(\frac{U\ 238}{U\ 235}\right)_{\text{actual}} = \left(\frac{U\ 238}{U\ 235}\right)_{\text{inicial}} e^{\lambda_1 t - \lambda_2 t}$$

de donde se obtiene el valor del tiempo como:

$$t = 6 \times 10^9 \text{ años.}$$

Éste sería un límite inferior para la edad de la nucleosíntesis; sin embargo, el estudio de los meteoritos ha permitido nuevamente refinar nuestras estimaciones de esta edad.

Esto ha sido posible a través del estudio de los isótopos de xenón. El yodo 129 (I-129) es un isótopo inestable que decae en Xe-129 con una vida media de poco más de 16 millones de años. Ésta es una vida media muy corta y en el presente no pueden encontrarse trazas de yodo en los meteoritos; sin embargo, sí puede encontrarse un exceso de Xe, que probablemente proviene del decaimiento del yodo. El xenón es un gas noble, poco combinable, y el exceso que se menciona arriba se refiere a su diferencia con el xenón atmosférico actual. Dadas las mencionadas características del elemento, es razonable suponer que la composición atmosférica actual represente la composición isotópica primeval u original.

Supongamos que t_e es el tiempo en que estaba completa la nucleosíntesis y T el tiempo en que se consolidó la Tierra y los meteoritos. Podemos escribir el decaimiento del yodo así:

$$(I - 129)_T = (I - 129)_{t_e} e^{\lambda \Delta t}, \text{ donde } \Delta t = (t_e - T)$$

El yodo 127 es un elemento estable cuya abundancia es prácticamente constante y, por las razones que se mencionaron para el reloj de rubidioestroncio, nos permite escribir la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\left(\frac{I - 129}{I - 127}\right)_T = \left(\frac{I - 129}{I - 127}\right)_{t_e} e^{\lambda \Delta t}$$

Podemos ahora, con base en lo que se ha discutido, substituir $(I - 129)_T$ por $(Xe)_{\text{exceso}}$

Tendremos así:

$$\left(\frac{Xe - 129}{I - 127}\right)_T = \left(\frac{I - 129}{I - 127}\right)_{t_e} e^{\lambda \Delta t}$$

La razón $(I - 129/I - 127)_{t_e}$ ha sido calculada teóricamente y tiene un valor de 1250. La abundancia de I-127 y Xe se determina en meteoritos, de manera que la única incógnita en la ecuación anterior es t , que puede despejarse y nos arroja resultados para datos de diferentes meteoritos que oscilan entre 50 y 250 millones de años. Éste es el tiempo transcurrido entre el fin de la nucleosíntesis y la consolidación de la Tierra. Como podemos ver, es un tiempo muy corto, lo cual nos indica que nuestro planeta probablemente se consolidó como tal muy poco tiempo después de la formación de los elementos. Esta edad es desde luego menos confiable que la de la Tierra, pero es muy probable que el orden de magnitud sea correcto.

Teorías del origen del agua en la Tierra

En la actualidad se plantean dos teorías sobre el origen del agua en la Tierra: la teoría volcánica, y la teoría extraterrestre de los meteoritos transportadores de agua. Ambas teorías siguen discutiéndose por las escuelas de científicos que toman una u otra posición, aunque actualmente se ha visto que lo más razonable es aceptar ambas teorías ya que una complementa a la otra.

La teoría volcánica plantea que el agua se formó en el centro de la Tierra, por reacciones a altas temperaturas ($527\text{ }^{\circ}\text{C}$) entre átomos de hidrógeno y oxígeno. Las moléculas formadas por esta reacción fueron expelidas a la superficie terrestre en forma de vapor (por la temperatura a la que se encontraban); algo de este vapor de agua pasó a formar parte de la atmósfera primitiva (esta atmósfera primitiva carecía de oxígeno molecular), y otra parte se enfrió y condensó para formar el agua líquida y sólida de la superficie terrestre. Este proceso tomó millones de años, pero las evidencias experimentales que se tienen actualmente plantean que el agua está presente en la Tierra hace unos 3.800 millones de años.

La teoría más reciente atribuye el origen del agua a causas extraterrestres. Numerosos estudios realizados por la NASA apoyan los planteamientos de Tobias, Mojzsis y Scienceweek quienes afirman que el agua llegó a la Tierra en forma de hielo, en el interior de numerosos meteoritos, que al impactar sobre la superficie terrestre liberaron este compuesto y llenaron los océanos (o al menos parte de ellos).

Cuando esta teoría fue planteada recibió una gran cantidad de críticas y censuras, pero estudios referidos por Mojzsis hablan de otros impactos de meteoritos sobre la Tierra, a los cuales se atribuye el haber contribuido con concentraciones significativas de otros elementos y moléculas químicas a la "sopa" donde se originaron las macromoléculas orgánicas. Posteriormente, científicos de la NASA han comunicado algunos descubrimientos que constituyen la primera evidencia sólida para este suceso: análisis del cometa S4 LINEAR han mostrado una similitud muy grande entre la composición y estructura química de éste con el agua que actualmente existe en los océanos de la Tierra, así como estudios de presencia de deuterio (D), átomos de hidrógeno con un neutrón extra, característicos de este tipo de cometas, inclusive en las profundidades de los mares, siendo que el D_2O se encuentra en toda el agua independientemente del tipo de cuerpo de agua o la profundidad en una relación natural aproximada de 99,85% de H y 0.15% de D.

Si bien ambas teorías son muy distintas y tienen poco en común, ambas todavía dejan algunas dudas sobre su validez, ya que ninguna de ellas explica del todo el origen del agua en el planeta. La teoría volcánica habla de una hidrogénesis masiva en el centro de la Tierra, proceso que fue desarrollándose paralelamente a la formación de la atmósfera primitiva, por lo que una parte considerable del agua generada por las reacciones químicas tuvo que evaporarse hacia el espacio o reaccionar con otros compuestos de la atmósfera primitiva.

Por otro lado, si bien la presencia de hielo en algunos planetas, la luna y algunos cometas apoya la teoría extraterrestre, los niveles de xenón presentes en la atmósfera terrestre son diez veces mayores que los presentes en los cometas, aunque se debe considerar que esta variación puede estar influenciada por las condiciones de gravedad en la Tierra que son diferentes a las de los cometas, y que el xenón como gas noble no sufre reacciones químicas y no puede ser fijado como compuesto. En este caso la interpretación de la cantidad de xenón puede ser usada como prueba tanto para aceptar como para refutar la teoría extraterrestre, dependiendo de cómo se interpreten estos hallazgos.

Las consideraciones anteriores sugieren, según Tobias, que el agua en la Tierra no fue originada por una sola causa, sino que más bien debería pensarse en un hipotético origen mixto, ya que de esta manera se complementan ambas teorías bajo un postulado lógico y coherente. Parte del agua se originó en la Tierra por reacciones a elevadas temperaturas y erupciones volcánicas, y la otra parte provino de los cometas. Esta idea concuerda también con el planteamiento de que la atmósfera y los océanos se desarrollaron juntos. Sin embargo, tampoco existen pruebas contundentes para aceptar plenamente el origen mixto, y quedan abiertas las puertas al planteamiento de otras nuevas teorías.

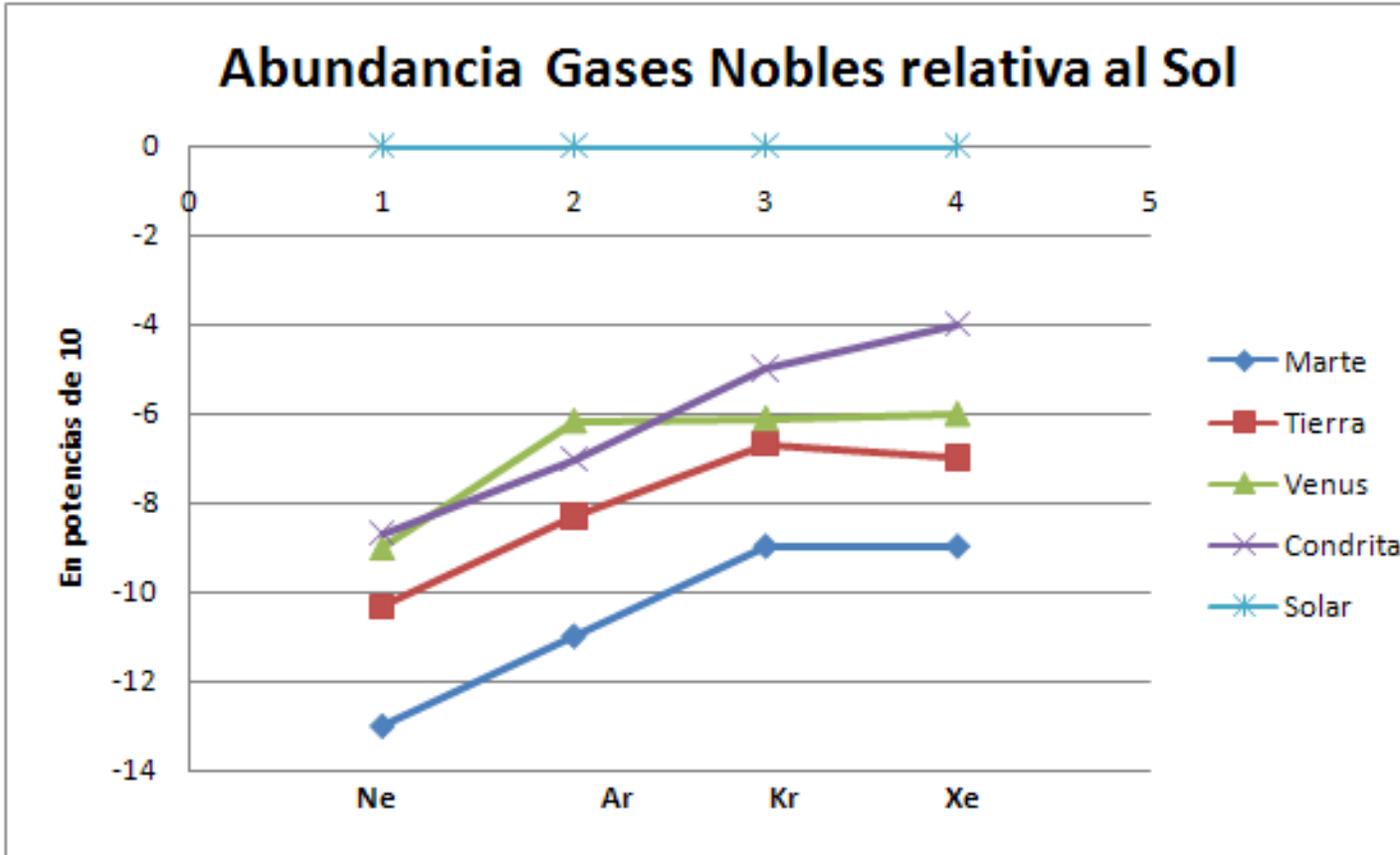
Agua en la Tierra viene de cometa?

Cuerpo	D/H
Tierra	1.5×10^{-4}
Cometa 1P/Halley	3.16×10^{-4}
Cometa Hyakutake	2.82×10^{-4}

Esta es una prueba en contra del origen cometario del agua en la Tierra

Agua en la Tierra viene de la Nébula Solar?

Es poco probable porque las concentraciones de gases raros como Ne, Ar, Kr y Xe era mucho mayor en la Nébula Solar que la concentración de los mismos gases en la Tierra.



Teorías sobre el Origen de la Luna:

1) Teoría de la Fisión:

Tomando en cuenta distintos datos y mediciones del pasado y que para mantener el momento angular del sistema Tierra-Luna, la Luna debería estar alejándose poco a poco, el matemático británico George H. Darwin (hijo de Charles, el gran naturalista que nos legó la gloriosa Teoría de la Selección Natural y la Evolución de las Especies) se lanzó al ruedo diciendo que tiempo atrás, unos 50 millones de años, la Tierra giraba sobre sí misma cada 5 horas, y la Luna estaba a sólo 10.000 kilómetros (actualmente, está a casi 400.000). Más allá de lo erróneo de las estimaciones de Darwin hijo, lo verdaderamente interesante eran sus conclusiones: como el satélite giraba a toda velocidad, razonaba, la fuerza centrífuga habría abultado nuestro planeta en el

ecuador, hasta que, tironeado también por la gravedad solar, parte de ese material protuberante se desgarró, se separó y se enfrió, formando un cuerpo independiente. Esta Teoría de la fisión, justificaba la liviandad de la Luna, dado que su materia prima habría sido, fundamentalmente, el manto externo de la Tierra, rocoso y menos denso que su corazón metálico.

Pero las dataciones de rocas realizadas a principios del siglo XX mostraron que nuestro planeta no tenía decenas de millones de años, sino probablemente miles de millones de años. Por lo tanto, hasta las más osadas y remotas estimaciones de la supuesta época de la fisión quedaban muy cerca en el tiempo, cuando la Tierra hace rato que ya debería haberse enfriado y solidificado. Ante estas graves falencias, comienza a asomar la cabeza un nuevo modelo: La Teoría de la Coacreción.

2) Teoría de la Cocreación:

Sus partidarios sostienen que la Luna había nacido en forma independiente, pero a partir de un disco de gases y escombros sólidos que rodeaban a la Tierra primitiva.

El principal punto débil de esta variante era que no justificaba las grandes diferencias estructurales entre la pesada Tierra y la liviana Luna: si ambas se habían gestado a la par, en la misma zona del Sistema Solar, sus materiales constitutivos deberían ser básicamente los mismos. Y sus densidades medias, en consecuencia, también. Y esto no es así.

3) Teoría de la captura:

Más o menos en la misma época, apareció una tercera variante para explicar el nacimiento de nuestro satélite: en 1909, el astrónomo Thomas J. J. See lanza la curiosa Teoría de la captura. Era una apuesta científica completamente distinta a las dos anteriores: según See, la Luna se había gestado en otra región del Sistema Solar, allá a lo lejos, en las frías zonas de Saturno, Urano, o quizá más lejos aún. Una vez forjada aquella Luna primitiva, razonaba See, fue achicando progresivamente su órbita, porque a medida que giraba en torno al Sol, inexorablemente, iba perdiendo energía gravitatoria ante la tenaz resistencia del mar de gases y escombros del Sistema Solar primitivo.

Punto en contra: las órbitas de las lunas capturadas son generalmente muy ovaladas, y suelen estar muy inclinadas respecto del plano orbital de sus planetas. La Luna, por el contrario, tiene una órbita elíptica

4) Teoría del Impacto Gigante:

Las cosas dieron un vuelco muy interesante a comienzos de los años 70: los cientos de kilos de rocas lunares traídas por las seis misiones Apolo, entre 1969 y 1972, echaron algo de luz al oscuro enigma lunar.

Entre otras cosas, los análisis químicos de esas preciosas piedras revelaron poco o nada de hierro, pero también una notable ausencia de agua unida a los minerales, y una baja cantidad de elementos volátiles en general (como potasio y plomo). Y eso parecía delatar que las rocas de la Luna habían soportado un calentamiento extremo. Como si se hubiesen forjado en un escenario violento e infernal. Estaban dadas las condiciones para el surgimiento de una nueva y más espectacular crónica de la génesis lunar. En 1974, los astrónomos William Hartmann y Donald Davis, del Instituto de Ciencias Planetarias de Tucson, propusieron la Teoría del Impacto Gigante. Durante los siguientes 500 o 600 millones de años, nuestro satélite vivió una infancia casi tan traumática como su nacimiento: un bombardeo continuo de meteoritos, cometas y asteroides. Y finalmente, colosales inundaciones de lava en su superficie: flujos de roca basáltica fundida, que brotaron desde su interior aún muy caliente colándose a través de las grandes y profundas fisuras, creadas en el manto exterior y la corteza por esos mismos impactos primigenios. Al enfriarse, esas masas calientes y viscosas formaron grandes llanuras, lisas y grises, que los primeros astrónomos que la observaron a través del telescopio bautizaron mares. De ahí en más, poco y nada ha cambiado en un mundo carente de atmósfera, agua y prácticamente todo tipo de agentes de erosión significativa (más allá de una poco dañina y constante lluvia de micrometeoritos). La Luna es un verdadero fósil astronómico: luce hoy prácticamente igual que hace casi 4000 millones de años.

