

El origen de la Tierra

The Origin of the Earth

JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS

Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM) Facultad de Ciencias Geológicas C/José Antonio Novais, 2, Ciudad Universitaria 28040 Madrid. E-mail: j.m.frias@igeo.ucm-csic.es

Resumen La Idea clave 2 se refiere específicamente al origen y la edad de nuestro planeta y se esquematiza, de manera conceptual, a través de un conjunto de ideas fundamentales que integran, con un enfoque multidisciplinar, diferentes aspectos relacionados con las ciencias de la Tierra y planetarias. De todos ellos, se ha destacado la importancia de los meteoritos y sus impactos, y se subraya cómo las nuevas perspectivas de investigación astrogeológica propician un mejor conocimiento y comprensión de la Tierra en el marco del Sistema Solar.

Palabras clave: Tierra, meteoritos, impactos, origen, astrogeología.

Abstract *Big Idea 2 is specifically focused on the origin and age of our planet. It is conceptually outlined through a set of fundamental ideas, which, by means of a multidisciplinary approach, integrate different subjects into the framework of the Earth and planetary sciences. Here the stress is on the relevance of the study of meteorites and their impacts. It can be seen how the new perspectives of astrogeological research foster a better knowledge and understanding of the Earth in the context of our solar system.*

Keywords: *The Earth, meteorites, impacts, origin, astrogeology.*

INTRODUCCIÓN

Varias disciplinas científicas fueron capaces, hace tiempo, de extrapolar sus ámbitos de actuación al espacio exterior. La astrofísica, la cosmoquímica o la misma ingeniería aeroespacial fueron la consecuencia conceptual de una necesidad científica y tecnológica. El simple resultado del avance del conocimiento, como un intento más de entender cómo se enmarcan nuestros modelos terrestres en un contexto más amplio. En la actualidad, muchas otras ciencias se están abriendo también hacia el Espacio como una rama más de su especialización y, por ello, en nuestro caso, hoy podemos afirmar que *“la geología planetaria o astrogeología es crucial en la proyección hacia el espacio de nuestras investigaciones más vanguardistas, pero también para comprender nuestros orígenes, el origen de la Tierra y el de la vida, en su relación con la astrobiología”* (ver, entre otros, Short, 1975; Guest, 1979; Francis, 1981; Glass, 1982; Hartman, 1983; Carr et al. 1984; Mark, 1987; Wilhelms, 1987; Attreya et al., 1989; Anguita, 1993; Greeley, 1994; Christiansen et al. 1995; Norton, 2002; Martínez Frías y Madero (2004); Faure y Mensing, 2007; Hutchison, 2007; Taylor y McLennan, 2010; Sears, 2011; Melosh, 2011; Vita-Finzi y Fortes, 2013). Los estudios geológicos relacionados con la exploración planetaria cubren numerosos aspectos y no pueden entenderse actualmente sin considerar su

carácter inter y transdisciplinar. En esta línea, la Idea clave 2 del documento “Alfabetización en ciencias de la Tierra” (ver en este volumen Pedrinaci et al, 2013) se refiere específicamente al origen de nuestro planeta y se fundamenta en que *“el origen de la Tierra va unido al del Sistema Solar y su larga historia está registrada en los materiales que la componen”*. En el documento NSF-ESLI (NSF-ESLI, 2010), esta afirmación se explica conceptualmente a través de siete epígrafes básicos que esencialmente: 1) sintetizan la conexión entre materiales y procesos terrestres y extraterrestres y 2) enfatizan la importancia de la geología planetaria o astrogeología (en concreto el papel de los meteoritos) para establecer las características y evolución de nuestro planeta.

Todo ello está muy bien reflejado, y de manera didáctica, en el video desarrollado por la NSF-ESLI: http://www.youtube.com/watch?v=2bOma_5v88I

La idea clave 2 desarrolla los ocho epígrafes siguientes:

- Las rocas y otros materiales terrestres proporcionan un registro de la historia de la Tierra;
- el Sistema Solar se originó a partir de una inmensa nube de gas y polvo;
- la Tierra se formó hace unos 4600 millones de años por múltiples colisiones de cuerpos planetarios más pequeños;

- la Tierra es uno de los planetas pequeños, densos y rocosos del Sistema Solar;
- en la primera etapa de evolución de la Tierra tuvo lugar su diferenciación y su estructuración en capas;
- los rasgos de la corteza terrestre son el resultado de la evolución geológica de la Tierra;
- el conocimiento del pasado terrestre ayuda a entender el presente y permite hacer predicciones fundadas acerca del futuro y
- la escala de tiempo geológico constituye el marco temporal en el que se ubica la evolución histórica de la Tierra.

DE LA MATERIA PRIMIGENIA AL ORIGEN DE LA TIERRA

Nos tenemos que remontar muy atrás, a casi el pasado remoto de la humanidad, para encontrar las primeras referencias sobre los materiales que caen del espacio a nuestro planeta, aunque como veremos más adelante esta concepción sobre su origen extraterrestre no fue aceptada científicamente hasta mucho después. Los fenómenos cósmicos relacionados con meteoritos, bólidos y cometas tuvieron que despertar en el ser humano los miedos más terribles, pero también encender esa pequeña luz de la curiosidad, algo que nos hizo mirar hacia arriba con temor ante lo grandioso que nos rodea, añadiendo esa dosis casi inevitable de interés innato hacia lo desconocido que nos ha movido, desde que éramos tan solo pequeños microorganismos, a explorar nuestro entorno. Considerando la relevancia de todas estas ideas previas —basadas más en los mitos primitivos, leyendas y textos religiosos que en la ciencia en sí—, existe un acuerdo más o menos unánime que acepta que el descubrimiento “propriadamente científico” del Sistema Solar como marco de referencia en el que se desarrollan los procesos cósmicos pertenece al Renacimiento. Es a partir de este momento cuando los filósofos decidieron admitir y utilizar en ciencia la observación y la lógica más que la tradición en sí misma. El “*cogito ergo sum*” de Descartes simboliza esta actitud, aunque la aceptación de un sistema centrado en el Sol llevó, como es bien sabido, varios cientos de años. ¿Cómo era la materia primigenia a partir de la cual se formó la Tierra y de la que procedemos nosotros mismos? ¿Qué nos aporta la geología planetaria? Como es bien conocido, las rocas y otros materiales terrestres nos proporcionan un registro

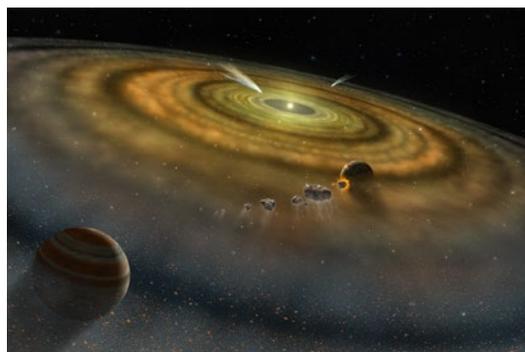


Fig. 1. Imagen artística representando la nebulosa solar primitiva y el proceso de formación planetaria por acreción de planetesimales. Fuente: NASA.

de la historia de la Tierra (aunque como veremos más adelante, no todo está en ellos). De acuerdo con la NSF-ESLI (2010), este concepto inicial se puede resumir en tres párrafos principales:

- a) la geología y otras ciencias afines estudian la estructura y composición de los materiales terrestres y de los meteoritos para tratar de establecer la evolución de la Tierra a lo largo de su historia;
- b) la secuencia temporal de eventos y materiales terrestres se realiza aplicando principios sencillos y fundamentales en geología y
- c) la datación absoluta de minerales y rocas se basa en la geoquímica de radioisótopos y permite conocer la edad de procesos que ocurrieron en el pasado.

Este trinomio es el punto de partida a partir del cual se estructura la presente contribución, incorporando los conceptos contenidos en los ocho epígrafes básicos descritos previamente y relativos a la Idea clave 2.

Planetesimales, meteoritos y la Tierra primitiva

De acuerdo con la teoría más aceptada, el Sistema Solar se formó por el colapso gravitatorio de una nube interestelar constituida por gases y partículas de polvo, que probablemente eran restos de cuerpos estelares preexistentes. La condensación de la mayor parte de estos constituyentes originó el Sol y en torno a él se formó un disco protoplanetario del que surgieron los planetas y demás cuerpos del Sistema Solar (Fig. 1). Esta evolución vendría definida por una serie de episodios que comenzaron hace unos 4.600 Ma, cuya caracterización es fundamental para entender los distintos tipos de materia extraterrestre conocida y que llega a nuestro planeta (ver, entre otros, Cameron y Truran, 1977; Lin y Papalouziou, 1980; Grammie, 1996; Gordon y Livio, 2000; Alves et al. 2001; Cassen, 2001; Boss, 2003; Boss y Gosswami, 2004; Jin y Siu, 2010):

- Una nube de gas y/o polvo interestelar (la nebulosa solar) sufre perturbaciones (por ej., debidas a las ondas de choque de una supernova cercana) y colapsa bajo su propia gravedad.
- Según colapsa se calienta y comprime en su zona central. El calor es suficiente para que el polvo sufra vaporización. Se supone que el colapso inicial es un proceso rápido (< 100 000 años).
- El centro se comprime lo suficiente para convertirse en una protoestrella y el resto del polvo/gas orbita y fluye a su alrededor. La mayor parte del gas se supone que fluye hacia el interior y se añade a la estrella en formación, aunque el gas está rotando. La fuerza centrífuga contribuye a que se genere un disco de acreción alrededor de la estrella. El disco lanza su energía hacia el exterior del conjunto y se va enfriando progresivamente.
- El gas se enfría lo suficiente para que los metales, rocas y hielo se condensen fuera como pequeñas partículas (de acuerdo con datos radiométricos esto tuvo lugar hace unos 4,4-4,6 Ga).
- Las partículas de polvo colisionan entre sí y van formando otras mayores hasta la generación de cuerpos del tipo de pequeños asteroides.

- Una vez que estos cuerpos son suficientemente grandes para alcanzar el punto de gravedad no trivial, su crecimiento se acelera y su tamaño dependerá de múltiples factores: distancia a la estrella, densidad y composición, etc. Se cree que la acreción de estos “planetesimales” duró entre 100 000 años y 20 millones de años.
- Los planetesimales comenzaron a generar proto-planetas y, en paralelo, según se produjo el enfriamiento de la nebulosa, la estrella generó un fuerte viento solar que lanzó hacia las zonas más externas los volátiles y materiales menos densos que posteriormente conformarían los cuerpos planetarios no-terrestres.
- La distribución de elementos en el Sistema Solar nos indica que el hidrógeno y el helio son los más abundantes con una progresión general decreciente, de acuerdo con el incremento del número atómico. Asimismo, la masa en nuestro Sistema Solar está principalmente concentrada en el Sol: Sol: 99.85%, Planetas: 0.135%, Cometas: 0.01%?, Satélites: 0.00005%, Planetas Menores: 0.000002%? Meteoroides: 0.000001%? Medio Interplanetario: 0.000001%?

Durante y con posterioridad a la formación de los planetas terrestres originados por acreción, se produjo un bombardeo catastrófico en el que los restantes planetesimales craterizaron la mayor parte de las superficies planetarias. Los “impactores”, acoplados con intensa radiactividad y subsecuente concentración gravitacional, produjeron suficiente calor para fundir y diferenciar químicamente los planetas en su actual estructura (núcleo, manto, corteza). Las atmósferas de los planetas terrestres se formaron durante este episodio y después por desgasificación. En el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter se supone que la temperatura de la nebulosa solar fue lo suficientemente baja para que minerales ricos en carbono y agua pudieran coalescer y formar planetesimales. Desde Júpiter hacia el exterior las temperaturas fueron aún más bajas, de tal manera que enormes cantidades de agua congelada pudieron acumularse con el material rocoso en los planetesimales. A temperaturas todavía inferiores se formarían otros hielos, tales como de amonio y metano, dando a los planetesimales distantes una composición mezclada de hielo de agua, amonio y metano impregnada con una pequeña cantidad de material rocoso.

Específicamente, las características generales de la Tierra vienen determinadas por su ubicación en la zona interna del Sistema Solar y la composición de los materiales que allí se concentraron. Así, los planetas que se originaron en esta zona son pequeños, rocosos y densos, características que los diferencian de los formados en la zona externa, que son grandes, ligeros y mayoritariamente gaseosos conformando la geodiversidad planetaria que observamos en nuestro Sistema Solar diferenciado (Fig. 2). La Tierra se originó por la unión de planetesimales que formaban parte del disco protoplanetario constituido en torno al Sol (Ringwood, 1979; Newson y Jones, 1990; Canup y Righter, 2000; Dalrymple, 1991). Esto ocurrió hace aproximadamente 4 600 millones de años y corresponde a la edad absoluta más antigua determinada



Fig. 2. Nuestro sistema solar refleja una importante geodiversidad planetaria con planetas de tipo terrestre, planetas gaseosos, lunas heladas, etc. representada (no a escala) en esta imagen. Fuente: NASA.

en meteoritos. El impacto de planetesimales y la desintegración de los radioisótopos de vida corta incrementaron notablemente la temperatura de nuestro planeta.

Es paradójico que una buena parte del conocimiento que tenemos de las primeras etapas de la evolución terrestre se basa en la observación y el estudio de otros planetas y cuerpos planetarios que apenas han cambiado desde su formación. Algunos meteoritos indiferenciados (condritas) serían, salvando las distancias, los mejores representantes de dichos planetesimales y, además, fueron (y siguen siendo) de gran ayuda para establecer cada vez con mayor precisión, gracias a los métodos radiométricos, la edad de la Tierra y de otros cuerpos planetarios.

Se llama meteoritos a los fragmentos de asteroides y planetas que viajan por el espacio, y chocan contra la superficie de la Tierra o de otro cuerpo planetario, donde son recogidos (Kerridge y Matthews 1988; McSween, 1999; Bevan y De laeter, 2002; Norton 2002; Beech, 2006; Hutchison, 2007). Del tipo de materia extraterrestre que nos llega del espacio, los meteoritos *sensu stricto* son, sin duda, los más importantes y los que nos proporcionan una información mineralógica más representativa, a escala espacial y temporal, de los procesos ocurridos en el Sistema Solar. De acuerdo con Grady (2000), se ha observado la caída de unos 1000 meteoritos, aunque esto solo representa una pequeña fracción de los objetos que nos llegan, la mayoría de los cuales se precipitan a los océanos o en áreas despobladas. Al contrario, se han encontrado más de 20 000 meteoritos, muchos de ellos a partir de 1969, cuando se descubrió que éstos se acumulan y conservan en cantidad en las superficies heladas de la Antártida, y en desiertos como el de Atacama o los del norte de África. Sin embargo, apenas se recupera un 1% de las toneladas de material extraterrestre que alcanzan la superficie de la Tierra cada día.

Al describir los meteoritos y su tipología nos centraremos, por su extraordinaria abundancia y carácter primitivo, en los meteoritos de origen asteroidal (> 99,9% del total), excluyendo por tanto los procedentes de la Luna y Marte (Korotev, 2013; Baalke, 2013). Se ha propuesto recientemente que el ejemplar denominado NWA 7325, encontrado en 2012 en Marruecos, podría ser el primer meteorito conocido procedente de Mercurio (Irving et al., 2013). Existen tres categorías básicas de meteoritos: sideritos (Irons), prácticamente el 100% metal, siderolitos (Stony irons), casi iguales proporciones de metal y silicatos, y lititos o aerolitos (Stony),

Fig. 3. Imagen del mayor meteorito conocido caído en España (144 kg). Se trata de la condrita de Molina de Segura. La caída se produjo el 24 de diciembre de 1858. El ejemplar forma parte de la colección de meteoritos del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid. Fotografía: Jesús Martínez Frías (tomada con permiso) (Martínez Frías y Lunar, 2008).



principalmente silicatos. Estos últimos, comprenden a su vez dos subgrupos importantes: condritas y acondritas. Las condritas son, con mucho, las más numerosas (Fig. 3) y toman su nombre de los cóndrulos. Estos se definen como masas casi esféricas de tamaño milimétrico de silicatos, y más raramente metal y/o sulfuros, que se encuentran presentes en la mayor parte de las condritas (Hewins et al., 1996; Boss y Durisen, 2005; Sears, 2011). A las condritas se las ha comparado con rocas sedimentarias formadas a partir de materiales nebulares primitivos preexistentes, con distintos orígenes, reunidos por acreción en los asteroides. En ellas se encuentran, además de los cóndrulos, las inclusiones de Ca, Al (CAIs), agregados ameboidales de olivino, granos interestelares y partículas opacas de grano grueso, englobados todos ellos en una matriz de grano fino. Estos componentes aparecen en distintas proporciones en cada tipo de condrita, reflejando probablemente sus diferentes ambientes de formación, y la heterogeneidad de la nebulosa solar primitiva. Al igual que los cóndrulos, también las CAIs se formaron con anterioridad a su incorporación en las condritas. Son los materiales más antiguos del Sistema Solar, datados en unos 4560 Ma por Rb-Sr y Pb-Pb en el meteorito de Allende. Aunque su forma es variable, la mayoría de las CAIs presentan una estructura concéntrica formada por capas de diferentes minerales refractarios (ej.: corindón, hibonita, perovskita, anortita, melilita y espinela). La secuencia teórica de condensación mineral, estimada para un régimen térmico de enfriamiento de la nebulosa solar, desde temperaturas cercanas a los 2000 K implicaría las siguientes fases minerales: 1) inicio con corindón, perovskita, hierro metálico y troilita; 2) corindón → espinela; 3) perovskita + melilita → diópsido; 4) espinela + melilita → olivino (forsterita); 5) espinela → enstatita; 6) diópsido + melilita + espinela → anortita; 7) anortita → plagioclasas (genérico); 8) forsterita + enstatita → olivinos + piroxenos (genéricos); 9) olivinos + piroxenos + plagioclasas → filosilicatos; 10) formación de magnetita. Otras fases de baja temperatura serían los

Fig. 4. Representación artística mostrando las estructuras comparadas de la Tierra, Marte y la Luna. NASA/JPL-Caltech.



carbonatos, sulfatos, los hielos de agua, NH_3 y CH_4 y los compuestos carbonáceos (Tapanila, 2006).

Las condritas se dividen en cuatro clases con 13 grupos, según su composición química: condritas enstatíticas (E: EH y EL), condritas carbonáceas (C: CI, CM, CO, CV, CR, CK, CH y CB), condritas ordinarias (O: H, L y LL) y condritas Rumuruti (R). Estas últimas son una clase definida recientemente, al encontrarse cinco meteoritos de las mismas características, número mínimo necesario para nombrar una nueva clase. Una clase adicional, las condritas Kakangari (K) no está aún reconocida por todos los autores.

Las acondritas son lititos sin cóndrulos. El término se refiere desde a condritas extrañas, intensamente recrystalizadas y parcialmente fundidas, a rocas ígneas más numerosas y mezclas mecánicas (brechas) de fragmentos ígneos derivados de ellos. Estos meteoritos son objetos muy diversos, que incluyen desde condritas casi primitivas a rocas monominerales, similares a las dunitas o piroxenitas terrestres y que se asemejan a los basaltos en su textura y mineralogía. Las acondritas incluyen: a) las denominadas acondritas primitivas (acapulcoitas, winonaitas y lodranitas), b) aunque constituyen un grupo independizado, con entidad propia, los meteoritos SNC a los que se ha asignado un origen marciano (shergottitas, anclitas y chassignitas y ALH84001), c) aubritas, ureilitas, angritas y las HED (howarditas, eucritas, diogenitas) y d) también como un grupo con entidad propia, las lunaitas (meteoritos lunares).

Los siderolitos se encuadran normalmente en pallasitos y mesosideritos. Los primeros consisten en cristales o fragmentos de cristales de olivino magnesiano en una matriz continua de Fe-Ni metálico. Los mesosideritos pueden definirse como mezclas mecánicas, más o menos recrystalizadas, de silicatos y metal.

Por último los sideritos se consideran derivados de una gran variedad de cuerpos padre y se han identificado unos 60 grupos sobre la base de sus características geoquímicas, estimaciones de la pauta de enfriamiento y edades de exposición. Básicamente, se clasifican en hexaedritas, octaedritas y ataxitas (fundamentalmente aleaciones de Fe-Ni, en forma de kamacita y taenita).

Aunque el conocimiento de la composición de los meteoritos es muy importante para determinar las características geoquímicas de la Tierra primitiva y su posterior diferenciación, los modelos cosmogeoquímicos aún no pueden precisar suficientemente cuál fue la participación de los distintos tipos condriticos, el papel que pudieron desempeñar los procesos de alteración acuosa sufridos por algunos asteroides o incluso si otras composiciones meteoríticas pudieron también estar involucradas. De manera simplificada, las altas temperaturas, las diferencias de densidad y las afinidades geoquímicas entre los elementos dieron lugar a una estructuración de la Tierra y de otros planetas y lunas en capas de densidad decreciente: núcleo, manto, corteza, hidrosfera y atmósfera (Fig. 4). La corteza terrestre es la capa rocosa más superficial del planeta y sus características geológicas son el resultado de la acción

reiterada de los procesos geológicos a lo largo de la historia de la Tierra. La Tierra, al ser un planeta geodinámicamente activo (con vitalidad geológica), se encuentra en un proceso continuo de transformación de sus materiales. Estos cambios nos ayudan a comprender los procesos geológicos que los generaron, su interacción y solapamiento (especialmente desde el inicio de la tectónica de placas que confirió a la geodinámica una influencia mucho más global), pero también han modificado y destruido las claves originales que se encontraban en los primeros minerales y rocas, en la materia primigenia a partir de la cual todo comenzó. Uno de los primeros efectos de esta evolución geológica fue su propia diferenciación en corteza oceánica y corteza continental, que generó una notable diferencia entre las altitudes medias de continentes y fondos oceánicos. (Fig. 5).

La importancia de los grandes impactos y su temporalidad

La conexión entre materiales y procesos terrestres y extraterrestres no se refiere únicamente a los aspectos puramente composicionales de la materia primigenia, básicamente de fuente asteroidal (pues los asteroides (Fig. 6) son principalmente los cuerpos padres de los meteoritos). Dado que las características que posee la Tierra son el resultado de los cambios ocurridos a lo largo de su historia, entender su funcionamiento actual requiere conocer los procesos que han intervenido en el pasado (incluyendo los causados por objetos procedentes del espacio), las interacciones generadas y los efectos producidos. Cualquier proyección que pretenda hacerse hacia el futuro debe estar basada en el conocimiento de lo sucedido en el pasado. Los impactos meteoríticos —a veces con efectos a escala planetaria— han acompañado la evolución geobiológica de la Tierra y no podría entenderse lo ocurrido en nuestro planeta sin tener en cuenta también estos procesos catastróficos (Mark, 1987; Melosh, 1989; Hodge, 1994; Kenkmann, 2005; Osinski y Pierazzo, 2012; Koeberl y Reimold, 2013).

La Tierra es un sistema en constante interacción con el espacio exterior. El campo magnético y la atmósfera terrestres actúan como escudos, protegiendo nuestro planeta del bombardeo continuo de partículas procedentes del Sol y de la entrada de millones de meteoroides, de dimensiones variables, a veces con tamaños que alcanzan las decenas de metros. Se ha estimado que las partículas microscópicas de polvo cósmico caen en una proporción de alrededor de 150 toneladas/día y que aproximadamente 500 meteoritos mayores de 0,5 Kg caen a la Tierra cada año, aunque solamente 4 son observados (en zonas pobladas) ya que la mayor parte se precipitan a los mares y océanos. No obstante, el estudio del registro geológico de la Tierra, al igual que el de la Luna y el del resto de los planetas y otros cuerpos planetarios del Sistema Solar, evidencia también las huellas de colisiones debidas a objetos asteroidales y/o cometarios de grandes dimensiones que permanece grabada sobre su superficie, principalmente en forma de cráteres de impacto. Se estima que existen: a) unos 150 millones de 10 m; b) unos 300 000 de 100 m; c) alrededor de

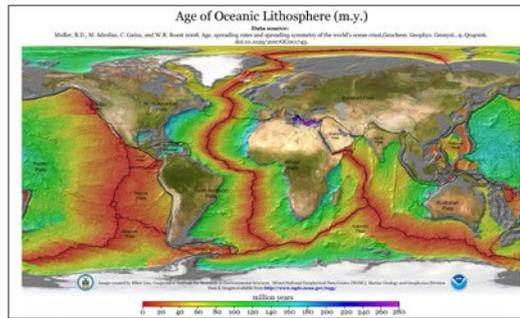


Fig. 5. Mapa geodinámico global de la Tierra, mostrando las placas tectónicas y la edad de la litosfera oceánica.



Fig. 6. Imagen del asteroide Eros (zona de su hemisferio sur), ofreciendo una perspectiva del terreno craterizado que fue el objetivo de la exploración de la sonda Near. Fuente: NASA.

10 000 de 500 m, y d) unos 2000 objetos masivos de cerca de 1 km de diámetro. El 75% de los grandes asteroides, de más de un kilómetro, capaces de causar una catástrofe planetaria, están ya localizados y ninguno de ellos tiene una órbita peligrosa (aunque se estima que quedan aún por localizar unos 300).

La escala de tiempo geológico abarca desde los primeros registros geológicos datados, hasta la actualidad (Fig. 7). Proporciona una referencia para la representación temporal de procesos y materiales geológicos, y establece divisiones y subdivisiones basadas en cambios generalizados (faunísticos, climáticos, eustáticos, químicos, etc.) que han quedado registrados en las rocas que, a su vez, se relacionan con eventos globales sucedidos a lo largo de la historia geológica de la Tierra. Específicamente, en relación con los eventos de impacto, se acepta en términos generales que el número de asteroides y cometas que cruzan el Sistema Solar interior ha ido decreciendo de manera exponencial desde la formación de la Tierra.

Fig. 7. Carta Cronoestratigráfica Internacional, elaborada por la Comisión Internacional de Estratigrafía de la IUGS.

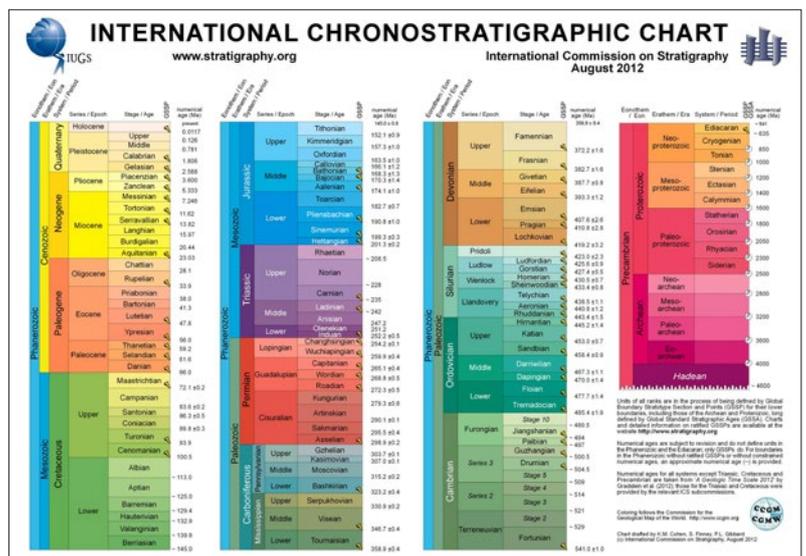


Fig. 8. Imagen generada por ordenador mostrando el mapa de gravedad del cráter de Chicxulub (Península del Yucatán). Fuente: NASA.

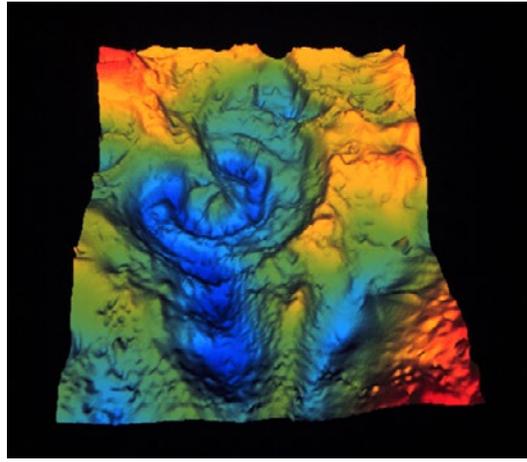
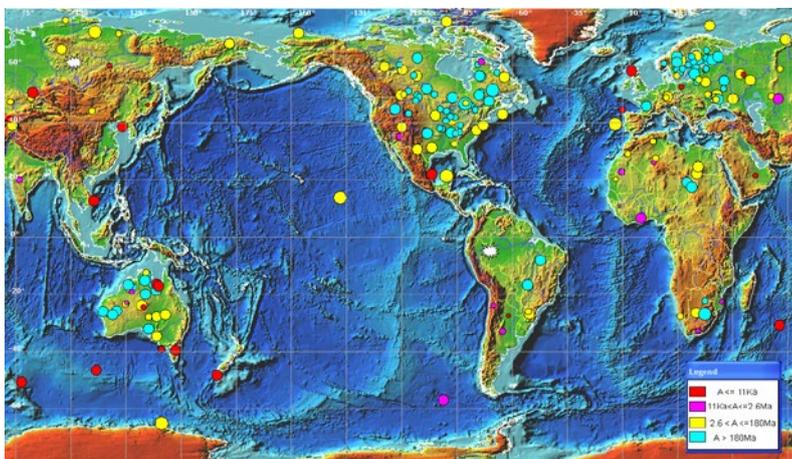


Fig. 9. Mapa de las estructuras de impacto confirmadas en la superficie terrestre (180 estructuras) y en el fondo oceánico (24 estructuras). El tamaño del círculo es proporcional al diámetro del cráter. El color muestra la edad de formación dividida en 4 grupos. Las estrellas blancas indican los epicentros de los dos eventos del siglo XX (Tinguska, 1908 y Brasil, 1930). Es importante tener en cuenta que 16 de las 24 estructuras conocidas en los fondos oceánicos se descubrieron entre 2005 y 2006. Créditos: Expert Database on the Earth Impact Structures (EDEIS), Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, Novosibirsk, 2006.



Por término medio, una vez cada pocos cientos de años la Tierra es alcanzada por un objeto de unos 70 m de diámetro; cada diez mil años nos golpea un objeto de unos 200 m, y cada millón de años se produce el impacto de un cuerpo de más de 2 km de diámetro. Por último, cada 100 millones de años tiene lugar una catástrofe como la que sucedió, en el límite Cretácico-Terciario (K-T), cuando se produjo el choque de un objeto de unos 10 km de diámetro (o más) contra nuestro planeta, al que se ha responsabilizado de la gigantesca estructura de impacto de Chicxulub, en el Golfo de México (Fig. 8) y, al menos en parte, de la desaparición de los dinosaurios y otras especies. Es importante subrayar que antes de que Walter y Luis Alvarez expusieran su hoy famosa hipótesis del impacto K/T, dos astrónomos británicos ya habían avanzado esta idea. Incluso antes que ellos, en 1973, el gran geoquímico y Premio Nobel, Harold C. Urey, había sugerido que los grandes períodos geológicos de la historia de la Tierra podrían haber terminado catastróficamente por la colisión de cometas contra nuestro planeta. El registro más antiguo de grandes eventos de impacto corresponde a las capas de esférulas del Arcaico inferior (3,5 a 3,2 Ga) que se han identificado en el “Barberton Greenston Belt”, en Sudáfrica. En la actualidad, es un hecho probado que los impactos han acompañado la coevolución geobiológica de la Tierra y que se han identificado alrededor de 170 estructuras de impacto, con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros (Fig. 9).

CONSIDERACIONES FINALES

Vivimos un momento pionero en la investigación y exploración planetarias en el que las misiones a la Luna, Marte, asteroides, Titán, etc., nos están ayudando a entender mejor el origen y evolución de nuestro propio planeta, incluyendo también el desafío implícito que supone entender la vida como suceso que, hasta el momento, sólo se ha detectado en la Tierra. Objetivos que hace apenas medio siglo eran impensables, pero que han extendido nuestras fronteras hacia el Espacio Cercano a la Tierra proporcionándonos una visión mucho más amplia de la Naturaleza y el Universo. Si queremos comprender nuestro planeta debemos considerar que es parte de algo más amplio, reflejando en nuestros esquemas educativos también esta nueva perspectiva astrogeológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Alves J. F., Lada C. J. y Lada E. A. (2001). Internal structure of a cold dark molecular cloud inferred from the extinction of background starlight. *Nature*, 409, 159–161.
- Anguita Virella, F. (1993). *Geología Planetaria*. Mare Nostrum. 150 p.
- Atreya, S.K., Pollack, J.B. y Matthews, M.S., (1989). *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*. Tucson, AZ: The University of Arizona Press, 881 p.
- Baalke, R. (2013). <http://www2.jpl.nasa.gov/snc/>
- Beech, M. (2006). *Meteors and Meteorites: Origins and Observations*. Crowood Press 157 p.
- Bevan, A. y De laeter, J. (2002). *Meteorites: A Journey through Space and Time*. Smithsonian 256p.
- Boss A. P. (1989). Evolution of the solar nebula I. Nonaxisymmetric structure during nebula formation. *Astrophys. J.*, 345, 554–571.
- Boss A. P. (2003). *The solar nebula. In Treatise on Geochemistry: Volume 1. Meteorites, Planets, and Comets* (A. Davis, ed.), 63–82. Elsevier, Oxford.
- Boss A. P. y Durisen R. H. (2005). Chondrule-forming shock fronts in the solar nebula: A possible unified scenario for planet and chondrite formation. *Astrophys. J. Lett.*, 621, L137–L140.
- Boss, A.P. y Goswami, J.M. (2004). Presolar Cloud Collapse and the Formation and Early Evolution of the Solar Nebula. In: Dante S. Lauretta and Harry Y. McSween Jr. (eds.) *Meteorites and the Early Solar System II* 171-186 <http://www.lpi.usra.edu/books/MESSII/9005.pdf>.
- Cameron A. G. W. y Truran J. W. (1977). The supernova trigger for formation of the solar system. *Icarus*, 30, 447–461.
- Canup, R.M. y Righter, K. (2000). *Origin of the Earth and Moon*. The University of Arizona, 555 p.
- Carr, M.H., Saunders, R.S., Strom, R.G. y Wilhelms, D.E. (1984). *The geology of the terrestrial planets*. NASA-SP-469. Full electronic version: <http://www.lpi.usra.edu/publications/books/geologyTerraPlanets/GeologyTerrestrialPlanets.pdf>
- Cassen, P. (2001). Nebula thermal evolution and the properties of primitive planetary materials. *Meteoritics & Planet. Sci.*, 36, 671–700.
- Christiansen, E.H. y Hamblin, W.K. (1995). *Exploring the Planets*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 500 p.

- Dalrymple, G. B. (1991). *The Age of the Earth*. Stanford University Press, 474 p.
- Glass, B.P. (1982). *Introduction to Planetary Geology*. Cambridge Planetary Science Series (number 2). 469 p.
- Faure G. y Mensing, T.M. (2007). *Introduction to Planetary Science. The geological perspective*. Springer. 509 p.
- Francis, P. (1981). *The Planets*. New York: Penguin Books, 411 p.
- Gammie C. F. (1996). Layered accretion in T Tauri disks. *Astrophys. J.*, 457, 355–362.
- Godon P. y Livio M. (2000). The formation and role of vortices in protoplanetary disks. *Astrophys. J.*, 537, 396–404.
- Grady, M.M. (2000). *Catalogue of meteorites*. Cambridge University Press. The Natural History Museum, London. 5th edition, 696 p.
- Greeley, R. (1994). *Planetary Landscapes*. NY Chapman and Hall, 286 p.
- Guest, J.E. (1979). *Planetary Geology*. London: David & Charles (Publ.) , 208p.
- Harry, Y. y McSween Jr. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press; 2 edition, 324 p.
- Hartmann, W. K. (1983). *Moons and Planets*, 2nd ed. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Co., 509 p.
- Hewins, R.H., Rhian, R., Jones, H, E. R. D. Scott (1996). *Chondrules and the Protoplanetary Disk*. Cambridge University Press, 346 p.
- Hodge, P.W. (1994). *Meteorite Craters and Impact Structures of the Earth*. Cambridge University Press, 124 p.
- Hutchison, R. (2007). *Meteorites. A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge Planetary Science(No. 2) 534 p.
- Irving, A. J., Kuehner, S. M., Bunch, T. E., Ziegler, K., Chen, G., Herd, C. D. K., Conrey, R. M. y Ralew, S. (2013). *Ungrouped Mafic Achondrite Northwest Africa 7325: A Reduced, Iron-Poor Cumulate Olivine Gabbro from a Differentiated Planetary Parent Body*. 44th LPSC, The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1719, p.2164
- Jin, L. y Siu, N. (2010). *The evolution of the solar nebula I. Evolution of the global properties and planet masses* ApJ 710 1179 doi:10.1088/0004-637X/710/2/1179
- Kenkmann, T. (2005). *Large Meteorite Impacts 3. Special paper Issue 384 of Large meteorite impacts III*. Geological Society of America, 476 p.
- Kerridge, J. F. y Matthews, M.S (1988). *Meteorites and the early solar system*. University of Arizona Press. 1269 p.
- Koeberl, Ch. y Reimold, U.W. (2013). *Meteorite Impact Structures*. Springer, 500 p.
- Korotev, R.L. (2013). <http://meteorites.wustl.edu/lunar/>
- Lin D. N. C. y Papaloizou J. (1980). On the structure and evolution of the primordial solar nebula. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 191, 37–48.
- Mark, K., ed. (1987). *Meteorite Craters*. Tucson, AZ: The University of Arizona Press, 288 p.
- Martínez-Frías, J. y Madero, J. (2004). (Eds) *Meteoritos y Geología Planetaria*. Dip. Provincial de Cuenca, Ediciones Provinciales nº 23, 305 p.
- Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2008). Molina de Segura: the largest meteorite fall in Spain. *Astronomy & Geophysics*, 49-4, 4.26-4.29.
- Melosh, H.G. (1989). *Impact cratering: a geologic process*. Oxford University Press. 245 p.
- Melosh, H.J. (2011). *Planetary Surface Processes*. Cambridge Planetary Science (No. 13) 520 p.
- National Science Foundation-Eearth Science Literacy Initiative (NSF-ESLI) (2010). http://www.earthscienceliteracy.org/es_literacy_6may10_.pdf
- Newson, H.E. y Jones, J.H. (1990). *Origin of the Earth*. Oxford University Press, 378 p.
- Norton, O.R. (2002). *The Cambridge Encyclopedia of meteorites*. Cambridge University Press 374 p.
- Osinski, G.R. y Pierazzo, E. (2012). *Impact cratering. Processes and products*. Blackwell Publishing Ltd. 316 p.
- Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G.R., Barrera, J.L., Belmonte, A., Brusí, D., Calonge, A., Cardona, V., Crespo-Blanc, A., Feixas, J.C., Fernández-Martínez, E., González-Díez, A., Jiménez-Millán, J., López-Ruiz, J., Mata-Perelló, J.M., Pascual, J.A., Quintanilla, L., Rábano, I., Rebollo, L., Rodrigo, A. y Roquero, E. (2013). Alfabetización en ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 117-129.
- Ringwood, A.E. (1979). *Origin of the Earth and Moon*. Springer-Verlag, 295 p.
- Sears, D.W. (2011). *The Origin of Chondrules and Chondrites*. Cambridge Planetary Science (No. 3) 222 p.
- Short, N.M. (1975). *Planetary Geology*. Prentice Hall, The University of California, 361 p.
- Tapanila, L. (2006). *Planetary Geology for Teachers*. GEOL 422/522 -- Web Class -- Summer 2006. Mod. 2. Origin of the Solar System. http://geology.isu.edu/wapi/geo_pgt/Modo2_SolarSys/mod2.htm
- Taylor, S.R. y McLennan S. (2010). *Planetary Crusts. Their composition, origin and evolution*. Cambridge Planetary Science (No. 10) 404 p.
- Vita-Finzi, C. y Fortes, D. (2013). *Planetary geology: An introduction*. 2nd edition. DUNEDIN Academic Press. 176 p.
- Wasson, J.T. (1985). *Meteorites: Their Record of Early Solar-System History*. W H Freeman y Co (Sd) 267 p.
- Wilhelms, D.E. (1987). *The Geologic History of the Moon*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1348, Washington, DC: U.S. Govt. Printing Office, 328 p. ■

Fecha de recepción del original: 29/03/2013
 Fecha de aceptación definitiva: 01/06/2013