



Mineralogía espacial: de la materia primigenia a la exploración de Marte

JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS^(1, 2), FERNANDO RULL^(1, 2) Y ROSARIO LUNAR⁽³⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Geología Planetaria, Centro de Astrobiología (CSIC/INTA), asociado al NASA Astrobiology Institute, Ctra. de Ajalvir, km 4. Torrejón de Ardoz, 28850 Madrid.

⁽²⁾ Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid y Unidad Asociada CSIC-Universidad de Valladolid a través del Centro de Astrobiología.

⁽³⁾ Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

Varias disciplinas científicas fueron capaces, hace tiempo, de extrapolar sus ámbitos de actuación al espacio exterior. La (astro)física, la (cosmo) química 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. Por eso, lo que ayer parecía algo extraño y novedoso —incluso controvertido entre los científicos de la época—, actualmente no sólo está aceptado con total normalidad, sino que constituye el pilar consolidado de numerosos descubrimientos recientes sobre el universo.

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 mineralogía espacial es a la geología planetaria lo que la mineralogía clásica es a la geología*. En nuestro país este proceso aún se encuentra en un estadio incipiente de su desarrollo, pero no podemos obviar hechos tales como que sondas espaciales nos están proporcionando ya la composición superficial de asteroides, o que equipos robotizados están analizando rocas y minerales en Marte y que, casi inmediatamente, podemos visualizar y analizar los espectros obtenidos vía web. Por ello, iniciativas recientes en nuestro país como la organización de un seminario de astromineralogía y mineralogía espacial, impulsado por la Sociedad Española de Mineralogía, son muy importantes y abren nuevas vías, fomentando los aspectos formativos sobre estos temas.

La información que nos permite profundizar en el conocimiento de estos aspectos es básicamente de cuatro tipos:

a) la que nos llega a la Tierra directamente desde el Espacio (aunque sin control por nuestra parte), en

forma de partículas de polvo interplanetario y meteoritos;

- b) la que se genera en las propias rocas terrestres, como consecuencia de impactos de grandes meteoritos, implantando una signatura impactogénica que refleja algunas de las características de los impactores;
- c) la adquirida de manera directa y controlada, gracias a las misiones espaciales a asteroides, cometas, planetas y sus lunas;
- d) la que obtenemos en determinadas zonas de la Tierra que por sus características pueden considerarse “análogos” de los mecanismos, procesos o rocas y minerales a estudiar.

Nos tenemos que remontar muy atrás, a casi tiempos desconocidos en 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 sólo 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 “propiamente científico” del sistema solar como marco de referencia en el que se desarrollan los procesos cósmicos pertenece al Renacimiento. Es a par-

tir 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.

Desde el punto de vista mineralógico, resultaría prácticamente imposible pretender incorporar en tan corto espacio toda la información existente sobre la materia constituyente de los cometas y meteoritos asteroidales conocidos. Si a ello añadimos los constantes descubrimientos sobre meteoritos lunares y de Marte es evidente que se trata de un tema en continua actualización. Sin embargo, un primer paso, casi ineludible, conlleva el establecimiento de los eventos implicados en la evolución de la nube primigenia a partir de la que se generó nuestro sistema solar tal y como lo conocemos. Esta evolución vendría definida por una serie de episodios que comenzaron hace unos 4.600 M.a., cuya caracterización es fundamental para entender los distintos tipos de materia extraterrestre conocida y que llega a nuestro planeta:

- a) Una nube de gas y/o polvo interestelar (la nebulosa solar) sufre perturbaciones (por ejemplo, debidas a las ondas de choque de una supernova cercana) y colapsa bajo su propia gravedad.
- b) 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).
- c) 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.
- d) 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 G.a.).
- e) Las partículas de polvo colisionan entre sí y van formando otras mayores hasta la generación de cuerpos del tipo de pequeños asteroides.
- f) 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.
- g) Los planetesimales comenzaron a generar proto-planetes 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.

- h) 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: 0,0000002%? Meteoroides: 0,0000001%? Medio Interplanetario: 0,0000001%?

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.

El Sistema Solar contiene desde sus orígenes una población de cometas y asteroides en continua evolución. Partículas de diversa composición y meteoritos procedentes de distintas fuentes (cometas, asteroides, planetas), además de polvo interplanetario intra y extranebular, alcanzan la Tierra. Nuestro planeta se ubica dentro de un conjunto de cuerpos que pueden (y lo han hecho) colisionar con su superficie. De aquí la importancia de los estudios mineralógicos y geoquímicos relacionados con impactos meteoríticos, como uno de los procesos geológicos más relevantes y extendidos en nuestro sistema solar. *La Tierra se encuentra en una interacción permanente con el espacio exterior.*

ASTROMINERALOGÍA: POLVO COMETARIO-IDPs

Los cometas son cuerpos de formas irregulares, frágiles y pequeños, compuestos por una mezcla de granos no volátiles y gases congelados. Tienen órbitas muy elípticas que los lleva muy cerca del Sol y los devuelve al espacio profundo, frecuentemente más allá de la órbita de Plutón. Sus estructuras son diversas y muy dinámicas, pero todos ellos desarrollan una nube de material difuso que los rodea, denominada cabellera, que general-

mente crece en tamaño y brillo según se acerca al Sol. Básicamente, los cometas están constituidos por gases congelados H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 y HCO_2 y embebidos en las estructuras del hielo se encuentran granos de materiales no volátiles (es decir, materiales que no pasan de sólido a gas fácilmente, tal y como silicatos, compuestos complejos de carbono y otros), que forman lo que se denomina "polvo cometario". La sonda GIOTTO atravesó el cometa Halley a gran velocidad y pudo registrar algunos espectros de las partículas que la impactaban. La mayoría de los granos de polvo eran carbonáceos, justificando la descripción del material como "CHON (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno)".

Estas partículas de polvo cometario son una parte importante de las denominadas IDPs (Interplanetary Dust Particles) que algunos autores también han homologado al "cosmic dust" de génesis diversa intra, e incluso, extranebular. Como se ha indicado previamente, la Tierra está constantemente siendo bombardeada por pequeñísimas partículas de polvo extraterrestre. Se ha estimado que alcanza nuestro planeta un flujo de unas 100 toneladas/día con tamaños promedio de unas 200 μm . Normalmente se piensa que este polvo deriva de colisiones entre asteroides y de cometas. En su mayor parte presenta una composición similar a la de los meteoritos condriticos y distinta a la de las rocas corticales terrestres. Por ejemplo, los elementos siderófilos, tales como el Ir y Os, están enriquecidos y tienen ratios isotópicos distintivos en las IDPs, cuando se comparan con los materiales de la corteza terrestre. Ello hace posible su reconocimiento y cuantificación en el registro sedimentario.

Muchas de estas IDPs están constituidas predominantemente por plaquitas de silicatos interestelares (por ejemplo enstatita) y lo que se ha denominado GEMS ("Glass with Embedded Metal and Sulfides"). Otro tipo de IDPs son los granos presolares. Actualmente se han descubierto siete tipos principales de granos presolares: diamante, carburo de silicio (fig. 1), grafito, nitruro de silicio, óxido de aluminio, espinela y óxido de titanio. Recientemente se han encontrado incluso carbonatos (calcita) cuya génesis está aún por resolver.

Diamante: son los granos de menor tamaño que han sido identificados hasta el momento (unos 2 nanómetros), conteniendo solamente unos mil átomos. La prueba de que son presolares viene dada sobre todo porque contienen xenón y nitrógeno isotópicamente inusuales.

Carburo de silicio: son probablemente los más y mejor estudiados, con tamaños entre 0,1 y 20 μm (fig. 1). Presentan composiciones isotópicamente inusuales de silicio, carbono, nitrógeno, magnesio, calcio, titanio y muchos otros. Se piensa que se han formado en estrellas "AGB" (un cierto tipo de gigantes rojas muy antiguas ricas en carbono), aunque algunos granos muestran composiciones isotópicas que indican otras fuentes estelares, incluyendo novae y supernovas.

Grafito: pueden ser relativamente grandes, hasta 20 mm de diámetro. Tienen una composición isotópica inusual en un gran número de elementos. Muchos de ellos tienen una estructura en capas de grafito, como la de una cebolla. Los propios granos de grafito hospedan

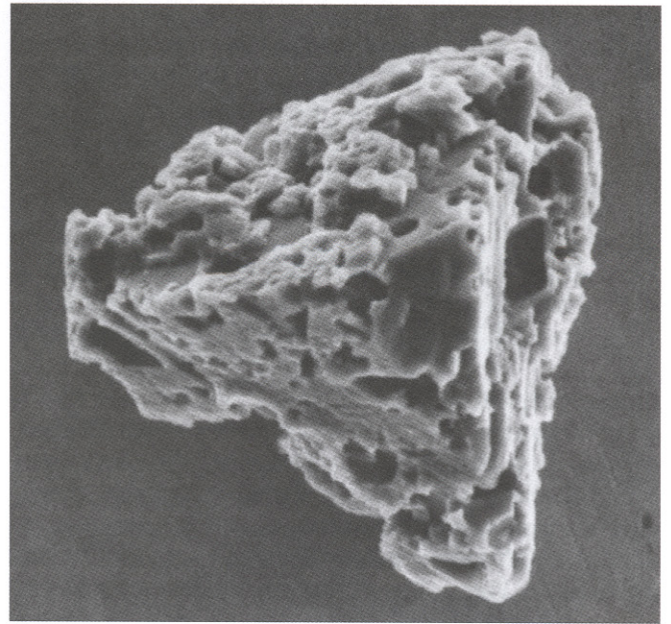


FIGURA 1. Partícula (IDP) de SiC, considerado uno de los granos presolares más frecuentes desde el punto de vista composicional. Tamaño del cristal: 10 μm .

sub-granos de otros minerales, tales como carburo de silicio y Fe-Ni.

Nitruro de silicio: sólo se han recuperado unos pocos granos con esta composición. Aunque son similares a los de carburo de silicio en tamaño y apariencia, son mucho menos comunes. Su composición isotópica indica que se formaron probablemente en explosiones de supernova.

Óxido de aluminio, espinela y óxido de titanio: solamente se han encontrado hasta el momento unos 150 granos presolares ricos en oxígeno, en contraste con los miles de granos de SiC y grafito. Los más frecuentes son de óxido de aluminio. Su composición isotópica indica que se formaron en gigantes rojas y estrellas AGB ricas en oxígeno. Sin embargo, uno o dos granos también presentan firmas isotópicas de supernovas y otros tienen origen desconocido.

METEORITOS ASTEROIDALES Y PLANETARIOS (MARTE Y LA LUNA)

Hace algo más de 200 años, E.F.F. Chladni, investigador de la Universidad de Berlín, se atrevió a proponer que los meteoritos no se generaron en la Tierra, sino que procedían del espacio exterior. Salvo contadas excepciones como Olbers en Alemania y Howard en Gran Bretaña, la respuesta de la comunidad científica de finales del siglo XVIII fue prácticamente unánime en su contra. A pesar del rigor científico de la época, los expertos llegaron a la conclusión de que la caída de los meteoritos sobre la Tierra era imposible. Como se suele hacer cuando no se entiende algo, o no se encuentra una explicación dentro de lo establecido, la ya conocida ultraortodoxia de la "ciencia oficial" negó la mayor y

todos los casos de caídas fueron considerados absurda ficción. Especialmente importantes por la significación del personaje fueron los comentarios de Lavoisier, quien incluso firmó un memorando en 1772 con otros científicos de la Academia de Ciencias de París que concluía de la siguiente manera:

“...Las piedras a las que se asignó un origen cósmico no son más que corrientes rocas terrestres que han sido alcanzadas por un rayo [...] “[...] la caída de piedras del cielo es físicamente imposible [...]”

Este comportamiento de no aceptación de un fenómeno de origen desconocido como real, retardó el desarrollo de la ciencia de los meteoritos. Born, otro conocido mineralogista, cuya reputación podría ser puesta en duda por culpa de una colección de meteoritos, ordenó que todos ellos fueran descartados de la colección imperial en Viena. El resultado es que estas muestras únicas se perdieron para siempre. Tuvieron que pasar casi 10 años, durante los que Chladni sufrió el descrédito y las burlas de sus colegas, hasta que Biot, un miembro de la Academia de París, corroboró sus ideas tras estudiar la caída meteorítica que tuvo lugar el 26 de abril de 1803, cerca de la torre del Águila, en el norte de Francia. Una vez que su origen fue reconocido, los meteoritos ganaron rápidamente el interés y la popularidad de los científicos, y a finales del siglo XIX ya existían cientos de análisis detallados sobre su composición en una euforia analítica casi sin precedentes.

Básicamente, un meteorito puede definirse como un fragmento de material natural extraterrestre que alcanza la superficie de la Tierra; son residuos muy primitivos, que nos proporcionan datos cruciales acerca de la materia en los orígenes de nuestro sistema solar. Algunas veces el término meteorito se confunde con dos términos relacionados: meteoróide y meteorito. El meteoróide es un objeto pequeño que entra en la atmósfera terrestre y el fenómeno que produce se denomina meteorito. La mayoría de los meteoritos que se observan (incluso cuando alcanzan la magnitud de *fireball*: bola de fuego, no llegan a impactar en forma de meteoritos. Cualquier intento de establecer una relación entre un hallazgo (meteorito encontrado) y el avistamiento de un evento de tipo bólido, bola de fuego o cualquier lluvia de fragmentos determinada, implica que existan sólidos fundamentos científicos para la determinación de su “edad terrestre” mediante la utilización de dataciones isotópicas u otros métodos “complementarios” (por ej. termoluminiscencia). Solamente de esta manera se podrá establecer de forma inequívoca dicha conexión, obteniendo el tiempo que el meteorito ha estado en la Tierra y evitar asignaciones erróneas (o inducidas de manera fraudulenta), de supuestos hallazgos meteoríticos con determinados avistamientos multitudinarios de bólidos. Desafortunadamente, este hecho a veces ha sucedido, propiciado por algunos coleccionistas y traficantes de meteoritos, con el simple objeto de incrementar el valor crematístico de las piezas para que museos u otras instituciones se interesen por ellos y los adquieran.

La mayor parte de los meteoritos son fragmentos procedentes de los asteroides, considerados sus principales cuerpos “padre”. Los asteroides son objetos rocosos y metálicos que orbitan alrededor del Sol, pero que son demasiado pequeños para ser considerados como planetas. Están constituidos por el material que sobró durante la formación del Sistema Solar. Dieciséis asteroides tienen un diámetro igual o superior a 240 km. Se han encontrado desde el interior de la órbita de la Tierra hasta más allá de la órbita de Saturno. La mayoría, sin embargo, están dentro del cinturón principal que existe entre las órbitas de Marte y Júpiter. Varios autores han sugerido que son los restos de un planeta que fue destruido por una gran colisión hace mucho tiempo. Sin embargo, es más probable que los asteroides sean el material que no llegó nunca a acrecionar para formar un planeta. De hecho, si se estima la masa total de todos los asteroides y se concentra en un solo objeto, este tendría menos de 1.500 km de diámetro.

Los asteroides de mayor tamaño y más representativos son: Ceres, con un diámetro de unos 1.030 km, y Pallas y Vesta, con diámetros de unos 450 km. Aproximadamente 200 asteroides tienen diámetros de más de 100 km, y existen miles de asteroides más pequeños. Como ya se ha indicado, la masa total de todos los asteroides del Sistema Solar es mucho menor que la masa de la Luna. Los cuerpos más grandes son más o menos esféricos, pero los que tienen diámetros menores de 160 km suelen presentar formas alargadas e irregulares. Quizá, en un principio, existieran unas pocas docenas de asteroides que posteriormente se fragmentaron en colisiones mutuas hasta producir el número actual. Un extraño asteroide del grupo Apolo, Faetón, de unos 5 km de ancho, se acerca al Sol más que cualquier otro asteroide conocido (20,9 millones de km). También se le relaciona con el regreso anual de la corriente de meteoros de Géminis.

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 K-T, cuando se produjo el choque de un cuerpo 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.

La energía liberada como consecuencia de los impactos meteoríticos es tremenda, de unos 10 Mt TNT para un cuerpo de unos 50 m. El paso de 100 a 200 m prácticamente multiplica por 10 la energía producida, de 75 a 600 Mt, y un impactor de alrededor de 1 km produciría una energía de 75.000 Mt. Se ha estimado que el área devastada por la colisión sería de unos 1.900 km² para un cuerpo de 50 m, 7.200 km² para uno de 100 m, 29.000 km² para uno de 200 m, 70.000 km² para uno de 500 m y 200.000 km² para un asteroide con un tamaño de alrededor de 1 km. A partir de un tamaño de 1,5-2 km la devastación sería total, a escala de todo el planeta. El registro más antiguo de grandes eventos de impacto en

nuestro planeta son las capas de esférulas del Arcaico inferior (3,5 a 3,2 Ga) que se han identificado en el "Barberton Greenstone Belt", en Suráfrica. Pero la dinámica geológica terrestre ha hecho que desaparecieran la mayor parte de las huellas y evidencias de estas gigantescas colisiones en un proceso que inexorablemente, con el paso del tiempo, va renovando la corteza.

Teniendo en cuenta que los meteoritos pueden alcanzar la Tierra con velocidades de 72 km/s, la energía cinética del impactor puede ser de 620.000 cal/g. La reducción de la energía cinética y potencial del meteorito durante su descenso suele ir acompañada de un incremento de la energía térmica del aire de alrededor, parte de la cual se transfiere a la superficie del meteorito. Esta fracción depende de la forma y velocidad de caída y de la altitud en que se encuentra el impactor. El calor se transmite del aire caliente al cuerpo por conducción y convección e incrementa su temperatura superficial que puede ser estimada en 273 °k (0 °C) cuando llega del espacio. El meteorito está frío cuando impacta contra el suelo y no se conocen casos, hasta el momento, de meteoritos que nada más caer no puedan mantenerse entre las manos. Si toda la energía cinética del meteorito se transformara en energía térmica, éste podría vaporizarse en su totalidad. Además de esta vaporización debida a la transformación de energía cinética en térmica, también se estima que durante su entrada en la atmósfera se pierde aproximadamente entre 1 y 4 mm por segundo de material. Esto significa, para velocidades de entrada de unos 10 km/s, que la pérdida puede, dependiendo evidentemente de su tamaño, alcanzar hasta el 100% del meteorito. Todas estas consideraciones son cruciales antes de abordar la investigación geológica de los resultados de los impactos. El primer cráter en la Tierra que fue ampliamente aceptado como de tipo meteorítico, no sin dificultades, fue el Barringer Meteor Crater alrededor del cual se encontraron fragmentos de meteoritos. En la actualidad, se han identificado alrededor de 170 estructuras de impacto (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>), con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros. Otros resultados verificables en el registro geológico, además de la formación de cráteres de impacto, implican: 1) la generación de nuevas fases minerales, como polimorfos de alta presión (ej. coesita), debidos a la transformación de minerales preexistentes en las denominadas "target rocks" (rocas afectadas por el impacto), 2) la formación de auténticas rocas de impacto "impact melts", que reciben distintas denominaciones (impactitas, suevitas...), 3) la existencia de anomalías en determinados elementos comunes en los meteoritos y escasos en la corteza, como por ejemplo el iridio, 4) la presencia de gases atrapados en el interior de fulerenos cuya signatura isotópica es extraterrestre, 5) el desarrollo de texturas de impacto a micro (PDF: "Planar Deformation Features") y meso y macroescala ("shatter cones") y 6) muchos otros criterios geodinámicos.

Composicionalmente, el principal propósito de las clasificaciones de los meteoritos es repartirlos en grupos de objetos similares que permitan comprender mejor su origen e interrelaciones. Una clasificación anti-

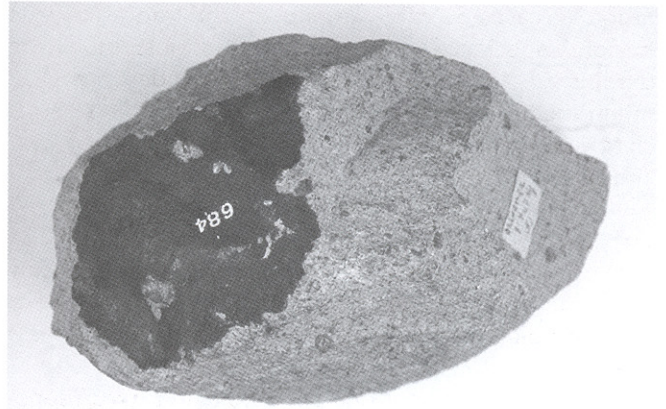


FIGURA 2. Ejemplar del meteorito caído en Olivenza (Badajoz) perteneciente a la colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid. Se trata de una condrita LL5 caída el 19 de junio de 1924. Peso del ejemplar: 50.076 g. Foto: MNCN.

gua, pero todavía muy utilizada, es la que los presenta en tres grandes grupos, de acuerdo con su abundancia modal en metal: los férreos o sideritos (irons), los petroférreos o siderolitos (stony-irons) y los pétreos o lititos o aerolitos (stony) (figs. 2 y 3). Estos últimos comprenden a su vez dos subgrupos importantes: condritas y acondritas. Según el número de caídas observadas, los lititos parecen ser unas quince veces más abundantes en el Sistema Solar que los sideritos y los siderolitos. No obstante, la proporción real es incluso mayor, ya que los lititos son más frágiles, y se desintegran con mayor facilidad en su paso por la atmósfera. A fecha de diciembre de 1999 se ha observado caer unos 1.000 meteoritos, aunque esto sólo 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 canti-

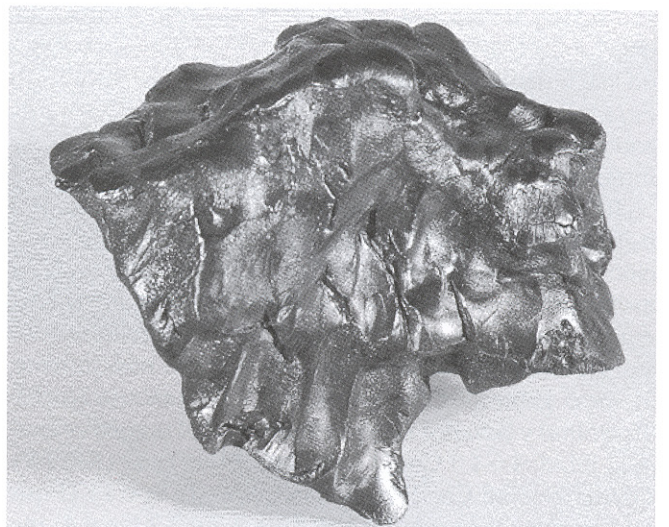


FIGURA 3. Típico fragmento de meteorito siderítico. Obsérvense las estrías y regmaglifs en su superficie. Dimensiones: 50 x 45 x 38 cm.

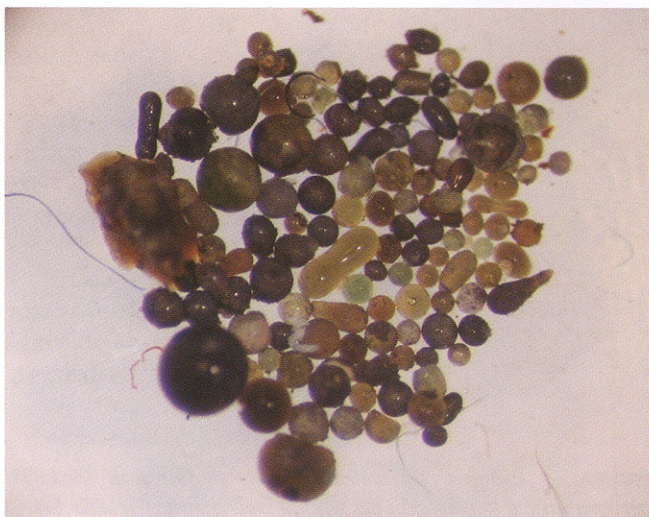


FIGURA 4. Esférulas de vidrio procedentes del regolito (suelo) lunar.

dad en las superficies heladas de la Antártida, y en desiertos como los del norte de África o el de Atacama (Chile). Sin embargo, apenas se recupera un 1% de las toneladas de material extraterrestre que alcanzan la superficie de la Tierra cada día.

Si previamente se había indicado que la mayor parte de los meteoritos proceden de los asteroides, también es cierto que un número mucho menor de ellos que alcanzan la superficie terrestre proceden de grandes impactos sobre planetas (Marte) o la Luna. Igual que existen criterios de distinta índole que permiten diferenciar las rocas terrestres de los meteoritos también existen criterios mineralógicos, estructurales, cosmoquímicos e isotópicos bien establecidos que permiten diferenciar aquellos que tienen un origen asteroidal de los meteoritos planetarios. Los meteoritos a los que se ha asignado un origen marciano se denominan SNCs, de acuerdo con las siglas de los tres primeros "ejemplares tipo": Shergotti, caído el 25 de agosto de 1865, Nakhla, caído el 28 de junio de 1911 y Chassigni, caído el 3 de octubre de 1915. Si hubiera que definir brevemente cuáles son los rasgos principales de los SNCs frente al resto, éstos son: *a)* tienen 1,3 Ga (o más jóvenes); *b)* tienen un mayor contenido en volátiles; *c)* presentan ratios Fe/Si vs. Ca/Si y Fe/Mn vs. Na/Si y Al/Si vs. Mg/Si diferenciales. Pero, sobre todo, la distribución de los gases atrapados en su interior coincide con la de la atmósfera de Marte.

También se distinguen los meteoritos de tipo lunaítico o "lunaitas" (procedentes de la Luna). Para su identificación fue fundamental el estudio de los más de 380 kg de muestras lunares que se recolectaron en las misiones Apolo. Gracias a ellas, hoy se pueden discriminar los principales tipos de rocas lunares, que son básicamente: 1) rocas gabroides de la serie ANT (Anortosita-Norita-Troctolita) y basaltos ricos en alúmina de las zonas elevadas. Edad: 4,6-4,0 Ga; 2) rocas basálticas ricas (KREEP). Edad: 4,0 y 3,8 Ga; 3) rocas basálticas de tipo FETI que extruyeron como coladas entre los 3,8 y 3,2 Ga y 4) numerosas variedades de brechas de impacto y depósitos piroclásticos dispersos en el regolito lunar (fig. 4).

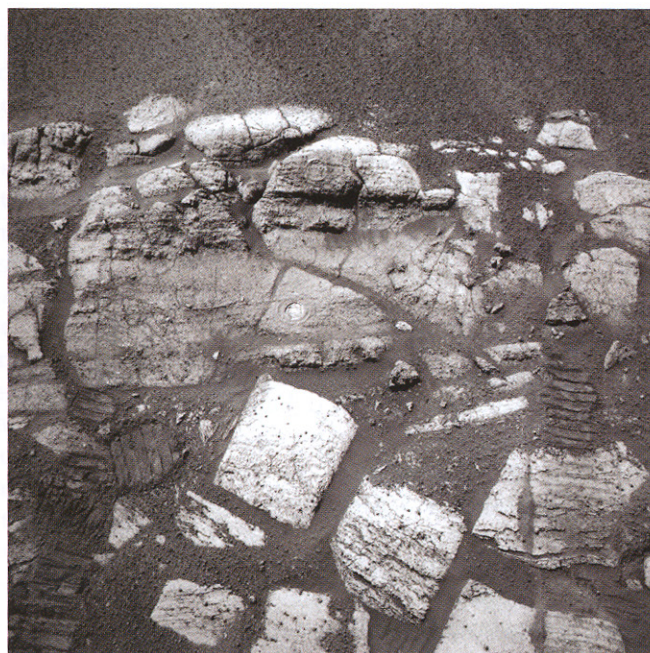


FIGURA 5. Impresionante aflojamiento de "El Capitán", zona de Meridiani Planum (Marte) fotografiado por la Opportunity (enero 2004) en el que se han encontrado importantísimas evidencias mineralógicas (hematites, jarosita) y texturales que confirman la existencia pasada de agua líquida, que en algún momento afectó a estos materiales. Foto: NASA.

Como hemos visto todos estos estudios relacionados con la geología planetaria se centran básicamente en la caracterización del polvo interplanetario y los meteoritos y del resultado (mineralógico, petrológico, textural, estructural, etc.) de sus impactos contra nuestro planeta. Este mismo año hemos sido testigos de varios éxitos de la NASA y de la ESA relacionados con la investigación de Marte, con la identificación y descubrimiento de varias fases minerales, como la jarosita indicativas de la presencia de agua líquida para su formación (figs. 5-8). Sin embargo, se puede hacer también mineralogía espacial de manera indirecta, abordando la investigación de determinadas zonas de nuestro planeta que podrían ser consideradas "modelos análogos" a lo

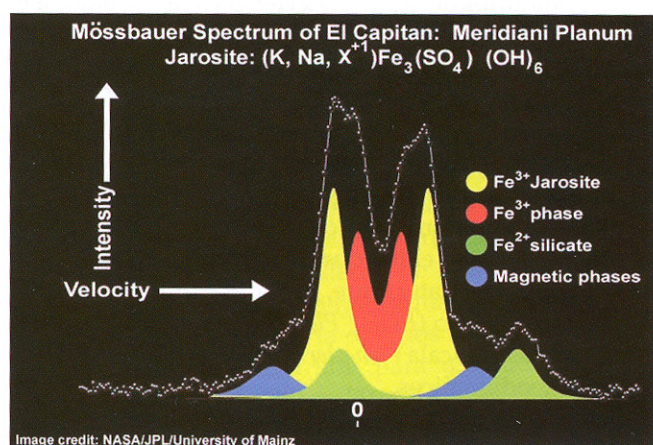


FIGURA 6. Espectro Mossbauer de la jarosita descubierta en "El Capitán", Meridiani Planum (Marte). Foto: NASA.

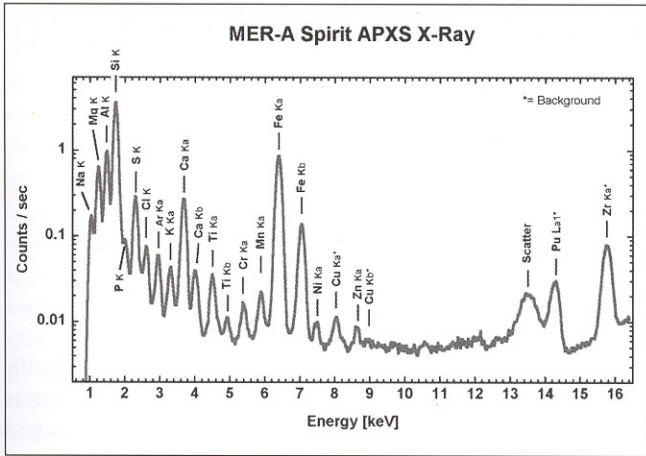


FIGURA 7. Distribución de elementos determinada por la sonda "Spirit" en el cráter Gusev de Marte.

que se espera encontrar en Marte, Venus, Europa u otros cuerpos planetarios de nuestro sistema solar. El caso de varias zonas de la Antártida es bien conocido y existen multitud de estudios que así lo demuestran, pero en España también disponemos de excelentes zonas muy interesantes como Río Tinto (fig. 9) o El Jaroso que han despertado el interés internacional de la NASA y muchos otros expertos internacionales.

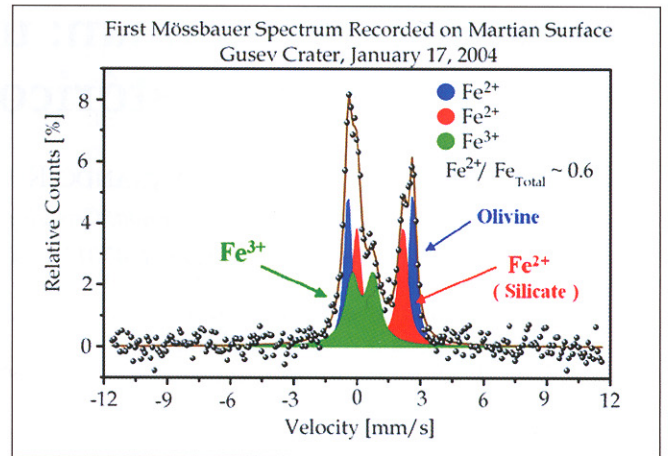


FIGURA 8. Espectros indicativos de olivino y silicatos de hierro obtenidos en el cráter Gusev de Marte. Foto: NASA.

La mineralogía espacial es una nueva disciplina que está tan sólo empezando a desarrollarse en nuestro país, pero nuestra riqueza geológica en tipologías de afloramientos de distinta edad y marcos geodinámicos y metalogénicos auguran un futuro muy prometedor en la identificación de nuevos "análogos", sobre la base también de estudios combinados de meteoritos asteroidales y planetarios, y sus impactos.



FIGURA 9. Detalle del agua en una zona rica en óxidos y sulfatos de hierro en Río Tinto (zona propuesta y actualmente en estudio como posible análogo de Marte).