

Astromineralogía y Mineralogía Espacial: Fundamentos, perspectivas científicas e importancia de los meteoritos

JESÚS MARTÍNEZ-FRÍAS¹, ROSARIO LUNAR² Y FERNANDO RULL^{1,3}

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

² Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de C.C. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid

³ Cristalografía y Mineralogía y Unidad Asociada CSIC-Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid

RESUMEN

Se realiza una revisión detallada de los conceptos de astromineralogía y mineralogía espacial, concretando sus ámbitos actuales de aplicación de acuerdo con su evolución histórica y científica. Se propone que los minerales constituyen los «ladrillos clave» de la materia en el universo; unidades básicas que nos ayudan a entender su funcionamiento a distintas escalas. Se describen los tipos principales de astrominerales y se evalúa la importancia de los minerales presentes en los meteoritos para entender los procesos desarrollados en el sistema solar. Por último, se plantea que la consolidación de la astromineralogía y mineralogía espacial se produce mediante la relación de la geología planetaria, la astrofísica y la astroquímica, sin olvidar el importantísimo papel que juegan las nuevas técnicas espectroscópicas, sobre todo para la realización de análisis de manera remota e «in situ».

PALABRAS CLAVE: astromineralogía, mineralogía espacial, meteoritos, exploración espacial

INTRODUCCIÓN

Aunque los términos Astromineralogía y Mineralogía Espacial puedan parecer redundantes en su significado, existen razones científicas de peso que, no sólo justifican esta doble denominación, sino que abren nuevas perspectivas sobre la esencia misma de lo que se debe o no considerar un mineral. Como se expondrá más adelante, la diferenciación de ambos términos: a) se corresponde con el «medio» en que los minerales se originan y distribuyen en el universo y b) es importante tanto en el ámbito de la geología planetaria como de la astrofísica y astroquímica. El espacio entre las estrellas no está vacío sino que se encuentra preñado de materia interestelar, con planetas, cuerpos planetarios de distintas dimensiones, asteroides, cometas, y partículas de polvo de distinto tamaño, composición y procedencia. Por ello, los minerales pueden considerarse los «ladrillos clave» de la materia en el universo; unidades básicas que nos ayudan a entender su funcionamiento a distintas escalas. Para alcanzar este objetivo, el ser humano tiene que explorar el Espacio, pero sin olvidar que una parte fundamental de las respuestas las podemos obtener en nuestro propio planeta. La mineralogía de la Tierra es crucial para determinar los parámetros físico-químicos y los contextos geológicos

«análogos» en los que se enmarcan los distintos tipos y combinaciones de paragénesis minerales existentes en otros lugares del universo.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CIENTÍFICA. ADECUACIÓN A LOS NUEVOS DESCUBRIMIENTOS

La mineralogía y la investigación espacial han sido campos científicos separados hasta hace aproximadamente 200 años, cuando 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. Ese momento fue clave para la mineralogía, a pesar de que, como se indica en Martínez-Frías y Barrera (2000) y Martínez-Frías et al. (2004), salvo contadas excepciones como Olbers en Alemania y Howard en Gran Bretaña, la respuesta de la comunidad científica fue prácticamente unánime en contra de las ideas de Chladni. A pesar del vigor científico de la época, los expertos llegaron a la conclusión de que la caída de los meteoritos sobre la Tierra era imposible y este comportamiento de no aceptación de un fenómeno de origen desconocido como real, simplemente por no ser entendido, retardó el desarrollo de la ciencia de los meteoritos en general y de todos sus aspectos relacionados (su mineralogía, petrología,

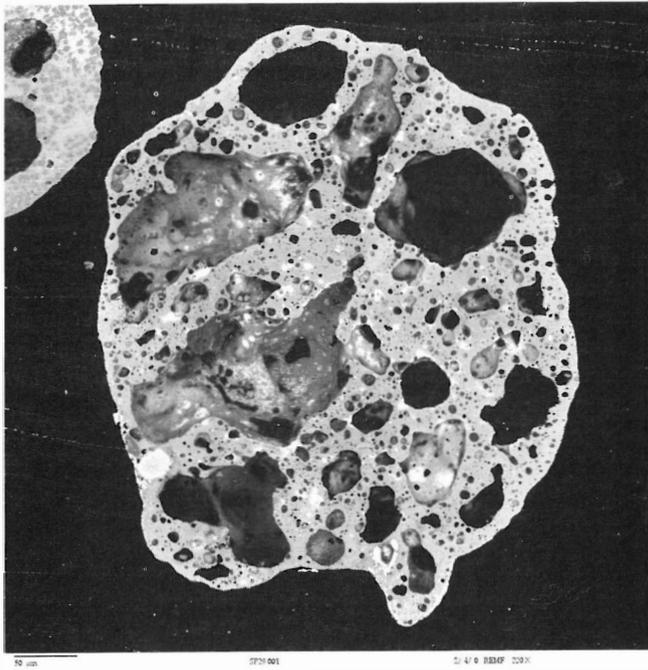


FIGURA 1: Micrometeorito escoriáceo encontrado en la Antártida. <http://remf.dartmouth.edu/micrometeorites/morescor/index.html>

geoquímica, etc.) en particular. 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 Aguila, 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 mineralógica y geoquímica en una euforia analítica casi sin precedentes. No fue hasta 1962 que este desarrollo científico tuvo un reflejo real en las instituciones oficiales. Este año la International Mineralogical Association (IMA) constituyó el Grupo de Trabajo de Mineralogía Cósmica (Engelhardt, 1963).

En definitiva, este proceso de transformación que hoy experimenta la mineralogía es parte de una evolución conceptual que ya se ha producido en otras áreas del conocimiento. De acuerdo con Martínez-Frías et al. (2004) 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 podría parecer algo extraño y novedoso ³incluso controvertido entre los científicos de la época ⁴, actualmente no sólo está aceptado con total normalidad, sino que constituye el pilar consolidado de numerosos descubrimientos recientes sobre el universo. Además, esta evolución de la mineralogía no es un proceso restringido exclusivamente a nuestra época. Hoy sabemos que el concepto de mineral ha sufrido a lo largo de la historia una serie de cambios y adaptaciones a los conocimientos de la época, especialmente durante el siglo XX. Tal y como indica Lunar (2006), el conocimiento de la naturaleza cristalina de los minera-

les y de aspectos cristalocquímicos, físicoquímicos y genéticos, han influido en las definiciones que a lo largo del tiempo se han establecido. Sin embargo, como sucede con muchas otras definiciones formales en Ciencia, formular una definición exacta no es tarea fácil. Desde una perspectiva clásica, los minerales son constituyentes naturales y homogéneos de la corteza terrestre. Son sustancias cristalinas, pero en algunos casos el grado de orden de la materia mineral puede llegar a ser muy escaso, prácticamente es amorfa. Se forman mediante procesos inorgánicos, pero a veces la interacción de animales y plantas es evidente en muchos de ellos. El mineral debe responder a una composición química definida que se pueda expresar mediante una fórmula, pero son muy frecuentes las sustituciones de elementos de características químicas parecidas, lo que hace variar las proporciones estequiométricas de una manera significativa, y los límites admitidos para tales variaciones no están en general establecidos y así, las excepciones e indeterminaciones invalidan en rigor cualquier definición. Una de las definiciones más aceptada a pesar de las limitaciones, es la propuesta en 1923 por la Sociedad Americana de Mineralogía. Dice así: «Una especie mineral es una sustancia natural, homogénea, de origen inorgánico, con composición química definida o variando entre ciertos límites, y que posee propiedades físicas características y normalmente una estructura cristalina». De las distintas definiciones que se han establecido, existe acuerdo al menos en que el mineral debe ser un compuesto natural, homogéneo, cristalino y con composición química definida, pero no fija. Recientemente, la Comisión de Nomenclatura Mineral y Nuevos Minerales (CNMMN) de la IMA, a petición de la comunidad mineralógica, ha dado una nueva definición de mineral, compatible con los recientes avances tecnológicos: «Una sustancia mineral es un sólido natural formado por procesos geológicos, bien la Tierra o en cuerpos extraterrestres. Una especie mineral es una sustancia mineral con composición química y propiedades cristalográficas bien definidas, y que merece un nombre único» (Nickel, 1995, Nickel y Grice, 1998). Pero, tal y como indica Dorschner (2003), sería deseable modificar esta definición, sobre todo cuando se abordan los problemas del polvo cósmico, extendiendo el término de «sustancia mineral» y ampliando el concepto de «procesos geológicos» como «procesos específicos de formación mineral». De esta manera se describirían más apropiadamente fases minerales que aparentemente se encuentran individualizadas en nubes de polvo cósmico alrededor de estrellas o en otros contextos similares. Este mismo autor sugiere que otra posible ampliación o actualización de la definición estaría relacionada, con el término «cristalino». En el medio interestelar son muy comunes las sustancias amorfas y algunos mineralogistas se resisten a aceptar que las sustancias amorfas son auténticas especies minerales. Esto sobre todo se debe a la dificultad para determinar si la sustancia es un auténtico compuesto químico o una mezcla y a la imposibilidad de caracterizarla completamente; el término *mineraloide* se aplica en ocasiones a dichas sustancias. Afortunadamente el avance de las técnicas analíticas, especialmente espectroscópicas (IR, Raman, NMR, etc.) está haciendo que ello cambie ya que permiten, a menudo de manera muy efectiva, la identificación inequívoca de fases amorfas. Otro problema relacionado son las denominadas *sustancias metamicticas*: aquellas que en algún momento fueron cristalinas, pero que su cristalinidad se ha destruido por la radiación ionizante. Si realmente se verifica que

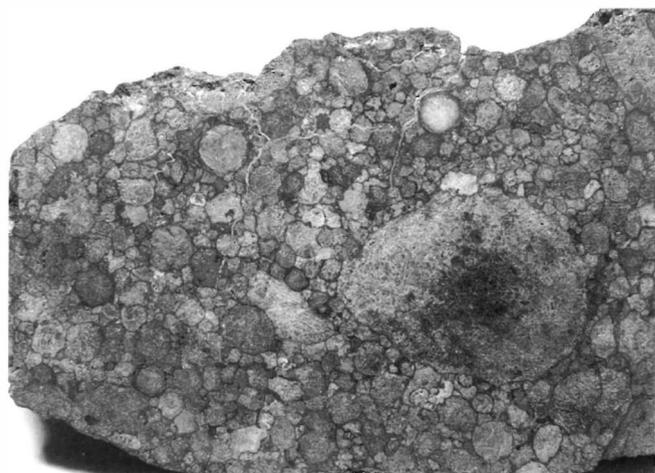


FIGURA 2: Meteorito de tipo condritico (condrita NWA 2892 (H/L3) <http://www.meteorites.com.au/features/nwa2892images.html>)

estas sustancias se formaron por procesos geológicos normalmente se aceptan como especies minerales. Actualmente, con el uso de determinadas técnicas, también es posible «restaurar» la cristalinidad original e identificar qué eran.

Existen varios modelos que intentar explicar la formación de granos de polvo en el espacio (Gail, 2003). Desde el punto de vista teórico, los cálculos de composiciones de equilibrio químico de mezclas sólido-gas han demostrado ser herramientas muy útiles. Sin embargo, esto debe entenderse sólo como una primera aproximación ya que se asume que la mayor parte de los sistemas reales *no* se encuentran en estado de equilibrio químico. Para el caso de sustancias puras, el problema de determinar el equilibrio químico entre varias especies en una mezcla, con una presión total p y temperatura T y un número de moles totales de los elementos, es un problema típicamente estándar de termodinámica. Para este problema el estado de equilibrio corresponde al mínimo de la función de Gibbs $G(p, T, n_i)$ con respecto a las variaciones de las funciones molares n_i de todas las especies gaseosas y sólidas i que pueden formarse a partir de los elementos contenidos en el sistema. Con respecto al proceso de crecimiento de los granos de polvo, la evaporación y crecimiento de un ensamblaje de granos de polvo viene determinado por dos procesos básicamente diferentes (Gail, 2003): a) los que extraen o añaden material de la fase gaseosa, desde o a la superficie de un grano y b) procesos de transporte en la fase gaseosa que, bien aportan el material necesario para el crecimiento de las partículas, o se llevan el material evaporado de los granos. Este mismo autor propone que el proceso más simple de crecimiento de granos de polvo en el espacio es aquel donde la composición química del condensado es la misma que la del vapor, como por ejemplo la condensación de átomos de hierro dentro de hierro sólido o la de moléculas de H_2O en el hielo. Esto es lo que se denomina crecimiento homomolecular, en contraste con el crecimiento heteromolecular, donde el vapor tiene una composición química diferente de la del sólido. Se asume que, entre los abundantes minerales cósmicos, solamente el hierro se forma por crecimiento homomolecular. Por el contrario, todos los compuestos silicatados y los de aluminio y calcio se descomponen durante la evaporación y el crecimiento se produce debido a procesos heteromoleculares.

La definición de *astrominerales* se aplica a aquellos materiales de origen presolar que se encuentran en materiales meteoríticos primitivos que ya existían antes del colapso de la nebulosa solar. Estos materiales pueden preservar granos circunestelares, granos formados en explosiones de supernovas y granos formados o modificados dentro del medio interestelar (incluyendo granos que estaban presentes en la nube molecular premolar). Los astrominerales también pueden encontrarse en meteoritos químicamente primitivos (ej. condritas carbonáceas), micrometeoritos polares (Fig.1) y partículas de polvo interplanetario (IDPs) (Bradley, 2003). El término *mineralogía espacial* es mucho más amplio (y también se ha utilizado de manera más ambigua) refiriéndose normalmente a la mineralogía común de los meteoritos (Figs.1,2), sin esta connotación temporal primigenia y a minerales identificados en otros planetas (ej. hematites y jarosita de Marte, etc. Fig. 3) o minerales lunares. La colaboración científica entre geología planetaria, astrofísica y astroquímica resolverá en el futuro algunos conflictos terminológicos, que en parte se deben al desarrollo aún incipiente de la mineralogía de la materia extraterrestre, aunque los avances de los descubrimientos que se vienen produciendo implicarán necesariamente continuas revisiones y actualizaciones.

Los astrominerales presentes en IDPs incluyen: a) materia orgánica, siendo el carbono predominantemente amorfo y parcialmente grafitico; b) nano-diamantes: que constituyen el tipo más abundante de granos presolares en meteoritos condriticos, con un tamaño de entre 1 a 10 nm de diámetro; c) otros granos presolares presentes en meteoritos muy primitivos: diamantes, carburo de silicio, grafito, corindón y nitruro de silicio; d) silicatos, principalmente

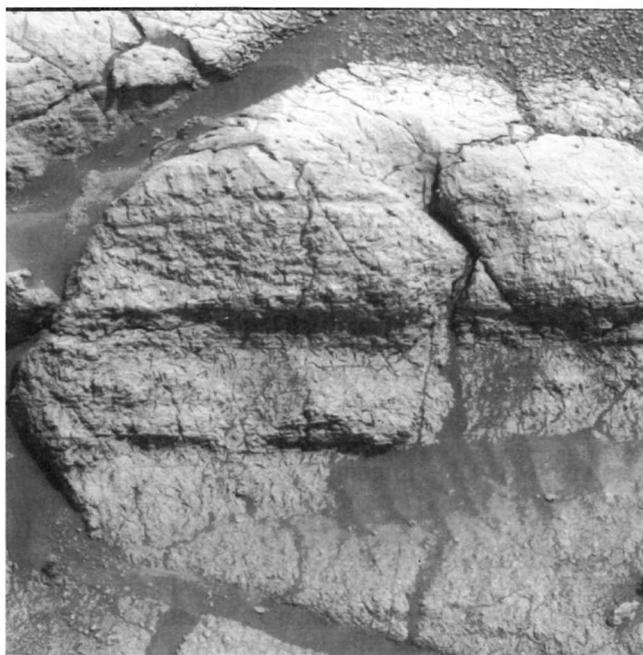


FIGURA 3: Imagen tomada en Marte (zona de Meridiani Planum) por la cámara panorámica del robot Opportunity (Mars Exploration Rover). Se muestra un detalle del afloramiento denominado «El Capitán». Obsérvese la laminación paralela y la existencia de diminutas esferas, principalmente de hematites. En este afloramiento es donde se descubrió por primera vez la jarosita marciana.

forsterita y enstatita y silicatos vítreos conocidos como GEMS (*glass with embedded metal and sulfides*), y e) sulfuros de Fe-Ni, principalmente pirrotina pobre en Ni, pentlandita, troilita, y esfalerita. Recientemente se ha descubierto un sulfuro de Fe-Ni con estructura cúbica de tipo espinela, con una composición similar a las de la pirrotina y pentlandita, aparentemente cercana a la pirrotina hexagonal.

IMPORTANCIA MINERALÓGICA DE LOS METEORITOS

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 (Muñoz Espadas et al. 2005). 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 (Figs 1 y 2). A fecha de diciembre 1999 se ha observado caer unos 1.000 meteoritos (Grady, 2000), 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.

Antes de 1962 se habían reconocido unos 40 minerales en meteoritos. En 1972 otros 47 minerales fueron añadidos a los anteriores. Hoy, sabemos que se han descrito unos 300 minerales, número que continúa incrementándose de acuerdo con los nuevos estudios. Aunque no es el objetivo de esta contribución describir y explicar pormenorizadamente los meteoritos y su clasificación (para más información, ver por ejemplo Wasson, 1974, 1985, Buchwald, 1975, Dodd, 1981, Kerridge and Matthews, 1988, Papike, 1998, McSween, 1999, Grady, 2000, Norton, 2002, Russell and Grady, 2002, Hutchison, 2004, Martínez-Frías y Madero 2005, entre otros), la información tipológica básica sobre su clasificación evidencia su complejidad mineralógica y geoquímica, incluso dentro de cada categoría y grupo específicos. Por ello, no es realmente correcto hablar, de manera general, de mineralogía de meteoritos. Si nos detenemos, por ejemplo en los lititos, y dentro de ellos, en las condritas, y dentro de ellas, en un determinado grupo, veremos que no es apropiado intentar realizar una descripción mineralógica de conjunto, sin especificar si nos referimos a los cóndrulos (Fig.4), a las CAIs, a la matriz, o a otras inclusiones. Nos centraremos además, 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.

Sobre la base de su contenido en dos tipos de materiales, hierro-níquel metálico y silicatos, existen tres categorías básicas de meteoritos: sideritos (Irons), prácticamente el 100% metal, siderolitos (Stony irons), casi iguales proporciones de metal y silicatos, y lititos

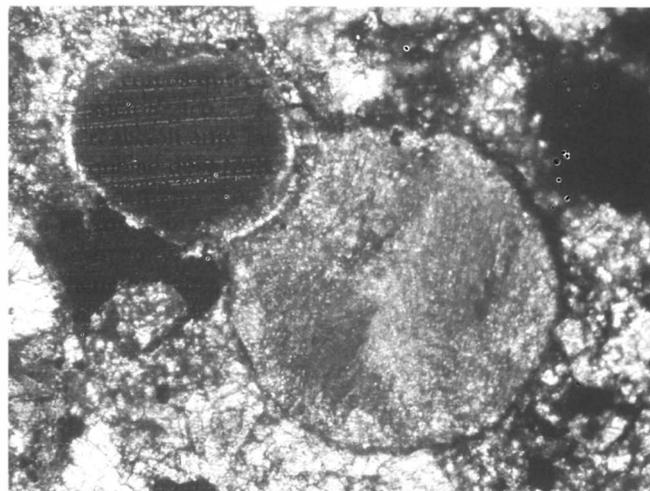


FIGURA 4: Detalle al microscopio de polarización de cóndrulos interpenetrados (condrita H4 de Cañellas); diámetro del cóndrulo de mayor tamaño: 400 µm. (Muñoz Espadas, 2003)

o aerolitos (Stony), principalmente silicatos. Estos últimos, comprenden a su vez dos subgrupos importantes: condritas y acondritas. Las condritas son, con mucho, las más numerosas y probablemente también las más importantes por muchas distintas razones (incluso de tipo astrobiológico) y toman su nombre de los cóndrulos, que pueden definirse 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. 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 (Fig.4), 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 (Muñoz-Espadas et al. 2005). 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 4.560 M.a. por Rb-Sr y Pb-Pb en el meteorito de Allende (Chen y Wasserburg, 1981). Aunque su forma es variable, la mayoría de las CAIs presentan una estructura concéntrica formada por capas de diferentes minerales refractarios (ej.: corindón, hibonita, perowskita, anortita, melilita y espinela). Sus minerales y texturas se han reproducido experimentalmente, calentando a temperaturas de hasta 1.700°C, y enfriando posteriormente a un ritmo de unas pocas decenas de grados por hora (Brearley y Jones, 1998; McSween, 1999).

Las condritas (Fig.2) 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

(McSween, 1999; Bischoff, 2001a, b). Una clase adicional, las condritas Kakangari (K) no está aún reconocida por todos los autores (Weisberg et al., 1996).

Las acondritas son lititos sin cóndrulos. El término se refiere desde a condritas extrañas, intensamente recristalizadas 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. De acuerdo con Bischoff (2001a y b), 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 de cristales o fragmentos de cristales de olivino magnésiano en una matriz continua de Fe, Ni metálico. Los mesosideritos pueden definirse como mezclas mecánicas, más o menos recristalizadas, 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).

CONSIDERACIONES FINALES

Los estudios de astromineralogía y mineralogía espacial están consolidándose mediante la relación de la geología planetaria, la astrofísica y la astroquímica, sin olvidar el importantísimo papel que juegan las nuevas técnicas espectroscópicas, sobre todo para la realización de análisis de manera remota e «in situ». Es cierto que muchos conceptos sobre estos temas se están abordando sin disponer aún de modelos genéticos apropiados en nuestro sistema solar, que expliquen claramente el origen y la evolución de las distintas fases minerales en sus distintos contextos. Además, por una parte la Tierra tiene muchas de las claves para entender los procesos desarrollados en otros mundos, pero se han descubierto también nuevos escenarios mineralogenéticos en nubes interestelares, que implican la revisión de algunos fundamentos sobre formación mineral, basados exclusivamente en modelos planetarios terrestres. A la información procedente de los meteoritos, IDPs, etc., hay que unir los datos mineralógicos obtenidos gracias a las misiones espaciales a la Luna, Marte, los satélites helados y otros cuerpos planetarios. Se abre un futuro muy prometedor para la mineralogía extraterrestre, con nuevas preguntas a resolver; todo un desafío científico y tecnológico que ya es imparable y que trasciende las fronteras de la Tierra.

REFERENCIAS

- Bradley, J. (2003) The astromineralogy of interplanetary dust particles. En: Henning, Th (ed.) *Astromineralogy*, Springer, 281 p.
- Chen, J.H. y Wasserburg, G.J. (1981). The isotopic composition of uranium and lead in Allende inclusions and meteoritic phosphates. *Earth and Planetary Science Letters*. 52, 1-15.
- Bischoff, A. (2001a). Fantastic new chondrites, achondrites, and lunar meteorites as the result of recent meteorite search expeditions in hot and cold deserts. *Earth, Moon and Planets*. 85-86, 87-97.
- Bischoff, A. (2001b). Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts. *Planetary and Space Science*. 49, 769-776.
- Brearely, A.J. y Jones, R.H. (1998). Chondritic Meteorites. En *Reviews in Mineralogy*. Vol. 36: *Planetary Materials*. (ed. J.J. Papike). American Society of Mineralogy. Washington. 3-1-3-398.
- Buchvald, V.F. (1975) *Handbook of iron meteorites*, 3 volumes.. Berkeley, CA: University of California Press, 1418 p.
- Dodd, R.T. (1981) *Meteorites: A petrologic chemical synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 368 p.
- Dorschner, J. (2003) From dust astrophysics towards dust mineralogy. A history review. En: Henning, Th (ed.) *Astromineralogy*, Springer, 281 p.
- Engelhardt, W.V. (1963) Probleme der kosmischen Mineralogie. In: *Tübinger Universitätsreden* No. 16.
- Gail, H.P. (2003) Formation and evolution of minerals in accretion disks and stellar outflows. En: Henning, Th (ed.) *Astromineralogy*, Springer, 281 p.
- Grady, M.M. (2000). *Catalogue of meteorites: with special reference to those represented in the collection of the Natural History Museum, London*. Cambridge University Press. Cambridge. 5ª ed. 689 pp.
- Hutchison, R. (2004) *Meteorites. A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge Planetary Science. Cambridge University Press, 506 p.
- Kerridge, J.F. y Matthews, M.S. (1988) (eds.) *Meteorites and the Early Solar System*, Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1269 p.
- Lunar, R. (2006) Creciendo hacia el espacio próximo a la Tierra. De la mineralogía y recursos terrestres a la exploración planetaria. *Discurso Toma de Posesión*, Real Academia de Doctores de España, 112 p.
- Martínez-Frías, J. y Barrera J.L. (2000) Duros como el granito In: Gregori J (Coord.) *Esto es imposible*. Editorial Aguilar, Madrid, 191-223.
- Martínez-Frías, J., Rull, F. & Lunar, R. (2004) Mineralogía espacial: De la materia primigenia a la exploración de Marte. *Macla* 1: 11-18.
- Martínez-Frías, J y Madero, J. (2005) (Coord.) *Meteoritos y Geología Planetaria*. Ediciones Provinciales 23, Diputación Provincial de Cuenca, Cuenca, 304 p.
- McSween, J.Y. Jr. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press. Cambridge. 310 pp.
- Nickel, E.N. (1995) *Canad. Min.* 33, 689.
- Nickel, E.N. y Grice, J.D. (1998) The IMA Commission on New Minerals and Mineral Names: Procedures and Guidelines on Mineral Nomenclature. *Can. Mineral.* 36, 913-926.
- Muñoz-Espadas, M.J. (2003). Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y

- LL5. Tesis doctoral. UCM. 324 pp.
- Muñoz-Espadas, M.J., Martínez-Frías, J. Y Lunar, R. (2005). Las Condritas. En: Martínez-Frías, J. Y Madero, J. (2005) (Coord.) Meteoritos y Geología Planetaria. Ediciones Provinciales 23, Diputación Provincial de Cuenca, Cuenca, 304 p.
- Norton, R.C. (2002) The Cambridge Encyclopedia of Meteorites. Cambridge University Press, 354 p.
- Papike, J.J. (1998) Planetary Materials. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1034 p.
- Russell, S. and Grady, M. (2002) Meteorites, 2nd edition. London, The Natural History Museum, 60 p.
- Weisberg, M.K., Prinz, M., Clayton, R.N., Mayeda, T.K., Grady, M.M., Franchi, I., Pillinger, C.T. y Kallemeyn, G.W. (1996). The K (Kakangari) chondrite grouplet. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 60, 4253-4263.

- Wasson, J.T. (1974) Meteorites. Classification and properties, New York, Springer-Verlag, 316 p.
- Wasson, J.T. (1985) Meteorites: Their record of Early Solar System History, New York, W.H. Freeman, 267 p.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a la Sociedad Española de Mineralogía su apoyo institucional por impulsar el desarrollo de la astromineralogía y mineralogía espacial en España. Asimismo, deseamos expresar nuestro agradecimiento al Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha, en particular a su director, Jesús Madero, con cuya ayuda hemos contado en todo momento. Finalmente, gracias al Centro de Astrobiología, por su colaboración en esta iniciativa.