

Las acondritas: meteoritos de otros mundos

Achondrites: meteorites from other worlds

CARLES E. MOYANO-CAMBERO Y JOSEP M. TRIGO-RODRÍGUEZ

Grupo de Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias. Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), Campus UAB, Facultat de Ciències, C5-p2, 08193 Bellaterra (Barcelona), Spain. moyano@ice.csic.es, trigo@ice.csic.es

Resumen Las acondritas son una clase de meteoritos diferenciados que proceden de la superficie de cuerpos planetarios. Cuando un cuerpo planetario sufre un impacto de grandes dimensiones una cantidad importante de material es eyectado fuera de su campo gravitatorio. Esas rocas vagarán por el espacio millones de años hasta alcanzar un nuevo cuerpo como puede ser la Tierra. Las acondritas son pues la evidencia de que existen rutas de transporte dinámico de materiales entre los planetas y, además, ocurre de manera natural. De esta forma llegan a nuestro planeta rocas de la Luna, Marte o Vesta. Sus meteoritos poseen generalmente naturaleza ígnea, formados como consecuencia de procesos magmáticos. Si tales rocas alcanzan la atmósfera de la Tierra con la adecuada geometría y a baja velocidad relativa, sobreviven produciendo algunos de los más fascinantes meteoritos que conocemos. En este artículo pretendemos ejemplificar la pléyade de información que se extrae del análisis químico y mineralógico de estas rocas. No sólo podemos conocer algunos de los cuerpos planetarios de los que proceden sino también datar procesos geofísicos acaecidos en ellos y asimismo ponderar las colisiones que los impulsan en órbita solar.

Palabras clave: Cuerpo planetario, acondrita, brecha, howardita, eucrita, diogenita, shergottita, nakhlita, chassignita, acapulcoide, lodranita, winonaita, ureilita, aubrita, brachinita, angrita, lunar, marciano.

Abstract *Achondrites are a class of differentiated meteorites coming from diverse planetary bodies surfaces. When a planetary body suffers a big impact an important part of its surface is ejected out of its gravity field. These rocks will wander through space for millions of years until reaching a new body like e.g. the Earth. Thus, achondrites provide evidence for dynamic transport among planets proving it occurs naturally. Rocks from the Moon, Mars or Vesta arrive at our planets in this way. Their meteorites are usually of an igneous nature, being formed by magmatic processes. If these rocks reach the atmosphere of the Earth with the right geometry and a low relative velocity, they will survive as some of the most fascinating meteorites that we know. In this article we wish to exemplify the amount of information that is extracted from the chemical and mineralogical analysis of these rocks. We are not only inferring from which parent bodies they come, but also dating the geophysical processes that took place and also quantifying the impact energy of the collision that drive them into solar orbit.*

Keywords: *Planetary body, achondrite, breccia, howardite, eucrite, diogenite, shergottite, nakhlite, chassignite, acapulcoite, lodranite, winonaita, ureilite, aubrite, brachinite, angrite, lunar, Martian.*

CLASES DE METEORITOS

El origen extraterrestre de los meteoritos fue ampliamente reconocido durante el siglo XIX, tras un largo período de debate y discusión en los círculos científicos (véase el artículo de J. Llorca en este monográfico). Pronto fue evidente que los objetos que llegaban a nuestro planeta tenían orígenes distintos o bien se habían formado en circunstancias diferentes. Así pues fue necesario establecer una

serie de principios para clasificar este tipo de cuerpos, y con el tiempo esta clasificación ha evolucionado hasta la que tenemos actualmente. Como ya se ha explicado en el artículo introductorio de este monográfico, una clasificación de meteoritos básica pero coherente se basa en el grado de procesado que estos objetos han sufrido en sus cuerpos progenitores. Asimismo, su mineralogía y composición química nos sirven para distinguir con más detalles las diferentes familias. (Weisberg et al., 2006).

Los meteoritos diferenciados que trataremos en este artículo son aquellos que provienen de un cuerpo planetario de varios cientos de kilómetros de diámetro, y que en consecuencia habrán sufrido diferenciación química y estarán formados por minerales secundarios de naturaleza ígnea. Tales procesos fundieron los minerales primarios, motivo por el cual estos objetos no conservan cóndrulos en su interior. En general estos meteoritos alcanzan la Tierra como consecuencia de las colisiones que han sufrido diversos cuerpos planetarios en los últimos 100 millones de años (Eugster et al., 2006). Esto acontece debido al proceso de craterización mismo que permite impulsar en órbita heliocéntrica algunos de los materiales de la superficie del cuerpo impactado por el proyectil (Melosh, 1989, véase también el artículo de este monográfico, de C. E. Moyano-Camero.

Volviendo a la naturaleza de los meteoritos acondriticos, en los cuerpos planetarios de los que provienen se produjo la segregación de sus componentes por afinidades químicas (proceso conocido como diferenciación), desplazando, en general, los materiales más pesados hacia el interior de los cuerpos y los más ligeros hacia su superficie. Posteriormente estos materiales fundidos recrystalizaron para formar nuevos minerales que mantuvieron cierta memoria química de sus componentes primordiales, aunque los cóndrulos se destruyeron en el proceso. En función de los materiales que componen a los meteoritos procedentes de estos cuerpos progenitores suficientemente grandes, se los puede clasificar en acondritas (meteoritos rocosos sin cóndrulos), meteoritos metalorocosos (mezcla de roca y metal) o meteoritos metálicos (compuestos de metal). En este artículo nos centraremos en el primer tipo, las acondritas, que provienen de las capas externas de los cuerpos progenitores, mientras que los meteoritos metalorocosos y metálicos provienen del manto interno y el núcleo de estos cuerpos, respectivamente.

Las acondritas son el producto ígneo de la recrystalización de minerales en la corteza de cuerpos que han sufrido un proceso de diferenciación. Al provenir de capas exteriores de los cuerpos progenitores generalmente son muy pobres en metal y están formadas principalmente por silicatos como el olivino, piroxenos y feldespatos (Tabla I). Los embriones pla-

netarios adquirieron suficiente masa como para sufrir un proceso de diferenciación química, formándose a partir de la agregación de múltiples planetesimales, y llegando a ser así bloques de dimensiones kilométricas consolidados en los primeros millones de años del Sistema Solar. Estos bloques iniciales de los planetas se formaron en diferentes regiones del disco protoplanetario, por lo que sus composiciones, y por extensión las de los cuerpos a que dieron origen, eran variadas. Asimismo las dimensiones finales del cuerpo, resultado de la agregación de planetesimales, serán de extrema importancia para definir la temperatura y el tiempo de diferenciación química en cada caso. Por lo tanto, en función del origen del cuerpo progenitor del que procedan las acondritas se pueden dividir en varios grupos.

Las acondritas procedentes de la Luna y Marte son probablemente las más famosas, ya que provienen de los dos cuerpos del Sistema Solar que hemos estudiado en mayor detalle, dada su proximidad y la relativa facilidad de acceder a sus superficies. Sin embargo, estos tipos de acondritas no son, ni mucho menos, las más numerosas. Existen múltiples acondritas cuyo cuerpo progenitor aún desconocemos o que incluso pueden tener su origen en objetos que se desintegraron hace mucho. Por otro lado están las acondritas basálticas más habituales, divididas en howarditas, eucritas y diogenitas y que comúnmente se conocen como acondritas HED (Tabla II). Este último tipo muy probablemente tenga su origen en el asteroide 4 Vesta (en adelante omitiremos su número de catálogo), y son en realidad mucho más numerosas que las acondritas marcianas y lunares juntas. Pasaremos a continuación a describir ese grupo de acondritas.

ACONDRIAS HED: POSIBLES MUESTRAS DEL ASTEROIDE VESTA

Las acondritas HED son los meteoritos diferenciados basálticos que más comúnmente podemos hallar en las colecciones terrestres. Dada su edad de cristalización (el tiempo que hace que solidificaron después de verse fundidas por el calor consecuencia de la desintegración radioactiva), sabemos que su cuerpo progenitor debió experimentar diferenciación. Según sistemas radioisotópicos, la cristalización debió tener lugar hace entre 4.550 y 4.400 millones de años, lo que indica que los procesos magmáticos empezaron tempranamente y duraron poco, ya que el cuerpo se enfrió en un tiempo relativamente corto. El asteroide Vesta tiene un tamaño que se ajusta muy bien a estas condiciones (Fig. 1).

No cabe duda de que howarditas, eucritas y diogenitas provienen de un mismo cuerpo planeta-

Tabla I. Principales minerales hallados en meteoritos. ¹X representa comúnmente Ca, Na, Fe²⁺ o Mg; Y suele ser Cr, Al, Fe³⁺, Mg, Mn, Sc, Ti, V o Fe²⁺. Augita, pigeonita, hiperstena, diópsido o enstatita son minerales que pertenecen a esta categoría. ²Se clasifica según esté más próximo a la forsterita (Mg₂SiO₄) o a la fayalita (Fe₂SiO₄). ³Se clasifica según esté más próximo a la anortita (CaAl₂Si₂O₈) o a la albita (NaAlSi₃O₈).

Tabla II. Diferentes grupos de acondritas provenientes de un cuerpo conocido. El número hallado de cada tipo crece constantemente, por lo que es meramente representativo de la diferencia en cantidad de meteoritos recuperados. Además hay que tener en cuenta que en algunos casos diversos meteoritos son trozos de un mismo meteorito que se fragmentó en la atmósfera o en el espacio. Tales procesos dan lugar a meteoritos emparentados (pairing en inglés).

MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA
Piroxenos ¹	XY(Si,Al) ₂ O ₆
Olivino ²	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄
Plagioclasa (y masquelinita) ³	NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Cromita	(Fe, Mg)Cr ₂ O ₄
Magnetita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄
Ilmenita	FeTiO ₃

TIPO	FAMILIAS	CUERPO PROGENITOR	NÚMERO CONOCIDO (HASTA ENERO DE 2014)
Acondritas marcianas	Shergottitas, nakhlitas y chassignitas, principalmente	Marte	~ 130
Acondritas HED	Howarditas, eucritas y diogenitas	Vesta	~ 1.400
Acondritas lunares	Anortositas, basálticas o mezcla (brechas), principalmente	Luna	~ 170

netarios adquirieron suficiente masa como para sufrir

rio, a pesar de ser diferentes. Se pueden establecer

relaciones químicas y mineralógicas emparentando estas tres clases de acondritas, pero resulta realmente definitivo que poseen similares cocientes isotópicos de oxígeno. Esto último es especialmente importante, ya que se considera que los cuerpos planetarios o protoplanetarios tienen su origen en distintas zonas del Sistema Solar, y heredan por lo tanto de los bloques que los forman una abundancia en isótopos de oxígeno que es característica y única para cada cuerpo progenitor. Así, el hecho de que las acondritas HED compartan similares cocientes isotópicos de oxígeno indica que provienen del mismo cuerpo planetario. Por si eso no fuera suficiente, es común en howarditas hallar cristales y fragmentos de eucritas y diogenitas.

Sin embargo la órbita de Vesta no se halla próxima a ninguna resonancia orbital que pueda enviar sus fragmentos a la Tierra, por lo que puede sorprender que este asteroide sea el cuerpo progenitor de las acondritas HED. Sin embargo, dada la gran cantidad de meteoritos de este tipo que se han recuperado, sabemos que debe existir un sistema viable para transportarlos hasta nuestro planeta. Efectivamente existe un mecanismo creado a lo largo de los eones, como consecuencia del procesado colisional de este auténtico embrión planetario (Binzel y Xu, 1993). Vesta posee, por ejemplo, un enorme cráter denominado Rheasilvia que con sus 505 km de diámetro se ubica en el hemisferio sur, y que es el legado fósil de una gran colisión con otro asteroide que lanzó grandes bloques de Vesta en órbita heliocéntrica (Russell et al., 2012). Tales fragmentos han migrado a lo largo de decenas de millones de años a otras zonas del cinturón principal de asteroides gracias a procesos no gravitatorios en los que pierden energía orbital (Morbidelli et al., 2002). De hecho, se han identificado diversos cuerpos menores en esta región, algunos no sólo con similares espectros de reflexión sino relacionados dinámicamente con Vesta, que muestran reflectividades prácticamente idénticas a las obtenidas en las diferentes litologías de este asteroide y en los meteoritos HED. Algunos de estos cuerpos, a los que llamamos Vestoides, se encuentran próximos a resonancias, lo que los convierte en las posibles fuentes de los meteoritos HED que llegan a nuestro planeta.

Como ya se ha dicho las howarditas aparentemente representan una mezcla de eucritas y diogenitas, siendo por lo tanto brechas polimícticas (fragmentos angulosos de varios tipos de roca o minerales unidos mediante un cemento o matriz de grano fino). Están formadas mayoritariamente por ortopiroxenos y plagioclasas pobres en sodio (ver Tabla I). Las eucritas por su lado son lavas basálticas similares a la de la Tierra, pero menos oxidadas y con una estructura cristalina peculiar en la que la plagioclasa rica en calcio encierra piroxenos pobres en calcio. Sin embargo, es más común en estos meteoritos hallar plagioclasas ricas en calcio y piroxenos ricos en metal. Por último, las diogenitas son ricas en grandes cristales de ortopiroxenos, que podrían formarse como rocas acumuladas y solidificadas en el fondo de cámaras magmáticas, lo cual es relevante al plantear una posible etapa inicial de Vesta con un magmatismo considerable.

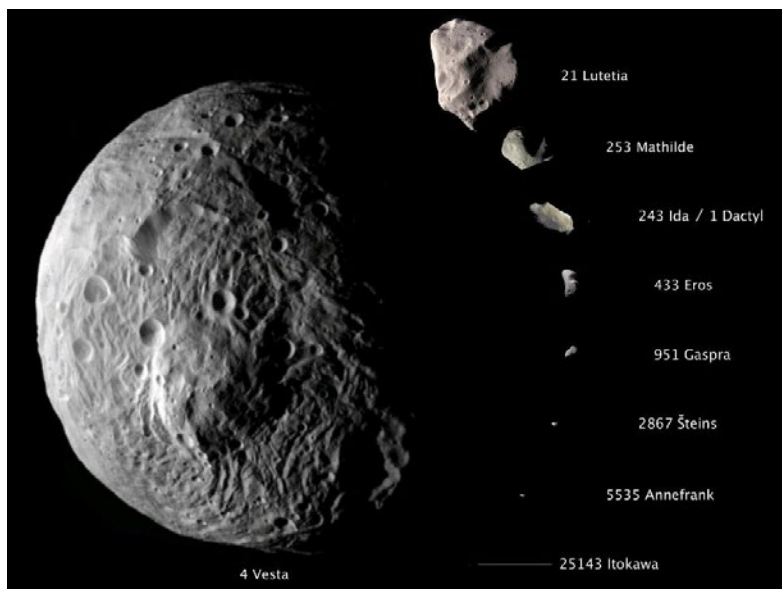


Fig. 1: Vesta comparado con otros asteroides del cinturón principal. A modo de escala, el diámetro medio de Vesta es de 525 km mientras que el de 5535 Annefrank posee un eje mayor de unos 6 km. Itokawa apenas posee 400 metros de eje mayor. (Imagen: DAWN/NASA-JPL).

Entre las caídas de acondritas HED cabe destacar la de la eucrita Puerto Lápice, que cayó a las 6 de la tarde del 10 de mayo de 2007 cerca del municipio homónimo, en Castilla-La Mancha, siendo estudiada por la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (Llorca et al., 2009; Trigo-Rodríguez et al., 2009, véase Fig. 2).

Fig. 2: Las diferentes litologías que se evidencian en la eucrita Puerto Lápice.



ACONDITAS LUNARES: TRANSPORTE URGENTE DESDE LA LUNA

Los meteoritos lunares son, como su nombre indica, aquellos que nos llegan desde nuestro satélite. Dado el tamaño de la Luna, con un radio de 1.738 km, fue lo bastante grande para sufrir diferenciación y por lo tanto sus meteoritos son de naturaleza acondrítica. Sin embargo, la Luna experimentó, dadas sus pequeñas dimensiones, un enfriamiento mucho más rápido, conservando así buena parte de los rasgos químicos primordiales de los cuerpos de los que se formó (Papike et al., 1998). Más allá de este hecho, las acondritas lunares son especialmente interesantes como representación de la variada litología de la superficie de la Luna, a diferencia de las muestras de las misiones Apolo, que provienen todas de puntos muy próximos.

Tabla III. Meteoritos lunares clasificados según su tipo.

GRUPO	NÚMERO CONOCIDO (HASTA ENERO DE 2014)
Anortositas	69
Lunares (sin clasificar)	41
Brechas feldespáticas	38
Basálticas	16
Gabbroicas	6
Basálticas y anortosíticas	2
Brechas basálticas	2
Noritas	1
Brechas basálticas y gabbroicas	1

En comparación con las acondritas tipo HED, de las que se han recuperado más de 1.400 muestras, solo se han recuperado unos 170 meteoritos lunares, por ahora (Tabla III). Parecería que la cantidad de meteoritos que nos llega desde la Luna debería ser mucho mayor, dada su proximidad a nuestro planeta (la distancia media es de unos 384.000 km), y de hecho sabemos a través del estudio de isótopos activados que los meteoritos lunares pasan generalmente menos de 100.000 años en el espacio, desde que son expulsados hasta que entran en la atmósfera terrestre, lo que indica que las rutas de tránsito hacia la Tierra son muy cortas, comparadas a las de los objetos que provienen desde cualquier otro cuerpo (Gault, 1983; Eugster et al., 2006). Sin embargo, las dimensiones y la masa de la Luna son lo bastante grandes para proporcionarle un campo gravitatorio que evita que escapen los cuerpos que no hayan sido expulsados con la energía suficiente. Es decir, solo los impactos de cuerpos de un gran tamaño podrán arrancar rocas de la superficie lunar y proporcionarles la velocidad de escape necesaria, y los impactos de semejantes dimensiones son muy poco comunes en el sistema formado por la Tierra y nuestro satélite (Trigo-Rodríguez, 2012b).

De todos modos, la ausencia de atmósfera apreciable en la Luna implica que ha sufrido multitud de impactos directos desde su formación, como se aprecia perfectamente en su superficie. De hecho actualmente se pueden detectar los impactos que sufre nuestro satélite, la mayoría de los cuales causados por objetos de tamaño inferior a un metro, que causan cráteres pequeños (Ortiz et al., 2006). Dado que la Luna no dispone de actividad geológica apreciable, los primeros metros de su corteza están formados principalmente por una mezcla de polvo, conocida como regolito, que consiste en fragmentos de meteoritos y restos de la roca madre depositados por la fuerza gravitatoria tras un impacto. Además, este regolito se ha visto afectado constantemente por impactos posteriores, el viento solar y la radiación cósmica, mezclándose, compactándose e incluso fundiéndose, para formar lo que llamamos brechas regolíticas.

Las acondritas provenientes de la Luna están formadas por este tipo de agregados, del mismo modo que las muestras que recogieron las misiones Apolo y Luna. Eso no significa que todas ellas estén formadas por el mismo tipo de materiales, pues pueden provenir de diferentes regiones. Incluso mirando nuestro satélite a simple vista se aprecian

dos zonas muy diferentes, una más clara y reflectante conocida como las *tierras altas* y otra más oscura formada por enormes cuencas, también llamadas *mares*. La primera está compuesta principalmente por anortosita, un tipo de roca con un contenido superior al 90% de feldespato rico en aluminio del tipo plagioclasa cálcica y un máximo de 10% de contenido máfico (silicatos ricos en hierro y magnesio, como los piroxenos o el olivino, entre otros). Se forma por enfriamiento y solidificación a mucha profundidad de magma o lava, elevado lentamente hasta la superficie, lo que permitió un enfriamiento lento que dio lugar a cristales distinguibles a simple vista. Los *mares*, por otro lado, están formados por minerales producto de la cristalización de magmas que afloraron tras grandes impactos y conocidos por el nombre de basaltos, rocas formadas por el enfriamiento rápido de los magmas al surgir a la superficie en muy poco tiempo, con un tamaño de grano muy fino no apreciable a simple vista y con contenidos también feldespáticos, pero con minerales más ricos en hierro y pobres en aluminio, como los piroxenos, el olivino o la ilmenita. Así, los meteoritos lunares conocidos están formados por una u otra de estas litologías o derivados, o bien son brechas que mezclan estos dos tipos de roca. Un ejemplo de estos materiales diversos lo constituye la acondrita lunar North West Africa 2700 que presenta dos litologías bien diferenciadas: gabbro de olivino y brecha regolítica (Fig. 3).

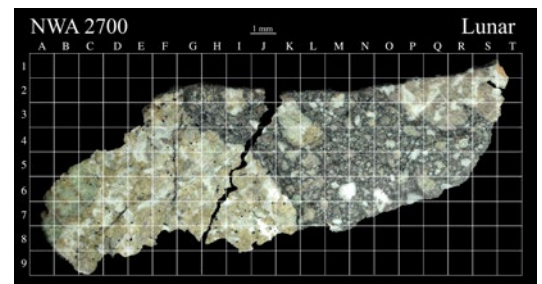


Fig. 3: Mosaico de alta resolución de una sección fina de North-West Africa 2700 (NWA 2700), montada a partir de imágenes obtenidas con un microscopio petrográfico (luz reflejada). Se aprecian las dos litologías bien diferenciadas comunes en las acondritas lunares. La rejilla impuesta para reconocer las zonas de estudio posee celdas de 1 mm².

Hay que destacar que hallar meteoritos provenientes de la Luna para su posterior análisis no es una tarea sencilla, ya que, para empezar, su contenido usualmente pobre en hierro hace que no suelen presentar cortezas de fusión fácilmente identificables. Además presentan muchas similitudes con las rocas terrestres. Entre otras cosas podemos ver que los cocientes de isótopos de oxígeno son esencialmente idénticos a los de los minerales terrestres, indicando una afinidad y origen común, lo que es consistente con la formación de nuestro satélite tras la colisión de un embrión planetario contra una versión mucho más primitiva de la Tierra (McSween, 1999; Trigo-Rodríguez, 2012a,b). La prueba irrefutable de su origen es su peculiar mineralogía y la presencia de ciertos patrones químicos, que concuerdan con las muestras traídas directamente de la Luna (Jolliff et al., 2000). De hecho, no fue hasta que se com-

pararon las rocas traídas por la misión Apolo con el primer meteorito de origen lunar conocido, hallado en la Antártida en 1982 y llamado Allan Hills 81005, cuando se confirmó que nuestro satélite podía ser también una fuente de meteoritos. Cabe mencionar que, hasta la fecha, no se ha recuperado ningún meteorito lunar cuya caída haya sido observada, por lo que el estudio de las rutas a través de las cuales estos objetos viajan entre los dos cuerpos se encuentra limitada a modelos puramente teóricos.

ACONDRITAS MARIANAS: VIAJERAS DEL PLANETA ROJO

El descubrimiento de que algunos meteoritos podían provenir de la Luna dio lugar al debate alrededor de otro tipo de acondritas poco usuales halladas anteriormente, dando fuerza a la posibilidad ya especulada de que provinieran de Marte. Fue debido a ello que, un año después de confirmar el origen de las acondritas lunares, en 1983, se llevó a cabo un experimento que consistió en calentar parte de un meteorito hallado en la Antártida llamado Elephant Moraine 79001 (ETA79001), con el objetivo de desprender los gases atrapados en su interior como consecuencia del choque que lo expulsó de su cuerpo progenitor y que provocó una fusión parcial de algunos de sus materiales. Se comprobó que la composición y abundancia de estos gases era prácticamente idéntica a la medida por la sonda *Viking* en 1976 de la atmósfera marciana, confirmando así que estas acondritas provienen de Marte (Bogard y Johnson, 1983). El descubrimiento de que en el interior de los meteoritos marcianos podían hallarse gases provenientes de la atmósfera de Marte capturados en el momento de la eyección (o antes, en algunos casos), conlleva además la posibilidad de conocer variaciones de la composición atmosférica con el tiempo, pues los gases de diferentes meteoritos fueron capturados en momentos distintos. Este hecho abre nuevas líneas de investigación para aquellos que estudian el planeta rojo.

Además de los gases atrapados en su interior, hay otras características que nos permiten distinguir entre los meteoritos provenientes de Marte y las rocas terrestres. Como en el caso de las acondritas lunares, el hecho de que tenga su origen en un cuerpo diferenciado implica que a nivel de estructura y mineralogía interna las diferencias apreciables son pequeñas. La corteza de fusión suele ser más evidente en meteoritos marcianos caídos recientemente que en los lunares, pero con el tiempo se vuelve menos distinguible. Donde sí existen diferencias notables es en la composición química entre unos y otros. Por ejemplo, la proporción de magnesio en relación al silicio (Mg/Si) con respecto a la proporción de aluminio en relación al silicio (Al/Si) es menor en todos los meteoritos marcianos que en la media de las rocas terrestres. Por otro lado, y a diferencia de la Luna, Marte dispone de atmósfera, y a pesar de ser mucho menos densa que la de la Tierra impide que gran parte del material proveniente del espacio alcance su superficie. De este modo los impactos directos son mucho menos habituales que en nuestro satélite y no es común la formación de brechas regolíticas. Además, Marte

ejerce una mayor atracción gravitatoria, aumentando significativamente la velocidad necesaria para que las rocas expulsadas por un impacto puedan escapar. A pesar de todo ello y de la distancia que separa nuestro planeta de Marte (unos 207 millones de kilómetros de media, aunque varía mucho del mínimo al máximo), actualmente se han recuperado alrededor de 130 acondritas marcianas en nuestro planeta, número no tan diferente al de meteoritos lunares recuperados. A través de los conocimientos adquiridos sobre los procesos de impacto (Melosh, 1989) y los mecanismos de transporte interplanetario (Head et al., 2002), se ha llegado a la conclusión de que las rocas de varios metros expulsadas al espacio tras un gran impacto pierden progresivamente su energía orbital debido a diversos procesos físicos del medio interplanetario, y eventualmente alcanzan regiones de resonancia orbital que las dirigen a zonas más interiores del Sistema Solar, con la Tierra como principal objetivo, al ser el mayor y más cercano a Marte.

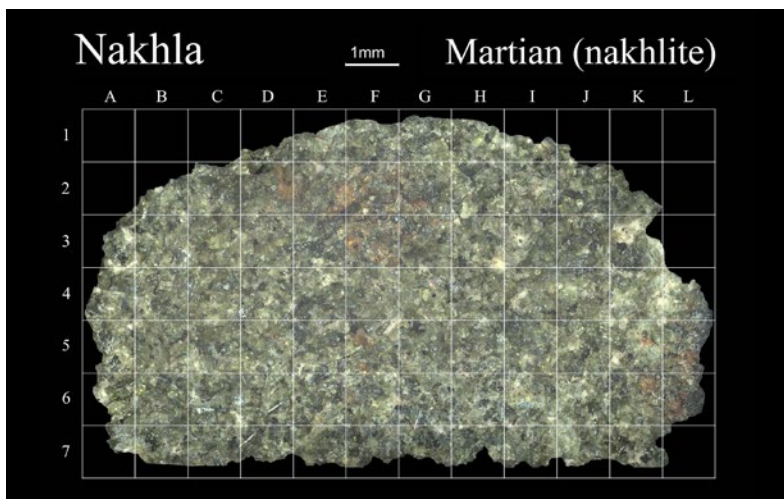
De los 130 meteoritos marcianos recuperados hasta ahora (Tabla IV), 5 han sido vistos caer en la

Tabla IV. Principales grupos de meteoritos marcianos. Si bien se incluyen 5 brechas basálticas en la tabla, se cree que todas ellas pertenecen en realidad al mismo meteorito.

GRUPO	METEORITO TIPO	NÚMERO CONOCIDO (HASTA ENERO DE 2014)
Shergottitas	Shergotty	107
Nakhlitas	Nakhla	13
Chassignitas	Chassigny	2
Brechas basálticas	NWA 7034	5
Orthopiroxenitas	ALH 84001	1
Basálticas ricas en augita	NWA 8159	1

superficie de nuestro planeta: Chassigny, en Francia en 1815, Shergotty, en India en 1865, Nakhla, en Egipto en 1911, Zagami, en Nigeria en 1962 y Tissint, en Marruecos en 2011. Todas las caídas de meteoritos son hechos remarcables, pero pocas son tan famosas como la de Nakhla (Fig. 4). Al parecer, un granjero local de la región de Nakhla en Abu Homos, Egipto, vio caer la roca justo sobre un perro a escasos metros de él. Esta historia, que se convirtió en la leyenda del perro de Nakhla al no haber más testigos ni pruebas del hecho (Kichinka, 1998), fue la que permitió a los científicos de otros países descubrir y estudiar la caída.

Fig. 4: Mosaico de alta resolución de una sección fina de Nakhla, obtenido de las imágenes de luz reflejada de un microscopio petrográfico. La rejilla impuesta para reconocer las zonas de estudio posee celdas de 1 mm².



Los tres primeros meteoritos marcianos recuperados tras su caída, Chassigny, Shergotty y Nakhla, resultaron corresponder a tres tipos de meteoritos marcianos distintos, en función de en qué zona y bajo qué circunstancias se formaron en Marte. De hecho estas tres familias eran mayoritarias entre las acondritas marcianas, de modo que sirvieron para clasificar este tipo de meteoritos en shergotitas, nakhlitas y chassignitas, llevando a la denominación común de todos los meteoritos de Marte como acondritas SNC. A pesar de que shergotitas y nakhlitas, con 107 y 14 miembros catalogados, respectivamente, sean realmente las familias mayoritarias, hoy en día se conocen por lo menos tres tipos de meteoritos marcianos que no entran en ninguna de las categorías básicas: una augita basáltica, cinco brechas basálticas (aunque se cree que todas son fragmentos de un mismo meteorito) y una ortopiroxenita. Teniendo en cuenta que tan solo se conocen dos chassignitas, la denominación de meteoritos SNC para las acondritas marcianas parece obsoleta.

Como en el caso de la Luna, Marte también presenta dos grandes zonas diferenciadas en su superficie, aparte de los polos: el sur del planeta, ocupando casi todo el hemisferio y una parte más allá del ecuador, y el norte, de albedo más oscuro. Esta división responde, entre otras cosas, a la diferente edad de estas regiones. Al parecer, el hemisferio sur se formó durante la era Noeica, hace entre 4.500 y 3.900 millones de años, y muestra los efectos de un posible Bombardeo Intenso Tardío (LHB, por sus siglas en inglés) en forma de múltiples cráteres (Anguita, 1998). El norte, por otro lado, es de formación más reciente durante la era Amazónica (desde hace unos 3.000 millones de años hasta la actualidad), se halla entre 1 y 3 kilómetros por debajo de las tierras altas del sur, y es más plano, mostrando una cantidad mucho menor de cráteres de impacto. Si bien aún se desconoce el porqué de esta dicotomía, una de las hipótesis plantea la posibilidad de que un cuerpo del tamaño de Plutón colisionara con Marte durante los primeros estadios de formación del planeta, creando un cráter en el hemisferio norte que ocuparía alrededor de un tercio de la superficie (Andrews-Hanna et al., 2008).

Los diferentes tipos de meteoritos marcianos no responden a esta separación entre norte y sur. De hecho, a pesar de que las tierras más antiguas de Marte ocupan alrededor de un 60% de la superficie del planeta, tan sólo uno de los meteoritos recuperados hasta ahora tiene una edad de cristalización lo bastante antigua para concordar con esta zona. Al parecer las tierras más jóvenes del norte producen meteoritos tras los impactos con más facilidad. Esto podría deberse al hecho de que las tierras del sur, en las que los efectos de los múltiples impactos tempranos son mucho más evidentes, nuevos impactos romperían en fragmentos relativamente pequeños las rocas de esta región, siendo menos capaces de generar los objetos de mayor tamaño que llegarían a nuestro planeta de forma más eficiente. Como consecuencia, las acondritas marcianas que podemos estudiar en los laboratorios terrestres no son una representación fiel de la variedad de territorios de la superficie de Marte.

Asimismo, mediante el estudio de ciertos isótopos se puede estimar durante cuánto tiempo un meteorito ha estado en el espacio calculando la Edad de Exposición a Rayos Cósmicos (CREA, por sus siglas en inglés) y sumándola a la edad terrestre (el tiempo que ha estado en nuestro planeta) (Eugster et al., 2006). Tales datos revelan que los diferentes grupos de acondritas se han generado en diversos procesos de fragmentación de sus cuerpos planetarios progenitores. Conocer estos datos ha llevado a la comunidad científica a la conclusión de que se pueden agrupar todos los meteoritos recuperados en un número relativamente pequeño de impactos sobre la superficie de Marte, lo que implica que disponemos de muestras de zonas muy concretas del planeta, si bien cada impacto puede arrancar material de zonas bastante grandes y a distintas profundidades, en función de su energía de impacto. Es interesante mencionar que de las acondritas conocidas todas fueron eyectadas de Marte hace entre 1,3 y 20 millones de años, lo que implica rutas bastante cortas para alcanzar nuestro planeta (Nyquist et al., 2001).

Por otro lado, los meteoritos marcianos muestran edades de cristalización muy variables, de modo que nos pueden proporcionar información de diferentes épocas del planeta. Así, se considera que las shergotitas cristalizaron hace entre 165 y 475 millones de años (aunque estudios recientes plantean la posibilidad de que algunas puedan ser mucho más antiguas), las nakhlitas se formaron hace alrededor de 1.300 millones de años y las chassignitas hace unos 1.350 millones de años (Nyquist et al., 2001). En cuanto a los demás meteoritos conocidos, Allan Hills 84001 (ALH 84001), es el que se formó más pronto, hace alrededor de 4.100 millones de años (Lapen et al., 2010), y por lo tanto es el único que proviene de las tierras altas del sur. Le sigue Northwest Africa 7034 (NWA 7034) y los fragmentos con los que aparentemente está emparejado (que constituyen el grupo de las brechas basálticas), formados hace unos 2.100 millones de años (Agee et al., 2013).

Aparte de sus edades de cristalización hay varias características intrínsecas de los distintos grupos que nos permiten diferenciarlos. Las shergotitas, que como ya hemos dicho constituyen el grupo más numeroso, son rocas ígneas y por lo tanto formadas por enfriamiento de magma o lava, constituidas principalmente por silicatos ricos en magnesio y hierro. A su vez se suelen dividir en shergotitas basálticas (contienen los minerales comunes en los basaltos terrestres), ricas en olivino (como las basálticas pero con cristales relativamente grandes de olivino) o lherzolíticas (similares a las ricas en olivino, pero con una cantidad mayor de magnesio en sus silicatos y menos plagioclasa), en función del tamaño de sus cristales y de su mineralogía, aunque por supuesto esta distinción está relacionada con el proceso por el cual se formó cada roca (Fig. 5-7). Dadas las bajas edades de formación de las shergotitas, que sugieren que Marte estuvo geológicamente activo hasta hace relativamente poco (si no lo está todavía), se considera que probablemente provengan de las zonas volcánicas más jóvenes de la superficie marciana, como la región de Tharsis o el Elysium Mons (McSween et al., 2007).

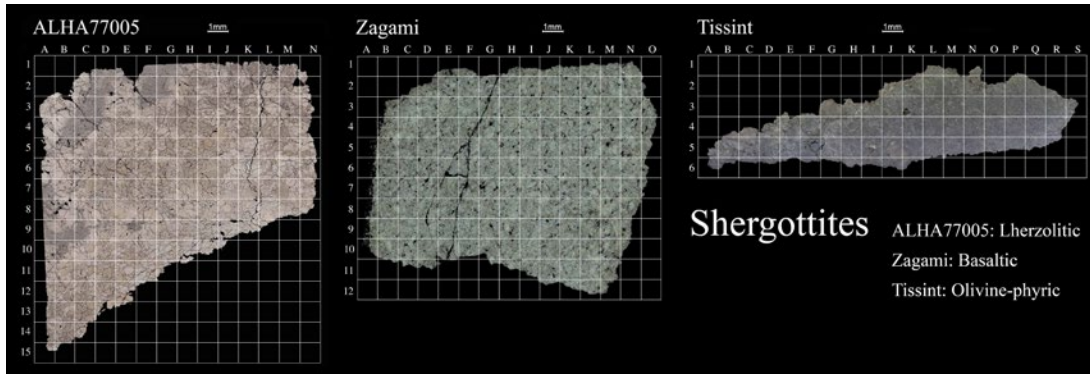


Fig. 5: Mosaicos de alta resolución de secciones finas de los tres tipos distintos de shergottitas, montados a partir de las imágenes obtenidas con un microscopio petrográfico (luz reflejada). ALHA77005 (ALHA77005) es un ejemplo de una shergottita lherzolitica recuperada en la Antártida, mientras que Zagami es una shergottita basáltica y Tissint una shergottita rica en olivino. Tanto en el caso de Zagami como en el de Tissint se pudo presenciar la caída a través de nuestra atmósfera, en 1962 y 2011, respectivamente. La rejilla impuesta para reconocer las zonas de estudio posee celdas de 1 mm².

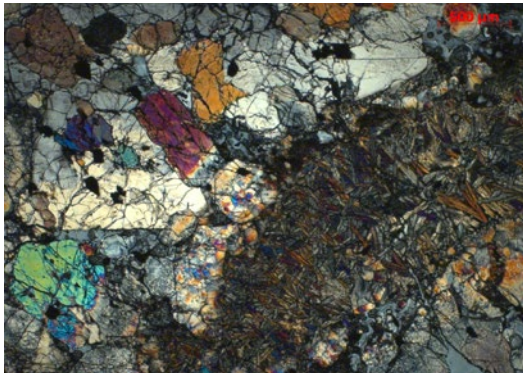


Fig. 6: Imagen petrográfica en luz transmitida (nícoles cruzados) de (ALHA77005), perteneciente a la colección Antártica de la NASA. Cristales de olivino y maskelinita aparecen en la diagonal superior izquierda mientras que una región rica en piroxeno se puede ver en la parte inferior derecha. Imagen de J.M. Trigo-Rodríguez (CSIC-IEEC).

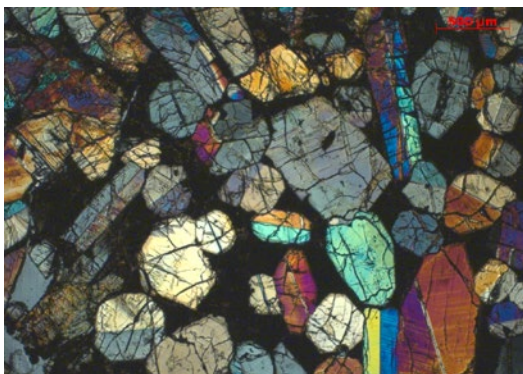


Fig. 7: Imagen petrográfica en luz transmitida (nícoles cruzados) de la nakhlita Miller Range 03346 (MIL 03346) perteneciente a la colección Antártica de la NASA. Grandes cristales de clinopiroxeno se encuentran embebidos en una mesostasis rica en óxidos de hierro y titanio. Imagen de J.M. Trigo-Rodríguez (CSIC-IEEC).

Las nakhlitas se forman como cúmulos de clinopiroxeno (augita) y olivino rico en hierro, mientras que las chassignitas son cúmulos de dunita, mineral proveniente del enfriamiento profundo de magma, con un contenido alto de magnesio en los silicatos y formado por alrededor de un 90% en olivino. Las brechas basálticas como NWA 7034 son brechas con múltiples cristales e inclusiones de diferentes tamaños y reflectividades, rodeados por una masa oscura, con composiciones de plagioclasa y olivino similares a las de las shergottitas basálticas, y que resultan de gran interés por su contenido excepcio-

nalmente alto en agua (Agee et al., 2013). El meteorito Northwest Africa 8159 (NWA 8159), el único considerado como augita basáltica, contiene augita y olivino y tendencias de cristalización similares a las nakhlitas, mientras que la composición de la plagioclasa es similar a la de las shergottitas.

ALH 84001 (Fig. 8), por su lado, está formada por un 97% de ortopiroxeno, básicamente silicatos ricos en hierro y magnesio con una estructura cristalina concreta. Este meteorito es una de las acondritas marcianas que más interés ha despertado en la comunidad científica y en el público en general. Esto se debe al hecho de que, en 1996, un estudio declaró que algunas características contenidas en este meteorito eran una prueba de cierta actividad biológica temprana en Marte (McKay et al., 1996). Años más tarde se ha comprobado que los supuestos rastros de vida también pueden tener su origen en procesos que no requieren actividad biológica (Martel et al., 2012), así que por ahora seguimos sin saber si alguna vez existió vida en Marte, pero la mera posibilidad sigue siendo muy atractiva. Por otro lado, este meteorito contiene carbonatos cuyo proceso formativo puede proporcionarnos mucha información sobre la presencia de agua y las condiciones climáticas y atmosféricas en el Marte primitivo (Scott et al., 1998, Moyano-Camero et al., 2013).

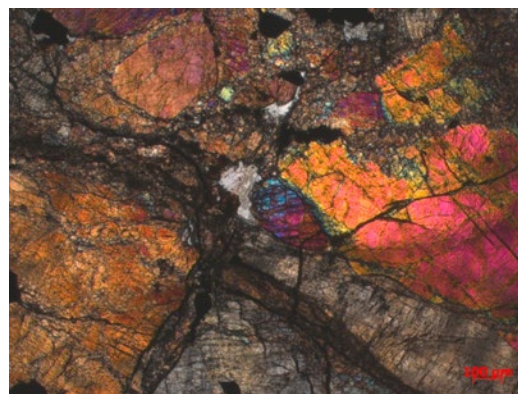


Fig. 8: Imagen petrográfica en luz transmitida de la sección delgada de la ortopiroxenita Allan Hills 84001. Diversos glóbulos de carbonato de pocas decenas de micras se aprecian en el centro y se formaron entre las grietas de la roca por acción del agua cuando formaba parte de la corteza de Marte. Imagen de J.M. Trigo-Rodríguez (CSIC-IEEC).

OTRAS ACONDRIAS: UN ORIGEN DESCONOCIDO

Hasta ahora hemos hablado de los meteoritos diferenciados que provienen de cuerpos que conocemos, ya sea en casos tan evidentes como los lunares y marcianos, o los que todavía no están completamente comprobados, como es el caso de

las acondritas HED. Sin embargo, hay alrededor de 600 acondritas catalogadas que se sabe que no provienen de ninguno de estos cuerpos. De hecho, se desconoce cuál es su cuerpo progenitor. Esto quizás no sea tan sorprendente si tenemos en cuenta que sucede lo mismo con los meteoritos metálicos (Lozano Fernández, en este monográfico), lo que sugiere la existencia de unos 70 cuerpos planetarios que debieron desintegrarse para llegar hasta nosotros sus núcleos metálicos (Keil et al., 1994; Burbine et al., 2003).

La diversidad mineralógica y composicional de estas acondritas, así como sus cocientes isotópicos de oxígeno diferenciados, nos permiten separarlos en varios grupos, cada uno con un origen distinto (Fig. 9). Por otro lado, también se suelen clasificar las acondritas en función de si son más o menos primitivas. Se da el caso de que algunas proceden de cuerpos planetarios relativamente pequeños en los que los materiales originales se fundieron parcialmente no perdiendo del todo su textura condritica. Por otro lado, los cuerpos cuya actividad ígnea fue más extensa y prolongada en el tiempo produjeron materiales plenamente diferenciados, con minerales más evolucionados. Estas acondritas tienen una gran relevancia en nuestra comprensión del origen de los planetas terrestres, pues algunas de ellas pueden provenir de los primitivos embriones que dieron lugar a los planetas del Sistema Solar, que posiblemente desaparecieron hace mucho, ya sea porque se juntaron con otros cuerpos o porque fueron destruidos por impactos.

Entre las acondritas primitivas tenemos tres grupos distintos. Por un lado está la familia de los acapulcoides y lodranitas, con algo más de 100

ejemplares y que aparentemente están estrechamente relacionadas. Forman un muy buen ejemplo de lo que son las acondritas primitivas, pues presentan minerales secundarios producidos por la fusión de sus materiales condriticos primitivos a través de procesos magmáticos en un gran asteroide, siendo ricas en olivino y piroxenos, principalmente. Según los estudios realizados con isótopos de plomo se cree que proceden de un cuerpo progenitor formado hace unos 4.560 millones de años y que mantuvo una cierta actividad. Sin embargo, parece ser que la actividad magmática cesó antes de que el cuerpo alcanzara una homogeneización química completa. Este hecho explicaría por qué los cocientes de oxígeno de estas acondritas no aparecen fraccionados como en las rocas de cuerpos planetarios. Si bien ambos grupos comparten todas estas características hay algunas diferencias entre ellos. Los acapulcoides tienen un tamaño de grano más fino y contienen restos de cóndrulos, aunque raramente. Por su lado las lodranitas muestran un grado de fraccionamiento más elevado y se vieron sometidas a temperaturas más elevadas, lo que probablemente signifique que se hallaban a más profundidad bajo la superficie del cuerpo progenitor. Existen, además, algunos meteoritos intermedios entre acapulcoides y lodranitas, siendo el eslabón que permite establecer el origen común de ambos tipos.

El tercer grupo de acondritas primitivas son las winonaitas, menos numerosas (alrededor de 25 meteoritos hasta ahora). Además de algunos restos poco comunes de cóndrulos, las winonaitas muestran pruebas de un intenso metamorfismo térmico y de fusión parcial. La composición química y mineralógica de estos meteoritos es intermedia entre las condritas de tipo H y E, si bien los patrones de isótopos de oxígeno de estos meteoritos permiten establecer alguna asociación con las inclusiones de silicatos halladas en los meteoritos metálicos de tipo IAB y IIICD (Weisberg et al., 2006). De hecho se considera que probablemente provengan del mismo cuerpo progenitor, hallándose unos en su superficie y otros en el núcleo, y por ello a menudo se juntan estos tres tipos en una misma familia, si bien la relación está menos clara en el caso de los meteoritos IIICD. Las propiedades de los silicatos y metales que forman estos meteoritos parecen indicar que el cuerpo del que proceden interrumpió su diferenciación, al menos parcialmente, a causa de uno o más impactos de gran fuerza.

Entre las acondritas más numerosas, tras las HED, encontramos las ureilitas, con casi 350 meteoritos identificados en la actualidad. Uno de ellos, conocido como Almahata Sitta, cayó en el Desierto Nubio de Sudán el 7 de Octubre de 2008, y se recuperaron cerca de 4 kg de material. Almahata Sitta marcó un hito en la detección de estos objetos antes de su impacto pues a pesar de poseer un diámetro de alrededor de 4 metros fue detectado y catalogado como asteroide 2008 TC3 por el Catalina Sky Survey para la detección de Objetos Próximos a la Tierra veinte horas antes de impactar (Jenniskens et al., 2009). Este tipo de acondritas muestra un contenido especialmente alto en carbono, de alrededor de un 3% en masa de media,

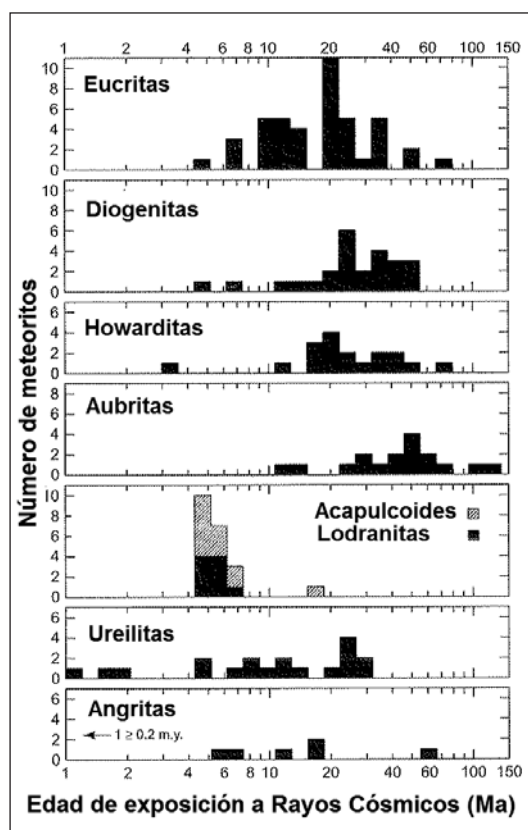


Fig. 9: Edades de Exposición a Rayos Cósmicos de las Acondritas que no Proviene de la Luna, Marte o Vesta (Adaptada con permiso de Eugster et al., 2006). Estas edades, que indican el tiempo que un cierto meteorito ha estado en el espacio expuesto a los rayos cósmicos, también nos permiten establecer diferencias entre los distintos grupos.

en forma de grafito y nanodiamantes. Se cree que estos últimos son el resultado de ondas de alta presión debido a colisiones del cuerpo progenitor con otros asteroides. Actualmente se denomina a las ureilitas como acondritas de olivino-piroxeno, si bien se pueden dividir en dos categorías: unas que muestran un tamaño de grano mayor y un contenido mayor de olivino que de piroxenos, y otras que se componen de una mezcla de fragmentos de distinta composición.

El siguiente grupo en cantidad de meteoritos recuperados (unos 70) es el de las aubritas, también conocidas como acondritas de enstatita debido a que se componen principalmente de grandes cristales de este ortopiroxeno rico en magnesio y pobre en hierro. Otras fases menores como el olivino y la troilita indican formación magmática bajo condiciones muy reductoras (usualmente ausencia de oxígeno). Por otro lado, la mayoría de aubritas son brechas, dando pie a interpretar un pasado violento para su cuerpo progenitor. De hecho, las inclusiones de naturaleza condritica que pueden hallarse en algunas aubritas sugieren que en algún punto el cuerpo progenitor colisionó con un asteroide de composición condritica de tipo F. Se ha dicho a menudo que el aspecto de estos meteoritos recuerda al de las acondritas lunares, y es cierto que su composición en isótopos de oxígeno cae en la línea de fraccionamiento terrestre, por lo que podrían representar muestras de los cuerpos primitivos que terminarían por dar origen a nuestro planeta. Por otro lado, estudios espectrales parecen relacionar las Aubritas con el asteroide 3103 Eger (Kelley y Gaffey, 2002), teoría respaldada tanto por su órbita, que lo convierte en un Objeto Cercano a la Tierra, como por sus dimensiones.

Las brachinitas son el penúltimo grupo de acondritas en abundancia, con menos de 40 miembros hallados. En un sentido composicional recuerdan a las condritas, de modo que a menudo se las ha considerado acondritas primitivas. Todavía no se han estudiado con el detalle suficiente para saber con certeza si provienen de un mismo cuerpo o no, pero coinciden en un contenido de olivino de entre un 74 y un 98%, detalle que las diferencia de las condritas. Debido al alto porcentaje de este mineral en un principio se creyó que eran acondritas marcianas, concretamente chassignitas, pero después se vio que sus patrones de elementos traza y composición isotópica de oxígeno eran únicos, y que su edad de formación era más antigua de lo esperado para Marte, por lo que se consideraron pertenecientes a un grupo distinto. Algunos estudios han relacionado este tipo de meteoritos con el asteroide 289 Nenetta (Cruikshank y Hartmann, 1984), aunque por ahora es solo una hipótesis que se basa en el aparente contenido anormalmente alto de olivino de este asteroide.

Las acondritas que forman el grupo menos abundante se conocen con el nombre de angritas, formado por unos 20 ejemplares. Esta familia se compone de acondritas basálticas, con una elevada proporción de calcio en relación al aluminio y formadas principalmente por augita, un piroxeno rico en calcio, así como por plagioclasa y olivino también ricos en calcio. También muestran abun-

dancia de elementos refractarios, pero son pobres en volátiles. Estos meteoritos, a menudo porosos y con una edad de cristalización de alrededor de 4.550 millones de años, se han relacionado por medio de espectros de reflexión con algunos cuerpos del cinturón principal de asteroides, así como con Mercurio, si bien todavía no existe ningún argumento lo bastante convincente que apoye estas teorías y por lo tanto podemos decir que se desconoce su origen. En cualquier caso, cabe mencionar al respecto, el tránsito dinámico desde los planetas rocosos internos a la órbita terrestre (Mercurio y Venus) se antoja complicado, dado que los materiales eyectados desde estos cuerpos por impactos preferentemente deberían seguir una ruta dinámica hacia el interior del Sistema Solar, para caer de manera natural en el Sol.

ACONDRIAS: RETAZOS DE OTROS CUERPOS

A modo de conclusión, en nuestro planeta se han encontrado hasta ahora más de 2.000 acondritas, rocas provenientes de otros cuerpos lo bastante grandes como para sufrir un cierto grado de diferenciación. Sólo los impactos de cierta magnitud sobre estos objetos son capaces de impulsar rocas por encima de la velocidad de escape, generando meteoroides que adquieren órbitas heliocéntricas. Tras viajar grandes distancias y en escalas temporales que fácilmente alcanzan varios millones de años, pueden completar su particular carambola y acabar cruzando la órbita de la Tierra. Si la roca es lo bastante consistente y su masa es de varios kilogramos sobrevivirán a la entrada a la atmósfera, convirtiéndose al llegar a la superficie en meteoritos. Todos ellos conservan en su interior información de gran valor sobre sus cuerpos progenitores, aportándonos pistas sobre las condiciones y formación de la Luna, Vesta o Marte. Las acondritas también proceden de otros cuerpos planetarios supervivientes en el cinturón principal de asteroides, así como de cuerpos que se desintegraron en pequeños asteroides que han sobrevivido al paso de los eones (Tabla V), y cuyos materiales podrían ser representativos de los bloques constitutivos de nuestro planeta.

Tabla V. Tabla mostrando los distintos grupos de acondritas conocidas. La segunda columna es el porcentaje de las caídas que representa cada grupo sobre el total de caídas de meteoritos de cualquier clase registradas hasta la fecha. La tercera es el cuerpo progenitor o tipo de asteroide de los que proceden o se cree que podrían proceder. La cuarta son los valores medios de $\Delta^{17}O$, que se define como $\Delta^{17}O = \delta^{17}O - 0,52 \times \delta^{18}O$, donde $\delta^{17}O$ y $\delta^{18}O$ son una medida del ratio de esos dos isótopos de oxígeno sobre el isótopo más común (^{16}O), respecto de un valor definido como estándar, que en este caso es el llamado valor solar. Información extraída de Burbine et al., 2003.

GRUPO	PORCENTAJE DE CAÍDAS (%)	CUERPO PROGENITOR (CONOCIDO O SUGERIDO)	ISÓTOPOS DE OXÍGENO ($\Delta^{17}O$)
Eucritas	2,7	Vesta	-0,24
Howarditas	2,1	Vesta	-0,26
Diogenitas	1,2	Vesta	-0,27
Aubritas	1,0	3103 Eger	0,02
Ureilitas	0,5	Asteroides tipo S	-1,20
Acondritas Marcianas	0,4	Marte	-
Acapulcoides	0,1	Asteroides tipo S	-1,04
Angritas	0,1	Asteroides tipo S	-0,15
Lodranitas	0,1	Asteroides tipo S	-1,18
Winonaitas	0,1	Asteroides tipo S	-0,50
Brachinitas	Solo halladas	Asteroides tipo A	-0,26
Acondritas lunares	Solo halladas	La Luna	-

BIBLIOGRAFÍA

- Agee, C.R., Wilson, N.V., McCubbin, F.M., Ziegler, K., Polyak, V.J., Sharp, Z.D., Asmerom, Y., Nunn, M.H., Shaheen, R., Thiemens, M.H., Steele, A., Fogel, M.L., Bowden, R., Glamoclija, M., Zhang, Z. y Elardo, S.M. (2013). Unique meteorite from Early Amazonian Mars: Water-rich basaltic breccia Northwest Africa 7034. *Science*, online publication.
- Andrews-Hanna, J.C., Zuber, M.T. y Banerdt, W.B. (2008). The Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy. *Nature*, 453, 1212-1215.
- Anguita, F. (1998). *Historia de Marte: mito, exploración y futuro*, Editorial Planeta, Barcelona.
- Binzel, R.P. y Xu, S. (1993). Chips off of asteroid 4 Vesta: Evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites. *Science* 260, 186-191.
- Bogard, D.D. y Johnson, P. (1983). Martian gases in an Antarctic meteorite? *Science*, 221, 651-654.
- Burbine, T.H., McCoy, T.J., Meibom, A., Gladman, B. y Keil, K. (2003). Meteoritic parent bodies: Their number and identification. En *Asteroids III*, W.F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R.P. Binzel (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, pp. 653-667.
- Cruikshank, D.P. y Hartmann, W.K. (1984). The meteorite-asteroid connection: Two olivine-rich asteroids. *Science*, 223, 281-283.
- Eugster, O., Herzog, G.F., Marti, K. y Caffee, M.W. (2006). Irradiation records, Cosmic-Ray Exposure Ages, and Transfer times of meteorites. En *Meteorites and the Early Solar System II*, D. Lauretta, H.Y. McSween (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, 829-851.
- Gault, D.E. (1983) The terrestrial accretion of lunar material. 14th *Lunar and Planetary Science Conference*, 243-244.
- Head, J.N., Melosh, H.J. y Ivanov, B.A. (2002). Martian meteorite launch: high-speed ejecta from small craters. *Science*, 298, 1752-1756.
- Jenniskens, P., Shaddad, M.H., Numan, D., Elsir, S., Kudoka, A.M., Zolensky, M.E., Le, L., Robinson, G.A., Friedrich, J.M., Rumble, D., Steele, A., Chelsey, S.R., Fitzsimmons, A., Duddy, S., Hsieh, H.H., Ramsay, G., Brown, P.G., Edwards, W.N., Tagliaferri, E., Boslough, M.B., Spalding, R.E., Dantowitz, R., Kozubal, M., Pravec, P., Borovicka, J., Charvat, Z., Vaubaillon, J., Kuiper, J., Albers, J., Bishop, J.L., Mancinelli, R.L., Sandford, S.A., Milam, S.N., Nuevo, M. y Worden, S.P. (2009). The impact and recovery of asteroid 2008 TC₃. *Nature*, 458, pp. 485-488.
- Jolliff, B.L., Gillis, J.J., Haskin, L.A., Korotev, R.L. y Wieczorek, M.A. (2000). Major lunar crustal terranes: surface expressions and crust-mantle origins. *J. Geophys. Res.* 105 (E2), 4197-4216.
- Keil, K., Haack, H. y Scott, E.R.D. (1994). Catastrophic fragmentation of asteroids: Evidence from meteorites. *Planetary & Space Science*, 42, 1109-1122.
- Kelley, M.S. y Gaffey, M.J. (2002). High-albedo asteroid 434 Hungaria: Spectrum, composition and genetic connections. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 37, 12, 1815-1827.
- Kichinka, K. (1998) El Nakhla. *Meteorite!* May issue.
- Lapen, T.J., Righter, M., Brandon, A.D., Debaille, V., Beard, B.L., Shafer, J.T. y Peslier, A.H. (2010). A younger age for ALH 84001 and its geochemical link to shergottites sources in Mars. *Science*, 328, 347-351.
- Llorca, J., Casanova, I., Trigo-Rodríguez, J.M., Madio, J.M., Roszjar, J., Bischoff, A., Ott, U., Franchi, I.A., Greenwood, R.C. y Laubenstein, M. (2009). "The Puerto Lápice eucrite". *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 159-174.
- Martel, J., Young, D., Peng, H.H., Wu, C.Y. y Young, J.D. (2012). Biomimetic properties of minerals and the search for life in the Martian meteorite ALH 84001. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 40, 167-193.
- McKay, D.S., Gibson Jr., E.K., Thomas-Keptra, K.L., Vali, H., Romanek, C.S., Clemett, S.J., Chiller, X.D.F., Maechling, C.R. y Zare, R.N. (1996). Search for life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273, 924-930.
- McSween, H.Y. (1999). *Meteorites and their parent planets*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- McSween, H.Y., Lang, N.P. y Tornabene, L.L. (2007). Are SNC meteorites from Tharsis? (abs#5067), *Meteoritics and Planetary Science* (Suppl.), 42.
- Melosh, H.J. (1989). *Impact Cratering: A Geologic Process*, Oxford University Press, New York.
- Morbidelli, A., Bottke Jr., W.F., Froeschlé, Ch. y Michel, P. (2003). Origin and evolution of Near-Earth Objects. En *Asteroids III*, W.F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R.P. Binzel (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, 409-422.
- Moyano-Camero, C.E., Trigo-Rodríguez, J.M., Mestres, N., Fraxedas, J. y Alonso-Azcárate, J. (2013). Studying carbonate globules in Allan Hills 84001 to better understand aqueous alteration in early Mars. 44th *Lunar and Planetary Science Conference*, abstract #2063.
- Nyquist, L.E., Bogard, D.D., Shih, C.Y., Greshake, A., Stöffler, D. y Eugster, O. (2001). Ages and geologic histories of Martian meteorites. *Chronology and Evolution of Mars*, 96, 105-164.
- Ortiz, J.L., Aceituno, F.J., Quesada, J.A., Aceituno, J., Fernández, M., Santos-Sanz, P., Trigo-Rodríguez, J.M., Llorca, J., Martín-Torres, F.J., Montañés-Rodríguez, P. y Pallé, E. (2006). Detection of sporadic impact flares on the Moon. Implications for the luminous efficiency of hypervelocity impacts and derived terrestrial impact rates. *Icarus*, 184, 319-326.
- Papike, J.J., Ryder, G. y Shearer, C.K. (1998). Lunar samples, en *Planetary Materials, Reviews in Mineralogy*, 36, 5-1/5-234.
- Russell, C.T., Raymond, C.A., Coradini, A., McSween, H.Y., Zuber, M.T., Nathues, A., De Sanctis, M.C., Jaumann, R., Konopliv, A.S., Preusker, F., Asmar, S.W., Park, R.S., Gaskell, R., Keller, H.U., Mottola, S., Roatsch, T., Scully, J.E.C., Smith, D.E., Tricarico, P., Toplis, M.J., Christensen, U.R., Feldman, W.C., Lawrence, D.J., McCoy, T.J., Prettyman, T.H., Reedy, R.C., Sykes, M.E. y Titus T.N. (2012). Dawn at Vesta: Testing the protoplanetary paradigm. *Science* 336, 684-686.
- Scott, E.R.D., Krot, A.N. y Yamagouchi, A. (1998). Carbonates in fractures of Martian meteorite ALH84001: Petrologic evidence for impact origin. *Meteoritics and Planetary Science*, 33, 709-719.
- Trigo-Rodríguez, J.M., Borovička, J., Llorca, J., Madio, J.M., Zamorano, J. y Izquierdo, J. (2009). "Puerto Lápice eucrite fall: strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit". *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 175-186.
- Trigo-Rodríguez, J.M. (2012a). *Meteoritos*, colección ¿Qué sabemos de?, Editorial Catarata-CSIC, Madrid.
- Trigo-Rodríguez, J.M. (2012b). *Las raíces cósmicas de la vida*, Barcelona, Ediciones UAB, colección de divulgación El espejo y la lámpara.
- Weisberg, M.K., McCoy, T.J. y Krot, A.N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. En *Meteorites and the Early Solar System II*, 19-52. ■

Este artículo fue solicitado desde ECT el día 22 de julio de 2013, y aceptado definitivamente para su publicación el 3 de diciembre de 2013