

El geólogo planetario o astrogeólogo

Jesús Martínez Frías
Centro de Astrobiología (CSIC/INTA),
asociado al NASA Astrobiology Institute

Introducción

Los estudios geológicos relacionados con la exploración planetaria cubren numerosos aspectos y no pueden entenderse actualmente sin considerar su carácter inter y transdisciplinar (Martínez Frías, 2006). La geología planetaria se encuentra en pleno desarrollo en los países avanzados y en España va ocupando, aunque aún lentamente, mayores espacios, tanto en ámbitos científicos como docentes. En este artículo se analiza la situación actual del tema y se detallan los principales aspectos relacionados con las investigaciones actualmente en desarrollo. Básicamente, esta contribución pretende ser la síntesis de dos interesantes iniciativas recientes, promovidas casi en paralelo: la solicitud por parte del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG) de una contribución específica sobre "El geólogo planetario o astrogeólogo" y la mesa redonda con título "La geología en la exploración planetaria" (Martínez Frías et al., 2008) que, en el contexto de la Sesión de Planetología, Impactos y Eventos de Extinción, se celebró en el marco del VII Congreso Geológico de España, celebrado en Gran Canaria.

Geología planetaria o astrogeología

Al igual que existen los astrofísicos, astroquímicos o astrobiólogos, los geólogos planetarios también se han denominado, y de hecho lo siguen haciendo, astrogeólogos. El propio Servicio Geológico de Estados Unidos dispone de un programa específico de investigación en astrogeología USGS Astrogeology Research Program (USGS, 2008) que lleva años funcionando. Aunque no existe una definición concreta y estandarizada de la

astrogeología o geología planetaria, una de las mejores corresponde a la utilizada por la Arizona State University: una institución emblemática y pionera en esta línea de investigación (ASU, 2006). La geología planetaria puede definirse como “el estudio a distintas escalas del origen, evolución y distribución de la materia condensada en el universo en forma de planetas, satélites, cometas, asteroides y partículas de distintas dimensiones y génesis. Esto conlleva la incorporación y estudio pormenorizado de datos procedentes de sondas espaciales, análisis comparados de meteoritos y polvo cósmico, estructuras y eventos de impacto meteorítico, simulaciones de laboratorio de varios procesos planetarios y también estudios de campo sobre análogos terrestres útiles para la exploración y modelización de los mecanismos y procesos geológicos que tienen lugar más allá de las fronteras de nuestro planeta”. Siendo amplia, esta definición no caracteriza en su totalidad el trabajo que realizan los geólogos planetarios. Estos científicos, al igual que los geólogos que desarrollan su actividad profesional sobre temas terrestres más clásicos, se nutren también de la física, química, biología y otras disciplinas en un mestizaje científico-técnico que, además de enriquecer el área de las ciencias de la Tierra y del espacio, es una base fundamental para la evolución del conocimiento en su sentido más amplio. Además de los avances científico-tecnológicos inherentes al desarrollo de la exploración espacial en sí misma (nanotecnología, ingeniería, nuevos materiales y sistemas de comunicaciones, etc.), el procesamiento de la ingente cantidad de datos geológicos recibidos de otros planetas y satélites requiere frecuentemente el uso de software de computación avanzada, muy útil, por ejemplo, para el procesamiento de imágenes. Probablemente, una de las iniciativas más exitosas que se viene utilizando es la denominada ISIS (Integrated Software for Imagers and Spectrometers). ISIS es el resultado de 30 años de investigación astrogeológica que permite el manejo de imágenes procedentes de misiones planetarias a Marte, Júpiter, Saturno y otros cuerpos planetarios del sistema solar.

Es importante tener en cuenta que la geología planetaria constituye un ámbito temático específico reconocido oficialmente en el contexto internacional de campos, disciplinas y subdisciplinas científicas de la UNESCO (código UNESCO: 2104.04), cuya revisión, reorganización y actualización se ha propuesto recientemente (Martínez Frías y Hochberg, 2007). De acuerdo con estos autores, dado que la mayor parte de los estudios y tópicos de investigación sobre geología planetaria involucran principalmente a geólogos, es decir, caen dentro del campo 25 de la UNESCO “Earth and Space Sciences”, se ha sugerido que sería muy apropiado asignar un nuevo código adicional UNESCO (2512.04) para la geología planetaria (con referencias cruzadas entre ambos: 2104.04 y 2512.04). Ello permitiría disponer de una clasificación más ajustada a la situación real de la profesión y coherente con las investigaciones que, sobre esta temática, realiza nuestro colectivo. Esta propuesta cuenta, hasta el momento, con el respaldo del ICOG y de la Federación Europea de Geólogos.

Todos estos aspectos deben ser tenidos en cuenta para entender el contexto general en que se enmarcan los distintos estudios del profesional que tiene como línea de trabajo la astrogeología o geología planetaria. Los temas e investigaciones que se han venido realizando en el laboratorio de geología planetaria del Centro de Astrobiología (llamado así desde la fundación del Centro hasta julio de 2008, fecha en que cambió su denominación a laboratorio de planetología), y su vinculación interdisciplinar con otras áreas científicas, pueden ser un buen ejemplo de ello. Éstos incluyen actividades relacionadas principalmente con:

- ▶ Estudios de materia extraterrestre, principalmente meteoritos.
- ▶ Investigación de cráteres y eventos de impacto meteorítico.
- ▶ Caracterización geológica, mineralógica, geoquímica y metalogenética de análogos terrestres para la exploración de Marte, Europa, Titán y otros cuerpos planetarios de nuestro sistema solar.
- ▶ Simulaciones en laboratorio utilizando cámaras planetarias. Una buena parte de estos trabajos se realiza con participación directa de los geólogos planetarios en misiones espaciales, que en la actualidad están principalmente centradas sobre Marte y el estudio de los cuerpos planetarios helados del sistema solar (ej. misiones ESA-ExoMars, NASA-Mars Science Laboratory-REMS, Laplace, Tandem).

Estudios de materia extraterrestre: meteoritos

El Museo Nacional de Ciencias Naturales cuenta con la colección de meteoritos más importante de España (más de 150 ejemplares entre lititos, sideritos y siderolitos, Muñoz Espadas et al., 2002). Sin embargo, ha sido el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha (Cuenca) el que ha sido sede de los dos eventos más relevantes relacionados con esta temática:

- ▶ El Congreso Ibérico de Meteoritos y Geología planetaria, celebrado en octubre de 2002, co-patrocinado por el ICOG (Martínez-Frías, 2002).
- ▶ El primer Seminario Científico de Astromineralogía y Mineralogía Espacial, organizado en 2004 en el marco de la XXIV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía (SEM, 2004). Si el congreso sirvió para fomentar la coordinación y colaboración entre científicos relacionados con esta temática (Martínez-Frías y Madero, 2005), el seminario fue extremadamente útil desde el punto de vista conceptual describiendo, entre otras cuestiones, las principales fuentes y tipos de materia en el sistema solar (principalmente IDP —partículas de polvo interplanetario— y meteoritos) (Martínez-Frías et al., 2004a).

Cuando, desde la geología planetaria, se trabaja con distintos tipos de materia extraterrestre es muy importante, al igual que en otras disciplinas, la terminología utilizada en

cada caso. La definición de astrominerales se aplica a aquellos materiales de origen pre-solar 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 presolar). Los astrominerales también pueden encontrarse en meteoritos químicamente primitivos (ej. condritas carbonáceas), micrometeoritos polares y partículas de polvo interplanetario (IDP) (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 —sin esta connotación temporal primigenia— y a minerales identificados en otros planetas (ej. hematites y jarosita de Marte, etc.) o minerales lunares. Los trabajos que se realizan habitualmente sobre astrominerales presentes en IDP incluyen estudios de:

- ▶ Materia orgánica, siendo el carbono predominantemente amorfo y parcialmente grafito.
- ▶ 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.
- ▶ Otros granos presolares presentes en meteoritos muy primitivos: diamantes, carburo de silicio, grafito, corindón y nitruro de silicio.
- ▶ Silicatos, principalmente forsterita y enstatita y silicatos vítreos conocidos como GEMS (glass with embedded metal and sulfides).
- ▶ 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.

Pero si el trabajo que tienen que realizar los geólogos planetarios sobre IDP es importante, sobre todo en colaboración con investigaciones complementarias en astrofísica, astroquímica y espectroscopia (Jenniskens et al., 2003), los relacionados con meteoritos son los que, sin duda, han caracterizado los estudios de materia extraterrestre a lo largo de estos últimos 200 años de estudio de meteoritos. Antes de abordar su tipología y clasificación, parece procedente comentar algunos aspectos históricos y de procedimientos de trabajo en su investigación.

Los meteoritos son 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. De todos los tipos de materia extraterrestre que nos llega del espacio, los meteoritos stricto sensu 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. A fecha de diciembre 2000 se ha observado caer unos 1.000 meteoritos (Grady, 2000), 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 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 uno por ciento de las toneladas de material extraterrestre que alcanzan la superficie de la Tierra cada día. Los trabajos que se realizan sobre meteoritos conllevan su caracterización detallada y clasificación (Muñoz-Espadas et al., 2002, Martínez Frías y Lunar, 2008). Ésta es una labor que habitualmente el especialista en geología planetaria debe ser capaz de realizar en toda su complejidad. A veces, la clasificación de un meteorito no es sencilla. La mayoría de los meteoros que se observan en la atmósfera (incluso cuando alcanzan la magnitud de fireball: bola de fuego), no llegan a impactar en forma de meteoritos. Por ello, es importante que exista una supervisión y asesoramiento científico de los geólogos especialistas en estos temas, sobre todo en eventos con repercusión social a los que se pueden asignar errores conceptuales importantes, tales como, por ejemplo, los que relacionan de manera directa meteoritos e incendios. El meteorito está prácticamente 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 (Martínez-Frías y Madero, 2004). En todos los estudios sobre meteoritos es esencial para el geólogo planetario determinar, en primer lugar, si se trata de una "caída", con evidencias de impacto o delante de testigos o si, por el contrario, el ejemplar meteorítico simplemente se ha encontrado, lo que se conoce como un "hallazgo". Los últimos cálculos basados en los registros históricos y observaciones, indican que alrededor de 500 meteoritos mayores de 0,5 kilos caen a la Tierra cada año, aunque solamente cuatro son observados. Desde el punto de vista histórico es importante considerar que las caídas coincidentes con la observación simultánea de bólidos son escasísimas y pueden contarse prácticamente con los dedos de las manos en toda la historia de los meteoritos. Cualquier intento de establecer una hipotética 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 previa de su "edad terrestre" (tiempo que ha pasado desde que el meteorito cayó a la Tierra), mediante la utilización de dataciones isotópicas u otros métodos (p. ej. termoluminiscencia). Solamente de esta manera se podrá plantear la posible conexión entre un bólido y un hallazgo meteorítico a posteriori, "pero siempre en la categoría de hipótesis científica y no como hecho o dato de confirmación", pues los meteoritos están cayendo continuamente sobre la Tierra y el hallazgo del supuesto ejemplar podría estar relacionado (o no) con dicho bólido. Actuando de acuerdo con este procedimiento científico, se evitarán asignaciones erróneas (o inducidas de manera

fraudulenta), de supuestos hallazgos meteoríticos con determinados avistamientos multitudinarios de bólidos. Desafortunadamente esto podría suceder, propiciado por algunos coleccionistas y traficantes de meteoritos que insinuarían interesadamente que determinados fragmentos se corresponden con un determinado bólido que ha tenido repercusión mediática (incluso nada más encontrarlos y sin hacer ningún estudio previo), para así incrementar el valor crematístico de las piezas y que museos u otras instituciones se interesen por ellos y los adquieran (Martínez Frías et al., 2004a; Martínez Frías, 2008). En este sentido, es muy importante desarrollar, con sólidos fundamentos científicos, la reglamentación correspondiente a la Ley Orgánica 16/2007 del 13 de diciembre, ya que en su Artículo 3 epígrafe 38, incluye por primera vez a los meteoritos como patrimonio geológico (propuesta que fue avanzada en 1998 por el autor del presente artículo en una visita al Senado) (Martínez-Frías et al., 2009).



Figura 1. Sección del meteorito condritico NWA2892, 20x10 cm (foto: cortesía de Meteorites Australia).

Entrando ya en su tipología, aunque de manera muy sucinta, existen tres categorías básicas de meteoritos atendiendo a su contenido en dos tipos de materiales (hierro-níquel metálico y silicatos): sideritos (Irons), prácticamente el cien por cien de metal, siderolitos (Stony irons), casi iguales proporciones de metal y silicatos, y lititos o aerolitos (Stony), principalmente silicatos. Estos últimos comprenden a su vez dos subgrupos importantes: condritas y acondritas. Las condritas

(figura 1) son, con mucho, las más numerosas y probablemente también las más importantes por muchas razones distintas (incluso de tipo astrobiológico). Las condritas se dividen en cuatro clases con 13 grupos, según su composición química: condritas enstatíticas (E: EH y EL), condritas carbonáceas (C: CI, CM, CO, CV, CR, CK, CH y CB), condritas ordinarias (O: H, L y LL) y condritas Rumuruti (R). Estas últimas son una clase definida recientemente, al encontrarse cinco meteoritos de las mismas características, número mínimo necesario para nombrar una nueva clase (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 cóndulos. De acuerdo con Bischoff (2001a y b), las acondritas incluyen:

- ▶ Las denominadas acondritas primitivas: acapulcoitas, winonaitas y lodranitas.
- ▶ 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).
- ▶ Aubritas, ureilitas, angritas y las HED (howarditas, eucritas, diogenitas).
- ▶ También como un grupo con entidad propia, las lunaitas (meteoritos lunares).

Los siderolitos se encuadran normalmente en pallasitos y mesosideritos. 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 mamacita y taenita. A todos ellos hay que añadir los meteoritos planetarios (de Marte y la Luna) que han alcanzado también nuestro planeta y que sería prolijo abordar aquí.

A esta complejidad tipológica hay que sumar que no es la primera vez que, entre los propios especímenes extraterrestres, determinados ejemplares han tenido que ser reclasificados (algunos meteoritos marcianos son claros ejemplos de ellos). Además, existen determinados materiales, a los que se denomina en una terminología no-oficial pseudometeoritos, que en ocasiones plantean serias dificultades. En 1994 cayó un supuesto meteorito en la zona de Getafe. Su estudio indicó que, aunque las circunstancias de su caída están bien documentadas (impactó en trayectoria descendente/bajo ángulo contra un automóvil en marcha hiriendo en la mano al conductor), sus características petrológicas y geoquímicas no coinciden con las de ningún meteorito previamente clasificado (básicamente es una roca ultrarrefractaria rica en larnita). Por ello se clasificó por nuestro equipo de investigación como pseudometeorito (Muñoz-Espadas et al., 2002) y ha sido objeto de un informe especial de la Meteoritical Society en el que, específicamente, se citan como referencia internacional nuestros trabajos (ver, entre otros, Martínez-Frías et al., 1999, Martínez-Frías et al., 2004 a y b, www.meteoriticalsociety.org/ y <http://tierra.rediris.es/merge/getafe.html>). En relación con el pseudometeorito de Getafe, también es importante destacar la investigación sobre la roca ultrarrefractaria de Granada (Colorado, EE UU), llevada a cabo por investigadores del departamento de Geociencias de Fort Hays State University (Hays, Kansas). Recientemente, la colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales ha sido objeto de un artículo recopilatorio de la información existente sobre meteoritos (García Guinea et al., 2006) y ha recibido dos entradas de ejemplares (una condrita L6: Villalbeto de la Peña y una eucrita-br: Puerto Lápice) correspondientes a hallazgos meteoríticos que se han relacionado con los bólidos del 4 de enero de 2004 y del 10 de mayo de 2007 (Llorca et al., 2005, Madiedo et al., 2008). Los primeros fragmentos de Villalbeto de la Peña se encontraron siete días después del avistamiento del bólido de 2004 y los de Puerto Lápice 24 días después del bólido de 2007. Posteriormente se encontraron otros fragmentos, que también se asignaron a dichos bólidos (ver <http://tin.er.usgs.gov/meteor/>).

En general, en España los estudios específicos sobre meteoritos son desafortunadamente aún muy escasos, con contadas excepciones, como en el Centro de Astrobiología, las universidades Complutense de Madrid y de Barcelona, el Museo

Nacional de Ciencias Naturales de Madrid y el de Ciencias Naturales de Tenerife. Por poner ejemplos directos del trabajo que se realiza sobre estos temas, éstos incluyen:

- ▶ Estudios generales de clasificación de meteoritos.
- ▶ Estudios mineralógicos, cristaloquímicos y espectroscópicos de IDP y partículas de polvo interestelar.
- ▶ Caracterización de condritas carbonáceas y ordinarias y mesosideritos, aplicando técnicas mineralógicas y geoquímicas clásicas y de espectroscopia Raman e IR.
- ▶ Estudios de la interacción de determinadas bacterias con meteoritos (fundamentalmente sideríticos).
- ▶ Análisis comparativo de la influencia de la radiación UV en meteoritos y determinadas rocas primitivas terrestres (komatiitas).

Investigación de cráteres y eventos de impacto meteorítico

Los impactos meteoríticos constituyen, probablemente, los episodios geológicos más extendidos en el sistema solar y su estudio desde la geología planetaria tiene multitud de implicaciones relacionadas con aspectos muy diversos, desde los propios procesos de acreción planetaria a la búsqueda de vida en Marte (figura 2) (Martínez-Frías y Ormö, 2005). Las colisiones contra la Tierra han jugado un papel geológico muy relevante en el modelado de la evolución planetaria. Unos pocos ejemplos (Martínez-Frías y Chicarro, 2005): el calor generado por los impactos se supone que contribuyó a la desgasificación y deshidratación de la temprana corteza terrestre rica en volátiles, favoreciendo así la formación de las primitivas atmósfera e hidrosfera; grandes impactos pueden haber participado en la ruptura de determinadas áreas corticales, contribuyendo a la apertura de las zonas de rifts oceánicos y posiblemente a la formación de corteza continental anómala como es el caso de Islandia; los anillos y las zonas elevadas centrales de varias estructuras de impacto en depósitos sedimentarios han servido de reservorios de petróleo y gas susceptibles de ser explotados y también de grandes mineralizaciones de cobre-níquel como la cuenca de Sudbury en Canadá, que están relacionados con el gigantesco impacto que tuvo lugar en el Precámbrico; los impactos en la primitiva Tierra, particularmente por cometas, pueden haber aportado los compuestos orgánicos necesarios para el comienzo y evolución de la vida; un número importante de extinciones de plantas y animales a través de toda la historia geológica de nuestro planeta están ligadas a efectos globales resultantes, entre otras causas, de grandes impactos meteoríticos. Los cráteres también son indicadores de la "energía" de un cuerpo planetario. Así la Luna, sin actividad geológica, no dispone de energía suficiente para remodelar su superficie por lo que permanece intensamente craterizada. Por el contrario, nuestro planeta ha sido capaz, gracias a la actividad geodinámica interna y externa, de modificar sus rasgos corticales, por lo que muchísimas estructuras colisionares han desaparecido.

Gusev Crater Site (TCM-5 DeltaDOR, -2Day:
MER-A; Open of window=dashed, Close=solid)

T.J. Parker, A. Watson, F. S. Anderson, JPL

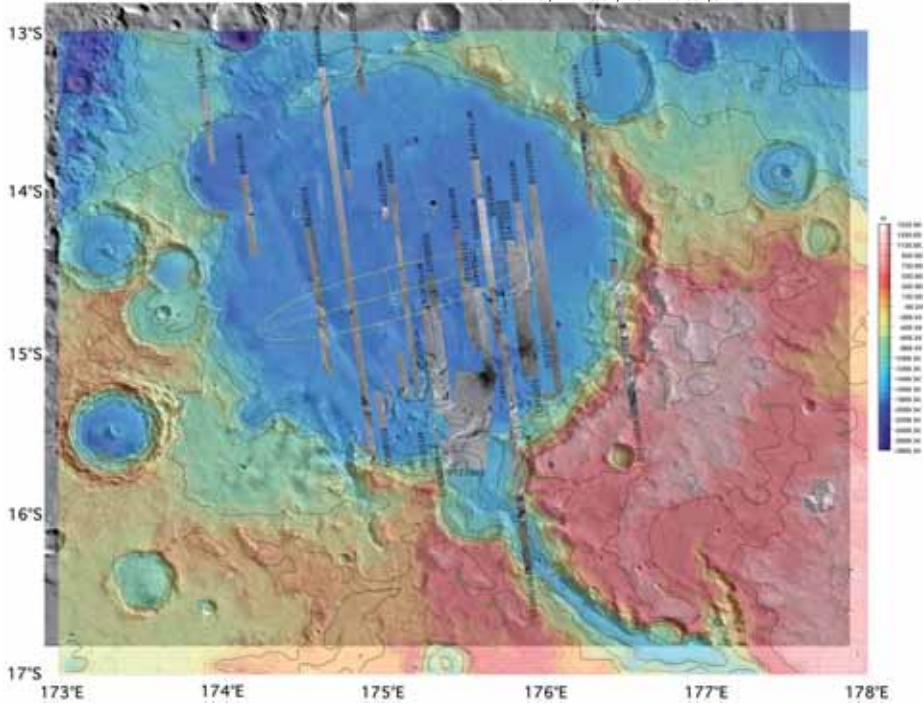


Figura 2. Mapa del cráter Gusev. Se trata de un cráter de impacto meteorítico en Marte con un diámetro de aproximadamente 150 km. Obsérvese la zona de amortizaje del Spirit (foto: cortesía NASA).

MER-A Spirit APXS X-Ray

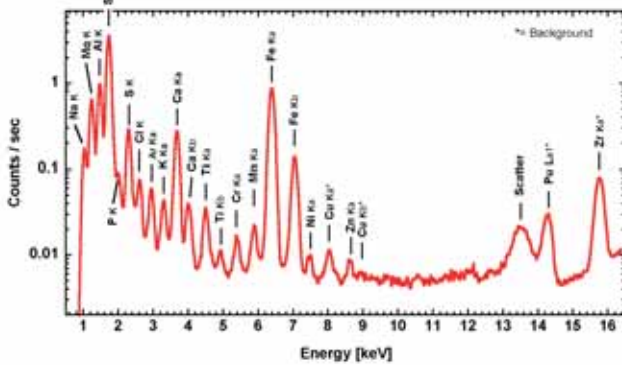


Figura 3. Análisis geoquímico del suelo marciano obtenido por el robot Spirit (NASA-Mars Exploration Rover) (foto: cortesía NASA).

Por último, decir que algunos cráteres (de impacto) en Marte (p. ej. cráter Gusev, figuras 2 y 3) constituyen zonas privilegiadas de exploración geológica y astrobiológica. No es casualidad que el robot Spirit haya “amartizado” precisamente en esta zona.

Los estudios de geología planetaria sobre este tipo de eventos, a veces con consecuencias catastróficas, deben tener en cuenta su componente temporal en el registro geológico. Nuestro planeta está en interacción constante con el espacio exterior, y la frecuencia con que los meteoritos alcanzan nuestro planeta decrece (afortunadamente) según aumenta el tamaño de los “impactores”. Se ha estimado que, por término medio, una vez cada pocos cientos de años la Tierra es alcanzada por un objeto de unos 70 metros de diámetro; cada diez mil años nos golpea un objeto de unos 200 metros y cada millón de años se produce el impacto de un cuerpo de más de 2 kilómetros de diámetro. Por último, cada 100 Ma tiene lugar una catástrofe como la que sucedió, en el límite K-T, cuando se produjo el choque de un cuerpo de unos 10 kilómetros 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. En la actualidad, se han identificado, de acuerdo con Spray y Heines (2006) alrededor de 170 estructuras de impacto (Spray y Heines, 2006), con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros. En España no existen estructuras confirmadas de impacto (Cortes et al., 2002; Spray y Heines, 2006) y hasta el momento, la única capa del registro sedimentario de España para la cual se ha demostrado de forma inequívoca su relación con un impacto meteorítico es la capa de arcilla del límite Cretácico-Terciario (Díaz et al., 2002). El mayor meteorito caído en España, del que se tiene referencias, es el de Molina de Segura (Murcia), con un peso original estimado de 144 kilos. Su espectacular impacto el 24 de diciembre de 1858 (a las 14:45) pudo seguirse detalladamente, gracias a la extraordinaria documentación que se conserva en el archivo del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, considerándose uno de los ejemplares españoles de mayor interés histórico (Martínez Frías y Lunar, 2008).

Desde enero de 2000 en que España se incorporó al programa IMPACT de la European Science Foundation, en el laboratorio de geología planetaria se vienen realizando estudios de todo este tipo de eventos de impacto que cubren aspectos de campo y laboratorio. Es importante indicar que, en nuestro país, geólogos fundamentalmente de la Universidad Complutense de Madrid, CSIC-Universidad de Granada, Universidad de Zaragoza y Museo de Ciencias Naturales de Tenerife ya habían abordado (y lo siguen haciendo) (Hernández Fernández et al., 2008), con excelentes resultados, el estudio de estos eventos, fundamentalmente desde el punto de vista geológico, geoquímico y paleontológico. Nuestros trabajos se iniciaron con la realización de un primer estudio sobre el registro de eventos de impacto en la península ibérica, enfocado específicamente en la investigación de la controvertida estructura de Azuara, y de una revisión detallada sobre las huellas geoquímicas de impacto en rocas terrestres (Díaz et al., 2002, Cortés et al., 2002, Muñoz-Espadas et al., 2003). Actualmente se centran en:

- ▶ La investigación geológica de determinadas estructuras inequívocas de impacto (Lockne, Acraman) (Ormo et al., 2004, Hill, 2004).

- ▶ El estudio de fases de alta presión mediante técnicas mineralógicas clásicas y espectroscopia Raman (Rull et al., 2006).
- ▶ La investigación sedimentológica y geoquímica del límite K/T en facies de plataforma marina somera del área de Cantabria (Ayllón et al., 2004).
- ▶ Estudios de simulación de laboratorio de impactos controlados (Ormö et al., 2004, 2005, 2006).
- ▶ Estudio comparado de estructuras confirmadas y no confirmadas de impacto como análogos terrestres para la exploración de Marte (Martínez Frías et al., 2008).

Análogos terrestres y exploración planetaria

A pesar de la ingente cantidad de datos geomorfológicos y geofísicos obtenidos gracias a las misiones espaciales, existe aún una gran ambigüedad en la interpretación de ciertos rasgos geológicos de sus superficies. De aquí la importancia de disponer de modelos terrestres (geología, geoquímica, mineralogía, metalogenia, etc.), basados en el conocimiento de los procesos desarrollados en nuestro planeta, que nos permitan extrapolar su funcionamiento a otros cuerpos planetarios. Por ello, la geología terrestre tiene muchas de las claves para la exploración de otros mundos y el estudio de los denominados "análogos terrestres" está siendo fundamental, por ejemplo, para la exploración de Marte o Europa, como también lo está siendo la utilización de cámaras de simulación planetaria.

Todo indica, sobre todo tras los últimos resultados de las misiones MER, Mars Express y Phoenix, que en Marte es extremadamente importante, tanto para la interpretación de

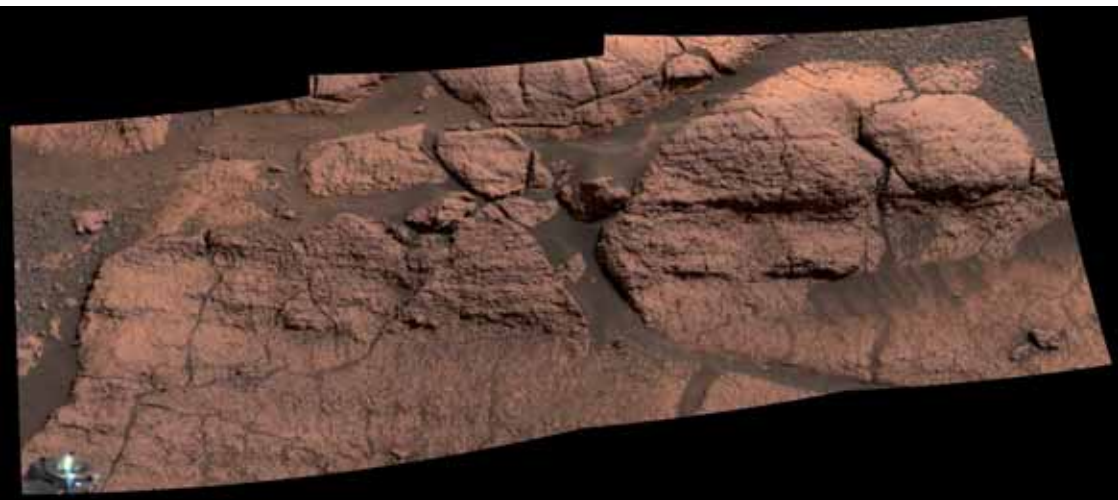


Figura 4. Mosaico de imágenes tomado por la cámara del Mars Exploration Rover-Opportunity correspondiente al afloramiento marciano de "El Capitán", donde se detectó la presencia de jarosita (foto: cortesía NASA).

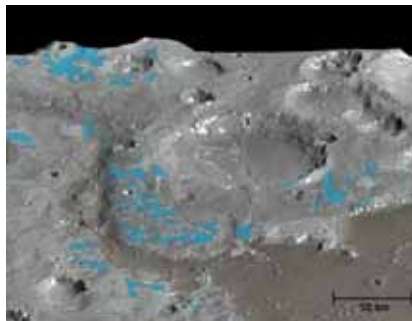
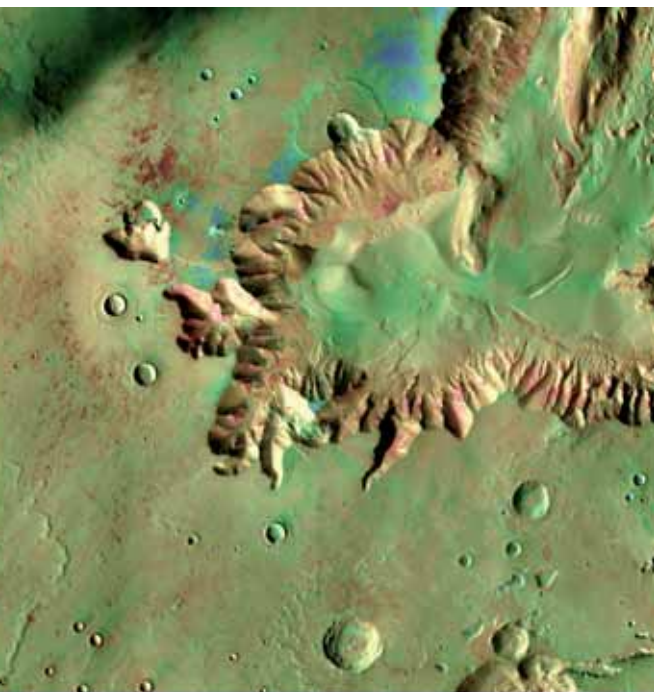


Figura 5. Imagen OMEGA en falso color de la zona de Marwth Vallis, donde se han cartografiado (en azul) los minerales ricos en agua (foto: cortesía ESA).

Figura 6. Imagen Themis de las colinas de la gran depresión Juventae Chusma, donde se ha detectado yeso y otros sulfatos relacionados con la interacción agua-roca en Marte (foto: cortesía NASA/JPL/ASU).

determinados modelos geológicos y mineralógicos superficiales, como desde una perspectiva astrobiológica, la conexión volcanismo-agua, así como diferenciar claramente, desde el punto de vista de la exploración, si las interpretaciones y modelización se basan en los sistemas geológicos antiguos o actuales (figuras 4-6). Todos aquellos minerales relacionados con el agua en cualquier contexto, desde evaporíticos a hidrotermales son auténticos geomarcadores (Martínez-Frías et al., 2006, 2007). Son muchos los sistemas terrestres que están siendo explorados desde esta perspectiva, desde la Antártida a las áreas con actividad hidrotermal submarina de los fondos oceánicos, de los desiertos de Atacama a los ríos ácidos de la Faja Pirítica, o de las mineralizaciones del SE peninsular a los cráteres canadienses, entre otros.

En el caso del Centro de Astrobiología, los trabajos relacionados con análogos terrestres tienen como proyecto emblemático, sin duda, el área de Río Tinto (Fernández-Remolar et al., 2005). En nuestro laboratorio y en el marco de la Unidad Asociada CSIC-Universidad de Valladolid, los trabajos cubren, en colaboración estrecha con muchos otros colegas e instituciones, varios aspectos temáticos y zonas geodinámicas:

- ▶ La caracterización de aspectos mineralógicos y paragenéticos del sistema ácido superficial y subsuperficial de Río Tinto, en colaboración con especialistas en robótica, microbiología, química prebiótica y ecología microbiana (proyecto MARTE).

- ▶ El estudio comparado de sistemas hidrotermales de mineralización (en algunos casos biomineralización) subaéreos y submarinos en distintas áreas: Jaroso (jarosita), Sorbas (yeso), Golfo de Cádiz (chimeneas metanógenas), Taganana (jaspe-celadonita), Isla Decepción (emisiones submarinas-óxidos de Fe-Mn).
- ▶ Estudios de mineralogía, geoquímica y geología planetaria relacionados con la Tierra primitiva, en Pílbara (Australia) y zonas de volcanismo komaiítico.
- ▶ Simulaciones y análisis bajo condiciones marcianas de asociaciones minerales seleccionadas.

Consideraciones finales

Tal y como se indicó en la reciente Mesa Redonda del VII Congreso Geológico de España (Martínez Frías et al., 2008), la geología planetaria se encuentra en pleno desarrollo en los países avanzados y en nuestro país, poco a poco, va ocupando —aunque aún lentamente— mayores espacios, tanto en aspectos profesionales relacionados con la investigación como la docencia. No hay más que asomarse a las revistas científicas de alto impacto (*Nature*, *Science*) para comprobar cómo estudios de mineralogía o geodinámica marciana están siendo principales focos de interés. Los geólogos tenemos que ser capaces, sin complejos, de participar en las misiones espaciales como ya lo están haciendo especialistas de otras áreas. Sería absurdo que astrónomos, astrofísicos, químicos o ingenieros fueran los responsables del estudio de los minerales, rocas, geomorfología, geodinámica o geoquímica de Marte, o de la interpretación de los afloramientos que allí se encuentran, al igual que lo sería que nosotros pretendiéramos realizar su trabajo. Pero para ello es necesario, incluso, un cambio de mentalidad en muchas instancias académicas y científicas de nuestro país. Todavía hoy, en España, algunos de nuestros colegas ven estas investigaciones como inusuales, o incluso fuera de lugar, considerando como ciencia ficción la ciencia avanzada que se viene realizando con normalidad en otros países (Martínez Frías, 2006; Martínez Frías et al., 2008). Un ejemplo sintomático es el reciente congreso de la Sociedad Geológica de América (GSA) donde su división de Geología Planetaria, en su reunión anual del 5 al 9 de octubre en Houston, Texas, contó con 17 sesiones específicas sobre el tema, un programa de becas para estudiantes y el prestigioso galardón “G. K. Gilbert Award”, lo que nos da idea de la diferencia aún abismal que nos separa y lo que nos queda por avanzar en nuestro país en relación con esta disciplina. Es importante destacar que en el nuevo Plan Estratégico del CSIC la geología planetaria está incluida como sublínea específica de “Geología Planetaria y Atmósferas” dentro de la línea de “Habitabilidad” del Centro de Astrobiología. Asimismo, el ICOG viene apoyando de manera notable, durante los últimos diez años, iniciativas importantes relacionadas con la geología planetaria. Personalmente estoy convencido de que su futuro profesional es muy prometedor, pero, en muchos aspectos, su desarrollo y perspectivas de futuro en España dependen sobre todo de nosotros, los geólogos.

Agradecimientos

Gracias al Centro de Astrobiología (CAB) por su apoyo institucional y a todos sus miembros por su colaboración interdisciplinar en las investigaciones que estamos llevando a cabo. Gracias también al Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, por la presente iniciativa y su continua labor de apoyo a distintas actividades relacionadas con la geología planetaria. Más específicamente, deseo expresar mi agradecimiento a la doctora Olga Prieto, doctora Delphine Nna Mvondo, doctor Jens Ormö, doctor Guillermo Muñoz Caro, doctor Andrew Hill, Maite Fernández Sanpedro y María Paz Martín, así como a todos los miembros que pasaron por nuestro laboratorio en el pasado y que han participado en mayor o menor medida en el desarrollo de las investigaciones. Deseo asimismo dar las gracias a todos los colaboradores externos de nuestros trabajos, en particular a aquellos que han participado de manera más directa: profesor R. Lunar, profesor F. Rull, doctor Antonio Delgado y doctor José Antonio Rodríguez Losada. En el ámbito museístico mi agradecimiento especial a Jesús Madero y F. García Talavera por su extraordinaria labor al frente del Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha y del Museo de Ciencias Naturales de Tenerife respectivamente, y en el docente es obligada la mención del profesor Francisco Anguita (UCM), por su dedicación a la promoción y enseñanza de la geología planetaria en España.

Referencias bibliográficas

Arenillas, I.; Molina, E. y Schmitz, B. (1999). Planktic foraminiferal and $\delta^{13}\text{C}$ isotopic changes across the Paleocene/Eocene boundary at Possagno (Italy). *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 88: 352-364.

Arenillas, I.; Arz, J. A.; Molina, E. y Dupuis, C. (2000). An independent test of planktic foraminiferal turnover across the Cretaceous/Paleogene (K/P) boundary at El Kef, Tunisia: catastrophic mass extinction and possible survivorship. *Micropaleontology* 46(1): 31-49.

ASU (2006). <http://europa.la.asu.edu/>

Ayllón Quevedo, F. y Martínez-Frías, J. (2004). Procesos diagenéticos en la transición Cretácico-Terciario del sector occidental de la cuenca Vasco-Cantábrica. *Macla* 2: 59-60.

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.

Bradley, J. (2003). The astromineralogy of interplanetary dust particles. Henning, T. (ed.) *Astromineralogy*, Springer.

Cortés, A. L.; Díaz-Martínez, E.; Sanz-Rubio, E.; Martínez-Frías, J. y Fernández, C. (2002). Cosmic impact vs. terrestrial origin of the Azuara structure (Spain): A review. *Meteoritics & Planetary Science* 37: 875-890.

Díaz Martínez, E.; Sanz, E. y Martínez-Frías, J. (2002). Sedimentary record of impact events in Spain. *Geological Society of America Special Papers* 356: 551-563.

Fernández-Remolar, D. C.; Morris, R.; Gruener, J. E.; Amils, R y Knoll, A. H. (2005). The Río Tinto Basin, Spain: Mineralogy, sedimentary geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars, *Earth Planet. Sci. Lett.* 240: 149-167.

García Guinea, J.; Martín Escorza, C.; Fernández Hernán, M.; Sánchez Muñoz, L.; Correcher, V.; Sánchez Chillón, B. y Tormo, L. (2006). Meteoritos españoles del Museo Nacional de Ciencias Naturales. *Estudios Geológicos* 62(1): 11-30.

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.

Hernández-Fernández, S.; Rodríguez-Losada, J. A.; García Talavera, F.; Lunar-Hernández, R. y Martínez-Frías, J. (2008). La colección de meteoritos del Museo de Ciencias Naturales de Tenerife: Catalogación y resultados preliminares. *Geo-Temas* 10: 1495-1497.

Hill, A. C.; Grey, K.; Gostin, V. A. y Webster, L. J. (2004). New records of Late Neoproterozoic Acraman ejecta in the Officer Basin. *Australian Journal of Earth Sciences* 51: 47-51.

ISIS (2006). <http://isis.astrogeology.usgs.gov/>

Jenniskens, P.; Russell, R. W.; Yano, H.; Plane, J. M. C.; Murray, I. S.; Taylor, M. J.; Borovicka, J.; Kuenzi, K.; Smith, W. H.; Rairden, R. L.; Stenbaek-Nielsen, H. C.; Rietmeijer, F. J. M.; Betlem, H. y Martínez-Frías J. (2003). Investigation of the Ejection and Physical Properties of Large Comet Dust Grains and Their Interaction with Earth's Atmosphere During the 2002 Leonid Multi-Instrument Aircraft Campaign. *Bulletin of the American Astronomical Society*.

Llorca, J.; Trigo, J. M.; Ortiz, J. L.; Docobo, J. A.; García Guineez, J.; Castro Tirado, A.; Rubin, A. E.; Eugster, O.; Edwards, W.; Laubenstein, M. y Casanova, I. (2005). The Villalbeto de la

Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field, and petrography. *Meteoritics & Planetary Science* 40(6): 795-804.

Madiedo, J. M.; Trigo-Rodríguez, J. M.; Llorca, J.; Borovicka, J.; Zamorano, J.; Izquierdo, J. y Ocaña, F. www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/1815.pdf.

Martínez-Frías, J. (2002). <http://tierra.rediris.es/merge/congremeteor/>

Martínez-Frías, J. (2006). Interdisciplinaria y Exploración Planetaria. *Tribuna de la Ciencia*, julio: 3.

Martínez Frías, J. (2008). *Meteohistoria. La investigación de los meteoritos en España. Historia de Iberia Vieja* 34: 90-95.

Martínez-Frías, J. y Chicarro, A. F. (2003). Vida y función de los meteoritos. *El Cultural El Mundo*, 6 de febrero.

Martínez-Frías, J. y Madero, J. (2004). "The Iberia fireball event of 4 January 2004". *Interdisciplinary Science Reviews* 29(2): 1-6.

Martínez-Frías, J y Madero, J. (coord.) (2005). *Meteoritos y Geología Planetaria. Ediciones Provinciales 23, Diputación Provincial de Cuenca*, 304 pp.

Martínez-Frías, J. y Ormö, J. (2005). Impactos meteoríticos. *Revista Sociedad Española de Física*, abril-junio: 1-9.

Martínez-Frías, J. y Hochberg, D. (2007). Classifying science and technology: two problems with the UNESCO system *Inter. Sci. Rev.* 32(4): 315-319.

Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2008). Molina de Segura: the largest meteorite fall in Spain. *Astronomy & Geophysics* 49(4). 26-29.

Martínez-Frías, J.; Weigel, A.; Marti, K.; Boyd, T.; Wilson, G. H. y Jull, T. (1999). The Getafe rock: Fall, composition and cosmic ray records of an unusual ultrarefractory scoriaceous material. *Revista de Metalurgia* 35: 308-315.

Martínez-Frías, J.; Benito, R.; Wilson, G.; Delgado, A.; Boyd, T. y Marti, K. (2004). Analysis and chemical composition of larnite-rich ultrarefractory materials. *Journal of Materials Processing Technology* 147-2: 204-210.

Martínez-Frías, J.; Rull, F. y Lunar, R. (2004a). Mineralogía espacial: De la materia primigenia a la exploración de Marte. *Macla* 1: 11-18.

Martínez-Frías, J.; Benito, R.; Delgado, A. y Rodríguez-Losada, J. A. (2004b). Meteorites versus rocas terrestres: El pseudometeorito de Getafe, XXIV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, Cuenca. *Macla* 2: 55-56.

Martínez-Frías, J.; Amaral, G. y Vázquez, L. (2006). Astrobiological significance of mineral son Mars surface environments. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5: 219-231.

Martínez-Frías, J.; Lázaro, E. y Esteve-Núñez, A. (2007). Geomarkers versus biomarkers: Paleoenvironmental and astrobiological significance. *AMBIO: Journal of the Human Environment* 36(5): 425-427.

Martínez Frías, J.; García Talavera, F.; Rull, F.; López-Vera, F.; Capote, R.; Navarro Latorre, J. M.; Sánchez-Pinto, L.; López Rondón, J.; Rodríguez Losada, J. A.; Fernández Sampedro, M. T.; Martín Redondo, M. P. y Menor-Salvan, C. (2008). Impactos en Mauritania: nuevos datos mineralógicos, texturales y geoquímicos de las megabrechas de Richat y del cráter meteorítico de Aouelloul. *Geo-Temas* 10: 1487-1490.

Martínez Frías, J.; Lunar, R., Rodríguez-Losada, J. A.; Eff-Darwich, A. y Madero Jarabe, J. (2008). La Geología en la exploración planetaria. *Geo-Temas* 10: 1621-1624.

Martínez-Frías, J.; Rodríguez Losada, J. A.; Lunar, R., Rull, F.; Madero, J.; García Talavera, F.; Pérez Verde, A. y Hernández-Fernández, S. Meteorites as "geological heritage" in the new Spanish legislation: current state, scientific and etnical praxis, and international implications regarding geodiversity in the Earth and Solar System". *International Conference on Bolides and Meteorite Falls, Praga, 10-15 mayo de 2009.*

McSween, J. Y. Jr. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press, 310 pp.

Molina E.; Gonzalvo C. y Keller G. (1993). The Eocene-Oligocene planktic foraminiferal transition: extinction, impact and hiatuses. *Geological Magazine* 130(4): 483-499.

Muñoz-Espadas, M^º J. (2003). Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y LL5. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Muñoz-Espadas, M. J.; Martínez-Frías, J.; Lunar, R.; Sánchez, B. y Sánchez, J. (2002). The meteorite collection of the National Museum of Natural Sciences, Madrid, Spain: An update of the catalog. *Meteoritics & Planetary Science* 37, supl.: 89-95.

Muñoz-Espadas, M. J.; Martínez-Frías, J. y Lunar, R. (2003). Main geochemical signatures related to meteoritic impacts in terrestrial rocks: A review. Koeberl, C. y Martínez-Ruiz, F. *Impact Markers in the stratigraphic record*. Springer Nueva York, 65-91.

Ormö, J.; Dohm, J. M.; Ferris, J. C.; Lepinette, A. y Fairén, A. G. (2004). Marine-target craters on Mars? An assessment study *Meteoritics and Planetary Science*, vol. 39 (2), 333-346.

Ormö, J.; Martínez-Frías, J.; Díaz, E.; Lepinette, A.; Lindstrom, M. (2004). Experiments with explosives and ordnance disposal devices for the simulation of specific processes during shallow marine impacts. *Lunar and Planetary Science Conference XXXV* (www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1276.pdf).

Ormö, J.; Lepinette, A. y Martínez-Frías, J. (2005). A combination of impact experiments and numerical modelling in the analysis of special features at wet impacts and crater fields. *68th Annual Meteoritical Society Meeting (2005)* (www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc2005/pdf/5160.pdf).

Ormö, J.; Lindström, M.; Lepinette, A.; Martínez-Frías, J. y Díaz, E. (2006). Cratering and modification of wet-target craters: Projectile impact experiments and field observations of the Lockne marine-target crater (Sweden). *Meteoritics & Planetary Science* 41-10: 1605-1613.

Rull, F.; Martínez-Frías, J. y Rodríguez-Losada, J. A. (2006). Micro-Raman spectroscopy of El Gasco pumice (Western Spain). *Journal of Raman Spectroscopy* 38: 239-244.

Schmitz, B.; Asaro, F.; Molina, E.; Monechi, S. von; Salis, K. y Speijer R. P. (1997). High-resolution iridium, ^{13}C , ^{18}O , foraminifera and nannofossil profiles across the latest Paleocene benthic extinction event at Zumaya, Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 133 (1-2): 49-68.

SEM (2004). www.jccm.es/museociencias/modulos/sem/libroprogramaSEM.pdf

Spray, J. y Heins, J. (2006). www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/

USGS (2008). <http://astrogeology.usgs.gov/>

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.