

Análisis de la condrita ordinaria Dalgety Downs (L4): Mineralogía, geoquímica y espectroscopía Raman

Analysis of the ordinary chondrite of Dalgety Downs (L4): Mineralogy, geochemistry and Raman spectroscopy

Andrés Caño Blanes¹, Rosario Lunar Hernández^{1,2}, Valentín García Baonza^{2,3} y Jesús Martínez-Frías²

¹ Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Facultad de Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid, España. andrescb1193@gmail.com, lunar@ucm.es

² Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), Madrid, España. j.m.frias@igeo.ucm-csic.es

³ Departamento de Física Química I, Facultad de Ciencias Químicas, UCM. 28040 Madrid, España. vgbaonza@quim.ucm.es

RESUMEN

El meteorito de Dalgety Downs, hallado en el Desierto de Australia Occidental, es una condrita ordinaria muy poco estudiada, que sin embargo contiene una valiosa información acerca de la evolución de la materia primitiva del Sistema Solar y los procesos que le afectan. Este ejemplar presenta unas características texturales, mineralógicas y geoquímicas en la matriz y cóndrulos que revelan procesos metamórficos de temperaturas intermedias y eventos de impacto moderados, además de una intensa alteración desarrollada durante su entrada en la atmósfera terrestre y su posterior exposición al clima, en lo que se define como la costra de fusión. Entre los métodos empleados en este estudio destaca la espectroscopía Raman como herramienta de identificación mineralógica, técnica que ha demostrado una gran precisión en materiales geológicos y que será empleada en próximas misiones espaciales.

Palabras clave: condritas ordinarias, cóndrulos, matriz, espectroscopía Raman.

Geogaceta, 69 (2021), 87-90
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Se denominan meteoritos aquellos fragmentos de asteroides, rocas procedentes de la Luna y Marte, e incluso polvo interplanetario y cometario que alcanzan la superficie de la Tierra u otro cuerpo planetario sin desintegrarse por completo en su atmósfera. Poseen una notoria importancia en el campo de la Geología Planetaria o Astrogeología ya que son determinantes para el estudio del origen de la Tierra y el nacimiento y evolución del Sistema Solar.

Las condritas son meteoritos pétreos o lititos que no han sufrido procesos de alteración y metamorfismo relacionados con la diferenciación del cuerpo padre asteroidal, y son clasificadas en cuatro clases y trece grupos en base a su composición química: condritas ordinarias (H, L y LL), condritas carbonáceas (CI, CM, CO, CV, CR, CK, CH y CB), condritas ensta-

títicas (EH y EL) y condritas Rumuruti (R) (Bischoff, 2001a, b).

Las condritas ordinarias son el tipo de condritas más abundante (93,5%), y están compuestas por una proporción en torno al 65-75% de volumen de cóndrulos y un 10-15% de una matriz de grano fino, en la que pueden formar parte inclusiones refractarias ricas en Ca y Al (CAI's) y bajas proporciones de aleación de Fe-Ni. La nomenclatura H-L-LL las agrupa en función de su relación de hierro metálico frente al hierro oxidado, siendo descendente esta relación en la secuencia y aportando información acerca de las condiciones de oxidación durante su formación.

El estudio de esta condrita aportará por tanto nuevos datos mineralógicos y geoquímicos que sirvan de apoyo para futuras investigaciones que ayuden a comprender como era la materia primitiva del Sistema Solar y su evolución, así como valorar el potencial analítico de la

ABSTRACT

The Dalgety Downs meteorite, found in the Western Australian Desert, is a poorly studied ordinary chondrite, that however contains valuable information about the Solar System primitive matter evolution and the processes that affect it. This specimen exhibits textural, mineralogical and geochemical characteristics in matrix and chondrules that reveal metamorphic processes of intermediate temperatures and moderate impact events, in addition to an intense alteration developed during its entry into the terrestrial atmosphere and later exposure to climate, in what is defined as the fusion crust. Among the methods employed in this study, Raman spectroscopy highlights as a mineralogical identification tool, a technique of high precision in the analysis of geological materials and that is expected to be used in upcoming space missions.

Keywords: ordinary chondrites, chondrules, matrix, Raman spectroscopy.

Fecha de recepción: 24/10/2019
Fecha de revisión: 23/10/2020
Fecha de aceptación: 27/11/2020

espectroscopía Raman, técnica con una relevancia científica al alza debido a su uso previsto en futuras misiones espaciales (ExoMars, Mars 2020).

Procedencia y Antecedentes

Dalgety Downs se clasifica como una condrita ordinaria L4 (Easton y Elliot, 1977) que fue hallada en la Región de Gascoyne, Australia Occidental, en el año 1941 con coordenadas aproximadas de latitud 25° 20' S y longitud 116° 11' E, según datos de la "Meteoritical Bulletin Database" perteneciente a la Meteoritical Society (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>).

Las referencias sobre esta condrita en la literatura científica internacional son escasas, si bien existen diferentes estudios relacionados con su contenido en isótopos cosmogénicos que tratan de determinar su grado de meteorización o

weathering e integrarlos en posteriores investigaciones (Herzog y Cressy, 1976; Englert y Herr, 1978; Herzog *et al.*, 1995).

El ejemplar objeto de este estudio (Fig. 1A), que pertenece a la litoteca del grupo de investigación de meteoritos y geociencias planetarias del Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM), se trata de un fragmento de 620 gramos (de un total de 257 kg de meteorito recuperados) y unas dimensiones de 9 x 7 x 4 cm que presenta una costra de fusión oscura e irregular con espesores que varían entre los 2 y 5 mm.

Mineralogía y texturas

Cóndrulos

Dalgety Downs contiene un extenso abanico de tipos y texturas condruales (Fig. 1) que, clasificados en orden decreciente de abundancia, se agrupan en: barrados de olivino (BO), porfídicos de olivino (PO), porfídicos de piroxeno (PP), radiales de piroxeno (RP) y en menor medida de textura criptocristalina. La mayoría de estos poseen diámetros de 1 a 2 mm, aunque se han observado tamaños de hasta 8 mm, con bordes bien diferenciados respecto a la matriz, si bien, en ocasiones, presentan una cierta pérdida de nitidez.

Son comunes además las fracturas intracóndrulo, con morfologías poligonales y estilolíticas, y las deformaciones en régimen dúctil de algunos cóndrulos (Figs. 1 E y H) que, junto al mosaicismo débil y extinciones ondulantes presentes en los olivinos, evidencian procesos de colisión pre y post acrecional.

Algunos de estos cóndrulos presentan una cierta complejidad estructural, que en algunos casos puede llegar a ser muy llamativa, presentando anillos dobles de olivino y piroxeno en cóndrulos de tipo BO (Fig. 1C).

La mesostasia (material intersticial intercrystalino), que es abundante y fácilmente reconocible en la mayoría de cóndrulos, presenta una textura criptocristalina con tonalidades que varían de grisáceas a oscuras.

Las fases minerales opacas que contienen están principalmente representadas por troilita y aleación de Fe-Ni, que en ocasiones llevan asociados pequeños cristales de cromita con morfologías irregulares. La manera en que estas fases se organizan espacialmente respecto a los

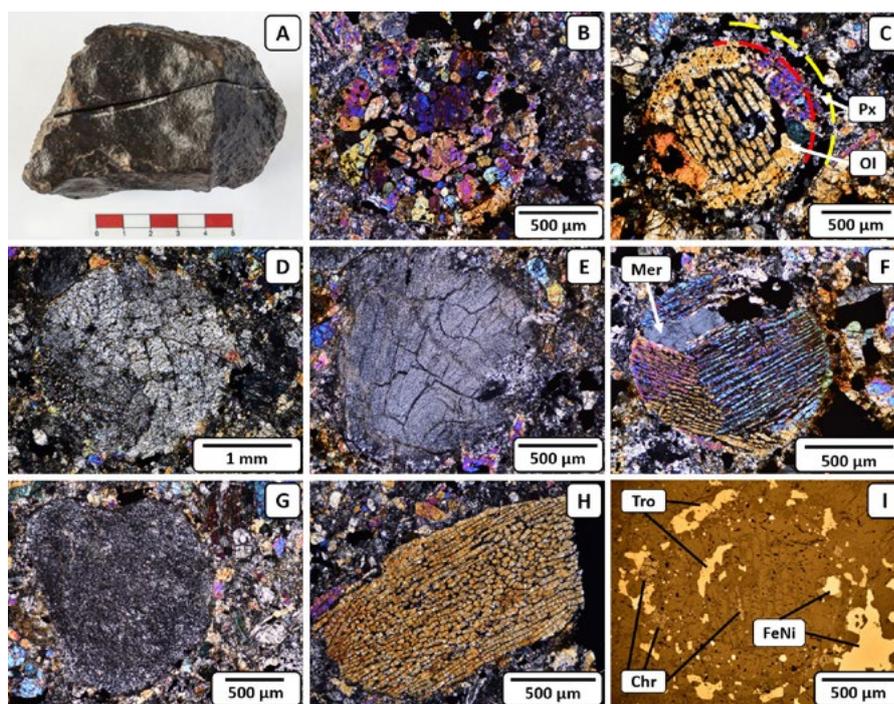


Fig. 1.- A) Ejemplar de Dalgety Downs. B) Cóndrulo porfídico de olivino. C, F y H) Cóndrulos barrados de olivino, con estructura compleja con un anillo interior de olivino y otro de piroxeno, con cristal relicto de merrillita, y afectado por deformación en régimen dúctil, respectivamente. D) Cóndrulo porfídico de piroxeno. E) Cóndrulo radial de piroxeno con abundante fracturación. G) Cóndrulo criptocristalino. I) Distribución de las fases metálicas en el interior de un cóndrulo. Mer: Merrillita; Tro: Troilita; FeNi: aleación de Fe-Ni; Chr: Cromita. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- A) Dalgety Downs specimen. B) Porphyritic olivine chondrule. C, F and H) Barred olivine chondrules, with a complex structure with an inner olivine ring and other of pyroxene, with a relict merrillite crystal, and affected by ductile deformation, respectively. D) Porphyritic pyroxene chondrule. E) Radial pyroxene chondrule with abundant fractures. G) Cryptocrystalline chondrule. I) Distribution of metallic phases inside a chondrule. Mer: Merrillite; Tro: Troilite; FeNi alloy; Chr: Chromite. See color figure in the web.

cóndrulos puede ser concéntricamente a los mismos en forma de pequeñas gotas diseminadas, o bien en su interior rellenando cavidades.

Destaca también la presencia de merrillita, un fosfato de calcio anhidro ($\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$) que aparece en el interior de cóndrulos en forma de cristales relictos (Fig. 1F).

Matriz

La matriz, que posee un tamaño de grano que varía entre fino y muy fino y puede formar cristales de mayor tamaño con morfologías idiomorfas a subidiomorfas en los bordes de cóndrulos, aparece muy fracturada y recrystalizada, lo que le confiere tonalidades oscuras y anubarradas. Carece de CAIs (inclusiones ricas en calcio y aluminio) y agregados ameboidales, comunes en otras condritas.

Presenta características de un metamorfismo de impacto que se manifiesta a través de una abundante fracturación

de su composición mineral, así como extinciones ondulantes, fracturas planares y un leve mosaicismo en algunos de los olivinos.

Aunque el olivino, seguido del piroxeno, constituyen la composición mineralógica principal en la matriz, esta contiene un volumen en torno al 15-18% de minerales opacos (troilita y Fe-Ni mayoritariamente y, de manera accesoria, cromita) que aparecen diseminados rellenando cavidades, sin la formación de caras cristalinas. Es común entre la aleación y la troilita el desarrollo de lamelas de exsolución, que describen entre sí caras planas y texturas gráficas (Fig. 2A). Estas fases metálicas desarrollan halos de oxidación en los que se ha detectado la presencia de hematites.

Hacia los bordes del ejemplar, en los sectores afectados por la costra de fusión y la meteorización, pueden realizarse las siguientes apreciaciones:

1) Granos de Fe-Ni que acusan una profunda corrosión, desarrollada hacia su interior con la formación de akaga-

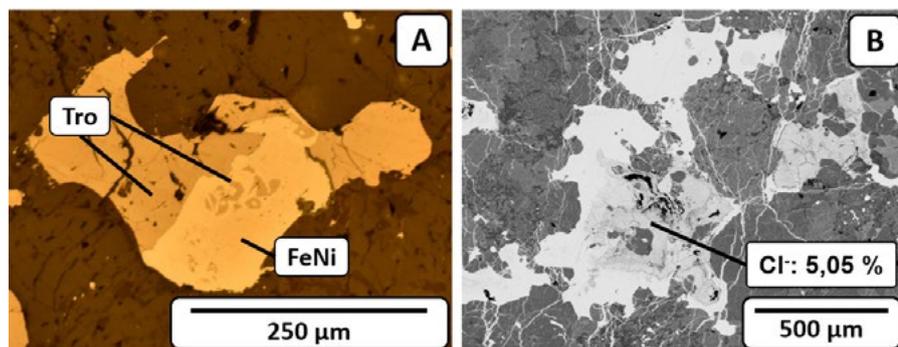


Fig. 2.- A) Fase metálica diseminada en la matriz. Desarrollo de texturas gráficas entre la troilita y la aleación de Fe-Ni. B) Imagen de electrones retrodispersados de la akaganeita formada probablemente a partir de la corrosión de granos de aleación (Bland *et al.*, 2006). Análisis químicos puntuales muestran contenidos en torno al 5 y 5,5% de Cl. Ver figura en color en la web.

*Fig. 2.- A) Metallic phases disseminated in the matrix. Development of graphic textures between troilite and Fe-Ni alloy. B) Image of backscattered electrons of the akaganeite, probably formed from the corrosion of alloy grains (Bland *et al.*, 2006). Chemical analysis shows contents around 5 and 5.5% of Cl. See color figure in the web.*

neíta ($\text{Fe}^{3+}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})$) (Fig. 2B).

2) Oxidación generalizada de la condrita, que le confiere tonalidades anaranjadas y dificulta la identificación de sus componentes (cóndrulos-matriz).

3) Venas oxidadas en la costra de fusión, atravesando cóndrulos y matriz.

La merrillita aparece también en la matriz en forma de pequeños cristales alotriomorfos diseminados, con una alteración significativa, y que en algunos casos se disponen rodeando los bordes de cóndrulos.

Geoquímica

La medida de la composición química de la mineralogía predominante, es decir olivino y piroxeno, muestra una clara homogeneidad composicional. Los olivinos presentan un rango composicional que varía entre $\text{Fa}_{22,3-25,2}$ y $\text{Fa}_{22,2-25,5}$ en cóndrulos y matriz, respectivamente. En cuanto a los piroxenos, estos son pobres en Ca (clinoenstatita) y presentan rangos composicionales que oscilan entre $\text{En}_{78,6-79,5}$ y $\text{Fs}_{18,7-20,5}$ en cóndrulos, y $\text{En}_{78,5-79,9}$ y $\text{Fs}_{18,1-20,2}$ en la matriz. Excepcionalmente, se han hallado piroxenos en la matriz con proporciones mayores de Ca, con composiciones de $\text{En}_{65,6-74}$ y $\text{Fs}_{15,1-16,8}$ que los sitúa en el campo de la pigeonita.

Los análisis realizados en la mesostasia de los cóndrulos reflejan un residuo de composición plagioclásica, con una media de 13,7% de Al_2O_3 , 13,31% de CaO , 5,47% de Na_2O y 0,4% de K_2O , además de proporciones residuales en FeO y MgO .

La aleación comprende la solución sólida entre kamacita, más abundante en

el ejemplar, y taenita. La kamacita contiene entre un 5,7 y un 6,5% en peso de Ni y hasta un 0,8% en Co. El contenido en Ni para la taenita varía entre 29,5 y 30,4% de peso, con valores inferiores de Co respecto a la kamacita que rondan el 0,3% en peso.

La cromita, descrita tanto en interior de cóndrulos como en forma de pequeños cristales diseminados en la matriz, presenta varias impurezas entre las que destacan concentraciones de hasta 2,7% de peso en Mg, 3,1% de Ti y 6,7% de Al.

Espectroscopia Raman

Mediante esta técnica se ha analizado el conjunto de la mineralogía presente en Dalgety Downs, obteniendo una serie de espectros característicos (Fig. 3) de los que se extraen las siguientes observaciones de mayor relevancia:

1) El desplazamiento hacia menores frecuencias, en torno a $5-7 \text{ cm}^{-1}$, de las principales bandas de los olivinos en la matriz y cóndrulos respecto a sus posiciones típicas (825 y 856 cm^{-1}), acompañado de un ligero incremento de unos 5 cm^{-1} en sus anchuras medidas a mitad de altura (FWHM).

2) Bandas situadas en frecuencias de 480 y 511 cm^{-1} en los espectros adquiridos en la mesostasia de cóndrulos, que corresponden a microcristales de plagioclasa (albita).

3) Los espectros obtenidos del análisis de fosfatos presentan dos bandas muy intensas en frecuencias de 960 y 976 cm^{-1} y bandas de menor intensidad a 408 , 448 y 1082 cm^{-1} , que se ajustan a las po-

siciones típicas de las bandas en espectros Raman de la merrillita contrastados en bases de datos especializadas (RRUFF, <http://rruff.info/>), por lo que se confirma la presencia de esta fase mineral en la matriz e interior de cóndrulos.

Discusión y Conclusiones

Los meteoritos, a través del estudio de sus mineralogías, texturas y datos geoquímicos, han sido típicamente una importante fuente de información acerca de la formación y evolución del Sistema Solar. Estos aspectos reflejan una serie de procesos acrecionales y post-acrecionales que afectaron al cuerpo padre asteroidal al que pertenece el ejemplar analizado, como son el metamorfismo térmico y de impacto, así como los efectos de la alteración atmosférica tras su colisión con la Tierra.

Dalgety Downs presenta una composición mineralógica muy homogénea entre los cóndrulos y su matriz, que junto a otros rasgos texturales característicos de un metamorfismo térmico avanzado como son la recristalización de la matriz, la pérdida de nitidez en bordes de cóndrulos y la desvitrificación de sus mesostasias, en la se forman microcristales de plagioclasa (Muñoz-Espadas, 2003), permiten confirmar el tipo petrológico 4 asignado a esta condrita (Van Schmus y Wood, 1967) en un contexto de temperaturas intermedias comprendidas entre los 600 y 700 °C (McSween, 1999).

Aunque en el ejemplar estudiado no han sido detectadas venas de impacto ni *pockets* de material fundido, la existencia de fracturas planares y extinción ondulante en los olivinos, acompañados de un mosaicismo débil generalizado, sugieren un metamorfismo de impacto de grado S4 o moderado con presiones comprendidas entre 30 y 35 GPa (Stöffler *et al.*, 1991). Otros autores, como Miyamoto y Ohsumi (1995), relacionan el desplazamiento hacia mayores frecuencias de las principales bandas Raman en olivinos y el aumento de sus anchuras a mitad de altura (FWHM) con un stress residual y un cierto grado de desorden en sus estructuras cristalinas debido a eventos de colisión, que si bien, en este caso, aunque el aumento de anchura en las bandas es notable, el desplazamiento se produce hacia menores frecuencias, por lo que estas variaciones podrían estar relacionadas con diferencias en la composición

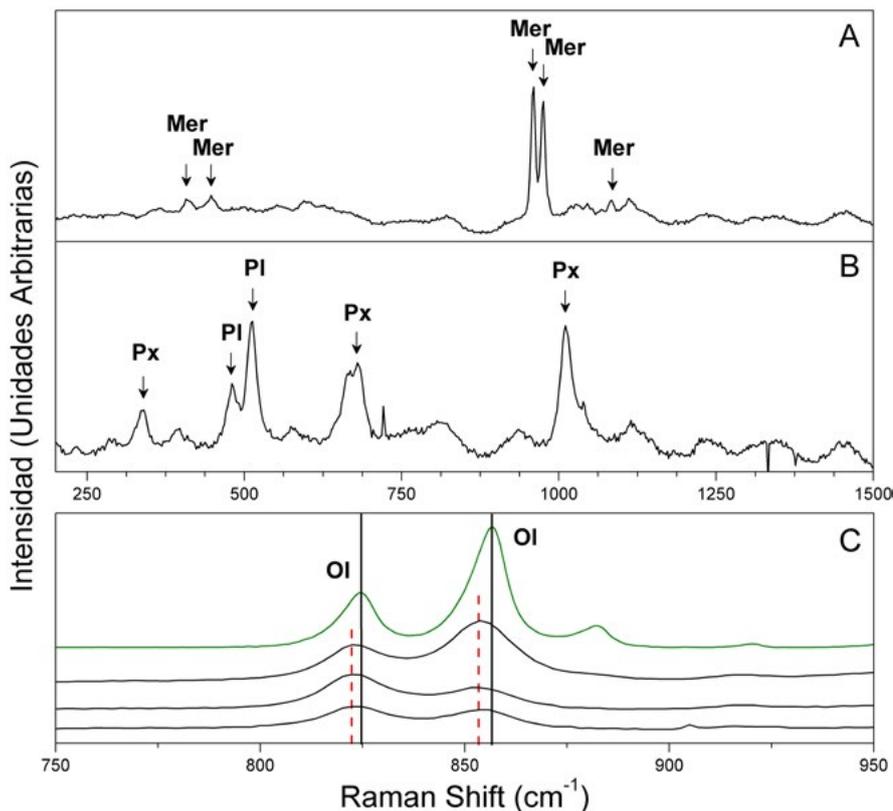


Fig. 3.- Espectros Raman de silicatos y fosfatos hallados en Dalgety Downs. A) Espectro Raman de la merrillita. B) Espectro Raman de plagioclasa (albite) en la mesostasia, con participación de acículas de piroxeno. C) Espectros Raman de olivinos en cóndrulos y matriz comparados respecto a una muestra de referencia, en verde (RRUFF).

Fig. 3.- Raman spectrums of silicates and phosphates found in Dalgety Downs. A) Merrillite Raman spectrum. B) Plagioclase (albite) Raman spectrum, with participation of pyroxene needles. C) Raman spectrums of chondrules and matrix olivines compared to a reference sample, in green (RRUFF).

química del olivino e incluso con un aumento de temperatura (debido o no a una colisión) que induzca cierto desorden en sus estructuras.

El grado de meteorización determinado en este ejemplar se corresponde con un estadio W3 o fuerte (Wlotzka, 1993), en base a las venas oxidadas, los halos de hematitas alrededor de granos metálicos y la incipiente formación de akaganeíta en la aleación, mineral de corrosión típico de una alteración temprana (Bland *et al.*, 2006), englobados en una costra de fusión fina e irregular.

Por último, queda probada la eficacia de la espectroscopía Raman para el estudio de los materiales geológicos

extraterrestres, ya que esta técnica es capaz de proporcionar, de manera precisa y no destructiva, una valiosa información acerca de la mineralogía presente en estas rocas y los procesos que les afectan.

Agradecimientos

Agradezco al grupo de investigación de meteoritos y geociencias planetarias del IGEO (CSIC-UCM) las muestras de Dalgety Downs que han sido analizadas en el presente trabajo. Los datos de geoquímica mineral han sido obtenidos en el Centro Nacional de Microscopía Electrónica Luis Bru de la Universidad Complutense de Madrid. Andrés Caño

Blanes agradece al resto de coautores su apoyo y revisión de este artículo, tanto las observaciones y consejos del Dr. Valentín García Baonza en lo referente a espectroscopía Raman, como al Dr. Jesús Martínez Frías y la Dra. Rosario Lunar Hernández sus apreciaciones sobre los aspectos mineralógicos y geoquímicos. Por último, los autores agradecen la revisión y comentarios de Rogelio Daniel Acevedo y de un revisor anónimo, que han contribuido a la mejora del artículo original.

Referencias

- Bischoff, A. (2001a). *Earth, Moon and Planets* 85-86, 87-97.
- Bischoff, A. (2001b). *Planetary and Space Science* 49, 769-776.
- Bland, P. A., Zolensky, M. E., Benedix, G. K., y Sephton, M. A. (2006). *Meteorites and the early solar system II*, 853-867.
- Easton, A. J., y Elliott, C. J. (1977). *Meteoritics* 12, 409-416.
- Englert, P. y Herr, W. (1978). *Meteoritics* 13, 454.
- Herzog, G.F. y Cressy Jr, P.J. (1976). *Meteoritics* 11, 59-68.
- Herzog, G.F., Xue, S., Cloudt, S., Jull, A.J.T., Middleton, R. y Klein, J. (1995). *Meteoritics* 30(5), 518-519.
- McSween, H.Y.Jr. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press, Cambridge, 310 p.
- Miyamoto, M. y Ohsumi, K. (1995). *Geophysical research letters* 22(4), 437-440.
- Muñoz-Espadas, M.J. (2003). *Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y LL5*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 324 p.
- Stöffler, D., Keil, K. y Scott, E.R.D. (1991). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 3845-3867.
- Van Schmus, W.R. y Wood, J.A. (1967). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31, 747-765.
- Wlotzka, F. (1993). *Meteoritics* 28, 460-460.