

Comparación textural y químico-mineralógica de cóndrulos y matriz en condritas ordinarias y carbonáceas: Bechar 002 y Allende

Textural and chemical-mineralogical comparison of chondrules and matrix in ordinary and carbonaceous chondrites: Bechar 002 and Allende

Rubén Campanero¹, Rosario Lunar^{1,2} y Jesús Martínez-Frías²

¹ Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Facultad Ciencias Geológicas, UCM. 28040 Madrid, España.

rubcampanero@gmail.com, lunar@ucm.es

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

ABSTRACT

Chondrites represent the most primitive meteoritic matter in the solar system. Their study provides essential mineralogical and cosmochemical keys to understand: a) the processes that occurred in the early stages of its formation and b) their role and significance influencing the composition of the surfaces of other planets and moons. This work presents a detailed comparison of the textural and chemical-mineralogical features of the chondrules and matrix of two types of chondrites: the Bechar 002 ordinary chondrite and the Allende carbonaceous chondrite. The results obtained allow knowing better the characteristics of both specimens, and confirm that they have undergone different processes after their formation in the asteroidal parent body: a) thermal processes of thermal metamorphism and homogenization and b) secondary transformations due to aqueous alteration processes.

Key-words: Carbonaceous chondrites, ordinary chondrites, chondrules, matrix, secondary processes.

RESUMEN

Las condritas representan la materia meteorítica más primitiva del sistema solar. Su estudio aporta importantes claves mineralógicas y cosmoquímicas para comprender: a) los procesos que tuvieron lugar en las primeras etapas de su formación y b) su influencia en la composición de las superficies de otros planetas y lunas. Este trabajo presenta la caracterización textural y químico-mineralógica comparada de los cóndrulos y la matriz de dos tipos de condritas: la condrita ordinaria Bechar 002 (H6) y la condrita carbonácea de Allende (CV3). Los resultados obtenidos permiten conocer mejor las características de ambos ejemplares y confirman que han sido sometidas a procesos diferentes a partir de su formación en el cuerpo padre asteroidal: a) procesos de metamorfismo térmico y homogeneización y b) transformaciones secundarias debidas a alteración acuosa.

Palabras clave: Condritas carbonáceas, condritas ordinarias, cóndrulos, matriz, procesos secundarios.

Geogaceta, 58 (2015), 31-34
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 29 de enero de 2015
Fecha de revisión: 29 de abril de 2015
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2015

Introducción

Los meteoritos son fragmentos de asteroides y planetas que han viajado por el espacio y chocan contra la superficie de la Tierra o de otros cuerpos planetarios donde son recogidos o caracterizados *in situ* (ej. el caso de meteoritos hallados en Marte y analizados por los *rovers*).

Las condritas son un tipo de meteoritos asteroidales indiferenciados compuestos principalmente por silicatos ferromagnesianos (olivino y piroxeno pobre en calcio) y por cantidades significativas de minerales opacos (principalmente troilita y aleación de Fe-Ni). En general, se considera que repre-

sentan a los primeros grandes cuerpos formados en el sistema solar. Dentro de las condritas existen cuatro clases y trece grupos establecidos en base a su composición química: condritas enstatíticas (EH y EL), condritas ordinarias (H, L y LL), condritas carbonáceas (CI, CM, CO, CV, CR, CK, CH y CB) y condritas Rumuruti, definidas recientemente (McSween, 1999; Bischoff, 2001a, b).

El estudio individual y comparado de los cóndrulos y la matriz de los meteoritos condriticos permite comprender mejor los procesos de formación mineral (y sus posteriores transformaciones), desarrollados en la nebulosa solar primitiva. Asimismo, su estu-

dio aporta importantes claves mineralógicas y cosmoquímicas para comprender su influencia en la composición de las superficies de otros planetas y lunas. En el presente estudio se lleva a cabo la caracterización comparada de las texturas y las características químico-mineralógicas de los diferentes tipos de cóndrulos y de la matriz de dos ejemplares de meteoritos condriticos: una condrita ordinaria (Bechar 002) y una carbonácea (Allende).

Antecedentes y procedencia

De acuerdo con la información existente en la "Meteoritical Bulletin Database" de la

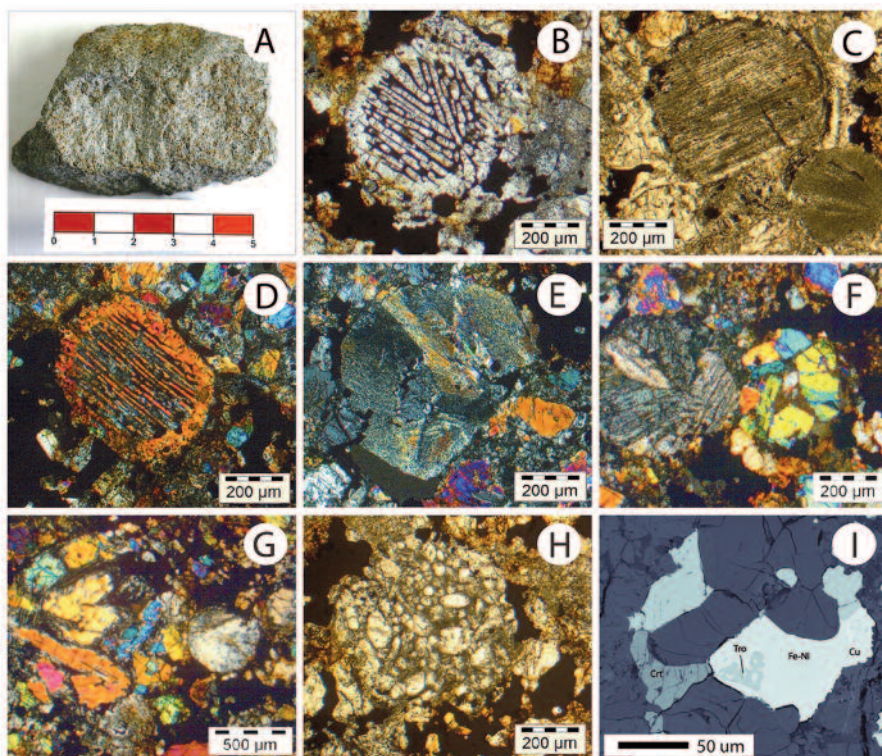


Fig. 1.- Condrita de Bechar 002. A) Ejemplar de Bechar 002. B-H) Diferentes texturas de cóndrulos: B), C) y D) barrados de olivino, E) radial de piroxeno, F) porfídico de piroxeno (izda.) y porfídico de olivino (dcha.), G) porfídico de olivino y piroxeno (izda.) y criptocristalino (dcha.), H) porfídico de olivino. I) Imagen de electrones retrodispersados de la fase metálica. C, H nícoles paralelos. D-G nícoles cruzados. Tro: troilita; Fe-Ni: aleación de Fe-Ni; Cu: Cu nativo; Cr: Cromita.

Fig. 1.- Bechar 002 chondrite. A) Bechar 002 specimen. B-H) Different chondrule textures: B), C) and D) barred olivine, E) radial piroxene, F) porfídico piroxene (left) and porfídico olivine (right), G) porfídico olivine and piroxene (left) and criptocristalino (right), H) porfídico olivine. I) Back-scattered Electron Image of metal phase. C, H plane-polarized light. D-G crossed-polarized light. Tro: troilite; Fe-Ni: Fe-Ni alloy; Cu: Native Cu; Cr: Chromite.

"Meteoritical Society" (<http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>), Bechar 002 es un "hallazgo" (no se ha observado su caída). Se encontró en el año 1998 en Argelia, coordenadas: 30° 50' N, 3° 20' W; y se recuperaron 12 kg de material. Bechar 002 está clasificada como una "condrita ordinaria" H6 (Grossman, 1999). El grupo químico H significa alto contenido en hierro oxidado (Keil y Fredriksson, 1964), y el tipo petrológico 6 hace referencia a un alto grado de metamorfismo térmico. En Van Schmus y Wood (1967), Dodd (1981), Sears y Dodd (1988) y Brearley y Jones (1998) puede encontrarse más información sobre los criterios relativos a la clasificación de los distintos tipos petrológicos.

La condrita de Allende es una "caída" (recogida tras haberla visto caer). El evento se produjo el 8 de febrero del año 1969 a las 7h 05m GMT en Pueblito de Allende, Chihuahua, México, coordenadas: 26° 58'N, 105° 19'W; y se recuperaron cerca de dos toneladas de material. La caída fue en

forma de lluvia meteorítica y se extendió a lo largo de un área de más de 50 km cuadrados. El meteorito está clasificado como una condrita carbonácea del grupo CV que significa "Carbonácea de Vigarano" (nombre del espécimen tipo) y tipo petrológico 3 (muy bajo grado de metamorfismo térmico). Los dos ejemplares utilizados en este estudio forman parte de la colección de meteoritos del grupo de investigación de meteoritos y geociencias planetarias del IGEO (CSIC-UCM).

Condrita de Bechar 002

Mineralogía y texturas

Los componentes principales son los cóndrulos y la matriz (65% y 20% en volumen, respectivamente). La pérdida de nitidez en los contornos, tanto de los cóndrulos como de los propios cristales dentro y fuera de ellos, así como la intensa recristalización de la matriz, sugieren procesos posteriores

de transformación que deben ser tenidos en cuenta en la posterior interpretación de los resultados.

Las texturas principales de los cóndrulos (Fig. 1) son los porfídicos de olivino (PO), barrados de olivino (BO), radiales de piroxeno (RP) y porfídicos de piroxeno (PP).

El grado de meteorización observado en la sección del ejemplar (Wlotzka, 1993) se encuentra entre W2 y W3.

A pesar de que, en correspondencia con su tipo petrológico (H6) el grado de homogeneización es alto, el número de cóndrulos distinguibles es aún significativo. La mayoría son inferiores a un milímetro, en torno a 0,5 mm, aunque también se observan cóndrulos de entre 1 y 2 mm. Su morfología varía de redondeada a subredondeada. Suelen aparecer o bien fragmentados, o muy homogeneizados con la matriz, lo que dificulta su diferenciación. La interpenetración que se observa en algunos cóndrulos parece reflejar bien un crecimiento conjunto o la existencia de procesos posteriores de integración condular.

También es frecuente observar procesos de sericitización diferencial, de borde a centro de los cóndrulos, aprovechando la intensa red de microfracturas.

Con respecto a los minerales opacos estos ocupan un 15% en volumen. Se presentan:

- rellenando cavidades y fracturas en la matriz;
- alrededor de los cóndrulos;
- en el interior los cóndrulos, ya sea relleno de cavidades o dispuesta en forma de pequeñas gotas diseminadas.

Las principales fases son aleación de Fe-Ni, troilita y cromita. También aparece cobre nativo, de forma muy localizada y normalmente sin superar los 20 μm .

Es también común el desarrollo de lamelas de exsolución. El proceso ocurre entre la troilita (huésped) y la aleación de Fe-Ni (patrón). Las lamelas de troilita no suelen superar los 50 μm y presentan una cierta diversidad textural (caras planas, morfologías irregulares, texturas gráficas).

Química mineral

La composición media de los olivinos de la matriz es $\text{Fa}_{17.9}$, y la de los olivinos de los cóndrulos de $\text{Fa}_{17.1}$. Para los piroxenos, la mayoría son pobres en calcio (clinoenstatita) con composiciones que varían entre $\text{En}_{81.8-83.7}$ y $\text{Fs}_{15.2-16.7}$ para los piroxenos de

la matriz, con cantidades de cromo entre 0,1 y 0,2% en peso. La composición de los piroxenos pobres en calcio de los cóndrulos varía entre $En_{82,6-84}$ y $Fs_{14,8-16,5}$. Contienen hasta 0,2% en peso de cromo. Por último, los piroxenos con calcio (diópsido) solo se han encontrado en los cóndrulos y tienen una composición de $En_{48,1-48,4}$ y $Fs_{4,6-4,7}$. Estos últimos tienen cantidades de cromo en torno al 0,6 % en peso. Los análisis de la mesostasia indican la presencia de albita. Este mineral suele ser común como producto del metamorfismo térmico (Muñoz-Espadas, 2003). Algunos análisis presentan trazas de cromo y titanio. La aleación de Fe-Ni comprende una solución sólida entre kamacita ($Fe-\alpha$) y taenita ($Fe-\gamma$). La kamacita contiene entre 5,1 y 6,9% en peso de Ni, y para la taenita, los valores varían entre el 38,9 y 51% en peso. Este último valor es cercano al teórico de la tetrataenita (51,2%).

Condrita de Allende

Mineralogía y texturas

Allende es una de las condritas carbonáceas más primitivas y menos metamorfizadas; se ha clasificado en el tipo petrológico 3 (Clarke *et al.*, 1971).

Específicamente, el ejemplar objeto de estudio está compuesto por cóndrulos (35% en vol.), una matriz oscura y de grano fino (45% en vol.), inclusiones refractarias que incluyen las CAIs (inclusiones ricas en calcio y aluminio), los AOA (agregados ameboideos de olivino) y otras partículas (10-15% en vol.) y el resto lo ocupan los minerales opacos (5-10% en vol.).

La mayor parte de los cóndrulos (Fig. 2) son de textura porfídica de olivino seguidos de los barrados de olivino y, en menor medida, los de piroxeno radial y porfídicos de olivino y piroxeno. Se trata de cóndrulos redondeados a subredondeados, que normalmente no muestran un contorno bien definido (con presencia de bordes irregulares). Estos bordes son de grano fino, constituidos por serpentinita e iddingsita y pueden alcanzar los 0,5 mm en los cóndrulos de mayor tamaño. En ocasiones, podrían definirse como "halos" que se confunden fácilmente con la matriz. Es frecuente que exista una heterometría del tamaño de los cristales dentro de un mismo cóndrulo. Por lo general, el hábito de los cristales es euhedral, pero también se observan zonas anubarradas

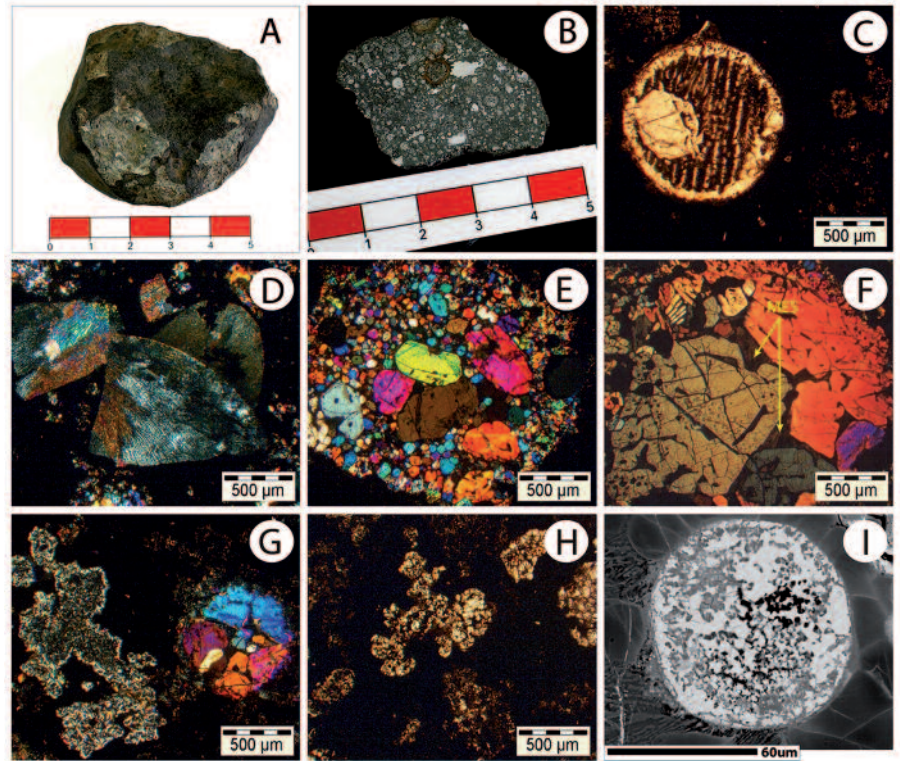


Fig. 2.- Condrita de Allende. A y B) Ejemplar de Allende. C-F) Diferentes texturas de cóndrulos: C) barrado de olivino con cristal idiomorfo de olivino, D) radial de piroxeno, E) y F) porfídicos de olivino. MES: Mesostasia. G) CAI (izda.) y cóndrulo porfídico de olivino (dcha.). H) Agregado amebooidal de olivino. I) Imagen de electrones retrodispersados de la fase metálica. C y H nicóles paralelos. D-G nicóles cruzados.

Fig. 2.- Allende Chondrite. A and B) Allende specimen. C-F) Different chondrule textures: C) barred olivine, showing an euhedral olivine crystal. D) radial piroxene, E) and F) olivine porphyritic. MES: Mesostasia. G) Calcium and Aluminium Inclusion (left) and olivine porphyritic chondrule (right). H) Amebooidal Olivine Aggregate. I) Back-scattered Electron Image of metal phase. C and H plane-polarized light. D-G crossed-polarized light.

en algunas áreas intracondrulares donde los cristales pierden definición y se encuentran más fracturados. Hay abundante mesostasia (material intersticial que aparece entre los cristales).

La matriz es de grano fino y oscura, caracterizada por la presencia de olivino como mineral principal; aparece distribuido de manera homogénea y normalmente alterado a iddingsita.

Las inclusiones refractarias principales son las CAIs y los AOA. Las CAIs son de tamaño similar a los cóndrulos pero de morfología alargada, irregular y de bordes lobulados. Las principales fases son mellita y espinela. Los AOA también se presentan con morfologías irregulares, como su propio nombre indica, generalmente ameboideas, con protuberancias y de tamaño similar a los cóndrulos. Su composición mineral es: principalmente olivino, con inclusiones de pentlandita, troilita y aleación de Fe-Ni.

La fase metálica de la condrita de Allende está caracterizada por la presencia de pentlandita, troilita, aleación de Fe-Ni y

cromita. Normalmente es bastante escasa (< 10% en volumen). Aparece dispersa en la matriz, con tamaños microcristalinos, formando halos alrededor de los cóndrulos o dentro de ellos en forma de "gotas".

Química mineral

El olivino de los cóndrulos es casi forsterita pura $Fa_{0,6}$. Muchos de los olivinos presentan zonado composicional, mostrando un borde en los cristales de olivino más rico en hierro. Este zonado o borde, que por lo general no supera los 40 μm de espesor, también está presente a escala de todo el cóndrulo con composiciones fayalíticas (Fa_{32-45}). La composición de los olivinos de la matriz es también rica en hierro con un promedio de Fa_{32} . En cuanto a los piroxenos, su presencia es muy escasa, pero su variedad es mayor. En la matriz se ha detectado clinoenstatita ($En_{98,6} Fs_{0,5}$), pigeonita ($En_{61} Fs_{30}$), augita ($En_{46,7} Fs_{23,2}$), hedembergita ($En_{22,9} Fs_{31,8}$) y (una) wollastonita ($En_{21} Fs_{28}$).

Los análisis de la aleación de Fe-Ni indican que son kamacitas (2,8 a 11% en peso de Ni).

Finalmente, con respecto a otros elementos menores, cabe señalar que las concentraciones de Al_2O_3 , CaO, Cr_2O_3 y TiO_2 son más altas en los cristales de olivino y piroxeno de Allende (muchos de ellos > 1% en peso), mientras que el contenido en MnO, es mayor en Bechar 002.

Discusión y conclusiones

A pesar de su carácter primitivo e indiferenciado, la amplia variedad de clases y grupos de condritas refleja toda una serie de procesos que tuvieron lugar desde la formación del sistema solar primitivo a los ocurridos en los asteroides padres: a) aquellos que dejaron una impronta de rasgos claramente primarios o nebulares; b) los relacionados con los episodios específicos de acreción de material condritico para generar los cuerpos padres asteroidales; y c) los procesos de alteración secundaria de dichos materiales primarios.

El estudio comparativo llevado a cabo, a través de la caracterización textural y químico-mineralógica de sus cóndrulos y matriz, confirma que las dos condritas han sido sometidas a procesos diferentes a partir de su formación en el cuerpo padre asteroidal. La condrita de Bechar 002 tiene una composición mineral más homogénea además de una matriz recristalizada, por lo que se verifica que ha sufrido procesos avanzados de metamorfismo térmico en el asteroide padre. Por el contrario, a partir de

las composiciones en olivinos de la condrita de Allende se deduce que no ha habido (al menos no se detectan) procesos de homogeneización como se desprende de la gran diferencia composicional entre los olivinos de los cóndrulos y los de la matriz. Los olivinos de los cóndrulos son prácticamente forsterita pura, por lo que no han sufrido procesos de alteración desde su formación. Asimismo, la diferencia composicional en los bordes de los cristales y de los cóndrulos más ricos en hierro podría deberse a procesos de alteración acuosa, que, como ya se ha indicado en trabajos previos (p. ej., DuFresne y Anders, 1962; Brearley y Jones, 1998) afectan a los asteroides en sus primeros estadios y originan minerales de alteración como la iddingsita.

Agradecimientos

Rubén Campanero agradece al grupo de investigación del IGEO (CSIC-UCM) las muestras de los dos meteoritos con las que se ha llevado a cabo el estudio de Master del que forma parte la presente contribución. Este trabajo está vinculado científicamente con los estudios sobre materia extraterrestre relativos a los proyectos AYA2012-39884-C02-02 y ESP2013-48427-C3-2-R, a través de los cuales se han financiado los análisis de SEM-EDX y microsonda electrónica y otros apoyos para la presentación de la presente contribución. Finalmente, gracias también al Dr. Rubén Piña por su inestimable ayuda, así como a los revisores del trabajo por sus

comentarios y sugerencias, que han contribuido a mejorar el manuscrito original.

Referencias

- Bischoff, A. (2001a). *Earth, Moon and Planets* 85-86, 87-97.
- Bischoff, A. (2001b). *Planetary and Space Science* 49, 769-776.
- Brearley, A.J. y Jones, R.H. (1998). En: *Planetary Materials, Reviews in Mineralogy* (J.J. Papike, Ed.). American Society of Mineralogy, Washington DC., 36, 3.1-3.398.
- Clarke Jr, R.S., Jarosewich, E., Mason, B., Nelen, J., Gomez, M. y Hyde, J.R. (1971). *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences* 5, 1-53.
- Dodd, R.T. (1981). *Meteorites: A Petrologic-Chemical Synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge, 368 p.
- DuFresne, E.R. y Anders, E. (1962). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 26, 1085-1114.
- Grossman, J.N. (1999). *Meteoritics and Planetary Science* 34, 169-186.
- Keil, K. y Fredriksson, K. (1964). *Journal of Geophysical Research* 69, 3487-3515.
- McSween, H.Y.Jr. (1999). *Meteorites and their Parent Planets*. Cambridge University Press, Cambridge, 310 p.
- Muñoz-Espadas, M.J. (2003). *Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y LL5*. Tesis doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 324 p.
- Sears, D.W.G. y Dodd, R.T. (1988). En: *Meteorites and the Early Solar System* (J.F. Kerridge y J.S. Matthews, Eds.). University of Arizona Press, Tucson, 3-31.
- Van Schmus, W.R. y Wood, J.A. (1967). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31, 747-765.
- Wlotzka, F. (1993). *Meteoritics* 28, 460-460.