

El meteorito de Villalbeto de la Peña (Palencia). Estudio mineralógico y petrológico

T. Martín Crespo⁽¹⁾, R.P. Lozano⁽²⁾, I. Casanova⁽³⁾ y J. Llorca⁽⁴⁾

(1) Dpto. Biología y Geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos. Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid.
E-mail: tomas.martin@urjc.es

(2) Museo Geominero (IGME). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.
E-mail: r.lozano@igme.es

(3) Grupo de Mecánica y Nanotecnología de Ingeniería de Materiales, Universitat Politècnica de Catalunya, 08028 Barcelona.
E-mail: ignasi.casanova@upc.edu

(4) Instituto de Técnicas Energéticas, Universitat Politècnica de Catalunya, Diagonal 647, 08028 Barcelona.
E-mail: jordi.llorca@upc.edu

RESUMEN

En este trabajo se ha llevado a cabo una petrografía y mineralogía detalladas y un estudio químico de la condrita ordinaria (L6) Villalbeto de la Peña. Se han determinado las abundancias de 36 elementos químicos en cuatro muestras diferentes del meteorito. Las abundancias medidas están dentro de los rangos observados para las condritas L6, excepto para Ce, Pd y Os, que son particularmente abundantes en Villalbeto de la Peña. A partir de las abundancias en elementos volátiles, hay pruebas de mínima pérdida debido al calentamiento por el impacto que arrancó el meteorito de su cuerpo progenitor. Del estudio petrográfico y mineralógico se deduce que el meteorito presenta un alto grado de recristalización. La matriz está formada principalmente por olivino y ortopiroxeno, con feldespato intersticial, y cromita y apatito como accesorios principales. Los cóndrulos más frecuentes son los barrados de olivino y piroxeno, aunque se han identificado fragmentos de cóndrulos porfídicos de olivino y microgranulares de olivino y piroxeno. Las venas de impacto reconocidas están compuestas de troilita, Fe-Ni metal, olivino y piroxeno principalmente. El apatito, identificado pero no analizado en estudios previos, ha resultado ser Cl-apatito.

Palabras clave: condrita L6, meteorito, petrografía, venas de impacto, Villalbeto de la Peña

The Villalbeto de la Peña meteorite (Palencia). Mineralogical and petrological study

ABSTRACT

Detailed petrographical, mineralogical and chemical studies of the Villalbeto de la Peña (L6) chondrite are reported. Abundances of 36 chemical elements were determined in four different samples of the meteorite. The measured abundances are within the range observed for L6 chondrites for most elements, except for Ce, Pd, and Os, which are particularly abundant in Villalbeto de la Peña. From the volatile element abundance there are some indications of minimal loss due to shock heating. The meteorite displays a high degree of recrystallisation. The matrix is mainly composed by olivine and orthopyroxene with interstitial feldspar, with chromite and apatite as the most common accessory minerals. Barred olivine-pyroxene chondrules are the most common type, although some porphyritic olivine chondrule fragments and olivine-pyroxene microgranular chondrules have also been identified. Identified shock veins are mainly composed by troilite, Fe-Ni metal, olivine and pyroxene. Apatite, previously identified but not analyzed, is Cl-apatite.

Key words: chondrite L6, meteorite, petrographie, shock veins, Villalbeto de la Peña

Introducción

El último meteorito recuperado en España tras ser observada su entrada en la atmósfera como bola de fuego, ocurrió el domingo 4 de enero de 2004 en la provincia de Palencia, después de la última caída

constatada en nuestro país en 1947 (condrita ordinaria L5 de Reliegos; Lozano y Martín Crespo, 2004). A las 16h 46m UTC, centenares de personas presenciaron el paso de un meteoride en el cielo con una apariencia de una bola de fuego y con una luminosidad superior a la de la Luna llena. El meteoride sobrevoló

ló el norte de Portugal y se desvaneció después de pasar junto a la ciudad de León. El paso del meteoroido fue filmado de manera casual con una cámara de video desde León y fotografiado desde Las Oces de Valdeteja y Santa Columba de Curueño, en la misma provincia (Fig. 1). A partir del análisis minucioso del video se pudo determinar que el meteoroido explotó en la atmósfera a unos 28 km de altura. La explosión se produjo a las 17h 33m UTC y fue registrada por la estación sísmica de Arriondas (Asturias), situada a unos 80 km al norte, y por la estación de infrasonidos de Flers (Normandía), situada a más de 600 km de distancia. A partir de la luminosidad de la explosión y de los registros sísmico y de infrasonidos se pudo determinar que la energía liberada en la explosión fue de unos 0,02 kt. Gracias a todos estos datos y observaciones, detallados en Llorca *et al.* (2005), se delimitó el área donde podían haber caído meteoritos, entre las provincias de León y Palencia. Unos días después, mientras se organizaban los equipos que debían rastrear la zona, los vecinos de la zona conocida como “de la Peña”, en Palencia, encontraron de manera casual los primeros meteoritos. Tras comprobar la autenticidad de los ejemplares, los equipos de rastreo hicieron un barrido sistemático de la zona para recuperar el máximo número

de fragmentos (Fig. 2). En total se tiene constancia del hallazgo de 33 meteoritos, con masas entre 11 g y 1,4 kg. En el Museo Geominero (IGME) se conservan dos ejemplares completos de 129 y 169 g. y dos secciones de 2,9 y 7,1 g. Los meteoritos se encontraron distribuidos en una elipse de unos 20 x 6 km, en una zona montañosa poco poblada. El primer fragmento fue encontrado en la vecindad del pueblo de Villalbeto de la Peña. Por este motivo, y siguiendo las normas de nomenclatura internacionales, el meteorito se registró de manera oficial en el catálogo de *The Meteoritical Society* con el nombre de *Villalbeto de la Peña* (Russell *et al.*, 2004). Desde su recuperación, el meteorito Villalbeto de la Peña ha sido estudiado en España con todas las técnicas disponibles y ha sido objeto, también, de estudios realizados en colaboración con otros centros extranjeros especializados. El estudio petrológico y mineralógico preliminar del meteorito se describe en Llorca *et al.* (2005), donde se llega a la conclusión que Villalbeto de la Peña es una condrita ordinaria L6 S4 W0. En este mismo trabajo se calcula la energía liberada durante el tránsito atmosférico del meteoroido a partir de los datos fotométricos, se analizan los datos sísmicos y de infrasonidos asociados a la explosión del meteoroido en la atmósfera, se describe la elipse de distribución y la



Figura 1. Fotografía del meteoroido tomada desde Las Hoces de Valdeteja, León (cortesía S. Díez, Red de Investigación sobre Bóolidos y Meteoritos)

Figure 1. Photograph of meteoroid taken from Las Hoces de Valdeteja, León (courtesy S. Díez, Spanish Photographic Meteor Network)



Figura 2. Fotografía de uno de los fragmentos recuperados del meteorito de Villalbeto de la Peña (cortesía R. Chao y J.V. Casado, Red de Investigación sobre Bóolidos y Meteoritos)

Figure 2. Photograph of one of the recovered fragments of the Villalbeto de la Peña meteorite (courtesy R. Chao and J.V. Casado, Spanish Photographic Meteor Network)

localización de los meteoritos encontrados, se estudió el contenido en gases nobles del meteorito y la composición isotópica de He, Ne y Ar, se determina el tiempo de exposición del cuerpo progenitor del meteorito a los rayos cósmicos en el espacio (48 ± 5 millones de años después de haber sido arrancado de su asteroide original), y se analizan los isótopos radiogénicos, lo que permite calcular que el cuerpo que originó el meteorito Villalbeto de la Peña tuvo un peso aproximado de 760 ± 150 kg. En un estudio posterior (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006) y a partir de la calibración astrométrica precisa del video y las imágenes tomadas del meteorito, se deduce la velocidad inicial del cuerpo progenitor ($\sim 17 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) y se calcula su órbita, lo que permite demostrar que el cuerpo progenitor del meteorito procede del cinturón principal de asteroides. Es importante destacar que únicamente en ocho ocasiones más ha sido posible en todo el mundo llevar a cabo de manera simultánea el estudio de un meteorito y determinar su origen preciso en el Sistema Solar, por lo que el análisis del meteorito Villalbeto de la Peña adquiere aún más importancia. De manera reciente, también se han estudiado la composición química, las propiedades magnéticas y la porosidad del meteorito Villalbeto

de la Peña y se ha realizado un estudio mineralógico mediante espectroscopia Raman y Mössbauer (Llorca *et al.*, 2007). En este trabajo se realiza un estudio petrográfico y mineralógico detallado del meteorito Villalbeto de la Peña así como de su composición química elemental.

Composición química elemental

La composición química total del meteorito Villalbeto de la Peña se ha obtenido a partir del análisis de cuatro muestras diferentes obtenidas en dos ejemplares distintos del mismo meteorito. Las muestras (cada una de unos 100 mg) se han tomado del interior de los ejemplares para evitar la presencia de la corteza de fusión, se han reducido a polvo con un mortero de ágata y se han secado a 105°C . Se han utilizado dos técnicas distintas de análisis y dos métodos de preparación distintos para cada una de las muestras con la finalidad de analizar con precisión un amplio conjunto de elementos químicos. Las técnicas utilizadas han sido la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS PerkinElmer Elan 6000) y la espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES PerkinElmer Optima 3200 RL). Los análisis se han realizado en los servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona. La calibración se ha llevado a cabo con disoluciones certificadas en $1\% \text{HNO}_3$. Los elementos determinados mediante ICP-MS han sido Li, Sc, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Ru, Pd, Te, Ba, Ce, Eu, Os, Ir, Pt, Th y U, mientras que por ICP-OES se han determinado Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co y Ni. Los dos métodos independientes de preparación de las muestras han sido la digestión ácida y la fusión alcalina. En el método de la digestión ácida, las muestras se han tratado con agua regia en un reactor cerrado de Teflón a 90°C durante 4 h. Después de centrifugar, la fracción sólida se ha lavado con HNO_3 y se ha tratado en el mismo reactor con HNO_3 HF a 90°C durante 12 h. A continuación se ha añadido HClO_4 y HF al reactor y se ha mantenido la temperatura a 90°C durante 2 h. Con este tratamiento la fracción sólida se ha disuelto por completo. Las fracciones líquidas se han llevado a sequedad, y el sólido resultante se ha disuelto en una disolución de HNO_3 , que se ha mantenido a reflujo durante 30 min. La disolución final resultante se ha diluido convenientemente y se han realizado cuatro réplicas de cada análisis y tres análisis en blanco. Todas las diluciones se han realizado con $\text{H}_2\text{O} > 10 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$. Con este método se han analizado Li, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Sc, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Mo,

Ru, Pd, Te, Ba, Ce, Eu, Os, Ir, Pt, Th y U. En el método de la fusión alcalina, las muestras se han mezclado con Na_2O_2 y Na_2CO_3 en un crisol de zirconio y la mezcla se ha mantenido a 450 °C. El sólido resultante se ha tratado con H_2O y HCl y la fracción insoluble se ha vuelto a someter al tratamiento de fusión previo, con lo que el sólido resultante se ha disuelto completamente. La disolución final resultante se ha diluido convenientemente y se han realizado dos réplicas de cada análisis y dos análisis en blanco. Con este método se han analizado Mg, Al, Si, Ca, Cr, Fe e Y. Algunos elementos (Mg, Al, Ca, Fe, Y) se han analizado a partir de los dos métodos de preparación y los resultados han sido similares, lo que demuestra la validez de la metodología experimental empleada en este estudio. En total se ha determinado la abundancia de 36 elementos químicos.

El contenido en Fe total (21,3%) y los valores relativos $\text{Mg}/\text{Si}=0,92$, $\text{Al}/\text{Si}=0,06$ y $\text{Fe}/\text{Si}=1,17$ están dentro del margen de los valores medios de las condritas ordinarias de tipo L (Kallemeyn *et al.*, 1989; Friedrich *et al.*, 2003), al igual que la mayoría de los elementos analizados (Fig. 3). Son excepciones el Ce, cuya concentración es significativamente superior a la media de las condritas L6, y el Zr, que se encuentra empobrecido. Asimismo el Pd y Os tienen una abundancia superior a los valores medios de las condritas L6, aunque el valor relativo $\text{Os}/\text{Pd}=0,83$ está dentro de los valores típicos (Horan *et al.*, 2003). Algunos elementos volátiles, como el Te y Ga, se encuentran ligeramente empobrecidos en el meteorito Villalbeto de la Peña, mientras que otros como el Rb y Zn tienen una abundancia normal, lo que indica que la pérdida de elementos volátiles durante el evento de impacto que separó el cuerpo progenitor del meteorito de su asteroide no fue severo, a pesar que el meteorito tiene un contenido de gases nobles radiogénicos ^4He y ^{40}Ar bajo (Llorca *et al.*, 2005).

En la Fig. 4 se comparan las abundancias elementales del meteorito Villalbeto de la Peña y de la condrita carbonácea CI Orgueil (Anders y Grevesse, 1989; Friedrich *et al.*, 2002), por considerarse ésta representativa de la composición media del Sistema Solar. La abundancia de elementos litófilos en el meteorito Villalbeto de la Peña es mayor que en las condritas CI, tal y como ocurre en todas las condritas L debido a los procesos de diferenciación interna que sufrieron sus cuerpos progenitores. Por su parte, la abundancia de los elementos siderófilos se sitúa en torno a $1,35 \pm 0,25 \times \text{CI}$, lo que está de acuerdo con los valores medios de las condritas L, $1,28 \pm 0,14$ (Friedrich *et al.*, 2003). Finalmente, la abundancia de los elementos volátiles del meteorito en su conjunto es claramente inferior a los valores de las condritas CI, las cuales

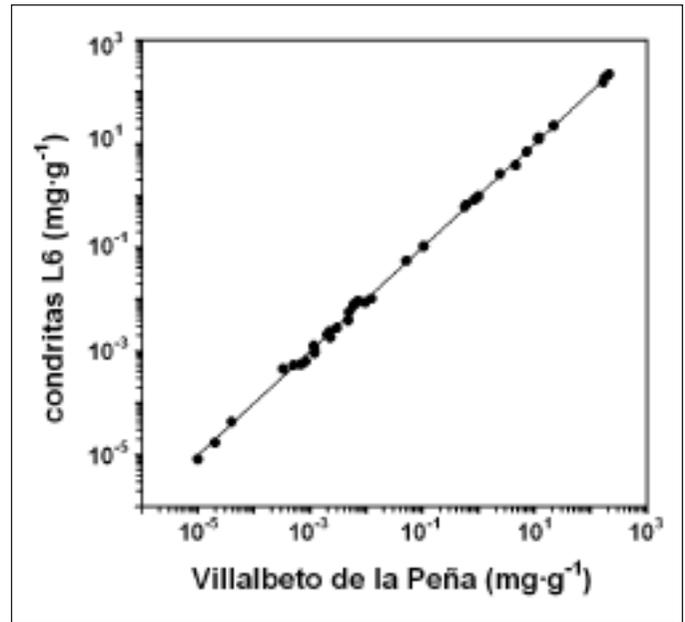


Figura 3. Comparación entre la composición elemental del meteorito Villalbeto de la Peña y la de las condritas ordinarias L6
 Figure 3. Comparison between elemental composition of Villalbeto de la Peña meteorite and that of L6 ordinary chondrites

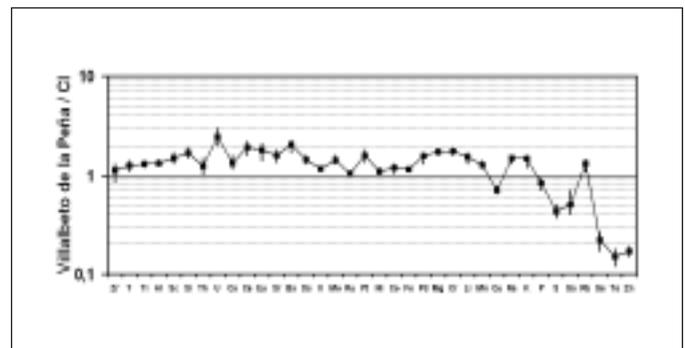


Figura 4. Comparación entre la composición elemental del meteorito Villalbeto de la Peña y la de las condritas carbonáceas CI. Las barras verticales corresponden a la dispersión de valores en el análisis del meteorito
 Figure 4. Comparison between elemental composition of Villalbeto de la Peña meteorite and that of CI carbonaceous chondrites. The vertical bars correspond to data dispersion from meteorite analysis

preservan su contenido en estos elementos puesto que los cuerpos de los que proceden no se han alterado de manera significativa desde su formación. En su conjunto, la composición química total del meteorito Villalbeto de la Peña se corresponde con los valores medios encontrados en las condritas ordinarias

de grupo químico L y tipo petrológico 6, y la desviación encontrada en la abundancia de determinados elementos químicos no constituye ninguna anomalía de especial relevancia.

Petrografía

Se han estudiado dos secciones delgadas pulidas (V-1 y V-2 en la UPC) mediante microscopía óptica y electrónica (Fig. 5). Los cóndrulos se reconocen vagamente tanto con luz transmitida como reflejada, y muestran formas elipsoidales y tamaños de hasta 1,2 mm (Fig. 6A). La matriz muestra un alto grado de

recristalización, y está formada principalmente por olivino y ortopiroxeno, con feldespato intersticial de composición plagioclásica (Fig. 6B); la cromita, el apatito y el clinopiroxeno constituyen los minerales accesorios. Los cóndrulos más frecuentes son los barrados de olivino y piroxeno (Fig. 6C), aunque también se han identificado fragmentos de cóndrulos porfídicos de olivino y microgranulares de olivino y piroxeno (Fig. 6D), siendo éstos últimos muy escasos. La cromita está presente como granos anhedral (0.1-0.5 mm), generalmente asociada con agregados opacos (Fig. 6E). El apatito ha sido identificado como granos anhedral aislados (<200 µm) en contacto con cristales de olivino y piroxeno (Fig. 6F). Se han

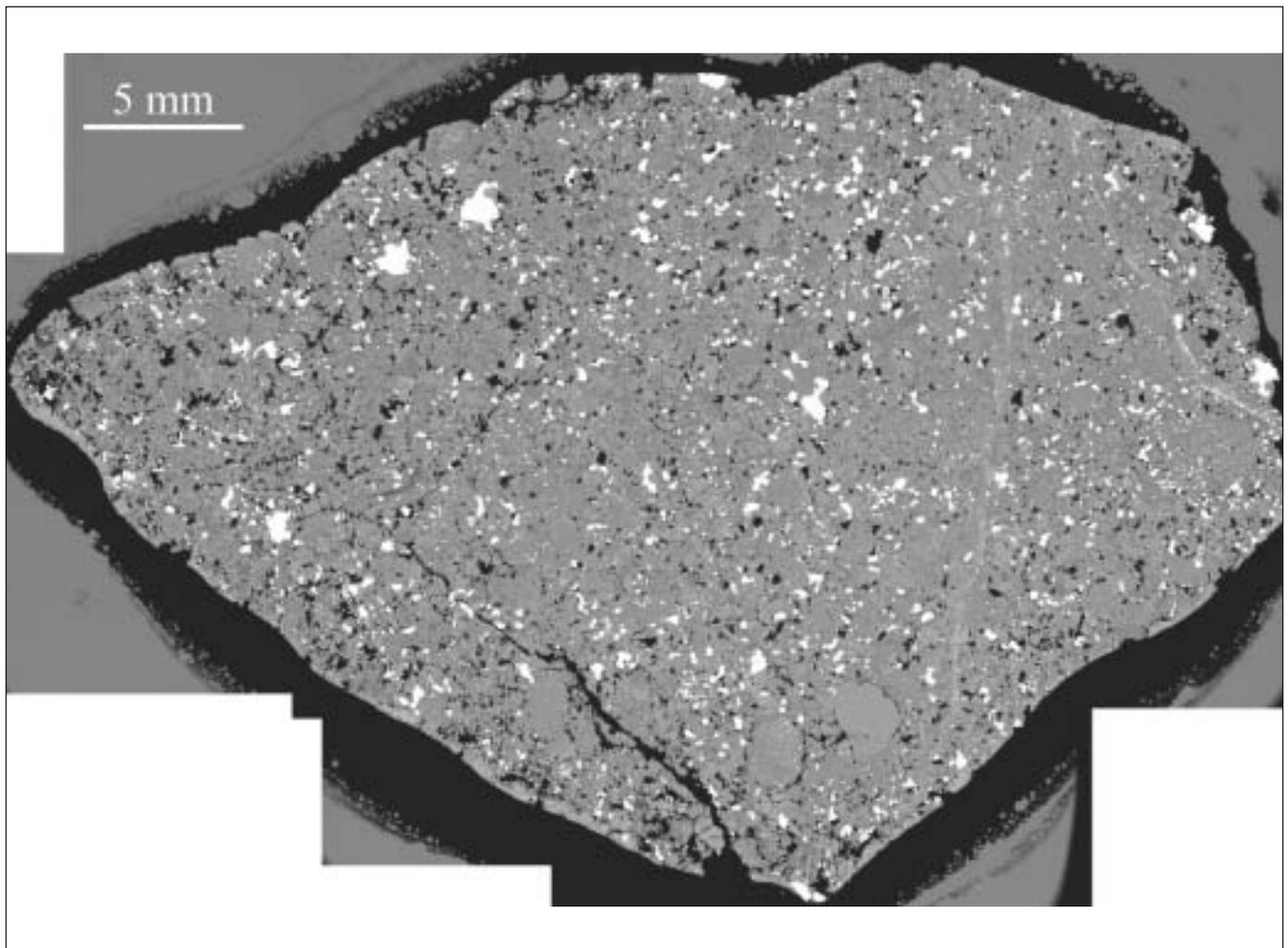


Figura 5. Composición de imágenes de microscopía electrónica con una visión general de toda la sección delgada V-1 de Villalbeto de la Peña. Se pueden observar dos venas de impacto en la parte derecha de la lámina, algunos cóndrulos y fragmentos de cóndrulos repartidos por toda la lámina y los agregados metálicos en color blanco

Figure 5. Composition of electron microscopy images showing a general view of the V-1 polished section of Villalbeto de la Peña meteorite. Two shock veins at the right part of the section, several chondrules and fragments of chondrules all over the section and metallic aggregates in white can be clearly observed

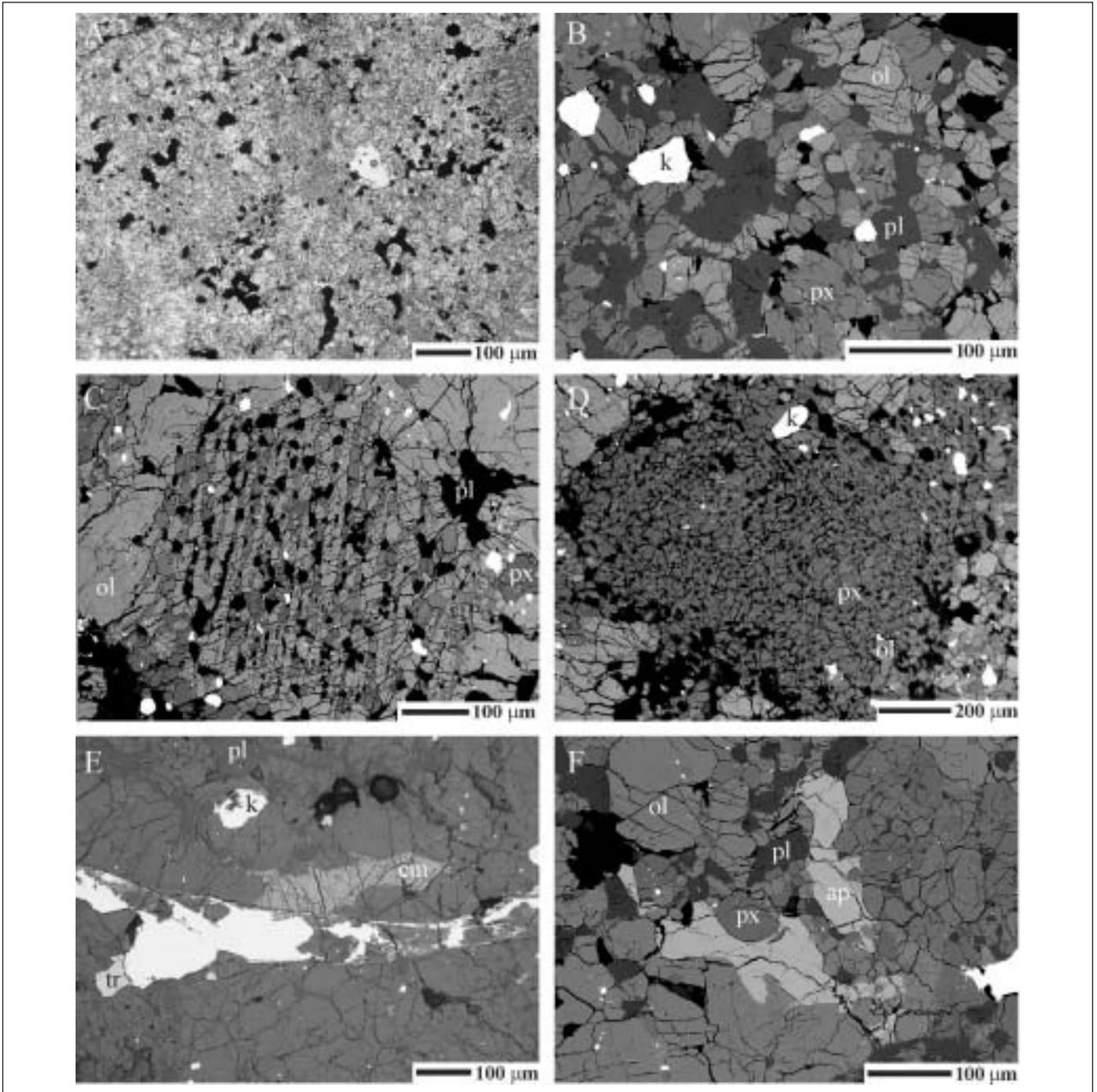


Figura 6. Imágenes de microscopio óptico y electrónico (electrones retrodispersados) del meteorito de Villalbeto de la Peña: A) Aspecto general del meteorito de Villalbeto de la Peña donde los cóndrulos se observan vagamente; B) Típica área recrystalizada donde se observan olivino (ol), piroxeno (px), plagioclasa (pl) y mamacita (k); C) Cóndrulo barrado recrystalizado de olivino con barras de olivino discontinuas (ol), piroxeno intercalado (px) y gotas de Fe-Ni metálico (en blanco); D) Cóndrulo microgranular de piroxeno (px) y, en menor proporción, olivino (ol); E) Grano de cromita (cm) en contacto con Fe-Ni metal, troilita (tr) y mamacita (k); F) Cristales anhedral de apatito (ap) en contacto con olivino (ol), granos de piroxeno (px) y granos fundidos de plagioclasa (pl)

Figure 6. Optical microscope and backscattered images of the Villalbeto de la Peña meteorite: A) General aspect of the Villalbeto de la Peña meteorite where the chondrules are not clearly observed; B) Typical recrystallized area showing olivine (ol), pyroxene (px), plagioclase (pl), and kamacite (k); C) Recrystallized barred olivine chondrule with discontinuous olivine bars (ol), intercalated pyroxene (px) and blebs of metallic Fe-Ni (white); D) Microgranular pyroxene chondrule (px) and olivine (ol) in minor content; E) Chromite grain (cm) in contact with Fe-Ni metal, troilite (tr) and kamacite (k); F) Anhedral apatite crystals (ap) in contact with olivine (ol), pyroxene grains (px) and melting plagioclase grains (pl)

reconocido también granos anhedrales de ortopiroxeno como pequeñas inclusiones en apatito. El carácter recrystalizado de la matriz confirma la clasificación del meteorito de Villalbeto de la Peña como perteneciente al tipo petrológico 6, confirmando los trabajos preliminares de Llorca *et al.* (2005). Se han reconocido algunos granos anhedrales de clinopiroxeno con tamaños que oscilan entre 10 y 50 μm , como componentes menores de cóndrulos microgranulares y barrados y que no habían sido reconocidos en los trabajos previos.

Los minerales opacos generalmente forman agregados con tamaños que varían entre 0,05 y 1,2 mm. Han sido identificados kamacita, taenita, plessita, troi-

lita y cromita como los componentes principales de la fracción opaca (Fig. 7A y 7D). El análisis modal (140 puntos en V-1) muestra que aproximadamente un 3 % vol. de las secciones estudiadas es Fe-Ni metal, normalmente como granos globulares. La plessita es particularmente abundante en las partículas de Fe-Ni metal (Fig. 7B y 7C). La troilita aparece siempre en contacto con los granos de metal o como inclusiones dentro de ellos.

En las secciones estudiadas han sido también identificadas varias venas de impacto de longitud centimétrica, mostrando una anchura entre 0.1 y 0.5 mm (Fig. 8A y 8B). Estas venas están principalmente compuestas de troilita, Fe-Ni metal, olivino y piroxe-

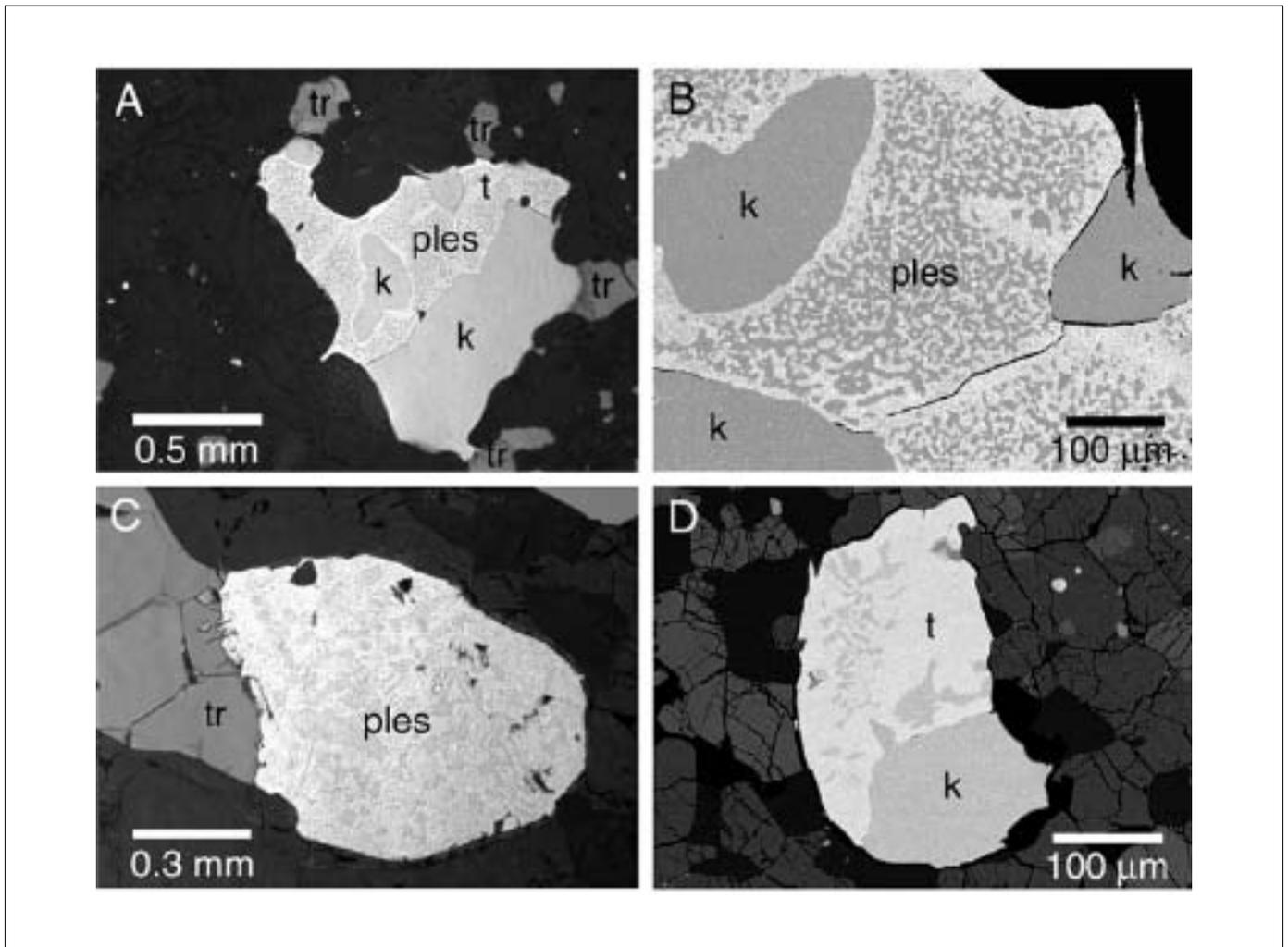


Figura 7. Imágenes de microscopio óptico de las fases metálicas del meteorito Villalbeto de la Peña: A) Grano metálico de kamacita (k), plessita (ples) y troilita (tr); B) Detalle de la plessita en el mismo grano de A); C) Grano metálico compuesto en su totalidad por plessita (ples) junto a un grano de troilita (tr); D) Grano metálico de taenita (t) y kamacita (k)

Figure 7. Optical microscope images of the metallic phases of Villalbeto de la Peña meteorite: A) Metallic grain of kamacite (k), plessite (ples), and troilite (tr); B) Detail of plessite in grain A); C) Metallic grain consisting entirely of plessite (ples) with a troilite (tr) grain; D) Taenite (t) and kamacite (k) metallic grain

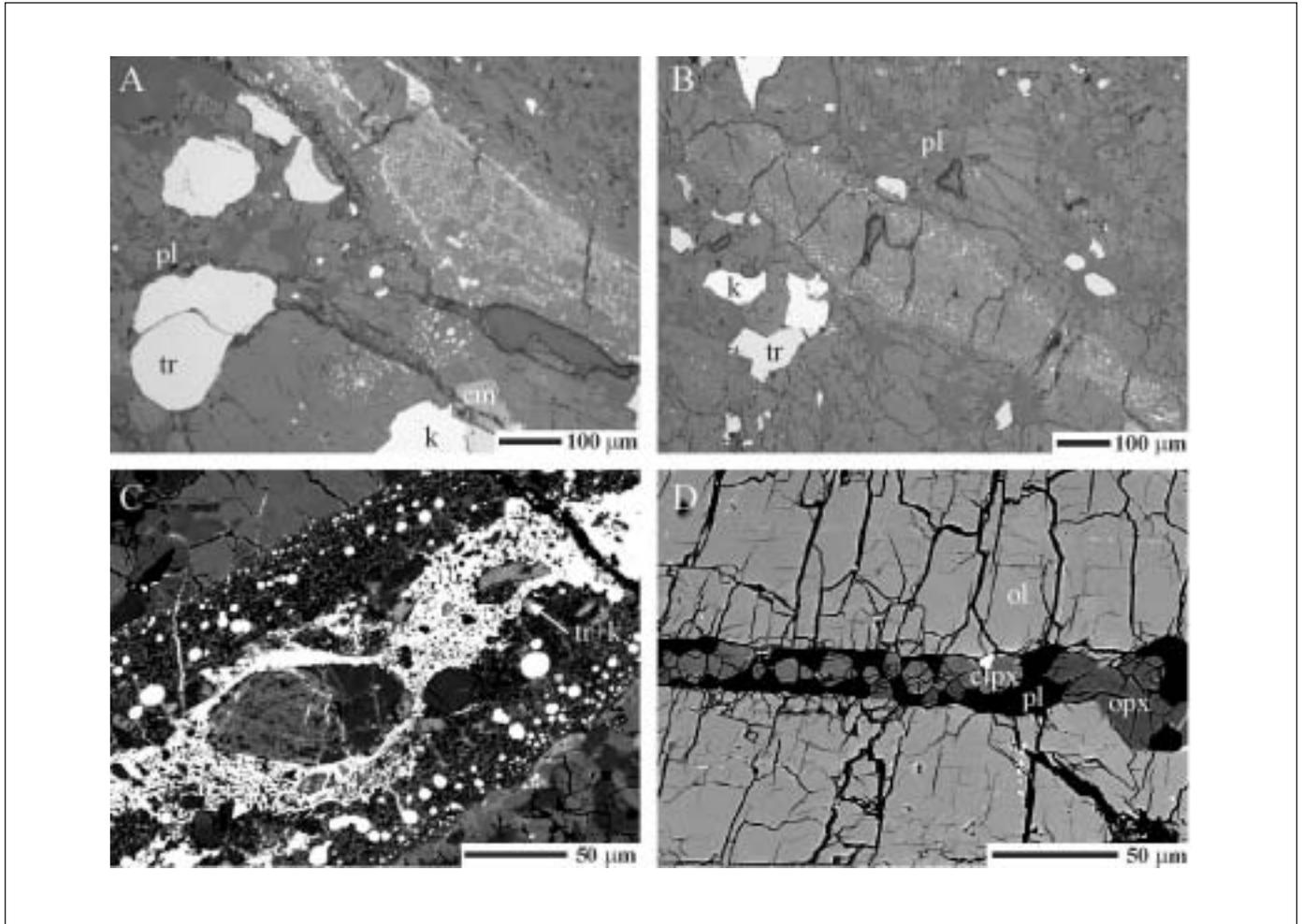


Figura 8. Imágenes de microscopio electrónico (electrones retrodispersados) de las venas de impacto: A) Granos metálicos de troilita (tr) y kamacita (k), con un grano de cromita (cm) y plagioclasa recristalizada (pl); B) Grano de troilita (tr) asociado a kamacita (k) junto a una vena de impacto; C) Vena de impacto que muestra la presencia de fragmentos silicatados parcialmente fundidos y una zonación de gotas de fundido de composición troilita + kamacita (tr+k); D) Fractura planar en olivino (ol) rellena con cristales euhedrales de orto- y clinopiroxeno (opx y clpx respectivamente), y fundido de composición plagioclásica (pl)

Figure 8. Backscattered images of shock veins: A) Metallic grains of troilite (tr) and kamacite (k), with a chromite grain (cm) and recrystallized plagioclase (pl); B) Troilite grain (tr) associated to kamacite (k) close to a shock vein; C) Shock vein showing the presence of partially melted silicate fragments and zonation of troilite+kamacite (tr+k) blebs. D) Planar fracture in olivine (ol) filled with euhedral crystals of ortho- and clinopyroxene (opx and clpx, respectively), and melt of plagioclase composition (pl)

no, así como plagioclasa y cromita en cantidades menores. El Fe-Ni metal y la troilita aparecen como gotas de fundido o como agregados localizados en las partes más internas de las venas (Fig. 8C), incluyendo fragmentos de silicatos embebidos en una matriz de grano fino (<10 μm). Esta matriz está compuesta por fragmentos de cristales de olivino y piroxeno, con plagioclasa accesoria.

Tanto las fracturas planares como el mosaicismo débil en algunos cristales de olivino han sido también claramente identificados en el presente estudio. Algunas de estas fracturas planares están rellenas de

granos criptocristalinos de plagioclasa y cristales euhedrales hexagonales de orto- y clinopiroxeno (Fig. 8D). Estas observaciones sugieren una clasificación para Villalbeto de la Peña como S4, de acuerdo a los criterios de Stöffler *et al.* (1991), y de acuerdo también con los datos aportados en el anterior trabajo de Llorca *et al.* (2005).

Química mineral

Para la analítica mineral se ha utilizado una micro-

sonda electrónica JEOL JXA-8900M, ubicada en el Centro de Microscopía "Luis Bru" de la Universidad Complutense de Madrid, con unas condiciones de trabajo de 20 keV para minerales metálicos y de 15 keV para minerales silicatados. Se ha utilizado un diámetro de haz electrónico de 5 µm aproximadamente para los análisis puntuales excepto para plagioclasa, donde se ha utilizado un diámetro de 20 µm aproximadamente para minimizar la volatilización del Na.

Se han utilizado silicatos sintéticos y naturales, así como óxidos y metales como patrones de referencia. Las composiciones químicas obtenidas de los minerales no metálicos (silicatos, cromita y apatito), así como sus fórmulas estructurales calculadas se muestran en la Tabla 1.

Los análisis de microsonda electrónica realizados ponen de manifiesto que las composiciones de olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno, plagioclasa y cromi-

	Pl	Ol	Or-Px	Cl-Px	Cr	Ap
n	27	30	26	12	22	9
SiO₂	64.63 ± 0.3	37.99 ± 0.4	55.16 ± 0.4	53.73 ± 0.2	n.d.	n.d.
Al₂O₃	22.12 ± 0.2	0.01	0.17 ± 0.03	0.55 ± 0.04	6.04 ± 0.3	0.03 ± 0.01
FeO	0.17 ± 0.08	21.34 ± 0.5	13.30 ± 0.4	4.63 ± 0.3	30.04 ± 0.4	n.d.
MnO	0.03 ± 0.02	0.41 ± 0.07	0.44 ± 0.05	0.22 ± 0.05	0.71 ± 0.07	0.04 ± 0.04
Mg O	0.02 ± 0.02	39.92 ± 0.4	29.57 ± 0.3	16.89 ± 0.1	2.55 ± 0.2	n.d.
CaO	2.21 ± 0.1	0.04 ± 0.02	0.77 ± 0.1	22.37 ± 0.4	0.02 ± 0.01	53.22 ± 0.6
Na₂O	9.30 ± 0.2	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.44 ± 0.1	0.03 ± 0.02	0.35 ± 0.03
K₂O	1.26 ± 0.2	0.02 ± 0.01	n.d.	0.01	n.a.	n.d.
TiO₂	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.19 ± 0.03	0.48 ± 0.03	3.15 ± 0.3	n.d.
NiO	n.d.	0.03 ± 0.02	n.d.	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.07	0.03 ± 0.02
Cr₂O₃	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.13 ± 0.1	0.74 ± 0.05	56.64 ± 0.5	n.d.
P₂O₅	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02	n.d.	41.33 ± 0.4
ZnO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.12 ± 0.06	n.a.
V₂O₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.76 ± 0.06	n.a.
F	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.a.	0.28 ± 0.06
Cl	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	n.a.	4.77 ± 0.3
Total	99.83	99.87	99.78	100.14	100.13	100.06
(oxígenos)	8	4	6	6	4	25
Si	2.86	0.98	1.98	1.97	-	-
Ti	-	-	0.01	0.01	0.08	-
Al	1.15	-	0.01	0.02	0.25	-
Fe²⁺	0.01	0.46	0.40	0.14	0.89	-
Mn	-	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Mg	-	1.54	1.58	0.92	0.13	-
Ca	0.10	-	0.03	0.88	-	9.54
Na	0.80	-	-	0.03	-	0.11
K	0.07	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	0.02	1.58	-
P	-	-	-	-	-	5.86
V	-	-	-	-	0.02	-
F	-	-	-	-	-	0.15
Cl	-	-	-	-	-	1.35
Total	5.00	3.01	4.01	4.01	2.99	17.02
	Or _{53-9.8} Ab _{79.4-84} An _{9.9-11.2}	Fa _{22.0-23.7}	Fs _{18.9-20.5} Wo _{1.2-1.9}	Fs _{6.5-7.9} Wo ₄₄₋₄₆		

Cr: cromita, Ol: olivino, Or-Px: ortopiroxeno, Cl-Px: clinopiroxeno, Pl: plagioclasa, Ap: apatito, n.a.: no analizado, n.d.: no detectado

Tabla 1. Composiciones químicas medias de microsonda electrónica (% peso) de las fases no metálicas analizadas
Table 1. Mean electron microprobe analyses (wt. %) and mineral formulae of non-metallic phases

ta de cóndrulos y matriz son esencialmente homogéneas. Los olivinos analizados en Villalbeto de la Peña son forsteríticos, con un rango composicional en fayalita ligeramente menor que los publicados hasta la fecha ($Fa_{24,0-24,4}$ en Llorca *et al.*, 2005; $Fa_{22,0-23,7}$ en este estudio). No se han encontrado diferencias sustanciales entre granos de olivino de diferentes zonas de la matriz o entre cristales de olivino de matriz y de cóndrulos. El contenido en Ca está siempre por debajo de 0,08 % peso, y en Mn entre 0,27 y 0,53 % peso. El ortopiroxeno pobre en calcio presenta una composición enstatítica, con contenidos en wollastonita de $Wo_{1,5}$ y de ferrosilita entre $Fs_{18,9}$ y $Fs_{20,5}$, y contenidos menores de Ti, Al, Cr y Mn (Tabla 1). No hay diferencias relevantes entre estos datos y los publicados, excepto un contenido en Fe ligeramente menor (< 2 mol% Fs) en alguno de los piroxenos analizados en este trabajo. Se han reconocido y analizado también varios granos de clinopiroxeno. Se trata de clinopiroxeno rico en Ca (diópsido) con contenidos en ferrosilita de $Fs_{6,5-7,0}$, y cantidades menores de Na, Ti y Cr (<1%). La plagioclasa de la matriz recristalizada muestra una composición claramente albitica $An_{9,9-11,2}Ab_{79,4-84}Or_{5,3-9,8}$. Estos valores muestran menores cantidades de SiO_2 y Al_2O_3 (1%) y mayores de Na_2O (2%) que los publicados anteriormente (Llorca *et al.*, 2005), y puede ser atribuido a ligeras diferencias en las condiciones analíticas y al mayor número de análisis realizados en el presente estudio. Sin embargo, las interpretaciones de la química mineral para la clasificación del meteorito se mantienen igualmente válidas.

Los cristales de cromita muestran una composición muy cercana a la estequiométrica $FeCr_2O_4$, con

Fe^{2+} (>3 % peso de FeO) parcialmente sustituido por Mg y Mn, en torno a un 6 % peso de Al_2O_3 , y cantidades importantes de TiO_2 (>3 % peso) y V_2O_5 (0,76 % peso), tal y como se puede observar en la Tabla 1. El apatito había sido identificado en estudios previos pero no había sido analizado; los granos analizados en este estudio son principalmente Cl-apatito, con contenidos en F entre 0,21-0,37 y en Cl entre 4,42-5,08 % peso. Las composiciones de los sulfuros y fases metálicas están recogidas en la Tabla 2. La troilita es estequiométrica, muy homogénea en composición, y con contenidos poco importantes en Ni y Co. La composición media de los granos de kamacita y taenita es de 6,2 y 36,9 % peso de Ni respectivamente. Estos resultados composicionales son muy similares a los obtenidos en el trabajo preliminar de Llorca *et al.* (2005).

Conclusiones

Los análisis de microsonda electrónica y la petrografía detallada realizada en dos láminas delgadas de Villalbeto de la Peña corroboran la clasificación de este meteorito como una condrita ordinaria equilibrada (L6), y un índice de metamorfismo de impacto moderado (S4). Se han identificado granos de clinopiroxeno, no reconocidos en estudios previos, en cóndrulos barrados y microgranulares. Los granos de apatito, que no habían sido analizados en estudios previos, son principalmente Cl-apatito. La composición química elemental del meteorito Villalbeto de la Peña se corresponde con los valores medios de las condritas ordinarias L6.

	Tr	K	T
n	29	20	12
Fe	63.14 ± 0.3	92.70 ± 0.7	62.86 ± 0.8
S	36.74 ± 0.4	n.d.	n.d.
Ni	n.d.	6.19 ± 0.2	36.91 ± 1.1
Co	0.07 ± 0.01	0.87 ± 0.08	0.24 ± 0.05
Total	99.96	99.76	100.01

Tr: troilita, K: kamacita, T: taenita, n.d.: no detectado

Tabla 2. Composiciones químicas medias de microsonda electrónica (% peso) de las fases metálicas analizadas
Table 2. Mean electron microprobe analyses (wt. %) of metallic phases

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el MEC, proyecto AYA2004-20101.

Los autores agradecen las revisiones críticas realizadas por los Dres. F. Tornos y J.M. Trigo-Rodríguez.

Referencias

- Anders, E. y Grevesse, N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 197-214.
- Friedrich, J.M., Wang, M.S. y Lipschutz, M.E. 2002. Comparison of the trace element composition of Tagish Lake with other primitive carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 37, 677-686.
- Friedrich, J.M., Wang, M.S. y Lipschutz, M.E. 2003. Chemical studies of L chondrites. V: Compositional patterns for 49 trace elements in 14 L4-6 and 7 LL4-6 falls. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 2467-2479.
- Horan, M.F., Walker, R.J., Morgan, J.W., Grossman, J.N. y Rubin, A.E. 2003. Highly siderophile elements in chondrites. *Chemical Geology*, 196, 5-20.
- Kallemeyn, G.W., Rubin, A.E., Wang, D. y Wasson, T.W. 1989. Ordinary chondrites: Bulk compositions, classification, lithophile-element fractionations, and composition-petrographic type relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 2747-2767.
- Llorca, J., Trigo-Rodríguez, J.M., Ortiz, J.L., Docobo, J.A., García-Guinea, J., Castro-Tirado, A.J., 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, 795-804.
- Llorca, J., Gich, M. y Molins, E. 2007. The Villalbeto de la Peña meteorite fall: III. Bulk chemistry, porosity, magnetic properties, ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy, and Raman spectroscopy. *Meteoritics & Planetary Science*, in press.
- Lozano, R. y Martín Crespo, T. 2004. Petrography and mineral chemistry of the Reliegos chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 39, A157-A162.
- Russell, S.S., Folco, L., Grady, M.M., Zolensky, M.E., Jones, R., Richter, K., Zipfel, J. y Grossman, J.N. 2004. The Meteoritical Bulletin, No. 88. *Meteoritics & Planetary Science*, 39, A215-272.
- Stöffler D., Keil K. y Scott E.R.D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- Trigo-Rodríguez, J.M., Borovička, J., Spurný, P., Ortiz, J.L., Docobo, J.A., Castro-Tirado, A.J. y Llorca, J. 2006. The Villalbeto de la Peña meteorite fall: II. Determination of atmospheric trajectory and orbit. *Meteoritics & Planetary Science*, 41, 505-517.

Recibido: enero 2007

Aceptado: marzo 2007