

ESTUDIO ESPECTROSCÓPICO, COMPOSICIONAL Y MINERALÓGICO DE UN FRAGMENTO DEL METEORITO VIÑALES, CAÍDO EN LOS JAZMINES, CUBA OCCIDENTAL

Manuel A. Iturralde-Vinent¹, Angélica I. Llanes Castro², María Santa Cruz Pacheco², Carlos A. Toledo Sánchez³, Ileana Cabrera Díaz³

¹Academia de Ciencias de Cuba, ²Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico Nacional, Cuba, ³Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica, Cuba.

RESUMEN

En este trabajo se ofrecen los resultados del estudio mediante microscopías óptica y electrónica y espectrometrías de rayos X y Raman Confocal, de una muestra del meteorito caído en Viñales, Pinar del Río, Cuba. El ejemplar caído en Los Jazmines tenía forma tabular (11 x 9 x 4.5 cm, 1 kg) con la superficie ondulada por depresiones regmaglíticas. La roca es una brecha compuesta por muchos fragmentos de bordes angulares, con grietas rellenas de una fina diseminación de granos minerales, especialmente metálicos. Los fragmentos mayores tienen rasgos texturales y composición química semejante a una roca ígnea ultramáfica, con O (~46.7%), Si (~16.8), Fe (~14.2%) y Mg (~12.2%), así como Al (~1.82%), S (~1.83%), Ca (~1.78%), Na (~1.33%), Ni (~0.57%), Cr (~0.29%) y K (~0.25%). Los minerales más representativos son olivino (Fo₇₈/Fa₂₂) ~44.73%, plagioclasa sódica ~13%, piroxeno (augita) ~12.6%, troilita ~4.47%, taenita ~3.35%, cromita ~0.62%, muy rara Kamacita, así como escaso hierro metálico y plomo. La textura es condritica, heterogranoblástica, por partes de aspecto porfírica por la presencia de minerales metálicos diseminados. La matriz es de color blanco a verde pálido. Los cóndrulos (~25%), a menudo obliterados, alcanzan 0.6, 1.0 y 1.6 mm de diámetro. El ejemplar muestra recristalización y cataclásis por metamorfismo térmico y de choque. No se observa meteorización. El ejemplar de Los Jazmines se clasifica como una condrita ordinaria (L6/S4/W0). Se asemeja en su composición mineralógica al meteorito Kamargaon (L6).

PALABRAS CLAVE: meteorito, condrita ordinaria, L6, Viñales, Cuba.

SPECTROSCOPICAL, COMPOSITIONAL AND MINERALOGICAL STUDY OF THE VIÑALES METEORITE AS DETERMINED IN A FRAGMENT FALLEN AT LOS JAZMINES, WESTERN CUBA

ABSTRACT

The result of the X Ray, Raman Confocal and electronic and optical microscope analysis of a sample (Specimen Los Jazmines) from the meteorite fallen in Viñales, Pinar del Río, Cuba is presented. The specimen presents a tabular shape (11 x 9 x 4.5 cm, 1 kg) with undulated regmagliptic external features. The rock is a breccias composed of angular fragments with fractures filled by disseminated grains of mainly metallic minerals. The fragments present minor textural differences, but its chemical composition match an ultramafic igneous rock as many chondrites [O (~46.7%), Si (~16.8), Fe (~14.2%) y Mg (~12.2%), Al (~1.82%), S (~1.83%), Ca (~1.78%), Na (~1.33%), Ni (~0.57%), Cr (~0.29%) y K(~0.25%)]. Mineral are Olivine ((Fo₇₈/Fa₂₂) ~44.73%, Na Plagioclase ~13%, Piroxene (Augite) ~12.6%, Troilite ~4.47%, Taenite ~3.35%, Chromite ~0.62%, sparse Kamacite, and rare metallic Fe and Pb. The matrix is white or pale green in color, with chondritic, heterogranoblastic texture, partially porphyritic due to disseminated large metallic minerals. Condrules (~25%) are often obliterated with diameters between 0.6, 1.0 and 1.6 mm. The specimen is fractured and recrystallized due to thermal and shock metamorphism. Meteorization is nule. It is classified as an ordinary (L6/S4/W0) chondrite, with some similarities in its mineralogical composition to Kamargaon (L6).

KEYWORDS: Meteorite, ordinary chondrite, L6, Viñales, Cuba.

INTRODUCCIÓN

El primero de Febrero de 2019, poco después de la una de la tarde, se observó una estela de humo en el cielo del Caribe occidental en dirección NE, acompañada por fuertes explosiones que sacudieron las casas, puertas, ventanas y muebles de varias poblaciones de Cuba occidental. A continuación, sobre la populosa zona turística del Valle de Viñales y su entorno, en un área general de unos 150 km², que incluyó Los Jazmines, el valle de Viñales con el pueblo, el mogote El Valle, el valle de Dos Hermanas, valle de Ancón y embalse El Salto, se precipitaron miles de fragmentos ⁽¹⁾ del meteorito, algunos de hasta 2400 gramos y más de 15 cm de diámetro máximo, sin causar heridas ni daños de consideración (Vázquez y Pino, 2019).

Para realizar el estudio del meteorito se seleccionó un fragmento caído al norte de Los Jazmines, cuya composición químico-mineralógica y rasgos petrográficos fueron establecidos con el objetivo de obtener una información lo más completa posible e identificarlo. Este estudio reviste gran interés, debido a que ninguno de los siete meteoritos recuperados en Cuba anteriormente había sido sometido a un análisis detallado. De acuerdo a los datos existentes (Ceballos-Izquierdo, 2019), parece que el meteorito caído en San José de las Lajas se asemeja al presente, pero se necesitarán análisis complementarios de aquel para asegurarlo.

MÉTODOS

El fragmento Los Jazmines del meteorito Viñales se cortó en cuatro y una parte se dejó como testigo. Con otra se realizaron sección pulida y láminas delgadas. El tercer pedazo se pulverizó para análisis espectral y el cuarto se dejó una cara sin pulir y a posteriori se pulverizó para preparar un concentrado y dos inclusiones en resina conductora, para otros análisis.

Los preparados fueron examinados primero mediante microscopía óptica con un equipo marca MEIJI, modelo EMZ-5TR; un microscopio petro-minerográfico marca AxioScope A₁; y un microscopio petrográfico marca AxioLab A₁. También se aplicó microscopía electrónica de barrido con analizador de rayos X, utilizando un equipo marca TESCAN, modelo 5130 SB y un analizador de rayos X de la marca Oxford Instruments modelo INCA 350, así como microscopía Raman Confocal con un equipo XploRa marca HORIBA con microscopio OLYMPUS, modelo BX-41. Para determinar la radioactividad se utilizó un espectrómetro de rayos gamma RS-230 BGO.

Las imágenes de microscopía electrónica se procesaron mediante el software VEGA TC versión 1 y los análisis de rayos X mediante el software INCA ENERGY. Para los trabajos de microscopía Raman Confocal se utilizó el software Lab Spec 6. Las identificaciones de fases minerales se basaron en la información acumulada durante años por los autores sobre minerales conocidos, la suministrada por las listas de minerales de la IMA y los espectros de libre acceso de la base de datos internacional RRUFF.

DESCRIPCIÓN DEL METEORITO VIÑALES

El primero de Febrero de 2019 cayeron numerosos fragmentos del meteorito sobre el valle de Viñales y sus alrededores. A juzgar por las docenas de ejemplares que se pudieron examinar directamente o mediante fotos facilitadas por distintas fuentes, los fragmentos son redondeados a subredondeados con diversas dimensiones. Los mayores que llegaron a tierra, según Vázquez y Pino (2019), alcanzan 2070 gramos de peso y tamaño de hasta 15 cm. Cada fragmento caído ⁽¹⁾ a su vez presenta aspecto brechoso, compuesto por clastos

subangulares (Fig. 1A), separados por una lámina fina de color oscuro, de menor espesor que la corteza de fusión externa (Fig. 1B).

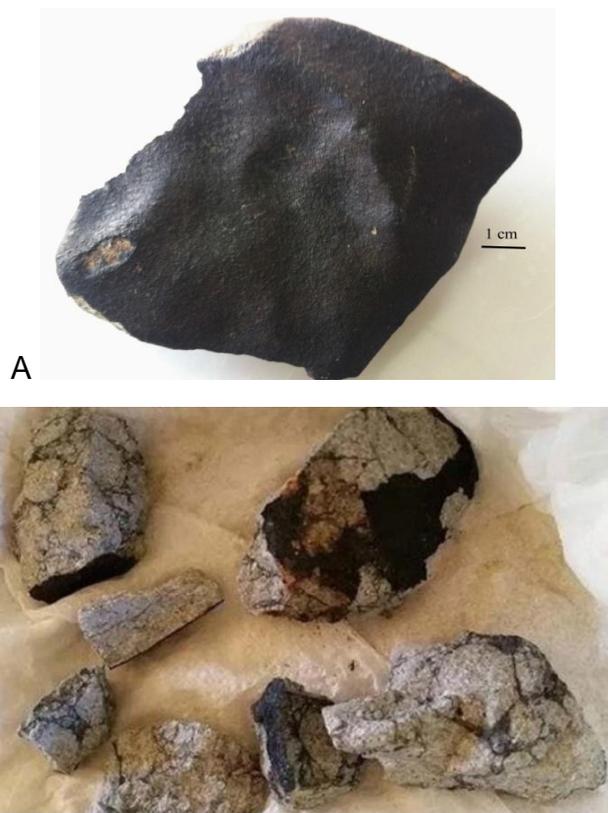


Fig. 1. Fotos del meteorito de Viñales. A- ejemplar objeto de estudio caído en Los Jazmines. B- varios ejemplares con evidente carácter brechoso.

FRAGMENTO LOS JAZMINES

Localización. Este fragmento cayó en una vega de tabaco denominada Los Virgilio, situada justo al norte del hotel Los Jazmines, en el punto de coordenadas $x= 219.764.68$, $y= 310.403.14$, $z= 147.26$, según GPSMAP marca Garmin 64s, configurado para la obtención directa de las coordenadas planas del sistema Cuba Norte de la proyección Cónica Conforme de Lambert (Vázquez y Pino, 2019). **Repositorio.** La cuarta parte de este fragmento se depositó en la colección científica de meteoritos del Museo de Ciencias Naturales de Viena, Austria.

(¹) Cada ejemplar componente del Meteorito Viñales, desmembrado en el aire, caído y recuperado, se denomina indistintamente fragmento o pedazo. Se aplica el término **clasto** a los trozos que se distinguen en cada ejemplar y que le otorgan carácter brechoso. Se refiere como muestra una parte de algún fragmento que haya sido preparada para su estudio.

Características externas. El ejemplar Los Jazmines tenía forma tabular (11 x 9 x 4.5 cm) con la superficie externa (costra de fusión) ondulada con depresiones regmaglíticas (Fig. 1A), que en un lado presenta una superficie de ruptura cubierta por una fina capa oscura, como la que divide los clastos ⁽¹⁾ que lo componen, evidenciando que se le desprendieron uno o varios fragmentos. El interior, a simple vista, es color blanco grisáceo y en sección pulida verde pálido (Fig. 2). Presenta magnetismo. Su peso es de aproximadamente 1 kg con una densidad de 3.7 g/cm³.

Características internas. Al cortarse, reveló su carácter brechoso interno, demostrando que la fracturación está desarrollada desde el nivel macro hasta el nivel de cada ejemplar recuperado. Una vena de material opaco separa dos zonas en la muestra: una masiva, y la otra con varios clastos separados por fracturas rellenas de masa oscura (Fig. 2).

Para detectar las heterogeneidades del ejemplar Los Jazmines se inspeccionaron y fotografiaron seis campos (Fig. 3A). El **Campo 1** tiene textura masiva, en cuya matriz de silicatos los componentes metálicos están dispersos como granos irregulares de hasta 800 µm. El **Campo 2** presenta textura masiva y en la matriz de silicato aparecen dispersos abundantes granos de troilita de formas irregulares, con bordes desde subangulares hasta subredondeados. Los granos alcanzan tamaños superiores a 1000 µm. La taenita es menos abundante que en el Campo 1.

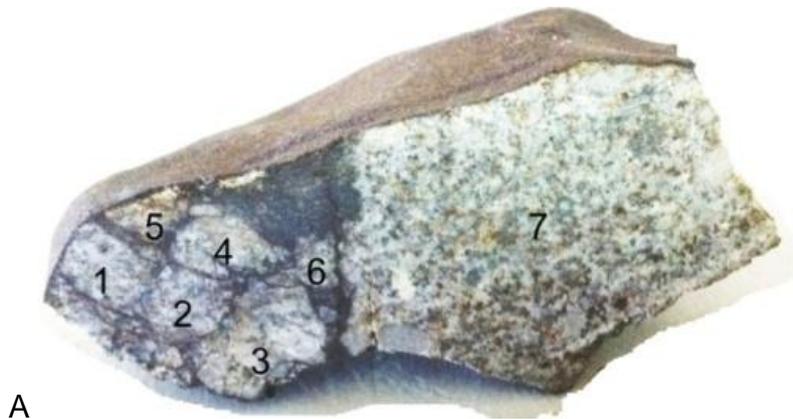




Fig. 2. Fragmento Los Jazmines. Observe la ligera pátina de oxidación amarillenta después de una breve exposición al aire. La corteza de fusión externa es más gruesa que las venas que rellenan las grietas entre los fragmentos. A. Campos definidos para fotografiar. B. Foto de un corte sin pulimento del clasto mayor, donde se observan cóndrulos y varias grietas rellenas de minerales metálicos.

En el **Campo 3** se distinguen sectores de textura masiva separados por una matriz fina con minerales metálicos. La taenita, en formas irregulares que llegan a ameboidales, es más abundante que la troilita. Estos granos metálicos alcanzan dimensiones mayores que en el campo 2. El **Campo 4** tiene textura y composición similar a los campos 1 y 2, pero la taenita, algo más abundante, se presenta en granos irregulares con bordes subredondeados, de menor tamaño que en los restantes campos. El tamaño de los metálicos es menor que en los campos 1 a 3. Una grieta rellena por minerales metálicos atraviesa parte de la matriz de silicatos. El **Campo 5** es muy similar al campo 1, con abundancia de minerales metálicos, donde la troilita parece abundar más que la taenita, pero esta última alcanza mayores tamaños $>1000 \mu\text{m}$. El **Campo 6** tiene la matriz de silicatos más fina que los campos 1, 2, 4 y 5, pero más gruesa que el campo 3 y los metálicos son menos abundantes respecto a los otros campos. El **Campo 7**, del clasto mayor, presenta textura masiva, heterogranular, porfídica, con aislados cristales tabulares de silicatos y con cóndrulos elipsoidales, cuyos contornos pueden estar delimitados por minerales metálicos (Fig. 5, A y B), donde resaltan cristales gruesos de minerales metálicos (Fig. 3).

Entre los clastos menores se observa una veta donde los minerales metálicos envuelven a los granos de silicatos (olivino) (Fig. 4, D). Se destacan formas esferoidales de troilita de tamaño submicroscópico ($<20\mu\text{m}$) que pueden estar entrecrecidas con la taenita.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

El fragmento Los Jazmines presenta textura condrítica, heterogranoblástica, con efectos de choque. Abundan los minerales metálicos de diversas formas, lo que le otorga a la roca un aspecto porfírico.

Intemperismo. En las láminas delgada examinadas no se define una alteración secundaria, de modo que el ejemplar de Los Jazmines se puede clasificar como **W0** en la escala de meteorización (Wlotzka, 1993). Esto refleja el hecho de haber sido recogido y preservado justo después de la caída. El ejemplar estudiado, al ser cortado y expuesto al aire durante varias horas, comenzó a presentar huellas de oxidación superficial alrededor de los sulfuros (Fig. 2).

Matriz. La masa de minerales que forma la matriz de esta roca alcanza un ~40% del volumen y es de color blanco a verde pálido. Presenta textura granoblástica fina a media, determinada por cristales de olivino y clinopiroxeno de tamaños menores a 150 μm , donde se destacan cristales subhedrales de olivino y en menor grado piroxeno de tamaño mayor de 100 μm y plagioclasa subhedral a euhedral. Algunos cristales pequeños de Albita no alcanzan una buena figura conoscópica para ver el signo óptico, presentan bajo relieve, con birrefringencia baja en tonos de blanco y grises bajos. Por partes está recrystalizada y cataclastizada en fragmentos menores de 50 μm . Los minerales metálicos (troilita, taenita y raros granos de cromita) ocupan intersticios entre los silicatos y alcanzan desde unas pocas micras hasta un máximo de 400 μm (Figs. 4 y 5).

Cóndrulos. Corresponden a ~25% del volumen de la roca, con tamaños entre 0.6 y 1 mm, hasta de ~1.6 mm. El porcentaje es aproximado ya que la recrystalización de la matriz, a causa del metamorfismo que puede haber obliterado la estructura de algunos de ellos. Presentan formas subesféricas hasta algo elipsoidales; o aparecen definidos por la disposición del material metálico a su alrededor (Fig. 4, A, B). Algunos se encuentran fragmentados. Los tipos de cóndrulos observados son de olivino barrado (BO), porfírico de olivino (PO), radial de piroxeno (PR) y porfírico de piroxeno y olivino (POP).

Grupo Químico. Se considera del grupo **L** (bajo contenido de hierro) basado fundamentalmente en la proporción $\text{Fo}_{78}/\text{Fa}_{22}$ del olivino, abundancia modal estimada del metal (troilita + taenita) alrededor de 7% y diámetro promedio de los cóndrulos 0.7 mm (700 μm).

CLASIFICACIÓN

Tipo petrológico: Según la clasificación de Van Schmus y Wood (1967) el fragmento Los Jazmines puede corresponder al tipo petrológico **6**, por el contenido de un 25% de cóndrulos en la matriz y una textura de equilibrio de cóndrulo moderada, dada por la integración de estos con la matriz, donde el

contorno, en la mayoría de los casos, no se define con nitidez. Lo anterior indica que gran parte de los cóndrulos recrystalizó formando parte de la matriz (Fig.4C). Además el tamaño promedio de los cristales de plagioclasa es $\leq 100\mu\text{m}$ y existe un número limitado con tamaño $> 100\mu\text{m}$, mientras se aprecia el tamaño grande de los granos de metal, así como la presencia de bordes cóncavos/convexos entre los cristales metálicos y de olivino (Fig. 4,D); quizás producto de una interacción en estado fundido, donde el contorno del metal y los sulfuros metálicos se modificaron progresivamente para adquirir formas ameboidales (Huss et al., 2006; Brearley and Jones, 1998).

Metamorfismo. El metamorfismo presente es tanto térmico como de choque. Sobre la base de los efectos de choque en olivino y plagioclasa, el metamorfismo **de choque** se considera moderado (**S4**) reflejado en la fracturación de la roca desde el nivel macro (todo el meteorito) hasta la matriz y sus componentes, lo que se expresa en un mosaicismo débil. Se observan fracturas planares en algunos cristales de olivino, extinción ondulante, y más frecuente, fracturas irregulares. En la plagioclasa es visible la extinción ondulante hasta isotropía parcial, los que constituyen rasgos de deformación planar. Al mismo tiempo, la presencia de grietas y venas finas rellenas de minerales metálicos (Fig. 5, C, D) se puede vincular con colisiones, a veces múltiples, a lo largo de su historia dentro del cinturón de asteroides, como sugieren algunos autores (Stöffler et al. 1991 y otros). Una evidencia de estructuras muy finas resultantes de este metamorfismo dinámico lo constituyen las vetillas compuestas por agregados de troilita II y la taenita II entrecrecidas, que a veces cortan los agregados de troilita I primeramente formados, y también las formas esferoidales de sulfuro de hierro, que debieron formarse a elevadas presiones y temperaturas de impacto de choque dinámico y solidificado a la elevada velocidad de enfriamiento.

El metamorfismo **termal** está reflejado en la integración de los cóndrulos con la masa que los rodea. La mesostasia de los cóndrulos es escasa y está desvitrificada, con desarrollo de la cristalización de plagioclasa. Adicionalmente, resalta la presencia de grandes cristales de minerales metálicos que superan los $120\mu\text{m}$.

La composición mineralógica y rasgos texturales del fragmento Los Jazmines permiten caracterizarlo como una condrita ordinaria del grupo **L** y tipo petrológico **6**, de grado de metamorfismo moderado **S4** e intemperismo **W0**.

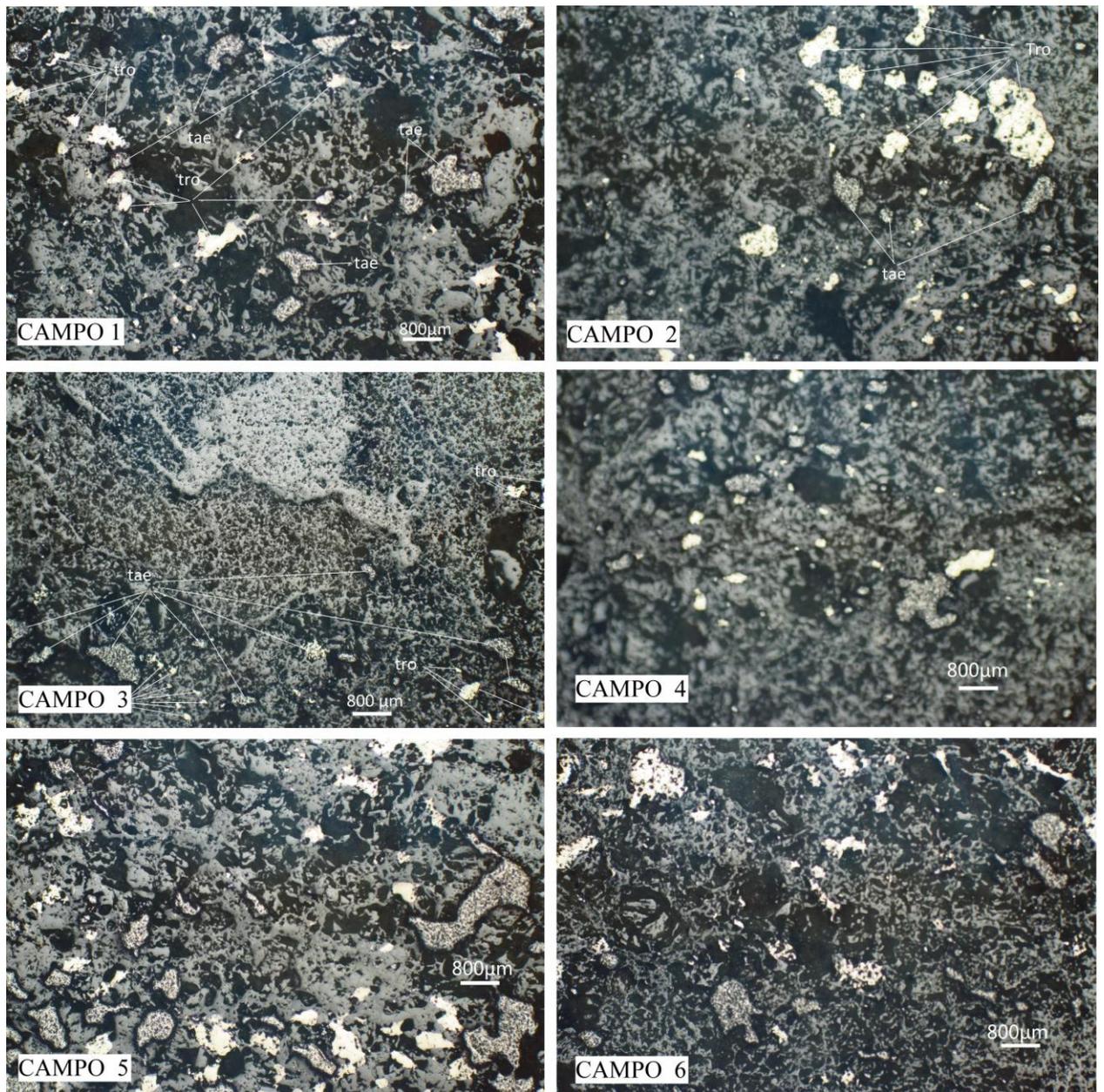


Figura 3. Aspecto de la textura de los distintos campos indicados en la figura 2. (tae- taenita, tro- troilita).

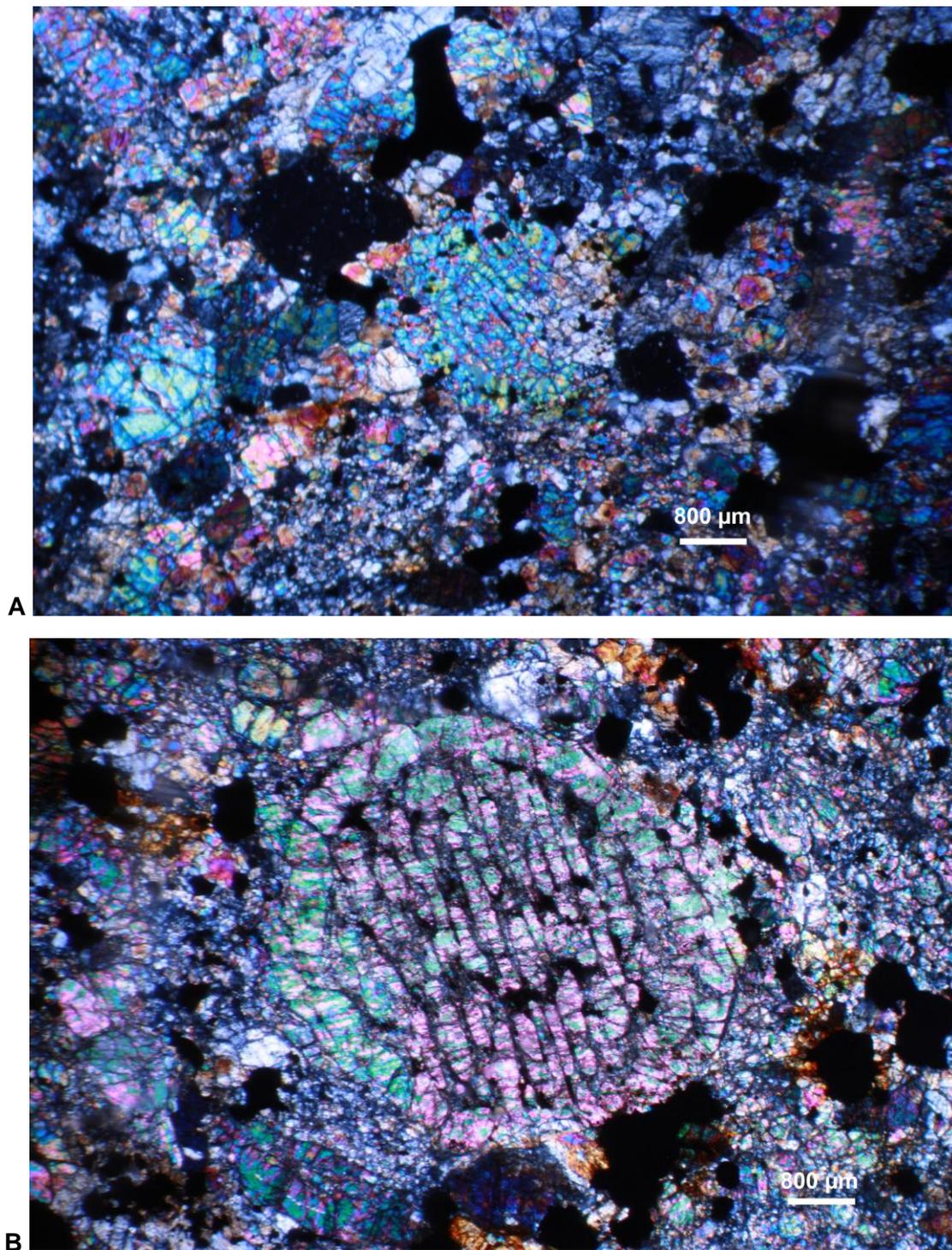


Figura 4 A, B. Micrografías de láminas delgadas con luz transmitida y nicols cruzados. A. Cóndrulo esferoidal de olivino barrado (BO) en matriz granoblástica de grano más fino; B. Detalle del olivino barrado.

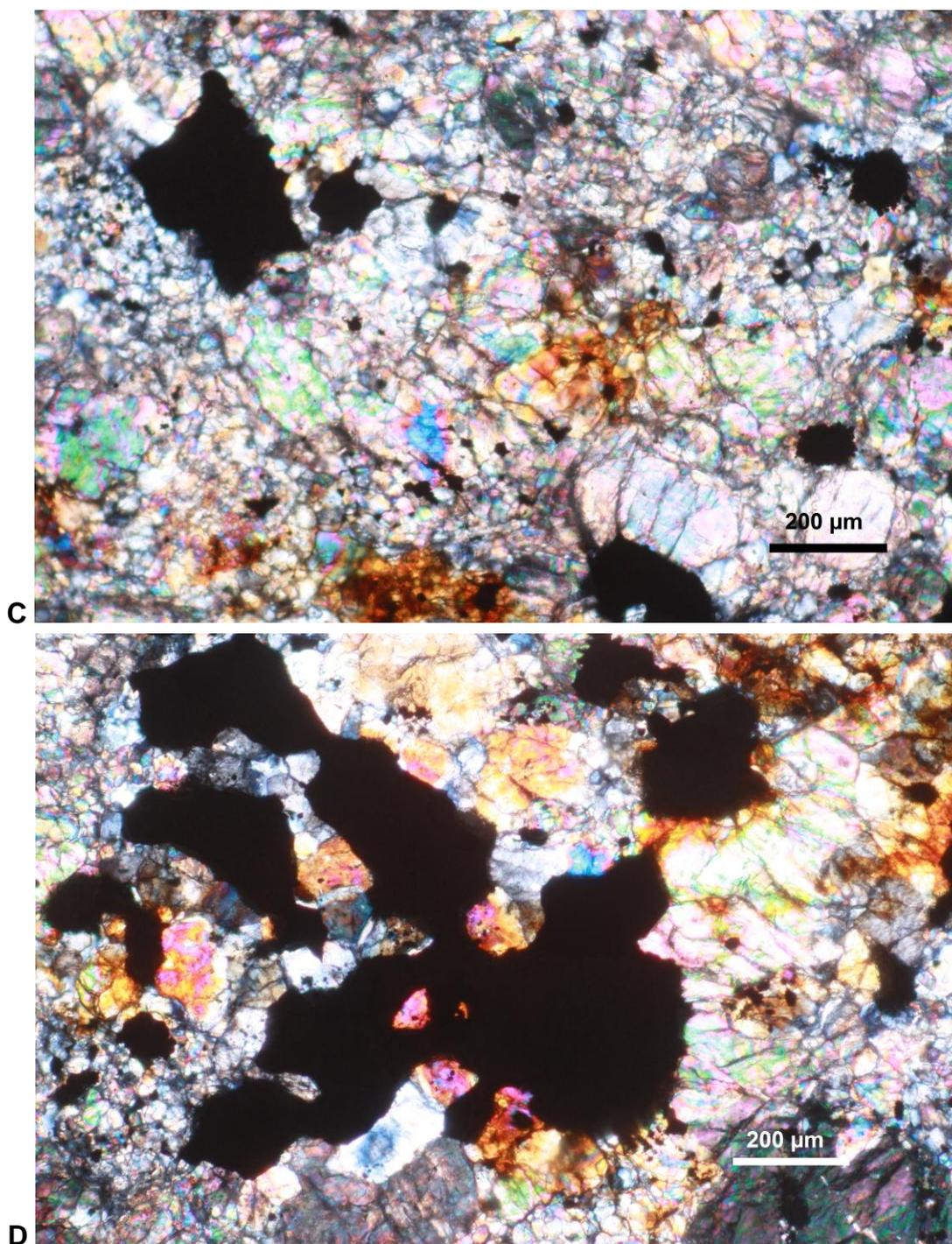


Figura 4 C, D. Micrografías de láminas delgadas con luz transmitida y nicols cruzados. C. Matriz granoblástica fina donde se destacan cristales de olivino (OL), piroxeno (Px) y minerales metálicos (M). D. Detalle de los bordes cóncavos/convexos entre metálico (oscuro) y olivino.

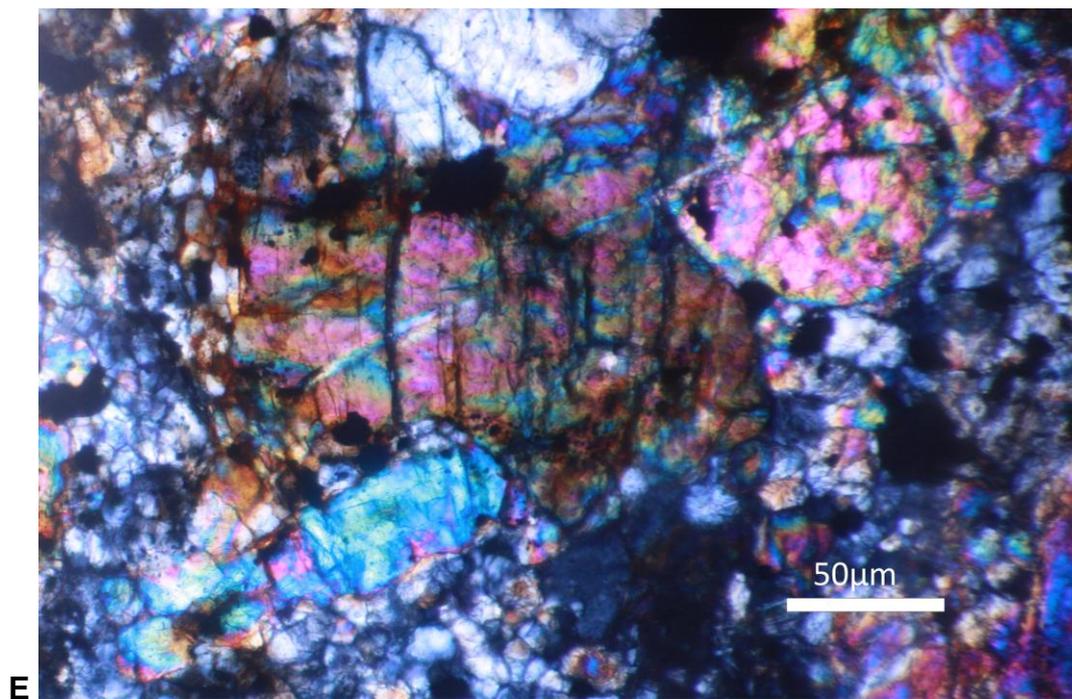


Figura 4 E. Micrografías de láminas delgadas con luz transmitida y nicoles cruzados.
E. Fracturas planares (PDFs) en olivino.

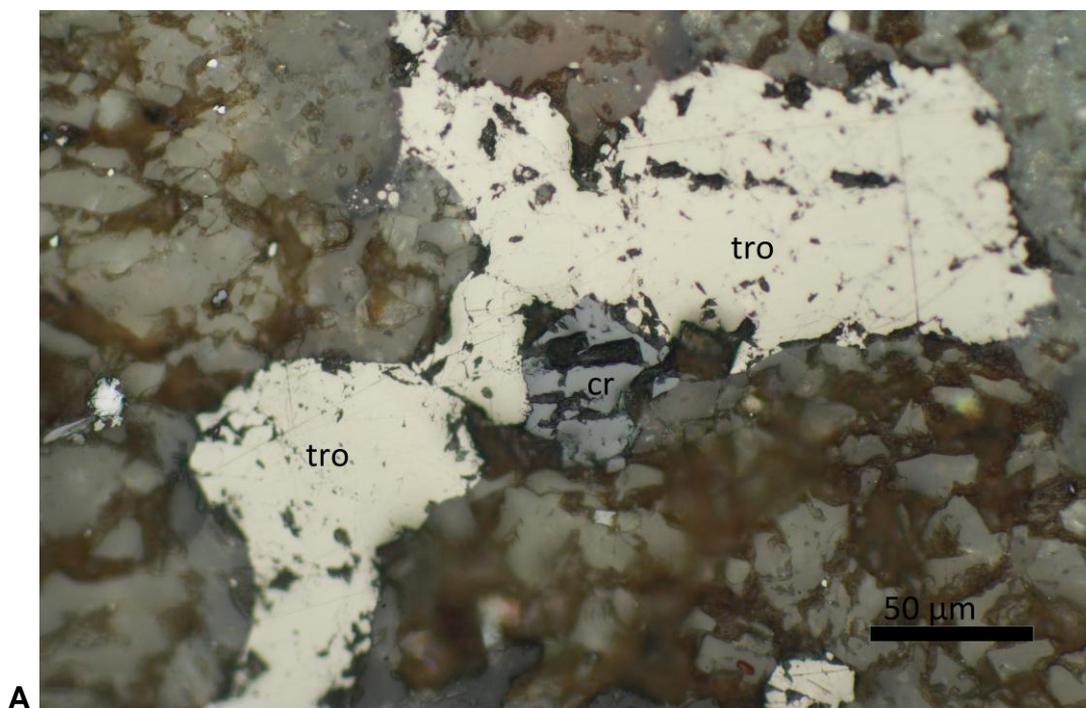


Fig. 5 A. Micrografías al microscopio de luz reflejada de los minerales metálicos identificados en el fragmento Los Jazmines. Diseminaciones de cristales anhedrales de troilita (tr) bordeando a la cromita anhedral (cr) fuertemente cataclastizada (Fig. 2, campo 7).

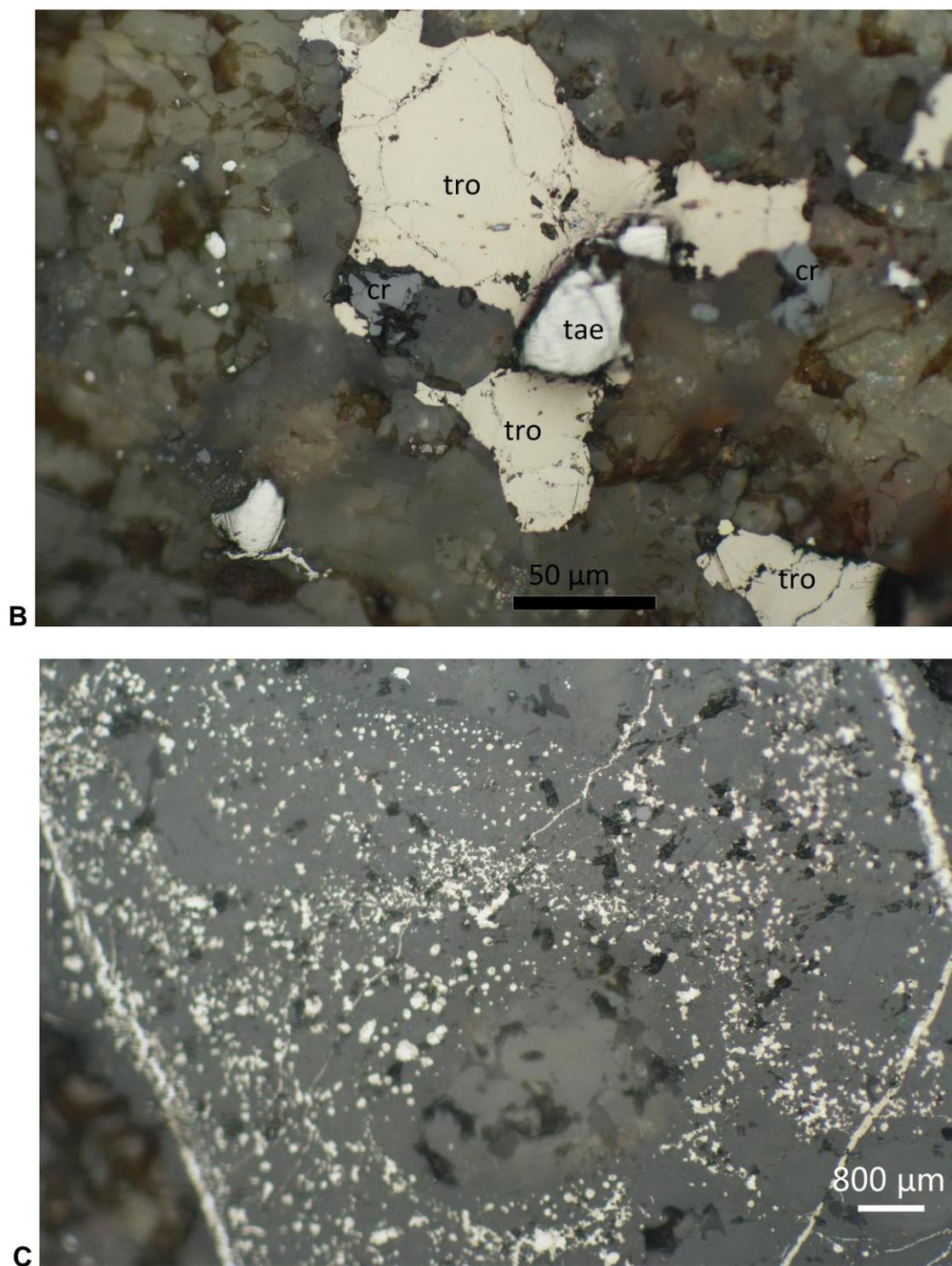


Fig. 5 B, C. Micrografías al microscopio de luz reflejada de los minerales metálicos identificados en el fragmento Los Jazmines. B. Cristales anhedrales de troilita (tr) en contacto con taenita y cromita (Fig. 2, campo 7). C. Cristales anhedrales de troilita (tr) intersectados por pequeñas esferas y vetillas de troilita y taenita. Cóndrulo rodeado por minerales metálicos (Fig. 2, Vena intersticial).

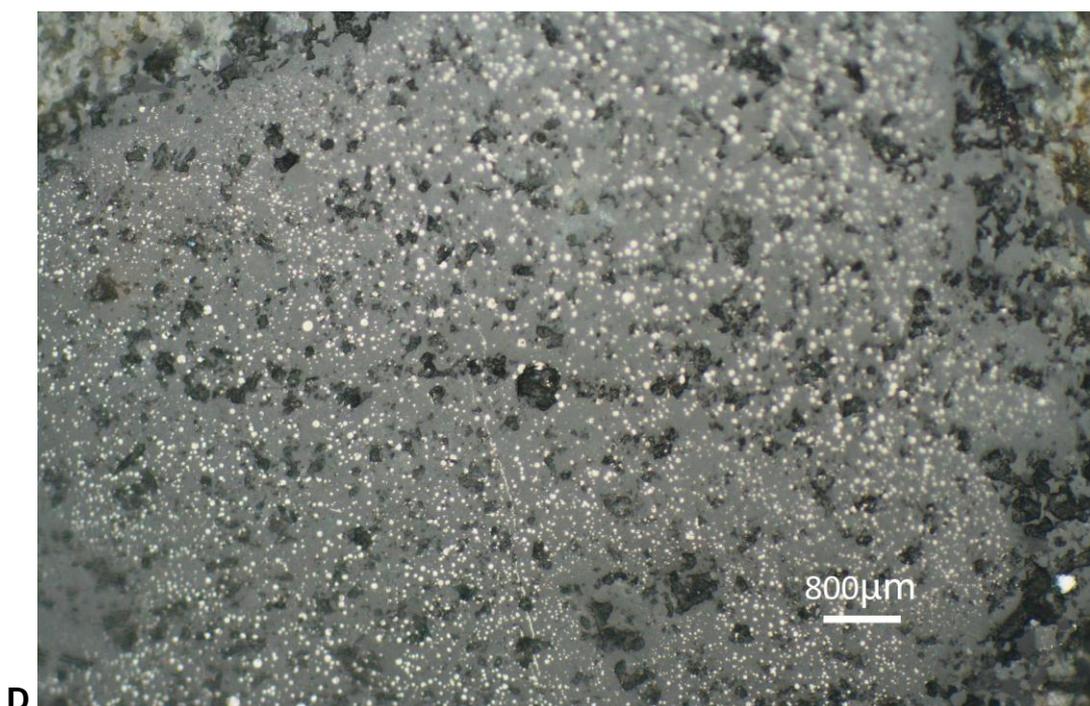


Fig. 5 D. Micrografías al microscopio de luz reflejada de los minerales metálicos identificados en el fragmento Los Jazmines. Diseminaciones esféricas de troilita, en ocasiones entrecrecidas con taenita (Vena intersticial).

COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química semicuantitativa de la muestra se determinó mediante el promedio de ocho análisis de áreas diferentes con el espectrómetro de rayos X del microscopio electrónico. Se apreció el predominio de oxígeno, silicio, hierro y magnesio, con cantidades menores de aluminio, azufre, calcio y sodio. También se detectaron cantidades muy pequeñas de níquel, cromo y potasio. En dos sectores de la muestra, de 200 analizados, se detectaron 50 y 70% de carbono respectivamente.

En general este resultado se asemeja a una roca ígnea ultramáfica, con O (~46.7%), Si (~16.8), Fe (~14.2%), Mg (~12.2%), Al (~1.82%), S (~1.83%), Ca (~1.78%), Na (~1.33%), Ni (~0.57%), Cr (~0.29%) y K (~0.25%). Desde el punto de vista del contenido de elementos principales la muestra estudiada está dentro del rango de las condritas ordinarias (Tabla 1). La comparación de la composición química entre el meteorito Kamargaon (Saikia et al. 2017) y el fragmento Los Jazmines muestra un alto grado de coincidencia desde el punto de vista del contenido de los elementos principales (Tabla 1). La diferencia principal está en el menor contenido de hierro y níquel de la muestra estudiada.

Tabla 1. Composición espectral media de rayos X de las condritas ordinarias (H, L, LL) y del meteorito Kamargaon según Saikia et al. (2017); para comparar con Los Jazmines.

Elemento % Peso	Meteoritos H	Meteoritos L	Meteoritos LL	Kamaragaon L6	Los Jazmines L6
Si	16.9	18.5	18.9	16.8	16.86
Ti	0.06	0.063	0.062	0.07	~
Al	1.13	1.22	1.19	1.28	1.82
Cr	0.366	0.388	0.374	0.382	0.29
Fe	27.5	21.5	18.5	27.2	14.2
Mn	0.232	0.257	0.262	0.280	~
Mg	14	14.9	15.3	14.1	12.27
Ca	1.25	1.31	1.3	1.39	1.78
K	0.64	0.7	0.7	0.72	1.33
Na	0.078	0.083	0.079	0.082	0.25
P	0.108	0.095	0.085	0.15	~
Ni	1.6	1.2	1.02	1.52	0.57
Co	0.081	0.059	0.049	0.066	~
S	2	2.2	2.3	1.93	1.83

RADIOACTIVIDAD

Mediante el Espectrómetro de rayos gamma RS-230 BGO se determinaron los valores que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de las mediciones espectrométricas del fragmento Los Jazmines

	Total [ppm]	Total [cpm]	K [%]	K [cpm]	U [ppm]	U [cpm]	Th [ppm]	Th [cpm]	Dosis (nSv/h)
14456	325.4	1256.2	0.6	151.3	2.6	48.7	1.6	15.3	31.8
14468	322.4	1244.7	0.5	134.5	2.9	54.5	1.9	17.9	32.8
14474	326.5	1260.4	0.5	132.5	2.8	51.9	1.5	14.3	30.9
Promedio	324.8	1253.8	0.5	139.4	2.8	51.7	1.7	15.8	31.8

La comparación con las concentraciones de radioelementos que la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA, 2003) ofrece para las rocas ultramáficas en la Tierra (Tabla 3) indica que los valores de Potasio y Torio se comportan dentro del rango de referencia, mientras que los valores de Uranio son ligeramente más altos. Esta actividad radioactiva es poco significativa como es normal en los meteoritos.

Tabla No.3. Concentraciones de Radioelementos en ultramafitas (IAEA, 2003; Killeen, 1979).

Roca	Potasio (%)		Uranio (ppm)		Torio (ppm)	
Ultramáfica	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango
	0.3	0 – 0.8	0.3	0 – 1.6	1.4	0 -7.5

MINERALOGÍA

En este acápite se caracterizan los minerales presentes en la muestra de Los Jazmines. Para la determinación de los mismos se utilizaron técnicas petrográficas, minerográficas, de microscopía electrónica y espectrometría. Mediante microscopía electrónica con espectrometría de rayos X acoplada se realizaron un total de 212 análisis y 22 espectrometrías Raman, alcanzando los resultados (Tabla 4) que se analizan en los párrafos siguientes. Se observó presencia de material disperso como óxidos y pequeñas cantidades de otros componentes que no se contabilizan en la Tabla.

Tabla 4. Composición mineralógica de la muestra Los Jazmines.

Mineral	Fórmula química	% estimado
olivino (Fo ₇₈ /Fa ₂₂)	(Mg,Fe)(SiO ₄)	~44.7
plagioclasa sódica	Na(AlSi ₃ O ₈)	~13.0
piroxeno (augita)	(Ca,Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆	~12.6
troilita	FeS	~4.47
kamacita	(Fe,Ni)	Muy rara
taenita	(Fe,Ni)	~3.35
cromita	FeCr ₂ O ₄	~0.62

Mineral de magnesio, hierro, oxígeno y silicio

Con un grado de coincidencia del 98.5% con la base de datos de minerales se comprobó mediante espectrometría de rayos X y Raman (Fig. 6) la presencia del olivino. Con 47 análisis químicos en porciones microscópicas del mineral, y la realización de 6 análisis Raman, y teniendo en cuenta el contenido de Mg/Fe y los corrimientos Raman de los picos principales, se encontró que la proporción forsterita/fayalita en la muestra alcanza los valores Fo₇₈/Fa₂₂ (Fig. 6). En el microscopio petrográfico el olivino presenta un relieve alto, es incoloro, tiene fuerte birrefringencia dentro del segundo orden, con las fracturas que lo caracterizan. En cristales subeuhedrales de bordes redondeados está presente en los cóndrulos, en la matriz y como fragmentos dentro de ésta última, alcanzando más de 200 µm (Fig.4, A, B, C).

El clinopiroxeno augita fue detectado con espectrografía de rayos X y confirmado mediante la espectrometría Raman Confocal (Fig. 7). Este mineral ocurre en la matriz, como pequeños cristales subhedrales con extinción oblicua que pueden alcanzar hasta 150 µm, o presentarse como fragmentos que superan los 1000 µm (1.8 mm), con extinción oblicua (36°) a menudo ondulante. Presenta una birrefringencia del segundo orden en tonos naranja a

rojo-violeta, aunque se observan cristales con una birrefringencia más débil, amarillo y hasta gris del primer orden, que debe responder a un corte paralelo a un plano {100}. La clinoenstatita se observa raramente.

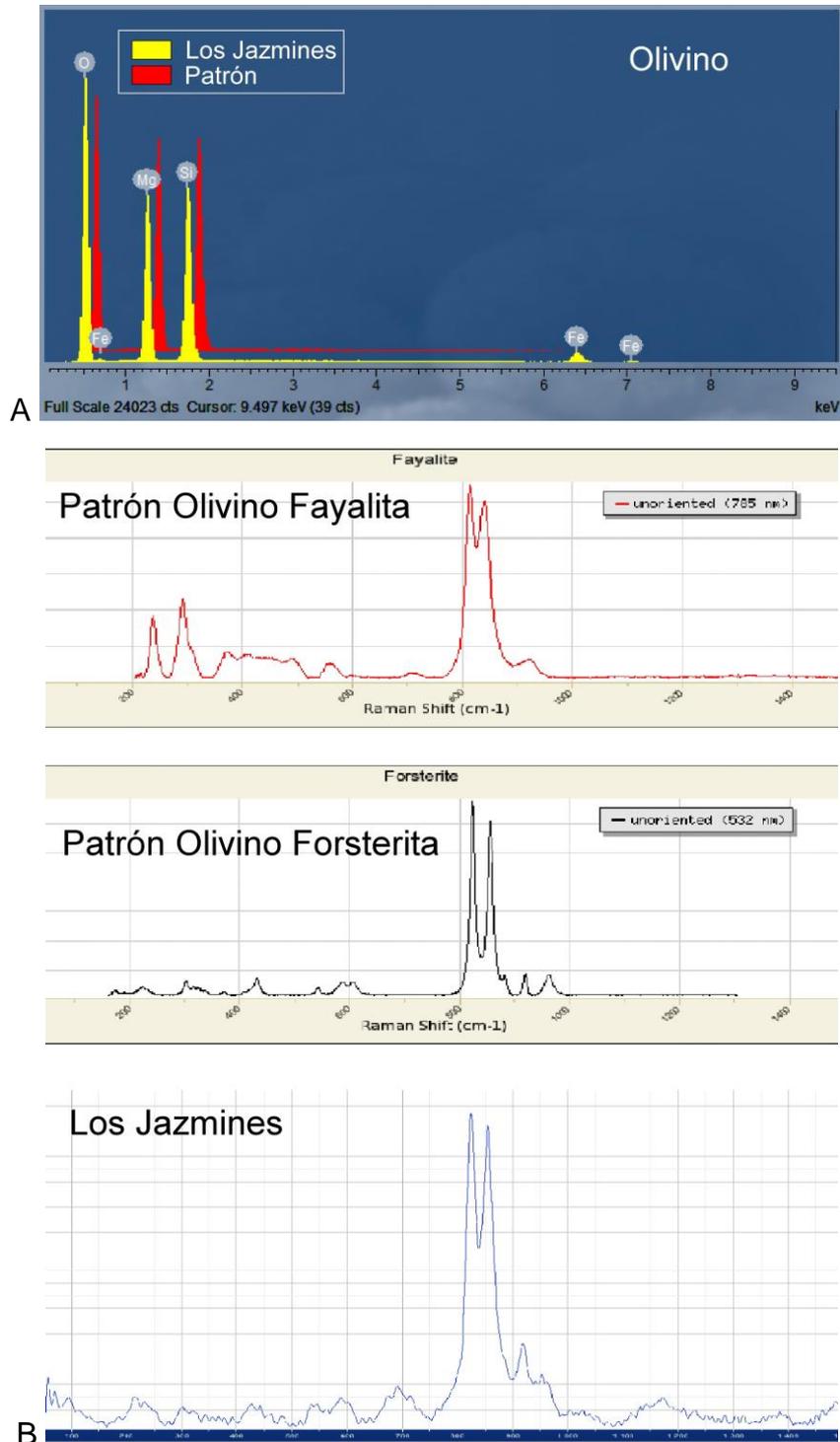


Figura 6. Espectros de la composición del olivino en la muestra de Los Jazmines. A. Espectrometría de Rayos X. B. Espectrometría Raman.

Mineral de sodio, aluminio, silicio y oxígeno.

Con un grado de coincidencia del 98,14% se determinó la plagioclasa sódica (Fig. 8), cuya fórmula $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ corresponde con la albita, la cual se ha reportado en otros meteoritos (Reyes Salas et al. 2010; Van Schmus y Wood, 1967; Van Schmus y Ribbe, 1968; Norton y Chitwood, 2008). La plagioclasa sódica de la muestra Los Jazmines puede ser albita, pero la lingunita tiene su fórmula química idéntica. También pudiera ser kumdykolita, pero según la International Mineralogical Association (IMA) es muy rara. La plagioclasa ocurre en cristales tabulares cortos con tamaño menor de $200\ \mu\text{m}$, a veces maclada, ocupando espacios entre el olivino, el piroxeno y los metálicos.

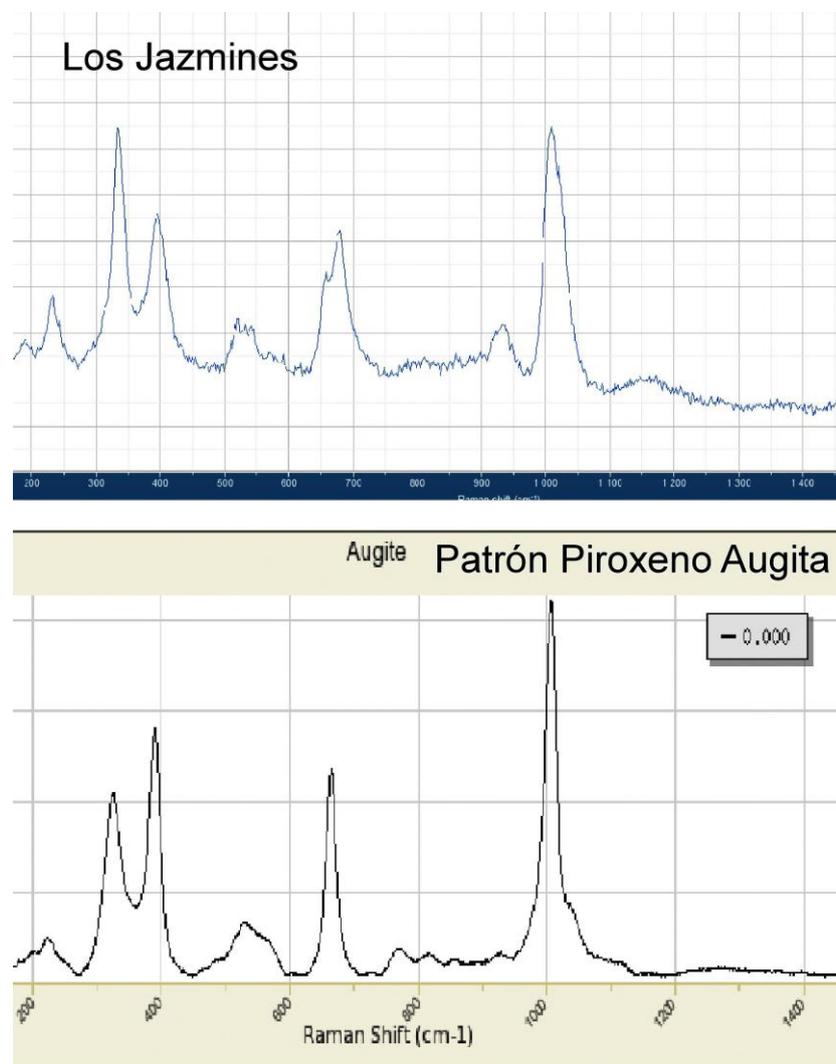


Fig. 7. Espectrometría Raman Confocal del clinopiroxeno augita.

Minerales de hierro

La espectrometría de rayos X permitió detectar dos minerales de hierro, un

sulfuro y otro asociado con Ni. Con un grado de coincidencia del 99,1 % el sulfuro de hierro de la muestra pudiera ser pirrotina, keilita o troilita, que comparten la misma fórmula química (Fig. 8). Sin embargo, los espectros Raman descartaron la pirrotina y la keilita, de modo que se determina la troilita. Esta es de color beige pálido, anisotrópica, fuertemente magnética. Se presenta en dos generaciones que se han denominado I y II: La *troilita I* es de color beige claro, con pleocroismo normal en la troilita, raramente es pleocroica, forma agregados policristalinos anhedrales, en ocasiones fracturados, cuyo tamaño alcanza los 0.8mm. Está diseminada en la matriz no metálica, a veces en contacto con la taenita o bordeando a la cromita (Figs. 5A, B y 10A, C).

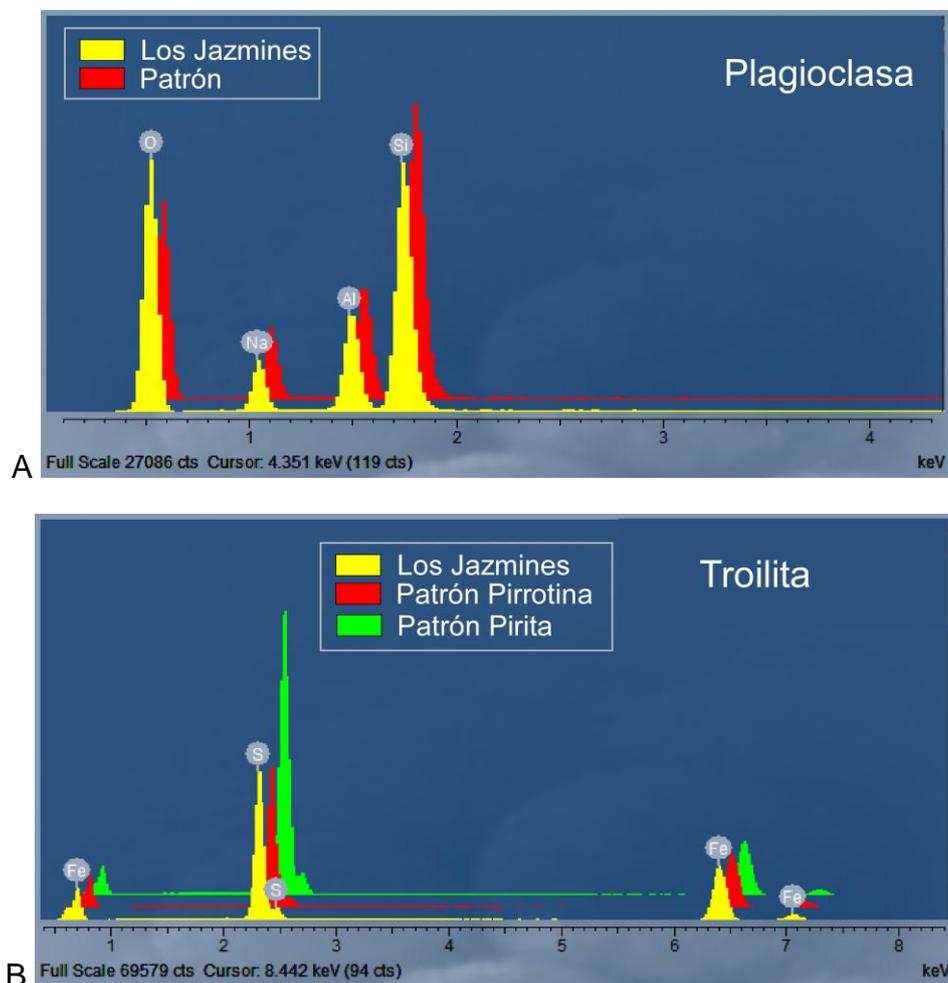


Fig. 8. Espectros de Rayos X de la plagioclasa sódica (A) y la troilita (B). Note que este último mineral es semejante a la pirrotina (aproximadamente FeS) y se distingue de la Pirita pura (FeS_2) por el contenido de azufre.

La *troilita II* aparece en vetillas y diseminaciones submicroscópicas en las zonas de fracturas (Fig. 3, campos 1 a 6). En las vetillas se presenta como

agregados con un estrecho entrecrecimiento de troilita II y taenita II, en ocasiones de forma alternante. Estas vetillas finas a veces cortan los agregados de troilita I formados con anterioridad (Fig. 9, E). La troilita II también se presenta como granos esferoidales submicroscópicos, que no superan los 0.015mm. A veces estas formas esferoidales están fuertemente entrecrecidas con la taenita II (Fig. 5 C, D).

En los análisis espectrales se detectaron aisladas partículas de hierro casi puro (~100%) y en aleación con Ni. Los contenidos de Ni en 48 partículas estudiadas oscilaron entre 7.33% y 28.27%, con 17.08% como promedio. Esto permite identificar el mineral taenita, y solo en una ocasión apareció Kamacita, que tiene contenidos inferiores de Ni (IMA).

La taenita (Fe-Ni) es de color blanco con ligera tonalidad de amarillo muy pálido, la cual se presenta en dos variedades aquí denominadas I y II. La *taenita I* forma granos subhedrales con tamaños que alcanzan los 1,8mm, diseminados en la matriz no metálica (Fig. 5, B). La *taenita II* forma finos entrecrecimientos en las vetillas y en los nódulos de troilita II (Fig. 5, C, D).

Las características texturales de la mineralización y la forma de entrecrecimiento de troilita II y taenita II (Fig. 10), así como su presencia solamente en las venas que separan los campos (Fig. 2), sugiere la formación más tardía de esta mineralización, probablemente relacionada con el metamorfismo de impacto (Fig. 5, C, D).

Minerales de cromo y plomo

La cromita en pequeñas cantidades fue detectada mediante espectrometría de rayos X (Fig. 11 A), en comparación con espinela cromífera que presenta un contenido mayor de Al y Mg respecto a la cromita. En la muestra de Los Jazmines se detectó Ti como impureza. La cromita es de color gris claro, isotrópica, con granos anhedrales muy cataclastizados cuyo tamaño alcanza los 0.25 mm. Los granos aparecen diseminados en la matriz no metálica, en ocasiones bordeados por troilita I (Fig. 9, A, C, Fig.10). El plomo aparece muy raramente como partículas pequeñísimas, pero no se ha podido determinar si es una impureza, contaminación o forma parte de algún mineral (Fig. 9, B).

CONCLUSIONES

Las características espectrales, composicionales y mineralógicas del fragmento Los Jazmines permiten caracterizarlo como una condrita ordinaria del grupo **L**, tipo petrológico **6**, metamorfismo **S4** e intemperismo **W0**. De este resultado se pudiera inferir que el meteorito caído en Viñales, el primero de febrero del 2019, corresponde con ésta denominación, tal como demuestra el contenido del reporte aparecido en la base de datos de la Meteoritical Society (Ver anexo

1). Teniendo en cuenta la diversidad de texturas observadas en los distintos campos que constituyen el fragmento Los Jazmines, pudiera resultar que aparezcan pequeñas diferencias composicionales y texturales entre los diversos fragmentos recuperados.

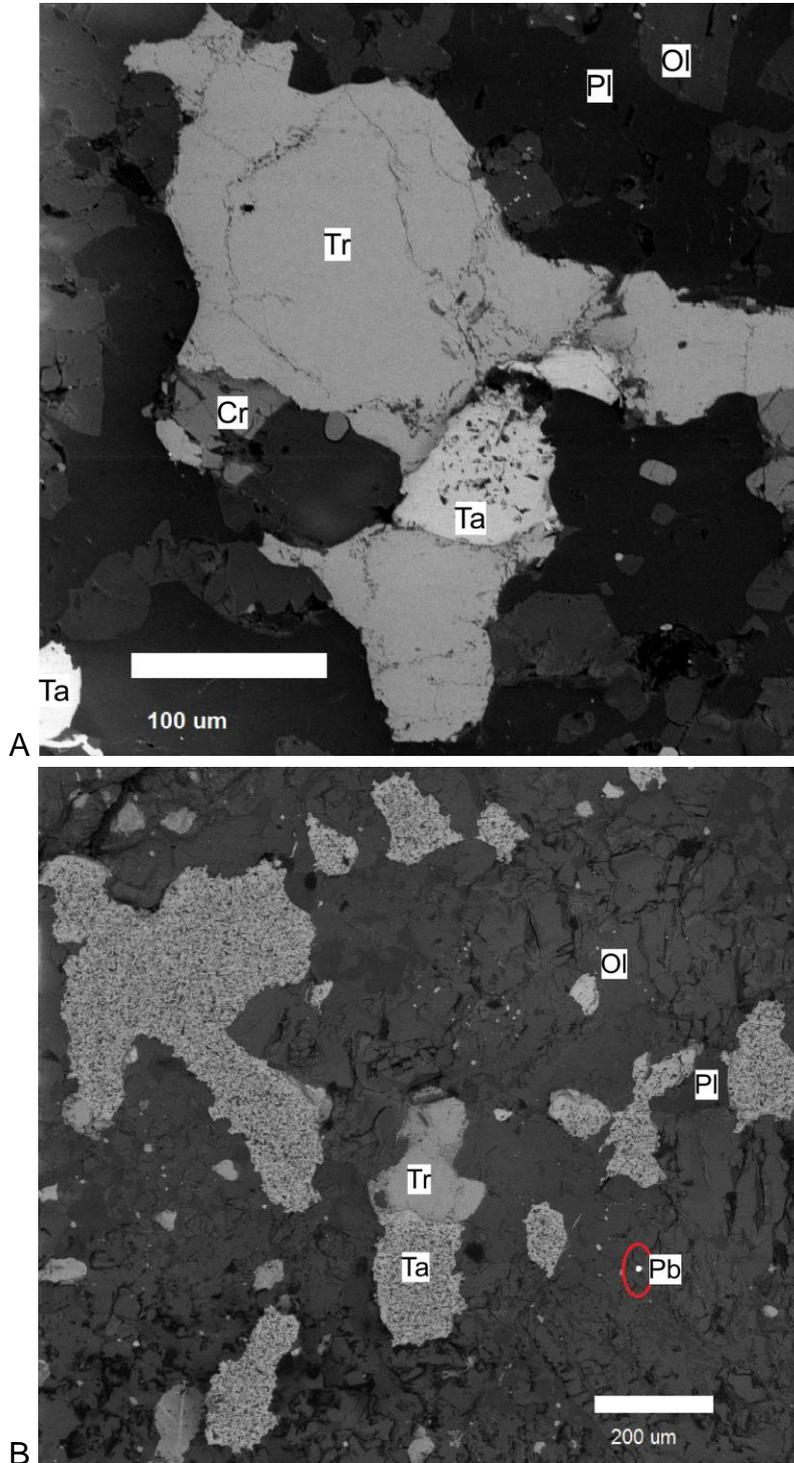


Fig. 9 A, B. Micrografías al microscopio electrónico de algunos minerales identificados en el fragmento Los Jazmines. A. (Fig. 2, clastos); B. (Fig. 2, clasto mayor). Leyenda: Ol-olivino, PL- plagioclasa, Tr- troilita, Ta- taenita, Cr- cromita, Pb- Mineral de plomo.

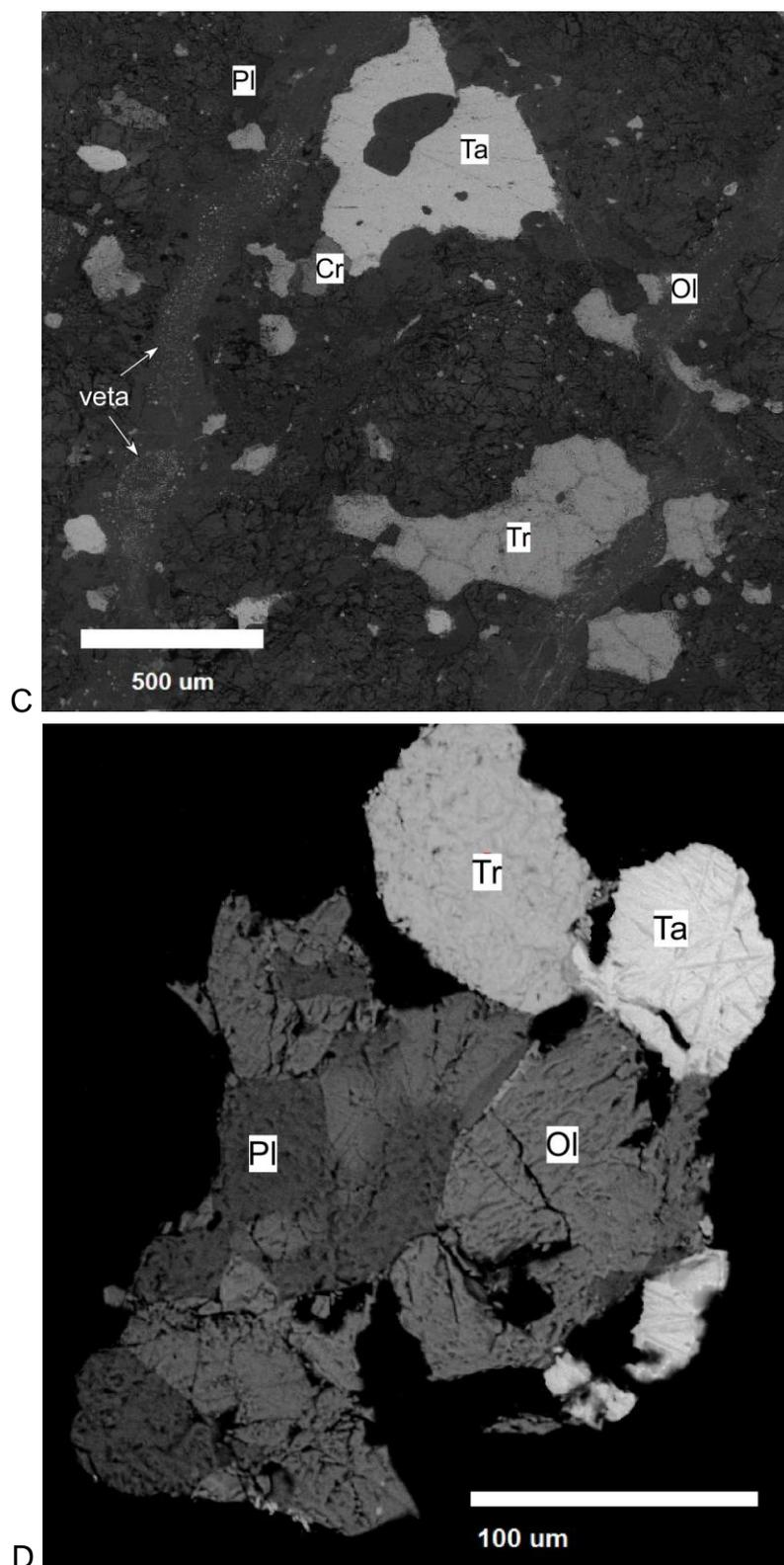


Fig. 9 C, D. Micrográficas al microscopio electrónico de algunos minerales identificados en el fragmento Los Jazmines. C. veta-bolsón relleno de minerales pequeños y fundidos de metal y silicatos; D. Ocurrencia simultánea de cuatro minerales (Fig. 2, clasto mayor). Leyenda: Ol-olivino, Pl- plagioclasa, Tr- troilita, Ta- taenita, Cr- cromita.

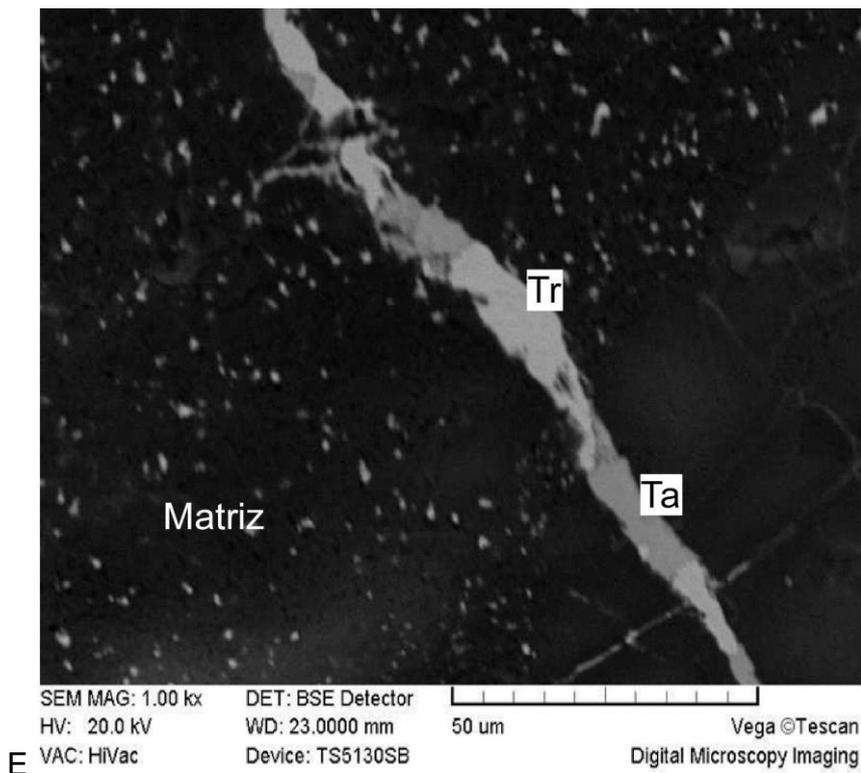


Fig. 9 E. Micrografías al microscopio electrónico de algunos minerales identificados en el fragmento Los Jazmines. Veta con minerales metálicos cortando matriz donde se observan metales dispersos. Leyenda: Tr- troilita, Ta- taenita.

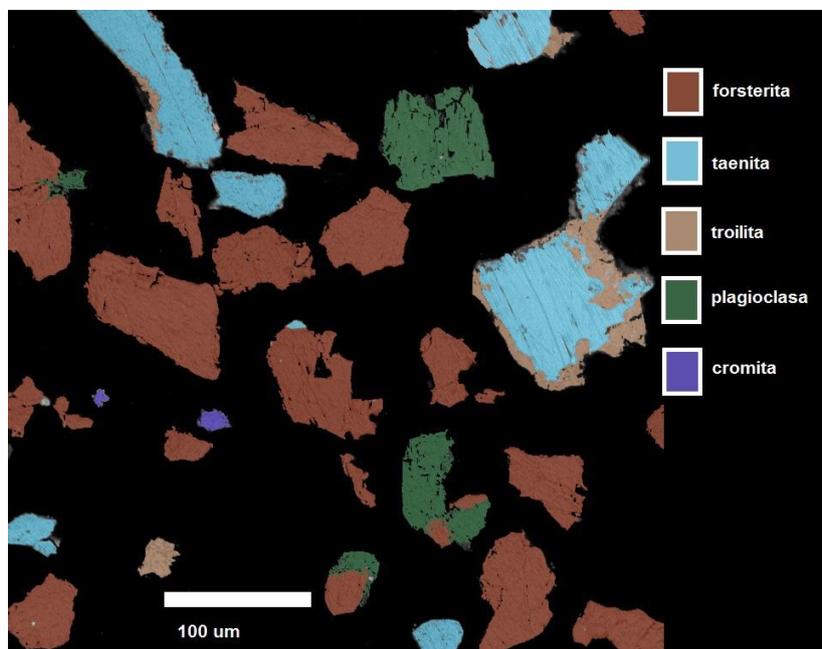


Fig. 10. Micrografía con microscopia electrónica de partículas de un concentrado con líquidos densos de una muestra del fragmento Los Jazmines. Colores artificiales. Observe las interrelaciones entre forsterita y plagioclasa, forsterita y taenita, y entre taenita y troilita.

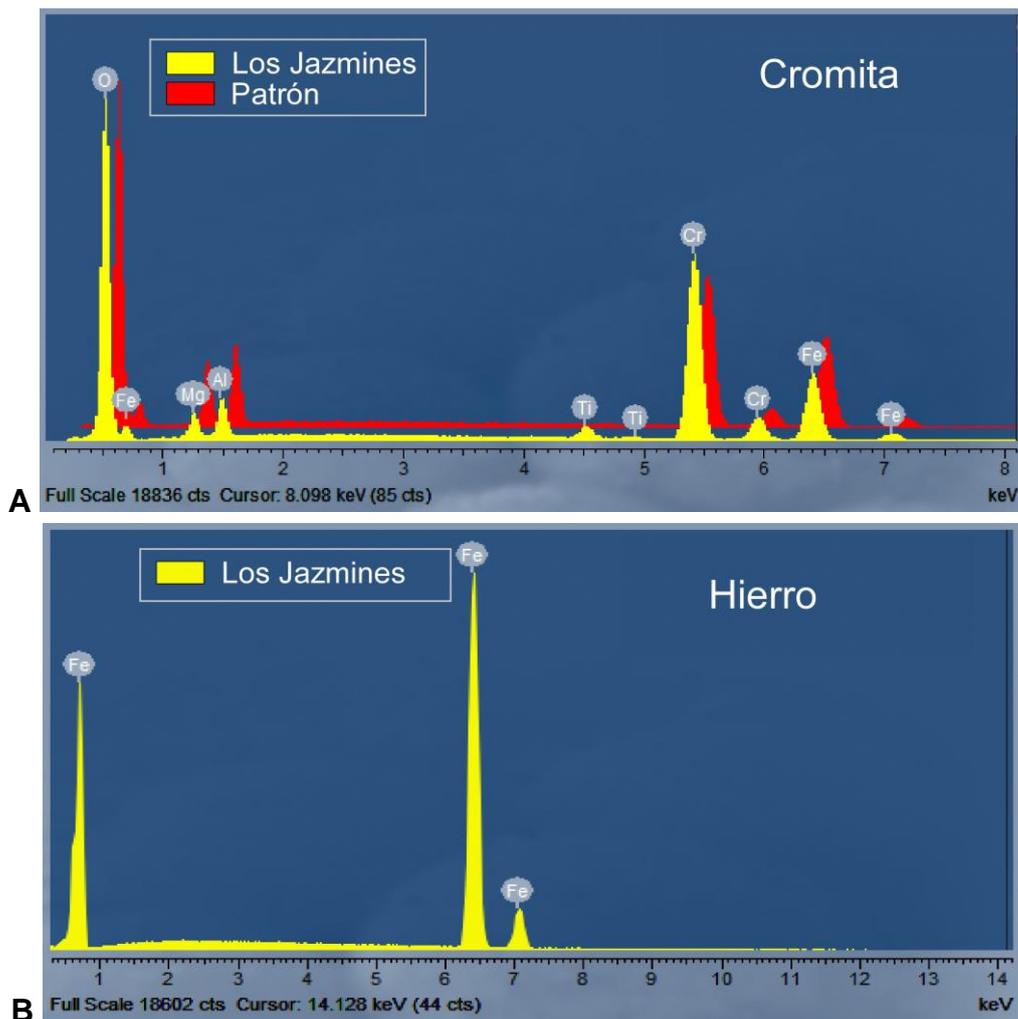


Fig. 11. Espectro de Rayos X de: A. cromita comparada con una espinela cromifera que se diferencia por su mayor contenido de Mg y Al. Note una impureza de Titanio (Ti); B. Hierro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores están muy agradecidos al viñalero Adonis Martínez García quien donó el fragmento objeto de este estudio. A Luis Gómez Narbona, director del Instituto de Geología y Paleontología/Servicio Geológico Nacional, a Marcela Figueredo Frías, directora del Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica y directivos de otras instituciones que pusieron a disposición de los investigadores sus laboratorios y les permitieron ocupar un tiempo no previsto para dedicarlo a este trabajo. A Roberto González Valdéz que realizó la determinación del peso específico. También a los especialistas Walfrido Alfonso San Jorge e Irelys Matos Oliva del IGP/SCG que realizaron las determinaciones de Espectrometría de Rayos Gamma. Muy en especial estamos agradecidos a Millarda Valenzuela de la Universidad Católica del Norte, Chile; a José García del Museo Canario de Meteoritos en España y a Julio Cesar Saucedo Morales del Departamento de Física, Universidad de Sonora, México, por sus útiles consejos y lectura crítica del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2003). *Guidelines for radio-element mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363, Vienna. Austria 179 p.
- Bennett M.E. III y McSween H.Y. Jr. (1996). Revised model calculations for the thermal histories of ordinary chondrite parent bodies. *Meteoritics*, 31, 783–792.
- Brearley, A. J., Jones, R. H., 1998, Chondritic meteorites, in Papike J.J., Planetary materials. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, 36, 3.1-3.398, Washington D.C.
- Ceballos Izquierdo, Y., (2019). Recuento de los meteoritos reportados en Cuba y bibliografía sobre el tema. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. Vol. 18, No. 1.
- Huss G.R., Rubin A.E., Grossman J.N. (2006). Thermal metamorphism in chondrites. In Lauretta D.S. y McSween, H.Y., *Meteorites and the Early Solar System II*. pp. 567-586. Univ. of Arizona, Houston.
- Killeen, P.G. (1979). Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration - application and interpretation, p. 163–230; in Hood, P.J., *Geophysics and Geochemistry in Search for Metallic Ores*, Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, 811 p.
- Muñoz Espadas, M. J., (2003). *Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y LL5*. Tesis Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas, Departamento de Cristalografía y Mineralogía, 324 p.
- Norton, O. R., Chitwood, L. A. (2008). *Field Guide to Meteors and Meteorites*. Springer-Verlag London Limited 2008, ISBN 978-1-84800-156-5
- Pittarello, L., Baert, K., Vinciane Debaille, V., Claeys, P., (2015). *Screening and classification of ordinary chondrites by Raman spectroscopy*. <https://doi.org/10.1111/maps.12506>.
- Reyes-Salas, A. M., Sánchez-Rubio, G., Altuzar-Coello, P., Ortega-Gutiérrez, F., Flores-Gutiérrez, D., Cervantes-de la Cruz, K., Reyes, E., Linares, C., (2010). Petrography and mineral chemistry of Escalón meteorite, an H4 chondrite, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 27, núm. 1, p. 148-161
- Rubin A. E., Ulf-Møller F., Wasson J. T., and Carlson W. D. (2001). The Portales Valley meteorite breccia: Evidence for impact-induced melting and metamorphism of an ordinary chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 323–342.

- Saikia, B.J., Parthasarathy, G., Borah, R.R., Satyanarayanan, Borthakur, R., Chetia, P., (2017). Spectroscopy and Mineralogy of a fresh meteorite fall Kamargaoan (L6) condrite. *Proceeding of the Indian National Academy*. 83, 4, 941-948.
- Scott, E.R., Taylor, G.J., Keil, K., (1986), Accretion, metamorphism and brecciation of ordinary chondrites: Evidence from petrologic studies of meteorites from Roosevelt County, New Mexico, *in Proceedings of the 17th Lunar and Planetary Science Conference*.
- Stöffler, D., Keil, K., Scott, E.R.D., (1991), Shock metamorphism of ordinary chondrites: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- Van Schmus, W.R. y Wood, J.A. (1967). A chemical-petrological classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 31, 747-765.
- Vázquez Torres, M., y Pinos Torga, R.M. 2019. El meteorito de Viñales, campo de dispersión y daños ocasionados, *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. Vol. 18, No. 1.
- Weisberg, M. K., Prinz, M., Clayton, R.N., Mayeda, T.K., Sugiura, N., Zashu, S. y Ebihara, M. (2001). A new metal-rich chondrite grouplet. *Meteoritics & Planetary Science*. 36, 3, 401-418.
- Weisberg, M. K., McCoy, T.J., Krot, A.N., (2006). In Lauretta D.S. y McSween, H.Y., *Meteorites and the Early Solar System II.*, University of Arizona Press, Tucson, 943 pp., p.19-52.
- Wlotzka, F., (1993), A weathering scale for the ordinary chondrites. *The Meteorical Bull.* No. 75.

Autor principal

Manuel A. Iturralde Vinent, Académico de Mérito de la Academia de Ciencias de Cuba.

iturralde@ceniai.inf.cu

Recibido: 9 de marzo de 2019

Aprobado: 28 de marzo de 2019

Anexo 1.

METEORITO VIÑALES, ENTRADA EN LA BASE DE DATOS DE LA METEORITICAL SOCIETY

Disponible en:

<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?sea=Vi%C3%B1ales&sfor=names&ants=&nwas=&falls=&valids=&stype=contains&lrec=50&map=ge&browse=&country=Cuba&rt=name&categ=All&mblis=All&rect=&phot=&strewn=&snew=0&pnt=Normal%20table&code=69213>

Viñales	
Basic information	<p>Name: Viñales This is an OFFICIAL meteorite name.</p> <p>Abbreviation: There is no official abbreviation for this meteorite.</p> <p>Observed fall: Yes, confirmed fall</p> <p>Year fell: 2019</p> <p>Country: Cuba</p> <p>Mass:  50 kg</p>
Classification history:	<p>Recommended: L6 [explanation]</p> <p>This is 1 of 10781 approved meteorites (plus 3 unapproved names) classified as L6. [show all]</p> <p>Search for other: L chondrites, L chondrites (type 4-7), Ordinary chondrites, and Ordinary chondrites (type 4-7)</p>
Comments:	Approved 27 Mar 2019
Writeup 	<p>Writeup from MB 108:</p> <p>Viñales 22°37.17'N, 83°44.57'W Pinar del Rio, Cuba Fall: 2019 Feb 01 Classification: Ordinary chondrite (L6)</p> <p>History: A bright bolide accompanied by loud sonic booms flew across the province of Pinar Del Rio, Cuba, at 1:17 pm local time (18:17:10 UTC) on 1 February 2019. A long smoke trail was also observed. The residents thought a plane had crashed, as they heard explosions and then ground rumbling lasting 15 to 20 ". A</p>

meteorite shower fell on Vinales Valley, a national monument since 1978 and a UNESCO world heritage site. The area is covered by a forest and fields. The first and some of the largest stones were collected near the monument "Mural of Prehistory" by artist Leovigildo Gonzalez Morillo. Others were discovered in and around Viñales and throughout the Viñales Valley. Some of the meteorite individuals penetrated the ground, one of them broke through an asphalt road, and many were recovered from rooftops.

Physical characteristics: Hundreds of individual samples were collected by the local residents. The stones are covered by black fusion crust with reddish smears of a laterite clay. The substance of the meteorite of light gray color can be seen in small areas of the broken crust. The masses of stones are in a range 2 to 1100 g. In total, about 50-100 kg of the meteorite were collected.

Petrography: The interior is light-colored; silicates are transected by dark, pseudotachylite-like shock veins. The rock is highly recrystallized; chondrule margins are difficult to discern.

Recognizable chondrule types include POP, PO and BO, ranging up to ~1 mm in diameter. The meteorite samples contain the several vol% of black inclusions of melt rock. Metal grains range in size up to about 700 μm . The rock exhibits moderate silicate darkening. Chromite grains are moderately to extensively fractured. Some troilite grains and some kamacite grains are polycrystalline. A few kamacite grains contain small rounded grains of troilite within them. Metallic Cu was not observed. There are several small chromite-plagioclase assemblages and some olivine grains contain small chromite veinlets. The shock veins range to more than 1 cm in length and are typically 20 μm to 150 μm wide. The veins contain major silicate and small blebs of metallic Fe-Ni, and to a lesser extent, troilite; these opaque blebs are typically 1-3 μm in diameter. Also present in the veins are cellular metal-troilite veinlets 10-30 μm in length. Elongated aggregates of chromite occur alongside portions of some shock veins. Slabs of Viñales show intersecting dark shock veins, anastomosing veins, and a few quasi-circular melt concentrations where veins intersect. Coarse metal grains are heterogeneously distributed in some samples – some regions of these samples have abundant coarse metal; other regions have none. Near the dark fusion crust, numerous thin veinlets of troilite surround and penetrate fractures within silicate grains. Magnetic susceptibility (J. Gattacceca, *CEREGE*): $\log \chi (\times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}) = 4.93$ measured on a 18 g sample.

Geochemistry: Mineral compositions and geochemistry: (Borisovsky S. E., *IGEM*; A. Rubin, *UCLA* and L. Garvie, *ASU*) Olivine, $\text{Fa}_{24.7 \pm 0.3}$ (N=15, *IGEM*), $\text{Fa}_{24.6 \pm 0.4}$ (n=23, *UCLA*); low-Ca pyroxene, $\text{Fs}_{21.0 \pm 0.4} \text{Wo}_{1.5 \pm 0.3}$ (N=21, *UCLA*),

	<p>$\text{Fs}_{20.2\pm 0.3}\text{Wo}_{1.6\pm 0.2}$ (N=15, <i>IGEM</i>); other minerals characterized by <i>UCLA</i> and <i>ASU</i> include diopside ($\text{Fs}_{8.1\pm 0.1}\text{Wo}_{44.8\pm 0.6}$; n=5), plagioclase (which has an average size of $\sim 80\ \mu\text{m}$; $\text{Ab}_{90.0\pm 0.5}\text{Or}_{1.8\pm 1.2}$; n=14), chromite, kamacite ($6.6\pm 0.6\ \text{wt.}\% \text{Ni}$; $0.89\pm 0.12\ \text{wt.}\% \text{Co}$), troilite (containing $0.7\text{-}0.42\ \text{wt.}\% \text{Ni}$), taenite, and accessory tetrataenite, merrillite and chlorapatite. Oxygen isotopes (K. Ziegler, <i>UNM</i>): $\delta^{18}\text{O}=4.38, 4.55, 4.69$; $\delta^{17}\text{O}=3.39, 3.50, 3.57$; $\Delta^{17}\text{O}=1.08, 1.09, 1.09$ (all ‰).</p> <p>Classification: (Dr. C. Efrén Jaimez Salgado; IGA, Havana, Cuba; C. A. Lorenz, <i>Vernad</i>.) Ordinary chondrite (L6), Weathering grade is W0, Shock stage is S3 (<i>Vernad</i>) or S4 (<i>UCLA</i>).</p> <p>Specimens: The individual sample of 148 g and one transparent-polished section are deposited in <i>Vernad</i>; 22 g, <i>UCLA</i>; 18 g, <i>CEREGE</i>; 8 individual samples of total mass 2.31 kg are on deposit in Institute of Geophysics and Astronomy (IGA), Havana, Cuba. Large specimen masses are also held by John Higgins, <i>MFarmer</i>, and <i>DPitt</i>.</p>	
<p>Data from: MB108 Table 0 Line 0:</p>	<p>State/Prov/County: Origin or pseudonym: Date: Latitude: Longitude: Mass (g): Pieces: Class: Shock stage: Weathering grade: Fayalite (mol%): Ferrosilite (mol%): Wollastonite (mol%): Magnetic suscept.: Classifier: Type spec mass (g): Type spec location: Main mass: Comments:</p>	<p>Pinar del Rio Vinales Valley 2019 Feb 01 22°37.17'N 83°44.57'W 50000 many L6 S3 W0 24.7±0.3 (N=15) 20.2±0.3 (N=15) 1.6±0.2 (N=15) 4.93 Dr. C. Efrén Jaimez Salgado, IGA; C. A. Lorenz, Vernad; A. Rubin, UCLA; L. Garvie, ASU 148 Vernad Institute of Geophysics and Astronomy, Havana, Cuba Submitted by Lorenz C. A., Vernad</p>

Plots:	O isotopes:
Institutions and collections	<p>ASU: Center for Meteorite Studies, Arizona State University, Tempe, Arizona 85287-1404, United States; Website (institutional address; updated 14 Jan 2012)</p> <p>CEREGE: CEREGE BP 80 Avenue Philibert, Technopole de l'Arbois 13545 Aix-en-Provence Cedex 4 France, France (institutional address; updated 29 Oct 2018)</p> <p>UCLA: Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, United States (institutional address; updated 17 Oct 2011)</p> <p>UNM: Institute of Meteoritics MSC03 2050 University of New Mexico Albuquerque NM 87131-1126 USA, United States; Website (institutional address; updated 12 Feb 2015)</p> <p>Vernad: Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russia (institutional address; updated 21 Feb 2016)</p> <p>DPitt: Darryl Pitt, 225 West 83rd Street, New York, NY 10024, United States; Website (private address)</p> <p>MFarmer: Michael Farmer, P.O. Box 86059, Tucson, AZ 85754-6059, United States; Website (private address)</p> <p>IGEM: Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Staromonetny Per., 35, Moscow, 119017, Russia (institutional address; updated 16 Dec 2010)</p>
Catalogs:	
References:	<p>Published in Meteoritical Bulletin, no. 108, in preparation (2019)</p> <p>Find references in NASA ADS: </p> <p>Find references in Google Scholar: </p>
<p>Geography:</p> 	<p>Coordinates: Recommended: (22° 37' 10"N, 83° 44' 34"W)</p> <p>Statistics: This is the only approved meteorite from Pinar del Rio, Cuba</p>