

Caracterización petrográfica y clasificación textural-química de los meteoritos mexicanos

Juanita de Ángeles y Toluca

Gabriel Julian Ariza Benavides

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

Director:

Alfredo Victoria Morales

Ingeniero Geólogo

Codirector:

Julian David De Bedout Ordoñez

Geólogo M.Eng



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mis padres, Edda y Néstor, a quienes dedico esto, son los pilares de mi vida y quienes me han convertido en la persona que soy.

A mi hermano Daniel, el cual me brindó su apoyo incondicional y quien ha sido siempre un ejemplo a seguir.

A mi nonito, por quererme tanto y brindarme todo su apoyo durante toda mi vida.

A mi novia Angela, por ser mi complemento, mi mejor amiga y la persona más especial e incondicional conmigo durante estos años.

A mis amigos y compañeros de la universidad, por compartir juntos esta bonita etapa y haberla llenado de momentos que guardaré por siempre conmigo.

Gabriel Julian Ariza Benavides

Agradecimientos

A mi director, el profesor Alfredo Victoria Morales a quien conocí en el año 2019 en mi intercambio en la UNAM y el cual confió en mí desde el momento que le propuse hacer este proyecto y me brindó todo su apoyo, su conocimiento y su tiempo para poder concluir satisfactoriamente con éste trabajo aún desde la distancia y estaré eternamente agradecido por ello.

A mi codirector, el profesor Julian De Bedout por la ayuda brindada y las constantes recomendaciones para generar un trabajo de una muy alta calidad técnica y estética. Así mismo, por todo el apoyo recibido de su parte en los diferentes proyectos en los cuales me he embarcado y que han salido exitosos gracias a su colaboración.

A la Dra. Margarita Reyes Salas y a Sonia Ángeles, las cuales muy amablemente nos brindaron la posibilidad de usar el Microscopio Electrónico de Barrido del Instituto de Geología de la UNAM para realizar los análisis SEM-EDS.

Al señor Eduardo Gómez por la toda la colaboración brindada, por su interés en realizar parte de este proyecto y por aportar su conocimiento y experiencia en meteoritos.

A los profesores tanto de la UIS como de la UNAM por el conocimiento compartido durante estos 5 años de estudio.

A mis amigos y compañeros con los cuales compartí múltiples experiencias tanto en el aula como en los laboratorios y en el campo y en especial a Juan Pablo Jaimes cuyos gustos por las mismas áreas de la geología nos han embarcado en tantos proyectos en común y por sus críticas constructivas a este trabajo.

Contenido

Introducción	13
1. Planteamiento del problema.....	14
2. Justificación	15
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo general.....	16
3.2 Objetivos específicos	16
4. Localización y descripción de los hallazgos	17
5. Metodología	18
6. Antecedentes	20
7. Marco Teórico.....	21
7.1 Clasificación de los meteoritos	21
7.2 Las condritas	23
7.2.1 Condritas Ordinarias (OC):.....	25
7.2.2 Condritas Carbonáceas (C):	26
7.2.3 Condritas Enstatíticas (E):	28
7.2.4 Condritas Rumuruti (R):	29
7.2.5 Condritas Kakangari (K):.....	29
7.2.6 Parámetros de clasificación secundaria	30
7.3 Meteoritos No Condriticos:.....	35
7.3.1 Acondritas Primitivas:	36
7.3.2 Acondritas Diferenciadas:.....	37

7.3.3 Metal-rocosos o siderolíticos (Stony-irons):.....	40
7.3.4 Meteoritos Metálicos (irons):.....	41
8. Meteoritos en Latinoamérica	45
9. Técnicas de Estudio	48
9.1 Microscopía Óptica de Luz Transmitida y Luz Reflejada	48
9.2 Microscopía Electrónica de Barrido con acoplado a un Espectrómetro de Energía Dispersiva De Rayos X (SEM-EDS)	52
9.3 88Acidificación para revelar la estructura Widmanstätten en meteoritos metálicos.....	55
10. Resultados	57
10.1 JUANITA DE ÁNGELES	57
10.1.1 Petrografía y Mineragrafía.....	57
10.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS).....	64
10.2 TOLUCA	74
10.2.1 Mineragrafía.....	74
10.2.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS).....	77
10.2.3 Estructura Widmanstätten.....	81
11. Discusión.....	83
12. Conclusiones	84
13. Recomendaciones	86
Referencias Bibliográficas	87

Lista de tablas

Tabla 1. Esquema de clasificación de las condritas ordinarias (OC) y Enstatíticas (E) en base a su contenido de hierro.	26
Tabla 2. Esquema de clasificación petrológica de Van Schmus y Wood, 1967.	31
Tabla 3. Etapas progresivas de metamorfismo de choque en condritas ordinarias.	32
Tabla 4. Clasificación estructural de los meteoritos metálicos y su relación con los modernos grupos químicos.	44
Tabla 5. Meteoritos en Latinoamérica.	46
Tabla 6. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 1.	65
Tabla 7. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 2.	66
Tabla 8. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3.	68
Tabla 9. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 4.	69
Tabla 10. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 5.	71
Tabla 11. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 6.	72
Tabla 12. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 7.	73

Tabla 13. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 1.....	78
Tabla 14. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 2.....	80
Tabla 15. Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 3.....	81
Tabla 16. Mediciones de espesor de banda de kamacita.....	82

Lista de figuras

Figura 1. Esquema simplificado de los sitios de hallazgo de los meteoritos	17
Figura 2. Esquema general de las etapas principales del presente proyecto.....	19
Figura 3. Clasificación de los meteoritos basado en su composición química, mineralogía, texturas y procedencia.....	21
Figura 4. Tipos de meteoritos	22
Figura 5. Esquema de clasificación de los meteoritos condriticos	25
Figura 6. Tipos de texturas en cóndrulos.....	34
Figura 7. Tipos de acondritas o meteoritos no condriticos.....	35
Figura 8. Formación de la estructura Windmännstatten	43
Figura 9. Representación logarítmica de las relaciones:(a) Ge vs. Ni y (b) Ir vs. Ni de todas las composiciones de los meteoritos metálicos.....	45
Figura 10. Mapa de Meteoritos en Latinoamérica.....	47
Figura 11. Tipos de microscopios compuestos de luz polarizada.....	48
Figura 12. Esquema del recorrido de la luz en un microscopio petrográfico	49
Figura 13. Representación del comportamiento de la luz en un microscopio de luz transmitida en polarizadores cruzados.....	50
Figura 14. <i>Microscopio Petrográfico Zeiss Primotech y una sección delgada pulida del meteorito Juanita de Ángeles.....</i>	51
Figura 15. Esquema básico de los componentes del SEM y sus diferentes interacciones	52

Figura 16. Microscopio Electrónico de Barrido SEM marca ZEISS EVO MA10 con su detector de Energía dispersiva (EDS) marca Bruker. 54

Figura 17. Aplicación del ácido nítrico a una muestra representativa del meteorito Toluca. 56

Figura 18. Microfotografías de cóndrulos C, POP y PP. 59

Figura 19. Microfotografías de cóndrulos RP, GOP y PP. 60

Figura 20. Microfotografías de cóndrulos PO, BO, C, POP y RP. 61

Figura 21. Microfotografías de cóndrulos PO y GOP junto con fracturas planares en olivino. 62

Figura 22. Microfotografías de minerales opacos: kamacita, taenita y troilita. 63

Figura 23. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 1 64

Figura 24. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 1. 65

Figura 25. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 2. 66

Figura 26. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 2. 66

Figura 27. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3. 67

Figura 28. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3. 67

Figura 29. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3. 68

Figura 30. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 4. 69

Figura 31. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 5..... 70

Figura 32. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 5..... 70

Figura 33. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 6..... 71

Figura 34. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 6..... 72

Figura 35. Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 7..... 72

Figura 36. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 7..... 73

Figura 37. Microfotografías de intercrecimiento kamacita-taenita y minerales accesorios.
..... 75

Figura 38. Microfotografías de minerales accesorios y de alteración 76

Figura 39. Microfotografía SEM-EDS: Toluca 1..... 77

Figura 40. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 1. 78

Figura 41. Microfotografía SEM-EDS: Toluca 2..... 79

Figura 42. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 2. 79

Figura 43. Microfotografía SEM-EDS: Toluca 3 80

Figura 44. Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 3. 81

Figura 45. Estructura Widmanstätten del meteorito Toluca..... 82

Resumen

Título: Caracterización petrográfica y clasificación textural-química de los meteoritos mexicanos Juanita de Ángeles y Toluca*

Autor: Gabriel Julian Ariza Benavides**

Palabras clave: Condrita ordinaria, H5, Meteorito de hierro, Octaedrita, SEM-EDS

Descripción:

Los meteoritos representan partes de cuerpos planetarios extraterrestres que han alcanzado la superficie del planeta Tierra. La Meteorítica es la ciencia que se encarga del estudio de éstos y su importancia tiene relevancia en el conocimiento de la historia temprana del sistema solar. El propósito del presente estudio es identificar las características mineralógicas y texturales de dos meteoritos mexicanos, Juanita de Ángeles y Toluca con base en análisis petrográficos, minerográficos y de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS) que permitan, además, ajustar sus respectivas clasificaciones. Los resultados obtenidos permiten clasificar al meteorito Juanita de Ángeles como una condrita ordinaria tipo H5, con un metamorfismo de choque S3 y un estado de meteorización W2 cuya mineralogía está compuesta de forsterita, hiperstena, augita, kamacita, taenita, troilita, cromita y plagioclasa además de presentar texturas en sus cóndrulos tipo POP, PO, PP, RP, BO, C y GOP. Por otro lado, el meteorito Toluca es un meteorito metálico tipo octaedrita gruesa (Og) con estructura Widmanstätten cuyo espesor promedio de banda es 1.55 mm, el cual está compuesto principalmente de aleaciones metálicas Fe-Ni denominadas kamacita y taenita y por minerales accesorios cohenita y schreibersita. Este trabajo representa el primer informe detallado sobre la mineralogía de Juanita de Ángeles y constituye una base para futuros aportes al conocimiento de éste con diferentes técnicas analíticas, mientras que los resultados obtenidos para el meteorito Toluca permiten aportar datos que posibiliten una correcta clasificación estructural de éste.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Ing. Alfredo Victoria Morales. Codirector: Julián David De Bedout Ordóñez. Geólogo M.Eng

Abstract

Title: Petrographic characterization and textural-chemical classification of the Mexican meteorites Juanita de Ángeles and Toluca*

Author: Gabriel Julian Ariza Benavides**

Key words: Ordinary chondrite, H5, Iron meteorite, Octahedrite, SEM-EDS

Description:

Meteorites represent parts of extraterrestrial planetary bodies that have reached the surface of the Planet Earth. Meteoritics is the science that is responsible for the study of these and its importance is relevant in the knowledge of the early history of the solar system. The purpose of this study is to identify the mineralogical and textural characteristics of two Mexican meteorites, Juanita de Ángeles and Toluca, based on petrographic, mineragraphic and Scanning Electron Microscopy (SEM-EDS) analyzes, which also allow adjusting their respective classifications. The results obtained allow classifying the Juanita de Ángeles meteorite as an ordinary H5 type chondrite, with an S3 shock metamorphism and a W2 weathering state whose mineralogy is composed of forsterite, hypersthene, augite, kamacite, taenite, troilite, chromite and plagioclase in addition to present textures in their chondrules type POP, PO, PP, RP, BO, C and GOP. On the other hand, the Toluca meteorite is a coarse octahedrite (Og) metallic meteorite with Widmanstätten structure whose average band thickness is 1.55 mm, which is mainly composed of Fe-Ni metallic alloys called kamacite and taenite and by accessory minerals cohenite and schreibersite. This work represents the first detailed report on the mineralogy of Juanita de Angeles and constitutes a basis for future contributions to the knowledge of it with different analytical techniques, while the results obtained for the Toluca meteorite allow us to provide data that enables a correct structural classification of it.

*Bachelor thesis

** Faculty of Physico-Chemical Engineering. School of Geology Director: Ing. Alfredo Victoria Morales. Codirector: Julián David de Bedout Ordóñez. Geologist M.Eng

Introducción

Los meteoritos son objetos sólidos naturales con un tamaño mayor a 10 μm , derivados de cuerpos celestes y que han sido transportados por medios naturales desde el lugar donde se formaron a una región fuera de su influencia gravitacional y, que posteriormente colisionan con otro cuerpo más grande que si mismo, ya sea natural como el planeta Tierra o artificial (Rubin & Grossman, 2010).

Aquellos meteoritos donde es posible observar cuando caen e impactan en la superficie terrestre y, posteriormente son recuperados se denominan ‘caídas’, aquellos que se encuentran y no se observa su descenso a la superficie de la Tierra se denominan ‘hallazgos’. Reciben sus nombres basados en la ubicación del lugar donde fueron recuperados (por ejemplo, el meteorito de Allende cayó en Allende poblado cercano a la ciudad Parral en el estado de Chihuahua, México) (Krot *et al.*, 2004).

Los meteoritos llevan consigo una amplia información acerca de gran variedad de procesos ocurridos durante la evolución del sistema solar: 1) Aquellos que ocurrieron en la nebulosa solar, antes de la formación de los planetas; 2) Procesos que ocurrieron en los protoplanetas y cuyos procesos son similares a los que ocurren en la Tierra y en otros planetas; 3) Resultantes de interacción colisional entre objetos interplanetarios, es decir, procesos de choque y fragmentación; y 4) Producidos por la interacción con la energía solar y los rayos cósmicos galácticos (Wasson, 1974).

En este trabajo se presenta el análisis mineralógico obtenido con base en Petrografía, Minerografía y Microscopía Electrónica de Barrido de dos meteoritos del tipo hallazgo: Juanita de Ángeles y Toluca, así como su clasificación textural y estructural.

1. Planteamiento del problema

Con este trabajo se busca generar un aporte al conocimiento de los cuerpos planetarios del sistema solar, específicamente a aquellos que han entrado en la órbita de nuestro planeta Tierra y han terminado, finalmente, en la superficie Terrestre. Los científicos están recorriendo el planeta en búsqueda de estos cuerpos así que la base de datos está creciendo constantemente y con ello la necesidad de realizar estudios detallados para poder comprender más ampliamente los procesos que se dan y se han dado en nuestro sistema solar. Los estudios petrográficos y geoquímicos son importantes en la caracterización de los meteoritos pues nos permiten entender los procesos que han tenido estos cuerpos desde el momento que se formaron hasta el presente.

Con este trabajo se busca resolver problemas primordiales tales como origen y evolución de dos meteoritos completamente diferentes: Juanita de Ángeles, el cual es un meteorito pétreo condritico que representa el material más primitivo del sistema solar; y el meteorito Toluca, que se caracteriza por ser un meteorito metálico el cual ha sufrido procesos de diferenciación. El objeto del presente estudio es obtener la composición química, su mineralogía, sus texturas e interpretar los procesos tanto formacionales, como de diferenciación y de choques que han presentado en su historia cada uno de estos meteoritos.

2. Justificación

El estudio químico mineralógico y textural de los meteoritos permite entender cómo están constituidos para poder clasificarlos y cuáles han sido los procesos que han sufrido desde su formación hasta el momento de coleccionarlos. La clasificación depende, como se menciona arriba de sus características químico-mineralógicas y en esto radica la importancia del presente estudio pues se aportarán datos que servirán para completar el conocimiento que se tiene de los mismos.

Con respecto al meteorito Juanita de Ángeles hay muy pocos estudios sobre éste (Wlotzka, 1995; Sánchez-Rubio *et al.*, 2001), por lo que el presente proyecto de investigación sería el primero enfocado a hacer una descripción detallada sobre éste meteorito. Por el contrario, la situación del meteorito Toluca es totalmente diferente pues su hallazgo en el año 1776, científicos de diferentes épocas han estudiado de manera detallada este meteorito, sin embargo, hay una fuerte discusión sobre ciertos aspectos del mismo como por ejemplo su clasificación estructural, así que con este trabajo se pretende obtener nuevos datos que puedan apoyar algunas de esas hipótesis y nos permitan un mejor entendimiento en la evolución de ésta roca.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Clasificar los meteoritos mexicanos Juanita de los Ángeles y Toluca así como describir las transformaciones a las que han sido sometidos realizando estudios petrográficos a preparaciones representativas de estos.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar y describir las características mineralógicas y texturales de los meteoritos con base en microscopía de luz transmitida, microscopía de luz reflejada y microscopía electrónica de barrido
- Clasificar mediante parámetros secundarios tales como intemperismo y metamorfismo de choque al meteorito pétreo Juanita de Ángeles.
- Revelar la estructura Widmanstätten del meteorito Toluca mediante un ataque con ácido nítrico y dimensionar el tamaño de sus bandas de kamacita.

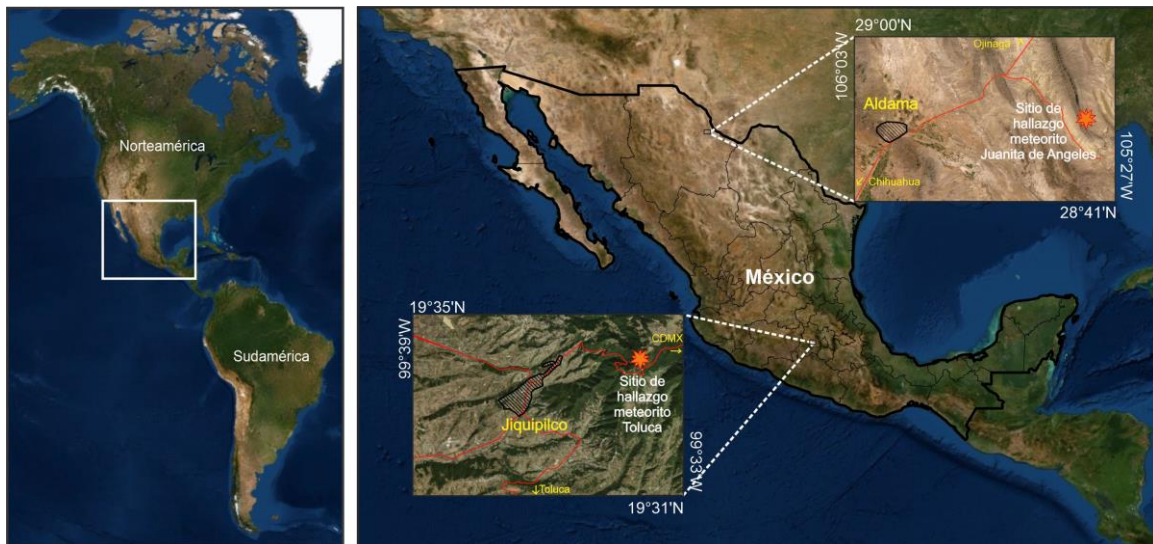
4. Localización y descripción de los hallazgos

Juanita de Ángeles es un meteorito de 85kg que fue encontrado por un minero mexicano en el año 1992 cerca de la mina ‘Juanita de Ángeles’ con coordenadas $28^{\circ}51'05''\text{N}$, $105^{\circ}31'11''\text{W}$ en las proximidades del rancherío Las Amosgoas, municipio de Aldama, en el Estado de Chihuahua, México (Eduardo Gómez, comunicación personal).

Toluca es un meteorito que representa a miles de fragmentos recuperados en una pequeña área en las colinas cerca del poblado de Jiquipilco con coordenadas $19^{\circ}34'\text{N}$, $99^{\circ}34'\text{W}$ en el valle de Toluca a aproximadamente 25km al noreste de la ciudad de Toluca en el Estado de México, México. El acumulado de todos los fragmentos suma 2800kg, pero es muy probable que mucho más material se haya encontrado y distribuido en colecciones personales. El primer reporte formal sobre Toluca se dio en el año 1776, pero ya era muy conocido que los indígenas de Jiquipilco usaban el hierro desde antes para hacer sus instrumentos de labranza (Buchwald, 1975; Sanchez-Rubio *et al.*, 2001).

Figura 1

Esquema simplificado de los sitios de hallazgo de los meteoritos.



5. Metodología

El proyecto se realizará en las siguientes etapas con el fin de alcanzar los objetivos planteados.

Etapas 1: Revisión y recopilación de información bibliográfica.

Esta etapa consiste en la recopilación y análisis bibliográfico de libros, artículos y otros archivos que puedan tener información acerca de los dos meteoritos en estudio y de la Meteorítica, ciencia que trata del estudio de éstos. Esta fase permitirá tener un primer acercamiento a lo que se podría encontrar y planear los análisis de laboratorio con el fin de lograr los objetivos deseados.

Etapas 2: Laboratorio

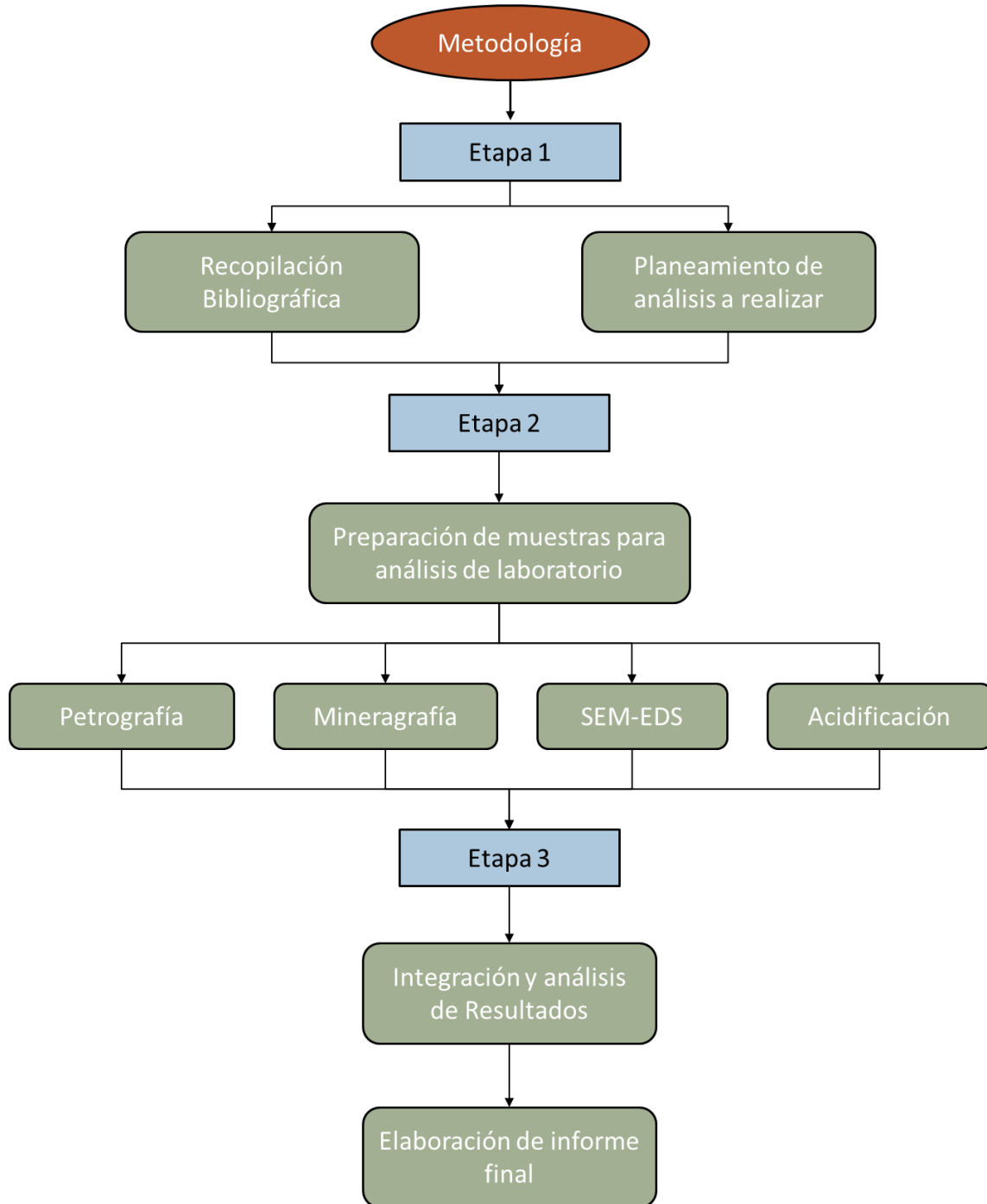
Esta fase comprende la preparación de las muestras para análisis petrográficos, minerográficos y estructurales. Estudios petrográficos, minerográficos y por microscopía electrónica para determinar la mineralogía, las relaciones texturales, estructurales y paragenéticas de las muestras, y la acidificación en el meteorito Toluca para revelar la estructura Widmanstätten.

Etapas 3: Oficina

Esta fase incluye el análisis, interpretación, documentación y organización de los datos obtenidos en un informe completo, donde se señalen las conclusiones y recomendaciones que arroje la investigación.

Figura 2

Esquema general de las etapas principales del presente proyecto.



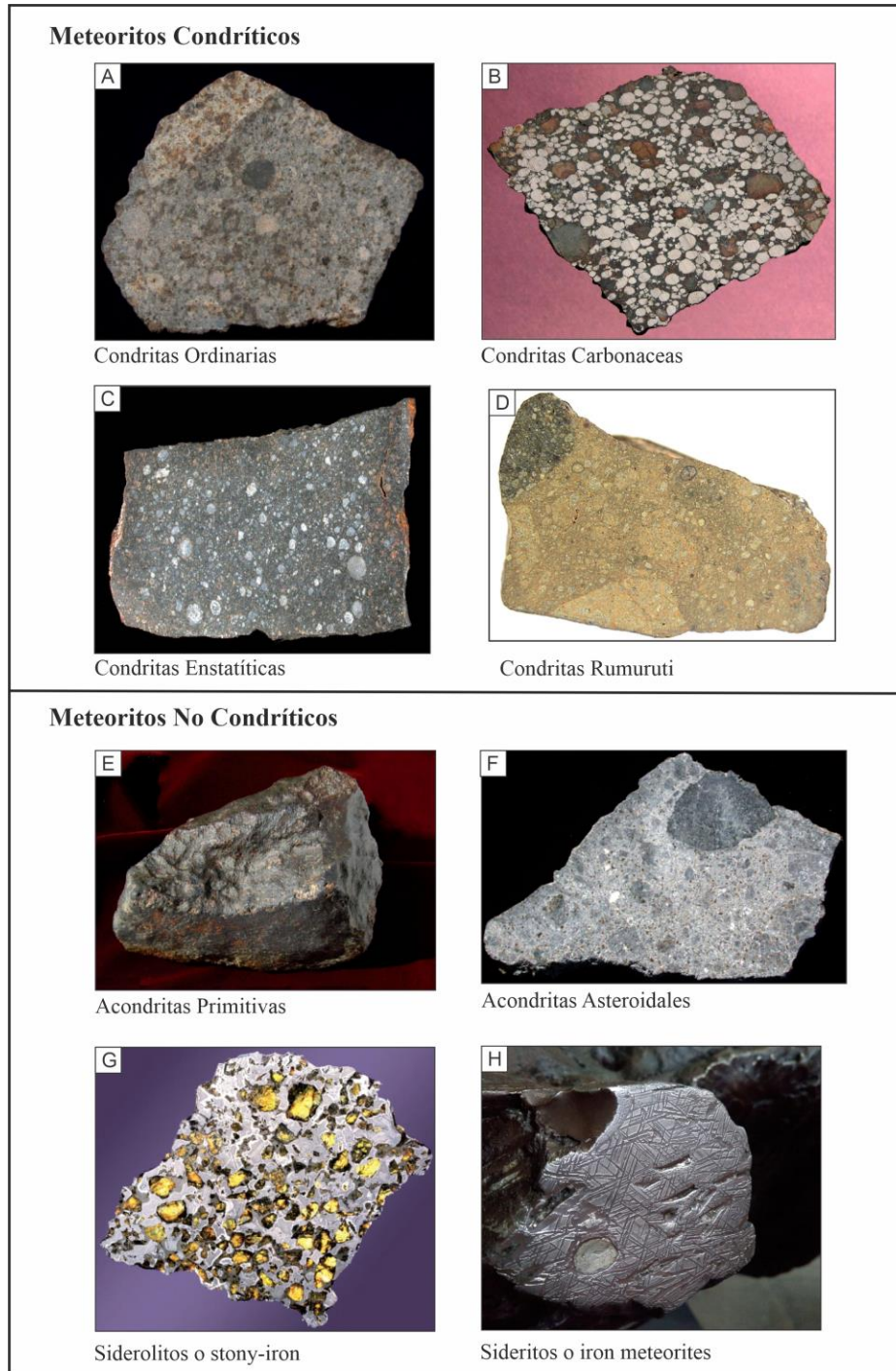
6. Antecedentes

El meteorito Juanita de Ángeles ha sido poco estudiado desde el momento de su descubrimiento en el año 1992. Wlotzka (1995), menciona cómo se dio su hallazgo en el Meteoritical Bulletin No. 78 de la Meteoritical Society, y, además, lo clasifica como una condrita H5, con una etapa de metamorfismo de choque S2 y en la escala de meteorización como W2, con olivinos tipo $Fa_{18.3}$ y piroxenos tipo $Fs_{16.6}$, esa misma información se presenta en Sánchez-Rubio *et al.*, 2001. No existen datos de petrografía, texturas, estructuras, geoquímica de roca total, elementos traza o geoquímica isotópica para éste meteorito.

La situación del meteorito Toluca es totalmente diferente ya que ha sido ampliamente estudiado desde su hallazgo en el año 1776 (Chladni, 1819; Burkart, 1856; Wohler, 1856; Brezina, 1896; Cohen, 1900; Young, 1926; Beck, 1951; El Goresy, 1965; Alexander *et al.*, 1969; Buchwald, 1975; janić, 1988; Sánchez-Rubio *et al.*, 2001; Kuno & Satish-Kumar, 2004; Theis *et al.*, 2013; Nichols *et al.*, 2018), ha sido clasificada como Octaedrita gruesa (Buchwald, 1975) y Octaedrita media (Sánchez-Rubio *et al.*, 2001) según la clasificación estructural. En cuanto al grupo químico se ha clasificado como IAB (Grady, 2000). Mineralógicamente, Buchwald, 1975, realiza una descripción muy detallada reportando la presencia de kamacita, taenita, scheibersita, cohenita, troilita y grafito para éste.

Figura 4

Tipos de meteoritos.



Nota. [A-D] Meteoritos condriticos, los cuales son las rocas mas primitivas y su conocimiento aporta claves importantes para comprender el origen del sistema solar. [E-H] Meteoritos No Condriticos, los cuales han sufrido procesos de fusión parcial o total en su evolución. Fotografías tomadas de Norton & Chitwood, 2008

7.2 Las condritas

Las condritas son meteoritos que proporcionan las mejores pistas para entender el origen del sistema solar. Son las rocas más antiguas conocidas, sus componentes se formaron durante el nacimiento del sistema solar hace aproximadamente 4567 Ma. (Krot *et al.*, 2014) y su composición elemental es muy cercana a la fotosfera solar, excepto por sus volátiles como hidrógeno y helio. (Norton & Chitwood, 2008). Las condritas son llamadas así porque están compuestas de unos pequeños cuerpos esféricos llamados cóndrulos, que son partículas pequeñas y redondeadas, generalmente compuestas por minerales silicatados de afinidad ultramáfica cuya textura indica que cristalizaron rápidamente en cuestión de minutos a horas. Estos cóndrulos varían en tamaño desde menos de un milímetro a poco menos de un centímetro (Fisher & Erickson, 2010).

Además de los cóndrulos, las condritas tienen diversas proporciones de otros tres componentes: inclusiones refractarias (0.01-3% vol), minerales Fe-Ni y sulfuros (<0.1-70% vol) y material de la matriz (1-80% vol) (Krot *et al.*, 2014).

Las inclusiones refractarias se dividen en 2: las ricas en calcio y aluminio (CAIs) y los agregados de olivino amoeboides (AOAs). Los CAIs tienen tamaños que van desde los submilímetros a centímetros, están compuestos principalmente de óxidos y silicatos de calcio, aluminio, magnesio y titanio y han sido objeto de múltiples estudios pues conservan pistas directas sobre los procesos y ambientes que existieron durante la fase nebulosa de nuestro sistema solar durante sus primeros millones de años antes de la formación de los planetas. La investigación intensiva durante más de 30 años ha demostrado que los CAIs son los objetos más antiguos conocidos del sistema solar. (MacPherson *et al.*, 2005). Los

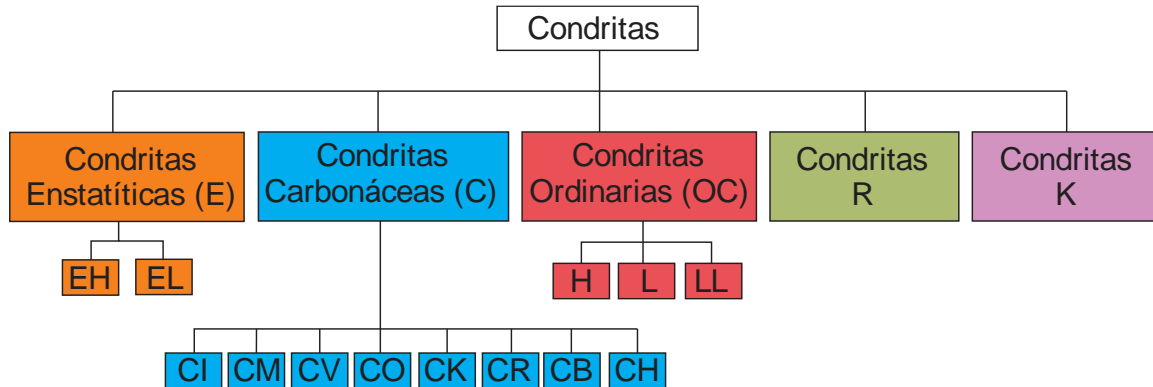
AOAs son agregados de olivinos de tamaño muy fino y de forma irregular que en muchos casos contienen anortita, piroxenos de Ca, minerales metálicos de Fe-Ni y menos comúnmente espinela, perovskita y melilita. Son componentes menores (menor al 1%) de muchas condritas carbonáceas, pero algunas condritas carbonáceas contienen arriba del 9% de éstos agregados (McSween, 1977a). Los AOAs han sido interpretados como condensados primarios de la nebulosa presolar y si lo son, los AOAs pueden proporcionar restricciones importantes en los modelos de condensación de la nebulosa (Grossman & Steele, 1976). Los AOAs son de composición intermedia y pueden ser un vínculo entre las inclusiones más antiguas: los CAIs y los más jóvenes cóndrulos ferromagnesianos moderadamente volátiles, y pueden, por lo tanto, proporcionar un enlace genético entre estos objetos (Weisberg *et al.*, 2004).

Otros componentes de las condritas son los minerales metálicos de Fe-Ni y algunos sulfuros los cuales son comunes adentro y afuera de los cóndrulos como granos arriba de 1 mm de diámetro y, al igual que los cóndrulos y las inclusiones refractarias, se formaron a altas temperaturas. Finalmente, el material de la matriz son partículas de tamaño de grano fino (10nm – 5µm) que rellenan los espacios que hay entre los demás componentes, está formada principalmente por polvo de la nube proto-planetaria y puede contener también fragmentos de cóndrulos. (Krot *et al.*, 2014).

Las condritas están divididas en clases y grupos. Las clases incluyen las Condritas Ordinarias (OC), Condritas Carbonáceas (C), y Condritas Enstatíticas (E).

Figura 5

Esquema de clasificación de los meteoritos condriticos.



Los meteoritos condriticos se subdividen en tres clases principales: Enstatíticas (E), carbonáceas (C) y ordinarias (OC). Las condritas ordinarias y enstatíticas se subdividen de acuerdo a su contenido de hierro, siendo H, alto contenido y L, bajo contenido. Las condritas carbonáceas se subdividen en base a meteoritos tipo: CI (tipo Ivuna), CM (tipo Mighei), CV (tipo Vigarano), CO (tipo Ornans), CK (tipo Karoonda), CR (tipo Renazzo), CB (tipo Bencubbin), CH (tipo High metal). Las condritas Rumuruti (R) y Kakangari (K) son grupos con pocos ejemplares. Tomado y modificado de Krot *et al.*, 2014.

7.2.1 *Condritas Ordinarias (OC):*

Las condritas ordinarias (OC – por sus siglas en inglés) se clasifican en 3 clases químicas según la cantidad de hierro que contengan: el H (High Iron- por sus siglas en inglés) donde la cantidad total en peso de hierro de la roca sea 25-30wt.% y entre 15-19wt.% se encuentra en minerales metálicos; el L (Low Iron – por sus siglas en inglés) donde la cantidad total en peso de hierro de la roca sea 15-19wt.% y entre 1-10wt.% se encuentra en minerales metálicos y el LL (Very Low Iron – por sus siglas en inglés) donde la cantidad total en peso de hierro de la roca sea 19-22% y entre 1-3wt.% se encuentra en minerales metálicos (Norton & Chitwood, 2008) (**Tabla 1**).

Tabla 1

Esquema de clasificación de las condritas ordinarias (OC) y Enstatíticas (E) en base a su contenido de hierro.

Clase	Grupo	Metal(wt%)	Hierro Total(wt%)	Fa (mol%)	Fs (mol%)
E	H	17-23	25-30	<1	0
E	L	17-23	<25	<1	0
OC	H	15-19	25-30	16-20	14-20
OC	L	1-10	20-23	21-25	20-30
OC	LL	1-3	19-22	26-32	32-40

Nota. Fa=Fayalita, Fs=Ferrosilita. Tomado y modificado de Norton & Chitwood, 2008.

7.2.2 *Condritas Carbonáceas (C):*

Las condritas carbonáceas son meteoritos primitivos e indiferenciados que se formaron en regiones ricas en oxígeno del sistema solar temprano, por lo que la mayor parte del metal no se encuentra en su forma libre, sino como silicatos, óxidos o sulfuros. La mayoría de ellos contienen agua o minerales que han sido alterados en presencia de agua, y algunos de ellos contienen grandes cantidades de carbono (como las CI, CM y CR), así como compuestos orgánicos (Scott, 2007).

Existen 4 características típicas de las condritas carbonáceas por medio de la cual pueden ser identificadas y clasificadas:

1) Relaciones relativas de elementos litófilos refractarios/abundancia de Si relativo a las condritas CI (≥ 1.00 en condritas carbonáceas, ≤ 0.95 en condritas no carbonáceas).

2) Composición isotópica del oxígeno ($\Delta_{17}O \leq -2\%$ para condritas carbonáceas, excepto para las CI; $\Delta_{17}O \geq -1\%$ para condritas no carbonáceas).

3) Abundancia de inclusiones refractarias (≥ 0.1 vol% en condritas carbonáceas, excepto para las CI; ≤ 0.1 vol% para condritas no carbonáceas).

4) Relación matriz/abundancia modal de cóndrulos (≥ 0.9 en condritas carbonáceas, excepto para las CH y las CB; ≤ 0.9 para condritas no carbonáceas, excepto para las condritas K) (Kallemeyn *et al.*, 1996).

Existen 8 tipos bien definidos de condritas carbonáceas:

CI (tipo Ivuna) tienen un contenido de carbono entre 3-5% y un contenido de agua entre 18 y 22%, no tiene cóndrulos y se han estudiado por su posible relación con el origen de la vida.

CM (tipo Mighei) tienen una abundancia de cóndrulos de 20% vol. y unos diámetros promedio de 0.3mm, contienen entre 3 y 11% de agua y entre 20.44 y 22.13% de Hierro total. Se ha descubierto la presencia de aminoácidos en estos meteoritos, los componentes básicos de las proteínas, fundamentales en todos los organismos vivos.

CV (tipo Vigarano), presentan los cóndrulos con un promedio de 1mm de diámetro y un volumen de entre 35-45% del total de la roca y tienen un porcentaje de entre 5-10% de CAIs, minerales refractarios como melilita, espinela y anortita.

CO (tipo Ornans) presentan pequeños cóndrulos de 0.2 mm de diámetro, pero con una abundancia en el meteorito mayor al 48%, así mismo presenta un 15% de inclusiones refractarias muy pequeñas y esparcidas por su matriz y también son comunes pequeñas inclusiones de metales.

CK (tipo Karoonda) tienen alrededor de 45% vol. de cóndrulos con un promedio de 1mm de diámetro, no presenta granos de metal en su matriz, pero sus silicatos como olivinos y piroxenos se encuentran muy enriquecidos en hierro, lo cual demuestra el alto grado de oxidación del meteorito.

CR (tipo Renazzo) contienen altos contenidos de metal, su contenido de cóndrulos es un 50% vol. y un tamaño promedio de 0.7mm de diámetro, así mismo es común que los cóndrulos presenten anillos de metal.

CB (tipo Bencubbin) contienen más del 50% de minerales metálicos de Fe-Ni, texturalmente contienen grandes nódulos de minerales metálicos de 1.5-8mm de diámetro, también presenta numerosos cóndrulos de centímetros de diámetro con inclusiones de nódulos de minerales metálicos y agregados de piroxenos, la presencia de CAIs es mínima <0.1%.

CH (tipo High metal) son condritas que contienen arriba del 20% vol. de metal Fe-Ni, su matriz contiene pequeños cóndrulos fragmentados de 0.02mm en diámetro que abarca un 70% del volumen de la roca y los CAIs son poco abundantes ~0.1% vol. también contienen pequeñas cantidades de filosilicatos y otras trazas de alteración acuosa. Algunos miembros de éste grupo contienen hasta 70% de metal. (Norton & Chitwood, 2008)

7.2.3 *Condritas Enstatíticas (E):*

Las condritas enstatíticas son meteoritos que se formaron en un ambiente altamente reducido (Keil, 1989), por lo cual la mayoría de su hierro se encuentra como aleación de metal o como sulfuros libres de oxígeno. Sus piroxenos prácticamente no contienen hierro, y están constituidos principalmente de silicatos de magnesio (Enstatita). Su clasificación al igual que en la condritas ordinarias se basa en su contenido de elementos metálicos. Sus grupos son: el EH (High Iron) que contiene mayor cantidad de Fe aproximadamente 30%

o más de hierro total y el EL (Low Iron) que contiene poco Fe, aproximadamente 25% o menos de metal. (Norton & Chitwood, 2008).

7.2.4 *Condritas Rumuruti (R):*

Constituyen un grupo joven, establecido en el año 1994 muy diferente de las condritas C, OC y E. Se tratan de unas brechas regolíticas ricas en gas formando una estructura claro-oscuro que consiste en abundantes fragmentos líticos de varios cuerpos parentales embebidas en una matriz fina rica en olivinos (Bischoff, 2000). Este grupo se caracteriza por:

- 1) Alto contenido de matriz ~50% vol.
- 2) Altos estados de oxidación reflejados en el contenido de Fayalita en olivinos (44-57%) y la ausencia de minerales con Fe-Ni.
- 3) La presencia de inclusiones refractarias y contenidos de elementos volátiles similar a las condritas ordinarias.
- 4) El enriquecimiento en Ga, Se, S y Zn.
- 5) Valores de $\Delta_{17}\text{O}$ de roca total mayor que en cualquier otro grupo de condritas.

(Krot *et al.*, 2014)

7.2.5 *Condritas Kakangari (K):*

Este tipo de condritas tienen un set de características petrológicas e isotópicas que las distinguen de otros tipos de condritas.

- 1) Alto contenido de matriz (33-77% vol.).

- 2) Abundancia de minerales metálicos (6-10% vol.).
- 3) Promedio composicional de olivino = Fa_{2.2} y de enstatita =Fs_{4.4}, indicando un estado de oxidación intermedio entre las condritas H y las condritas E.
- 4) La matriz es rica en enstatita con composición más rica en Mg (Fs₃) que la de sus cóndrulos.
- 5) Poca presencia de inclusiones refractarias ~0.1% vol.
- 6) Composición isotópica del oxígeno por debajo de la línea de fraccionamiento terrestre ($\Delta_{17}O = -1.2$ a -1.8).
- 7) Composición isotópica del oxígeno en los cóndrulos forman una mezcla entre la composición similares a las encontradas en las condritas E ($\Delta_{17}O$ cercano a cero) a valores negativos de $\Delta_{17}O$ (Weisberg *et al.*, 1996).

7.2.6 *Parámetros de clasificación secundaria*

7.2.6.1 Tipo petrológico:

Esta clasificación fue introducida por Van Schmus y Wood, 1967. Se trata de un esquema que proporciona una guía del metamorfismo térmico y de alteración acuosa experimentada por una condrita. De acuerdo a este esquema, las condritas se dividen en tipos petrológicos (o petrográficos) de 1 a 6. La secuencia de tipo 3 (comúnmente llamada inequilibrada) al tipo 6 (comúnmente llamada equilibrada) representa un incremento del equilibrio químico y una recristalización textural, presumiblemente debido a metamorfismo termal. El tipo 1 representa un alto grado de alteración acuosa comparado con el tipo 2, basado en la abundancia de silicatos hidratados. La **Tabla 2** presenta los

diferentes aspectos de clasificación petrológica propuesta por Van Schmus y Wood en el año 1967.

Tabla 2

Esquema de clasificación petrológica de Van Schmus y Wood, 1967.

Criterio	Tipo Petrológico					
	1	2	3	4	5	6
Homogeneidad de las composiciones del olivino y piroxeno bajo en Ca		Desviación media mayor a 5%		Desviación media menor a 5%	Homogenea	
Estado estructural del piroxeno bajo en Ca		Predominantemente monoclinico		>20% monoclinicos	<20% monoclinicos	Ortorómbicos
Feldespatos		Granos primarios solamente		Granos secundarios, <2µm	Granos secundarios, 2µm- 50µm	Granos secundarios, >50µm
Vidrio igneo		Vidrio primario limpio e isotrópico, abundancia variable		Desvitrificado, ausente		
Ni en minerales metálicos		<20wt%; taenita menor o ausente	>20wt%kamacita y taenita en relación de exolución			
Ni en sulfuros		>0.5 wt%	<0.5 wt%	<0.5 wt%	<0.5 wt%	<0.5 wt%
Matriz	De grano fino, opacos	Mayormente fino, opacos	Clástico, opacos menores	Transparente, recristalizado de 4 a 6		
Textura de los cóndrulos	Sin cóndrulos	Cóndrulos muy bien definidos		Cóndrulos bien definidos	Cóndrulos medianamente definidos	Cóndrulos pobremente definidos
Carbono (wt%)	3-5	0.8-2.6	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5
Agua (wt%)	18-22	2-16	0.3-3			<1.5

Nota. Es un esquema está basado en las características químicas y petrológicas de los meteoritos condriticos donde destacan características como la textura de los cóndrulos y la textura de la matriz. Esta clasificación es complementaria a la clasificación con base en el contenido en hierro. Tomado y modificado de Van Schmus y Wood, 1967.

7.2.6.2 Etapas de metamorfismo de choque (shock metamorphism stages):

Se definen seis etapas de choque (S1 a S6), basadas en las texturas de choque en olivinos y plagioclasas obtenidas mediante estudios petrográficos. Los efectos de choque característicos de cada etapa son:

S1 (sin choque)- ángulo lo extinción claro y sin irregularidades en olivinos.

S2 (muy débilmente golpeado) -extinción ondulatoria del olivino.

S3 (débilmente golpeado) fracturas planas en olivino.

S4 (moderadamente golpeado) -mosaicismo en olivino.

S5 (fuertemente golpeado) -isotropización de plagioclasa (maskelynita) y características de deformación planar en olivino.

S6 (muy fuertemente golpeado) -recristalización de olivino, a veces combinada con transformaciones de fase (ringwoodita y / o fases producidas por reacciones de disociación). (Stöffler *et al.*, 1991).

Tabla 3

Etapas progresivas de metamorfismo de choque en condritas ordinarias.

Etapa de choque	Efectos resultantes del pico de presión de choque en equilibrio		Efectos resultantes de excursiones locales P-T	Presión de choque Gpa	Incremento de la temperatura Post-choque °C	Incremento estimado mínimo de temperatura °C
	Olivino	Plagioclasa				
Sin choque S1	Fuerte extinción óptica, fracturas irregulares		Ninguna	<4 - 5	10 - 20	10
Muy débilmente golpeado S2	Extinción ondulosa, fracturas irregulares		Ninguna			
Débilmente golpeado S3	Fracturas planares, extinción ondulosa, fracturas irregulares	Extinción ondulosa	Venas opacas, incipiente formación de bolsas de fusión, a veces interconectadas	15 - 20	100 - 150	100
Moderadamente golpeado S4	Mosaicismo (debil), fracturas planares	Extinción ondulosa, parcialmente isotrópico, características de deformación planar	Bolsas fundidas, venas interconectadas, venas de choque opacas	30 - 35	250 - 350	300
Fuertemente golpeado S5	Mosaicismo (fuerte), fracturas planares + características de deformación planar	Maskelenita	Formación penetrante de bolsas fundidas, venas y diques, venas opacas	45 - 55	600 - 850	600
Muy fuertemente golpeado S6	Restringida a regiones locales o cerca a zonas de fusión		Igual que en la etapa S6	75 - 90	1500 - 1750	1500
	Recristalización en estado sólido, ringwoodita, fusión	Fusión por choque (vidrio)				
Fusión	Fusión de roca total (rocas de fusion y brechas de fusión)					

Nota. Solo los efectos provocados en olivino y plagioclasa son usados para definir cada una de las etapas de metamorfismo de choque. Tomado y modificado de Stöffler *et al.*, 1991.

7.2.6.3 Escala de meteorización (Weathering scale):

Propuesto por Wlotzka, 1993, donde el grado de meteorización terrestre es un parámetro de clasificación adicional comúnmente aplicado a los hallazgos de meteoritos.

Los grados de meteorización (W1-W6) se determinan por medio de estudios petrográficos.

Las siguientes etapas progresivas pueden ser identificadas:

W0: No hay oxidación visible de los minerales metálicos Fe-Ni o de los sulfuros.

W1: Pequeños anillos de óxidos alrededor de los minerales metálicos o de la troilita; pequeñas venas de óxidos.

W2: Moderada alteración de los metales, alrededor del 20-60% siendo afectado.

W3: Fuerte oxidación de los metales y de la troilita, siendo 60-95% reemplazado.

W4: Completa (>95%) de oxidación de los metales y de la troilita, pero sin alteración de los silicatos.

W5: Comienzo de la alteración de los silicatos, principalmente entre fracturas.

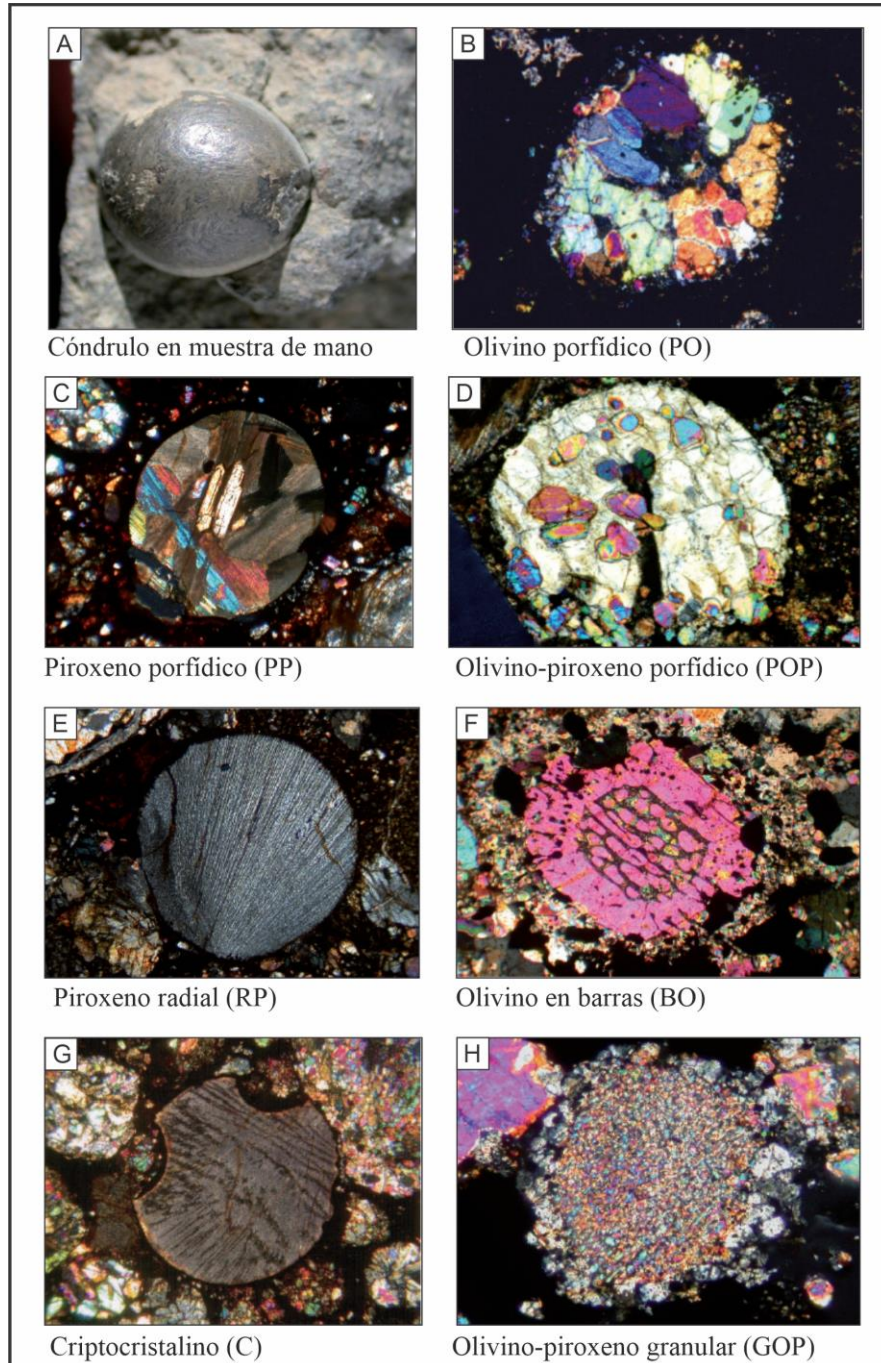
W6: Reemplazamiento masivo de silicatos por minerales de la arcilla y óxidos.

7.2.6.4. Texturas en cóndrulos

Las condritas se caracterizan por sus abundantes cóndrulos, los cuales, vistos en el microscopio de luz transmitida presentan variadas texturas entre las que se encuentran olivino-piroxeno porfídico (POP), olivino porfídico (PO), piroxeno porfídico (PP), piroxeno radial (RP), olivino en barras (BO), criptocristalino (C) y olivino-piroxeno granular (GOP) (**Figura 6**). Aunque la gran mayoría de cóndrulos pueden ser clasificados en estas categorías, existen muchos reportes de texturas singulares las cuales no pertenecen a los grupos principales anteriormente mencionados.

Figura 6

Tipos de texturas en cóndrulos.



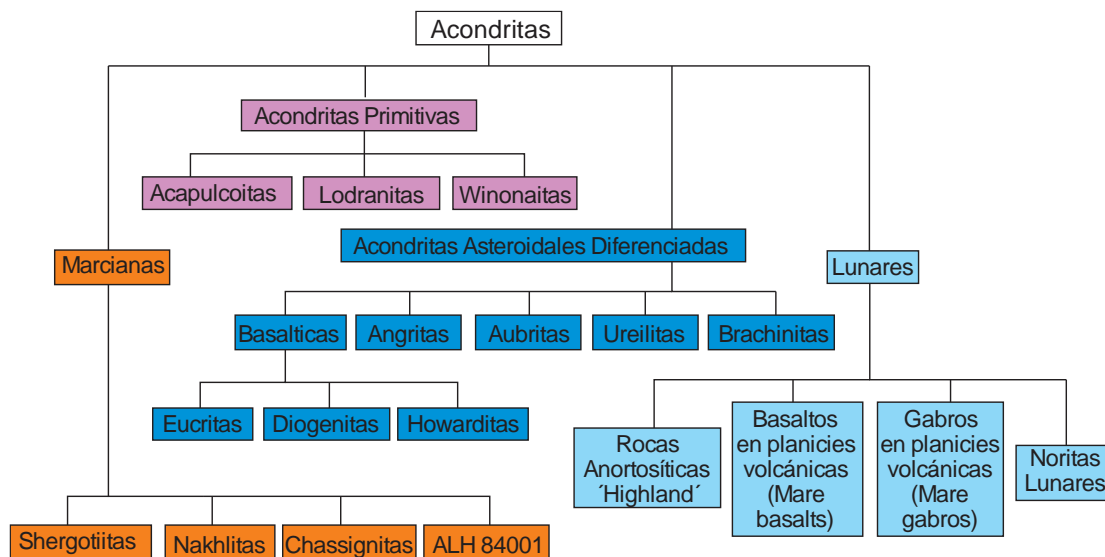
Nota. [A] La mayoría de los cóndrulos varían en tamaño desde menos de 0,1 a 3,8 mm de diámetro Algunos son más grandes y se conocen como macrocóndrulos. Se han clasificado en siete tipos de textura básicos. [B] Olivino porfídico (PO). [C] Piroxeno porfídico (PP). [D] Olivino-piroxeno porfídico (POP). [E] Piroxeno radial (RP). [F] Olivino en barras (BO) [G] Criptocristalino (C). [H] Olivino-piroxeno granular (GOP). Fotografías tomadas de Norton & Chitwood, 2008.

7.3 Meteoritos No Condriticos:

Los meteoritos no condriticos no contienen prácticamente ninguno de algunos de los componentes encontrados en condritas (cóndrulos, CAI, AOA, etc.), pero se cree que se derivan de materiales condriticos por fusión planetaria y fraccionamiento. Estos procesos alteraron sus texturas y causaron que sus composiciones se desviaran de las condritas. Los grados de fusión que produjeron estas rocas son altamente variable y, por lo tanto, estos meteoritos se han dividido en cuatro categorías principales: acondritas primitivas, acondritas asteroidales diferenciadas, lunares y marcianas. La **Figura 7** resumen los tipos de meteoritos no condriticos.

Figura 7

Tipos de acondritas o meteoritos no condriticos.



Se incluyen meteoritos del cinturón de asteroides, Marte, la luna y las acondritas primitivas. Tomado de Norton & Chitwood, 2008.

7.3.1 *Acondritas Primitivas:*

Como regla general, los meteoritos primarios no condríticos (acondritas) tienen composiciones químicas "casi condríticas", pero texturas que son ígneas y / o metamórficas. Se cree que son condritas ultrametamorfoseadas o residuos de muy bajos grados de fusión parcial. Probablemente se formaron en pequeños cuerpos parentales condríticos y se fundieron y diferenciaron solo parcialmente a través de procesos de acreción o de eventos de impacto, y luego se enfriaron rápidamente (Krot, *et al.*, 2014).

-Acapulcoitas y Lodranitas: Son rocas equigranulares de grano fino a medio con texturas recristalizadas compuestas de ortopiroxeno, olivino, Cr-dióxido, Na-plagioclasa, FeNi-metal, schreibersita, troilita, whitlockita, Cl-apatito, cromita y grafito. Las acapulcoitas son de grano fino (150–230 μm), mientras que las lodranitas son mucho más gruesas (540–700 μm) (Krot, *et al.*, 2014). Las edades de exposición a rayos cósmicos para las acapulcoitas y las lodranitas está estrechamente relacionada entre 5 a 10 M.a. lo cual indicaría el momento en que se separaron del asteroide y también tienen la misma relación isotópica de oxígeno por lo cual se asume que ambos grupos provienen de un mismo cuerpo parental que se separó del mismo y que las acapulcoitas procede de una parte más somera del asteroide mientras que las lodranitas con sus cristales más gruesos provienen de capas más profundas. (Eugster *et al.*, 2006).

-Winonaitas e inclusiones silicatadas en metálicos tipo IAB y III CD: Se utilizan tres criterios para clasificar las winonaitas: 1) La mineralogía altamente reducida y composiciones minerales como Olivino (Fa_{1-8}), ortopiroxeno (Fs_{1-9}), clinopiroxeno ($\text{Fs}_{2-4}\text{Wo}_{44-45}$), Na-plagioclasa ($\text{An}_{11-22}\text{Ab}_{76-85}$), troilita, minerales metálicos, daubreelita,

schreibersita, grafito. 2) las composiciones isotópicas de oxígeno, las cuales son idénticas a las inclusiones silicatadas de las sideritas IAB y IIICD indicando un origen en piscinas metálicas de un cuerpo parental winanoítico, y (3) la abundancia y distribución de metal y troilita (Benedix *et al.*, 1998)

7.3.2 *Acondritas Diferenciadas:*

Las acondritas diferenciadas representan los productos de procesos ígneos clásicos que actúan sobre el sistema de silicato-óxido de cuerpos asteroidales como lo son fusión parcial o completo y cristalización magmática.

-Angritas: Las angritas son rocas ígneas de grano medio a grueso (hasta 2–3 mm) de composición generalmente basáltica y consisten principalmente de un piroxeno rico en Ca–Al–Ti (llamado fassaita), olivinos ricos en calcio y plagioclasa anortítica; espinela, ilmenita, troilita, kirschsteinita, whitlockita, titanomagnetita y minerales metálicos Fe-Ni (Norton & Chitwood, 2008). Las angritas no están brechadas y, en esencia, presentan evidencias de choques. (S1 – S2) (Scott & Bottke, 2011) y han conservado un registro de la actividad ígnea más temprana en el sistema solar y paleomagnética evidencia de una dinamo central (Kleine *et al.*, 2012).

-Aubritas: Las aubritas consisten en su mayoría (75–95% vol.) de enstatita casi libre de hierro, pero también contienen cantidades menores de plagioclasa albitica, dióxido y forsterita casi libre en hierro. Otras fases incluyen minerales metálicos FeNi con 0.1–2.4% vol. y una gran cantidad de sulfuros inusuales de elementos que normalmente son litófilos como el titanio en heideita (FeTi_2S_4) (Keil y Brett, 1974) y calcio en oldhamite (CaS) (Wheelock *et al.*, 1994).

-Brachinitas: Son acondritas ricas en olivino (79–95% vol.), con importantes cantidades de (3–15%) de augita (Wo_{45}), diferentes cantidades de plagioclasa (0-10%) principalmente cálcica y menores a trazas de ortopiroxeno, cromita, fosfatos, sulfuros de Fe y minerales metálicos Fe-Ni. Se distinguen de la mayoría de las otras acondritas al tener más FeO-rico en los minerales silicatados (Krot *et al.*, 2014).

-Ureilitas: Son rocas ígneas compuestas de olivino, clinopiroxeno (pigeonita), minerales metálicos Fe-Ni, sulfuro de hierro (troilita) y carece casi por completo de feldespato. La característica más interesante es la presencia de carbono en forma de grafito y a veces en forma de diamante producto del metamorfismo del grafito (Norton & Chitwood, 2008).

-Meteoritos HED, Howarditas, Eucritas, y Diogenitas: Las eucritas son acondritas basálticas, las diogenitas están dominadas por ortopiroxeno y las howarditas son mezclas de eucritas y diogenitas. Todas las howarditas y diogenitas y casi todas las eucritas se cree que provienen de un solo cuerpo parental asteroidal (McSween *et al.*, 2011). La evidencia de esto incluye sus composiciones isotópicas de oxígeno uniformes (Greenwood *et al.*, 2005), similitudes en Fe / Mn relaciones de piroxenos, la aparición de brechas polimícticas que consisten en materiales parentales eucríticos y diogeníticos y la existencia de rocas intermedias entre diogenitas y cumatos eucríticos. Similitudes en las composiciones mineralógicas de los HED y la mineralogía superficial del asteroide 4 Vesta según lo determinado por espectroscopía visible e infrarroja cercana de la Tierra (McCord *et al.*, 1970) y la nave espacial Dawn (McSween *et al.*, 2012) sugiere que los HED son eyecciones de un impacto que sufrió Vesta. Esta propuesta ha sido fortalecida por el

descubrimiento de varios miles de asteroides de la familia Vesta, que son cuerpos pequeños (<10 km de diámetro) que son dinámicamente vinculado a Vesta (Binzel & Xu, 1993; Moskovitz *et al.*, 2010).

-Meteoritos Marcianos: Los meteoritos marcianos son rocas volcánicas, subvolcánicas y plutónicas. Sus diversas composiciones altamente fraccionadas, y edades de cristalización jóvenes (1.3 Ga y posiblemente 180 Ma) sugieren que se derivan de un cuerpo de gran tamaño (Ashwal *et al.*, 1982; Jones, 1986). Sus composiciones isotópicas de oxígeno únicas y las relaciones FeO / MnO indican que este cuerpo no es la Tierra ni la Luna. Similitudes entre las composiciones isotópicas de nitrógeno y gases nobles de la Atmósfera marciana (según lo determinado por las naves no tripuladas del Programa Viking) y aquellos atrapados en vidrios producidos por impacto en algunas shergottitas sugieren que el cuerpo parental es Marte (Bogard *et al.*, 2000; McSween, 2002, 2008; Nyquist *et al.*, 2001). Se dividen en shergottitas, nakhlitas, chassignitas y ortopiroxenitas.

-Las **shergottitas** son rocas ígneas de origen volcánico o plutónico, y se parecen más a las rocas terrestres que cualquier otro grupo de acondrita. Todas ellas muestran edades de cristalización excepcionalmente jóvenes de aproximadamente 150 a 200 millones de años, y generalmente exhiben signos de metamorfismo de choque severo. Las **nakhlitas** son clinopiroxenitas, de grano fino que muestran una textura azucarada (sugary). Consisten principalmente en cumulos de augita verde con olivino en cantidades menores en una denominada mesostasis. Esta mesostasis se compone de plagioclasa, feldespatos alcalinos, piroxenos, óxidos de hierro-titanio, sulfuros y fosfatos. Las **Chassignitas** son unas rocas que se asemejan a una dunita terrestre. Consiste en aproximadamente 91% de

olivino rica en hierro, 5% de clinopiroxeno, 1.7% de plagioclasa, 1.4% de cromita, 0.3% de inclusiones fundidas y otros minerales accesorios. (Norton & Chitwood, 2008)

-Meteoritos Lunares: La mayoría de las rocas lunares encontradas tanto en la Luna como en la Tierra son anortositas. Son principalmente rocas ígneas monominerálicas, compuestas principalmente de anortita, rico en aluminio y pobre en hierro. En la Luna, las rocas de las tierras altas (Highland rocks) son 75-80% de brechas regolíticas. (Norton & Chitwood, 2008).

7.3.3 *Metal-rocosos o siderolíticos (Stony-irons):*

Son meteoritos que están compuestos de mitad hierro, mitad silicatos y se dividen en 2 grupos: mesosideritas y pallasitas

-Mesosideritas: Las mesosideritas son brechas compuestas de proporciones aproximadamente iguales de silicatos y minerales metálicos Fe-Ni más troilita. Su fracción de silicato consiste en clastos minerales y líticos en una matriz fragmentaria o ígnea de grano fino (Hewins, 1983). Los clastos líticos son en gran parte basaltos, gabbros y piroxenitas con menores cantidades de dunita y granos de olivino (1-3% de silicato) y raramente anortosita (Mittlefehldt, 2007). Los clastos minerales consisten de ortopiroxeno de grano grueso, olivina y plagioclasa. El metal, relacionado a los meteoritos metálicos IIIAB, puede mostrar la estructura Widmanstätten. (Norton & Chitwood, 2008)

-Pallasitas: Las pallasitas son meteoritos compuestos aproximadamente de mitad silicatos (dominantemente olivino) y mitad metal. Hay 3 tipos de pallasitas:

(1) **Grupo Principal de Pallasitas** compuestas principalmente de cristales de olivinos angulares o redondeados con cantidades menores de piroxenos bajos en calcio, cromita, fosfatos, troilita y schreibersita (Buseck, 1977) y el metal se encuentra relacionado isotópicamente a los meteoritos metálicos tipo IIIAB (Scott, 1977).

(2) **Pallasitas Eagle Station** mineralógicamente similar al grupo principal de pallasitas, pero sus olivinos están más enriquecidos en hierro y calcio (Buseck, 1977). Su contenido metálico tiene una composición similar a los meteoritos metálicos tipo IIF y tiene contenido de níquel e iridio más altos que los del grupo principal (Wasson & Choi, 2003).

(3) **Las pallasitas de piroxeno** las cuales están caracterizadas por la presencia de pequeñas cantidades de clinopiroxeno. Pueden aparecer como granos bordeando a los olivinos, también dentro de la matriz de hierro-níquel o como inclusiones. (Norton & Chitwood, 2008)

7.3.4 *Meteoritos Metálicos (irons):*

Los meteoritos metálicos son aleaciones de hierro y níquel (kamacita (5-10%Ni) y taenita (20-65%Ni)) con pequeñas cantidades de cobalto (0.4– 0.8% en peso), azufre y fósforo (0.01–1% en peso) y carbono, que forman troilita (FeS) y otros minerales poco comunes como: schreibersita ((Fe, Ni)₃P) cohenita ((Fe, Ni)₃C) y otros carburos de Fe-Ni (Goldstein *et al.*, 2009).

Clasificación estructural: El sistema de clasificación estructural ha sido ampliamente utilizado desde que fue desarrollado por Tschernak (1872) y Brezina (1885).

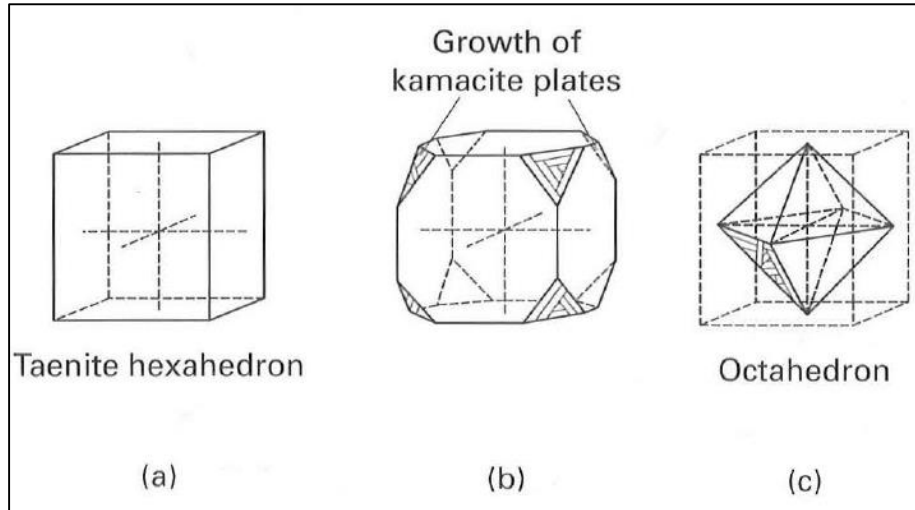
Se basa en la estructura que es visible cuando una superficie pulida es atacada con ácido nítrico y varía de acuerdo a su contenido en níquel. Se dividen en hexaedritas, octaedritas y ataxitas.

-Hexaedritas (H): Son los meteoritos metálicos que contienen la menor cantidad de níquel (4.5-6.5%) y están compuestas casi exclusivamente por kamacita. Cuando la kamacita cristaliza, forma cristales cúbicos con los seis lados iguales y ángulo recto entre sí. Su forma cristalina es por lo tanto un hexaedro. Las hexaedritas a menudo presentan unas líneas finas y paralelas llamadas 'líneas de Neumann', éstas líneas representan una deformación estructural de las placas de kamacita producida por impactos en el cuerpo parental de las hexaedritas (Norton & Chitwood, 2008).

-Octaedritas (O): Son los más abundantes de la clasificación estructural de los meteoritos metálicos, son llamados así porque al ser pulidos y atacados con ácido nítrico, se expone una estructura denominada Windmännstatten (**Figura 8**), el cual es el resultado de un intercrecimiento entre kamacita y taenita producidas por un enfriamiento muy lento durante un espacio temporal muy prolongado. Las Octaedritas se clasifican de acuerdo al grosor de sus bandas, el cual depende del contenido de níquel total del meteorito (**Tabla 4**) (Scott y Wasson, 1975).

Figura 8

Formación de la estructura Windmännchen.



Nota. (a) El crecimiento de kamacita tiene lugar en las ocho esquinas del hexaedro de taenita a medida que disminuye la temperatura, (b) la kamacita empieza a crecer en caras a 45° de las seis de las esquinas de la taenita, (c) la estructura se convierte gradualmente en un octaedro, compuesto tanto de kamacita como de taenita. Tomado de Norton, 2002.

-Ataxitas (D): El nombre ataxita viene del griego "sin estructura", un buen nombre ya que no es posible detectar ninguna estructura interna en estos meteoritos. La designación D viene del alemán 'Dichte Eisen', que significa hierro denso. Estos meteoritos están compuestos casi exclusivamente por taenita y son lo que tienen la mayor cantidad de níquel. (Norton & Chitwood, 2008).

Tabla 4

Clasificación estructural de los meteoritos metálicos y su relación con los modernos grupos químicos.

Clasificación Estructural y Química de los meteoritos metálicos				
Clase Estructural	Textura	Espesor de banda de kamacita (mm)	Niquel (%)	Grupo Químico relacionado
Hexahedritas (HEX)	Lineas de Neuman	>50	4.5-6.5	IIAB, IIG
Octahedritas (O)	Lineas Windmanstätten			
	Octahedrita muy gruesa (Ogg)	3.3-50	6.5-7.2	IIAB, IIG
	Octahedrita gruesa (Og)	1.3-3.3	6.5-8.5	IAB, IIC, IIE, IIIAB, IIIE
	Octahedrita media (Om)	0.5-1.3	7.4-10.3	IAB, IID, IIE, IIIAB, IIIF
	Octahedrita fina (Of)	0.2-0.5	7.8-12.7	IID, IIICD, IIIF, IVA
	Octahedrita muy fina (Off)	<0.2	7.8-12.7	IIC, IIICD
	Octahedrita plessítica (Opl)	<0.2, husillos	Husillos de kamacita	IIC, IIF
Ataxita (D)		Ninguna	>16.0	IIF, IVB

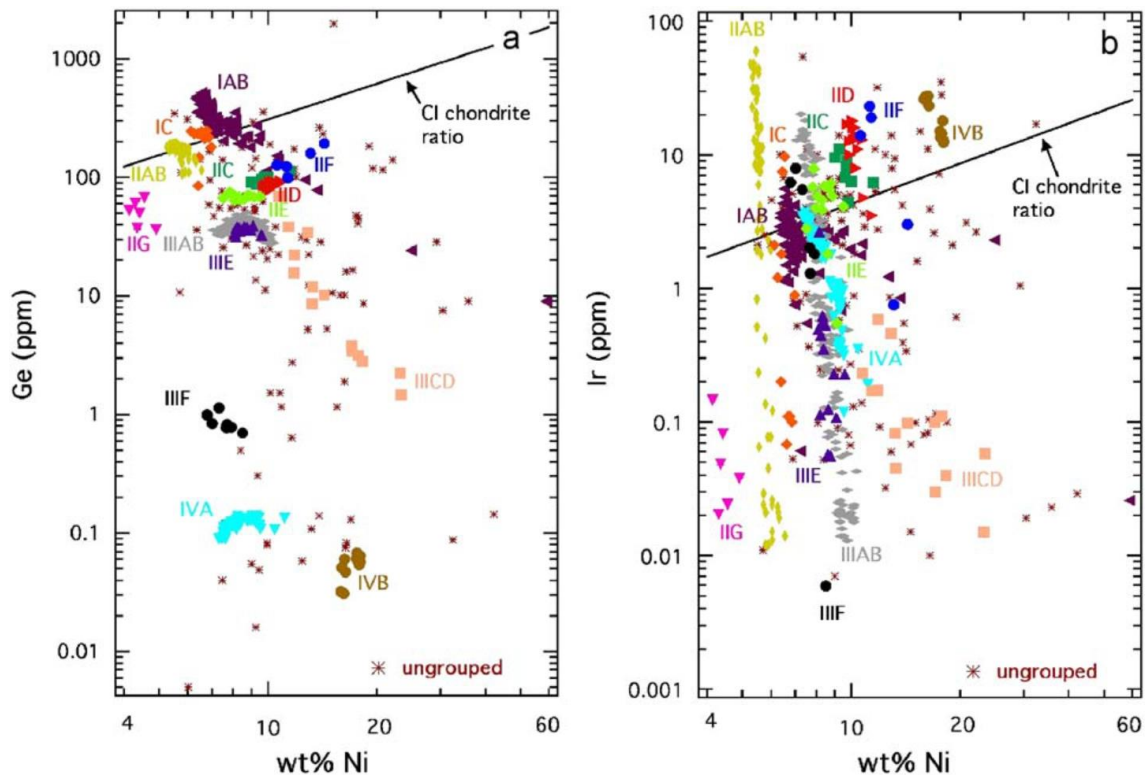
Nota. Tomado de Norton & Chitwood, 2008.

Clasificación Química: Esta clasificación está basada en el contenido de elementos menores y traza. La primera parte de la clasificación está basada en la concentración de Galio y Germanio, divididos en 4 clases I-IV en orden decreciente en cuanto a su concentración, el Ga y el Ge se grafican vs el níquel (Lovering *et al.*, 1957). También se usan otros elementos como iridio, oro, cobalto y fósforo para discriminar los grupos (Krot *et al.*, 2014). La siguiente parte de la clasificación está dada gracias a los análisis que realizaron Wasson y colegas entre 1966 y 1975 para realizar mayores discriminaciones en la clasificación. De esa manera actualmente se tienen 14 grupos químicos (**Figura 9**) los cuales son: IAB, IC, IIAB, IIC, IID, IIE, IIF, IIG, IIIAB, IIICD,

III E, III F, IV A, IV B. Así mismo los meteoritos que no entran en ninguno de estos grupos se les denominada Anómalos (Scott y Wasson, 1975).

Figura 9

Representación logarítmica de las relaciones:(a) Ge vs. Ni y (b) Ir vs. Ni de todas las composiciones de los meteoritos metálicos.



Nota. Los grupos químicos se muestran en distintos colores y símbolos. Tomado de Goldstein *et al.*, 2009.

8. Meteoritos en Latinoamérica

El desarrollo de la Ciencia Meteorítica en Latinoamérica está ligado a la cantidad de especímenes que han sido encontrados en el territorio de cada país. En este apartado se presentan los meteoritos caídos o hallados en cada uno de los países latinoamericanos con su debida clasificación presentes en la Meteoritical Bulletin Database (MBDB) (**Tabla 5**).

Existen actualmente 63694 meteoritos validados en el mundo de los cuales 1989 corresponden a especímenes de países latinos donde la gran mayoría de éstos se han encontrado en el desierto de Atacama ubicado en Chile (**Figura 10**).

Tabla 5

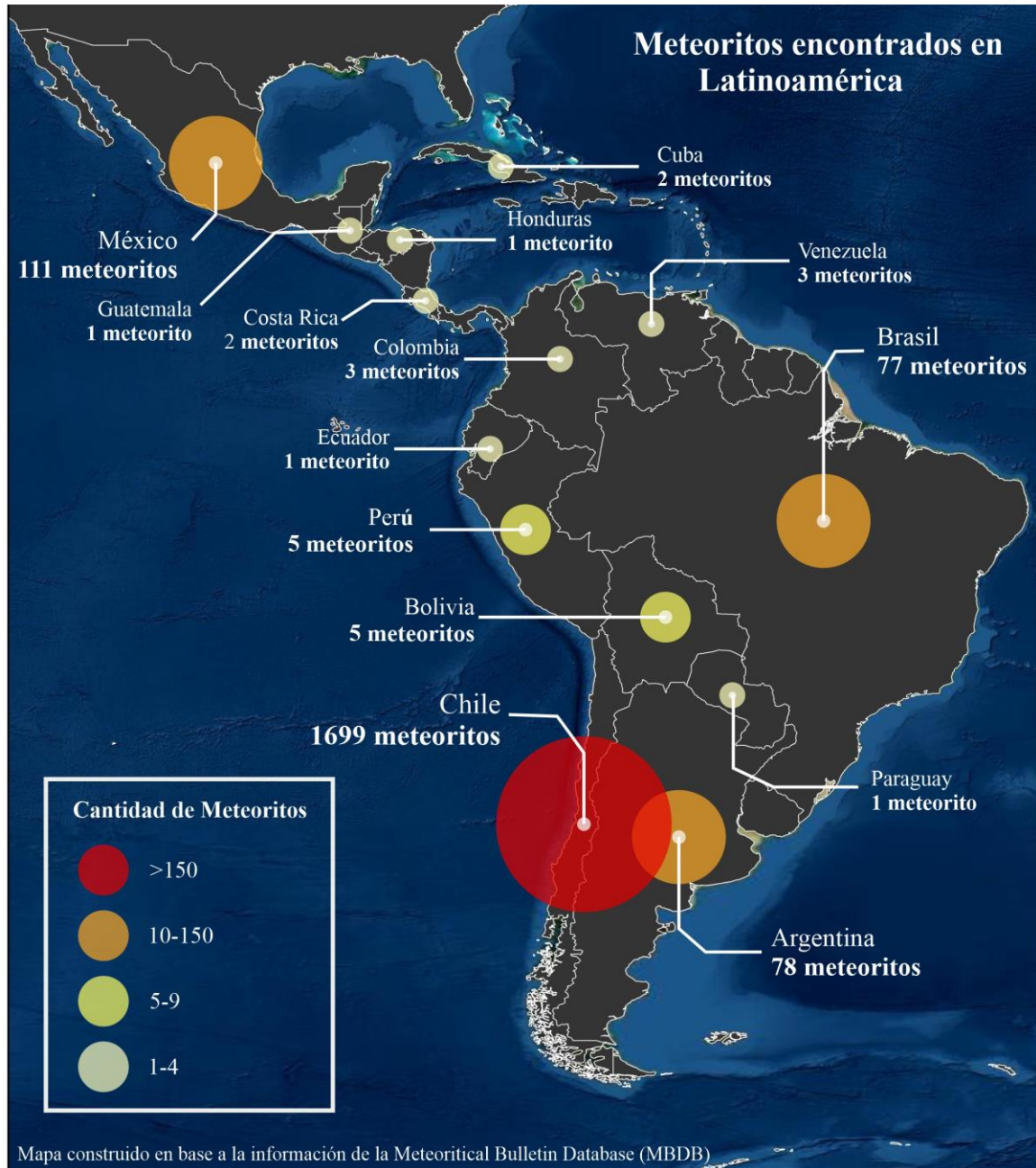
Meteoritos en Latinoamérica.

País	Condritas					Acondritas	Metal- rocoso	Metálicos	Total Meteoritos
	OC	C	E	R	K				
Argentina	52	1	-	-	-	6	1	18	78
Bolivia	2	1	-	-	-	-	-	2	5
Brasil	33	-	-	-	-	5	1	38	77
Chile	1580	36	5	1	-	16	8	53	1699
Colombia	2	-	-	-	-	-	-	1	3
Costa Rica	1	1	-	-	-	-	-	-	2
Cuba	1	-	-	-	-	-	-	1	2
Ecuador	1	-	-	-	-	-	-	-	1
El Salvador	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Guatemala	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Haití	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Honduras	-	-	-	-	-	-	-	1	1
México	46	1	-	-	-	3	3	58	111
Nicaragua	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Panamá	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Paraguay	1	-	-	-	-	-	-	-	1
Perú	4	-	-	-	-	-	-	1	5
República Dominicana	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Uruguay	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Venezuela	2	-	-	-	-	-	-	1	3

Nota. Información tomada de la Meteoritical Bulletin Database (MBDB) de acuerdo a los estándares establecidos por el Meteorite Nomenclature Committee (NomCom) de la Meteoritical Society. Recopilación realizada el 19/01/2021.

Figura 10

Mapa de Meteoritos en Latinoamérica.



Nota. Mapa construido por el autor en base en la información obtenida del Meteorical Bulletin Database (MBDB).

9. Técnicas de Estudio

9.1 Microscopía Óptica de Luz Transmitida y Luz Reflejada

La microscopía óptica de luz transmitida para materiales transparentes y luz reflejada para materiales opacos, es una técnica que sirve para la identificación de fases minerales y relaciones texturales como forma, tamaño, intercrecimientos, etc., entre los materiales que componen las rocas o cualquier material, en este caso meteoritos, con base en las propiedades ópticas tanto en lámina delgada como en lámina pulida. La **Figura 11** presenta esquemas con las partes tanto del Microscopio Petrográfico y el Mineragráfico.

Figura 11

Tipos de microscopios compuestos de luz polarizada.

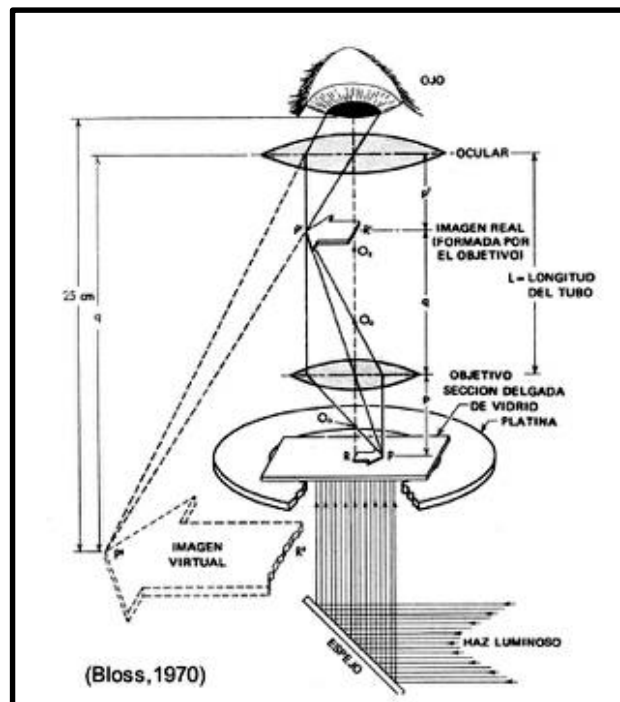


Nota. A la derecha, un esquema de las partes del microscopio petrográfico donde su fuente de luz se encuentra en la parte inferior del sistema. A la izquierda un esquema de las partes del microscopio mineragráfico en donde su fuente de luz se encuentra en el tubo trasero del sistema. Tomado de Victoria-Morales, 2019.

Es un microscopio compuesto basado en la combinación de dos sistemas de lentes convergentes (ocular y objetivo) (**Figura 12**). El objetivo forma una imagen real del objeto estudiado situada a menor distancia del ocular que la distancia focal de éste, de manera que el ocular forma una imagen virtual, aún más aumentada, en una posición por debajo de la platina del microscopio. La luz es polarizada mediante 2 polarizadores orientados a 90 grados el uno del otro. (Bloss, 1970)

Figura 12

Esquema del recorrido de la luz en un microscopio petrográfico.



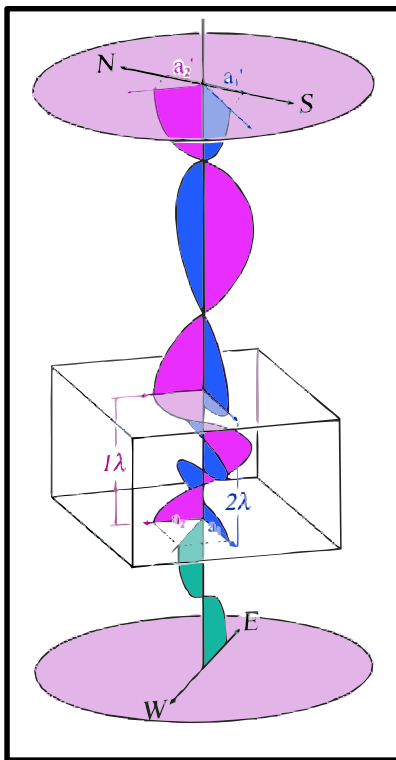
Nota. Tomado de Bloss, 1970.

El sistema de iluminación para los microscopios de luz transmitida se encuentra en la parte inferior del equipo, de tal modo que la luz pueda atravesar la muestra y los diferentes polarizadores hasta llegar al ocular, mientras en los microscopios de luz reflejada, la reflexión de la luz que incide sobre la muestra se logra mediante un prisma de

reflexión colocado dentro el tubo del microscopio. El microscopio dispone de una platina portamuestras giratoria que permite estudiar los efectos cristalográficos producidos por la interacción de la luz polarizada con la muestra en diferentes direcciones cristalográficas, además, en los microscopios petrográficos se utilizan accesorios específicos como los compensadores (lambda y cuña de cuarzo) y la lente de Bertrand (Raith *et al*, 2012; Victoria-Morales, 2019).

Figura 13

Representación del comportamiento de la luz en un microscopio de luz transmitida en polarizadores cruzados.



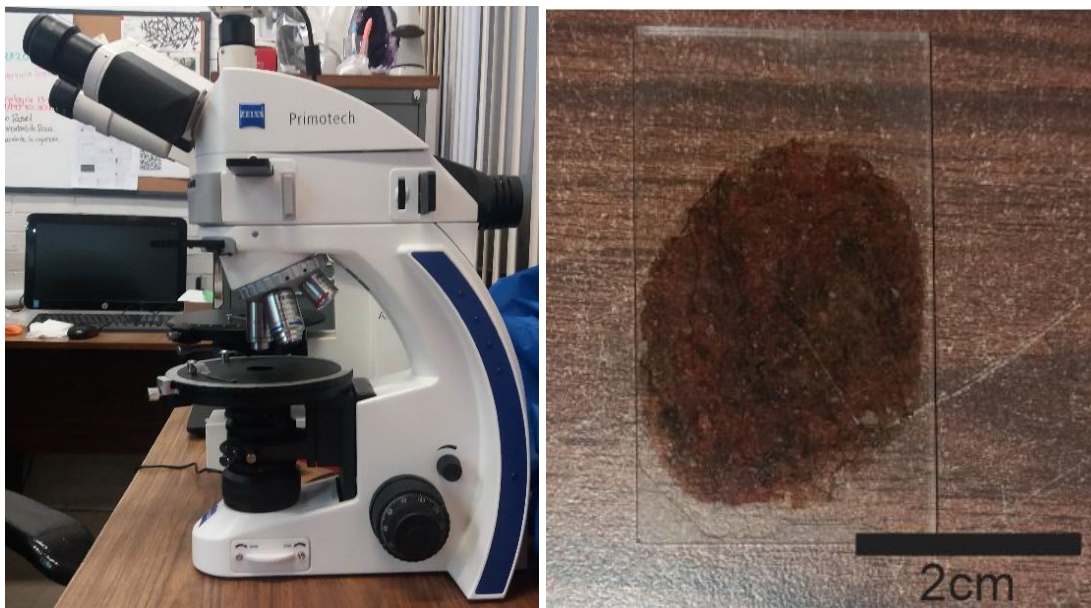
Nota. Ejemplo de la luz atravesando un cristal birrefringente que está en posición diagonal. La luz inicial (verde) polarizada atraviesa el mineral y se descompone en 2 rayos perpendiculares entre sí (azul y morado) y con diferente longitud de onda provocando una interferencia característica que es estudiada para determinar su correspondencia con los minerales. Tomado de Raith *et al.*, 2012.

El estudio mineralógico y petrográfico se realizó en el Laboratorio de Yacimientos Minerales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México con un Microscopio Carl Zeiss Primotech (**Figura 14**) con lámparas de iluminación para luz transmitida y luz reflejada, un ocular variable entre 10-20 aumentos y objetivos de 2.5, 5, 10, 20 y 40 aumentos.

Con este equipo se estudiaron las muestras en lámina delgada pulida (para la condrita) y en lámina pulida (para el metálico), prestando especial atención a la mineralogía, texturas, grado de metamorfismo de impacto y abundancias relativas de los distintos componentes de las de cada uno de los 2 meteoritos. Así mismo se seleccionaron las áreas y elementos concretos sobre los que se realizaron determinaciones composicionales puntuales mediante el uso de SEM-EDS.

Figura 14

Microscopio Petrográfico Zeiss Primotech y una sección delgada pulida del meteorito Juanita de Ángeles.



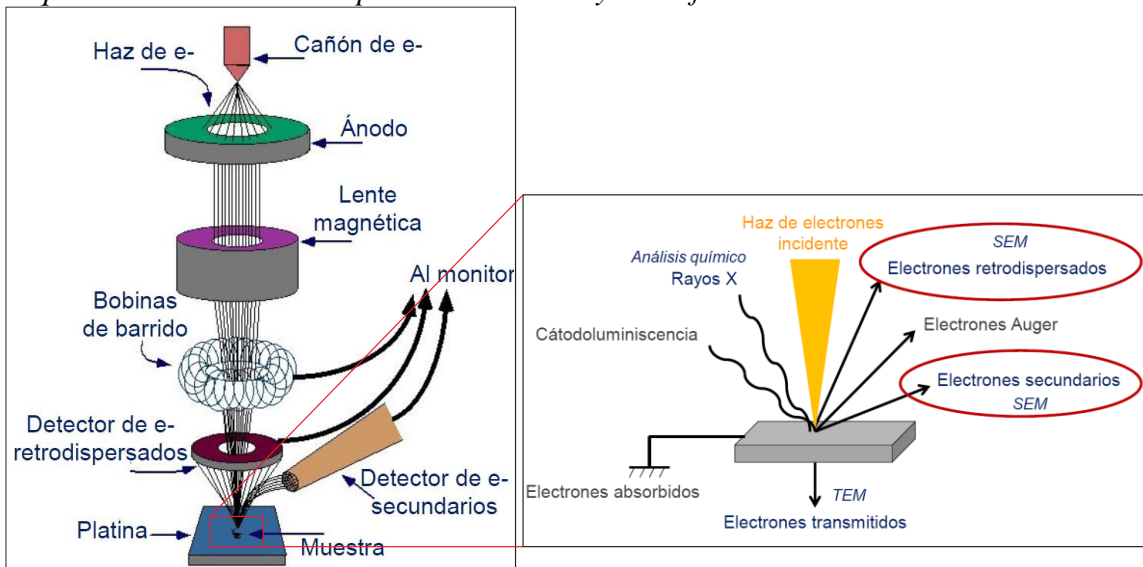
Nota. Fotografías del autor.

9.2 Microscopía Electrónica de Barrido con acoplado a un Espectrómetro de Energía Dispersiva De Rayos X (SEM-EDS)

El Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning Electron Microscopy – SEM por sus siglas en inglés) es un instrumento que permite la observación de alta resolución y caracterización de materiales mediante el estudio de superficies. El fundamento del SEM radica en que los electrones emitidos por un cañón de electrones que pasan a través de una columna que genera un vacío variable, al momento de chocar con la muestra, se generan distintos tipos de señales (electrones secundarios, retrodispersados, rayos X, Auger, etc.) (Figura 15) que se utilizan para examinar muchas de sus características como su topografía y composición química (Welton, 2003; Breed, 2005; Goldstein *et al.*, 2017).

Figura 15

Esquema básico de los componentes del SEM y sus diferentes interacciones.



Nota. A la izquierda un esquema básico de los componentes del Microscopio Electrónico de Barrido. A la derecha las diferentes interacciones que se producen cuando el haz de electrones incide sobre la muestra siendo los Electrones Retrodispersados (BSE) y la Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) los utilizados para los análisis de este trabajo. Tomado y modificado de Universidad de Alicante, 2012.

Las imágenes obtenidas con Electrones Secundarios (SE) se usan típicamente para obtener detalles de la topografía de los especímenes, pero las imágenes obtenidas con Electrones Retrodispersados (BSE) revelan variaciones en la composición química para un material plano donde las regiones con colores más blancos indican la presencia de elementos con altos números atómicos y las regiones más oscuras indican elementos con números atómicos más bajos (Welton, 2003; Ipohorski y Bozzano, 2013).

Acoplados al SEM, pueden estar diferentes detectores como los Espectrómetros de Rayos X: EDS (Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X) y WDS (Espectroscopía de Longitud de Onda de Rayos X).

El analizador por dispersión de energía de rayos X (EDS) es una técnica de análisis no destructiva donde la radiación utilizada son los rayos X característicos que emite la muestra bajo el bombardeo de electrones. El análisis de esta radiación proporciona una información analítica sobre la composición de zonas de la muestra de hasta unas cuantas micras de diámetro. (Jenkins, 1999; Verma, 2007; Donais & George, 2018).

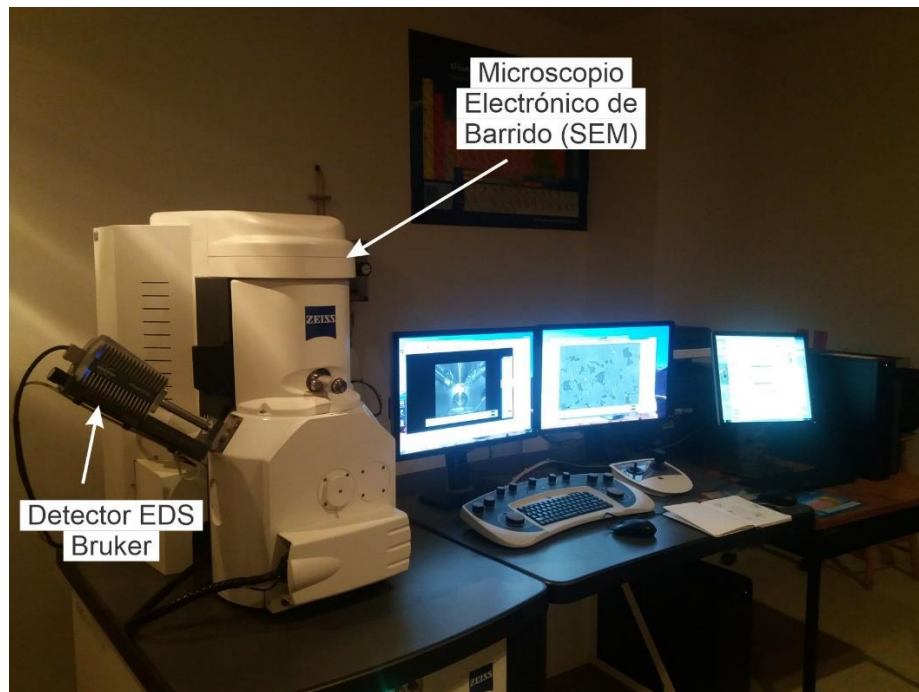
El analizador por dispersión de Longitud de onda de rayos X (WDS), es una técnica de análisis no destructiva, se distingue del EDS por el hecho de que los rayos X son dispersados de acuerdo con su longitud de onda mediante la reflexión de Bragg. Se pueden hacer análisis de elementos presentes en la muestra en muy baja concentración. (Jenkins, 1999; Breed, 2005; Verma, 2007).

El análisis de esta radiación proporciona una información analítica puntual sobre la composición del total o de zonas de la muestra de hasta unas cuantas micras de diámetro. (Welton, 2003; Breed, 2005; Goldstein *et al.*, 2017)

El microscopio electrónico de barrido que se usó en este trabajo se encuentra en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. El equipo es un ZEISS EVO MA10 (**Figura 16**) de alto vacío con filamento de Boro-Lantano y un sistema de procesamiento de imágenes, por detección de electrones secundarios y retrodispersados generados por la interacción de un haz de electrones con las muestras. Acoplado a éste se encuentra un detector EDS (Espectroscopía de Energía Dispersiva) de marca Bruker donde la radiación medida son los rayos X característicos que emite la muestra bajo el bombardeo de los electrones. El análisis de esta radiación proporciona una información analítica puntual sobre la composición del total o de zonas de la muestra de hasta unas cuantas micras de diámetro.

Figura 16

Microscopio Electrónico de Barrido SEM marca ZEISS EVO MA10 con su detector de Energía dispersiva (EDS) marca Bruker.



Nota. Fotografía del autor.

9.3 Acidificación para revelar la estructura Widmanstätten en meteoritos metálicos.

Esta técnica debe su nombre al conde Alois von Widmanstätten quien la descubrió en 1808. Este procedimiento permite hacer visible la estructura Widmanstätten en una superficie pulida de un meteorito que contenga las fases metálicas de intercrecimiento Fe-Ni: kamacita (4-7% de Ni) y taenita (20-45% de Ni).

Este procedimiento consiste de 3 fases (Norton, 2002; Gil y Concha, 2006):

- 1) Cortar de manera lisa y recta la superficie del meteorito que se quiera analizar.
- 2) Realizar un pulido progresivo de la superficie lisa a analizar, comenzando con lijas de malla 280 y continuar progresivamente con lijas malla 360, 500, 600, 1000 y 1200 para finalmente llevar la superficie a brillo de espejo con alúmina de 1 μm sobre un paño de billar.
- 3) Una vez pulida la superficie a brillo de espejo, se elabora una solución de etanol con ácido nítrico al 10% el cual se aplica en la superficie y se deja actuar durante 2 minutos lo cual exhibe la denominada textura Widmanstätten.

El procedimiento funciona porque la solubilidad de la kamacita y la taenita respecto al ácido nítrico difiere sustancialmente. La kamacita se disuelve más fácilmente mientras que la taenita resiste la disolución. Esto afecta el brillo de los dos minerales, la kamacita aparece de un gris opaco mientras que la taenita aparece de color plateado brillante (o negro dependiendo de la dirección de la iluminación).

El tratamiento se realizó en el laboratorio de Yacimientos Minerales de la Universidad Nacional Autónoma de México, siguiendo el procedimiento anteriormente

descrito con los estándares de seguridad necesarios para la protección física de todos los involucrados (**Figura 17**).

Este procedimiento se realizó posterior al análisis minerográfico y de microscopía electrónica debido a que la disolución producto del ácido nítrico afecta las características originales de los minerales.

Figura 17

Aplicación del ácido nítrico a una muestra representativa del meteorito Toluca.



Nota. En este punto del procedimiento ya es visible la estructura Widmanstätten en donde las bandas de kamacita se acomodan con un ángulo entre ellas de 45° y cuyo espesor permite clasificar al meteorito dentro de la clasificación estructural. Fotografía del autor.

10. Resultados

10.1 JUANITA DE ÁNGELES

10.1.1 Petrografía y Minerografía

Éste meteorito presenta una textura porfirítica. La condrita contiene diferentes tamaños, tipos, y morfologías de cóndrulos con variada composición mineral. Los cóndrulos son poco abundantes (15%), varían en tamaño desde los 20 μm hasta 1.2mm de diámetro compuestos de forsterita (olivino enriquecido ligeramente en Mg) con colores de interferencia de finales del segundo orden a inicios del tercer orden y relieve muy alto, hiperstena con colores de interferencia grises de primer orden y relieve alto y augita con colores de interferencia de segundo orden y relieve alto, además, altamente fracturados y rellenos con minerales metálicos Fe-Ni (**Figura 19, E-F**) que a su vez están siendo alterados parcial y casi totalmente a goethita.

Los cóndrulos presentan texturas olivino-piroxeno porfídico (POP), olivino porfídico (PO), piroxeno porfídico (PP), piroxeno radial (RP), olivino en barras (BO), cóndrulo criptocristalino (C) y olivino-piroxeno granular (GOP) (**Figuras 18-22**) según la clasificación de Gooding & Keil, (1981). Los límites de los cóndrulos son más o menos discernibles, los de mayor tamaño están relativamente bien definidos pero los de menor tamaño tienen una definición menor. Las morfologías de los cóndrulos varían desde subredondeados hasta ovalados en algunos cristales, pero la mayoría presentan una forma muy irregular.

La matriz, mucho más abundante (85%) que los cóndrulos, se compone principalmente de material recristalizado y por cristales que, por su textura, se reconocen

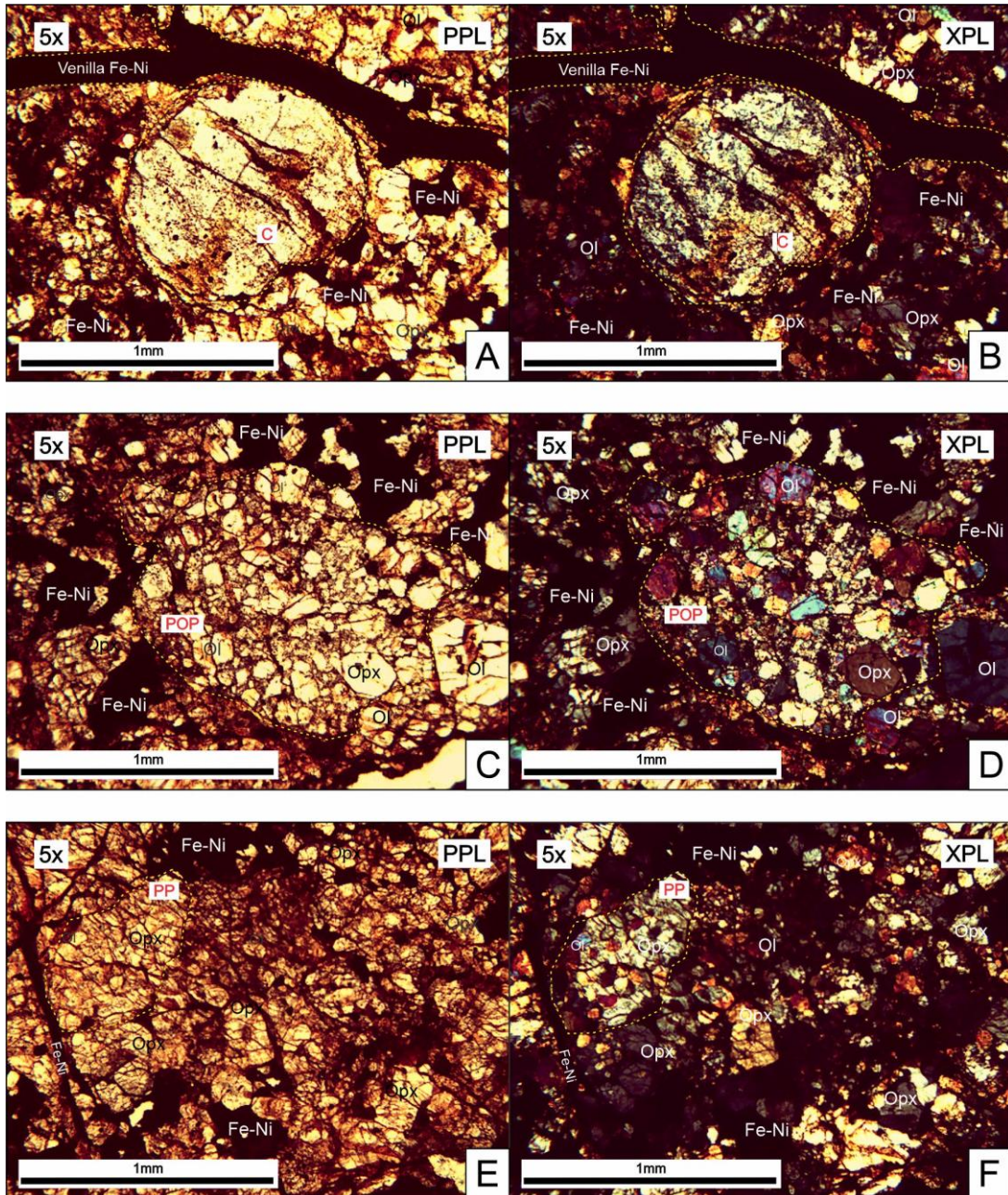
como restos de cóndrulos fragmentados (**Figura 21, C-D**) entre los que destacan olivinos y piroxenos, así como unos pocos fragmentos de plagioclasa. La matriz del meteorito también está compuesta de material de grano fino o mesostasis que se encuentra rellenando los espacios entre los fragmentos, además, también contiene abundantes cristales de minerales metálicos como kamacita, taenita, troilita y cromita que no superan los 1.3 milímetros de tamaño y a veces se encuentran interconectados por venillas que cortan la roca, formando la textura melt pocked (**Figura 18, E-F; Figura 22, A-B**).

Algunos cristales de olivino presentan varios sets de fracturas planares tal cual se evidencian en la **Figura 21, A-D**, los cuales, junto con las venillas de impacto y las bolsas de fusión de hasta 0.3 mm de espesor de carácter metálico son indicadores de por lo menos un evento de choque importante que sufrió el meteorito el cual creó estas texturas características (Stöffler *et al.*, 1991).

Los minerales secundarios presentes en el meteorito están alterando entre el 30% y el 50% a los minerales metálicos originales kamacita, taenita y troilita tanto de la matriz como de las venillas y las bolsas de fusión, indicando que el meteorito estuvo siendo atacado por agentes terrestres que meteorizaron la roca durante un buen tiempo antes de su hallazgo en el año 1992. Los minerales silicatados se encuentran fuertemente fracturados, pero no presentan productos de reemplazamiento más allá de aquel material que se encuentra rellenando las fracturas los cuales típicamente son minerales metálicos.

Figura 18

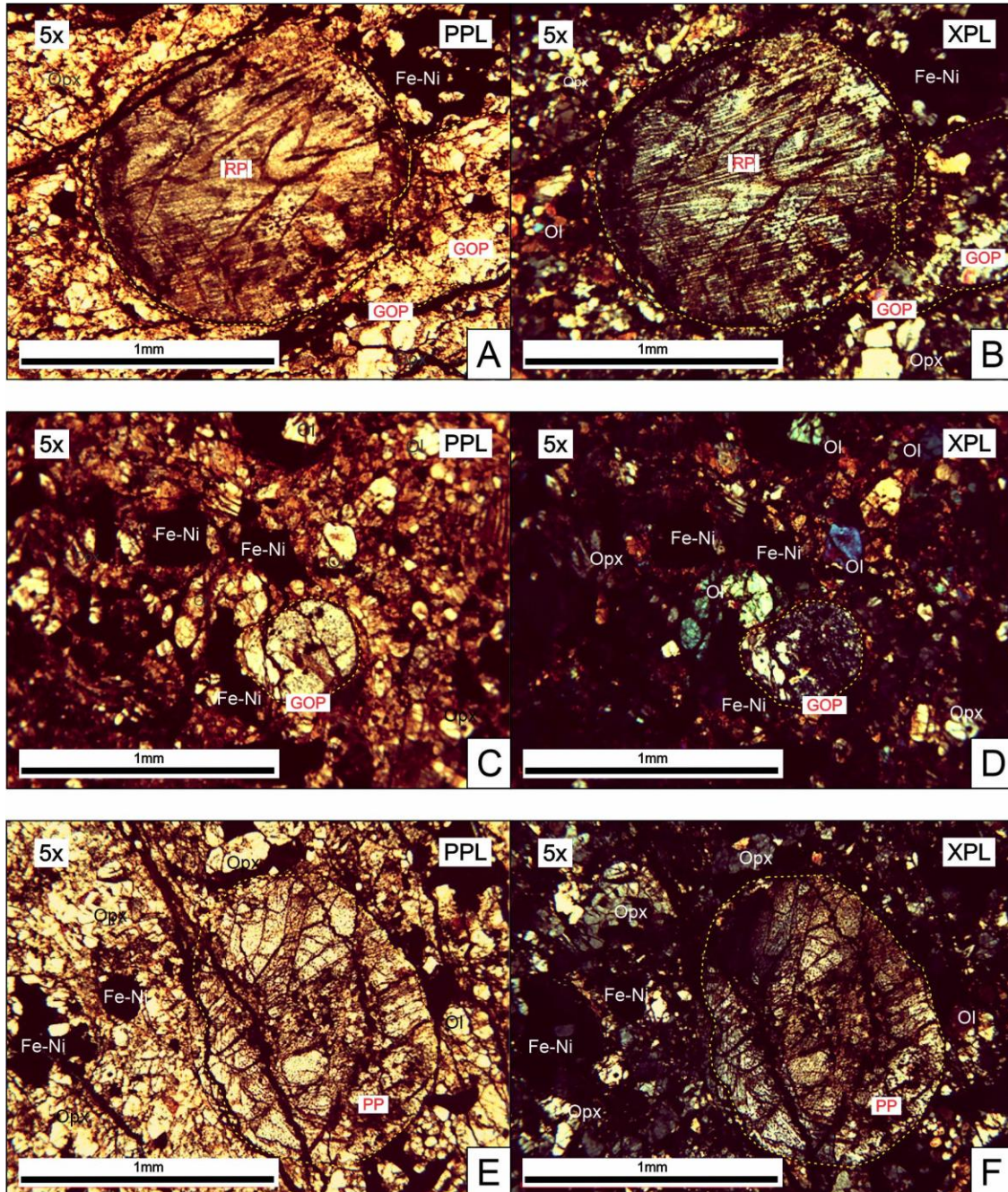
Microfotografías de cóndrulos C, POP y PP.



Nota. [A-B] Cóndrulo criptocristalino (C) en contacto con una venilla Fe-Ni de 0.15mm de espesor y una matriz de fragmentos de olivinos, piroxenos y minerales Fe-Ni. [C-D] Cóndrulo porfirítico de olivino-piroxeno (POP) ovalado con un diámetro de 1.2mm cuyo borde no es muy irregular y sus granos internos son subhedrales a anhedrales muy fracturados. [E-F] Cóndrulo porfirítico de piroxeno (PP) con inclusiones poiquilíticas de olivino, la matriz está conformada por fragmentos de cóndrulos reconocibles en algunas formas ovaladas, la zona está altamente fracturada y rellena con minerales Fe-Ni. Ol=Olivino; Opx=Ortopiroxeno; Fe-Ni=Aleaciones metálicas kamacita y taenita.

Figura 19

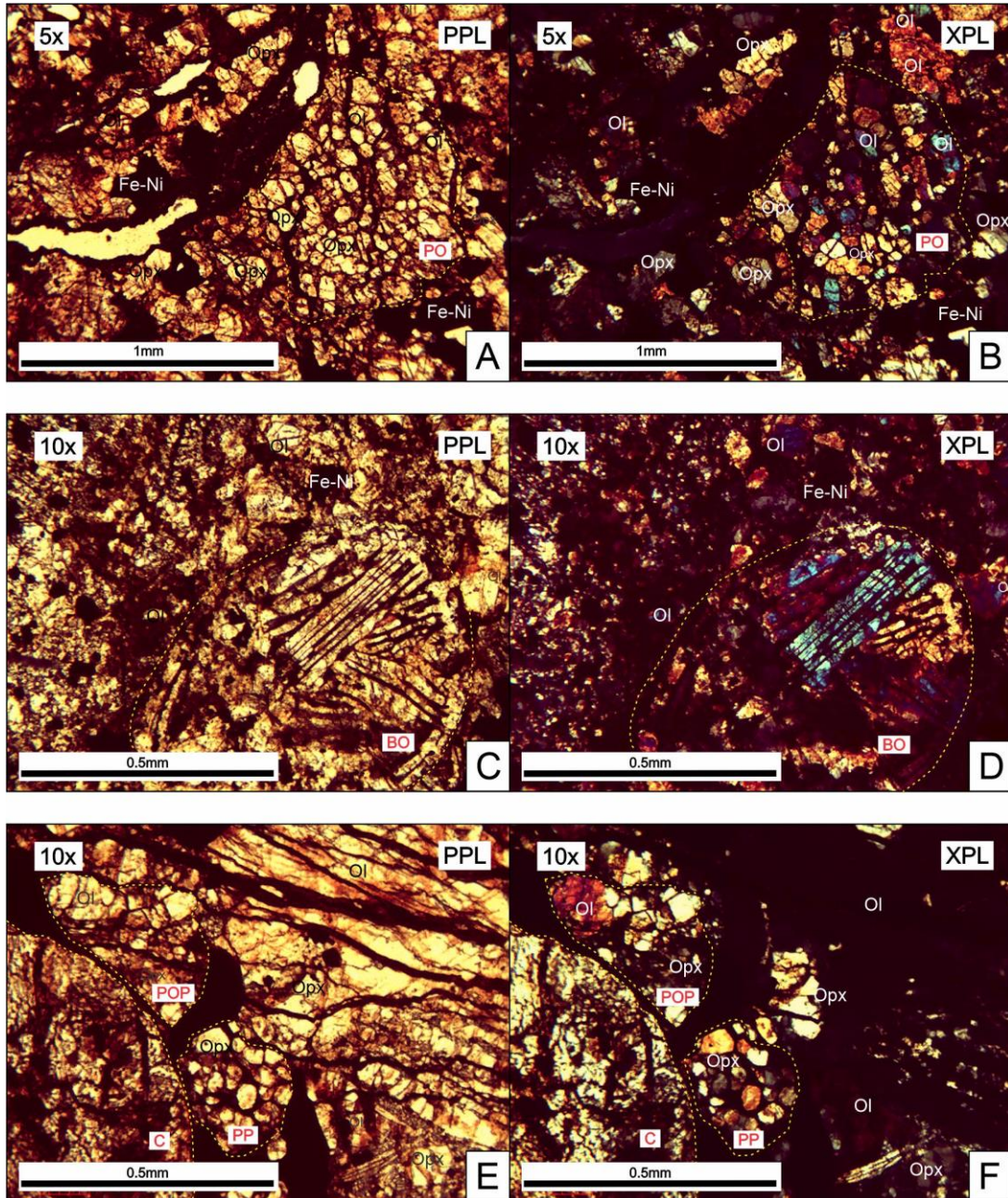
Microfotografías de cóndrulos RP, GOP y PP.



Nota. [A-B] Cóndrulo de piroxeno radial (RP) de 1mm de diámetro altamente fracturado en matriz de fragmentos de cóndrulos y minerales Fe-Ni. [C-D] Cóndrulo granular de piroxeno-olivino (GOP) rodeado de fragmentos angulares donde se distinguen texturas de cóndrulos de olivinos altamente fracturados, las fracturas rellenas con minerales Fe-Ni. [E-F] Cóndrulo ovalado porfirítico de piroxeno (PP) con extinción ondulosa de 1.2mm de diámetro y fuertemente fracturado con relleno de minerales Fe-Ni. Ol=Olivino; Opx=Ortopiroxeno; Fe-Ni=Aleaciones metálicas kamacita y taenita.

Figura 20

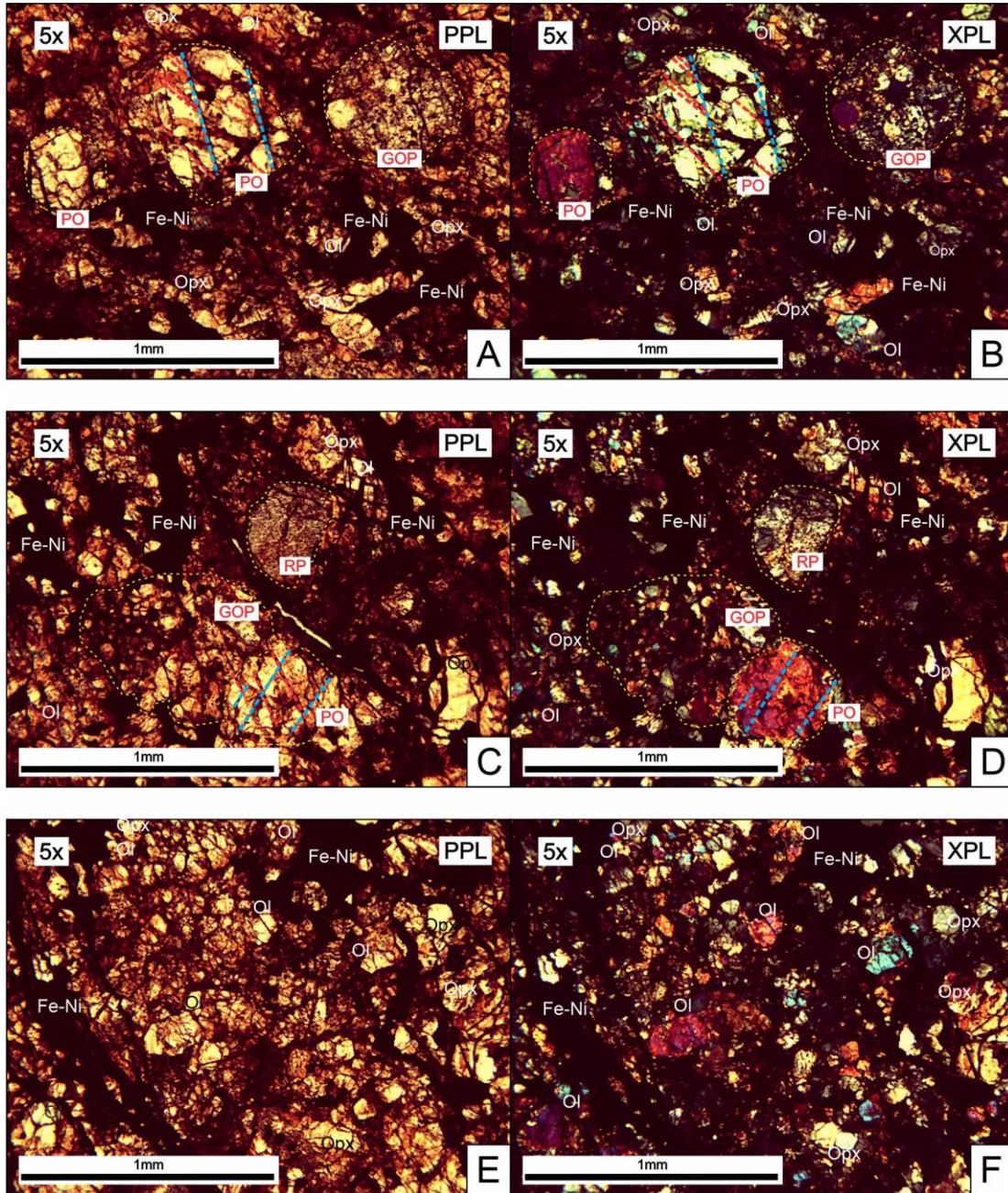
Microfotografías de cóndrulos PO, BO, C, POP y RP.



Nota. [A-B] Cóndrulo porfirítico de olivino (PO) con granos subhedrales-anhedrales internos, contorno es muy irregular, en contacto con una venilla Fe-Ni y una matriz de fragmentos de olivinos y ortopiroxenos. [C-D] Cóndrulo en barras (BO) polisomático con un anillo unido en su borde, una matriz recrystalizada de olivinos, piroxenos y minerales Fe-Ni. [E-F] En el centro un pequeño cóndrulo porfirítico de piroxeno (PP) de 0.2mm de diámetro, a la izquierda una parte de un cóndrulo criptocristalino (C) de 0.7mm. Arriba un fragmento de POP, a la derecha un olivino en posición isotrópica muy fracturado. Ol=Olivino; Opx=Ortopiroxeno; Fe-Ni=Aleaciones metálicas kamacita y taenita.

Figura 21

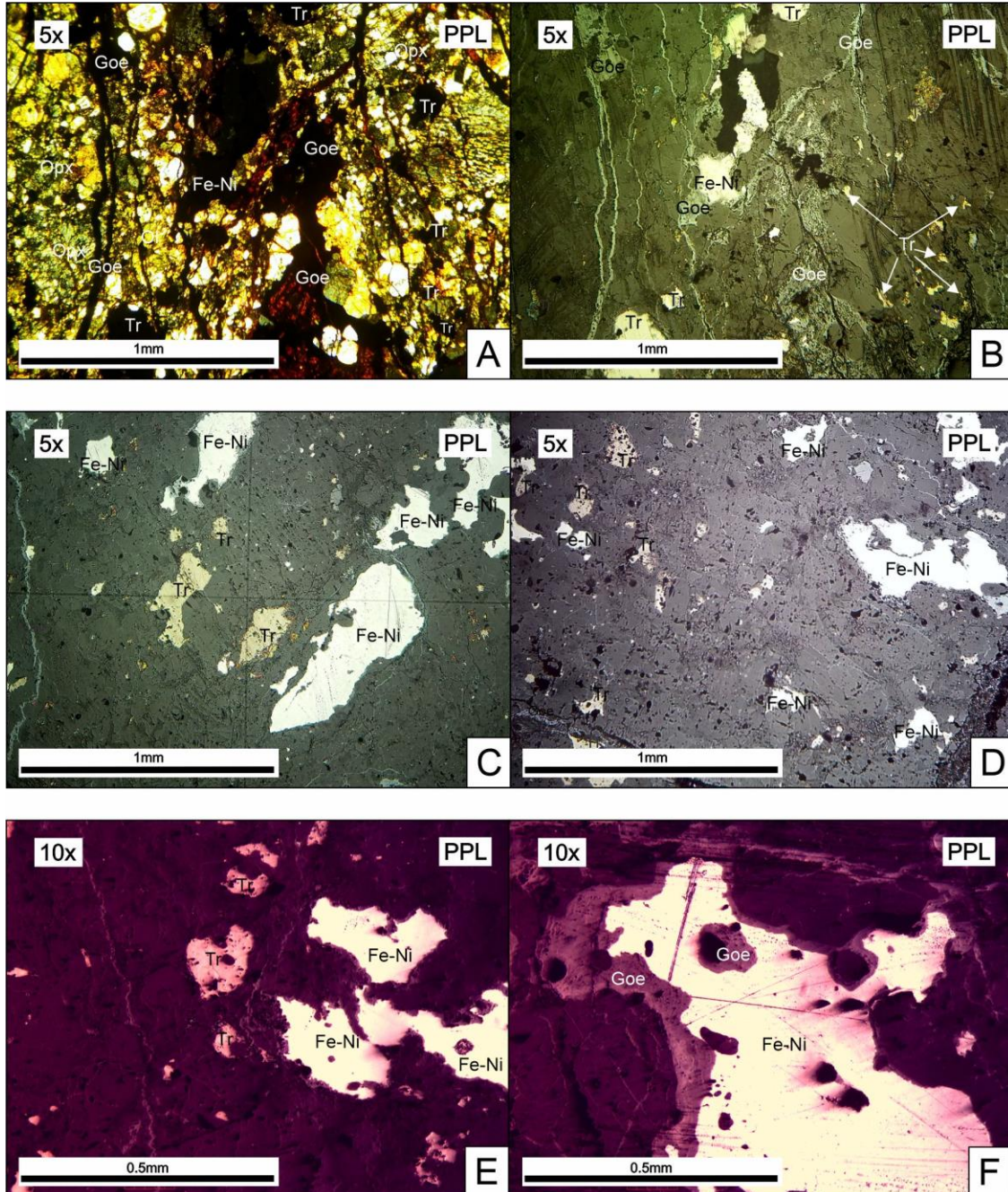
Microfotografías de cóndrulos PO y GOP junto con fracturas planares en olivino.



Nota. [A-B] Al centro un cóndrulo de olivino porfirítico (PO) de 0,62mm de diámetro con 2 sets de fracturas planares marcadas con líneas punteadas rojas y azules. A la derecha un cóndrulo granular de olivino-piroxeno (GOP) de 0.53mm de diámetro, la matriz está recrystalizada. [C-D] Abajo en las figuras se observa un cóndrulo porfirítico de olivino (PO) con 2 sets de fracturas planares en matriz recrystalizada y de cóndrulos fragmentados confirmando el metamorfismo de choque S3. [E-F] Aspecto general de la muestra mayormente conformada por cristales recrystalizados de olivinos y ortopiroxenos, fragmentos de cóndrulos y granos metálicos. Ol=Olivino; Opx=Ortopiroxeno; Fe-Ni=Aleaciones metálicas kamacita y taenita.

Figura 22

Microfotografías de minerales opacos: kamacita, taenita y troilita.



Nota. [A-B] Microfotografías en luz transmitida y reflejada de una misma área contrastando la cantidad de minerales transparentes y minerales opacos. [C-D] Luz reflejada que muestra la abundancia de minerales opacos tales como kamacita, taenita y troilita. (E-F) Fotografías con el brillo disminuido. Donde se observan con mejor detalle los minerales opacos, se denota la baja dureza de la kamacita mostrando el rayado del pulido, así como coronas e inclusiones de alteración a goethita. Ol=Olivino; Opx=Ortopiroxeno; Fe-Ni=Aleaciones metálicas kamacita y taenita; Tr=Troilita; Goe=Goethita.

10.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS)

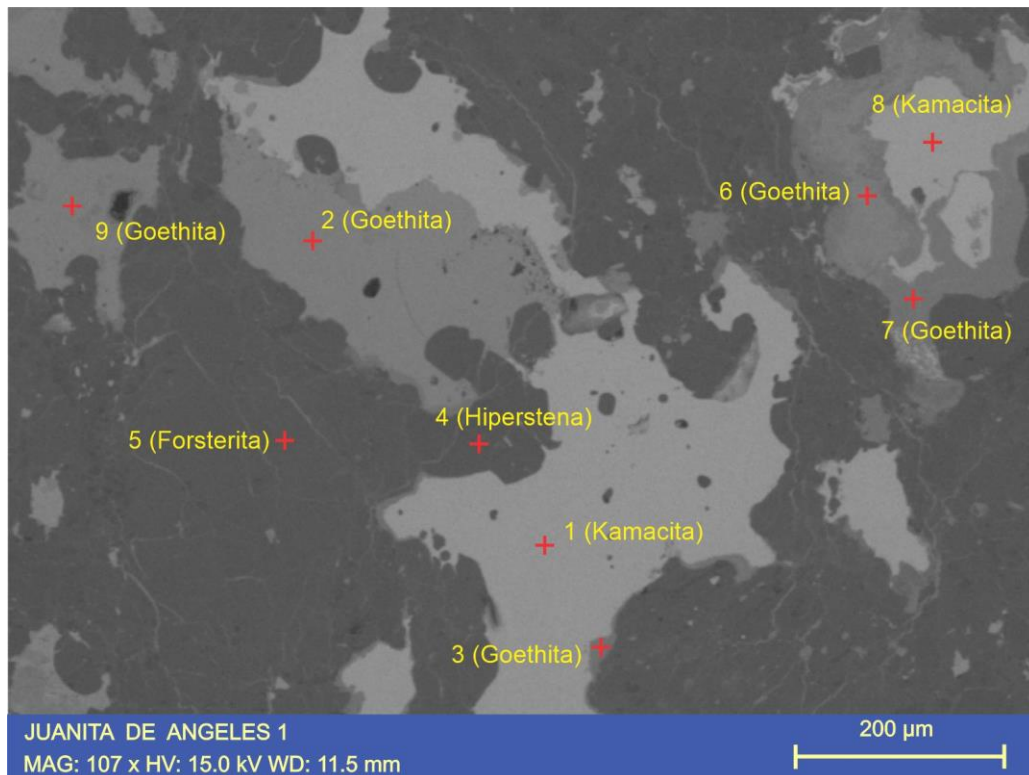
Los análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) con sus análisis químicos puntuales por energía dispersiva (EDS) se realiza posterior al análisis petrográfico y minerográfico en el cual se escogen las áreas para su análisis de detalle.

A continuación, se presentan 7 áreas de interés con 43 análisis puntuales EDS repartidos entre ellas:

-Juanita de Ángeles 1: Microfotografía en la cual se presentan características generales de la matriz, minerales metálicos y su alteración:

Figura 23

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 1.



Nota. Se observan fases de color gris claro relacionadas a minerales metálicos (kamacita), colores grises intermedios relacionados a la alteración de estos últimos, y otra fase gris oscura relacionada a minerales silicatados (forsterita e hiperstena).

Figura 24

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 1.

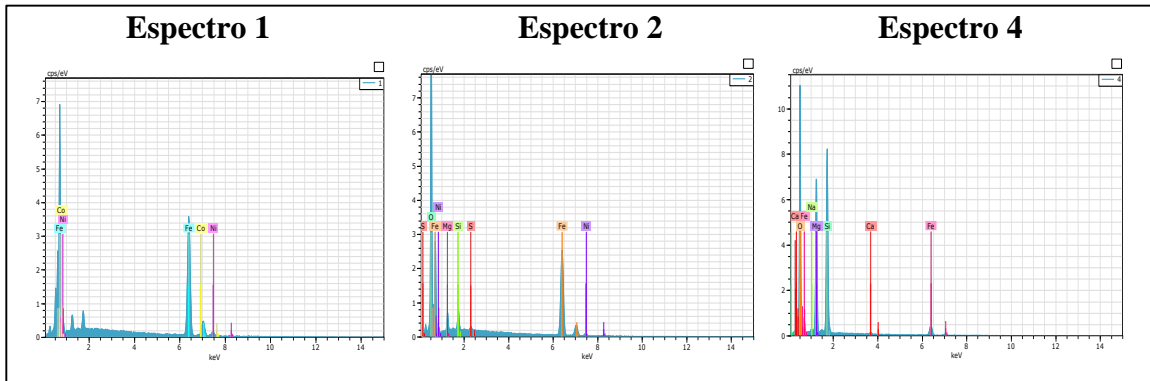


Tabla 6

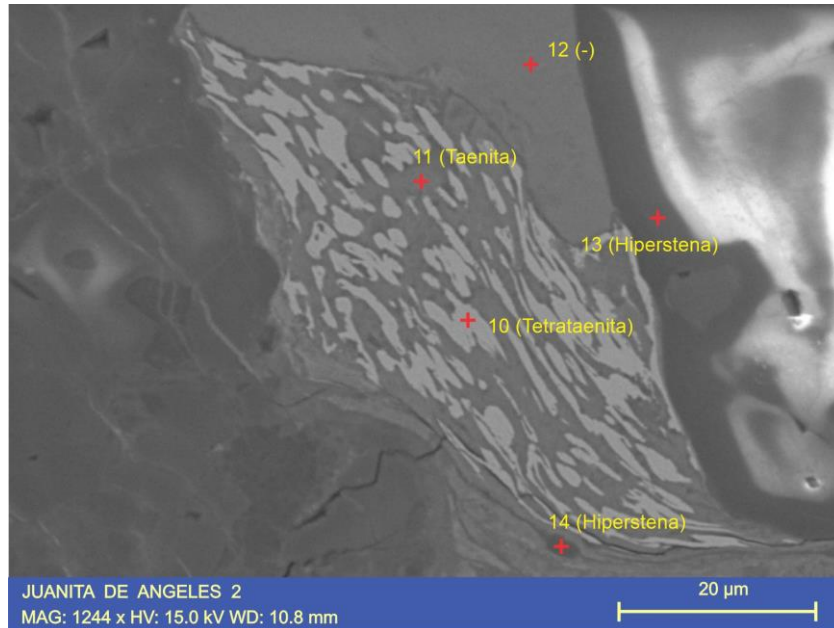
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 1.

Espectro	Elementos (%)			Óxidos(%)							Mineral Interpretado	
	Fe	Ni	Co	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	SO ₃		
1	93.30	5.49	1.21								Kamacita	
2				4.52	87.11	4.28				3.15	0.94	Goethita
3				7.87	82.34	5.58				3.43	0.79	Goethita
4				51.29	15.26	31.88	0.77	0.80				Hiperstena
5				39.61	14.36	46.03						Forsterita
6				6.87	81.90	3.88				6.60		Goethita
7				14.05	73.53	4.78				6.91		Goethita
8	93.65	6.35										Kamacita
9				5.87	84.90	2.88				5.60		Goethita

-Juanita de Ángeles 2: Presenta una estructura de intercrecimiento entre taenita y tetrataenita por fusión producto de metamorfismo de choque de alto grado.

Figura 25

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 2.



Nota. Se presenta el detalle de un intercrecimiento de 2 fases metálicas diferentes enriquecidas en níquel (taenita-tetrataenita) producto de un evento dinámico que fundió el material preexistente y lo recrystalizó.

Figura 26

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 2.

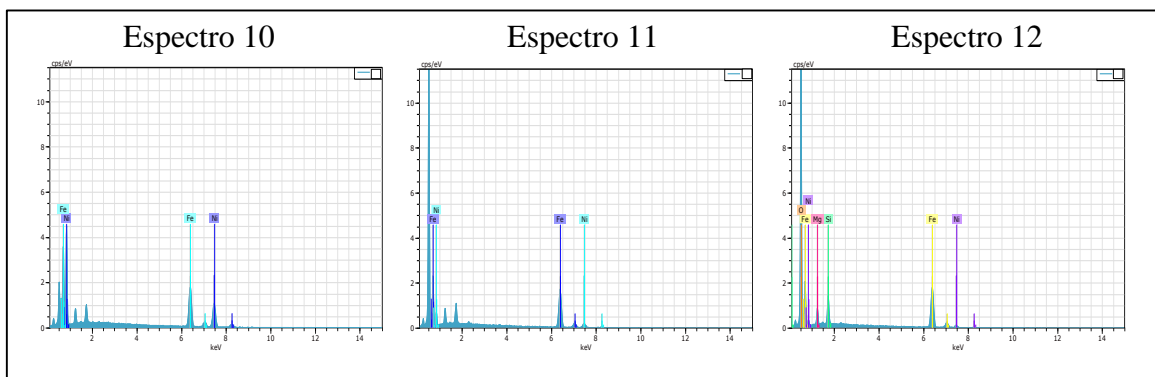


Tabla 7

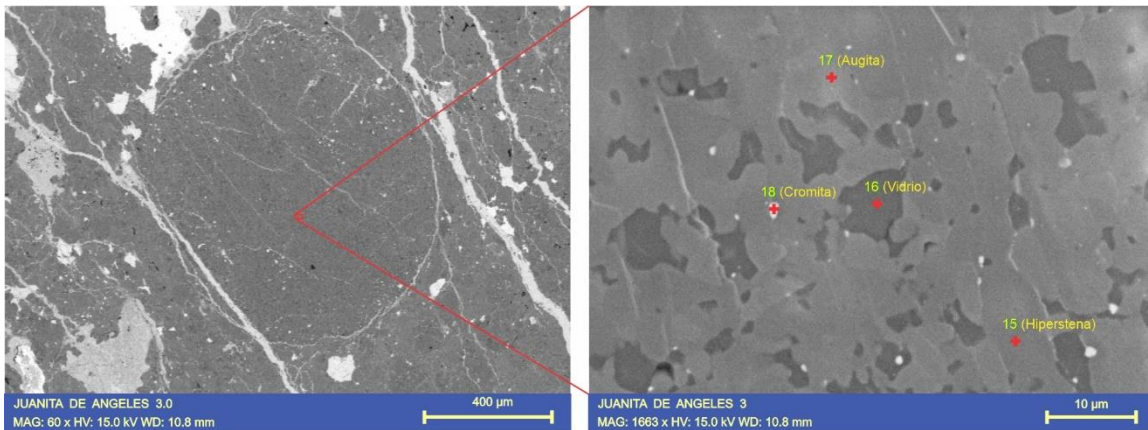
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 2.

Espectro	Elementos (%)		Óxidos(%)				Mineral Interpretado	
	Fe	Ni	SiO ₂	FeO	MgO	CaO		NiO
10	47.41	52.59						Tetrataenita
11	85.28	14.72						Taenita
12			11.76	75.24	6.49		6.51	Pendiente para un próximo análisis más detallado
13			52.18	14.72	32.18	0.92		Hiperstena
14			51.18	17.24	30.76	0.81		Hiperstena

-Juanita de Ángeles 3: Esta imagen presenta el detalle de un cóndrulo criptocristalino (C) y su composición mineralógica.

Figura 27

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3.



Nota. Microfotografía de un cóndrulo criptocristalino con su detalle mostrando que está formado por microcristales de piroxenos (augita e hiperstena), cromita y vidrio.

Figura 28

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3.

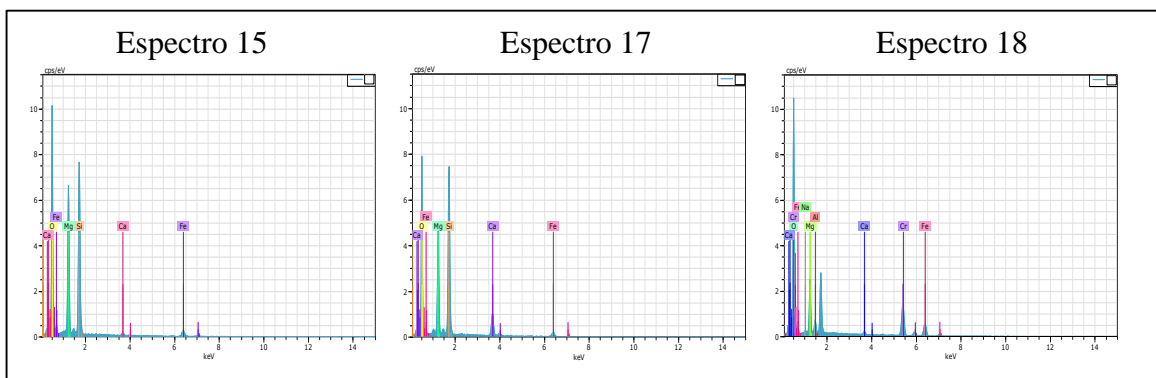


Tabla 8

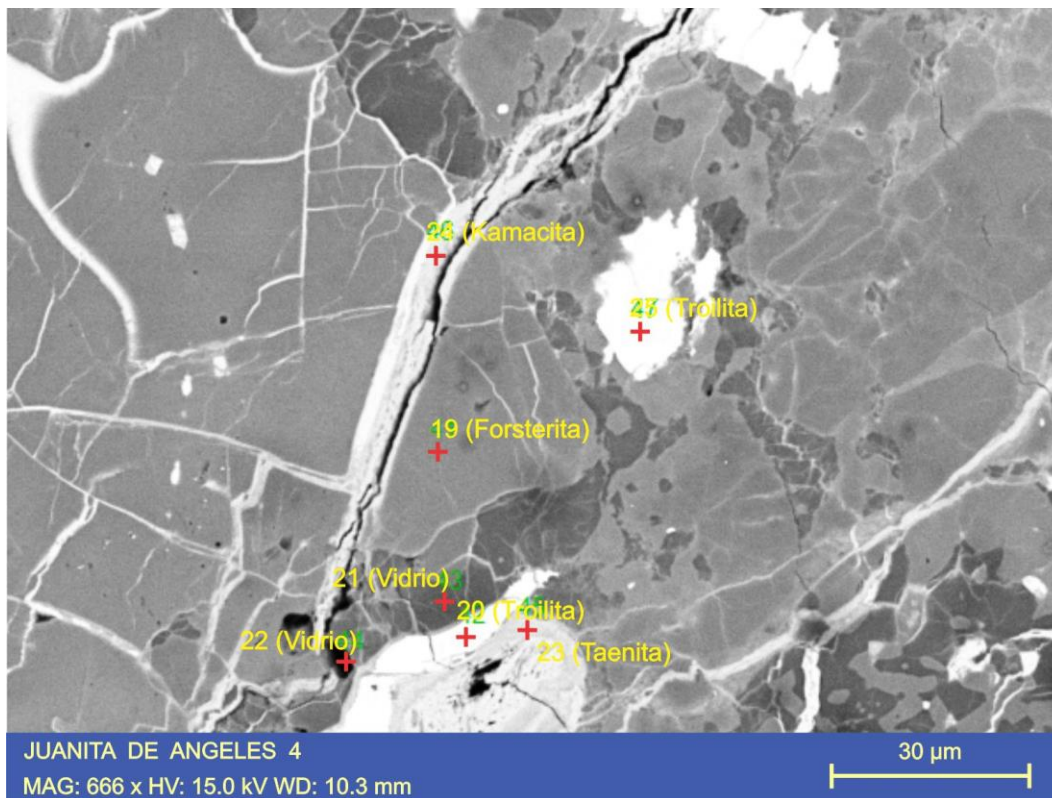
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3.

Espectro	Óxidos(%)								Mineral Interpretado
	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
15	56.28	10.00	32.73	0.98					Hiperstena
16	59.15	4.21	7.25	2.20		18.10	8.32	0.77	Vidrio
17	55.60	6.58	24.46	13.35					Augita
18		27.85	19.61	1.77	43.02	5.95	1.80		Cromita

-Juanita de Ángeles 4: Presenta una zona altamente fracturada y su relleno con minerales metálicos de elevado número atómico.

Figura 29

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 3.



Nota. se presenta un patrón de fracturamiento dado por la cantidad de finas venillas rellenas por minerales metálicos de color blanco, así como la presencia de un cristal de troilita (FeS) y la matriz fragmentaria compuesta de olivino.

Figura 30

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 4.

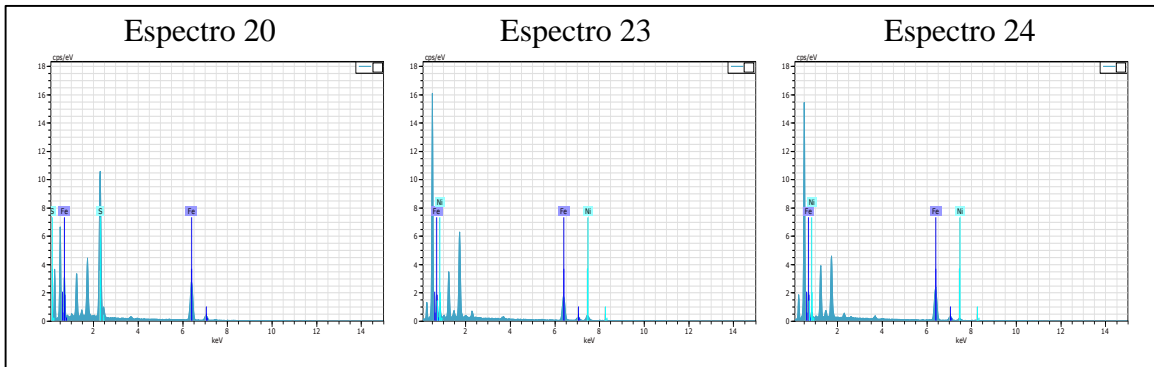


Tabla 9

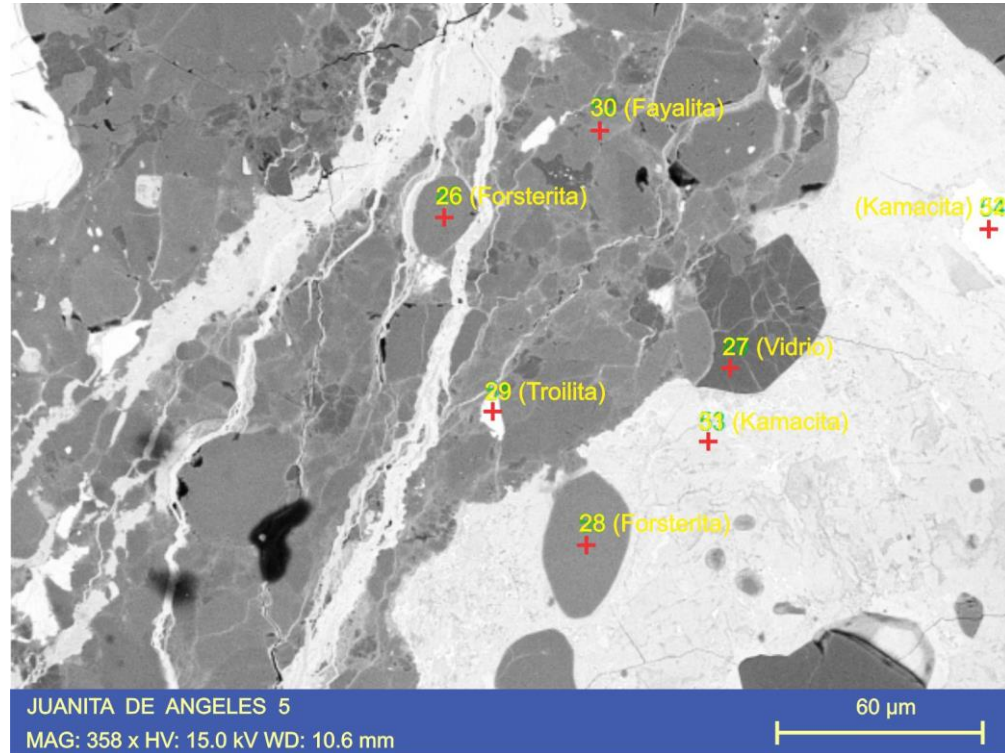
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 4.

Espectro	Elementos (%)			Óxidos(%)						Mineral Interpretado
	Fe	Ni	S	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	
19				38.21	21.72	37.06	0.55	1.45		Forsterita
20	66.63		33.37							Troilita
21				51.01	12.40	10.38	2.04	14.97	7.16	Vidrio
22				34.50	25.19	18.27	3.94	5.42	1.29	Vidrio
23	73.58	26.42								Taenita
24	89.97	10.03								Kamacita
25	65.11		34.89							Troilita

-Juanita de Ángeles 5: En esta imagen se presenta el detalle de una venilla de gran espesor, junto con pequeños cóndrulos ovalados de olivino de 20 µm de diámetro en su eje mayor y un cristal de gran tamaño de kamacita junto con un cristal de 5 µm de troilita.

Figura 31

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 5.



Nota. Microfotografía que tiene en su centro-izquierda una zona altamente fracturada con venillas rellenas de minerales metálicos, así mismo, una matriz fragmentaria donde resaltan pequeños cóndrulos ovalados de olivinos (ligeramente enriquecidos en Mg). A la derecha de la imagen se presenta un gran cristal de kamacita (aleación Fe-Ni rica en Fe).

Figura 32

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 5.

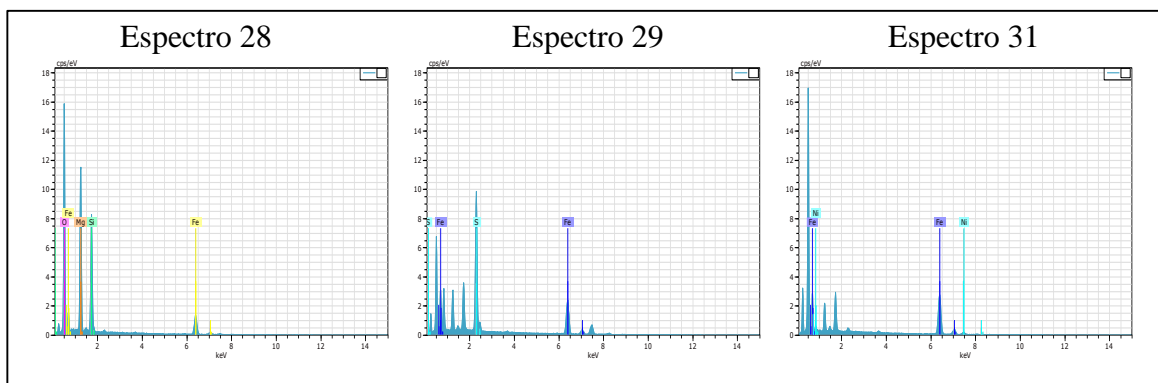


Tabla 10

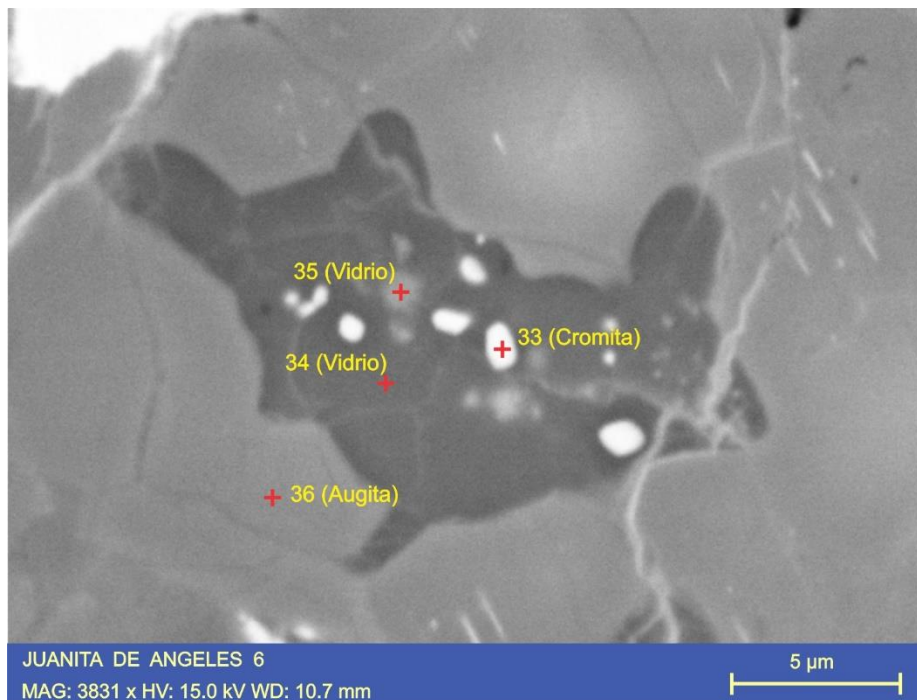
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 5.

Espectro	Elementos (%)			Óxidos(%)							Mineral Interpretado	
	Fe	Ni	S	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	NiO		
26				34.86	27.60	37.03	0.50					Forsterita
27				50.07	18.77	6.19	1.72	15.75	7.50			Vidrio
28				33.89	30.17	35.95						Forsterita
29	65.17		34.83									Troilita
30				32.09	39.30	17.69	1.51	4.82		4.59		Fayalita
31	91.52	8.48										Kamacita
32	91.49	8.51										Kamacita

-Juanita de Ángeles 6: Detalle a 3831x de una textura de agregados en la cual un material amorfo (vidrio) presenta pequeñas inclusiones de cromita.

Figura 33

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 6.



Nota. Pequeña área en la cual se presenta una imagen de alto aumento (3831x) en la cual se detalla un agregado de material amorfo (vidrio) con pequeñas inclusiones de 1μm de diámetro de ¿cromita?. Todo lo anterior mencionado, embebido en un cristal de augita.

Figura 34

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 6.

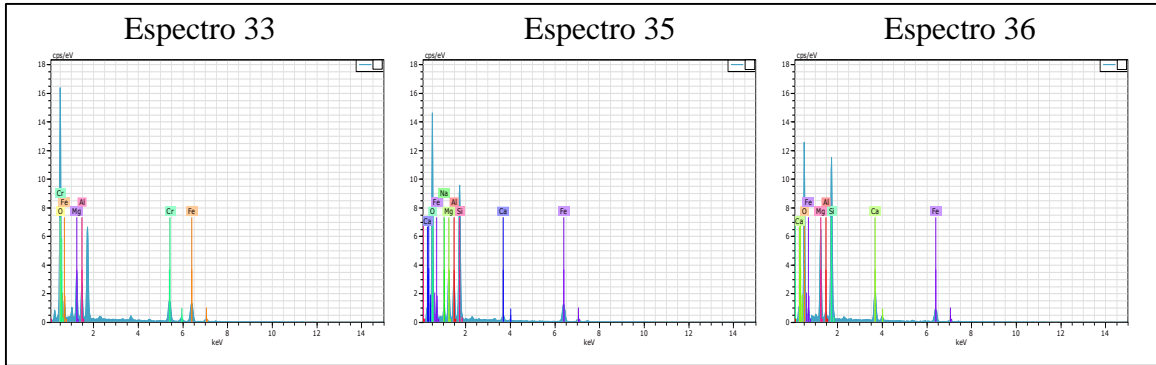


Tabla 11

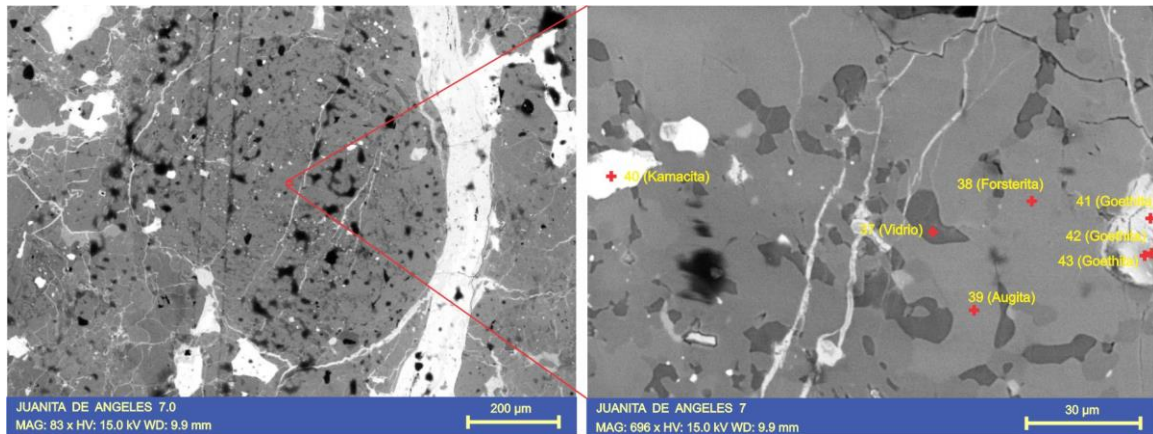
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 6.

Espectro	Elementos (%)					Óxidos(%)						Mineral Interpretado
	Fe	O	Cr	Mg	Al	SiO2	FeO	MgO	CaO	Al2O3	Na2O	
33	25.32	45.44	15.57	8.19	4.91							Cromita
34						48.07	19.77	7.19	2.72	14.75	7.50	Vidrio
35						45.13	22.54	8.19	2.23	11.51	8.84	Vidrio
36						45.40	19.59	19.72	13.52	1.77		Augita

-Juanita de Ángeles 7: Esta imagen presenta el detalle de un cóndrulo criptocristalino (C) y su detalle mineralógico el cual lo compone.

Figura 35

Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 7.



Nota. A la izquierda se presenta un cóndrulo criptocristalino (C) en contacto con una gran venilla rellena de material metálico. A la derecha se muestra un detalle del cóndrulo para observar la composición y el tamaño de los cristales que lo componen.

Figura 36

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 7.

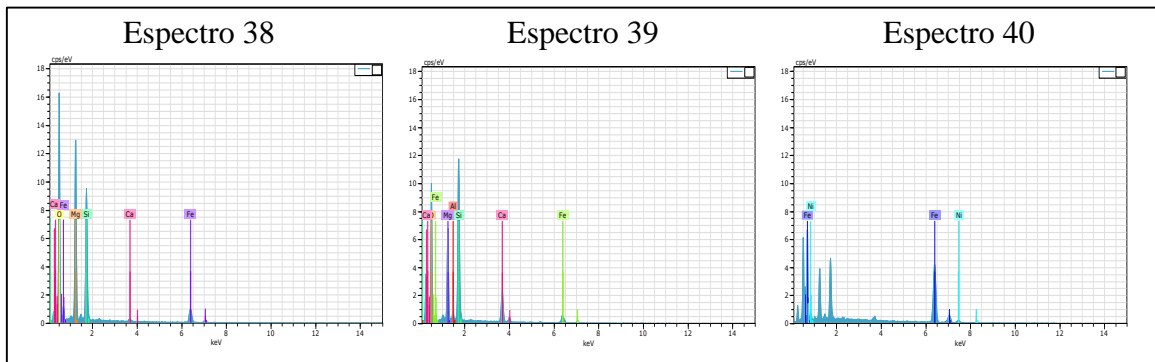


Tabla 12

Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Juanita de Ángeles 7.

Espectro	Elemento(%)		Óxidos(%)							Mineral Interpretado
	Fe	Ni	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	NiO	
37			53.58	10.54	10.79	2.95	15.37	6.76		Vidrio
38			40.00	20.48	38.49	1.03				Forsterita
39			49.15	12.10	21.20	15.42	2.13			Augita
40	93.71	6.29								Kamacita
41			17.45	68.87	13.56					Goethita
42			19.28	59.47	14.71	1.12	1.70	0.96	2.17	Goethita
43			16.87	69.28	13.85					Goethita

10.2 TOLUCA

10.2.1 Minerografía

Toluca es un meteorito de carácter metálico por lo cual se realiza un análisis de minerografía a partir de secciones pulidas representativas del meteorito.

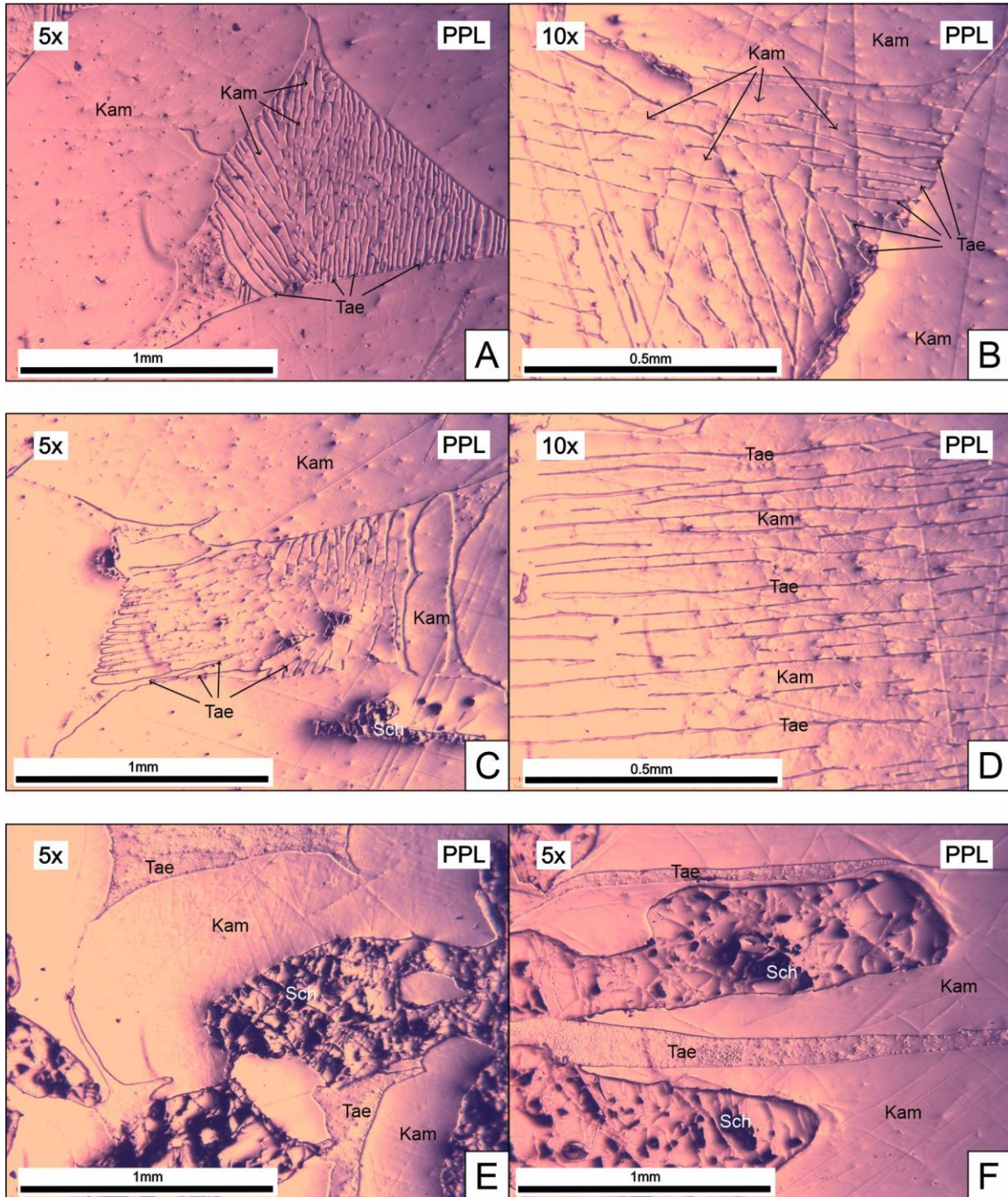
Este meteorito presenta una mineralogía mucho más simple que la condrita y se caracteriza por la presencia de una estructura característica única en meteoritos llamada estructura Widmanstätten producto del intercrecimiento de dos aleaciones de hierro y níquel (Fe-Ni): kamacita y taenita (**Figura 37, A-D**). La taenita se presenta como pequeñas lamelas de entre 5 a 20 μ m de espesor las cuales están intercrecidas con kamacita, mineral que se exhibe como el trasfondo del meteorito, sin morfología definida. Dicha estructura se resalta a nivel macro cuando se ataca con ácido nítrico (ver sección 10.2.3).

Los minerales formadores de roca son kamacita y taenita, además, reportamos la presencia de 2 minerales accesorios: schreibersita (fosfuro de hierro y níquel) y cohenita (carburo de hierro y níquel) los cuales varían de tamaños desde 0.5mm a 1cm en su eje mayor. La schreibersita luce como cristales menos reflectivos y de muy alto relieve respecto a la kamacita (**Figura 37, E-F**). La cohenita presenta una coloración cremosa y una reflectividad ligeramente menor respecto a la kamacita en cristales típicamente alargados (**Figura 38, A-D**).

El mineral de alteración es goethita con un reflectividad muy baja y un color grisáceo con morfologías globulares reemplazando a la kamacita.

Figura 37

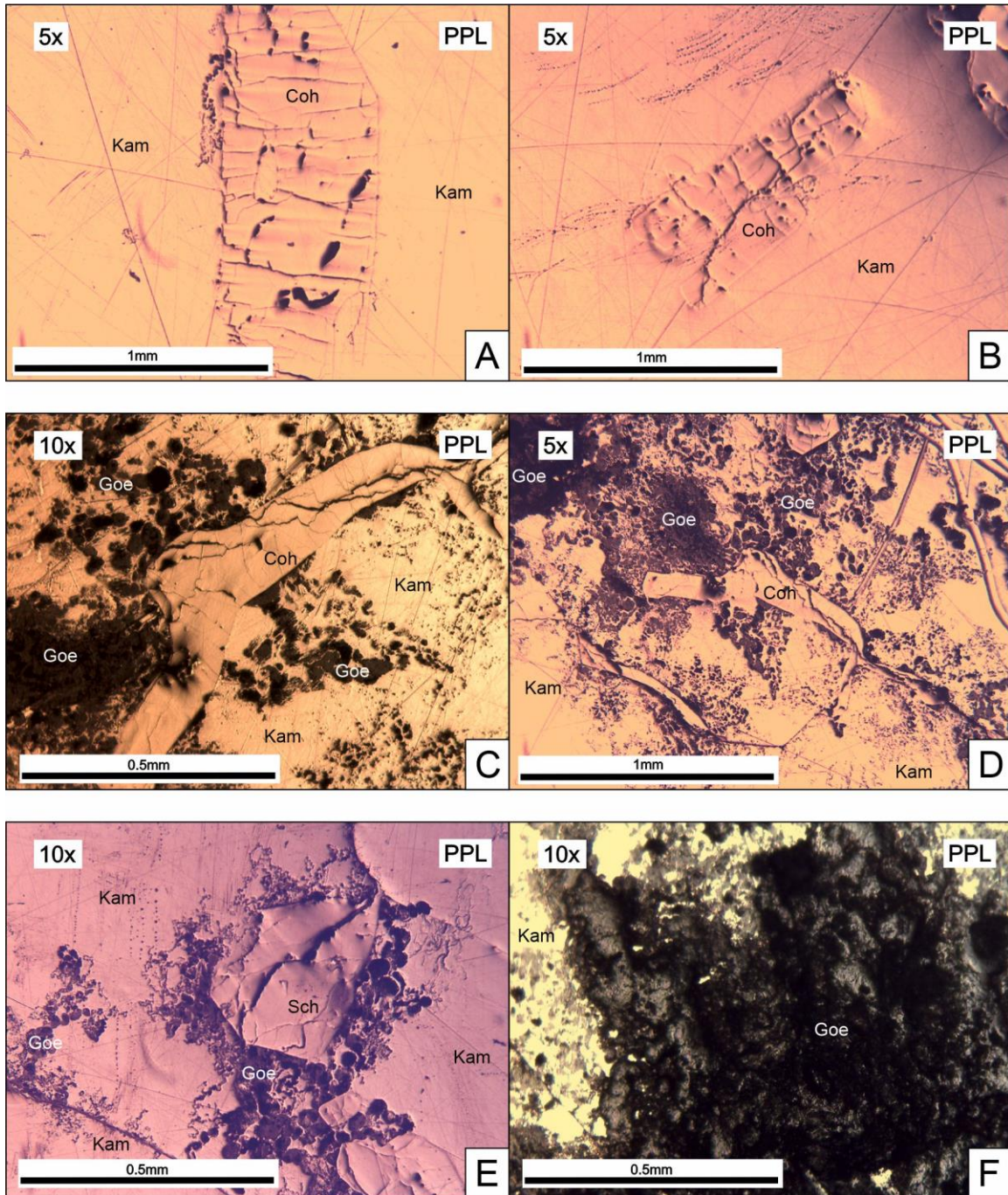
Microfotografías de intercrecimiento kamacita-taenita y minerales accesorios.



Nota. [A-D] Detalle de la estructura plessítica observable sin atacar con ácido nítrico, son evidentes las lamelas de taenita de entre 5 a 20µm de espesor intercrecidas con kamacita, confirmadas sus variaciones en composición gracias al análisis con SEM-EDS. [E-F] Cristales de Schreibersita con un relieve mayor a la kamacita y taenita debido a su mayor dureza al pulido, también son apreciables las rayas provocadas por el pulido en la kamacita. Kam=Kamacita; Tae=Taenita; Sch=Schreibersita.

Figura 38

Microfotografías de minerales accesorios y de alteración.



Nota. [A-B] Cristales de cohenita embebidos en kamacita, la cohenita tiene una dureza mayor, por esto la cohenita tiene mayor relieve y la kamacita tiene múltiples rayas del pulido. [C-D] Cristales de cohenita en contacto con kamacita, es apreciable la alteración de kamacita a goethita en pequeños manchones y fracturas. [E] Pequeño cristal de Schreibersita fracturado y con una corona de goethita [F] Cluster de goethita alterando casi totalmente a kamacita. Kam=Kamacita; Tae=Taenita; Sch=Schreibersita; Coh=Cohenita; Goe=Goethita.

10.2.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS):

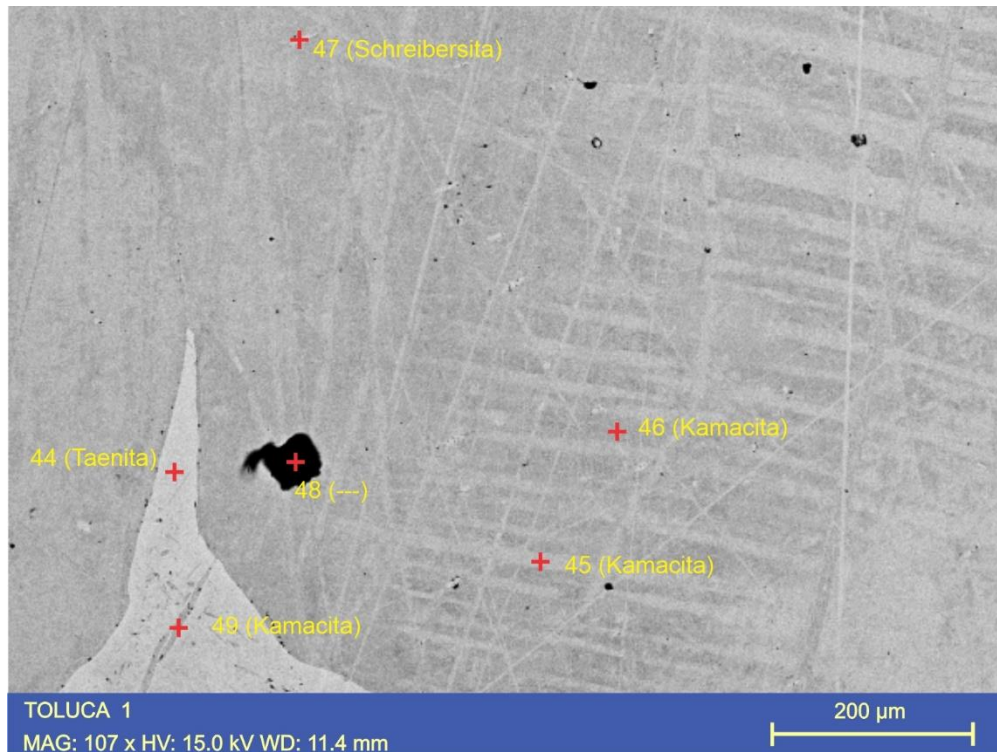
Los análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) con sus análisis químicos puntuales por energía dispersiva (EDS) se realiza posterior al análisis minerográfico en el cual se escogen las áreas para su análisis de detalle.

A continuación, se presentan 3 áreas de interés con 22 análisis puntuales EDS repartidos entre ellas:

-**Toluca 1:** Microfotografía en la cual se presentan características generales de la kamacita, y la presencia de una lamela de taenita.

Figura 39

Microfotografía SEM-EDS: Toluca 1.



Nota. Microfotografía en la cual se observa un color gris oscuro general el cual corresponde a kamacita y en donde también es apreciable la aparición de líneas rectas producto del pulido de la sección, así mismo, a la izquierda de la imagen, se presenta una lamela de un color gris más brillante del mineral taenita. También en la parte superior se observa un cristal muy fino de aproximadamente 20µm en su eje mayor el cual hace referencia al mineral schreibersita.

Figura 40

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 1.

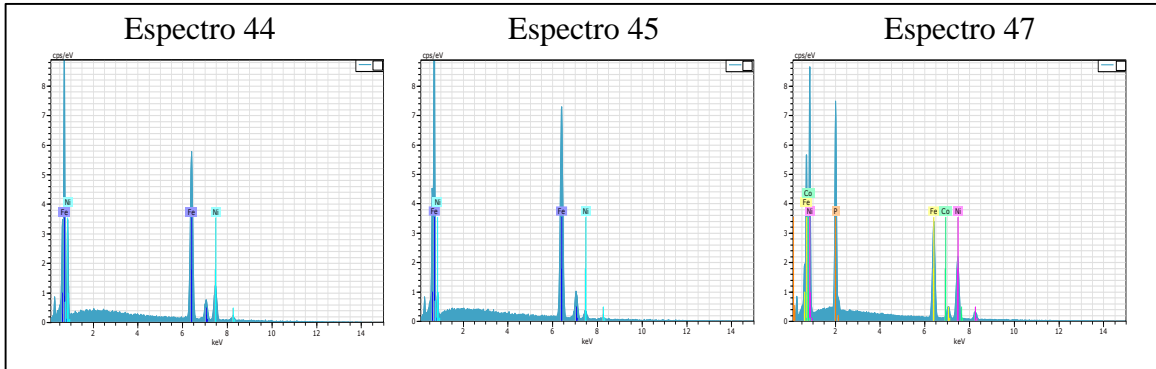


Tabla 13

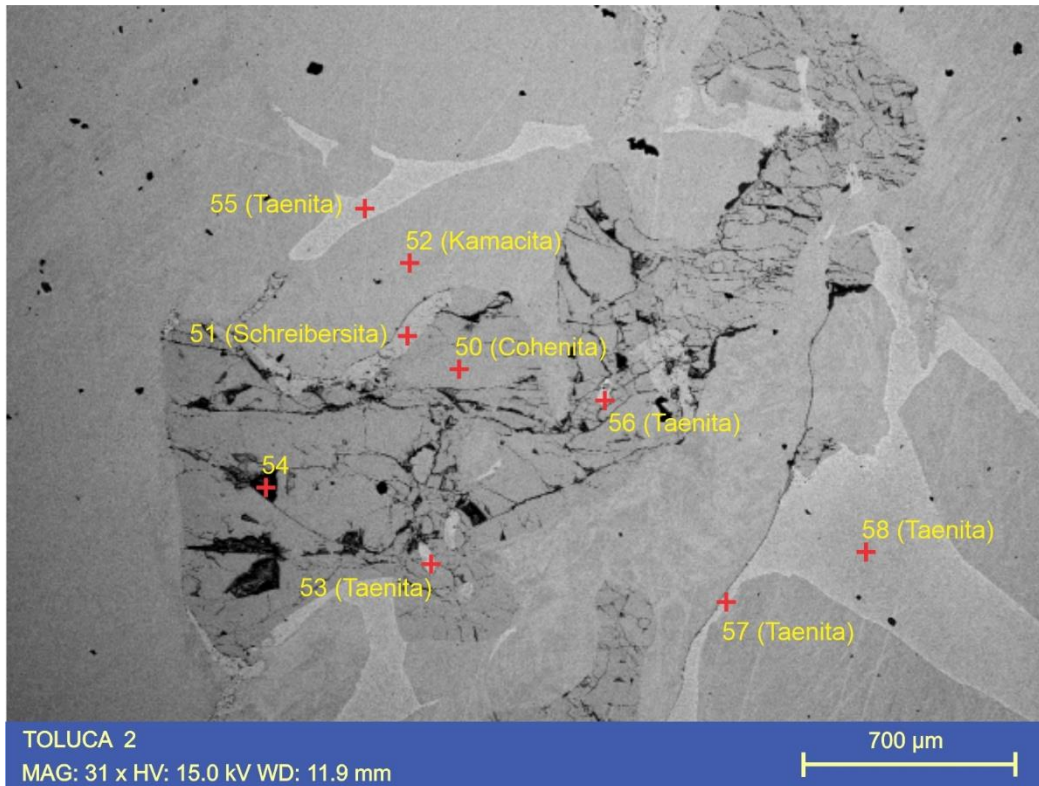
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 1.

Espectro	Elementos (%)				Mineral Interpretado
	Fe	Ni	P	Co	
44	72.10	27.90			Taenita
45	92.87	7.13			Kamacita
46	92.90	7.10			Kamacita
47	38.61	43.89	13.03	0.33	Schreibersita
48	No se detectó un valor				
49	94.46	5.54			Kamacita

-Toluca 2: Esta imagen la protagoniza un cristal de cohenita de 3.5mm de largo el cual resalta por su textura altamente fracturada. Este mineral presenta un fino halo de alteración de schreibersita y con pequeñas inclusiones de taenita. Así mismo en los alrededores se observan las lamelas brillantes de taenita embebidas en kamacita.

Figura 41

Microfotografía SEM-EDS: Toluca 2.



Nota. Microfotografía en la cual en el centro se presenta un cristal de cohenita de 3.5mm de largo con un relieve alto y muy fracturado con pequeñas inclusiones de taenita y un halo de alteración de 50 µm de espesor de schreibersita. En los alrededores del cristal, se tienen las estructuras de intercrecimiento entre lamelas de taenita (gris blancuzco) y kamacita (gris opaco) las cuales son las que predominan en el meteorito.

Figura 42

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 2.

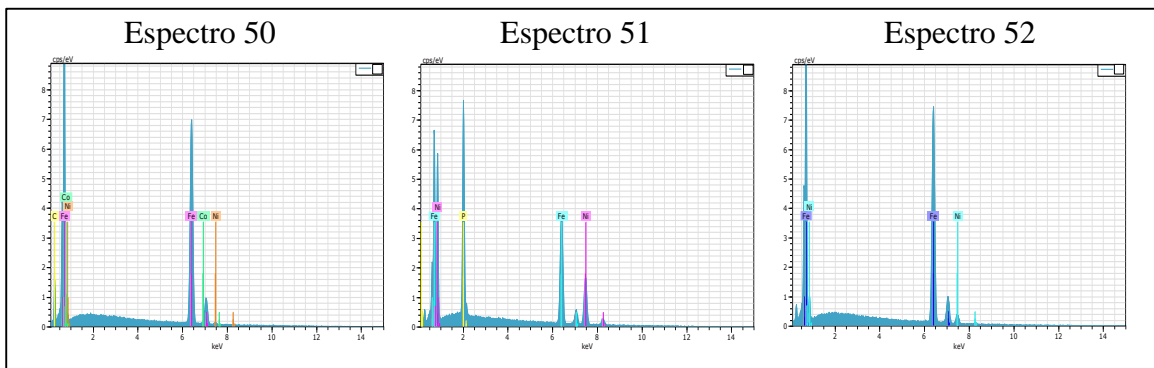


Tabla 14

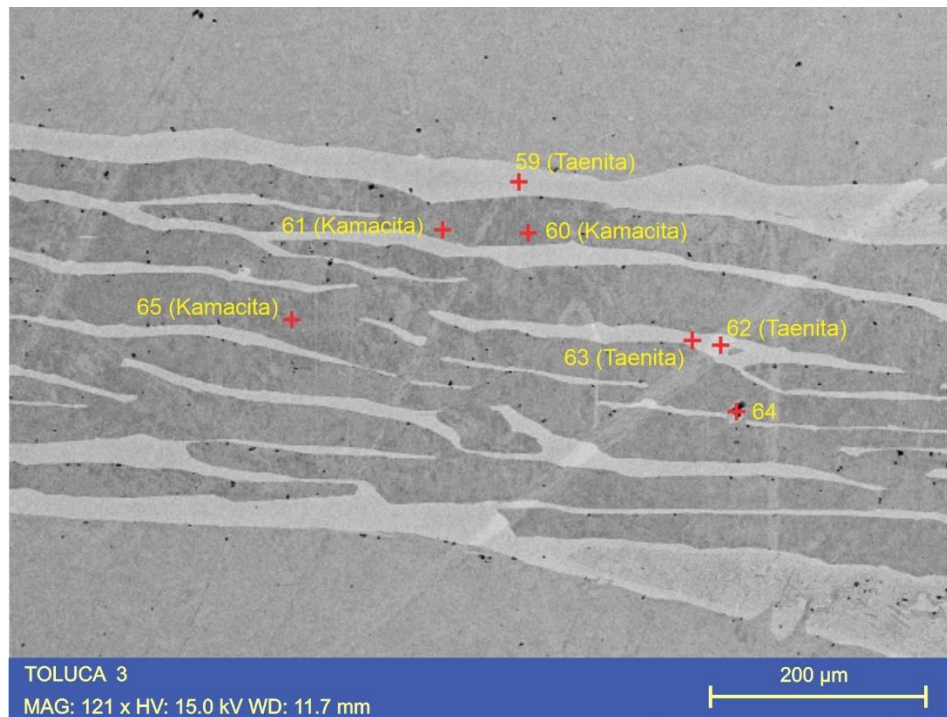
Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 2.

Espectro	Elementos (%)								Mineral Interpretado
	Fe	Ni	Co	C	P	Al	Si	O	
50	88.27	1.44	0.69	9.60					Cohenita
51	49.57	35.95			14.49				Schreibersita
52	93.91	6.09							Kamacita
53	69.83	30.17							Taenita
54	No se detectó valor								
55	83.62	16.38							Taenita
56	67.90	32.10							Taenita
57	65.74	34.83							Taenita
58	69.45	30.55							Taenita

-Toluca 3: Esta fotografía presenta la estructura típica de intercrecimiento entre lamelas de taenita y kamacita.

Figura 43

Microfotografía SEM-EDS: Toluca 3.



Nota. Microfotografía 10 de 121x de aumento la cual detalla la estructura de intercrecimiento entre taenita (gris blancuzco) y kamacita (gris oscuro). Dichos minerales al ser atacados con ácido nítrico resaltan ésta estructura a nivel macro dando origen a la estructura Widmanstätten (octaedrita) y cuyo espesor de banda permite clasificar el meteorito. Las líneas rectas que cortan la estructura son debido al pulido de la sección.

Figura 44

Espectros seleccionados de 3 minerales característicos en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 3.

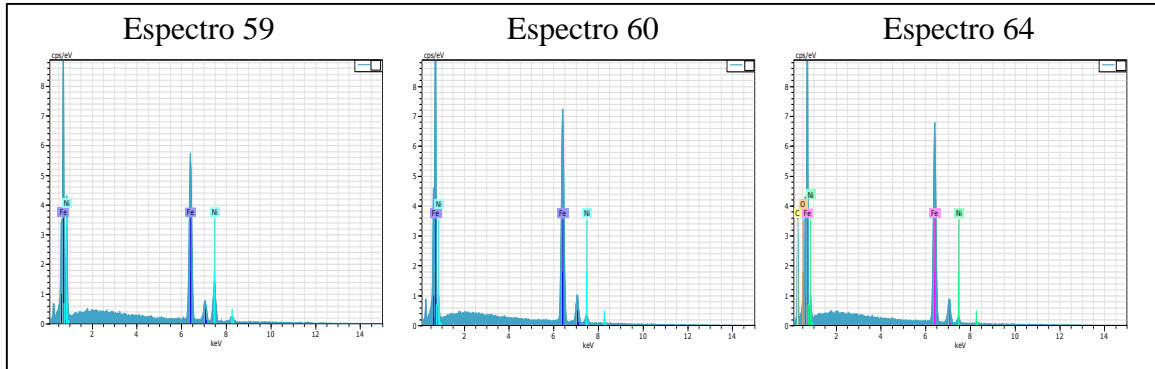


Tabla 15

Composiciones químicas de los análisis puntuales en la Microfotografía SEM-EDS: Toluca 3.

Espectro	Elementos (%)				Mineral Interpretado
	Fe	Ni	C	O	
59	71.38	28.62			Taenita
60	93.77	6.23			Kamacita
61	93.89	6.11			Kamacita
62	61.47	38.53			Taenita
63	60.17	39.83			Taenita
64	No se detectó valor				
65	94.13	5.87			Kamacita

10.2.3 Estructura Widmanstätten

Al atacar el meteorito con ácido nítrico diluido se revela la estructura Widmanstätten, la cual dependiendo del contenido de níquel del meteorito tendrá cierto espesor de banda de kamacita, esta relación a rasgos generales se presenta de la siguiente manera: entre menor contenido de níquel, más grande el espesor de banda.

El meteorito Toluca ya ha sido clasificado anteriormente como Octaedrita de grano grueso (Og) con un espesor de banda de 1.40 ± 0.20 mm por Buchwald, 1976, aunque en el libro de Meteoritas de México de Sánchez-Rubio *et al.*, 2001 se clasifica como Octaedrita media (Om), en este trabajo se realiza el ataque (**Figura 45**) y posterior a éste llevan a cabo mediciones a 52 bandas de kamacita para generar un promedio y clasificar el meteorito (**Tabla 16**).

Figura 45

Estructura Widmanstätten del meteorito Toluca.



Nota. A la izquierda una fotografía del meteorito Toluca con su estructura Widmanstätten. A la derecha una representación de las bandas de kamacita cuyo espesor promedio es de 1.55 mm

Tabla 16

Mediciones de espesor de banda de kamacita del meteorito Toluca.

#	Espesor (mm)	#	Espesor (mm)	#	Espesor (mm)	#	Espesor (mm)	#	Espesor (mm)	#	Espesor (mm)
1	1.76	11	1.98	21	1.72	31	0.97	41	1.37	51	2.41
2	1.55	12	1.99	22	1.92	32	1.55	42	0.94	52	1.35
3	1.78	13	1.83	23	1.41	33	1.23	43	1.32		
4	1.67	14	2.15	24	1.26	34	1.95	44	1.3		

5	1.09	15	1.52	25	1.26	35	1.67	45	1.05		
6	1.49	16	1.74	26	1.12	36	1.15	46	1.28		
7	2.02	17	1.82	27	1.08	37	1.65	47	1.1		
8	1.5	18	0.92	28	1.54	38	1.62	48	2		
9	1.5	19	2.06	29	1.35	39	1.93	49	2.05		
10	2.55	20	1.24	30	1.44	40	1.29	50	1.55		
Promedio = 1.55 mm											

De acuerdo a los resultados obtenidos, el promedio de banda de kamacita es de 1.55mm, permitiendo clasificar al meteorito como una Octaedrita gruesa (Og).

11. Discusión

El meteorito Juanita de Ángeles presenta una mineralogía compuesta principalmente de olivino y piroxeno cuya composición química se encuentra ligeramente enriquecida en Mg, y cuyos cóndrulos, además de ser poco abundantes, se encuentran medianamente definidos, así mismo, este meteorito presenta un alto contenido de minerales metálicos (kamacita, taenita y troilita) >17%, permitiendo así, clasificar a este espécimen como una condrita ordinaria con alto contenido metálico (H5). Los minerales metálicos se encuentran ligeramente alterados a minerales hidratados tales como goethita y limonita, producto de la meteorización terrestre, permitiendo darle un grado de meteorización (W2), dichas clasificaciones se ajustan tal cual lo reportado por Wlotzka (1995), sin embargo, el estado de metamorfismo de choque, de acuerdo a las evidencias reportadas en este trabajo sugieren por lo menos una etapa S3, entre 15 y 30 Gpa de presión, la cual difiere del reportado por Wlotzka (1995). Las fracturas planares en olivino y las venas opacas

interconectadas junto con las incipientes bolsas de fusión (**Figura 22**) son las evidencias que permiten situar al meteorito en una etapa de metamorfismo de choque S3.

La clasificación estructural para los meteoritos diferenciados metálicos se basa en la textura de la estructura Widmanstätten, es decir, que tan ancho o estrecho son las bandas de kamacita. El ancho está relacionado negativamente al contenido de níquel, es decir, a menor contenido de níquel, mayor es el espesor de banda. El espesor promedio de banda que reportamos en este trabajo es 1.55 mm (**Tabla 16**), lo cual difiere de lo reportado por Sánchez-Rubio *et al.*, (2001), mientras que se ajusta a lo reportado por Buchwald, (1975), por lo que nuestros datos permiten apoyar esta última hipótesis.

12. Conclusiones

El meteorito Juanita de Ángeles es una condrita ordinaria con alto contenido de hierro (H), cuyo tipo petrológico es 5, un metamorfismo de choque S3 y un estado de meteorización W2, es un meteorito que se formó al inicio del sistema solar con el enfriamiento de la nebulosa presolar, pero que presenta características de transformación hacia una acondrita primitiva. Mineralógicamente está compuesto de forsterita (olivino ligeramente enriquecido en Mg), hiperstena (ortopiroxeno ligeramente enriquecido en Mg), augita, kamacita, taenita, troilita, cromita, plagioclasa y vidrio, así como de minerales de hidróxido de hierro producto de alteración como goethita y limonita.

Los cóndrulos son poco abundantes y se encuentran medianamente definidos con texturas olivino-piroxeno porfídico (POP), olivino porfídico (PO), piroxeno porfídico (PP), piroxeno radial (RP), olivino en barras (BO), criptocristalino (C) y olivino-piroxeno

granular (GOP). La matriz se compone principalmente de material recristalizado y por restos de cóndrulos fragmentados.

Fracturas planares en olivino y venillas opacas interconectadas entre sí junto con incipientes bolsas de fusión son los indicadores de un metamorfismo de choque cuya presión alcanzada fue de por lo menos 15 GPa, lo cual es comparable con la presión del manto terrestre en la transición piroxeno-majorita a 410km de profundidad. Por otro lado, la alteración parcial de entre el 30% y el 50% de los minerales metálicos en la condrita, indican que el meteorito sufrió meteorización terrestre por hidrólisis durante un tiempo prolongando antes de su hallazgo en el año 1992.

El meteorito Toluca es una octaedrita gruesa (Og), con estructura Widmanstätten cuyo espesor promedio de banda de kamacita es de 1.55 mm y su mineralogía está compuesta por kamacita y taenita (aleaciones de hierro y níquel) como minerales formadores y por cohenita (carburo de hierro y níquel) y schreibersita (fosfuro de hierro y níquel) como minerales accesorios, las cuales, son características típicas de los núcleos metálicos de protoplanetas con una alta diferenciación magmática y que poseen un alto potencial económico. Así mismo, también se reporta la presencia de minerales de hidróxidos de hierro enriquecidos en níquel producto de alteración secundaria de estas aleaciones metálicas indicando, al igual que en la condrita, un tiempo de permanencia prolongado en la superficie terrestre previo a su hallazgo.

13. Recomendaciones

Se recomienda realizar análisis geoquímicos de roca total para cuantificar el contenido elemental de cada meteorito, en donde resaltan el contenido de hierro y níquel en el meteorito Juanita de Ángeles y de níquel, galio, germanio e iridio en el meteorito Toluca. También recomendamos realizar estudios de isótopos estables de oxígeno para la condrita para identificar la posición de ésta respecto a la línea de fraccionamiento terrestre (TFL).

Es importante realizar estudios con microsonda electrónica para cuantificar el contenido elemental en los cóndrulos de la condrita principalmente de hierro y magnesio.

Realizar estudios de difracción de rayos X para determinar fases minerales no determinables mediante estudios petrográficos y estudios de microdifracción como técnica analítica no destructiva.

Desarrollar un estudio con Espectrometría Raman y de catodoluminiscencia en orden de identificar la presencia o no de maskelenita (feldespato amorfizado indicador de un estado de choque S5).

Referencias Bibliográficas

- Alexander, E. C., Srinivasan, B., & Manuel, O. K. (1969). I-Xe dating of silicates from Toluca iron. *Earth and Planetary Science Letters*, 6(5), 355–358. doi:10.1016/0012-821X(69)90185-X.
- Ammann A. (2007). Inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP MS): a versatile tool. *Journal of Mass Spectrometry* 42: 419-427. doi:10.1002/jms.1206
- Ashwal LD, Warner JL, and Wood CA (1982). SNC meteorites: Evidence against an asteroidal origin. *Journal of Geophysical Research* 87(S01): A393–A400. doi:10.1029/JB087iS01p0A393
- Beauchemin, D. (2017). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Methods. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 236–245. doi:10.1016/b978-0-12-409547-2.11222-3
- Beck, C. W. (1951). Observations on the Toluca, Mexico, Meteoritic Iron (ECN =+997,194)*. *Contributions of the Meteoritical Society*, 5(17), 1–4. doi:10.1111/j.1945-5100.1951.tb00157.x
- Benedix GK, McCoy TJ, Keil K, Bogard DD, & Garrison DH (1998). A petrologic and isotopic study of winonaites: Evidence for early partial melting, brecciation, and metamorphism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62: 2535–2553. doi:10.1016/S0016-7037(98)00166-5
- Binzel RP & Xu S (1993). Chips off of asteroid 4 Vesta: Evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites. *Science* 260: 186–191. doi:10.1126/science.260.5105.186

- Bischoff A. (2000). Mineralogical characterization of primitive, type-3 lithologies in Rumuruti chondrites. *Meteoritics and Planetary Science* 35: 699–706. doi:10.1111/j.1945-5100.2000.tb01453.x
- Bloss D. (1970). *Introducción a los métodos de Cristalografía Óptica*. Barcelona. Editorial Omega. 320 p.
- Bogard D. D., Garrison D. H., and McCoy T. J. (2000). Chronology and petrology of silicates from IIE iron meteorites: Evidence of a complex parent body evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 2133–2154. doi:10.1016/S0016-7037(00)00355-0
- Breed S. J. B (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge: University Press, Cambridge, 186 p.
- Brezina, A (1885). Die Meteoritensammlung des K. K. *Mineralogischen Hofkabinetes in Wien*: am 1. Mai 1885; mit vier Tafeln. Hölder. 126 p.
- Buchwald, V. F. (1975). *Handbook of Iron Meteorites*. Berkeley, CA: University of California Press, 1426 p.
- Burkart, H.J. (1856). Ober die Fundorte der bis jetzt bekannten Mexikanischen Meteoreisen-Massen. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*, 257-307.

- Buseck PR (1977). Pallasite meteorites mineralogy, petrology and geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41: 711–740. doi:10.1016/0016-7037(77)90044-8
- Chladni E. F. F. (1819). *Über Feuermeteore und über die mit denselben herabgefallenen Massen. Nebst 10 Steindrucktafeln und deren Erklärung von Carl von Schreibers.* Wien. 434 p.
- Cohen, E. (1900). Meteoreisen-Studien X (Salt River, Toluca, Cape of Good Hope, Babb's Mill). *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien*, 15 :74-94.
- Donais, M. K & George, D. B. (2018). *X-Ray Fluorescence Spectrometry and Its Applications to Archaeology: An Illustrated Guide.* New York, United States. Momentum Press. 178p.
- El Goresy, A (1965). Mineralbestand und Strukturen der Graphit - und Sulfideinschlüsse in Eisenmeteoriten. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29: 1131-1151. doi:10.1016/0016-7037(65)90116-X
- Eugster O, Herzog GF, Marti K, and Caffee MW (2006). Irradiation records, cosmic-ray exposure ages, and transfer times of meteorites. In: *Lauretta DS and McSween HY Jr. (eds.) Meteorites and the Early Solar System II*, pp. 829–851. Tucson, AZ: University of Arizona Press.
- Fernandez R. (2004). La Técnica de Plasma-Masas (ICP-MS). Seminarios. Recuperado de: <http://ramontxrf.260mb.net/icpms.html> - 05/04/2020

- Fisher, D. G., & Erickson, R. R. (2010). *The Solar System*. Pasadena, California: Salem Press. 352p.
- Goldstein, J., Newbury, D., Michael, J., Ritchie, N. W. M., Scott, J., & Joy, D. (2017). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. New York, United States. Springer. 554p.
- Goldstein, J. I., Scott, E. R.D., and Chabot N. L. (2009) Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Chemie der Erde – Geochemistry* 69: 293–325. doi:10.1016/j.chemer.2009.01.002
- Grady M. (2000). *Catalogue of Meteorites*. London, England. Cambridge University Press, 696p.
- Greenwood RC, Franchi IA, Jambon A, & Buchanan PC (2005). Widespread magma oceans on asteroidal bodies in the early Solar System. *Nature* 435: 916–918. doi:10.1038/nature03612
- Grossman L., & Steele I., (1976). Amoeboid olivine aggregates in the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 40. 149-155. doi:10.1016/0016-7037(76)90172-1
- Gooding J. L. & Keil, K. (1981). Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation. *Meteoritics* 16: 17-43. doi:10.1111/j.1945-5100.1981.tb00183.x

- Hewins R. H. (1983). Impact versus internal origins for mesosiderites. *Journal of Geophysical Research* 88(S01): B257–B266. doi:10.1029/JB088iS01p0B257.
- Ipohorski M. & Bozzano P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e Investigación N°63*. 43-53.
- Jenkins R. (1999). *X-Ray Fluorescence Spectrometry*. New York, United States. John Wiley & Sons, Inc. 232p.
- Jones J.H. (1986). A discussion of isotopic systematics and mineral zoning in the shergottites: Evidence for a 180 m. y. igneous crystallization age. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50: 969–977. doi:10.1016/0016-7037(86)90377-7
- Kallemeyn GW, Rubin AE, & Wasson JT (1996.) The compositional classification of chondrites: VII. The R chondrite group. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 2243–2256. doi:10.1016/0016-7037(96)88430-4
- Keil K. & Breet R. (1974). Heidete, A New Mineral in Bustee Enstatite Acondrite. *Amer. Mineral* 59, 465-470.
- Keil K. (1989). Enstatite meteorites and their parent bodies. *Meteoritics* 24: 195–208. doi:10.1111/j.1945-5100.1989.tb00694.x
- Kleine T, Hans U, Irving AJ, & Bourdon B (2012). Chronology of the angrite parent body and implications for core formation in protoplanets. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 84: 186–203. doi:10.1016/j.gca.2012.01.032

- Krot, A. N., Keil K., Goodrich, C. A., Scott, E. R. D., & Weisberg, M. K. (2004). Classification of Meteorites. In *Treatise on Geochemistry, Vol. 1: Meteorites, Comets, and Planets* (A. M. Davis, 1 ed.), pp. 83–128. Elsevier, Oxford. Doi:
- Krot, A. N., Keil, K., Goodrich, C. A., Scott, E. R. D., & Weisberg, M. K. (2014). Classification of Meteorites. In *Treatise on Geochemistry, Vol. 1: Meteorites, Comets, and Planets* (A. M. Davis, 2 ed.), pp. 1–63. Elsevier, Oxford.
- Kuno T., Satish-Kumar S., (2004). Widmanstätten structure and kamacite-taenite phase distribution in Toluca meteorite. *Geoscience Reports - Shizuoka University* 31: 23-31.
- Lovering J. F., Nichiporuk W., Chodos A., & Brown H. (1957). The distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium, and copper in iron and stony-iron meteorites in relation to nickel content and structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 11: 263–278. doi:10.1016/0016-7037(57)90099-6
- MacPherson, G. J., Simon, S. B., Davis, A. M., Grossman, L., & Krot, A. N. (2005). Calcium-Aluminum-rich Inclusions: Major Unanswered Questions. In *Chondrites and the Protoplanetary Disk, ASP Conference Series, 341*, eds Krot, A. N., Scott, E. R. D. and Repurth, A. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 225-250.
- McCord TB, Adams JB, & Johnson TV (1970) Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science* 168: 1445–1447. doi:10.1126/science.168.3938.1445

McSween HY Jr. (1977a). Carbonaceous chondrites of the Ornans type: A metamorphic sequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41: 479–491. doi:10.1016/0016-7037(77)90286-1

McSween HY Jr. (1977b). Petrographic variations among carbonaceous chondrites of the Vigarano type. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41: 1777–1790. doi:10.1016/0016-7037(77)90210-1

McSween HY Jr. (2002). The rocks of Mars, from far and near. *Meteoritics and Planetary Science* 37: 7–25. doi:10.1111/j.1945-5100.2002.tb00793.x

McSween HY Jr. (2008). Martian meteorites as crustal samples. In: *Bell JF III (ed.) The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties*, pp. 383–395. Cambridge: Cambridge University Press.

McSween HY, Mittlefehldt DW, Beck AW, Mayne RG, and McCoy TJ (2011). HED meteorites and their relationship to the geology of Vesta and the Dawn Mission. *Space Science Reviews* 163: 141–174. doi:10.1007/s11214-010-9637-z

McSween HY, Mittlefehldt DW, & Beck AW. (2012). Dawn and the Vesta-HED connection. In: *Lunar and Planetary Science Conference XLIII, #1433*. Houston, TX: The Lunar and Planetary Institute (CD-ROM).

Mittlefehldt DW (2007). Achondrites. In: Davis AM (ed.) *Treatise on Geochemistry*, Vol. 1: Meteorites, Comets, and Planets, pp. 1–40. Oxford: Elsevier.

- Moskovitz NA, Willman M, Burbine TH, Binzel RP, & Bus SJ (2010). A spectroscopic comparison of HED meteorites and V-type asteroids in the inner Main Belt. *Icarus* 208: 773–788. doi:10.1016/j.icarus.2010.03.002
- Nichols, C. I. O., Krakow, R., Herrero-Albillos, J., Kronast, F., Northwood-Smith, G., & Harrison, R. J. (2018). Microstructural and paleomagnetic insight into the cooling history of the IAB parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 229, 1–19. doi:10.1016/j.gca.2018.03.009
- Norton, O. R. (2002). *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press. 354 p.
- Norton, O. R. & Chitwood, L. (2008). *Field Guide to Meteors and Meteorites*. London: Springer-Verlag. 316 p.
- Nyquist L. E., Bogard D. D., Shih C-Y, Greshake A., Stöffler D., and Eugster O. (2001). Ages and geologic histories of martian meteorites. *Space Science Reviews* 96: 105–164. doi:10.1023/A:1011993105172
- Raith M., Raase P. & Reinhardt J. (2012). Guía para la Microscopía de minerales en lámina delgada. Traducción al español por Pedro Oyhantcabal. University of Bonn. 126 p.
- Rubin, AE. & Grossman, JN. (2010). Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science* 45: 114–122. doi:10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x

Sánchez-Rubio, G., Rubinovich-Kogan, R., Lozano-Santa Cruz, R. Medina-Malagón, S., & Flores-Gutiérrez, D., (2001). *Las Meteoritas de México*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Instituto de Geofísica e Instituto de Astronomía, 85 p.

Schönbächler M., (2018) Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), En: White W. M. (Ed), *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth*, Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-39193-9_111-1

Scott E. R. D. (1977). Geochemical relationship between some pallasites and iron meteorites. *Mineralogical Magazine* 41: 262–275. doi:10.1180/minmag.1977.041.318.15

Scott E. R. D. & Bottke W. F. (2011). Impact histories of angrites, eucrites, and their parent bodies. *Meteoritics and Planetary Science* 46: 1878–1887. doi:https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01301.x

Scott, E. R. D. (2007). Chondrites and the Protoplanetary Disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1), 577–620. doi:10.1146/annurev.earth.35.031306.140100

Scott E. R. D. & Wasson J. T. (1975). Classification and properties of iron meteorites. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 13: 527–546. doi:10.1029/RG013i004p00527

- Scott E. R. D. & Wasson J. T. (1976). Chemical classification of iron meteorites VIII. Groups IC, IIE, IIF and 97 other irons. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 40: 103–115. doi:10.1016/0016-7037(76)90198-8
- Stöffler D, Keil K, & Scott ERD (1991). Shock metamorphism in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55: 3845–3867. doi:10.1016/0016-7037(91)90078-J
- Theis, K. J., Schönbächler, M., Benedix, G. K., Rehkämper, M., Andreasen, R., & Davies, C. (2013). Palladium–silver chronology of IAB iron meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 402–411. doi:10.1016/j.epsl.2012.11.004
- Tschermak (1872). Die meteoriten von Shergotty u. *Gopalpur, Sitzber. Wien. Akad, Bd.* 65 I, p. 135-145.
- Universidad de Alicante (2012). Microscopía Electrónica de Barrido. *Servicios Técnicos de Investigación*. 11 p. Recuperado de: <https://ssyf.ua.es/es/formacion> - 29/06/2020
- Van Schmus WR & Wood JA (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31: 747–765. doi:10.1016/S0016-7037(67)80030-9.
- Verma, R. H. (2007). *Atomic and Nuclear Analytical Methods*. New York, United States. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 376p.

- Victoria-Morales, A. (2019). Mineralogía Óptica. Facultad de Ingeniería UNAM: Ciudad de México: Proyecto PAPIME105116. Recuperado de: <https://papimepe105116.wixsite.com/mineralogiaoptica> - 01/08/2020
- Wasson, J. T. (1974). *Meteorites: Classification and properties*. Berlin: Springer-Verlag. 316 p.
- Wasson JT & Choi B-G (2003). Main-group pallasites: Chemical composition, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67: 3079–3096. doi:10.1016/S0016-7037(03)00306-5
- Weisberg M. K., Connolly H. C. Jr., & Ebel D. S. (2004) Petrology and origin of amoeboid olivine aggregates in CR chondrites. *Meteoritics & Planet. Sci.*, 39, 1741–1753. doi:10.1111/j.1945-5100.2004.tb00070.x
- Weisberg MK, Prinz M, Clayton RN. (1996). The K (Kakangari) chondrite grouplet. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 4253–4263. doi:10.1016/S0016-7037(96)00233-5
- Welton, J. E. (2003). *SEM Petrology Atlas*. The American Association of Petroleum Geologists, p. 241. doi:10.1306/Mth4442.
- Wheelock M. M., Keil K., Floss C., Taylor G. J., and Crozaz G. (1994). REE geochemistry of oldhamite-dominated clasts from the Norton County aubrite: Igneous origin of oldhamite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 449–458. doi:10.1016/0016-7037(94)90476-6

Wlotzka F. (1993). A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics* 28: 460.

Wlotzka, F. (1995). The Meteoritical Bulletin, No 78. *Meteoritics*, Vol. 30, 792-796.

Wohler, F. (1856). Uber das Meteoreisen von Toluca in Mexico. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften*, Wien, 20: 217-224.

Young, J. (1926). The Crystal Structure of Meteoric Iron as Determined by X-Ray analysis. *Proceedings of the Royal Society*, London, 112A: 630-641.