



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Búsqueda y caracterización de micrometeoritos de la
zona urbana de San Luis Potosí, S. L. P.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA APLICADA

PRESENTA:

KARLA GUADALUPE GONZÁLEZ MEDINA

BECARIA DEL CONACYT (CVU: 1075432)

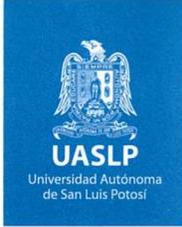
ASESOR:

DR. ALFREDO AGUILLÓN ROBLES

CO-ASESORA:

KARINA ELIZABETH CERVANTES DE LA CRUZ





16 de junio de 2022

**ING. KARLA GUADALUPE GONZÁLEZ MEDINA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Alfredo Aguilón Robles y Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz** Asesor y Coasesora de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Búsqueda y caracterización de micrometeoritos de la zona urbana de San Luis Potosí, S.L.P."

1. INTRODUCCIÓN GENERAL
2. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS MICROMETEORITOS
3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MICROMETEORITOS
4. RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS
5. DISCUSIONES
6. CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

Copia. Archivo
*etn.



www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"Rumbo al centenario de la autonomía universitaria"

Agradecimientos académicos

La investigación fue financiada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN117619 titulado “Estudio de las características de petrológicas y de formación de condros y otros componentes de meteoritas a través de experimentos de irradiación con un láser de CO₂”, donde la responsable del proyecto es la Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz.

Este proyecto fue desarrollado gracias al apoyo del proyecto FORDECYT-PRONACES/15303/2020 “Estudio experimental del rol de la materia orgánica durante el calentamiento de micrometeoroides” cuyas responsable y corresponsable académicas son la Dra. Antígona Segura Peralta y la Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz, respectivamente.

Agradezco al CONACyT por la beca N° 1075432 otorgada para desarrollar este trabajo de maestría.

¡Gracias a mis asesores!, la Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz y el Dr. Alfredo Aguillón Robles por todos los consejos brindados para el desarrollo de esta investigación, el esfuerzo y el tiempo brindado y gracias de nuevo por la confiar en mí.

Al Taller de Mineralogía y Petrología ubicado en el área de Laboratorios de Física General de la Facultad de Ciencias, UNAM, en donde se llevó a cabo parte de la descripción del material.

Al Instituto de Ciencias Nucleares por todas las facilidades y apoyo otorgado, en especial al área de Docencia.

A la M. C. Jaqueline Rafaela Dolores Cañetas Ortega y al Dr. José Luis Ruvalcaba Sil del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Nacional Cultural, por el apoyo para llevar a cabo los análisis por medio de microscopía electrónica de barrido.

A la Ing. María Cristina Zorrilla Cangas y al Dr. Raúl Herrera Becerra del Laboratorio de Materiales Avanzados, Instituto de Física, UNAM por el apoyo con los espectros micro-Raman.

Al Laboratorio Análisis de Muestras Planetarias del Instituto de Ciencias Nucleares a cargo de los investigadores Alejandro Heredia Barbero y Antígona Segura Peralta, en donde se llevó a cabo parte de la descripción del material.

Al M.C. Marcos Rojas, al Dr. José Juan Francisco Castillo Rivera y al Dr. Pascal Sieck por ser parte del comité tutorial y apoyarme en las correcciones del trabajo.

Agradecimientos personales

¡Gracias a mi mamá, papá y Luisito!, por todo el apoyo que me brindaron en estos dos años. Ustedes han sido una motivación y ejemplo para seguir cumpliendo mis objetivos. Este trabajo es para ustedes con todo mi esfuerzo y dedicación. Los quiero mucho. ♥

A Sebas, por estar conmigo y apoyarme en este paso importante, gracias por brindarme seguridad y confianza en mí misma para lograr todo lo que me propongo, te quiero muchísimo. ♥

A Geovanni, Karen, Felipe, Víctor y Juan Pablo por ser los mejores compañeros y amigos de la maestría. Gracias por su amistad y por todos los buenos momentos y experiencias que vivimos. Espero que nuestra amistad dure muchos años, los quiero compañeros. ♥

A Kari, el profe Marco y al Dr. Alfredo por ser un buen ejemplo y darme consejos para alcanzar mis objetivos, espero que la amistad dure muchos años y en un futuro colaborar profesionalmente.

A Lola, mi fiel compañera, por aguantar conmigo las noches de desvelo, por animarme y alegrarme todos mis días, mi bebecita. ♥

*Hay que aprender a cuidar a la gente que nos hace bien,
la que esperaría todos los trenes con tal de volvernors a ver,
la que nos acompaña en los días grises y en los bonitos también.
El Principito*

INDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS.....	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
Justificación.....	2
Hipótesis.....	2
Objetivo.....	2
2. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS MICROMETEORITOS.....	3
2.1 Entrada atmosférica de los micrometeoritos	4
2.2 Clasificación de micrometeoritos	6
2.2.1 Micrometeoritos fundidos	7
2.2.2 Micrometeoritos parcialmente fundidos.....	12
2.2.3 Micrometeoritos no fundidos	13
2.3 Flujo de micrometeoritos	14
2.4 Colecciones de MMs.....	16
3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MICROMETEORITOS	18
3.1 Recolección de material	19
3.2 Preparación de muestras.....	19
3.3 Búsqueda de prospectos de micrometeoritos	19
3.4 Técnicas analíticas.....	20
3.4.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	20
3.4.2 Espectroscopía micro-Raman.....	21
4. RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS	22
4.1 Sitios de muestreo	22
4.2 Sedimentos	23
4.3 Fracción magnética de los sedimentos	26
4.4 Microestructura	28
4.4.1 Esferas tipo I (magnéticas).....	28
4.4.2 Esferas tipo S (barradas de olivino)	33
4.5 Espectroscopía micro-Raman.....	36

4.5.1 Esfera tipo I	37
4.5.2 Esferas tipo S (barradas de olivino)	40
5. DISCUSIONES	44
5.1 De los sedimentos recolectados.....	44
5.2 Preparación y técnicas analíticas.....	46
5.3 Esferas de tipo I.....	47
5.4 Esferas de tipo S (barradas).....	49
6. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estimación aproximada de las diferentes fuentes de micrometeoritos de la colección 2000 South Pole Water Well (SPWW)..	3
Figura 2.2. Parámetros de entrada de los micrometeoritos como el ángulo cenital y la velocidad de entrada..	5
Figura 2.3. Porcentaje de ablación para diferentes tamaños de partículas y ángulo cenital a velocidades de entrada de 11 y 16 km/s.	6
Figura 2.4. Imágenes de electrones retrodispersados de micrometeoritos.	6
Figura 2.5. Ejemplos de esferas cósmicas presentados como imágenes de electrones retrodispersados e imágenes ópticas.	8
Figura 2.6. Ejemplos de esferas cósmicas de tipo S presentados como imágenes de electrones retrodispersados e imágenes ópticas.	12
Figura 2.7. Ejemplos de micrometeoritos parcialmente fundidos y no fundidos. (a, b, c) Esferas parcialmente fundidas.	14
Figura 2.8. Masa anual de los micrometeoritos que caen a la Tierra por intervalo de masa de partículas de diferencial logarítmico.	15
Figura 3.1. Metodología propuesta para la investigación del trabajo.	18
Figura 3.2. Interacción de los electrones incidentes con los átomos de la muestra y producción de electrones secundarios en el método de microscopía electrónica de barrido	21
Figura 4.1. Mapa de localización de las muestras.	22
Figura 4.2. Muestra total recolectada en 4 sitios diferentes.	25
Figura 4.3. Material magnético de dos muestras donde se observan las láminas de intemperismo de material de acero y otras partículas magnéticas.	26
Figura 4.4. Esferas magnéticas recolectadas por medio de un imán.	27
Figura 4.5. Ejemplos de esfera de tipo I con contenidos altos de Fe.	29
Figura 4.6. Ejemplos de esfera con composiciones variables de óxidos. (a) Esfera con aleaciones de silicato-óxido de Fe, Ti.	30
Figura 4.7. Ejemplos de espectros EDS donde se puede observar que las esferas de tipo I tienen como elemento principal el Fe, y en menos cantidad Al y Si.	33

Figura 4.8. Partículas tipo S. (a) Esfera barrada de olivino. (b) Esfera barrada de olivino con una perla de Ni-Fe.....	34
Figura 4.9. Imágenes composicionales de la partícula SLPb_07_k, donde se muestra que la esfera contiene elementos de Fe, Mg, Si que pueden correlacionarse con los olivinos, además de una perla que contiene Ni.....	36
Figura 4.10. Dendritas de magnetita que se forman en la superficie de las esferas barradas de olivino.....	36
Figura 4.11. Microfotografías y espectros micro-Raman de las partículas SLPb_02_a y SLPb_02_b.....	38
Figura 4.12. Microfotografías y espectros micro-Raman de la partícula SLPb_02_c y SLPb_08_r.. ..	39
Figura 4.13. Espectros microRaman de la partícula SLPb_07_k.....	41
Figura 4.14. Microfotografías y espectros micro-Raman de la partícula SLPa_00_a.	42
Figura 4.15. Diagrama de los modos internos de SiO ₂ vs el parámetro 1/M, representado el cambio en la frecuencia vibratoria con la masa. M es el promedio de la masa del catión.. ..	43
Figura 5.1. Histograma de la distribución del tamaño de grano de las partículas recolectadas.	44
Figura 5.2. Geología circundante de la zona urbana de San Luis Potosí.	45
Figura 5.3. Partículas de origen antropogénico-industrial.	49
Figura 5.4. Ejemplos de micrometeoritos barradas de olivino.....	50
Figura 5.5. Diagrama que muestra la evolución de perlas de Fe-Ni-S en esferas cósmicas durante la entrada atmosférica.....	52
Figura 5.6. Diagramas ternarios Mg-Si-Fe (% atómico) presentando la composición química de las diferentes esferas	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de los micrometeoritos. Tomado de Genge <i>et al.</i> (2008).....	10
Tabla 4.1. Distribución y características de los sitios de muestreo para localizar micrometeoritos (MM).	23

Tabla 4.2. Peso de las muestras antes del tamizado, en cada una de las fracciones y el peso total final en gramos	25
Tabla 4.3. Análisis EDS en porcentaje en peso para el cálculo estequiométrico de minerales de wüstita.	31
Tabla 4.4. Análisis EDS en % en peso de las esferas que presentan composición variable.	32
Tabla 4.5. Análisis EDS de las esferas barradas de olivino.	35
Tabla 4.6. Principales vibraciones (cm.1) de óxidos de Fe presentes en las esferas tipo I.	37

RESUMEN

Los micrometeoritos son partículas cuyo tamaño oscila entre los 10 μm y los 2 mm. Se estima que caen alrededor de miles de toneladas por año en la Tierra (Genge *et al.* 2008). Los micrometeoritos pueden tener un origen asteroidal o cometario, por lo cual pueden dar mucha información sobre la formación y evolución de los cuerpos planetarios. El material meteorítico se puede recolectar con frecuencia en zonas desérticas y zonas polares ya que el intemperismo es bajo en estos ambientes. Recientemente, se ha implementado la búsqueda de micrometeoritos en zonas urbanas.

El objetivo de este trabajo fue la prospección de micrometeoritos en la zona urbana de la ciudad de San Luis Potosí. En el marco teórico se describe la manera de clasificar los micrometeoritos, los procesos físicos y químicos que sufren las partículas al entrar a la atmosfera terrestre, así como mencionar la manera en la que se han formado las colecciones de micrometeoritos más importantes que se tienen hasta ahora. La metodología implementada en este trabajo consistió en coleccionar sedimentos de azoteas de la zona urbana de San Luis Potosí, separar partículas por medio de un imán e identificarlas tanto por microscópicas, así como, por técnicas espectroscópicas no invasivas. En total se recolectaron alrededor de 11 kg de sedimento el cual consiste, principalmente, en cristales de cuarzo, feldespatos y desechos de construcción. Se separó alrededor de 100 g de material magnético de los cuales se seleccionaron las partículas con hábitos esféricos.

Las esferas encontradas se clasificaron en dos grupos: las esferas de tipo I y las de tipo S. Las esferas tipo I están caracterizadas por tener óxidos de hierro, en menor cantidad se detectaron elementos como el Si, Al, Co y Ca. Las texturas superficiales mostraron cristales de hábito romboédricos y octaédricos. Las características de las esferas de tipo I son consistentes con un origen industrial. Se encontraron dos esferas de tipo S las cuales están compuestas por cristales de barrados olivino (Fa₁₉ a Fa₃₇) y dendritas de magnetita con textura de “*christmas tree*”. Una de las esferas presenta una perla con un contenido de 82 % en peso de Ni. Las características químicas y texturales son correspondientes a micrometeoritos.

La ciudad de San Luis Potosí ofrece un entorno geológico que contrasta con la mineralogía máfica de los micrometeoritos favoreciendo el inicio de la colección de micrometeoritos de la zona urbana de San Luis Potosí.

ABSTRACT

Micrometeorites are particles between 10 μm to 2 mm in size. Every year fall, thousands of tons of material to the Earth's surface (Genge *et al.* 2008). The micrometeorites come from asteroids such as comets and are related to the solar system's early formation. Cooled and hot deserts are places where weathering is slow and offers protection to the meteoritic material, but urban roofs are an excellent place to find micrometeorites, too.

The objective of this work is to prospect micrometeorites in the roofs of the urban areas of San Luis Potosí city. The first step is supporting the classification and origin of micrometeorites and physical and chemical processes while flying through the Earth's atmosphere. The method employed consists of recollecting and separating magnetically urban sediments. Then, diamagnetic, and magnetic fractions are separated with a stereoscopic microscope, an electron microscope, and micro-Raman spectroscopy. Around 11 kg of material was recollecting, principally felsic minerals such as quartz, feldspar, and calcite, but pollution is also present. Magnetic and diamagnetic material sum around 100 g of material.

Magnetic and diamagnetic recollecting spheres are type I and type S spheres. Type I spheres present iron oxides and elements such as Si, Al, Co, and Ca. Rhombohedral and octahedral iron crystals dominate external textures. Some type I spheres are classified as industrial sphere. Two S spheres are reported; they present barred olivine (Fa₁₉ a Fa₃₇) and Christmas tree magnetite. One of the spheres has a nickel pearl. All these characteristics consist of micrometeorites.

Then, San Luis Potosi city is an excellent place to find micrometeorites because they have a felsic material to contrast to mafic composition to felsic sediments.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El inicio del sistema solar se caracterizó por ser caótico, donde procesos como la acreción y colisión de partículas de diferentes tamaños y composiciones evolucionó a lo que conocemos hoy en día como planetas, planetas enanos, satélites, asteroides y cometas, además de polvo interplanetario. Actualmente, pero en menor medida, existen colisiones entre asteroides o restos de cometas que llegan a la Tierra.

Los meteoroides son objetos cuyos tamaños oscilan entre los 10 μm y 1 m de tamaño que se mueven en el espacio interplanetario y pueden ser derivados de colisiones de objetos más grandes u objetos primarios y las partículas de polvo interplanetario (IDP) tienen tamaños menores a las 10 μm . Los asteroides y cometas son cuerpos de más de 1 m de tamaño. En el caso que se les encuentre en la superficie terrestre se les conoce como meteoritos (Rubin y Grossman 2010).

Las IDP, los meteoroides, asteroides y cometas pueden alcanzar la superficie de un cuerpo planetario, en este caso la Tierra, por colisiones, perturbaciones gravitacionales y por fuerzas de radiación (presión de radiación, efecto Yarkovsky, efecto Poynting-Robertson) que pueden cambiar la órbita de los cuerpos en el espacio, por lo cual la trayectoria nueva pueda encontrarse con la Tierra y ser atrapada (Burns *et al.* 1979; Brownlee 2001).

Según Rubin y Grossman (2010), los micrometeoroides son meteoroides con tamaños 10 μm a 2 mm y se estima que entran al menos 40000 toneladas por año (Love y Brownlee 1993). Los micrometeoroides sufren varios procesos al entrar a la atmósfera de la Tierra que han sido observados de manera experimental o por estudios de micrometeoritos. Los micrometeoritos (por sus siglas MMs) son partículas que se pueden encontrar en la superficie terrestre y los tamaños suelen ser menores a los 2 mm (Genge *et al.* 2008; Rubin y Grossman 2010). Los avances en el estudio de los micrometeoritos han hecho posible nuevas técnicas para la recolección del material, que suelen ser desde las más sofisticadas como vuelos estratosféricos para recolectar el material, a maneras más accesibles como la recolección en azoteas urbanas (Maurette 2006).

La abundancia de los micrometeoritos ha sido utilizada para validar modelos que intentan explicar el flujo de material extraterrestre a la Tierra; los estudios mineralógicos y composicionales han sido usados para restringir los cuerpos parentales de los micrometeoritos sin fundir y fundidos. Los cuerpos parentales de los MMs pueden llegar a tener composiciones similares a los meteoritos

carbonáceos. Los MMs que son ricos en carbono pueden provenir de cometas y los MMs con tamaños $>300 \mu\text{m}$ tienen similitudes con las condritas ordinarias (Genge *et al.* 2020).

El material extraterrestre es muy limitado y es de gran importancia, así que la búsqueda de micrometeoritos en zonas urbanas es un modo muy útil para el estudio de este tipo de material, en el documento se presenta una metodología de fácil implementación mediante la cual se pueden tener una mayor probabilidad de éxito para encontrar micrometeoritos.

Justificación

El estudio de los micrometeoritos tiene gran relevancia en el entendimiento del origen y evolución del sistema solar, ya que provienen de cuerpos parentales de tipo asteroidal, cometario o planetario. Al ser un tema relativamente nuevo, la información acerca de los micrometeoritos recolectados en zonas urbanas es muy poca, por lo que se busca que haya más datos e información, principalmente en México sobre este tipo de materiales.

Entender el origen de los micrometeoritos provee de información importante al estudio de los asteroides o cometas, además de identificar qué procesos actúan en el espacio exterior y conocer los cambios que se generan en los micrometeoritos al entrar a la atmósfera terrestre.

Hipótesis

La hipótesis del trabajo es que se pueden encontrar micrometeoritos en la zona urbana de San Luis Potosí, ya que la geología circundante podría favorecer la búsqueda de micrometeoritos debido al contraste de la composición máfica de los micrometeoritos con respecto a las composiciones félsicas, carbonatadas y urbano/industrial de las partículas propias de una ciudad.

Objetivo

El objetivo general es la búsqueda y caracterización de los micrometeoritos teniendo como meta final la creación de una colección de micrometeoritos. Para lograr este objetivo se plantean los siguientes objetivos particulares: (1) muestreo de sedimentos en azoteas, (2) descripción morfológica de los micrometeoritos y (3) estudios mineralógicos de los prospectos a micrometeoritos.

2. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS MICROMETEORITOS

Los micrometeoritos son partículas extraterrestres que fueron capturados por la gravedad de la Tierra, por lo tanto, se pueden recuperar en la superficie terrestre (Genge *et al.* 2008). Algunos MMs presentan compuestos prístinos que aportan información sobre la formación, evolución e historia de los cuerpos parentales que formaron el sistema solar.

De acuerdo con Genge *et al.* (2008) los micrometeoritos tienen tamaños entre $\sim 30 \mu\text{m}$ a 1 mm. Rubin y Grossman (2010) proponen que las medidas para los MMs son de $10 \mu\text{m}$ a 2 mm. Finalmente, Suttle *et al.* (2021) proponen que los tamaños para los micrometeoritos oscilan entre $50 \mu\text{m}$ a 3 mm.

Los MMs se almacenan temporalmente en la nube zodiacal que es un disco circunsolar grueso de pequeñas partículas de escombros producidas por colisiones de asteroides y cometas, además por la sublimación del hielo y colas de los cometas. Por lo tanto, las dos fuentes principales de micrometeoritos son de origen asteroidal o cometario (Figura 2.1) (Dermott *et al.* 2001; Maurette 2006; Genge *et al.* 2008; Nesvorný *et al.* 2010).

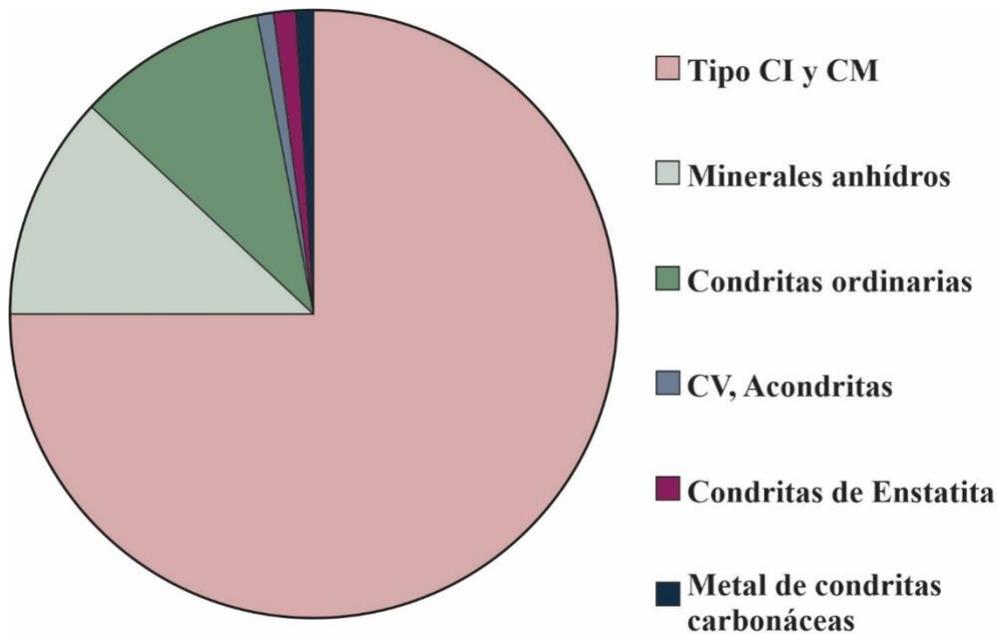


Figura 2.1. Estimación aproximada de las diferentes fuentes de micrometeoritos de la colección 2000 South Pole Water Well (SPWW). El 75% pertenece a condritas de tipo CI y CM. El 10-15% puede derivar de minerales anhidros de una variedad de condritas. La fuente de condritas ordinarias se estima en 10%, por último, las CV, las acondritas y el metal de las condritas tienen una contribución de aproximadamente el 1%. (Modificada de Taylor *et al.* 2012).

El polvo que es expulsado de las colisiones de los asteroides sufre el efecto de Poynting-Robertson que causa el movimiento espiral hacia el Sol causado por la radiación solar y algunas llegan a la Tierra, si es que no son perturbadas o destruidas en el camino por otras colisiones (Brownlee 2001).

2.1 Entrada atmosférica de los micrometeoritos

Los micrometeoritos sufren efectos importantes en las partículas al entrar a la atmósfera terrestre que pueden ser desde un leve calentamiento hasta la fusión y pérdida de masa por la evaporación y ablación. La comprensión de los procesos que sufren al entrar a la atmósfera, así como la alteración térmica que experimentan puede ser de utilidad para inferir las propiedades pre-atmosféricas y sus cuerpos parentales (Love y Brownlee 1991; Flynn 2001).

Las partículas que sufren poco calentamiento experimentan velocidad lenta y/o un ángulo de entrada casi perpendicular a la superficie de la Tierra, mientras que las partículas que sufren alto calentamiento entran a una velocidad alta y un ángulo más pronunciado (Love y Brownlee 1991). Al menos el 90% de la masa que incide sobre la Tierra se evapora durante el paso a través de la atmósfera terrestre (Genge 2008; Love y Brownlee 1991).

Los parámetros de velocidad de entrada, masa, ángulo cenital, densidad y composición química son importantes para elaborar modelos y simulaciones de la entrada atmosférica de las partículas (Figura 2.2). A medida que disminuye el ángulo de entrada, disminuye la temperatura máxima y aumenta la duración del pico de temperatura máxima. Las partículas que entran a velocidades de entrada altas pasan menos tiempo en el pico de temperatura en comparación con las que entran con velocidad menor (Love y Brownlee 1991; Flynn 2001; Rudraswami *et al.* 2016a).

El porcentaje de ablación que experimentan los micrometeoritos puede variar entre el 95% al 0% y dependen de parámetros como la velocidad (v) y el ángulo cenital (ZA). La Figura 2.3 presenta el porcentaje de la ablación para partículas entre las 100 μm y los 400 μm , donde las partículas con ZA entre 80-90° tienen más oportunidades de no presentar ablación y cuyas velocidades varían entre los 11 y 16 km/s (Rudraswami *et al.* 2015).

Del polvo extraterrestre que cae en la superficie terrestre el rango de tamaño típico va de 100 a 300 μm y en la mayoría de los casos el diámetro más probable del progenitor de una esfera es de 1.5 a 2 veces el diámetro del objeto recogido; para partículas más pequeñas la relación suele ser de 2

veces. La velocidad de las partículas es cercana a los 15 km/h y alcanzan un calentamiento máximo y pérdida de masa en altitudes entre 80 y 90 km (Love y Brownlee 1991).

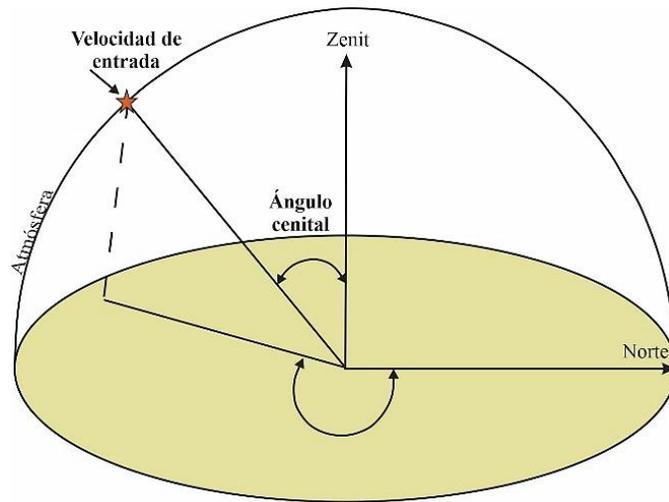


Figura 2.2. Parámetros de entrada de los micrometeoritos como el ángulo cenital (ZA) y la velocidad de entrada (v). Modificado de Masoom *et al.* (2020).

La ablación incluye la pulverización y vaporización del material que conduce a una pérdida de masa, por lo tanto, cambia la composición química inicial y las propiedades originales, este proceso ocurre cerca de los 70-90 km. La ablación depende de la temperatura que alcanza la partícula al entrar a la atmósfera. La temperatura máxima que pueden llegar a experimentar es de 1500 °C, al disminuir la velocidad, la temperatura desciende hasta que se solidifica la partícula que había fundido parcial o totalmente (Rudraswami *et al.* 2016a).

Los primeros elementos que sufren ablación son los elementos más volátiles los cuales se evapora por completo el Na y K, conforme la partícula penetra la atmósfera se eleva la temperatura y los elementos menos volátiles (Fe, Mg, Si) empiezan a sufrir ablación. Los elementos refractarios (Ca y Al) también experimentan ablación, por eso las partículas deben de tener un tamaño grande, entrar con velocidad alta y un ángulo cenital pequeño (Rudraswami *et al.* 2015; Rudraswami *et al.* 2016a).

La aparición de anillos formados en los micrometeoritos durante la entrada atmosférica es debido a que el Fe se evapora más rápido que el Mg. Un borde delgado de Fe es común en varios tipos de micrometeoritos lo que sugiere que el fraccionamiento de Fe puede darse a temperaturas relativamente bajas (500 °C) (Rudraswami *et al.* 2015).

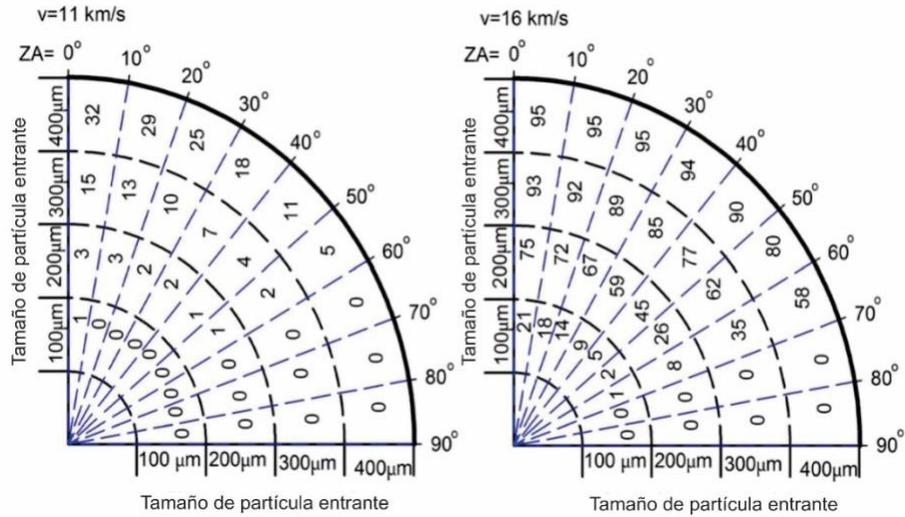


Figura 2.3. Porcentaje de ablación para diferentes tamaños de partículas y ángulo cenital a velocidades de entrada de 11 y 16 km/s. Tomada de Rudraswami *et al.* (2015).

2.2 Clasificación de micrometeoritos

Los micrometeoritos (MM) tienen dos tipos de clasificaciones que se mencionan a continuación. Los MM que se pueden clasificar de acuerdo con las texturas pre-atmosféricas sobrevivientes: los MM de grano fino (FgMM) que están dominados por una masa porosa de granos de mineral del tamaño de micrómetros y los MM de grano grueso (CgMMs) compuestos por silicatos anhidros con tamaños de grano más grandes y a menudo con mesostasis vítrea (Genge *et al.* 2008).

La otra clasificación de los MM también es de acuerdo con los cambios generados por el calentamiento de la entrada atmosférica tomando en cuenta las características texturales, mineralógicas y composicionales de las partículas, estos son: fundidos, parcialmente fundidos y no fundidos (Figura 2.4) (Tabla 2.1) (Taylor *et al.* 2000; Genge *et al.* 2008).

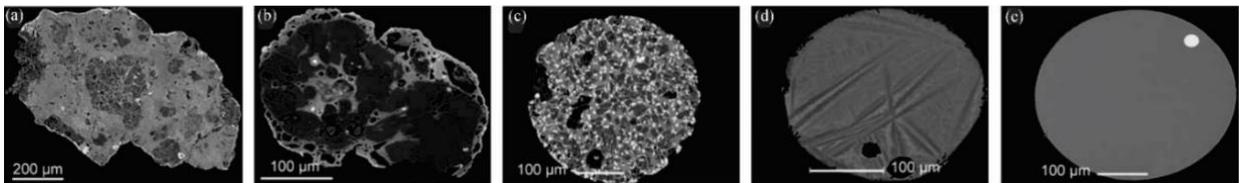


Figura 2.4. Imágenes de electrones retrodispersados de micrometeoritos, se puede observar un cambio en la textura por el calentamiento al entrar a la Tierra, desde los (a) no fundidos después los (b) parcialmente fundidos, hasta llegar a los (c, d, e) fundidos. Modificado de Folco y Cordier 2015.

2.2.1 Micrometeoritos fundidos

Los MMs fundidos o esferas cósmicas (CSs) son clasificados como partículas esféricas a subesféricas formadas como gotas fundidas durante la entrada atmosférica. Las CSs experimentan grados de fusión altos y suele ser un criterio para identificar un MMs fundido en comparación con otro tipo de partículas (Genge *et al.* 2008; Folco y Cordier 2015).

El grado de fusión de las esferas cósmicas es identificado con base en las texturas y la mineralogía, suelen ser partículas dominadas por una mesostasis vítrea con o sin microfenocristales. Las CS se subdividen en varios grupos químicos y texturales: los tipos I, los tipos G y los tipos S (Genge y Grady 1997; Taylor *et al.* 2000; Genge *et al.* 2008).

Las esferas cósmicas tipo I (Figuras 2.5 c, d) tienen formas de esferoides oscuros y opacos con un brillo metálico distintivo bajo el microscopio estereoscópico. Los minerales predominantes son los óxidos de hierro, wüstita y magnetita, metal de hierro rico en Ni que algunas veces se presenta como un nugget de elementos del grupo del Pt, por lo tanto, su composición está dominada por FeO y Fe₂O₃ con Ni (hasta un 7.5 % peso) y cantidades menores de otros óxidos como MgO y SiO₂ (Genge *et al.* 2008; Folco y Cordier 2015).

Las partículas tipo I tienen dos tipos de texturas: (a) esferas con perlas de metal, predomina la wüstita, pobre en Ni (<1.5 % peso), aleaciones de Fe-Ni (10-95 % peso) y en menor medida magnética y (b) las esferas sin perlas de metal donde predomina la wüstita rica en Ni (0.5-22.5 % peso) y magnetita (Genge *et al.* 2017).

Las partículas a menudo contienen un vacío esférico o irregular en el centro por la pérdida de una perla de metal fundido. La expulsión de estas masas metálicas se debe a la aceleración diferencial de líquidos inmiscibles con densidades diferentes y también suele observarse un enriquecimiento de magnetita hacia la superficie como resultado de una mayor oxidación durante la entrada atmosférica. Las esferas tipo I suelen ser abundantes en algunas colecciones ya que son muy resistentes (Taylor *et al.* 2000; Genge *et al.* 2008; Folco y Cordier 2015).

La superficie de las esferas tipo I se caracteriza por tener cristales dendríticos que a menudo tienen formas cruciformes con dos conjuntos de barras paralelas transversales, también pueden presentar patrones de formas de cristales de tipo celular (asemejándose a la intersección de celdas iguales) (Genge *et al.* 2017).

Las esferas cósmicas tipo G (Figura 2.5 a, b) muestran colores oscuros, con brillo mate bajo el microscopio y tienen composiciones de elementos principales que son intermedias entre las esferas de tipo S (ampliamente condriticas) y el tipo I. Las partículas presentan dendritas de magnetita dentro de una mesostasis de vidrio silicatado, algunas tienen vacíos esféricos similares a los que exhiben el tipo I (Genge *et al.* 2008).

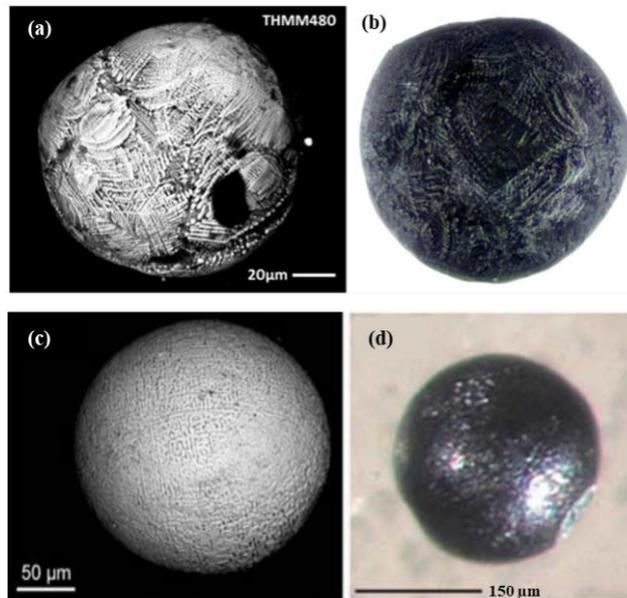


Figura 2.5. Ejemplos de esferas cósmicas presentados como imágenes de electrones retrodispersados e imágenes ópticas. (a, b) Esferas de tipo G. (c, d) Esferas de tipo I. (Tomadas de Suttle *et al.* (2021); Folco y Cordier (2009)).

Las esferas cósmicas tipo S son las esferas más comunes (97%) y tienen composiciones ampliamente condriticas, que suelen estar dominados por microfenocristales de olivino, vidrio y llegan a contener magnetita y/o cromita, de igual manera, llegan a contener granos relictos, principalmente de piroxeno y olivino ricos en Mg y a veces contienen gotitas de metal de Fe-Ni (Genge *et al.* 2008).

Las esferas tipo S se clasifican según las texturas de enfriamiento que son: CAT (esferas ricas en Ca-Al-Ti), vidrio (G), criptocristalino (CC), barrado de olivino (BO), porfirítico de olivino (PO) y de grano grueso, siendo las primeras las que se sometieron a temperaturas más altas. Las características principales se mencionan a continuación:

- CAT: Partículas achatadas, blancas y se parecen a los BO, pero no tienen magnetita; son las esferas que experimentaron las temperaturas más altas.

- Vidrio: Compuestas de vidrio máfico y son muy esféricas, carecen de microfenocristales de olivino, a veces contienen vesículas grandes y algunas contienen perlas de Fe-Ni (Figura 2.6 a, b).
- Criptocristalino: Contienen cristalitos micrométricos y pueden tener magnetita. Los microcristales de olivino pueden crecer desde la superficie hacia dentro produciendo superficie nudosa que llaman “espalda de tortuga”. Las partículas son de color gris oscuro, de translúcidos a opacos (Figura 2.6 c, d).
- Barrado de olivino: Contienen cristales de olivino de crecimiento paralelo que se ven como barras dentro de una matriz vítrea que a menudo contiene magnetita. Las partículas tienen formas ovoides y elípticas, algunas esferas exhiben perlas de metal Fe-Ni que a veces se oxidan para formar óxidos de hierro, suelen ser opacas vistas bajo microscopio (Figura 2.6 e, f).

Tabla 2.1. Clasificación de los micrometeoritos. Tomado de Genge *et al.* (2008).

Grupo	Clase	Tipo	Subtipo	Descripción
Fundidos	Esferas cósmicas (CSs)	S	CAT	Esferas con Mg/Si > 1.7 que está enriquecido en Ca, Ti y Al. Tienen texturas de olivino barrado.
		S	Vidrio	Esferas formadas casi en su totalidad por vidrio.
		S	Cripcristalino (CC)	Esferas dominadas por cristalitas submicrónicas de olivino y magnetita, algunos incluyen varios dominios.
		S	Barrado de olivino (BO)	Esferas dominadas por crecimiento paralelo de olivino dentro de una mesostasis vítrea.
		S	Porfirítico de olivino (PO)	Esferas dominadas por olivino esquelético dentro de vidrio. Las variedades de relictos contienen minerales sin fundir.
		S	Grano grueso	Estas esferas contienen > 50% de volumen de minerales relictos.
		G		Esferas dominadas por dendritas de XX dentro de un vidrio silicatado.
		I		Esferas dominadas por magnetita y wüstita.
Parcialmente fundidos	Escoriáceos (ScMMs)	-	-	Partículas vesiculares dominadas por una mesostasis de microfenocristales de olivino fayalítico dentro de vidrio. A menudo contienen minerales relictos y áreas de matriz relictas.
No Fundidos	Grano fino (FgMMs)	C1		FgMMs compactos y químicamente homogéneos, a menudo contienen magnetita framboidal.
		C2		MMs de grano fino compactos, químicamente heterogéneos, a menudo contienen silicatos aislados y/o toquilinita.
		C3		FgMMs altamente porosos, a menudo contienen silicatos aislados y magnetita framboidal.
	Grano grueso (CgMMs)	Condriticos	Porfirítico de olivino y/o piroxeno	MMs ígneos dominados por piroxeno y/o fenocristales de piroxeno dentro de vidrio.
			Olivino granular y/o piroxeno	MMs ígneos dominados por piroxeno y/o olivino sin vidrio significativo.

		Olivino barrado	MMs ígneos dominados por olivino de crecimiento paralelo dentro de vidrio.
		Radial de piroxeno	MMs ígneos dominados por detritos de piroxeno radial dentro de vidrio.
		Tipo I/tipo II	CgMMs tipo I son partículas reducidas que contienen Fs y/o Fa < 10 % mol. CgMMs tipo II son partículas oxidadas con Fs y/o Fa > 10 % mol.
	Acondríticos	-	CgMMs ígneos diferenciados.
Refractarios	Porosos	-	Partículas porosas dominadas por minerales refractarios.
	Compactos	-	Partículas compactas dominadas por minerales refractarios.
	Hidratados	-	Partículas dominadas por minerales refractarios rodeados de filosilicatos ricos en Fe o sus deshidroxilatos.
Ultracarbonáceos		-	Partículas dominadas por material carbonáceo con incrustaciones.

- Porfirítico de olivino: Contienen microfenocristales de olivino dentro de una mesostasis vítrea generalmente con magnetita y/o cromita accesoria, vistos bajo microscopio tienen un aspecto moteado (Figura 2.4 g, h).

Los MMs fundidos suelen estar relacionados con condritas carbonáceas y ordinarias, de igual manera pudieran estar relacionados cuerpos parentales como Vesta. La comparación del cuerpo parental del que provienen puede ser medido por medio de la isotopía del oxígeno (Genge *et al.* 2008; Folco y Cordier 2015; Rudraswami *et al.* 2016b; Genge *et al.* 2020).

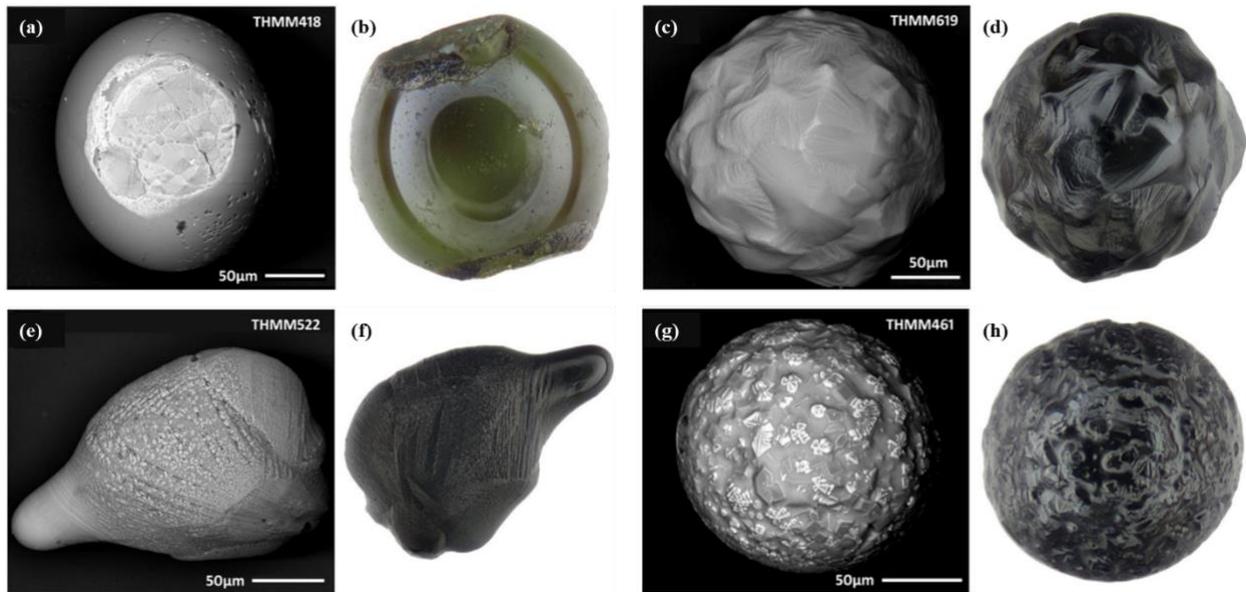


Figura 2.6. Ejemplos de esferas cósmicas de tipo S presentados como imágenes de electrones retrodispersados e imágenes ópticas. (a, b) Esfera vítrea. (c, d) Esfera criptocristalina. (e, f) Esfera barrada de olivino. (g, h) Esfera porfirítica de olivino. (Tomadas de Suttle *et al.* (2021)).

2.2.2 Micrometeoritos parcialmente fundidos

Los micrometeoritos parcialmente fundidos o micrometeoritos escoriáceos (ScMMs) tienen formas irregulares, muy vesiculares que bajo el microscopio son de color gris oscuro tienen exteriores lobulados con vesículas que inciden en la superficie, se caracterizan por estar cubiertos por un borde de magnetita y con frecuencia contienen relictos de olivino y enstatita. La cantidad de vesículas es alta y a veces excede el 50% en volumen (Figura 2.7 a, b, c) (Genge *et al.* 2008; Folco y Cordier 2015).

La presencia de magnetita en los bordes de los ScMMs y la ausencia en las CSs proveen un diagnóstico para la discriminación de una y otra partícula (Suttle *et al.* 2021).

2.2.3 Micrometeoritos no fundidos

Los MMs no fundidos se dividen en MMs de grano fino, MMs de grano grueso, refractarios y ultracarbonáceos. La fusión que experimentan las partículas es muy poca, pero llegan a presentar bordes con texturas ígneas en la superficie (Figura 2.7 d, e) (Genge 2006; Genge *et al.* 2008).

Los MMs de grano fino son en los que predomina una masa porosa de grano fino y son similares a las matrices de condritas carbonáceas, se pueden subdividir por las texturas y homogeneidad química en tres grupos: C1, C2 y C3 (Tabla 1).

Los MMs de grano grueso contienen silicatos anhidros, principalmente piroxeno con tamaños de granos superiores a 1 μm . Las partículas tienen texturas ígneas con olivino y/o piroxeno y también están compuestos por un solo cristal o agregados de silicatos anhidros. Los CgMMs tienen composiciones muy similares a los condros o a las acondritas primitivas, por lo tanto, las esferas se dividen en: CgMMs condriticas, CgMMs acondriticas y de cristal individual. (Genge *et al.* 2008).

Los MMs refractarios son esferas que contienen minerales ricos en Ca-Al-Ti y están asociados con las inclusiones de calcio y aluminio, además contienen granos aislados de minerales refractarios dentro de las partículas.

Los MMs ultracarbonáceos han sido descubiertos recientemente en colecciones de la Antártida (CONCORDIA y colecciones japonesas), están compuestas por materia orgánica y los componentes de silicato tienen composiciones heterogéneas que sugieren que no están equilibradas y el origen puede ser cometario (Genge *et al.* 2008).

Los MMs parcialmente fundidos y no fundidos sugieren que la mayoría proviene de condritas carbonáceas y ordinarias (asteroidal) y en menor medida de cometas y de cuerpos diferenciados desconocidos (Genge *et al.* 1997; Genge 2008; Van Ginneken *et al.* 2012). La colección CONCORDIA es una de las importantes fuentes de recolección de polvo cometario (cometas de periodo corto) y además de la primera aparición de MMs ultracarbonáceos (Duprat *et al.* 2007; Nesvorný *et al.* 2010; Folco y Cordier 2015).

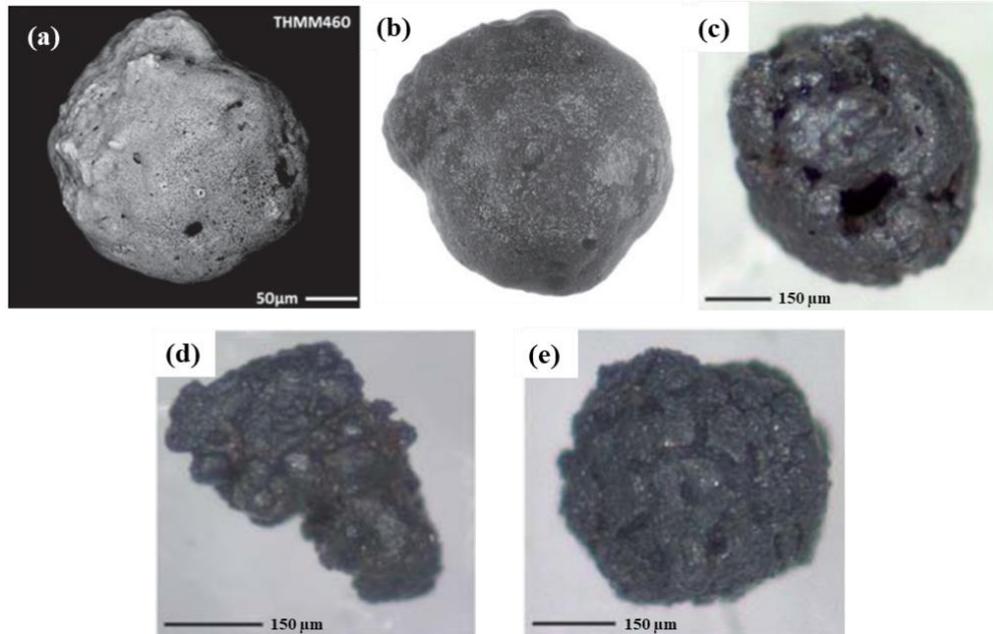


Figura 2.7. Ejemplos de micrometeoritos parcialmente fundidos y no fundidos. (a, b, c) Esferas parcialmente fundidas. (d, e) Esferas no fundidas. (Tomadas de Suttle *et al.* (2021); Folco y Cordier (2009)).

2.3 Flujo de micrometeoritos

Las partículas en la nube zodiacal pueden sufrir cambios en las órbitas por una amplia gama de fuerzas gravitacionales y no gravitacionales, del mismo modo, el tamaño de dichas partículas evoluciona por colisiones mutuas. El movimiento y la vida de las partículas más grandes se rigen por las colisiones, al contrario de las partículas pequeñas que están determinadas por las fuerzas de arrastre y radiación (Dermott *et al.* 2001). Una fracción de las partículas generadas por asteroides o cometas puede cruzar las órbitas de la Tierra por fuerzas no gravitacionales, por el contrario, las fuerzas gravitacionales perturban las órbitas de meteoritos mucho más grandes y solo una pequeña fracción puede cruzar la órbita terrestre (Maurette 2006).

La entrada de polvo cósmico a la Tierra puede medirse de diferentes maneras, ya sea con detectores de polvo espacial, observaciones astronómicas, radares, sensores remotos, con núcleos de hielo polar, sedimentos del fondo oceánico, etc. El cálculo del flujo de polvo cósmico depende de la metodología en que se determinó la entrada de material y pueden variar entre 5 a 300 ton/día (Plane 2012).

Love y Brownlee (1993) determinaron la masa del flujo y la distribución de los tamaños de los micrometeoritos gracias al satélite de Instalación de Exposición de Larga Duración (Long Duration

Exposure Facility, LDEF) que realiza un examen de los cráteres de impacto de hipervelocidad, la fracción de masa principal de las partículas tiene diámetros de $\sim 100\text{-}300\ \mu\text{m}$ (Figura 2.8) y el flujo de micrometeoritos que entran a la atmósfera terrestre es de $40000 \pm 20000\ \text{ton/año}$. El error fue estimado es por la incertidumbre de la velocidad del meteoroides y por las fórmulas que se utilizaron para la profundidad de penetración.

El flujo que se obtuvo de la medición de esferas cósmicas con tamaños de $50\text{-}700\ \mu\text{m}$ recolectados en pozos de agua del Polo Sur fue de $1600 \pm 300\ \text{ton/año}$, la cantidad de flujo puede aumentar a $2700 \pm 1400\ \text{ton/año}$ si se añaden los micrometeoritos sin fundir (Taylor *et al.* 1998), mientras que con el modelo de Función de Entrada Meteórica (Meteoric Input Function – MIF) se obtuvo un flujo de $2500 \pm 1250\ \text{ton/año}$ que está de acuerdo con las mediciones en pozos del Polo Sur (Carillo-Sánchez *et al.* 2015). Al igual, Suttle y Folco (2020) calcularon el flujo de MMs de las colecciones de las Montañas Transantárticas y obtuvieron datos de $1555 \pm 753\ \text{ton/año}$ para MMs con tamaños de $100\ \text{a}\ 2000\ \mu\text{m}$.

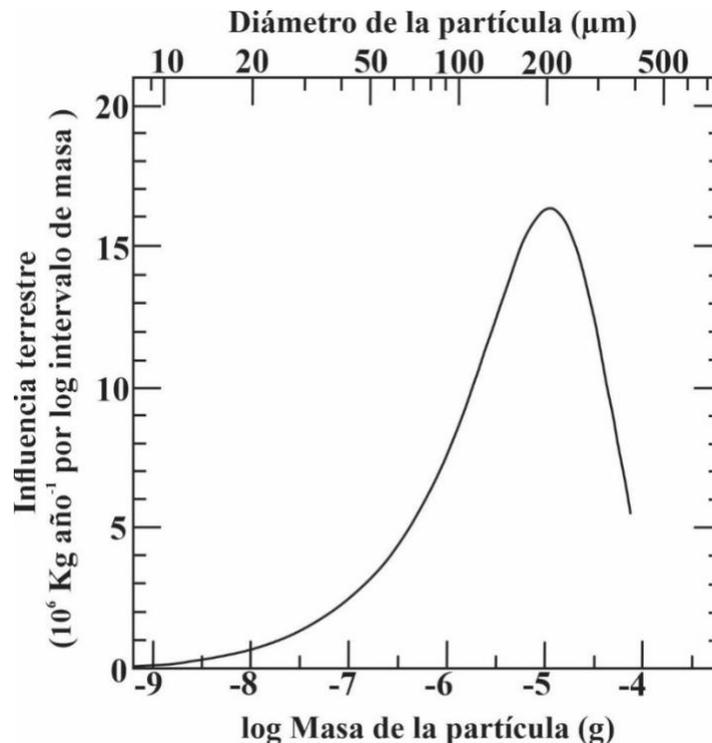


Figura 2.8. Masa anual de los micrometeoritos que caen a la Tierra por intervalo de masa de partículas de diferencial logarítmico. La gráfica muestra que la mayor parte de la masa que incide como micrometeoritos se produce como partículas de cerca de $220\ \mu\text{m}$ de diámetro que pesan $1.5 \times 10^{-5}\ \text{g}$. Tomado de Love y Brownlee (1993).

El flujo de masa de micrometeoritos también se puede calcular usando colecciones de MMs de azoteas, un ejemplo reciente es Suttle *et al.* (2021) que calculó un flujo corregido entre 43.8 y 87.7 ton/año.

El error de los flujos de micrometeoritos se puede deber a varios aspectos que dependen del lugar en donde se realizó la recolección, se ha concluido que el protocolo de limpieza y búsqueda es una fuente de pérdida del material, de igual manera el intemperismo de las partículas y la mala restricción de la edad de sedimentación, la identificación errónea, por lo tanto, los diferentes estudios de flujo de micrometeoritos suelen tener errores altos (Taylor *et al.* 1998; Suttle y Folco 2020; Suttle *et al.* 2021).

2.4 Colecciones de MMs

Los micrometeoritos se pueden encontrar en diversos sitios como en sedimentos de fondos oceánicos, hielos y nieve de la Antártida, en Groenlandia, la estratosfera, etc. Recientemente, la búsqueda de MMs en zonas urbanas ha sido un buen sitio de fácil acceso para recolectar material extraterrestre y ha sido realizado por varios investigadores y aficionados en el tema para encontrar MMs La forma de recolección de micrometeoritos en zonas urbanas puede hacerse de diferentes maneras, desde la recolección de sedimento en azoteas de casas o edificios, muestras de nieve de zonas urbanas, suelos, lodo urbano, de igual manera, se han dejado recipientes para recolectar las partículas al llover (Larsen 2017; Genge *et al.* 2017; Danilenko *et al.* 2018; Suttle *et al.* 2021).

El proyecto Stardust fue uno de los primeros proyectos a gran escala que se enfocó en la recolección de MMs en zonas urbanas, además de encontrar diversas partículas de origen terrestre e industrial; al final obtuvieron una base de datos de más de 40,000 fotografías de partículas de diferentes orígenes (Larsen 2017). Los MMs encontrados se clasificaron de acuerdo con la composición química, mineralógica y textural, al final se reportaron 500 MMs con tamaños mayores a 100 μm (Genge *et al.* 2017).

Suttle *et al.* (2021) realizaron una caracterización de micrometeoritos urbanos en Alemania, donde se recolectaron 315 micrometeoritos y cada uno de ellos se clasificó obteniendo en su mayoría esferas cósmicas de tipo S, además se obtuvo el primer flujo de masa que se estimó con datos de micrometeoritos urbanos.

La recolección y búsqueda de MMs ha sido mayormente en lugares con climas fríos como es el caso de las colecciones de la Antártida. Las partículas se conservan de mejor manera ya que sufren de poco intemperismo, además que reciben menor aporte de partículas terrestres o antropogénicas. Las colecciones en la Antártida y Groenlandia abarcan una gran variedad de sitios, como en hielo, nieve, pozos, morrenas, etc., que brindan información acerca del flujo de masa, características químicas, texturales y magnéticas de los MMs, (Maurette *et al.* 1987; Taylor *et al.* 1998; Yada *et al.* 2004; Duprat *et al.* 2007; Rochette *et al.* 2008; Suavet *et al.* 2009; Genge *et al.* 2018).

La colecta de los MMs en la estratosfera se lleva a cabo por proyectos de la NASA y de esta forma se disminuye la aparición de partículas de contaminación terrestre, sin embargo, los MMs suelen ser más pequeños. Además, dichas colecciones revelaron pequeñas esferas cósmicas magnéticas que ayudaron a encontrar partículas similares en los sedimentos del fondo oceánico.

La recolección en los sedimentos del fondo oceánico fue una de las primeras colecciones grandes, ya que los MM se recuperaban de núcleos o de manera magnética, por otro lado, las rocas sedimentarias también han aportado registros de los micrometeoritos más grandes (Taylor y Lever 2001).

La formación de colecciones de micrometeoritos tienen la ventaja de recolectar material extraterrestre de una manera fácil, accesible y sin costos, además la mayoría de las partículas se encuentran bien conservadas con edades muy jóvenes. Las desventajas de la recolección de micrometeoritos se puede dar por la forma de recuperación del material o la limpieza de los sedimentos, en el caso de las colecciones urbanas, los trabajos de limpieza en azoteas reducen la cantidad de micrometeoritos (Suttle *et al.* 2021).

3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MICROMETEORITOS

La metodología desarrollada en este trabajo consistió en varias etapas que incluyen la compilación de antecedentes bibliográficos de los micrometeoritos, la recolección del material, preparación y limpieza de las muestras, búsqueda de prospectos de micrometeoritos y análisis mineralógicos y químicos de las partículas (Figura 3.1). A continuación, se explicará en más detalle cada una de las etapas realizadas.

La compilación de bibliografía consistió en la búsqueda de artículos científicos, capítulos de libros o resúmenes de congresos que proporcionarán toda la información acerca de las colecciones y resultados de micrometeoritos existentes hasta ahora.

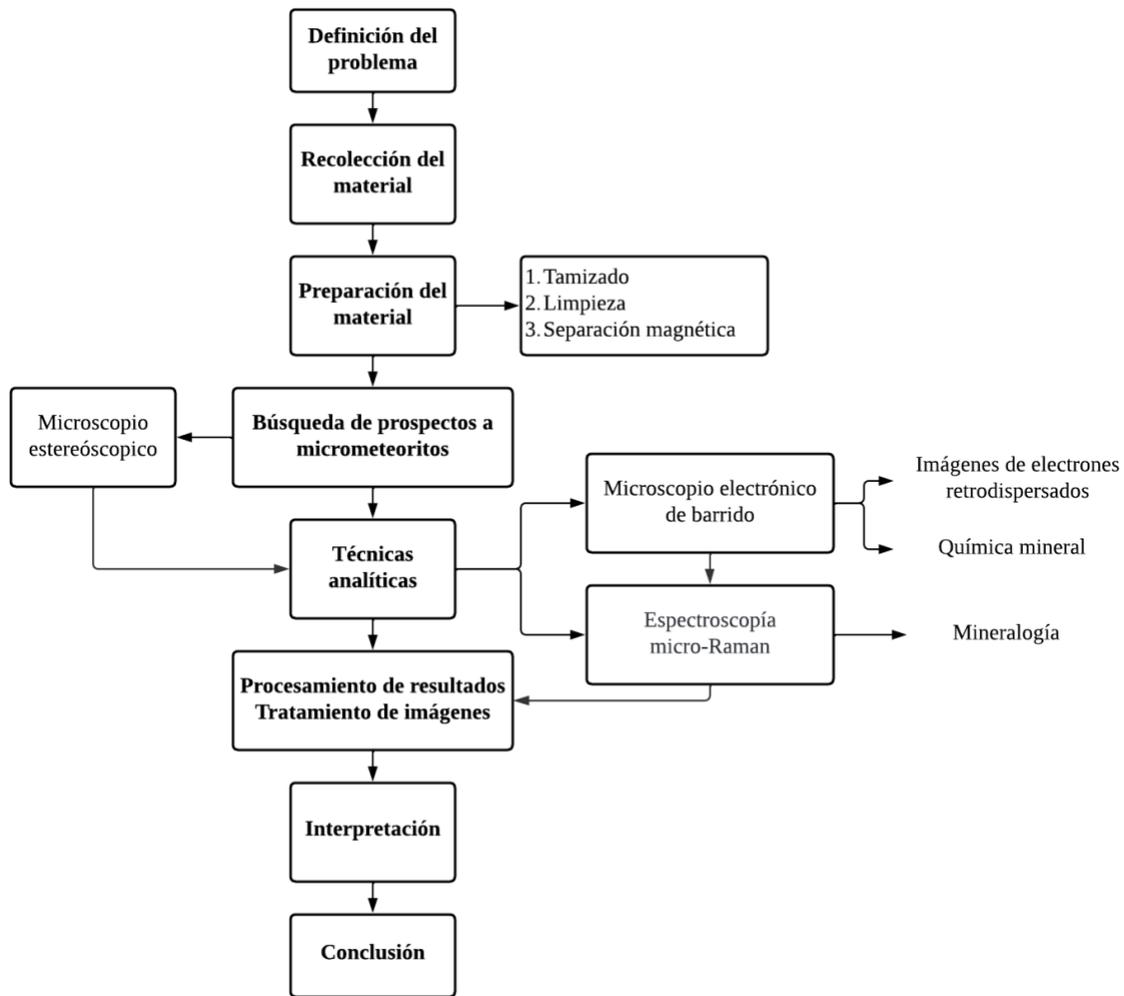


Figura 3.1. Metodología propuesta para la investigación del trabajo.

3.1 Recolección de material

La metodología para la recolección del material está basada en otros trabajos (Genge *et al.* 2017; Suttle *et al.* 2021), sin embargo, se han hecho modificaciones en la cantidad de recolección del material ya que se recogió todo el material que barrió en la azotea. La recolección se realizó en las azoteas de casas localizadas en la zona urbana de la capital de San Luis Potosí. Las zonas de muestreo se eligieron dependiendo de la accesibilidad y disponibilidad de los dueños. El procedimiento para obtener las muestras consistió en barrer las zonas seguras y disponibles en las azoteas con mayor énfasis en las partes donde sea visible una acumulación de sedimentos. Cabe destacar que es importante utilizar equipo de seguridad, tal como, cubrebocas y lentes, debido a que los sedimentos poseen un contenido alto de contaminantes urbanos.

3.2 Preparación de muestras

En total se procesaron 10 muestras que en total suman 10.961 kg. La preparación de las muestras empezó con el secado del sedimento en un horno eléctrico por 24 horas a una temperatura de 60 °C para que se pudiera eliminar la humedad de la muestra. Posteriormente, cada una de las muestras se tamiza de acuerdo con siete tamaños de grano (4-2 mm, 2-1 mm, 1 mm-500 µm, 500-250 µm, 250-125 µm, 125-62 µm, >62 µm).

La segunda parte de la preparación de las muestras fue la limpieza de cada fracción con agua desionizada (agua Mili-Q) para una buena limpieza de microorganismos, es libre de sales y de líquidos (ejemplo como el cloro). Posteriormente se realizaron baños ultrasónicos con agua Mili-Q por 5 minutos y lavado con acetona para la dispersión de las partículas aglomeradas, y por último la decantación. El proceso se repitió 2 veces por fracción. Las muestras se colocaron en charolas de aluminio y se secaron en horno por 24 horas a 60 °C para secarlas completamente.

La extracción magnética de las fracciones secas se realizó extendiendo la muestra en una superficie plana (2-3 mm de espesor por capa), se pasaron imanes de neodimio (N35, 15 mm) cubiertas de papel encerado por toda la muestra a 1 cm de distancia, posteriormente se quitaba el papel encerado y las partículas magnéticas y paramagnéticas se separaban de los imanes y caían en un recipiente.

3.3 Búsqueda de prospectos de micrometeoritos

La búsqueda de prospectos a micrometeoritos se realizó con un microscopio estereoscópico marca Leica. La primera identificación de micrometeoritos fue a partir de las características morfológicas,

de acuerdo con el esquema de Genge *et al.* (2008). Las características que se privilegiaron se encuentran la redondez, el color y algunas texturas visibles en la superficie de las partículas.

Los micrometeoritos pueden ser esféricas, elípticas y ovoidales. El color representativo de los micrometeoritos es gris oscuro, de translúcidos a opacos, los MMs vítreos tienden a ser de color marrón, amarillo o verde transparente y el tipo I tienden a tener lustres metálicos. Las texturas que se pueden encontrar en la superficie son muy amplias, sin embargo, las más representativas son estrías paralelas, protuberancias nudosas y perlas de Fe-Ni, en los MMs vítreos suelen ser lisos, por lo tanto, además de observar las características microscópicas, se requiere utilizar técnicas analíticas para tener más criterios de clasificación.

3.4 Técnicas analíticas

Con el fin de observar las características micromorfológicas de las muestras, las partículas separadas fueron montadas en una cinta de grafito adherida a un cilindro de aluminio para ser vistas en un microscopio electrónico de barrido (MEB) y realizar análisis de espectroscopía micro-Raman.

3.4.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El MEB es una técnica no destructiva en donde un haz de electrones incidentes interactúa con los átomos de la muestra y originan electrones secundarios, de electrones retrodispersados y de rayos X. Los electrones secundarios son ideales para obtener información de la morfología y topografía de las muestras mientras que las imágenes de electrones retrodispersados proporcionan un mapa con información sobre la composición superficial e ilustra los contrastes composicionales de la muestra (Figura 3.2) (Melgarejo *et al.* 2010; Swapp 2017).

El MEB también incorporan detectores de rayos X del tipo EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*) que permite identificar los elementos químicos existentes en la muestra. Los estudios que se realizaron fueron con un microscopio electrónico de barrido modelo TM3030 Hitachi™ de vacío variable. Las imágenes que se utilizaron fueron las imágenes BSE COMPO (electrones retrodispersados) que se tomaron con un aumento óptico que va de 5X a 60,000X más un aumento digital de 2X y 4X. El equipo operó con un voltaje de aceleración de electrones incidentes de 15 kV. El equipo contaba con un detector de energía dispersiva (EDS) para obtener análisis semicuantitativos de la composición química. La ventaja de utilizar un equipo de vacío variable es

que las muestras no se recubren de grafito, lo cual es indispensable para permitir otros estudios que no son parte de los objetivos de esta tesis.

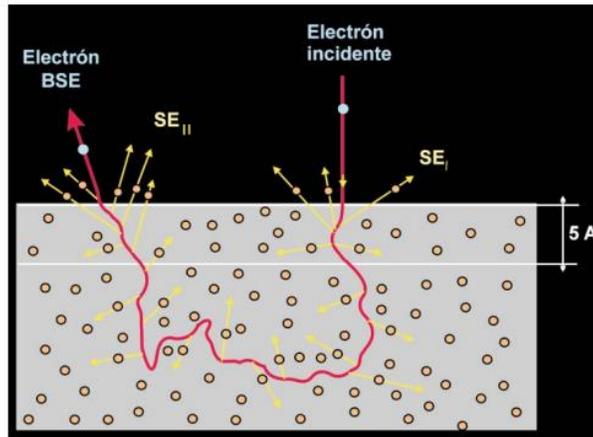


Figura 3.2. Interacción del haz de electrones incidentes con la muestra, en donde se puede ilustrar el comportamiento de los electrones secundarios que suelen escapar, mientras que los electrones retrodispersados tienen una trayectoria dentro de la muestra que terminan siendo reflejados y otros absorbidos.

3.4.2 Espectroscopía micro-Raman

La espectroscopía micro-Raman es una excelente herramienta para adquirir información modos vibracionales de los minerales, en este caso, de rocas extraterrestres. La técnica presenta varias ventajas: es no destructiva, las mediciones pueden ser en escala micrométrica y confocal, requiriendo cantidades pequeñas de materia (Dobrica et al. 2011). Estas ventajas hacen que el estudio de micrometeoritos por medio de la espectroscopia micro-Raman sea de gran ayuda y se complementa con otras técnicas.

Esta técnica se utilizó para la identificación de los minerales, en especial los óxidos, que se presentan en las partículas. Según Frezzotti *et al.* (2012) la espectroscopía Raman es la medida de los fotones que surgen de la dispersión inelástica de la luz monocromática (rango de luz visible, infrarrojo o el rango ultravioleta). Los espectros Raman obtenidos se compararon con la base de datos en línea de RRUFF para identificar los minerales, se utilizó un equipo DXR MicroRaman Confocal de Thermo Scientific y se empleó un objetivo Olympus x50.

El software *CrystalSleuth* se utilizó para analizar y manipular los datos de micro-Raman, así como para eliminar el ruido de fondo y los eventos de rayos cósmicos de los espectros y buscar coincidencias de las posiciones de los picos con la base de datos en línea de RRUFF.

4. RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS

4.1 Sitios de muestreo

Los sitios muestreados se encuentran dispersos en el área urbana de San Luis Potosí (Tabla 4.1). Cuatro de los sitios se encuentran cercanos a la antigua fundidora de cobre que funcionó de **1890 a 2010**, actualmente en este sitio las actividades industriales cesaron y en su lugar se encuentra el parque perteneciente al complejo metalúrgico Industrial Minera México (IMMSA). Otro de los sitios de muestreo se encuentra cercano a empresas como Bachoco, Apelsa y una Terminal de Almacenamiento y Depósito de PEMEX y otro más es cercano al Parque Industrial. Los 10 sitios se encuentran en la zona céntrica de la ciudad. La localización de las muestras se visualiza en la Figura 4.1.

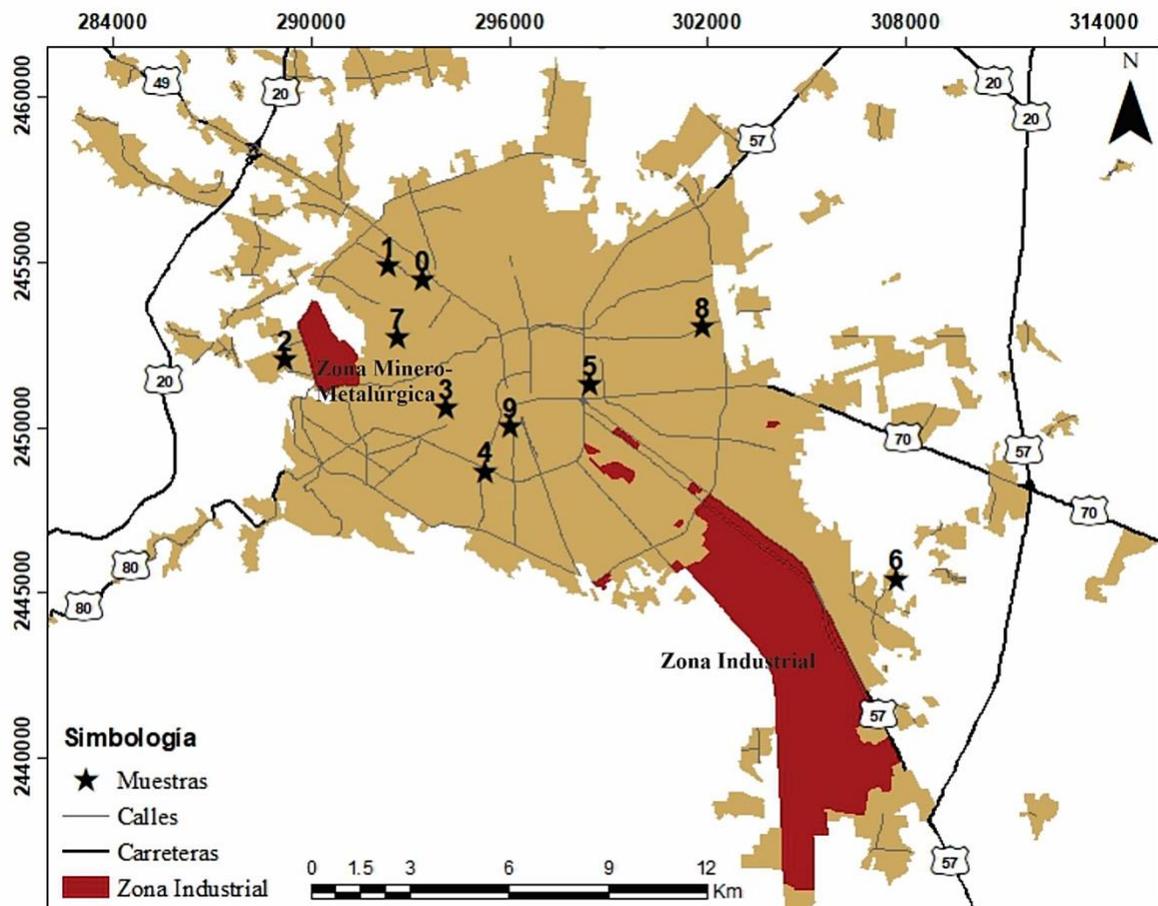


Figura 4.1. Mapa de localización de las muestras.

Tabla 4.1. Distribución y características de los sitios de muestreo para localizar micrometeoritos (MM).

Sitio	Coordenadas UTM	Peso de la muestra (g)	Observaciones
SLPa-00	293368, 2454447	2785.21	Cerca del sitio se encuentra la iglesia del Saucito y la embotelladora Aga, el tiempo de acumulación de sedimentos es de aproximadamente 30 años informado por el propietario.
SLPb-01	292350, 2454886	61.38	Con respecto a la fecha de recolección, hace poco se había limpiado la azotea por lo que se encontró muy poco material.
SLPb-02	289203, 2452043	321.96	Casa relativamente nueva (10 años) ubicada en una zona cercana a la es fundidora IMMSA de Morales.
SLPb-03	294096, 2450569	101.2	Localizada en zona céntrica de la ciudad y con gran afluencia vehicular.
SLPb-04	295292, 2451287	574.11	Ubicada cerca de la Av Salvador Nava Cercano, la cual es una de las vialidades importante de la ciudad.
SLPb-05	298450, 2451287	1936.33	Ubicado en las inmediaciones de la carretera 57 la cual es una de las principales vialidades que conecta la ciudad con la zona industrial. El tiempo de acumulación es considerable ya que tenían un espacio sin barrer.
SLPb-06	307717, 2445392	2103.04	Sitio ubicado cerca de la zona industrial.
SLPb-07	292629, 2452709	1867.84	Sitio localizado en la zona céntrica de la ciudad. En la azotea del sitio se encontraron restos de varilla y material de construcción. Los restos de varilla presentaban óxidos, debido al proceso de intemperización.
SLPb-08	301870, 2453033	161.63	Sitio ubicado al este de la zona urbana.
SLPb-09	296028, 2450003	1048.91	Sitio ubicado en una zona muy céntrica de la ciudad y se encuentra muy cercano a la Parroquia de San Miguelito.

4.2 Sedimentos

Los sedimentos estudiados en este trabajo tienen un tamaño de grano en el rango de 125 micrómetros y 1 milímetro (de 1 a 3 phi, donde $\text{phi} = -\log_2 D$, $D = \text{diámetro de partícula en milímetros}$). El peso total de las muestras recolectadas en 10 azoteas fue de 10,896.88 gramos (Tabla 4.2).

La cantidad de material barrido depende de varios factores como el clima, el tiempo de acumulación y las condiciones para que se permita esa acumulación de sedimentos en las azoteas. La cantidad de muestra colectada en cada azotea oscila entre los 2764.61 g y los 60.27 g. Como se muestra en la Tabla 4.2 en algunos casos el peso de las fracciones puede llegar a ser menor de los 50 g. Las muestras que tienen uno de los pesos más altos es por la cantidad de acumulación, en un caso fue de 30 años, mientras que las muestras que con menos peso fue porque fueron limpiados un mes antes de la recolecta del material. El peso total inicial es diferente al peso total final, ya que hay pérdida de material por el proceso de tamizado, limpieza y decantación de las muestras.

De manera general, los granos y cristales que se encontraron en todos los sedimentos de las azoteas están compuestos por granos de cuarzo, calcita, feldespato y plagioclasa que tienen formas que van de sub redondeados a muy angulosos (clasificación Powers 1953), en algunas muestras también se encontraron fragmentos de rocas oxidadas.

A pesar de que se encontraron los mismos cristales, las muestras se pudieron diferenciar por el contenido de partículas antropogénicas-industriales que era fácilmente observable por la coloración e los sedimentos. Las muestras que contenían menor cantidad de estas partículas fueron las localizadas en la parte noreste de la zona urbana, mientras que las partículas que se localizaron en la parte sureste tienen más partículas industriales. Dichas partículas son esquirlas de soldadura, fragmentos de cubiertas oxidadas de pedazos de acero, partes de insectos, plástico, pedazos de impermeabilizante, fragmentos de cemento, etc.

En la Figura 4.2 se pueden observar 4 ejemplos de muestras de diferentes azoteas, los componentes no tienen mucha variación entre sí, una de las diferencias son los fragmentos de oxidación de los escombros que se pueden encontrar en cada una de las casas. En todas las muestras se puede observar la ausencia de minerales máficos, como lo son el olivino, piroxenos o anfíboles.

Tabla 4.2. Peso de las muestras antes del tamizado, en cada una de las fracciones y el peso total final en gramos

	Peso total (gr)	ϕ								TOTAL
		-2	-1	0	1	2	3	4	<4	
<i>SLPb-00</i>	2785.41	34.85	118.98	318.81	662.2	619.33	599.19	325.3	85.95	2764.61
<i>SLPb-01</i>	61.38		6.61	6.49	9.82	4.2	2.78	7.56	22.81	60.27
<i>SLPb-02</i>	321.96	112.46	18.39	31.47	55.4	48.96	25.9	17.82	8.29	318.69
<i>SLPb-03</i>	101.2		16.02	10.68	16.18	18.22	11.92	18.48	8.09	99.59
<i>SLPb-04</i>	574.11	20.94	27.59	47.08	88.1	84.41	193.53	86.59	20	568.24
<i>SLPb-05</i>	1936.33	33.92	38.7	259.87	428.37	306.34	152.37	368.46	339.46	1927.49
<i>SLPb-06</i>	2103.04	383.1	419.67	383.39	227.83	133.15	102.48	135.65	306.47	2091.74
<i>SLPb-07</i>	1867.84	116.57	154.28	241.9	349.84	290.94	201.61	218.45	289.69	1863.28
<i>SLPb-08</i>	161.63	4.46	1.46	6.49	9.57	15.26	13.46	44.84	63.94	159.48
<i>SLPb-09</i>	1048.91	264.03	231.55	201.7	152.62	85.05	43.35	32.68	32.51	1043.49
TOTAL	10961.81	970.33	1033.25	1507.88	1999.93	1605.86	1346.59	1255.83	1177.21	10896.88

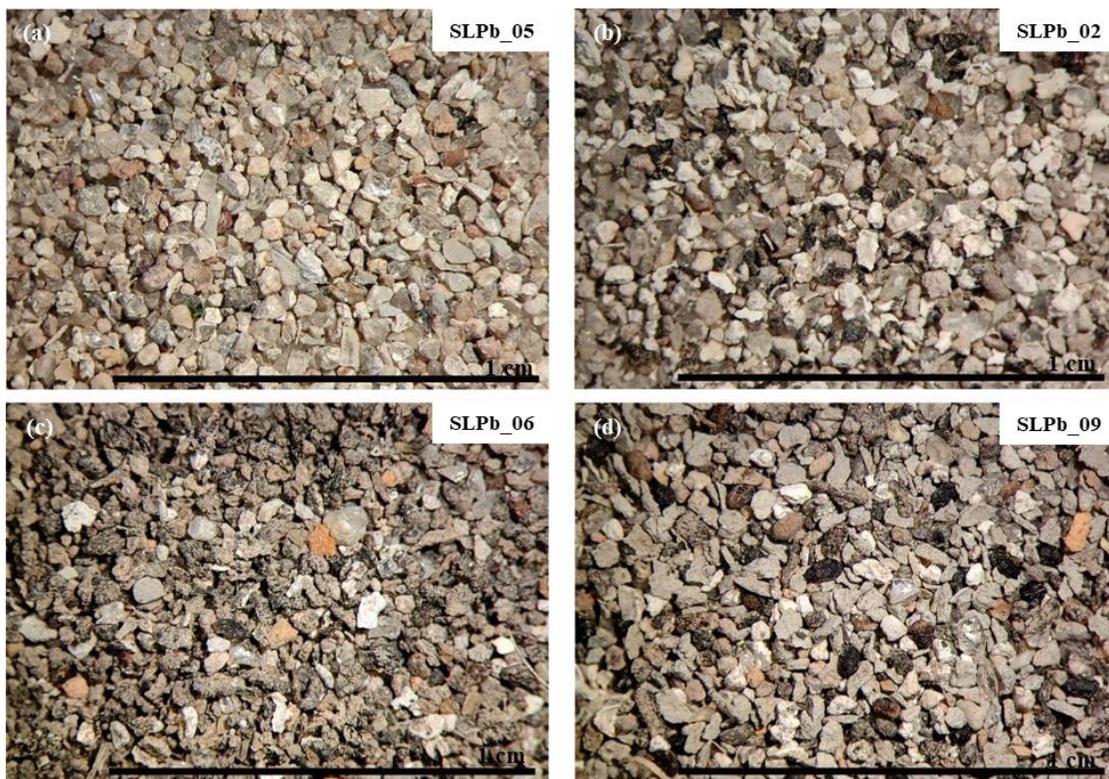


Figura 4.2. Muestra total recolectada en 4 sitios diferentes. (a) Muestra SLPb_05 localizada cerca de la carretera 57, los sedimentos tienen poca contaminación industrial ya que el lugar de acumulación estaba en el patio trasero. (b) SLPb_02 localizada en la parte oeste de la zona urbana y contiene menor cantidad de partículas antropogénicas que el esto. (c) SLPb_06 localizada en la parte sureste de la zona urbana, cercano a la zona industrial que fue reflejado por la cantidad de material tipo hollín que se encontró. (d) SLPb:09 localizada cerca del centro histórico y se encontraron muchos fragmentos de cemento e impermeabilizante. Escala 1 cm.

4.3 Fracción magnética de los sedimentos

La separación magnética dio como resultado la obtención de partículas con tamaños que van de 500 a 125 micrómetros. La cantidad más grande que se separó de cada fracción no es mayor a los 5 gramos, por lo que la búsqueda de material magnético arrojó poco material para la búsqueda de prospectos a micrometeoritos.

Las partículas que se encontraron fueron fragmentos de la corrosión del acero de escaleras o escombros de construcción, estos fragmentos tienen color rojizo o grisáceo con forma de láminas. También se encontraron cristales de magnetita con hábito octaédrico y algunas fibras de plásticos, pedazos de impermeabilizantes, así como algunos granos de minerales (Figura 4.3).

Dentro del material magnético y paramagnético se encontraron muchas partículas con formas esféricas, elipsoidales o de gota de color negro o gris con un brillo metálico a submetálico, además de encontrar partículas de otros colores como blancas o marrón. La superficie de las partículas bajo microscopio estereoscópico tiende a ser rugosa y en menor medida lisas o vesiculares. En la Figura 4.4 se presentan algunos ejemplos de partículas encontradas en el material magnético.

La mayoría de las partículas seleccionadas tienen superficies que presentan patrones de líneas delgadas que podían rodear a lo largo o ancho de la partícula en diferentes direcciones, también se encontraron esferas con patrones de líneas más gruesas y marcadas, en este caso, esta textura es barrada y rodean a lo ancho a la partícula (Figura 4.4 f). Otra textura observada fueron patrones de crecimiento de cristales, además de perlas que sobresalen de la superficie de la partícula (Figura 4.4 e y f).



Figura 4.3. Material magnético de dos muestras donde se observan las láminas de intemperismo de material de acero y otras partículas magnéticas. Escala 1 cm.

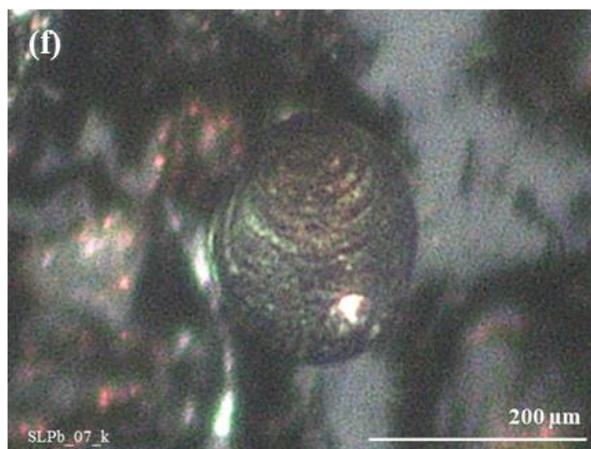
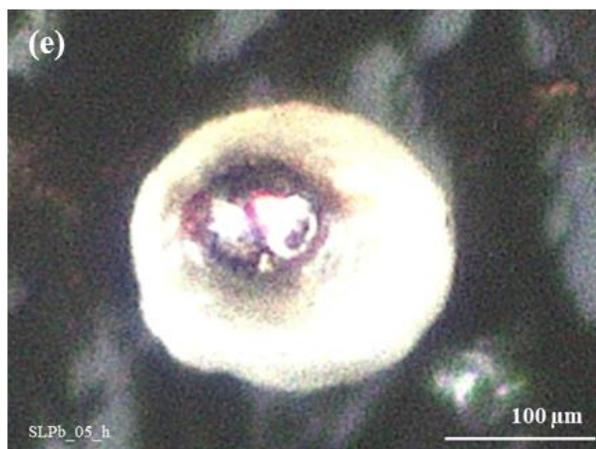
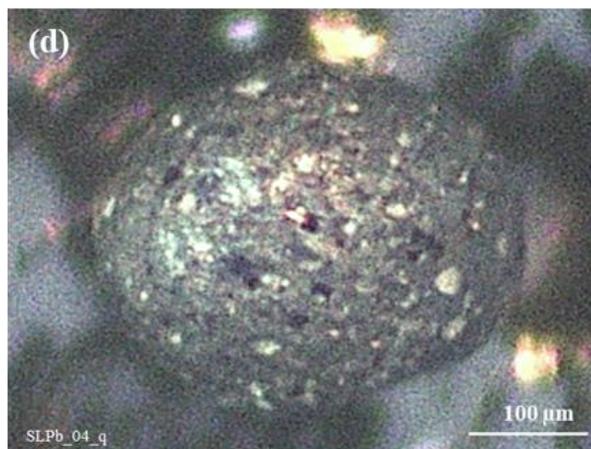
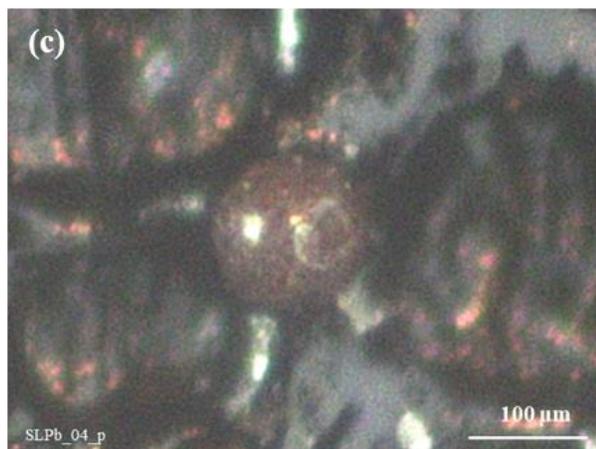
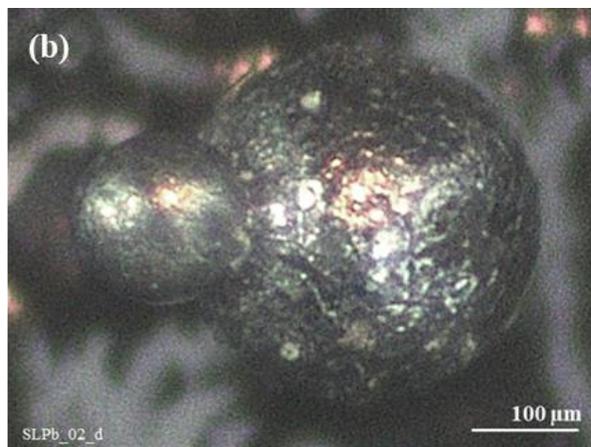


Figura 4.4. Esferas magnéticas recolectadas por medio de un imán. (a) Esfera con forma de gota y una textura lisa. (b) Esfera compuesta por dos partículas con una textura rugosa. (c) Esfera de color marrón con una textura lisa. (d) Esfera metálica con vesículas. (e) Esfera de color blanco con una perla plateada. (f) Esfera con textura barrada y una perla dorada.

4.4 Microestructura

Los prospectos a micrometeoritos que se recolectaron en el material magnético se estudiaron con un microscopio electrónico de barrido (MEB). Las características importantes para seleccionar las partículas en el MEB fue que presentaran textura superficial lo más parecida con la base fotográfica Larsen (2017), como lo son texturas barradas, perlas y crecimiento de óxidos de Fe.

Las partículas seleccionadas se pudieron agrupar en la siguiente clasificación:

4.4.1 Esferas tipo I (magnéticas)

Las esferas se caracterizan por tener un tamaño de 130 a 670 micrómetros, las texturas que presentan en la superficie son rugosas además se pueden observar algunos patrones de líneas o estructuras de cristales equigranulares. Las partículas en las imágenes de electrones retrodispersados tienen un color gris claro a fuerte (Figura 4.5).

Los análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDS) fueron realizados en 27 esferas con un total de 81 análisis químicos. Se calculó el promedio y la desviación estándar de los análisis de cada partícula. La desviación estándar nos ayudó a identificar qué partículas tenían composición homogénea y qué otras partículas podían tener otros minerales presentes en la superficie.

El cálculo estequiométrico permitió identificar el tipo de minerales de óxido de Fe que componen a las partículas. La wüstita (FeO) se identificó en 11 esferas con una composición aproximada que va de Fe_{0.87} a Fe_{0.98}, además de pequeñas cantidades de Si, Al, Co y Ca (Tabla 4.3).

Los cristales que se pueden observar en la superficie son de hábito octaédrico y romboédrico, donde los cristales están en contacto uno con otro como se observan en la Figura 4.5 a, d y e. Otra textura que se observa en algunas esferas es una morfología de cristales dendríticos que se relacionan con cristales de wüstita que tienen patrones de líneas en varias direcciones como en la Figura 4.5 b. En la esfera SLPa_00_i (Figura 4.5 f) se distinguió material entre los cristales de FeO que tiene una composición vítrea de silicato - (Ca,Fe).

Las partículas restantes tienen composiciones variables en donde se encontraron ferritas con Mn, óxidos de Fe, Co, Ni, así como aleaciones de silicato-óxidos de Fe. Ti y Al y óxidos de Fe,Ca. Una de las esferas tiene una composición de óxido de Al con una perla con altos contenidos de Fe y Co. Las composiciones de estas partículas se pueden ver en la Tabla 4.4.

De igual manera, en el MEB se pudieron distinguir mejor las características texturales en la superficie, desde partículas huecas con vesículas, también se observaron cristales de hábito romboédrico y octaédrico y algunas manchas de otro material en la superficie. Además, algunas presentaron el crecimiento de esferas más pequeñas en la superficie y de partículas compuestas por dos esferas que también presentan una textura en donde los cristales tienen contacto entre sí (Figura 4.6).

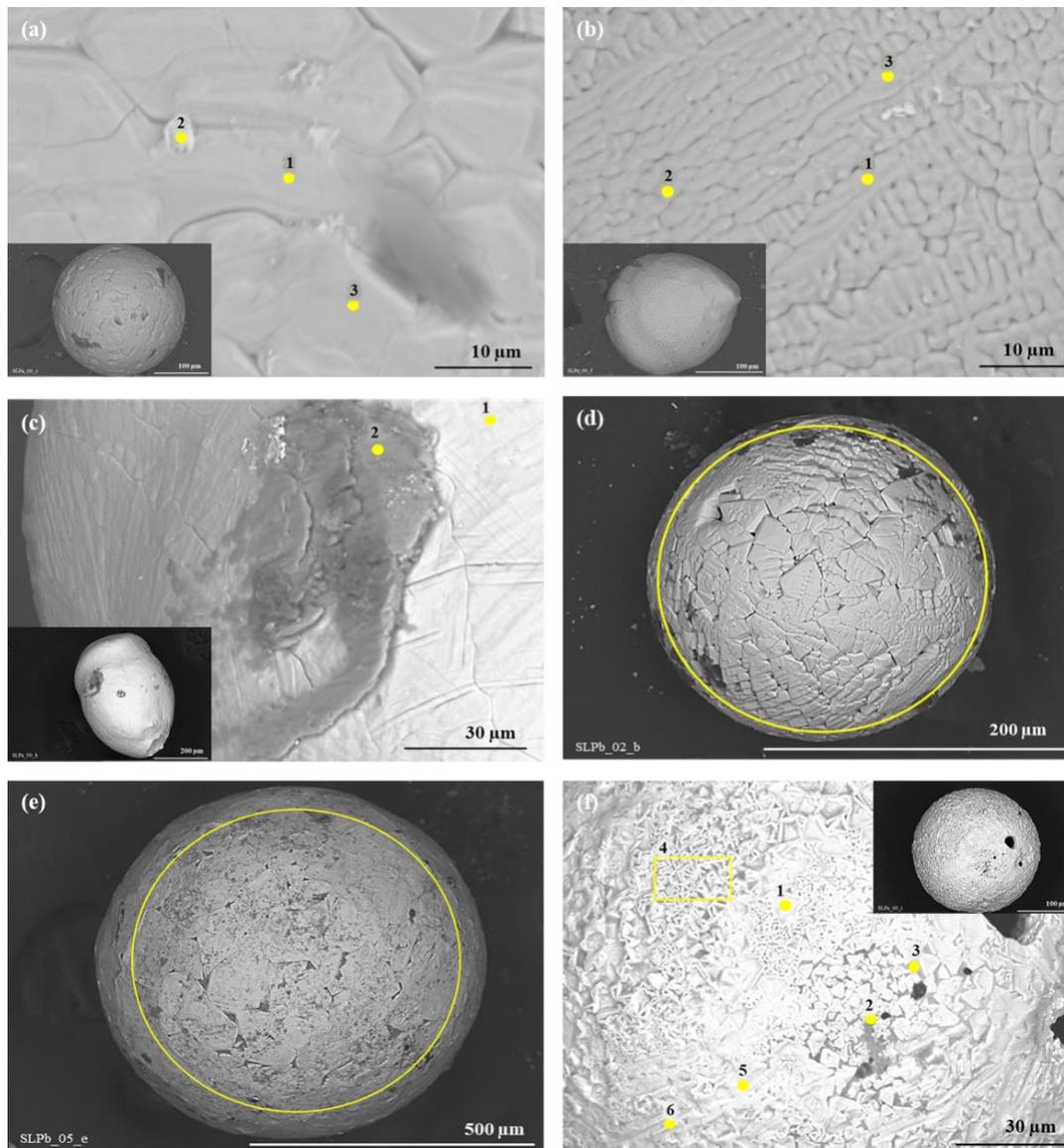


Figura 4.5. Ejemplos de esfera de tipo I con contenidos altos de Fe para la formación de wüstita. Las esferas (a, d, e, y f) muestran una estructura web que se forma con el contacto de los cristales de wüstita. La esfera (b) tiene una estructura de cristales dendríticos de wüstita que forman líneas en varias direcciones en la superficie de la partícula. Algunas esferas también presentaron incrustaciones de otros materiales en la superficie de la partícula como en la esfera (c) con una incrustación de óxido de Al. Los puntos enumerados indican en donde se realizaron análisis EDS.

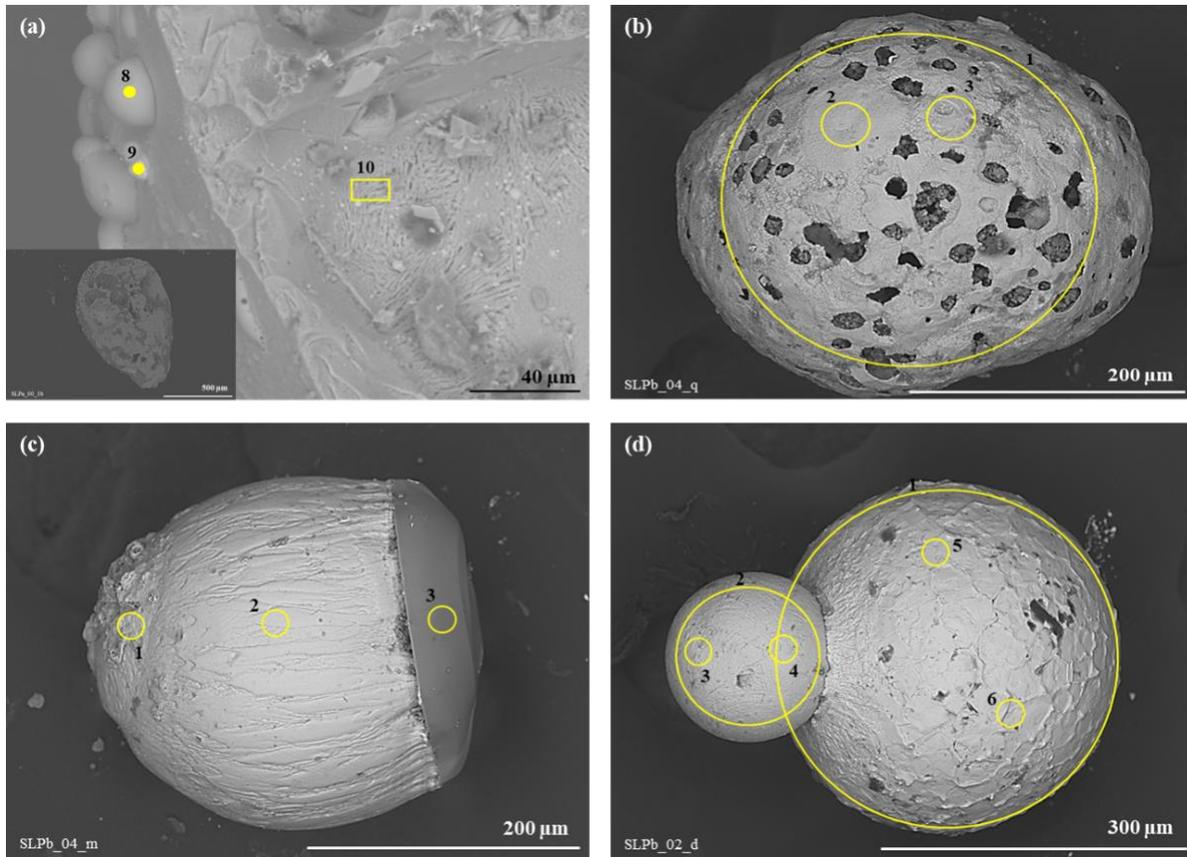


Figura 4.6. Ejemplos de esfera con composiciones variables de óxidos. (a) Esfera con aleaciones de silicato-óxido de Fe, Ti. (b) Esfera hueca porosa con composiciones ricas en Fe y Mn. (c) Esfera con altos contenidos altos de Fe y en menor cantidad de Na, Al y Si, presenta una “tapa” de composición de silicatos. (d) Esfera compuesta por dos partículas ricas en Fe. Los puntos enumerados son donde se realizaron análisis EDS.

Los espectros EDS (Figura 4.7) de las partículas de tipo I muestran una mayor concentración del elemento Fe y en menor medida O, Al y Si. Las partículas que contenían un porcentaje alto de Fe se les hizo un cálculo estequiométrico con un oxígeno. El total de Fe, según varios autores, debe de estar en el rango de los 0.84 y 0.95.

Tabla 4.3. Análisis EDS en porcentaje en peso para el cálculo estequiométrico de minerales de wüstita.

	<i>SLPa_00_a</i>	<i>SLPa_00_b</i>	<i>SLPa_00_c</i>	<i>SLPa_00_d</i>	<i>SLPa_00_f</i>	<i>SLPa_00_g</i>	<i>SLPa_00_h</i>	<i>SLPa_00_i</i>	<i>SLPb_02_b</i>	<i>SLPb_02_c</i>	<i>SLPa_01_e-l</i>
<i>Si</i>	0.79	0.10	0.20	0.91	0.13	-	-	0.53	0.59	0.71	-
<i>Ti</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.97
<i>Al</i>	1.40	0.61	0.79	1.06	0.93	0.45	1.57	0.73	0.87	0.87	4.23
<i>Cr</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>O</i>	23.44	22.60	22.71	23.32	22.74	22.48	23.00	22.97	23.02	23.02	24.50
<i>Fe</i>	74.38	76.73	76.40	74.73	76.29	77.08	75.43	75.65	69.60	70.50	70.30
<i>Mn</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	1.47	0.43	-
<i>Mg</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.53	0.53	-
<i>Na</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	1.07	0.98	-
<i>Ca</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11	0.16	-
<i>Co</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	2.75	2.81	-
<i>Ni</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>S</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
IO											
<i>Si</i>	0.02	-	0.01	0.02	-	-	-	0.01	0.01	0.02	-
<i>Ti</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
<i>Al</i>	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.10
<i>Cr</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Fe</i>	0.91	0.97	0.96	0.92	0.96	0.98	0.94	0.94	0.87	0.88	0.82
<i>Mn</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.01	-
<i>Mg</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.02	-
<i>Na</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	-
<i>Ca</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	-
<i>Co</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	-
<i>Ni</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>S</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	0.96	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99	0.98	0.97	1.00	1.00	0.94
Fe_xO	Fe _{0.91} O	Fe _{0.97} O	Fe _{0.96} O	Fe _{0.92} O	Fe _{0.96} O	Fe _{0.98} O	Fe _{0.94} O	Fe _{0.94} O	Fe _{0.87} O	Fe _{0.88} O	Fe _{0.82} O

Tabla 4.4. Análisis EDS en % en peso de las esferas que presentan composición más variable.

	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Cr</i>	<i>O</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>Ca</i>	<i>K</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cl</i>	<i>V</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Total</i>
<i>SLPb_04_q-2</i>	3	2.83	1.85	-	25.37	49.71	5.68	0.58	1.17	0.4	-	7	1.26	0.19	0.96	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_04_q-3</i>	4.08	2.29	2.17	-	-	66.57	8.86	0	1.15	0	-	11.05	2.31	-	1.52	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_05_j</i>	2.45	-	2.1	-	26.5	63.27	0.57	0.73	1.09	0.85	-	2.45	0	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_08_r-2</i>	2.5	-	0.77	-	24.68	51.36	2.68	0.25	1.31	1.09	1.29	10.3	2.88	-	0.39	0.49	-	-	-	100.00
<i>SLPb_08_r-4</i>	2.66	-	0.88	-	22.12	54.55	2.95	0.54	0.75	1.02	1.18	9.56	3.21	-	0.58	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_08_r-3</i>	2.41	0.64	0.41	0.32	7.42	65.94	4.5	0.22	0.46	1.07	1.49	10.66	3.49	-	0.70	0.25	-	-	-	100.00
<i>SLPb_08_r-5</i>	1.07	-	1.96	-	26.7	53.57	3.34	0.88	0.69	0.5	-	10.33	0.97	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPa_00_1b-8</i>	2.39	38.1	2.26	-	36.9	10.2	4	0.3	-	5.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPa_00_1b-9</i>	1.76	4.4	1.46	-	25.5	64.1	-	-	1.2	1.04	0.49	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPa_00_1b-10</i>	5.14	26.2	8.4	-	38.1	11.8	2.8	0.3	0.5	4.42	1.97-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_02_a-2</i>	0.88	-	1.13	0.52	18.42	73.12	1.5	1.32	2.28	0.32	0.24	-	-	-	-	0.27	-	-	-	100.00
<i>SLPb_02_a-3</i>	0.15	-	1.01	1.04	1.05	93.93	2.6	-	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_02_d-3</i>	1.35	-	1.15	0.94	16.32	73.62	1.05	0.97	1.85	0.25	-	2.12	-	-	-	-	0.38	-	-	100.00
<i>SLPb_02_d-4</i>	-	-	0.71	0.56	2.7	90.85	2.52	-	0.14	0.21	-	2.32	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_02_d-5</i>	0.61	0.2	0.82	0.48	11.4	80.32	1.79	0.38	0.94	-	-	2.65	0.19	0.2	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_02_d-6</i>	1.07	-	0.95	0.38	3.21	87.66	1.93	-	0.42	-	-	4.38	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_04_m-1</i>	5.33	0.6	2.17	0.59	20.41	64.82	0.83	1.35	2.27	0.54	-	0.43	-	-	0.34	-	-	0.30	-	100.00
<i>SLPb_04_m-2</i>	0.62	-	0.53	0.26	11.69	81.59	1.11	0.2	-	0.16	-	2.86	-	-	-	-	-	0.98	-	100.00
<i>SLPb_04_m-3</i>	28.35	-	3.5	2.79	18.44	20.77	0.85	0.48	-	18.72	-	2.69	1.09	1.75	-	-	-	0.57	-	100.00
<i>SLPb_04_p-2</i>	3.83	1.13	11.68	1.47	8.9	43.9	11.77	8.45	0.28	1.21	0.24	3.17	-	0.18	0.58	0.34	-	-	2.88	100.00
<i>SLPb_05_f-3</i>	1.37	0.13	1.62	0.4	5.12	80.69	1.3	0.78	0.88	2.13	-	5.13	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_05_f-4</i>	2.68	-	13.23	-	43.27	25.55	-	2.56	2.95	9.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_05_h-2</i>	8.13	0.17	49.34	0.15	37.98	2.31	-	0.72	0.77	0.31	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-	100.00
<i>SLPb_05_h-3</i>	10.31	0.13	2.09	0.55	6.51	76.95	0.31	0.38	0.66	-	-	2.11	-	-	-	-	-	-	-	100.00

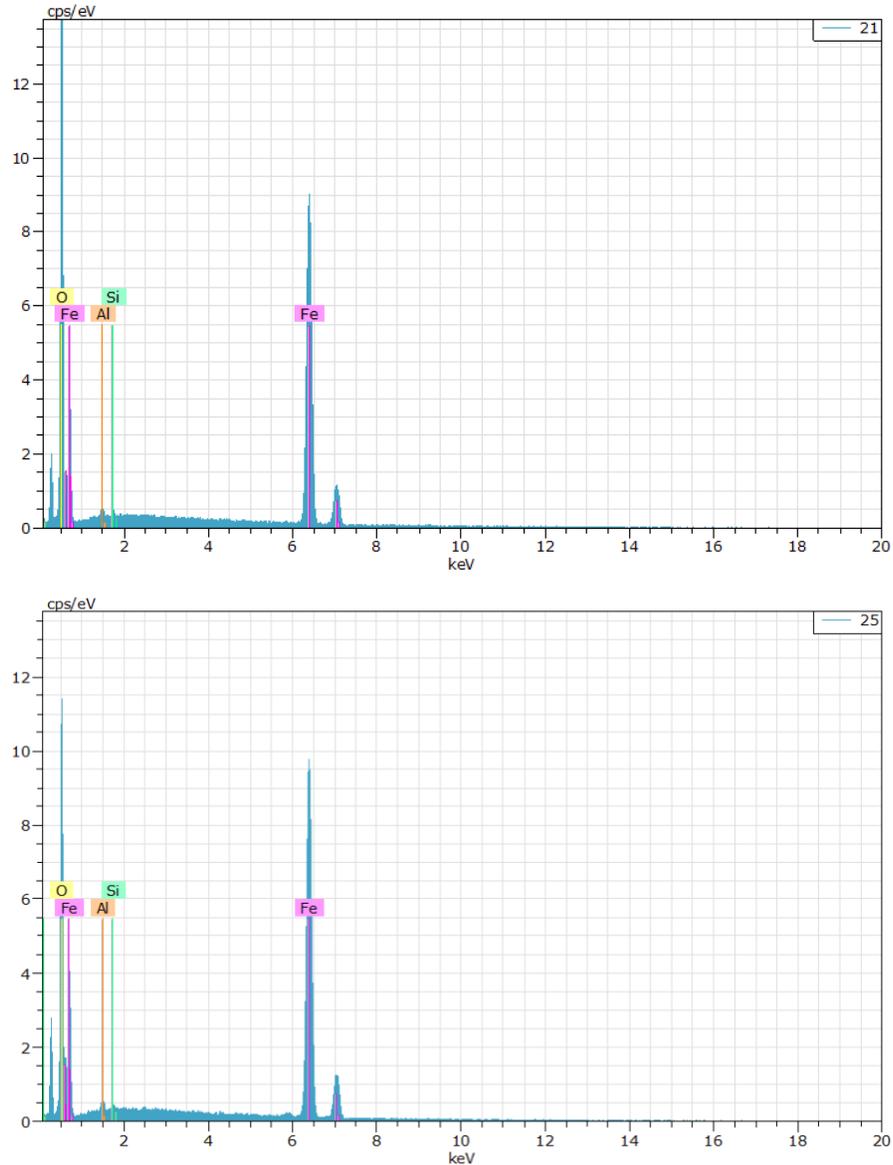


Figura 4.7. Ejemplos de espectros EDS donde se puede observar que las esferas de tipo I tienen como elemento principal el Fe, y en menor cantidad Al y Si.

4.4.2 Esferas tipo S (barradas de olivino)

Las dos esferas tienen un tamaño de 200 a 400 micrómetros, presentan una textura barrada y formas ovoidales, una de ellas tiene una perla de Fe-Ni. Las partículas en las imágenes de electrones retrodispersados tienen un color gris fuerte a claro con pequeños puntos más claros.

La composición química general es de silicatos de Fe y Mg. Los análisis químicos puntuales muestran una composición que sugiere la presencia del mineral de olivino rico en Mg (forsterita)

y olivinos ricos en Fe (fayalita). En la Tabla 4.5 se muestran los análisis que se realizaron en las esferas SLPa_00_a y SLPb_07_k que presentaron las características texturales que se mencionaron y la composición de la perla que se observó en una de las esferas.

En la esfera SLP_00_a (Figura 4.8 a) se realizaron 7 análisis químicos, de los cuales 4 puntos tienen una composición promedio de $Fe_{74}Fa_{26}$ con una desviación estándar de 8 % mol para ambas composiciones, mientras que los otros 3 puntos se realizaron sobre la textura dendrítica de la magnetita por lo que tienen una cantidad mayor de Fe.

En la esfera SLPb_07_k (Figura 4.8 b) se realizó un análisis con una composición promedio de $Fe_{58}Fa_{42}$ y de igual manera se realizó un análisis en la perla metálica que tiene una composición de 82.3 % en peso de Ni y 7.7 % en peso de Fe. La Figura 4.9 muestra imágenes composiciones de la partícula y se puede observar que los elementos Fe, Mg, Si, Al, Ni y S son los que presentaron menor ruido, además de observar un contenido de S en la perla de Ni.

Las texturas que se pudieron observar en la superficie de las partículas al hacer un acercamiento son las dendritas de magnetita encima de las barras de olivino (Figura 4.10).

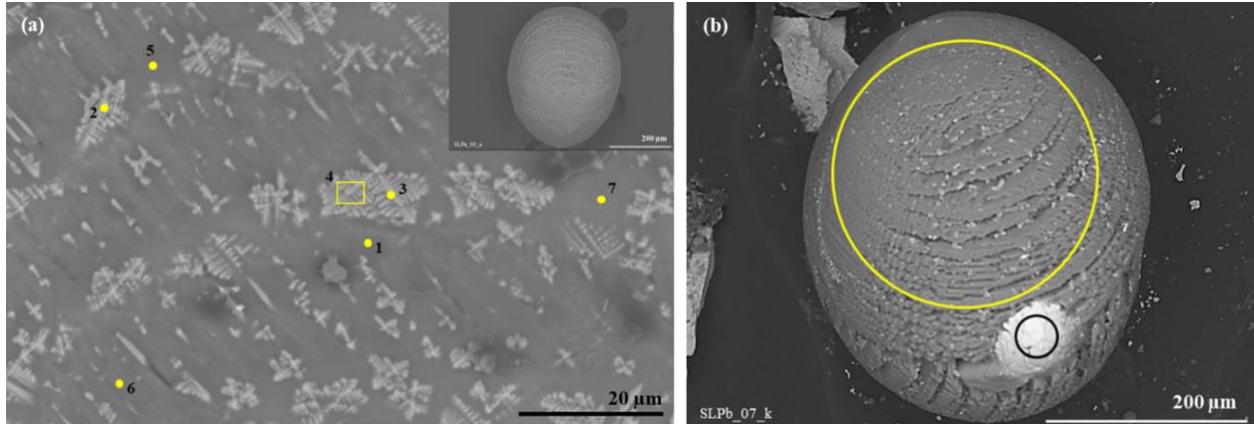


Figura 4.8. Partículas tipo S. (a) Esfera barrada de olivino. (b) Esfera barrada de olivino con una perla de Ni-Fe.

Tabla 4.5. Análisis EDS de las esferas barradas de olivino, de igual manera se presenta la estequiometría para 5 cristales de olivino, obteniendo contenidos de fayalita y forsterita, así como la perla de la esfera SLPb_07_k.

<i>Muestras</i>	<i>SLPa_01_a</i>							<i>SLPb_07_k</i>		
	<i>No.</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>1</i>	<i>Perla</i>
<i>O</i>		41.22	32.01	31.41	32.96	41.21	41.11	40.35	24.57	3.4
<i>Si</i>		16.84	8.78	9.04	11.11	17.74	17.26	18.64	18.07	0.95
<i>Al</i>		1.06	2.88	2.57	2.67	1.77	1.47	2.29	1.89	0.52
<i>K</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ca</i>		0.55	1.07	1.45	1.8	1.14	0.98	1.35	1.03	0.38
<i>Ti</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Mn</i>		-	-	-	-	-	-	-	0.44	-
<i>Fe</i>		13.95	46.15	48.71	44.38	15.77	15.61	21.67	31.69	7.72
<i>Na</i>		-	-	-	-	-	-	-	0.76	0.81
<i>Mg</i>		24.93	8.04	5.81	6.26	21.66	22.93	15.69	19.42	0.87
<i>Cr</i>		0.33	1.07	1	0.81	-	-	-	0.52	-
<i>Ni</i>		1.11	-	-	-	0.71	0.65	-	0.41	82.34
<i>Co</i>		-	-	-	-	-	-	-	1.21	1.49
<i>S</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	1.52
TOTAL		99.99	100	99.99	99.99	100	100.01	99.99	100.01	100
40										
<i>Si</i>		0.90	-	-	-	0.95	0.93	1.02	1.63	
<i>Al</i>		0.06	-	-	-	0.10	0.08	0.13	0.18	
<i>Ca</i>		0.02	-	-	-	0.04	0.04	0.05	0.07	
<i>Mn</i>		-	-	-	-	-	-	-	0.02	
<i>Fe³⁺</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Fe²⁺</i>		0.39	-	-	-	0.44	0.44	0.62	1.48	
<i>Na</i>		-	-	-	-	-	-	-	0.09	
<i>Mg</i>		1.59	-	-	-	1.38	1.47	1.02	2.08	
<i>Cr</i>		0.01	-	-	-	-	-	-	0.03	
<i>Ni</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Co</i>		-	-	-	-	-	-	-	0.05	
<i>S</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	
TOTAL		2.98	-	-	-	2.92	2.96	2.85	5.48	
Fayalita (Fa)		19.59	-	-	-	24.07	22.86	37.55	41.53	
Forsterita (Fo)		80.41	-	-	-	75.93	77.14	62.45	58.47	

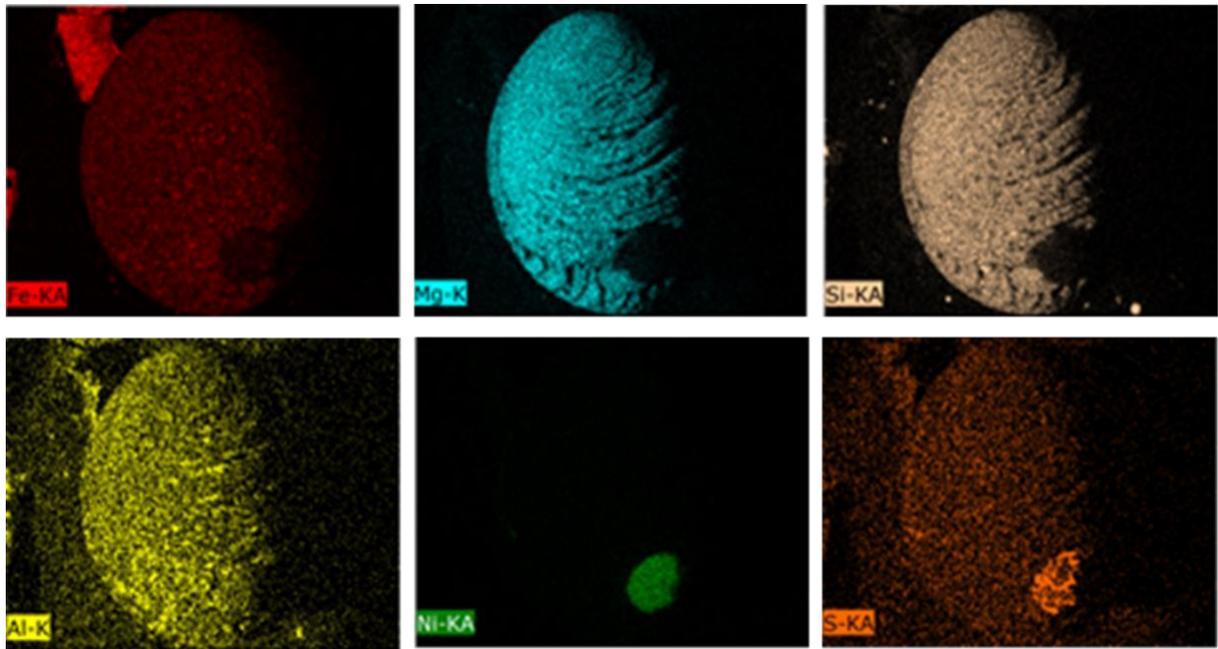


Figura 4.9. Imágenes composicionales de la partícula SLPb_07_k, donde se muestra que la esfera contiene elementos de Fe, Mg, Si que pueden correlacionarse con los olivinos, además de una perla que contiene Ni.

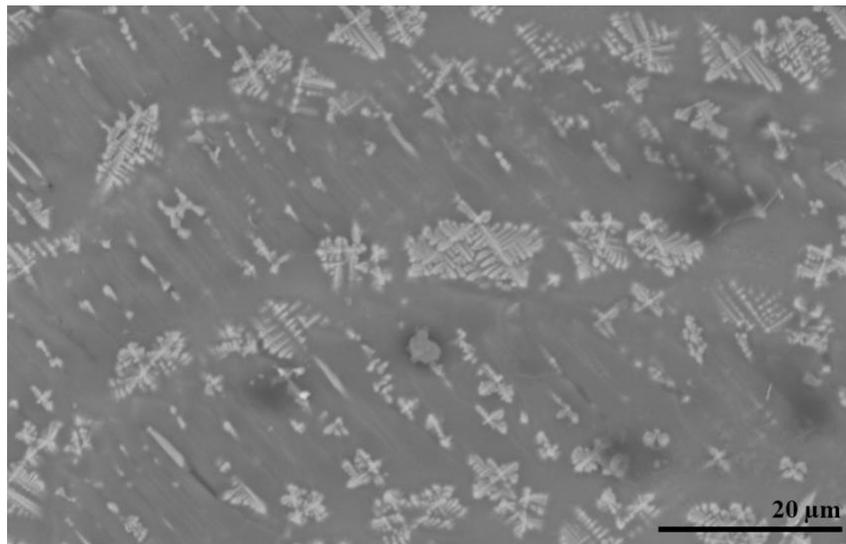


Figura 4.10. Dendritas de magnetita que se forman en la superficie de las esferas barradas de olivino.

4.5 Espectroscopía micro-Raman

De acuerdo con los análisis químicos se distinguieron varios minerales de silicatos y de óxidos de Fe. A continuación, se presentan los espectros micro-Raman de las partículas que conforman los dos grupos propuestos.

4.5.1 Esfera tipo I

Los análisis EDS de las esferas de tipo I mostraron contenidos altos de Fe, por lo que predominó fue la formación de óxidos de Fe. Los picos característicos de los minerales de óxidos de Fe que se pueden encontrar en las partículas de tipo I se muestran en la Tabla 4.6.

La magnetita tiene vibraciones diagnósticas cercanas al pico de 665 cm^{-1} , la wüstita en 595 cm^{-1} y la hematita en 225 , 409 y 1313 cm^{-1} . Según Hazan *et al.* (2013), la magnetita y la wüstita exhiben los mismos picos Raman sin embargo el pico en el 595 cm^{-1} es el más característico para diferenciar ambos espectros.

Los espectros micro-Raman de las partículas de tipo I resultaron ser wüstita y hematita. Dos esferas presentaron vibraciones principales en 216 , 281 , 395 , 595 , 645 y 1300 cm^{-1} relacionados con los picos característicos del mineral de wüstita que reporta Seifert *et al.* (2010) (Figura 4.11).

Las esferas con espectros similares a la hematita se compararon con la base de datos de RRUFF y se encontró que los picos característicos concordaban, pero con un pequeño corrimiento hacia la izquierda con pico en 220 , 240 , 287 , 400 , 605 y 1310 cm^{-1} , este corrimiento se puede dar por los efectos que puede generar el láser sobre los óxidos de Fe (Figura 4.12).

Tabla 4.6. Principales vibraciones (cm^{-1}) de óxidos de Fe presentes en las esferas tipo I.

	<i>Hanesch</i> (2009)	<i>Frezzotti et al.</i> (2012)	<i>De Faria et al.</i> (1997)	<i>Demoulin et al.</i> (2010)	<i>Seifert et al.</i> (2010)	<i>Este estudio</i>
Magnetita		193				
	310	306	301.6	306		
			513			
	540	538	533.6	538		
	<u>670</u>	<u>668</u>	662.7	<u>666</u>		
Wüstita					211-218	216
					277-283	281
					388-398	395
				<u>471</u>		
	<u>595</u>				<u>586-595</u>	<u>595</u>
			653		645	
Hematita	<u>225</u>	223		228	228	220
	254			250	248	240
	290-300			294	300	287
	412	<u>409</u>		414	414	400
		609		625	615	605
		<u>1313</u>		1330		1310

Nota: Los números subrayados son las vibraciones más fuertes para cada uno de los minerales.

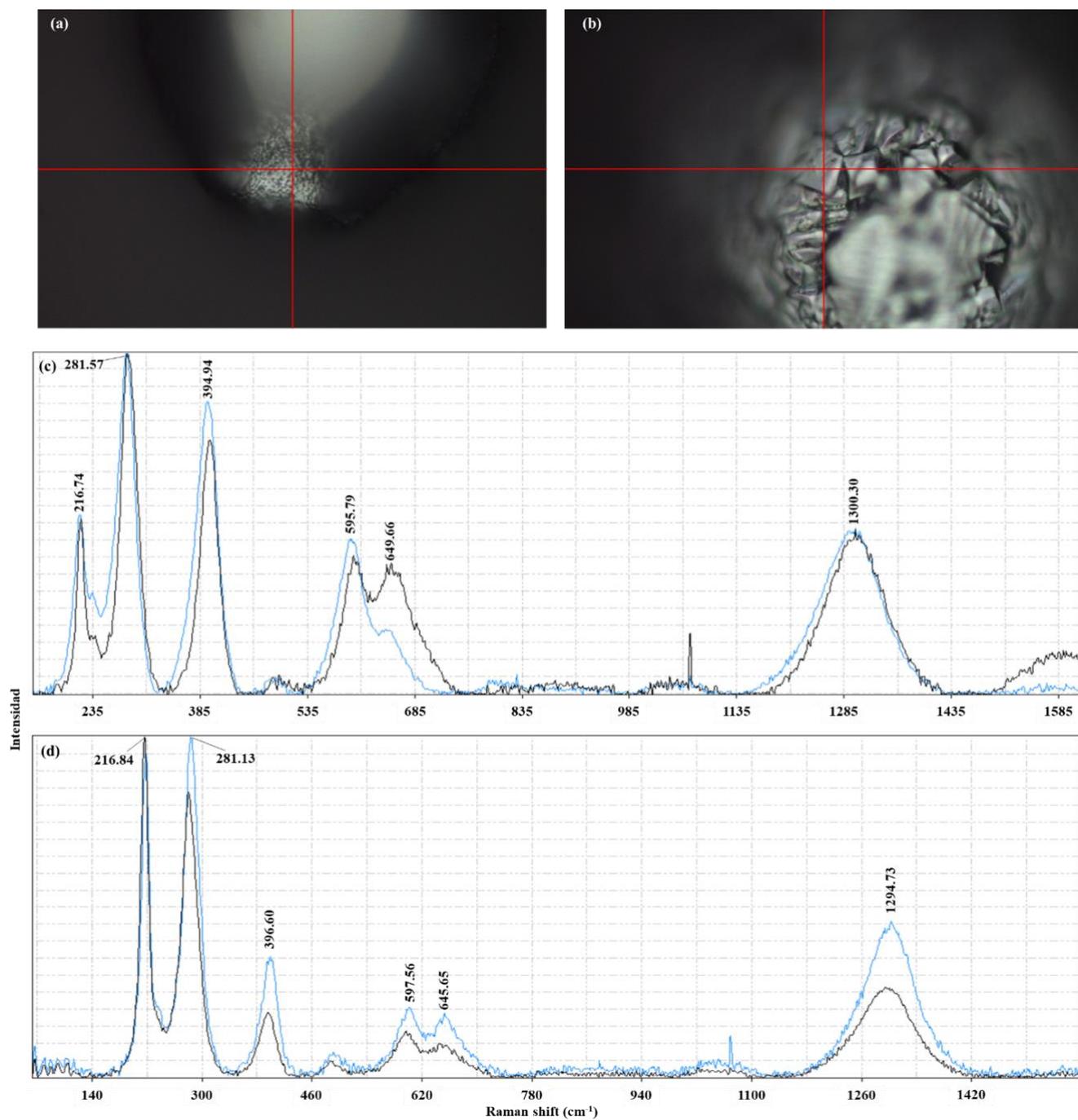


Figura 4.11. (a, c) Microfotografía y dos espectros micro-Raman de dos puntos diferentes de la esfera SLPb_02_a mostrando picos característicos de la wüstita. (b, d) Microfotografía y dos espectros micro-Raman de dos puntos diferentes de la esfera SLPb_02_b mostrando una mineralogía de wüstita. La base de datos que se tomo fue Seifert *et al.* (2010) que se muestra en la Tabla 4.6.

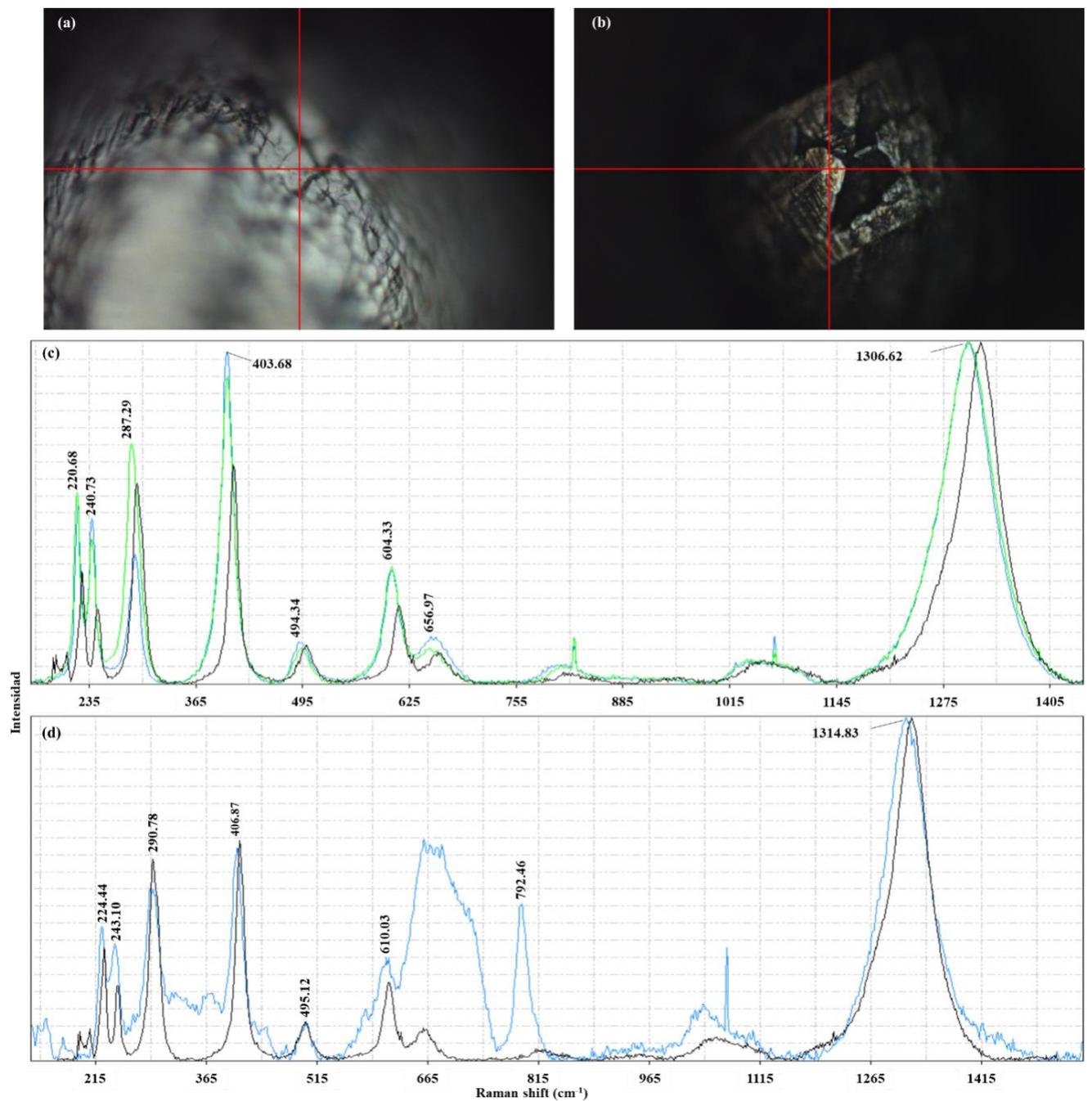


Figura 4.12 (a, c) Microfotografías y espectro micro-Raman de la partícula SLPb_02_c. (b, d) Microfotografía y espectro micro-Raman de la esfera SLPb_08_r. Los espectros en color negro es la hematita de la base de datos RRUFF. (<https://rruff.info/R050300/display=default/>).

4.5.2 Esferas tipo S (barradas de olivino)

De acuerdo con los análisis EDS, las partículas SLPa_00_a y SLPb_07_k presentaron composiciones de minerales de olivino. De acuerdo con Kuebler *et al.* (2006), un espectro Raman de olivino puede ser dividido en tres regiones: $<400\text{ cm}^{-1}$, $400\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ y $700\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$. Los picos entre los 700 y 1100 cm^{-1} se atribuyen a los modos vibracionales de estiramiento interno del grupo iónico SiO_4 , además de que el doblete en esta región con picos cerca de 820 y 850 cm^{-1} son función de la orientación del cristal.

De igual manera, los análisis y las microfotografías mostraron la presencia de un óxido de Fe y de acuerdo con Frezzotti *et al.* (2012) la vibración principal para la magnetita es 668 cm^{-1} y 538 cm^{-1} , de igual manera Hanesch (2009) propone que uno de los picos puede variar entre 661 y 676 cm^{-1} .

Los espectros que se obtuvieron de la partícula SLPb_07_k muestran el doblete en la región entre 700 a 1100 cm^{-1} con picos cerca de 818 y de 850 cm^{-1} concordante con el olivino, también se observa un pico cerca del 673 cm^{-1} relacionado con la magnetita (Figura 4.13).

De igual manera, la esfera SLPa_00_a presenta el doblete en la región entre 700 a 1100 cm^{-1} con picos cerca de 820 y de 850 cm^{-1} que es afín al mineral de olivino, también se observan otros picos importantes como el 670 y 539 que es relacionado con la magnetita (Figura 4.14).

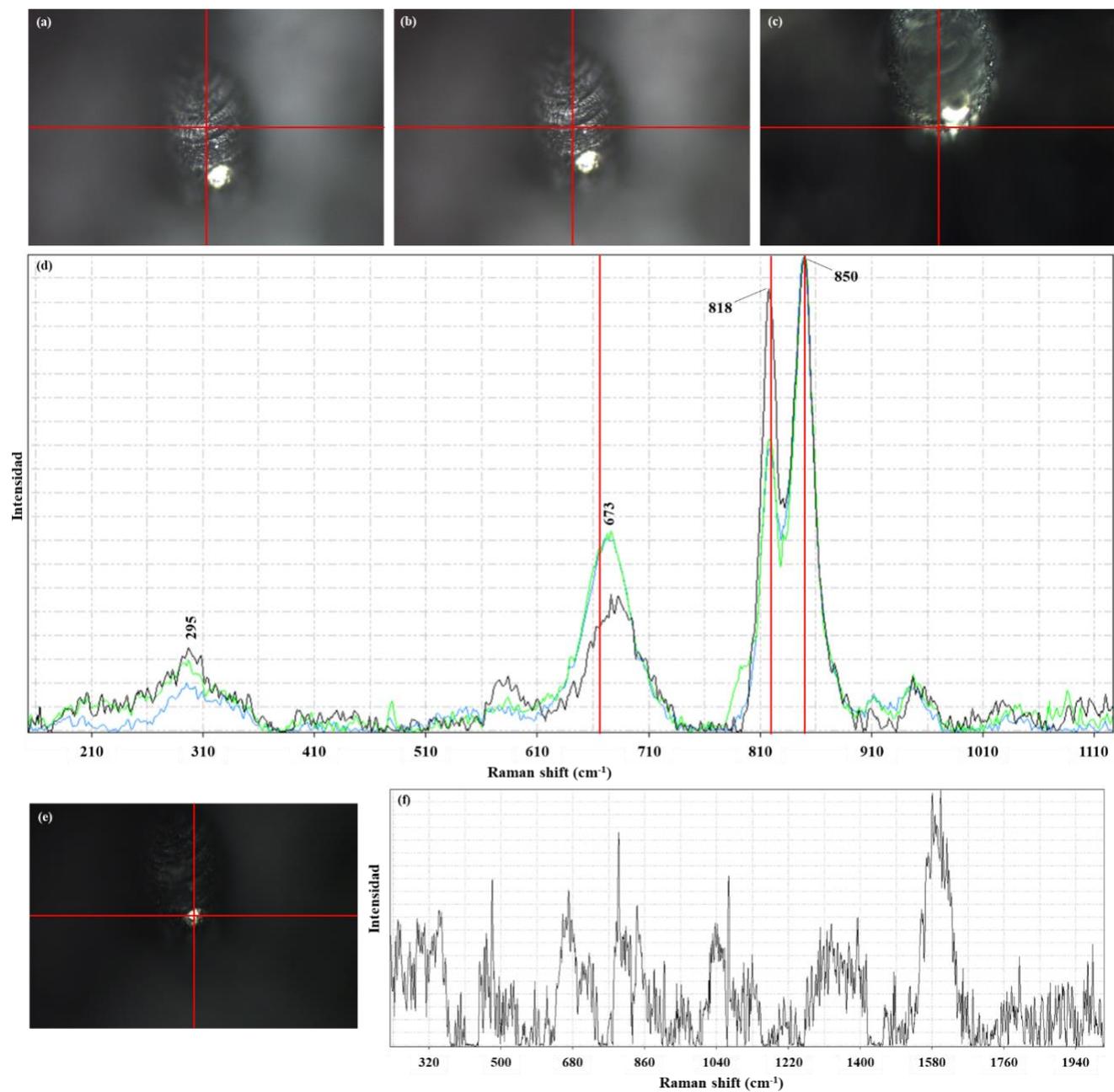


Figura 4.13. Espectros microRaman de la partícula SLPb_07_k. (a, b, c, d, e, f). Microfotografías y espectros microRaman donde se muestran los picos característicos del mineral del olivino, además de los puntos donde se realizaron los análisis en las barras de los olivinos. (g, h) Microfotografía y espectro microRaman de la perla de Ni.

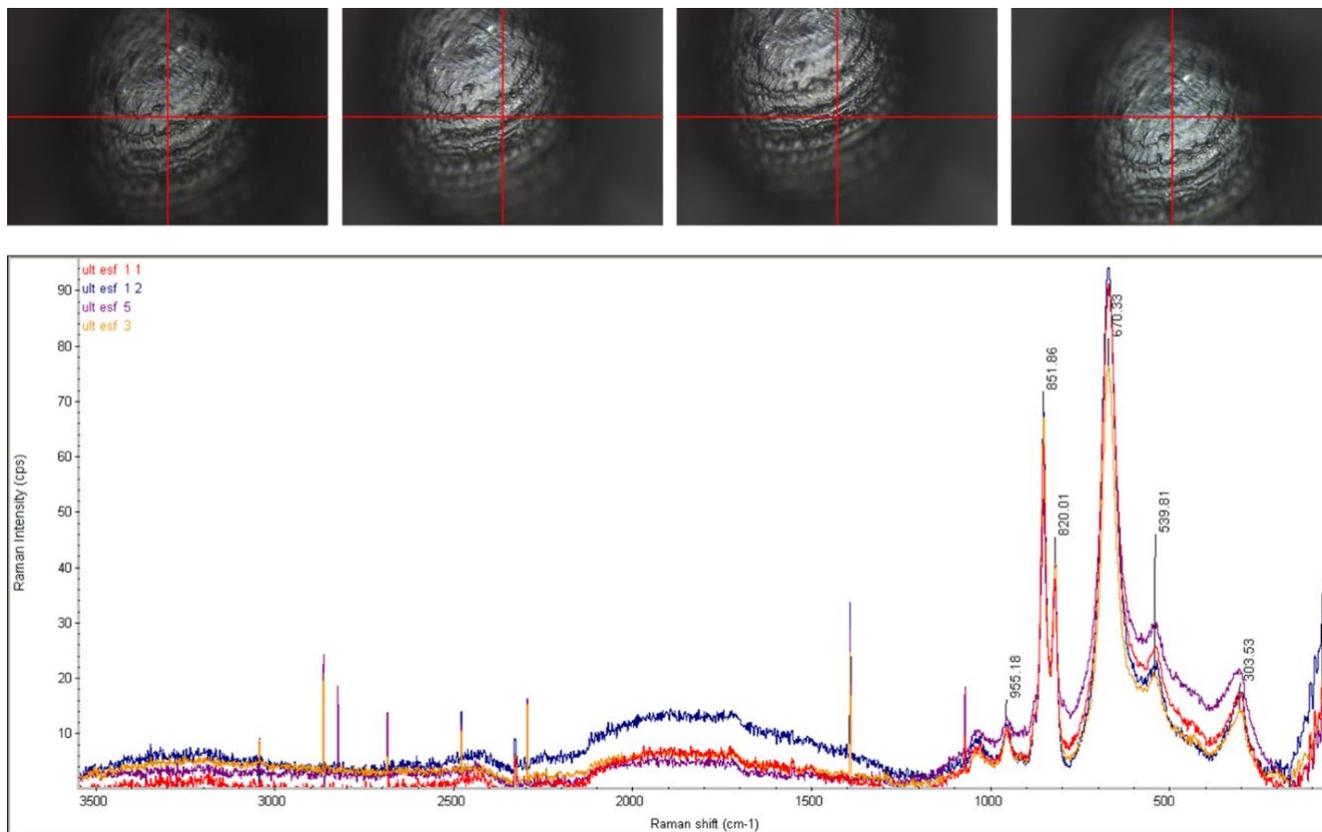


Figura 4.14. Microfotografías y espectros micro-Raman de la partícula SLPa_00_a en donde también se observan las vibraciones principales para el mineral de olivino, además de la magnética.

Las proporciones de fayalita y forsterita obtenidos de los análisis del MEB además de los análisis obtenidos de la espectroscopía micro-Raman se pueden comparar y encontrar coincidencias con los diagramas que muestran las frecuencias micro-Raman en función de los cationes Fe y Mg (Chopelas 1991, Montoya-Pérez 2016). La composición de los olivinos es importante para poder calcular M, la ecuación es:

$$M = (\text{masa atómica de Mg})(\%Fo/100) + (\text{masa atómica de Fe})(\%Fa/100)$$

Donde la masa atómica de Mg es igual a 23.4 y la masa atómica de Fe es 55.8. El valor de M nos ayuda a calcular el parámetro $1/\sqrt{M}$ que nos ayudará a realizar el diagrama. En la Tabla 4.7 se reportan los valores de M y el parámetro $1/\sqrt{M}$ así como las frecuencias (ν_1 y ν_3) obtenidas en los espectros.

La Figura 4.15 muestra que los picos característicos en micro-Raman coinciden con las frecuencias obtenidos por MEB por la relación Fe/Mg.

Tabla 4.7. Valores de M calculado a partir de las proporciones de Fo y Fa y las frecuencias características ($\nu_1+\nu_3$).

<i>Cristal</i>	<i>SLPb_07_k</i>	<i>SLPa_00_a-1</i>	<i>SLPa_00_a-5</i>	<i>SLPa_00_a-6</i>	<i>SLPa_00_a-7</i>
<i>Fo</i>	58.47	80.41	75.93	77.14	62.45
<i>Fa</i>	41.53	19.59	24.07	22,86	37.55
<i>M</i>	37.38	30.47	31.89	31.50	36.12
$1/\sqrt{M}$	0.16	0.18	0.18	0.18	0.17
$\nu_1 + \nu_3$	849.28	851.86	851.86	851.86	851.86
$\nu_1 + \nu_3$	817.82	820.01	820.01	820.01	820.01

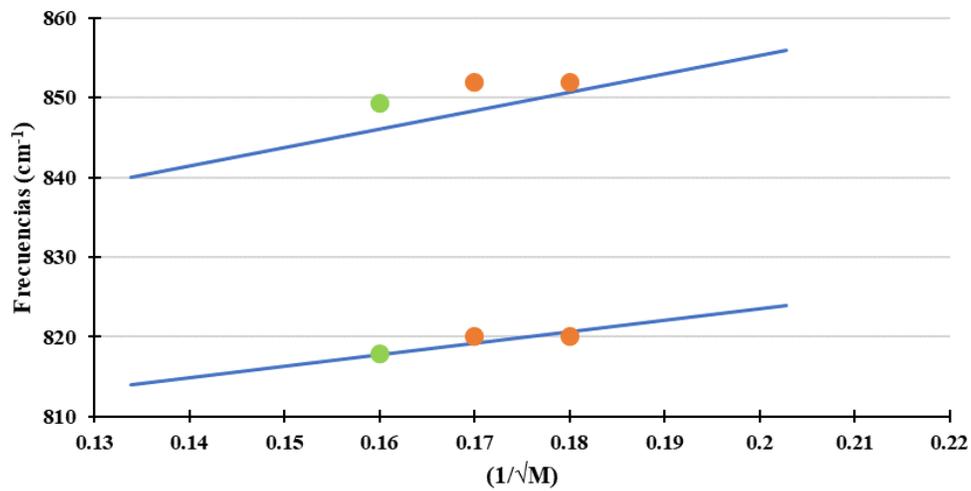


Figura 4.15. Diagrama de los modos internos de SiO₂ vs el parámetro $1/\sqrt{M}$, representado el cambio en la frecuencia vibratoria con la masa. M es el promedio de la masa del catión. Modificado de Montoya-Pérez (2016).

5. DISCUSIONES

5.1 De los sedimentos recolectados

El total del material recolectado de las azoteas tiene una gran variedad de componentes, desde granos de minerales terrestres, partículas totalmente esféricas y fragmentos de plásticos, así como un rango de tamaños que van de los 4 mm a los 62 μm . La mayoría de las partículas son minerales diamagnéticos, que al identificarse por otras de sus propiedades físicas (fractura, foliación, brillo, diafanidad, etc.) bajo el microscopio estereoscópico resultaron ser feldespato, cuarzo, calcita y magnetita, sin embargo, en la parte magnética también se encontraron con mayor frecuencia partículas esféricas de color negro y brillo metálico.

La distribución del tamaño de grano es unimodal por lo tanto no hay fuentes externas que aporten material ya depositado en las azoteas durante la recolección (Figura 5.1). En el caso de los depósitos de loess estos presentan una distribución bimodal que se divide en un componente grueso ($>20 \mu\text{m}$) y una moda de material fino ($<20 \mu\text{m}$), en este caso la distribución de las muestras es unimodal (Lin *et al.* 2016). Los sedimentos de azoteas presentan un comportamiento unimodal, por lo que se comportan como sedimentos de dunas, ya que se empobrecen en la fracción fina.

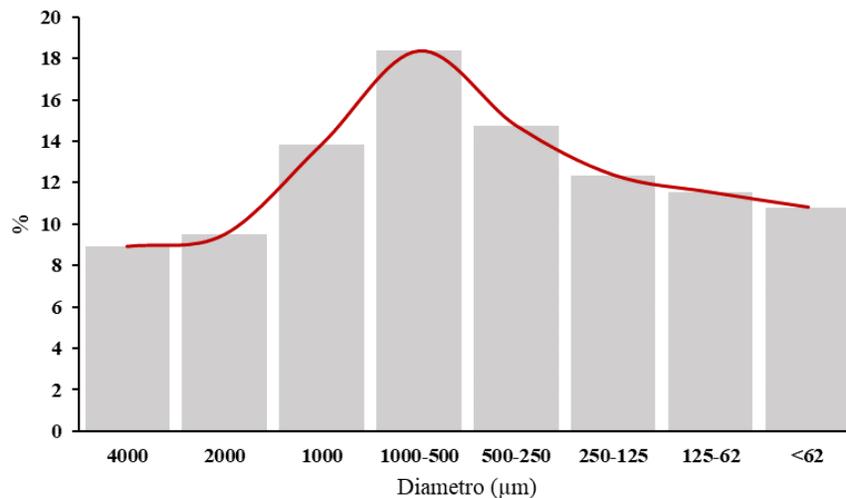


Figura 5.1. Histograma de la distribución del tamaño de grano de las partículas recolectadas.

Los granos de cuarzo y feldespatos suelen ser transportados y erosionados por el viento, pero suelen tener tamaños menores de 10 μm como lo propone Pineda-Martinez *et al.* (2011), por lo que las

partículas que pudieron ser transportadas por el viento a largas distancias no están incluidas en este trabajo.

Tsoar and Pye (1987) indican que las partículas $>20 \mu\text{m}$ solo pueden ser transportadas a través del viento por saltación y/o suspensión de corto alcance. Los micrometeoritos tienen tamaños y densidad altos que no podrían ser transportados por el viento, así que solo pueden depositados tras su entrada a la atmósfera terrestre.

Las partículas terrestres encontradas son concordantes con la geología circundante a la zona urbana que está delimitada al norte, oeste y sur por el Complejo Volcánico Sierra San Miguelito formada por una secuencia de lavas de composición riolítica (cuarzos y feldespatos) y depósitos de flujos piroclásticos (Labarthe-Hernández *et al.* 1982; Tristán-González *et al.* 2009). En el sector este afloran las secuencias carbonatadas pertenecientes a la Plataforma de Valles-San Luis (Carrillo-Bravo 1971) las cuales forman parte del Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicano (Fitz-Díaz *et al.* 2017), además de sedimentos cuaternarios (Figura 5.2).

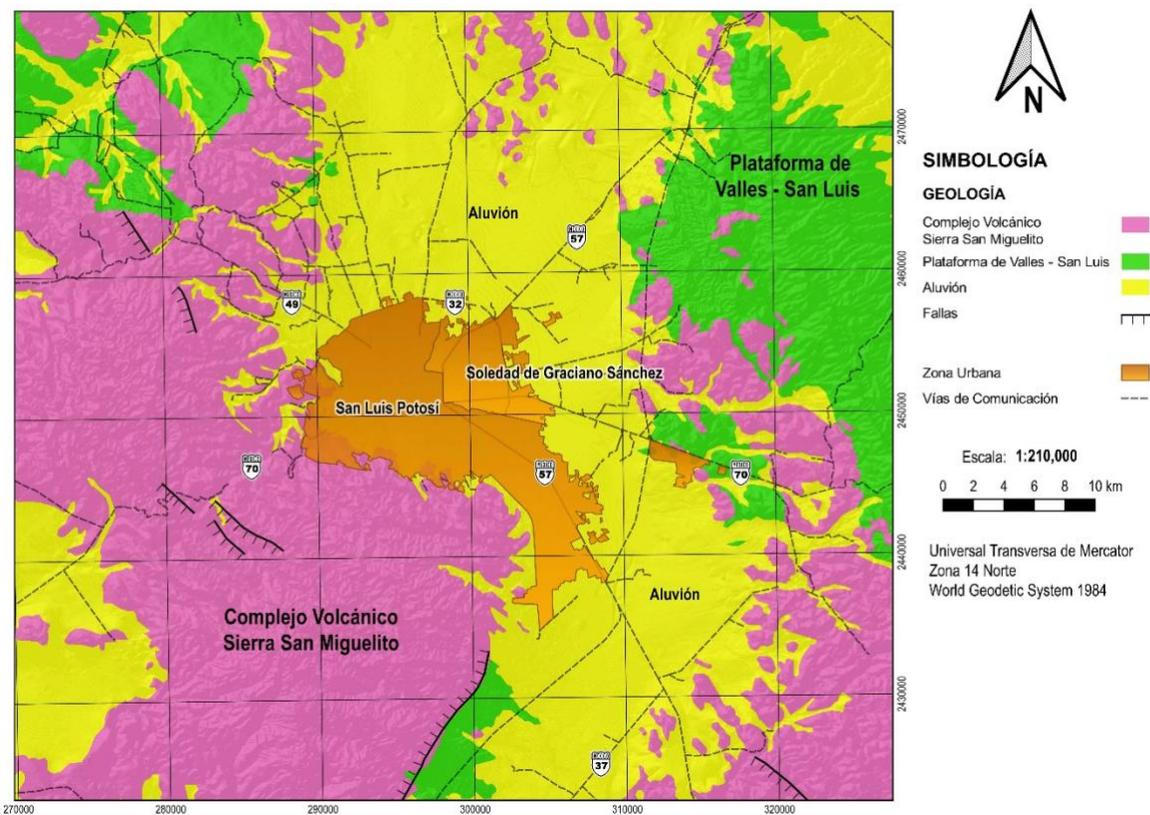


Figura 5.2. Geología circundante de la zona urbana de San Luis Potosí. (Tomado de Labarthe-Hernández *et al.* 1982; Tristán-González *et al.* 2009).

Con respecto a la diferencia entre el tipo de sedimentos entre cada una de las azoteas se observan la misma mineralogía, sin embargo, la diferencia recae en la abundancia de partículas y fragmentos industriales y de construcción. La muestra SLPb_06 es la que tiene una mayor cantidad de partículas relacionadas con la zona industrial al encontrar sedimentos de tipo hollín y también se puede observar que la muestra tiene una coloración oscura. En comparación, las muestras SLPb_05 y SLPb_07 que están más alejadas de la zona industrial fueron las que menos partículas de tipo industrial tuvieron.

La mayoría de los prospectos a micrometeoritos presentan texturas y morfologías que pueden coincidir con los micrometeoritos, sin embargo, algunas de estas características son compartidas con las partículas antropogénicas que reportan algunos autores como Larsen (2017).

5.2 Preparación y técnicas analíticas

En las zonas urbanas la concentración de micrometeoritos está sujeta a varios factores, ya que el lugar de la recolección y la manera de preparar las muestras es la mayor fuente de pérdidas. La recolección de micrometeoritos en las azoteas tiene varios agentes para la pérdida como lo son el drenaje del agua y los trabajos de limpieza continuos. La preparación de las muestras hace que haya pérdida de material al momento del tamizado y la limpieza por decantación ya que se puede escapar material importante, sin embargo, la recolección del material en zonas urbanas tiene la ventaja de que es de fácil acceso y de bajos costos.

La selección de cuál método utilizar es muy importante y más cuando se habla de la manipulación de material muy pequeño, poco común y poca cantidad. Uno de los factores que se deben de tomar en cuenta es que deben de ser métodos no destructivos para conservar todo o la mayor parte del material.

La microscopía electrónica de barrido tiene como ventaja dar una imagen composicional gracias a las imágenes de electrones retrodispersados además de que el MEB es capaz de realizar análisis de forma cualitativa o semicuantitativa de las composiciones químicas usando el EDS del material, además las mejoras en la resolución de los detectores hacen que este tipo de análisis sea una alternativa confiable y no destructiva (Swapp 2017; Goodge 2017). Por otro lado, con técnicas como la microsonda electrónica de barrido que se puede obtener análisis cuantitativos, pero la

muestra se tiene que pulir y recubrir con grafito, lo que puede poner en riesgo parte del material, que sin duda se puede utilizar, siempre y cuando se tenga material suficiente.

La espectroscopía micro-Raman es otra técnica muy eficiente y no invasiva, ni destructiva que puede dar información importante del comportamiento molecular del material, sin embargo, en el caso de los óxidos de Fe (wüstita y la magnetita) al ser buenos absorbentes del haz de los láseres de excitación se oxidan fácilmente a temperaturas elevadas (Shebanova y Lazor 2003). En el caso de la identificación de óxidos de Fe se encuentra la espectroscopía Mössbauer que es ampliamente usada en mineralogía para examinar la valencia del hierro, además de la identificación de las fases del óxido de Fe en base a sus propiedades magnéticas (Dyar 2022). Sin embargo, en el caso de la espectroscopía Mössbauer el material debe pulverizarse, por lo que el material resultaría destruido.

5.3 Esferas de tipo I

El grupo de esferas de tipo I se caracterizan por tener una composición principalmente de óxidos de Fe, y en menor medida óxidos de Al, Si, Ti, Mn y Co. Según Larsen (2017), las esferas de tipo I pueden tener dos orígenes: extraterrestre y antropogénicas. Las características que se pueden considerar diagnósticas para material extraterrestre son perlas de níquel o pepitas de elementos del grupo de los platinoides.

En el caso de los prospectos a micrometeoritos, 12 esferas presentan un contenido de Fe relacionado al mineral de wüstita con una composición que oscila entre $\text{Fe}_{0.82}\text{O}$ a $\text{Fe}_{0.98}\text{O}$. De Faria *et al.* (1997) indica que la wüstita es un compuesto no estequiométrico con una composición aproximada que varía entre $\text{Fe}_{0.84}\text{O}$ a $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$, por lo tanto, se puede considerar que las muestras cumplen una estequiometría relacionada con el mineral wüstita.

Suavet *et al.* (2009) presento un diagrama ternario Mg-Si-Fe con composiciones de varios micrometeoritos y rocas volcánicas, el resultado es un diagrama ternario donde se pueden diferenciar de una manera química el origen de las esferas, sin embargo, se debe de tener más criterios químicos y texturales.

El diagrama Mg-Si-Fe (Figura 5.6) que se realizó para las partículas de la zona urbana mostró que la mayoría de las partículas de tipo I tienen un contenido alto de Fe, sin embargo, las esferas de tipo I suelen ser muy difíciles para identificar el origen por lo que se tienen que utilizar más criterios.

La textura superficial de cristales equigranulares de hábito octaédrico y cristales dendríticos que forman patrones de líneas en diferentes direcciones son texturas que presentan esferas de tipo I con origen extraterrestre y terrestre. Las texturas que presentan se pueden encontrar en esferas de origen extraterrestre y de origen antropogénico, por lo tanto, se debe de dar más importancia a la composición química.

Genge *et al.* (2017) propone varios criterios para identificar esferas de tipo I como lo son la morfología esférica, morfología de cristales dendríticos, la presencia de wüstita y magnetita con contenidos de Ni y la presencia de aleaciones de Fe-Ni. El contenido de Ni que proponen para la wüstita varía de 0.1 a 22.5 % en peso. Las esferas estudiadas no presentan contenido de Ni, por lo tanto, no cumple uno de los criterios propuestos.

La composición elemental de las esferas restantes presenta contenidos altos de Fe, Co, Al, Ca, Si, que forman ferritas-Ca, silicatos de Ca, Fe. Miler y Gosar (2009) realizaron una caracterización de partículas en depósitos urbanos en nieve y presentan una mineralogía y morfología muy parecida a las partículas industriales. Las características que comparten son la morfología esférica, huecas y una composición química parecida.

Aragón-Piña *et al.* (2006) realiza un estudio de emisiones industriales en el polvo atmosférico de San Luis Potosí, que de igual manera presentan similitud con la composición química y morfología de las partículas de este trabajo.

La Figura 5.3 presenta ejemplos de partículas de origen industrial que presentan morfología y composición química parecida a algunas de las esferas encontradas, un ejemplo son las estructuras de dendritas, así como las vesículas y formación de cristales en la superficie.

La espectroscopía microRaman concuerda con el mineral de wüstita para algunas de las esferas que presentaron mineralogía y morfología superficial de este óxido, el otro mineral que se pudo observar en los espectros Raman es la hematita que suele ser producto de oxidación de la magnetita como lo reporta Shebanova y Lazor (2003) ya que la magnetita fue sometida a un aumento de potencia del láser en el transcurso del experimento lo que causó la oxidación de magnetita a hematita.

Las características físicas y químicas antes mencionadas pueden asemejarse con esferas que tienen un origen antropogénico como productos de combustión industrial de alta temperatura

(combustibles líquidos y fundición y procesamientos de acero) según la clasificación de Miler y Gosar (2009), de igual manera Aragón-Piña *et al.* (2006) les asigna un origen industrial, específicamente, por el uso y manipulación del acero.

La similitud de las texturas presentes en las esferas de tipo I y las partículas industriales requiere que se utilicen otras técnicas para identificar mejor el origen de las esferas, como lo realiza Genge *et al.* (2017) al hacer cortes a las partículas y observar las texturas en el interior de las partículas.

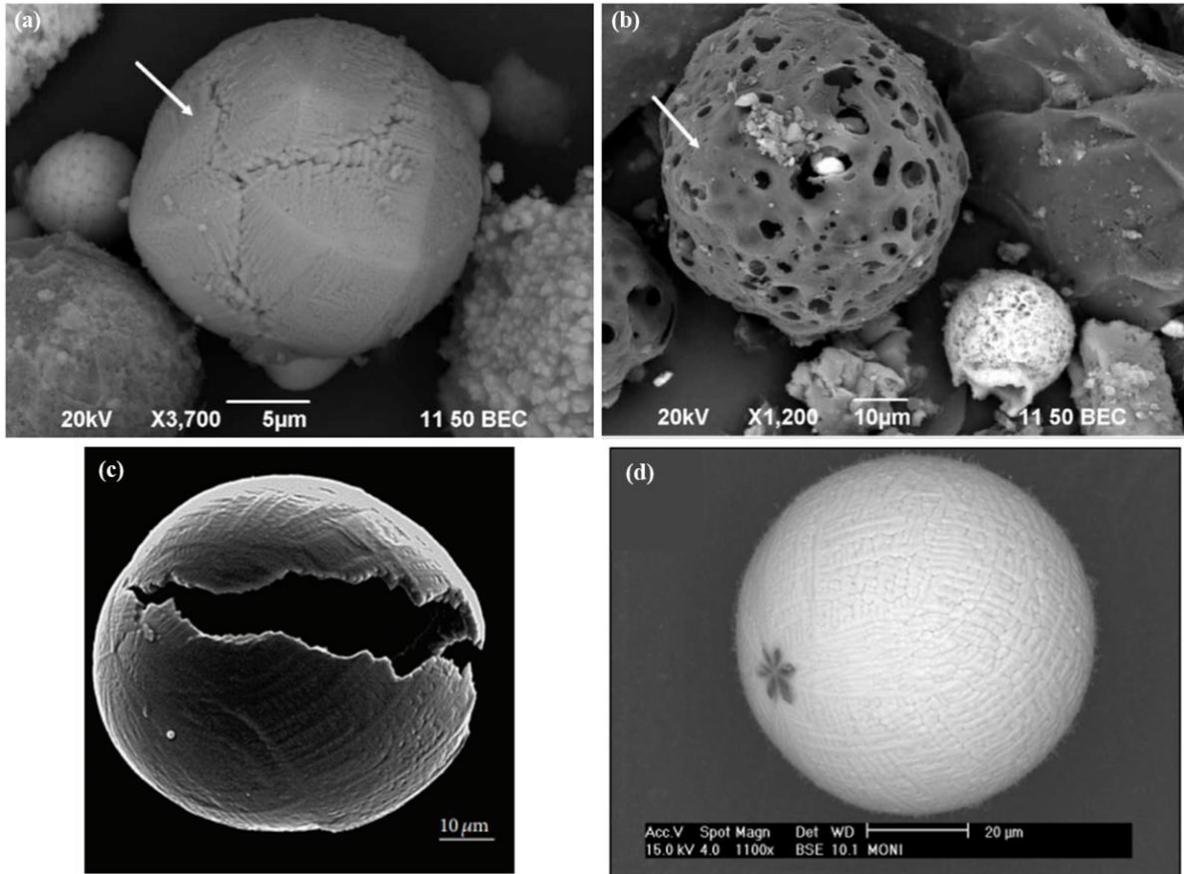


Figura 5.3. Partículas de origen antropogénico-industrial. (a) Partícula esférica de óxido- (Cr, Fe) relacionada con procesos de fundición de acero a alta temperatura. (b) Partícula esférica hueca porosa relacionada con combustión de carbón y combustibles líquidos a alta temperatura. (c) Desecho de molienda de acero. (d) Partícula emitida por la industria del acero. (a, b) Tomada de Miler y Gosar *et al.* (2009), (c) Tomada de Wong y Doyle (1999) y (d) Tomada de Aragón-Piña *et al.* (2006).

5.4 Esferas de tipo S (barradas)

En este trabajo, las esferas de tipo S se caracterizan por una textura barrada y una composición química de mineral de olivino y dendritas de magnetita. Genge *et al.* (2008) nombra a este tipo de

esferas como barradas de olivino (BO) y están dominados por un crecimiento paralelo de olivino con una mesostasis vítrea que llega a contener magnetita (Figura 5.4).

Las dos esferas de tipo S que se encontraron en la zona urbana tienen una textura barrada de cadena de olivinos con espesores delgados. Según Faure *et al.* (2022) la formación de textura barrada requiere que el micrometeorito sufra la fusión completa, en el caso de los olivinos, la temperatura de fusión llega a los 1400 °C, por lo tanto, el enfriamiento provoca este tipo de textura, sin embargo, la presencia de barras no es un criterio fiable para estimar la velocidad de enfriamiento. Las esferas de este estudio pudieron alcanzar la fusión completa que dio lugar a la formación de la textura de barras de olivino.

El tamaño de las bandas está relacionado con las diferencias de calentamiento y enfriamiento durante la entrada atmosférica, por lo que las barras más delgadas han experimentado un mayor calentamiento (Cervantes-de la Cruz *et al.* 2015; Rudraswami *et al.* 2016b).



Figura 5.4. Ejemplos de micrometeoritos barradas de olivino. Tomada de Larsen (2017).

La composición del olivino medido en las esferas varía de Fa₁₉ a Fa₃₇ con un contenido de Ni que va de 0.41 a 1.11 % en peso medido en los cristales de olivino, estos valores están dentro del rango que propone Cordier *et al.* (2011) de Fa₁₀ a Fa₆₆ y contenidos de 0.03 a 2.76 % en peso de Ni.

El diagrama Mg-Si-Fe (Figura 5.6) se utilizó para identificar si composicionalmente se podían localizar en el área de las esferas cósmicas. Las dos esferas que se identificaron como BO se localizaron en el campo de las esferas cósmicas, por lo que hay un criterio que cumplen para identificarlas como micrometeoritos.

Cordier *et al.* (2011) divide a los BO en esferas ricas en Ni (> 0.8 % en peso) y esferas pobres en Ni (< 0.7 % en peso), en el caso de la esfera SLPa_00_a tiene un contenido de Ni promedio de 0.82 % en peso y para la esfera SLPb_07_k es de 0.41 % en peso, por lo tanto, hay una esfera rica en Ni y una esfera pobre en Ni. La esfera SLPb_07_k cuenta con una perla de Fe-Ni con un contenido de Ni del 82.34 % en peso, por lo tanto, los olivinos pueden llegar a tener menor contenido de Ni (Cordier *et al.* 2011).

Las perlas de Fe-Ni es una característica importante para el diagnóstico de partículas con origen extraterrestre, las esferas de tipo S y tipo I suelen contener en su interior o en la superficie perlas de Fe-Ni y en algunos casos muestran evidencia de haber perdido la perla de metal (Taylor *et al.* 2000; Genge *et al.* 2008; Genge *et al.* 2017; Suttle *et al.* 2021).

La formación de las perlas es favorecida por la separación de líquidos metálicos de Fe, Ni del fundido de silicato durante el calentamiento de la entrada atmosférica de las esferas cósmicas. La perla se mueve hacia el borde de la esfera y se ubica en la parte delantera de la partícula. La perla al estar expuesta en la superficie, el azufre volátil hierve a un ritmo más rápido que el Fe y Ni. Sin embargo el Fe tiene un potencial de oxidación mayor que el Ni, da como resultado una composición progresivamente rica en Ni y de menor tamaño (Genge y Grady 1998; Genge *et al.* 2008; Suttle *et al.* 2021).

La perla que se encontró en la esfera SLPb_07_k tiene altos contenidos de Ni y en menor cantidad de Fe y S, por lo tanto, se puede inferir que la temperatura que alcanzo el micrometeorito fue muy alta para volatilizar el Fe y S y que al mismo tiempo redujera el tamaño de la perla a 40 μm . La Figura 5.5 muestra la evolución de la formación de la perla de Fe-Ni-S.

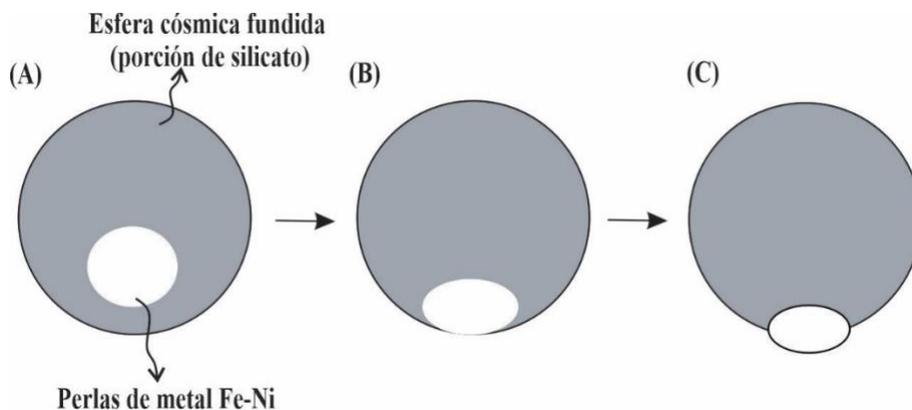


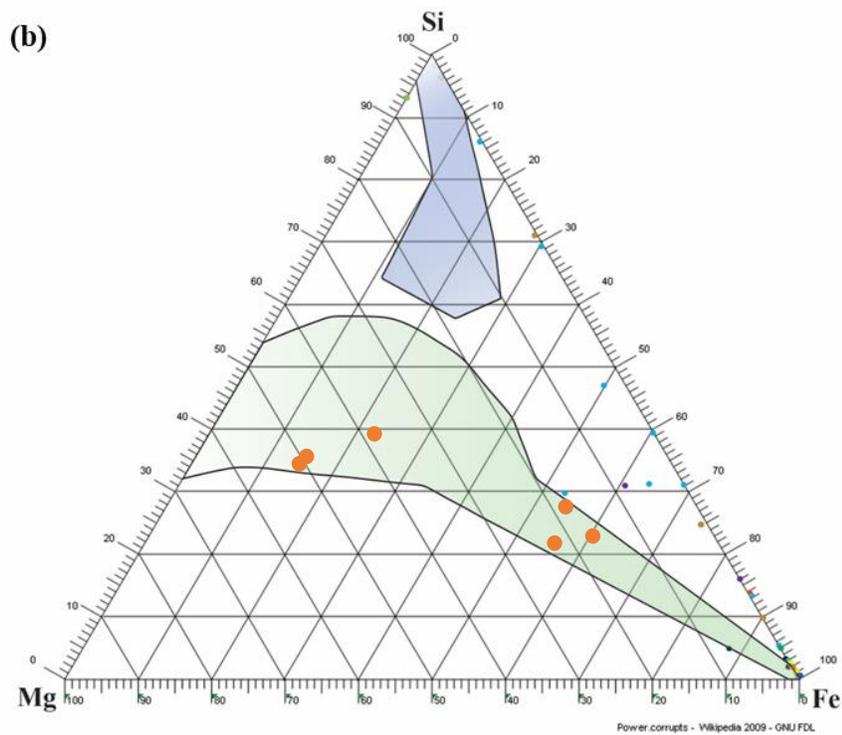
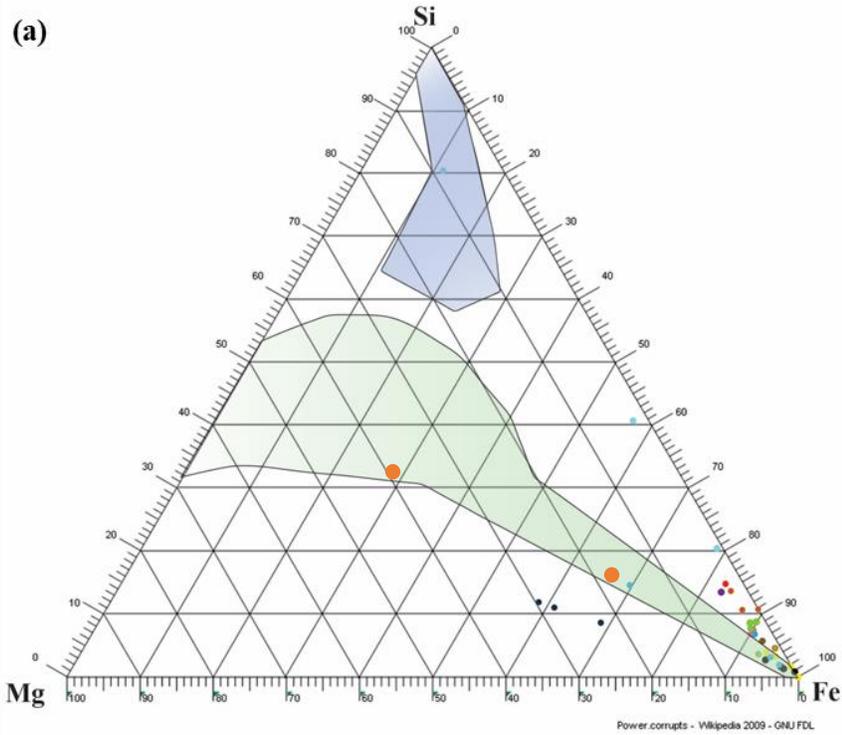
Figura 5.5. Diagrama que muestra la evolución de perlas de Fe-Ni-S en esferas cósmicas durante la entrada atmosférica. El gris indica la fusión de silicato, el blanco una perla de Fe-Ni-S. La imagen detalla cómo las perlas quedan expuestas en el perímetro de la partícula (A-C) y luego se enfrían y cristalizan (C). (Tomado de Suttle *et al.* 2021).

Los espectros Raman que mostraron picos característicos de los olivinos son semejantes con los espectros de Raman del olivino de forsterita obtenidos de Kuebler *et al.* (2006). Además, se observaron picos característicos de la magnetita relacionados con las mediciones en los puntos de las dendritas de magnetita que dieron mayor contenido de Fe.

Suttle *et al.* (2021) sugieren que los análisis de EDS en la superficie, cuando se combinan con imágenes de electrones retrodispersados que muestran texturas de enfriamiento pueden ser una herramienta para separar los micrometeoritos de esferas industriales o terrestres, sin embargo, debe de tratarse con precaución y solo usarse en casos prácticos. En el presente estudio se realizaron este tipo de análisis químicos ya que el material es muy poco para hacer análisis destructivos.

Las características químicas como la composición química de silicato, el contenido de Ni en los olivinos, la aparición de magnetita o wustita en la superficie, además de las características texturales y morfológicas como la forma ovoidal, las barras de olivino, las dendritas de magnetita y las perlas de Fe-Ni nos sugiere que estas dos partículas cumplen con los criterios para considerar que son micrometeoritos barrados de olivino (Genge *et al.* 2008; Folco y Cordier 2015; Suttle *et al.* 2021).

Figura 5.6. Diagramas ternarios Mg-Si-Fe (% atómico) presentando la composición química de las diferentes esferas. (a) Los círculos rojos corresponden a la esfera barrada de olivino, los círculos de otros colores pertenecen a las otras esferas magnéticas. (b) Los círculos naranjas pertenecen a la esfera barrada de olivino, mientras que los otros círculos pertenecen a las esferas magnéticas. Zona verde: esferas cósmicas. Zona azul: Rocas volcánicas. (Suavet *et al.* 2009).



6. CONCLUSIONES

El rango de tamaños de las partículas estudiadas es de 1 mm a 125 μm , de las cuales se separaron fracciones de 4-2 mm, 2-1 mm, 1 mm-500 μm , 500-250 μm , 250-125 μm , 125-62 μm . El total de prospectos a micrometeoritos fueron 29, de los cuales 27 fueron esferas de tipo I y dos esferas de tipo S.

Los sedimentos tienen el mismo tipo de minerales félsicos, pero mostraban una cantidad diferente de partículas industriales y de construcción, además de que la cantidad de material magnético no fue mayor de los 7 gramos por fracción lo que beneficiaba la búsqueda de prospectos a micrometeoritos en una cantidad pequeña de material.

Las esferas de tipo I tienen composiciones de óxidos de wüstita y hematita que se identificó por medio de espectroscopía Raman, por lo tanto, el origen de estas esferas es antropogénico-industrial, además de que se necesita otra técnica analítica para poder ver el interior de las partículas e identificar texturas diagnósticas importantes para definir si pertenecen a micrometeoritos de tipo I.

Las esferas de tipo S tienen composiciones de magnetita y olivino; los análisis químicos EDS de olivinos y sus espectros micro-Raman se pueden correlacionar dando una composición relativamente intermedia entre fayalita y forsterita, además presentan textura barrada y perlas de Fe-Ni en la superficie y una textura dendrítica de magnetita que establece su origen extraterrestre. Los micrometeoritos que se encontraron pueden servir para futuros estudios relacionados su origen o los procesos que sufrieron al entrar a la atmósfera para poder ser aplicados a modelos de fusión atmosférica.

Las condiciones del entorno geológico de la zona urbana de San Luis Potosí de composición félsica con mineralogía de feldespatos, cuarzos y en menor proporción de calcita favorecieron la búsqueda de micrometeoritos en las azoteas, ya que el material separado magnéticamente fue muy poco y así poder buscar de manera más exhaustiva con una menor cantidad de material.

La meta de la tesis de comenzar una colección de micrometeoritos se logró, con el objetivo de seguir adelante con la recolección y búsqueda de prospectos a micrometeoritos y poder utilizar diferentes técnicas analíticas para su estudio.

La composición química, morfología y las texturas que presentaron dos partículas coinciden con las características de los micrometeoritos barrados de olivino, por lo que se concluye que sí se pueden encontrar micrometeoritos en la zona urbana de San Luis Potosí.

BIBLIOGRAFÍA

- Aragón-Piña A., Campos-Ramos A. A., Leyva-Ramos R., Hernández-Orta M., Miranda-Ortiz N. y Luszczewski-Kudra A. 2006. Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22: 5-19.
- Brownlee D. E. 2001. The origin and properties of dust impacting the Earth. En *Accretion of extraterrestrial matter throughout Earth's history*, Ed. Peucker-Ehrenbrink B. y Schmitz B. Boston: Springer. pp. 1-11.
- Burns J. A., Lamy P. L. y Soter S. 1979. Radiation Forces on Small Particles in the Solar System. *Icarus* 40: 1-48.
- Carrillo-Bravo, J. 1971. La Plataforma Valles–San Luis Potosí. *Bol. Asoc. Mex. Geól. Pet.* 23:1–112.
- Carrillo-Sánchez J. D., Plane J. M. C., Feng W., Nesvorný D. y Janches D. 2015. On the size and velocity distribution of cosmic dust particles entering the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.* 42: 6518-6525.
- Cervantes-de la Cruz K. E., Ortega Gutiérrez F., Solé Viñas J., Segura Peralta A., Reyes Salas M., Ángeles García B. S., Macías Romo M. C. y Linares-López C. Experimental chondrules by melting samples of olivine, clays and carbon with a CO₂ laser. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 67: 401-412.
- Cordier C., Van Ginneken M. y Folco L. 2011. Nickel abundance in stony cosmic spherules: Constraining precursor material and formation mechanism. *Meteoritics & Planetary Science* 46: 1110-1132.
- Danilenko I.A., Baglaeva E. M., Petrova E. V., Seleznew A. A. y Yakovlev G. A. 2020. Modern Urban Sediments: Identification of the Cosmic Spherules. En *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation*. Switzerland: Springer. pp. 9-15.
- De Faria D. L. A., Venancio Silva S. y de Oliveira M. T. 1997. Raman Microspectroscopy of Some Iron Oxides and Oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy* 28: 873-878.
- Demoulin A., Trigance C., Neff D., Foy E., Dillmann P. y L'Hostis V. *Corrosion Science* 52: 3168-3179.
- Dermott S. F., Grogan K., Durda D. D., Jayaraman S., Kehoe T. J. J., Kortenkamp S. J. y Wyatt M. C. 2001. Orbital Evolution of Interplanetary Dust. En *Interplanetary Dust*. Berlín: Springer. pp. 569-639.
- Duprat J., Engrand C., Maurette M., Kurat G., Gounelle M. y Hammer C. 2007. Micrometeorites from Central Antarctic snow: The CONCORDIA collection. *Advances in Space Research* 39: 605-611.
- Dyar D. M. 2022. Geochemical Instrumentation and Analysis. *Mössbauer Spectroscopy*. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/mossbauer.html (Consultado el 26 de agosto de 2022).
- Faure F., Auxerre M. y Casola V. 2022. Slow cooling during crystallisation of barred olivine chondrules. *Earth and Planetary Science Letters* 93:1-12.

- Fitz-Díaz E., Lawton T. F., Juárez-Arriaga E., and Chávez-Cabello G. 2018. The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews* 183:56–84.
- Flynn G. J. 2001. Atmospheric Entry Heating of Interplanetary Dust. En *Accretion of extraterrestrial matter throughout Earth's history*, Ed. Peucker-Ehrenbrink B. y Schmitz B. Boston: Springer. pp. 107-128.
- Folco L. y Cordier C. 2015. Micrometeorites. *EMU Notes in Mineralogy* 15: 253-297.
- Frezzotti M. L., Tecce F. y Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 112: 1-20.
- Genge M. J., Grady M. M. y Hutchison R. 1997. The textures and compositions of fine-grained Antarctic micrometeorites: Implications for comparisons with meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 5149-5162.
- Genge M. J. y Grady M. M. 1998. Melted micrometeorites from Antarctic ice with evidence for the separation of immiscible Fe-Ni-S liquids during entry heating. *Meteoritics and Planetary Science* 33: 4255-434.
- Genge M. J. 2006. Igneous rims on micrometeorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70:2603-2621.
- Genge M. J. 2008. Micrometeorites and Their Implications for Meteors. *Earth Moon Planet* 102: 525-535.
- Genge M. J., Engrand C., Gounelle M. y Taylor S. 2008. The classification of micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science* 43: 497-515.
- Genge M. J., Davies B., Suttle M. D., Van Ginneken M. y Tomkins A. G. 2017. The mineralogy and petrology of I-type cosmic spherules: Implications for their sources, origins and identification in sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2018: 167-200.
- Genge M. J., Van Ginneken M. y Suttle M.D. 2020. Micrometeorites: Insights into the flux, sources and atmospheric entry of extraterrestrial dust at Earth. *Planetary and Space Science* 187: 104900.
- Goode J. 2017. Geochemical Instrumentation and Analysis. *Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)*. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/eds.html (Consultado el 26 de agosto de 2022).
- Hanesch M. 2009. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy)hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International* 177: 941-948.
- Hazan E., Sadia Y. y Gelbstein Y. 2013. Characterization of AISI 4340 corrosion products using Raman spectroscopy. *Corrosion Science* 74: 414-418.
- Kuebler K. E., Jolliff B. L., Wang A. y Haskin L. A. 2006. Extracting olivine (Fo-Fa) compositions from Raman spectral peak positions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 6201-6222.

- Larsen J. 2017. In search of stardust: amazing micrometeorites and their terrestrial imposters. Minneapolis: Voyageur Press. 152 p.
- López-Doncel, R. 2003. La Formación Tamabra del Cretácico en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles–San Luis Potosí, centro-noreste de México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 20:1– 19.
- Love S. G. y Brownlee D. E. 1991. Heating and Thermal Transformation of Micrometeoroids Entering the Earth's Atmosphere. *Icarus* 89: 26-43.
- Love S. G. y Brownlee D. E. 1993. A Direct Measurement of the Terrestrial Mass Accretion Rate of Cosmic Dust. *Science* 262: 550-553.
- Masoom A., Kosmopoulos P., Kashyap Y., Kumar S. y Bansal A. 2020. Rooftop Photovoltaic Energy Production Management in India Using Earth-Observation Data and Modeling Techniques. *Remote Sensing* 12: 1-27.
- Maurette M. 2006. *Micrometeorites and the mysteries of our origins*. Berlín: Springer. 330 p.
- Maurette M., Jehanno C., Robin E. y Hammer C. 1987. Characteristics and mass distribution of extraterrestrial dust from the Greenland ice cap. *Nature* 328: 699-702.
- Miler M. y Gosar M. 2009. Characterization of solid airborne particles in urban snow deposits from Ljubljana by means of SEM/EDS. *Material and Geoenvironment* 56: 266-282.
- Nesvorný D., Jenniskens P., Levison H. F., Bottke W. F. Vokrouhlický D. y Gounelle M. 2010. Cometary origin of the Zodiacal Cloud and Carbonaceous Micrometeorites. Implications for that debris disk. *The Astrophysical Journal* 713: 816-836.
- Pineda-Martinez L. F., Carbajal N., Campos-Ramos A. A., Noyola-Medrano C. y Aragón-Piña A. 2011. Numerical research of extreme wind-induced dust transport in a semi-arid human-impacted region of Mexico. *Atmospheric Environment* 45: 4652-4660.
- Plane J. M. C. 2012. Cosmic dust in the earth's atmosphere. *Chem. Soc. Rev.* 41: 6507-6518.
- Rochette P., Folco L., Suavet C., Van Ginneken M., Gattacceca J., Perchiazzi N., Braucher R. y Harvey R. P. 2008. Micrometeorites from the Transantarctic Mountains. *PNAS* 47: 18206-18211.
- Rubin A. E. y Grossman J. N. 2010. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science* 45: 114-122.
- Rudraswami N. G., Shyam Prasad M., Dey S., Plane J. M.C., Feng W. y Taylor S. 2015. Evaluating changes in the elemental composition of micrometeorites during entry into the Earth's atmosphere. *The Astrophysical Journal* 814: 1-11.
- Rudraswami N. G., Shyam Prasad M., Dey S., Plane J. M.C., Feng W., Carrillo-Sánchez J. D. y Fernandes D. 2016a. Ablation and chemical alteration of cosmic dust particles during entry into the earth's atmosphere. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 227:1-14.
- Rudraswami N. G., Shyam Prasad M., Babu E. V. S. S. K. y Vijaya Kumar T. 2016b. Major and trace element geochemistry of S-type cosmic spherules. *Meteoritics & Planetary Science* 51: 718-742.

- Seifert W., Thomas R., Rhede D. y Förster H. J. Origin of coexisting wüstite, Mg-Fe and REE phosphate in graphite-bearing fluorapatite from the Rumburk granite. *European Journal of Mineralogy* 22: 495-507.
- Shebanova O. N. y Lazor P. 2003. Raman study of magnetite (Fe₃O₄): laser-induced thermal effects and oxidation. *Journal of Raman Spectroscopy* 34: 845-852.
- Suavet C., Gattacceca J., Rochette P., Perchiazzi N., Folco L., Duprat J. y Harvey R. P. 2009. Magnetic properties of micrometeorites. *J. Geophys. Res.* 114: B04102.
- Suttle M. D. y Folco L. 2020. The extraterrestrial dust flux: Size distribution and mass contribution estimates inferred from the Transantarctic Mountain (TAM) micrometeorite collection. *Journal of Geophysical Research: Planets* 125: 1-18.
- Suttle M. D., Hasse T. y Hecht L. 2021. Evaluating urban micrometeorites as a research resource- A large population collected from a single rooftop. *Meteoritics & Planetary Science* 1-25.
- Swapp S. 2017. Geochemical Instrumentation and Analysis. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html (Consultado el 26 de agosto de 2022).
- Taylor S., Lever J. H. y Harvey R. P. 1998. Accretion rate of cosmic spherules measured at the South Pole. *Nature* 392: 899-903.
- Taylor S., Lever J. H. y Harvey R. P. 2000. Numbers, types, and compositions of an unbiased collection of cosmic spherules. *Meteoritics & Planetary Science* 35: 651-666.
- Tristán-González M., Aguillón-Robles A., Barboza-Gudiño J.R., Torres-Hernández J.R., Bellon H., López-Doncel R.A., Rodríguez- Ríos R., Labarthe-Hernández G. 2009. Geocronología y distribución espacial del Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 61(3): 287- 303.
- Tsoar H. y Pye K. 1987. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology* 34: 139-153.
- Wong Y. C. y Doyle E. D. 1999. Implications of high strain deformation in grinding. *Wear* 233: 395-401.
- Van Ginneken M., Folco L., Cordier C. y Rochette P. 2012. Chondritic micrometeorites from the Transantarctic Mountains. *Meteoritics & Planetary Science* 47: 228-247.
- Yada T., Nakamura T., Takaoka N., Noguchi T., Terada K., Yano H., Nakazawa T. y Kojima H. 2004. The global accretion rate of extraterrestrial materials in the last glacial period estimated from the abundance of micrometeorites in Antarctic glacier ice. *Earth Planets Space* 56: 67-79.