



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ESTUDIO DEL ESPECTRO INFRARROJO DE METEORITOS Y APLICACIÓN EN OBSERVACIONES ASTRONÓMICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

GRACE ÁNGELA BATALLA FALCÓN

PROFESOR GUÍA:
LUCAS ALEJO CIEZA GONZALEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ROBERTO OSVALDO LAVÍN SERRANO
DANIEL MONCADA DE LA ROSA

SANTIAGO DE CHILE
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA
POR: GRACE ANGELA BATALLA
FALCON
FECHA: 06/01/2020
PROFESOR GUÍA: DR. LUCAS ALEJO
CIEZA GONZALEZ**

ESTUDIO DEL ESPECTRO INFRARROJO DE METEORITOS Y APLICACIÓN EN OBSERVACIONES ASTRONÓMICAS

El estudio del polvo cósmico es fundamental para la comprensión de la formación y evolución del sistema solar. Para la observación de estos materiales tan pequeños y a distancias lejanas, se utilizan distintos instrumentos y metodologías, entre los cuales se encuentra la medición de la radiación emitida en el rango infrarrojo. Para la mejora en la interpretación de estos datos, es necesario realizar un trabajo de laboratorio, en la cual se puedan realizar mediciones análogas de esta emisión infrarroja en materiales provenientes del espacio como son los meteoritos.

El estudio del espectro infrarrojo de meteoritos ayuda a la interpretación de las observaciones astronómicas. Sin embargo, la mayoría de los trabajos de espectrometría se enfocan en las variaciones en el espectro con relación a la composición mineralógica y química de los minerales en los meteoritos. Además de estos, existen otros parámetros que también afectan el espectro de absorbancia. En este trabajo se pretende abarcar uno de los factores menos estudiados de este ámbito: el tamaño de las partículas y su influencia en la forma del espectro infrarrojo de meteoritos.

Para este estudio, se realizaron mediciones de espectrografía infrarroja, en el rango 2 – 23 μ m, de 23 meteoritos de tipo condritos, de los cuales 20 corresponden a condritos ordinarios y 3 a condritos carbonáceos, todos provenientes del desierto de atacama. Para las mediciones se varía el tamaño de las partículas de las muestras medidas, con lo que se pretende entender la relación que existe con el espectro de absorbancia.

Dante, motivación y luz de mi camino

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al laboratorio de polvo cósmico de la Universidad Diego Portales, por financiar los estudios necesarios para elaborar este trabajo, por facilitar el uso del espectrómetro Bruker Vertex 80v.

A mis profesores, Lucas Cieza y Roberto Lavín, por su dedicación y acompañamiento, la confianza entregada y la disposición a ayudar en la mejora de este trabajo, por los conocimientos entregados en física, astronomía, manejo de instrumentos y el trabajo de laboratorio, muchos de ellos nuevos para mí, y en particular por la paciencia tenida durante todo este periodo. Al profesor Daniel Moncada, por brindarme el apoyo necesario desde la facultad de geología y su conocimiento en meteoritos. A Cecilia Farías, por su constante apoyo en el laboratorio y procesamiento de los datos.

A mi familia, por la paciencia y el acompañamiento constante, en particular, agradecer a mi madre, que siempre ha tratado de motivarme, a su manera, a pesar de las diferencias que tengamos; a mi hermana, que constantemente se preocupaba por mi desarrollo; a mi padre, por estar siempre en las buenas y en las malas; y a mi hijo Dante, por ser el motor de mi vida, la motivación necesaria y la luz que ilumina mi camino.

A mi prima Melissa por enseñarme que nunca es tarde, y a mi amiga Maca, por apoyarme en las buenas y malas decisiones.

A Blanquita, por estar apoyándome y ayudándome con los tramites necesarios desde siempre.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos.....	3
1.3	Hipótesis de trabajo.....	3
1.4	Metodología general	4
2	Marco teórico	5
2.1	Polvo cósmico y discos protoplanetarios	5
2.2	Meteoritos y su clasificación	6
2.2.1	Clasificación de meteoritos con respecto a su composición	6
2.2.2	Clasificación de meteoritos de acuerdo con el grado de meteorización.....	11
2.2.3	Clasificación de meteoritos de acuerdo con su estado de choque	13
2.2.4	Clasificación de los meteoritos de acuerdo con su metamorfismo térmico o tipo petrológico	16
2.3	Teoría Espectro Infrarrojo	20
2.3.1	Espectro Infrarrojo Medio (MIR).....	21
3	Muestras	23
3.1	Características de las muestras	23
4	Laboratorio Polvo Cósmico	27
4.1	Equipos	27
4.1.1	Espectroscopio.....	27
4.1.2	Tamices.....	32
4.1.3	Fabricación de pastillas	34

4.2	Preparación de Muestras para espectroscopía FT-IR.....	39
4.3	Microscopía	40
4.3.1	Preparación de muestras	40
4.3.2	Microfotografía y escala	41
4.4	Procesamiento de datos.....	42
5	Resultados	43
5.1	Absorbancia de minerales.....	44
5.2	Absorbancia de Conditos Carbonáceos	46
5.3	Absorbancia de Conditos Ordinarios tipo H.....	49
5.4	Absorbancia de Conditos ordinarios tipo L-LL.....	52
5.5	Microfotografías	59
6	Discusión	67
6.1	Absorbancia Conditos carbonáceos.....	67
6.2	Absorbancia Conditos ordinarios.....	68
6.3	Absorbancia y tamaño de partículas	69
7	Conclusiones	78
	Bibliografía	80

Índice de figuras

- Figura 1. Gráfica de Cobalto en kamacita vs Olivino Fayalita de condritos ordinarios, que muestra la diferenciación entre grupos de condritos H, L y LL. Extraído de Rubin, 1990.....9
- Figura 2. Esquema de clasificación de meteoritos según Weisberg et al., 2006. De los 23 meteoritos estudiados en este trabajo, 3 corresponden a condritos carbonáceos de tipo Orgueil (CO) y 20 corresponden a condritos ordinarios (OC), entre los que se tienen 6 condritos del grupo H, 12 condritos del grupo L y 2 condritos del grupo LL. 10
- Figura 3. Mapa desierto de Atacama con el detalle de las zonas donde fueron recolectados los meteoritos estudiados en este trabajo. A) Sector Pampa de Mejillones, marcado con una estrella negra en el mapa de la izquierda y con un pentágono rojo en el mapa de la derecha, corresponde a una planicie al sur de la localidad de Mejillones. B) Sector San Juan, Catalina, Los Vientos y El Médano, marcado con una estrella blanca en el mapa de la izquierda y con un pentágono azul en el mapa de la derecha, se ubica al interior de la localidad de Taltal. Los meteoritos carbonáceos provienen de este sector. 26
- Figura 4. Esquema interno del espectrómetro FT-IR Bruker Vertex 80v, con detalle del funcionamiento de cada pieza y accesorio, extraído del manual del equipo..... 29
- Figura 5. Espectrómetro FT-IR Bruker Vertex 80v, perteneciente al laboratorio de Polvo cósmico del Núcleo de Astronomía de la Universidad Diego Portales..... 30
- Figura 6. Soporte removible (Pike) en el cual se instala el anillo de sujeción que contiene la pastilla de KBr con la muestra. Posteriormente es el soporte el que se ingresa al compartimiento de muestras del espectrómetro FT-IR. 31
- Figura 7. Compartimiento de muestra, hermético al vacío, donde se encuentra el montaje extraíble en el cual se instala el anillo de sujeción con la pastilla de muestra..... 31
- Figura 8. Imagen de tamizador analítico y cribas de acero inoxidable utilizadas en la separación de muestras. Solo las muestras de minerales puros fueron sometidas a este tipo de tamizaje, durante 10 minutos. 33
- Figura 9. Detalle de los parámetros utilizados en el tamizador digital para el tamizaje de las muestras de minerales puros. 33

Figura 10. Estufa de laboratorio Memmert digital de 32 L, modelo UN30. Horno de convección natural, con textura cubierta de acero inoxidable con 2 puntos de bloqueo (cerradura de la puerta de compresión), y doble rejilla de acero inoxidable interna.	35
Figura 11. Materiales utilizados en la molienda y creación de pastillas de medición. A) Mortero de ágata, utilizado en la molienda de meteoritos y de la mezcla KBr-meteorito. B) Paletas de laboratorio de acero inoxidable, usadas en la manipulación de las muestras. C) Donas de acero inoxidable, para la creación de la pastilla.	35
Figura 12. Micro balanza analítica Radwag modelo AS 220.2Y con precisión de 0.1mg, utilizada en la medición de los distintos instrumentos utilizados (platillos, donas) como de las muestras (KBr puro, polvo de meteorito, mezcla, pastillas solidas).	36
Figura 13. Prensa hidráulica para pellets Specac, diseñada para la preparación de pastillas de 7mm de KBr para análisis de FT-IR, con una capacidad máxima de aplicación de 2 toneladas. Las pastillas de este trabajo se someten a 1.7 toneladas durante 2 minutos en esta prensa.....	37
Figura 14. Esquema con detalle de funcionamiento de Prensa hidráulica Specac. 1) Tornillo de avance: se gira a mano hasta que el ensamble de pellets de 7mm este asegurado. 2) Área de presión. 3) Perilla manual de presión para proporcionar una carga de tonelaje. 4) Tornillo central, se puede aplicar mayor apalancamiento al girarlo.	37
Figura 15. Matriz completa de pellets. Consta de: 1) Yunque superior 2) Soporte central para anillos de pellets. 3) Yunque inferior y 4) Una tapa de anillo extractor transparente Perspex. El yunque superior tiene una sección de émbolo central más larga que el yunque inferior.	38
Figura 16. Para la preparación de las pastillas se utiliza Bromuro de Potasio Uvasol, especial para mediciones de espectroscopia infrarroja.	38
Figura 17. Limpiador ultrasónico de acero inoxidable Skymen. Genera ondas ultrasónicas que crean millones de burbujas de limpieza microscópicas para eliminar suciedad en minutos. Con ajuste de temporizador y de temperatura. Con canasta de limpieza de acero inoxidable para objetos pequeños.	39
Figura 18. Imagen de sección de cámara de Neubauer con el objetivo de aumento de 10x, y el detalle de escalas con relación a los pixeles de la imagen.	41
Figura 19. Gráfica de los espectros infrarrojos correspondientes a minerales puros: olivino, enstatita y diópsido, con un mismo tamaño de partícula (menor a 38 μm), variando la concentración de material en la pastilla. Para los datos [02] la concentración es de 2% y para [05] es de 0.5%. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical para una mejor apreciación de la forma de los espectros.	45

Figura 20. Gráfica de espectro infrarrojo correspondientes a las tres muestras de condritos carbonáceos tipo orgueil. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical de 0.2, para una mejor apreciación de la forma de los espectros. En la gráfica, las líneas verticales corresponden a bandas de absorción características para ciertos minerales, en donde se tiene: celeste, para las bandas de agua (OH); verde, para las bandas de olivino; naranja, para las bandas de piroxeno y rosado para la banda de materia carbonosa. En cuanto a los espectros, el de color negro corresponde a la muestra de Los Vientos 123 (V123), el de color rojo a El Médano 216 (M216) y el azul a Catalina 008 (C008). 47

Figura 21. Gráfica de los espectros infrarrojos correspondientes a los condritos ordinarios pertenecientes al grupo H. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical de 0.2, para una mejor apreciación de la forma de los espectros. En la gráfica, las líneas verticales corresponden a bandas de absorción características para ciertos minerales, en donde se tiene: celeste, para las bandas de agua (OH); verde, para las bandas de olivino; naranja, para las bandas de piroxeno y morado para las bandas de feldespato. 50

Figura 22. Gráfica de los espectros infrarrojos correspondientes a los condritos ordinarios pertenecientes al grupo L y LL. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical de 0.2, para una mejor apreciación de la forma de los espectros. En la gráfica, las líneas verticales corresponden a bandas de absorción características para ciertos minerales, en donde se tiene: celeste, para las bandas de agua (OH); verde, para las bandas de olivino; naranja, para las bandas de piroxeno y morado para las bandas de feldespato..... 55

Figura 23. Microfotografía de muestra de Olivino de tamaño B (45-53 μm), con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro polarizado (TLBF-P); arriba a la derecha en campo oscuro polarizado (ILDF-P); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución. 59

Figura 24. Microfotografías correspondientes a muestra de Los vientos 123, con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 3 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra tamizada con un tamaño de partícula D [63-75 μm]; segunda fila con el tamaño original de la muestra; tercera fila una muestra molida por 75 minutos. 60

Figura 25. Microfotografías correspondientes a muestra Catalina 008, de tamaño original de la muestra con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro (TLBF); arriba a la derecha en campo oscuro (ILDF); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución. 61

Figura 26. Microfotografías correspondientes a muestra La Yesera 01 (meteorito tipo H), con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF).

Se presentan muestras con 2 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra molida durante 30 minutos; segunda fila una muestra molida durante 60 minutos. 62

Figura 27. Microfotografías correspondientes a muestra Rencoret (meteorito tipo H), con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 2 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra molida durante 30 minutos; segunda fila una muestra molida durante 60 minutos..... 63

Figura 28. Microfotografías correspondientes a muestra de Chile M4 (meteorito tipo L), con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 2 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra de tamaño original; segunda fila una muestra molida durante 75 minutos. 64

Figura 29. Microfotografías correspondientes a muestra Chile M7 (meteorito tipoL), molida durante 75 minutos, con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro (TLBF); arriba a la derecha en campo oscuro (ILDF); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución. 65

Figura 30. Microfotografías correspondientes a muestra La Yesera 03 (meteorito de tipo L), molida durante 75 minutos, con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro (TLBF); arriba a la derecha en campo oscuro (ILDF); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución..... 66

Figura 31. Gráfica de espectro infrarrojo correspondientes a mediciones de olivino, con distintos tamaños obtenidos del tamizaje de las muestras. Los rangos de los tamaños corresponden a: G) 300 – 250um, F) 250 – 125um, E) 125 – 75um, D) 75 – 63um, A) 45 – 38um, IA) menor a 38um..... 70

Figura 32. Gráfica de espectro infrarrojo correspondientes a mediciones de diópsido, con distintos tamaños obtenidos del tamizaje de las muestras. Los rangos de los tamaños corresponden a: F) 250 – 125um, D) 75 – 63um, C) 63 – 53 um, A) 45 – 38um, IA) menor a 38um..... 71

Figura 33. Gráfica de espectros de absorción de los 3 meteoritos carbonáceos con dos tamaños distintos de granos. En negro se presenta la muestra de mayor tamaño (tamaño original) y en rojo el de la mezcla molida durante 75 minutos. 73

Figura 34. Gráfica del espectro de absorbancia de dos muestras de condritos ordinarios del grupo H: La Yesera 01 y Rencoret. Las muestras corresponden a la mezcla molida durante 60 minutos y la mezcla molida durante 75 minutos. 74

Figura 35. Histograma correspondiente al meteorito de Rencoret (condrito ordinario tipo H). El gráfico superior presenta el histograma para la muestra molida durante 30 minutos, mientras que el gráfico inferior corresponde al histograma de la muestra molida durante 75 minutos..... 75

Figura 36. Histograma correspondiente a la muestra Chile M4 (condrito ordinario de tipo L). El gráfico superior presenta el histograma para la muestra de tamaño original, mientras que el gráfico inferior corresponde al histograma de la muestra molida durante 75 minutos..... 77

Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla de clasificación de meteoritos de acuerdo con el grado de meteorización, desarrollada por Grossman, 1994, actualmente poco utilizada.....	11
Tabla 2. Gráfico de clasificación de meteoritos de acuerdo con su grado de meteorización propuesto por Wlotzka, 1993, actualmente la más utilizada para este tipo de clasificación.....	12
Tabla 3. Esquema de clasificación para meteoritos de acuerdo con su metamorfismo de choque, a partir de Stöfler y Keil 1991, Scott et al., 1992, Rubin et al., 1997 y M.J. Muñoz-Espadas, 2003.....	14
Tabla 4. Clasificación de acuerdo con el metamorfismo térmico, para distintos tipos de condritos.....	16
Tabla 5. Clasificación de meteoritos en cuanto al tipo petrológico y características de reconocimiento de cada una de ellas.....	18
Tabla 6. Subregiones características que se encuentran dentro del espectro infrarrojo medio..	21
Tabla 7. Minerales encontrados en las muestras de meteorito a través de XRD, y estimación porcentual cuantitativa de cada fase obtenida a través del método Rietveldt, extraído de Valenzuela, 2011. Hay que destacar que no todos los meteoritos estudiados en este trabajo se encuentran en esta descripción.....	25
Tabla 8. Detalle de los tamaños de partículas que pasan por las distintas cribas utilizadas al momento de tamizar las muestras y la nomenclatura utilizada en este trabajo para los rangos obtenidos.....	34
Tabla 9. Tabla que presenta la relación entre los valores de aumento que se utilizó para la toma de la fotografía, el tamaño en el que se guardó la imagen (píxeles) y el tamaño real (escala en um).....	42
Tabla 10. Muestras de meteoritos utilizados, detalle del tamaño de partícula, concentración y masa con que realizó la pastilla para la medición.....	44

Tabla 11. Detalle de las bandas de absorción [<i>peaks</i>] presentes en los espectros de los tres condritos carbonáceos analizados. El tamaño de partículas de estas muestras corresponde al de la muestra inicial. Las bandas más fuertes se presentan en negrita, mientras que los peaks más débiles o presentes como hombros, se presentan subrayados.	48
Tabla 12. Detalle de las bandas de absorción [<i>peaks</i>] presentes en los espectros de los 6 condritos ordinarios del grupo H analizados. El tamaño de partículas de estas muestras corresponde a la mezcla molida durante 60 minutos. Las bandas más fuertes se presentan en negrita, mientras que los peaks más débiles o presentes como hombros, se presentan subrayados.	51
Tabla 13. Detalle de las bandas de absorción [<i>peaks</i>] presentes en los espectros de los 10 condritos ordinarios del grupo L-LL analizados. El tamaño de partículas de estas muestras corresponde a la mezcla molida durante 60 minutos. Las bandas más fuertes se presentan en negrita, mientras que los peaks más débiles o presentes como hombros, se presentan subrayados.	57
Tabla 14. Detalle de la nomenclatura utilizada para los distintos tamaños de partícula obtenidos luego del tamizaje.	72

1 Introducción

1.1 Motivación

El estudio de las características de la nebulosa solar y su evolución abarca la comprensión de los procesos que suceden, en distintos niveles, a todos sus componentes, entre los cuales se encuentra el tamaño de los granos de polvo cósmico del medio interestelar.

La mayor parte de la materia interestelar (99%) se encuentra en forma de gas, mayormente hidrógeno, y el 1% restante, en forma de polvo cósmico. El polvo cósmico corresponde a granos de pequeñas partículas sólidas, que varían su tamaño, y que, al ser calentados por luz ultravioleta u óptica, emiten mayormente en el rango infrarrojo.

El polvo cósmico también está relacionado con distintos procesos o etapas en la vida de una estrella: una fuerte emisión en el rango infrarrojo indica gran cantidad de este polvo, lo que puede corresponder a una etapa temprana de la estrella, de disco proto-planetario, es decir, en proceso de formación de planetas [Molster y Waters, 2003].

Para acercarnos a entender los procesos de formación de estrellas y planetas es necesario entender los procesos que sufren estas pequeñas partículas dentro del disco, los cuales dependen de distintos parámetros, entre ellos del tamaño del material o polvo.

Existen variados estudios con respecto a la composición química [Chihara, Koike, Tsuchiyama, Tachibana y Sakamoto, 2002; Koike, Chihara, Tsuchiyama, Suto, Sogawa y Okuda, 2003; Chihara, Koike y Tsuchiyama, 2007; Chihara y Koike, 2017], simulaciones numéricas y modelos sobre los fenómenos de transporte, acreción y fragmentación de este polvo en los discos protoplanetarios, hasta la formación de protoplanetas [Gonzalez, Laibe, Maddison, Pinte y Ménard, 2015; Jacquet, 2014]. Entre los distintos parámetros, acercarse a conocer la distribución de tamaño real dentro del disco ayudaría a que estos estudios sean más precisos y cercanos a la realidad.

Por otra parte, el espectro infrarrojo depende de distintos parámetros: composición química, estado de la materia, forma y rugosidad de las partículas, temperatura, y, en particular, del tamaño de las partículas [Lyon, 1963; Salisbury, Walter

y Vergo, 1987]. A pesar de la importancia del tamaño, existen pocos trabajos con respecto a la variación del espectro por el tamaño de partícula, como son los de Mustard y Hays (1997) sobre el espectro de reflectancia y de Cooper, Salisbury, Killen y Potter (2002) o Shirley y Glotch (2019) con relación al espectro de emisividad, por lo que nuestro enfoque está en la relación del espectro de absorbancia de las muestras y el tamaño de partículas de estas.

La mayoría de los estudios sobre espectro infrarrojo corresponden a la relación entre la variación de la emisividad, reflectancia y/o transmitancia con respecto a la composición del material, específicamente de fases puras de minerales abundantes en meteoritos como olivino, piroxeno, melilita y plagioclasa [Chihara *et al.*, 2002; Koike *et al.*, 2003; Chihara *et al.*, 2007; Chihara y Koike, 2017].

Además, el rango infrarrojo (3.6 - 160 μ m) es justamente el rango de medición de distintos tipos de telescopios espaciales, como el ISO (*Infrared Spectroscopy Obserbatory*) o *Spitzer Space Telescope*, lo que implicaría que un estudio sobre la relación del espectro con el tamaño de las partículas puede ser usado para la mejora en la interpretación de futuras mediciones.

Dada la necesidad de estudiar este polvo cósmico, existen variados proyectos y estudios que obtienen muestras de material para estos estudios *in situ*, desde materia solar [Burnett *et al.*, 2003], cometas y polvo interestelar [Brownlee *et al.*, 2003], asteroides [Fujiwara, Kawaguchi y Uesugi, 2004], o Marte [Cazaux *et al.*, 2004], pero las dificultades para esto son numerosas, y las tecnologías para facilitarlo a un nivel más general están en desarrollo (Weisbin y Rodriguez, 2000; Mattingly y May, 2011), por lo que, no es una forma accesible para nosotros por ahora.

También hay diferentes estudios sobre la factibilidad de recolectar material extraterrestre que entra a la atmosfera y queda atrapado en partículas muy pequeñas en la estratosfera (aerogel) [Flynn, Horz, Bajt y Sutton, 1996; Della Corte *et al.*, 2012]. Sin embargo, la fuente más accesible y cercana de estudio son los meteoritos.

Los meteoritos son fragmentos remanentes de la formación del Sistema Solar, y sus minerales mantienen información sobre la química y física de los procesos que han sufrido, por lo que son una fuente de estudio ideal para entender fenómenos y procesos que ocurren en los discos protoplanetarios [Grossman, 1972], especialmente los meteoritos tipo condritos, dadas sus características petrogenéticas [Scott, 2007].

Este trabajo busca aportar al estudio de la espectroscopia infrarroja de meteoritos, en particular, de meteoritos condríticos y carbonáceos provenientes del desierto de Atacama, su grado de dependencia con respecto al tamaño de partícula, y su correlación con observaciones astronómicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar el espectro infrarrojo de diferentes muestras de meteoritos: condritos carbonáceos y condritos ordinarios, provenientes del desierto de Atacama, de acuerdo con su mineralogía, y determinar la correlación de estos en función de la composición y tamaño de grano.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el efecto de la variación de distintos parámetros físicos utilizados en la medición del espectro: abertura del diafragma del espectroscopio, masa de la muestra en medición, y número de mediciones del espectroscopio.
2. Obtener el espectro de transmisión infrarrojo en el rango medio, de 2 μ m a 23 μ m, para diferentes fases puras de minerales y meteoritos para la obtención de parámetros como la absorbancia.
3. Caracterizar el espectro infrarrojo de las distintas muestras de minerales y meteoritos medidas con respecto a su mineralogía y química. Analizar y relacionar los *peaks* de los espectros obtenidos en función de los cambios mineralógicos de las fases presentes en los meteoritos, la meteorización y del tamaño de grano de las muestras.

1.3 Hipótesis de trabajo

Además de la composición mineralógica, existe una relación entre el tamaño de partícula de la muestra que se está analizando, la opacidad y el espectro infrarrojo observado.

1.4 Metodología general

Las muestras utilizadas en este trabajo fueron proporcionadas por Millarca Valenzuela y recolectadas en el marco de un trabajo de campo previo a este estudio, y su descripción química y petrográfica fue realizada en el mismo, por lo tanto, el enfoque de este informe es el trabajo de laboratorio de estas muestras en relación con la espectrometría infrarroja.

La medición de los espectros infrarrojos de las muestras se realiza con un espectrómetro Bruker Vertex 80V. Para esto, es necesario crear una pastilla de Bromuro de Potasio (KBr) con material de meteorito. Esta pastilla se crea a partir de mezcla de polvo de meteorito y bromuro de potasio (KBr) sometido a una presión de 1.7 toneladas en una prensa hidráulica durante 2 minutos. El KBr utilizado es Uvasol de grado IR.

Para saber cómo afecta la concentración de material en el espectro y obtener una concentración óptima para la medición de estos, se realiza la medición de un mismo material (misma composición y tamaño de partícula) variando la masa del polvo de meteorito en la mezcla.

Para las mediciones, tanto de fases puras de minerales como de las muestras de meteorito, se mantendrá una misma concentración de material y se varía el tiempo de molienda de la mezcla. Con esto se espera obtener una variación en el tamaño de partícula de la muestra.

El procesamiento de estos datos se realiza utilizando distintos programas, para así obtener la absorbancia de las muestras de meteoritos a partir de su espectro de transmitancia. Con esto se procederá a la caracterización mineralógica de las muestras en función de los espectros obtenidos.

Se utiliza microscopía óptica para obtener microfotografías de las muestras medidas, con las cuales se realizará la caracterización de la distribución del tamaño de grano de del material.

2 Marco teórico

2.1 Polvo cósmico y discos protoplanetarios

Avances recientes en la astronomía, indican que los planetas extrasolares, en particular, los planetas rocosos, son muy comunes en la Galaxia, y por lo tanto los discos protoplanetarios observados, son considerados análogos a la Nebulosa Solar.

Los planetesimales en discos protoplanetarios son imposibles de observar con tecnología actual. Sin embargo, es posible observar el polvo primordial, a partir del cual se forman estos planetesimales; partículas que van de 1 micrómetro a 1mm, o el polvo secundario producto de colisiones entre los mismos.

Las mediciones astronómicas que realizan los telescopios espaciales presentan variados tipos de mediciones de las partículas observadas. Entre estos tipos de mediciones se encuentra el espectro infrarrojo y la absorbancia, los que dependen directamente de la composición, el tamaño y la temperatura a la que se encuentra el material medido. Por lo tanto, para poder obtener una interpretación realista del espectro infrarrojo obtenido por estos telescopios, es de vital importancia una caracterización de los espectros de materiales extraterrestres, como los meteoritos, y de los minerales comúnmente encontrados en estos.

Estas mediciones se dificultan de realizar desde telescopios terrestres, puesto que la atmósfera y en particular la presencia de H₂O ambiental, producen una gran interferencia en las mediciones, que no se puede evitar en estos tipos de telescopios.

El IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*), una misión de exploración de la NASA, realizó el primer reconocimiento del espacio a longitudes de onda infrarroja en 1983, lo que abrió una puerta a la exploración astronómica y donde se duplicaron las fuentes infrarrojas detectadas y catalogadas hasta ese momento por los astrónomos. Con esto se sentó el marco para los posteriores observatorios infrarrojos. Fue con IRAS que se descubrieron discos de polvo que rodeaban a las estrellas, los que ahora se conocen como discos protoplanetarios, y la presencia de granos de polvo en toda la vía láctea.

El ISO (*Infrared Space Observatory*) fue lanzado a fines de 1995, sus mediciones abarcaban el rango de 2.5 a 240 micrones, y su tecnología dio a los astrónomos mejora significativa en las capacidades de sus mediciones. A pesar de que el satélite ya no funciona, su base de datos y archivos continúan vigentes. Este telescopio confirmó y extendió muchos de los descubrimientos de IRAS, como la existencia de discos de polvos circunestelares formadores de planetas, caracterización de nuevas moléculas interestelares y el descubrimiento de que el agua es abundante en toda la galaxia. Posterior a ISO, nuevos telescopios espaciales han hecho importantes contribuciones en el campo de la espectroscopia astronómica infrarroja.

En este sentido, Spitzer fue un salto en el avance tecnológico, que proporciono mejoras en el orden de magnitud de mediciones y capacidades astronómicas. Esto es particularmente importante, puesto que mejoro las condiciones para el estudio del polvo alrededor de estrellas, su evolución y la formación de planetas

2.2 Meteoritos y su clasificación

Los meteoritos son fragmentos de planetesimales, es decir, remanentes de la formación del sistema solar, y sus minerales contienen información sobre la física y la química de los procesos que han sufrido. El estudio del espectro infrarrojo de los meteoritos es esencial para obtener información que no es posible obtener de otra manera, y que puede ayudarnos a comprender la naturaleza de la Nebulosa Solar.

La clasificación de los meteoritos está basada en distintos parámetros, de los cuales son esenciales para este trabajo los relacionados con su composición y procedencia, su grado de meteorización y el grado de metamorfismo de choque. En particular, el de mayor importancia es la relación con respecto a su composición y origen. Para esta clasificación son tres los métodos los más utilizados: de acuerdo con las características petrológicas (textura, mineralogía y composición mineral), en relación la composición química de roca total y la composición de isótopos de Oxígeno [Weisberg, McCoy y Krot, 2006].

2.2.1 Clasificación de meteoritos con respecto a su composición

La clasificación de los meteoritos con respecto a su composición está ligada a su petrogénesis. La primera división se da en cuanto a los procesos de diferenciación que han sufrido los distintos meteoritos: los meteoritos primitivos (o condritos) y los meteoritos diferenciados (o acondritos).

Los condritos corresponden a meteoritos primitivos, no diferenciados, que contienen pequeñas esferas (1-2 mm) de aglomerados minerales llamadas cóndrulos, que poseen una composición similar a la del sistema solar y que no experimentaron una diferenciación planetaria (son derivados de asteroides y cometas).

Los acondritos corresponden a rocas ígneas que han sufrido distintos procesos de diferenciación: fusión parcial o total en el cuerpo parental, o brechas con fragmentos de rocas ígneas provenientes de cuerpos diferenciados como asteroides o cuerpos planetarios (Luna, Marte).

Existe una clasificación intermedia, los acondritos primitivos, que corresponden a meteoritos que presentan una textura acondrítica (ígnea o recristalizada) pero que mantienen una química más similar a los condritos. No corresponden a meteoritos condritos, pero son más cercanos a su cuerpo parental que los acondritos.

Dada la naturaleza de las muestras estudiadas en este trabajo, correspondientes a condritos ordinarios de dos tipos diferentes, es que nos centraremos en la clasificación de este tipo de meteoritos.

Dentro de la clasificación de los condritos, se tiene la división en 3 **clases**: condritos carbonáceos (C), condritos ordinarios (O) y condritos de enstatita (E). Estas diferentes clases de meteoritos comparten propiedades similares tanto en la química primaria de la roca total, como las relacionadas a los isótopos de Oxígeno presentes [Hutchinson, 2004].

Estas clases se subdividen en clanes. Weisberg *et al.*, (2006), usa el término **clan** para condritos dentro de la misma clase que tienen similitudes químicas, mineralógicas e isotópicas, que sugieren una petrogénesis similar, pero con diferencias petrológicas y/o en la química total como para estar en un mismo grupo, y que pueden representar materiales que provienen de un mismo reservorio nebular, donde las diferencias presentes son producto de la distribución de tamaño o producto de procesos secundarios.

Los condritos ordinarios se superponen en la composición isotópica de Oxígeno y tienen características petrológicas similares perteneciendo a un mismo clan (H-L-LL), por lo que la diferenciación entre estos es solo a nivel de **grupo**: condritos de tipo H, L y LL. Los grupos indican comúnmente meteoritos provenientes del mismo cuerpo parental, con similar petrología, composición de roca total y características isotópicas de Oxígeno.

Se debe destacar la gran similitud entre los condritos tipo L, LL y H, donde la diferencia es la cantidad de Hierro (Fe), y la proporción entre el Hierro metálico (Fe^0) y el Hierro oxidado (FeO), lo cual también se refleja en sus nombres. Los de tipo **H** (*High*) tienen un alto contenido en Hierro con respecto a los condritos; los condritos tipo **L** (*Low*) un bajo contenido en Hierro en comparación al tipo H; y los condritos tipo **LL** (*Low total iron, Low metal*). En cuanto a la proporción entre Hierro metálico y Hierro oxidado (Fe^0/FeO), la mayor la tienen los condritos tipo H: 0.58, seguido de los condritos tipo L: 0.29 y la menor proporción los condritos tipo LL: 0.11. [Weisberg *et al.*, 2006].

En condritos equilibrados, es decir, de tipo petrológico 4-6, el ser del grupo H, L o LL también se refleja en sus minerales, en particular en el tipo y cantidad olivino: porcentaje molar de Fayalita (%mol Fa); y el grafico de Cobalto (Co) en kamacita vs Fayalita en olivinos [Rubin, 1990]. Para condritos no equilibrados, (tipo petrológico menos 3.5) no es un indicador fiable.

Figura 1. Gráfica de Cobalto en kamacita vs Olivino Fayalita de condritos ordinarios, que muestra la diferenciación entre grupos de condritos H, L y LL. Extraído de Rubin, 1990.

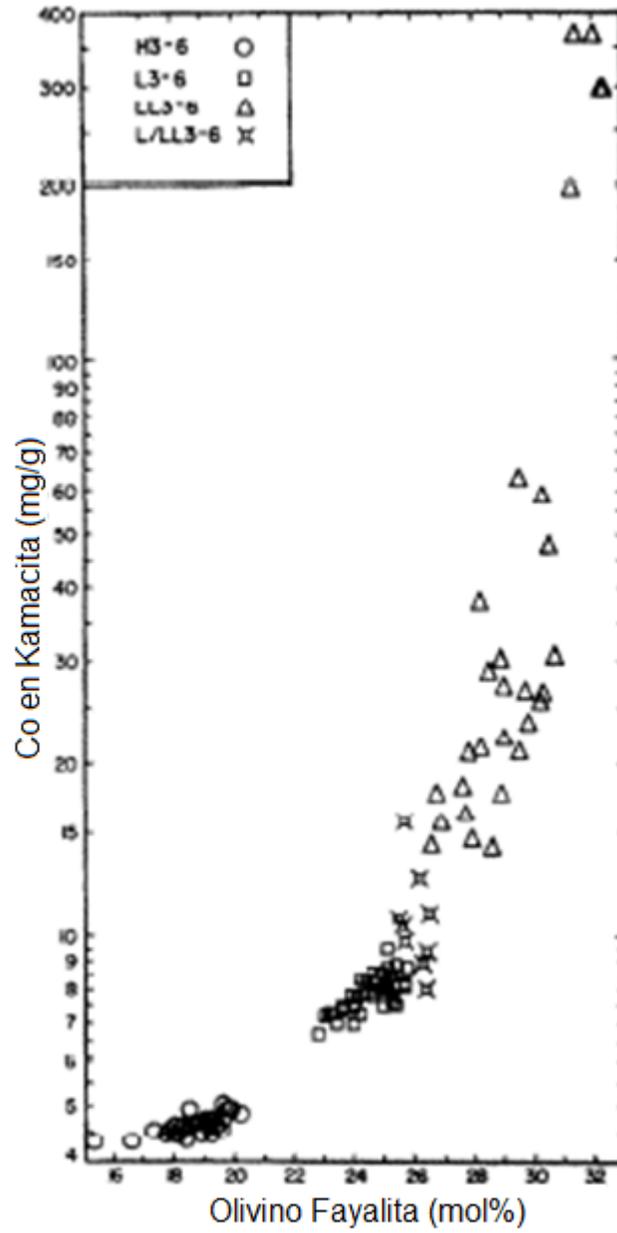
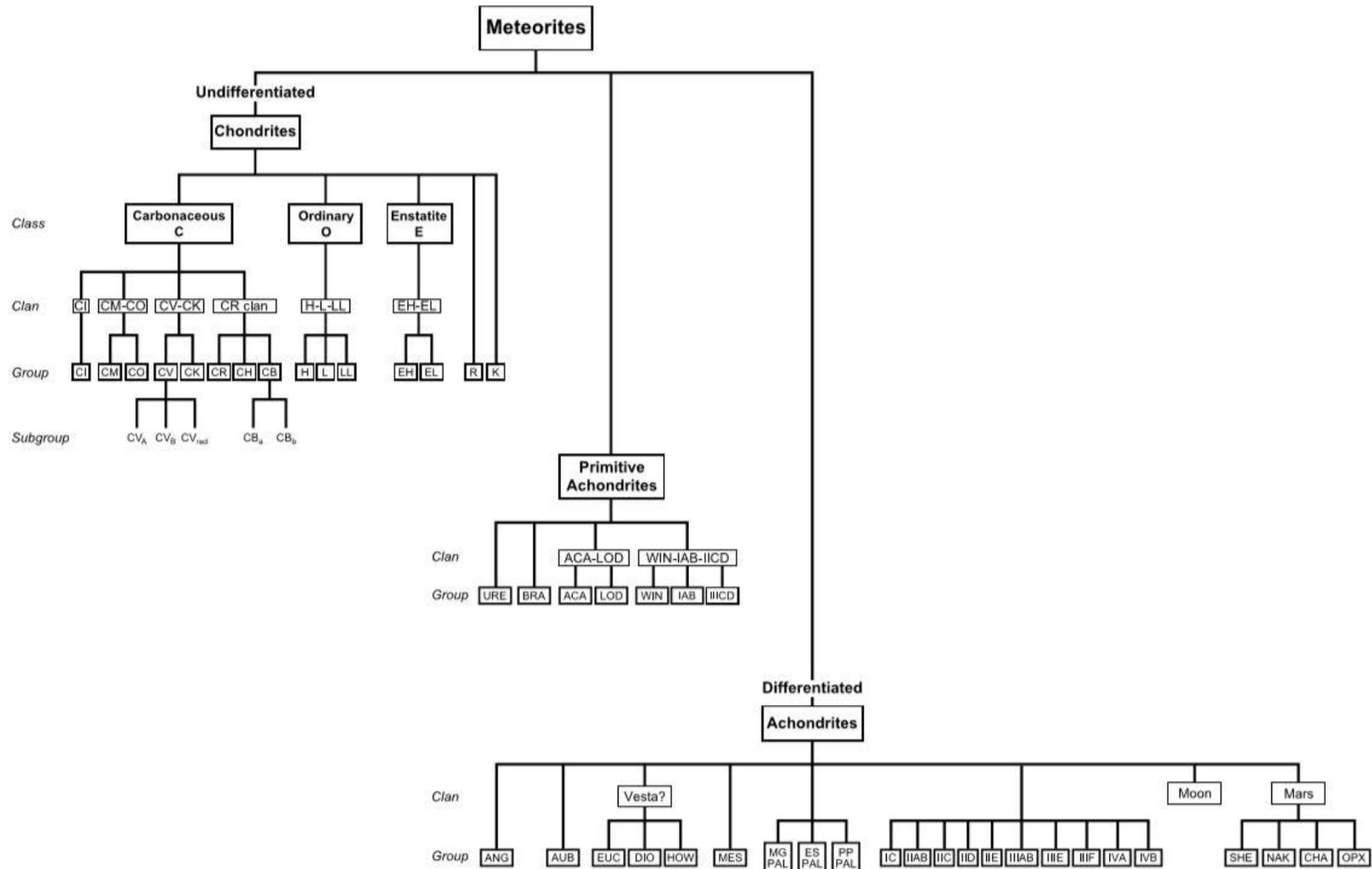


Figura 2. Esquema de clasificación de meteoritos según Weisberg et al., 2006. De los 23 meteoritos estudiados en este trabajo, 3 corresponden a condritos carbonáceos de tipo Orgueil (CO) y 20 corresponden a condritos ordinarios (OC), entre los que se tienen 6 condritos del grupo H, 12 condritos del grupo L y 2 condritos del grupo LL.



2.2.2 Clasificación de meteoritos de acuerdo con el grado de meteorización

Desde su llegada a la tierra, los meteoritos están expuestos a variados factores de meteorización como agua, aire, sales, viento y temperatura. Dependiendo de la composición inicial del meteorito, su porosidad y los factores antes mencionados, la tasa de meteorización puede variar.

Los lugares con menos disponibilidad de agua líquida son los que mantienen menores tasas de meteorización y alteración, siendo posible la acumulación y posterior reconocimiento de estos, por lo que, los desiertos, tanto fríos como calientes, son lugares ideales para la acumulación de meteoritos.

La clasificación del grado de meteorización de un meteorito para muestras de mano se presenta en la tabla 1. Desarrollada por Grossman (1994), y utilizada por el grupo de trabajo de meteoritos de la NASA (*Johnson Space Center*), esta clasificación está basada en meteoritos encontrados en la antártica.

Tabla 1. Tabla de clasificación de meteoritos de acuerdo con el grado de meteorización, desarrollada por Grossman, 1994, actualmente poco utilizada.

Meteorización	Características
A	Oxidación menor
B	Oxidación moderada
C	Oxidación severa
E	Minerales evaporíticos visibles a ojo descubierto

Por otro lado, Wlotzka (1993) sugiere una nueva clasificación, mostrada en la tabla 2, en busca de una caracterización en cuanto al grado de meteorización para cortes transparentes. Según esta clasificación, la meteorización afecta primero a los granos de metales, luego a la troilita, y en una fase final a los silicatos.

Mayor o menor cantidad de venas con óxidos de hierro pueden encontrarse en el estado W2. Estas venas se desarrollan independiente del grado de meteorización, aparentemente en fracturas producto de esfuerzos mecánicos. Fracturas abiertas normalmente son rellenadas con carbonatos [Wlotzka, 1993].

Los grados W5 y W6 son poco comunes. La alteración de silicatos afecta primero a los olivinos, comenzando desde el centro de los granos y no desde los bordes.

En el estado W6 se encuentran cóndrulos intactos donde los olivinos son completamente reemplazados por una mezcla de minerales de arcilla y óxidos de hierro.

En meteoritos encontrados en desiertos calientes se encuentra una correlación entre el grado de meteorización y el tiempo de estadía en la tierra. Para meteoritos encontrados en la antártica (desiertos fríos) esta correlación, entre el grado y el tiempo de estadía del meteorito en la tierra, indica que la meteorización es mucho más lenta.

Tabla 2. Gráfico de clasificación de meteoritos de acuerdo con su grado de meteorización propuesto por Wlotzka, 1993, actualmente la más utilizada para este tipo de clasificación.

Meteorización	Características
W0	No hay oxidación visible de metales o sulfuros. Manchas de limonita. Meteoritos recuperados inmediatamente después de su caída suelen presentar este grado, algunos incluso W1.
W1	Bordes menores de oxido alrededor de metales y troilita. Venas de oxido menores.
W2	Moderada oxidación de metales, afectando alrededor de 20-60%.
W3	Fuerte oxidación de metales y troilita, el 60-95% ha sido reemplazado.
W4	Completa oxidación del metal y la troilita (>95%), los silicatos aún no han sido alterados oxidados
W5	Comienzo de la alteración de silicatos máficos, principalmente a lo largo de las fracturas

2.2.3 Clasificación de meteoritos de acuerdo con su estado de choque

El metamorfismo de choque y la brechización en los meteoritos son el resultado de colisiones a muy alta velocidad, que ocurren frecuentemente durante su formación en el sistema solar, eyectando material fragmentado o fragmentando cuerpos enteros, por lo que muchos meteoritos son afectados por este tipo de metamorfismo [Bunch y Rajan, 1988].

Los choques entre cuerpos que viajan a velocidades de varios kilómetros por segundo pueden alcanzar presiones instantáneas de hasta 75-90 GPa [Stöffler y Keil, 1991], junto a la liberación de calor que puede llegar a temperaturas mayores de 1.000°C, llegando incluso a fundir material y presentar deformación en su estructura cristalina. También se puede presentar aparición de minerales que se forman a grandes presiones como diamante [Russell, Pillinger, Arden, Lee y Ott, 1992], ringwoodita (olivino con estructura de espinela), maskelynita (vidrio de composición plagioclásica) o majorita (piroxeno pobre en calcio con estructura de granate) [Muñoz-Espadas, 2003].

La clasificación por metamorfismo de choque o clasificación por impacto tiene en cuenta la fuerza del impacto del meteorito (medida en GPa).

Inicialmente se utilizó la clasificación propuesta por Dodd y Jarosewich (1979), quienes definieron 6 estados de choque (de la "a" a la "f"), basándose en propiedades presentes en los cristales de olivino y plagioclasa, junto a la presencia de venillas y bolsas de fundido observados en cortes transparentes. Esta clasificación estaba definida solo para condritos ordinarios tipo L, y en la actualidad se encuentra en desuso.

Posteriormente, se propone una nueva clasificación, con 6 estados de choque (S1 a S6) basado en los efectos sobre los cristales de olivino, plagioclasa y piroxeno en cortes transparentes, presentados en la tabla 3. [Stöffler y Keil, 1991; Scott, Keil y Stoeffler, 1992; Rubin, Scott y Keil, 1997].

En condritos ordinarios se utiliza el olivino y la plagioclasa para caracterizar el nivel de metamorfismo de impacto. Para los condritos carbonáceos se emplea

principalmente el olivino, mientras que, para los condritos de enstatita, el mineral utilizado es el ortopiroxeno.

Tabla 3. Esquema de clasificación para meteoritos de acuerdo con su metamorfismo de choque, a partir de Stöfler y Keil 1991, Scott et al., 1992, Rubin *et al.*, 1997 y M.J. Muñoz-Espadas, 2003.

Intensidad	Efecto de la presión en los minerales			Presión de choque	Incremento de la T° post shock
				[GPa]	[C°]
	Olivino	Plagioclasa	Ortopiroxeno		
S1 sin choque	Extinción óptica brusca, Fracturas irregulares			<4-5	10-20
S2 choque muy débil	Extinción ondulante Fracturas irregulares		Extinción ondulante Fracturas irregulares Algunas fracturas planares	05-10	20-50
S3 choque débil	Extinción ondulante Fracturas irregulares Fracturas planares	Extinción ondulante	Extinción ondulante Fracturas irregulares Fracturas planares Lamelas de clinoenstatita	15-20	100-150
S4 choque moderado	Mosaicismo débil Fracturas planares	Extinción ondulante Isotropía parcial Rasgos de deformación planar.	Mosaicismo débil Maclado Fracturas planares.	30-35	250-350
S5 choque fuerte	Mosaicismo intenso Fracturas planares Rasgos de deformación planar	Maskelynita (vidrio de composición plagioclásica, isotropía feldespató)	Mosaicismo intenso Lamelas submicroscópicas, de 20-40 mm y cuya orientación varía de 3 a 5° entre sí.	45-55	600-850

Fracturas planares.

S6 choque muy fuerte	Recristalización en estado sólido Presencia de ringwoodita Fusión local.	Fusión por choque (vidrio.	Majorita Fusión.	75-90	1500-1750
Roca fundida	La roca entera está fundida (roca fundida o brechas de fundido)			>90	>1750

2.2.4 Clasificación de los meteoritos de acuerdo con su metamorfismo térmico o tipo petrológico

El tipo petrológico corresponde a una clasificación de meteoritos con relación al metamorfismo térmico sufrido, que se produce producto de un calentamiento del cuerpo. Se cree que la acreción de los componentes de los condritos se produce a bajas temperaturas [Rubin y Brearley, 1996] por lo que este metamorfismo se asume posterior a su formación.

Tabla 4. Clasificación de acuerdo con el metamorfismo térmico, para distintos tipos de condritos.

	Alteración acuosa ←			Metamorfismo térmico →			
Tipo petrológico	1	2	3	4	5	6	
Condritos carbonáceos	CI1	CM2 CR2	CV3 CO3	CK4			
Condritos ordinarios			H3 L3 LL3	H4 L4 LL4	H5 L5 LL5	H6 L6 LL6	
Condritos de enstatita			EH3 EL3	EH4 EL4	EH5 EL5	EH6 EL6	
Kakangari			K3				
Rumuruti			R3				
T [°]	50	<20	400	600	700	750	950

Los cambios mineralógicos y texturales que se observan producto de este tipo de metamorfismo permiten clasificarlos en distintos tipos petrológicos, numerados de 1 a 6 [Van Schmur y Wood, 1967]. Inicialmente se relacionaba el grado metamórfico creciente con el tipo petrológico, donde 1 era el de menor grado, pero son las condritas de tipo 3

las que presentan menor grado de metamorfismo, y la escala está relacionada con el grado de equilibrio.

Los tipos 1 y 2 representan a condritos carbonáceos, que han experimentado alteración acuosa. A los 6 primeros grados, se agregó el tipo petrológico 7, que correspondería a condritos en los cuales los cóndrulos son irreconocibles. En la tabla 4 y 5 se presentan los esquemas de esta clasificación.

Tabla 5. Clasificación de meteoritos en cuanto al tipo petrológico y características de reconocimiento de cada una de ellas.

TIPO PETROLÓGICO

	1	2	3	4	5	6	7
Homogeneidad composicional de Olivino y Piroxeno pobre en Ca	-	>5% de desviación respecto a la media		≤5% de desviación respecto a la media	Homogéneos		
Estado estructural del Piroxeno pobre en Ca	-	Predominantemente monoclinico		>20% monoclinico	<20% monoclinico	Ortorrómico	
					CaO ≤ 1% en peso		CaO > 1%
Feldespatos	-	Solo algunos granos de feldespatos primario		Granos secundarios <2 um	Granos secundarios 2-50 um	Granos secundarios > 50um	
Vidrio en los cóndrulos	-	Alterado, casi ausente	Limpio, isótropo, abundancia variable	Desvitrificado, ausente			
Minerales metálicos (máx. % Ni en peso)	-	Taenita minoritaria o ausente (<20%)	Kamacita y taenita exseltas (>20%)				
Sulfuros: contenido medio de Ni	-	>0.5%	<0.5%				
Texturas de la matriz	Opaca, de grano fino	Opaca, casi toda fina	Clástica y parte opaca	Transparente, recristalizada. El tamaño de grano aumenta de 4 a 7			
Integración de los cóndrulos y la matriz	Sin cóndrulos	Cóndrulos con límites netos		Cóndrulos bien definidos	Cóndrulos diferenciables	Cóndrulos mal definidos	Cóndrulos relictos
Carbono (% en peso)	3-5	0.8-2.6	0.2-1	< 0.2			
Agua (% en peso)	18-22	feb-16	0.3-3	<1.5			

2.3 Teoría Espectro Infrarrojo

La radiación infrarroja de frecuencias bajo los 100 μm es absorbida y convertida tanto en energía de rotación molecular como de vibración molecular. Esta absorción es cuantificable y su espectro depende del tipo de esta energía. Mientras que para la energía de rotación molecular el espectro se presenta en líneas discretas, el espectro vibracional aparece en bandas en vez de líneas, dado que el cambio energía vibracional solitario es acompañado por un número de cambios en la energía rotacional.

Son estas bandas de vibración-rotación, especialmente las que ocurren entre 2.5 – 25 μm , las que nos interesan. La frecuencia o longitud de onda de absorción depende de las masas relativas de los átomos, la fuerza constante de los enlaces, y la geometría de los átomos.

Las posiciones de las bandas en el espectro infrarrojo se presentan en este trabajo como número de onda (recíproco de cm^{-1}), unidad que es proporcional a la energía de vibración. Cabe destacar que el número de onda es ocasionalmente llamado “frecuencia”, lo cual es incorrecto.

La intensidad de las bandas puede ser expresada tanto en Transmitancia (T) como en Absorbancia (A). La Transmitancia es la proporción del poder radiante transmitido por una muestra con respecto al poder incidente en la misma, y la Absorbancia corresponde al logaritmo, en base 10, del recíproco de la transmitancia; $A = \log(1/T)$.

Es importante tener en cuenta diferentes factores al momento de realizar la interpretación de un espectro dado. Existen componentes que pueden complicar el aspecto de un espectro infrarrojo definido, como puede ser la combinación de bandas, resonancia Fermi y bandas de rotación-vibración. Otro agente importante son los enlaces de hidrógeno, los cuales pueden contribuir con notables cambios en el espectro infrarrojo, por lo que, a veces, la presencia de este tipo de enlace en ciertas moléculas puede agregar información adicional errónea en el espectro.

De todas maneras, la interpretación del espectro es simplificada por el hecho de que las bandas que aparecen usualmente pueden ser asignadas a partes particulares (enlaces) de una molécula, produciendo lo que se conoce como “grupo de frecuencias”.

La espectroscopia infrarroja tiene cierta ventaja sobre otras técnicas analíticas. Puede ser utilizada para el análisis e identificación de un componente dentro de una

mezcla, especialmente cuando los compuestos en la mezcla son parecidos químicamente o tienen propiedades físicas similares (por ejemplo, isómeros estructurales). En este caso, el análisis utilizando espectroscopia ultravioleta/visible se complica, puesto que los espectros de los componentes serían casi idénticos. Otra ventaja de esta técnica es que no es destructiva con la muestra y requiere, relativamente, una pequeña cantidad de material.

2.3.1 Espectro Infrarrojo Medio (MIR)

El espectro infrarrojo medio (MIR) va desde 2.5 – 25 μm , y puede ser dividido en cuatro regiones y la naturaleza de un grupo de frecuencias puede ser determinado, generalmente, por la región en la que está localizada, las que se presentan en la tabla 5.

Tabla 6. Subregiones características que se encuentran dentro del espectro infrarrojo medio.

Tipo de región (MIR)	Rango 2.5 - 25[μm]
Región de X-H	2.5 – 4
Región de triple enlace	4 – 5
Región de doble enlace	5 – 6.67
Región de <i>fingerprint</i>	6.67 – 25

Las vibraciones en la región de 2.5 – 4 μm son producto de los enlaces de distintos elementos con el Hidrógeno, generalmente debido a O—H, C—H y N—H. El enlace OH produce una franja ancha que ocurre en el rango 2.70 – 2.77 μm , a diferencia del enlace NH, que es usualmente observada entre 2.94 – 3.03 μm . Esta absorción es generalmente mucho más aguda que la del OH. La franja del CH, de compuestos alifáticos, ocurre en el rango 3.33 – 3.51 μm . Si el enlace CH es adyacente a un doble enlace o un anillo aromático, el número de onda del CH aumenta y la absorción cae en el rango 3.22 – 3.33 μm .

Las absorciones de la región de triple enlace se presentan entre 4 – 5 μm producto de la alta fuerza constante de los enlaces. El enlace C—C absorbe entre 4.35 – 4.88 μm , mientras que el grupo nitrilo (C—N) ocurre entre 4.35 – 4.55 μm . Estos pueden ser distinguidos puesto que el enlace C—C es normalmente muy leve, mientras que el C—N es de intensidad media. Estas son las absorciones más comunes en esta región, pero también se puede encontrar absorciones de X—H, donde X es un átomo

más masivo como fosforo o silicio. Estas absorciones suelen ocurrir cerca del 4.16 – 4.55 μm respectivamente.

Las principales franjas en la región de doble enlace, 5 – 6.67 μm , son producto de los enlaces C—C y C—O. Carbonilo es una de las absorciones fáciles de reconocer en el espectro infrarrojo: usualmente la franja más intensa en el espectro, y dependiendo del tipo de enlace C—O, ocurre entre 5.46 – 6.06 μm . Cabe notar que carbonilos de metales pueden absorber sobre 5 μm . El enlace C—C es mucho más débil y ocurre alrededor 6.06 μm , pero esta franja esta frecuentemente ausente producto de la simetría o el momento dipolo. El enlace C—N también ocurre en esta región y es usualmente fuerte.

Hasta ahora se ha asumido que cada franja en el espectro infrarrojo puede ser asignada a una deformación particular de la molécula, el movimiento de un grupo de átomos, o el giro o elongación de un enlace en particular. Esto es posible para varias franjas, particularmente para las vibraciones de elongación de múltiples enlaces que tienen un “buen comportamiento”. De todas maneras, varias vibraciones no se comportan tan bien y puede variar desde cientos el número de onda, incluso para moléculas similares. Esto aplica para la mayoría de las vibraciones rotacionales y esqueléticas, las cuales absorben en la región 6.67 – 15.38 μm , por lo que pequeños efectos electrónicos o estéricos en la molécula llevan a un gran desplazamiento.

3 Muestras

3.1 Características de las muestras

Las muestras estudiadas corresponden a 23 meteoritos recolectados en distintas localidades del desierto de Atacama, en la región de Antofagasta, Chile. El desierto de Atacama resulta ser un lugar ideal para la recolección de muestras, dada su accesibilidad y su aridez, siendo uno de los desiertos más áridos del planeta, lo cual mantiene los meteoritos con una baja tasa de erosión y meteorización [Hutzler, Gattacceca, Rochette, Jull, Valenzuela, Cournede y Braucher, 2011; Gattacceca, Valenzuela, Uehara, Jull, Giscard, Rochette y Munayco, 2011].

De los 23 meteoritos estudiados en este trabajo, veinte corresponden a condritos ordinarios (OC), con ejemplares de los tres distintos grupos: H, L y LL. Las muestras de los condritos ordinarios provienen de dos localidades del desierto de atacama: Pampa de Mejillones y el área de San Juan.

La pampa de Mejillones corresponde a una extensa planicie de aproximadamente $\sim 250 \text{ km}^2$, ubicada en el sector norte de la Península de Mejillones, al sur de la localidad del mismo nombre. Los meteoritos recolectados fueron encontrados en superficies de deflación, a lo largo de esta zona.

El sector de San Juan se ubica al interior de Taltal, aproximadamente a $\sim 70 \text{ km}$ desde el borde costero. El área de recolección está centrada a los 22.44° latitud S y 69.87° longitud W, a una altura de $\sim 1700 \text{ msnm}$, en zonas de deflación de la Depresión Central [Valenzuela, 2011].

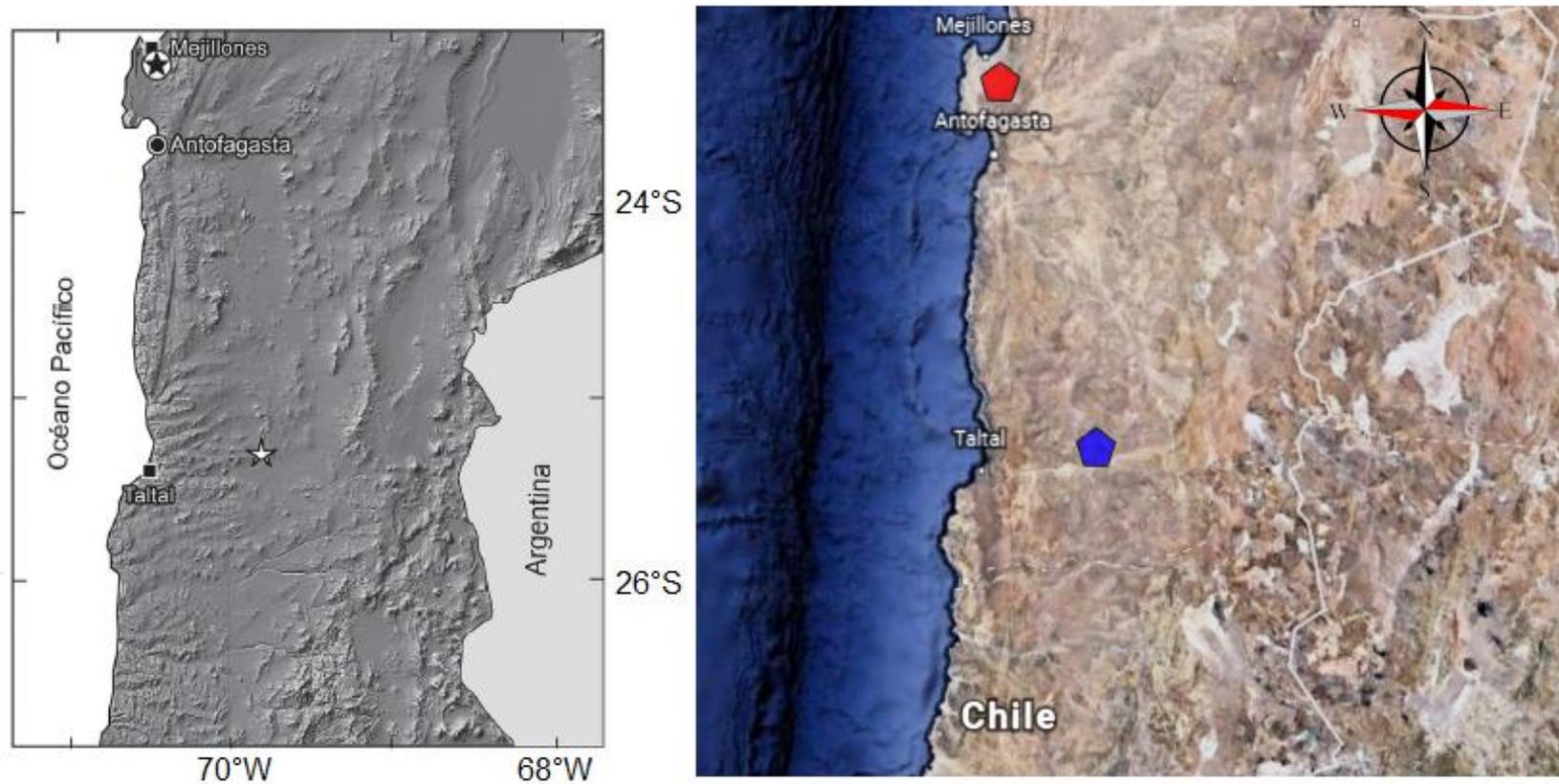
El estudio petrográfico y geoquímico de estos meteoritos está esta detallado en Valenzuela (2011), el cual incluye la clasificación de cada muestra, estado de choque, meteorización, descripción petrográfica y geoquímica, y que se presentan a modo de resumen, en la Tabla 7.

Los otros 3 meteoritos, corresponden a condritos carbonáceos pertenecientes al grupo CO (Carbonáceos tipo Orgueil), provenientes de área de Catalina, Los Vientos y El Médano, igualmente al interior de la localidad de Taltal.

Tabla 7. Minerales encontrados en las muestras de meteorito a través de XRD, y estimación porcentual cuantitativa de cada fase obtenida a través del método Rietveldt, extraído de Valenzuela, 2011. Hay que destacar que no todos los meteoritos estudiados en este trabajo se encuentran en esta descripción.

Meteorito	Clasificación	Olivino [%]	Piroxeno [%]	Fe-Ni [%]	Troilita [%]	Albita [%]	Anortita [%]	Magnetita [%]	Hematita [%]	Goethita [%]	Akaganeita [%]	% Total
ChileM1	H5 S2 W3	40.96	31.05	0.00	2.80	7.48	4.71	4.92	0.22	5.51	2.36	100.01
E. Imilac	H5 S4 W1	45.50	31.92	0.31	2.43	4.76	10.49	3.92	0.00	0.36	0.31	100.00
SanJuan02	H6 S1 W3	32.37	36.96	0.00	1.67	6.97	6.06	3.22	0.20	12.22	0.34	100.01
Rencoret	H6 S3 W3	40.60	35.34	0.00	1.94	1.72	11.17	4.73	0.26	2.83	1.40	99.99
ChileM8	L4 S3 W4	44.56	28.79	0.00	0.71	5.28	6.02	3.00	0.22	9.92	1.32	99.82
PampaB	L4/5 S4 W3	48.81	29.21	0.00	1.47	3.02	8.47	3.82	0.00	3.35	1.55	99.70
PampaD	L5 S2 W2/3	41.48	33.74	0.0	0.95	3.52	8.05	4.09	0.20	6.80	1.18	100.01
PampaG	L5 S2 W3	32.70	37.09	0.00	0.00	5.10	7.23	3.44	0.25	14.15	0.03	99.99
ChileM9	L6 S2 W3	44.30	35.11	0.01	0.00	1.52	7.49	3.38	0.20	6.07	1.02	99.10
ChileM7	L6 S3 W4	36.75	23.74	0.00	0.00	4.70	14.48	8.44	0.24	11.65	0.00	100.00
ChileM4	L6 S3 W4/5	43.19	27.19	0.00	0.00	3.01	11.62	4.25	0.33	10.40	0.00	99.99
Lutschaunig	L6 W1	55.01	28.85	0.18	2.94	5.77	1.66	4.58	0.00	0.78	0.23	100.00
LaYesera02	LL5 S2 W2	50.95	27.14	0.00	1.28	3.09	13.12	1.58	0.20	2.69	0.00	100.05

Figura 3. Mapa desierto de Atacama con el detalle de las zonas donde fueron recolectados los meteoritos estudiados en este trabajo. A) Sector Pampa de Mejillones, marcado con una estrella negra en el mapa de la izquierda y con un pentágono rojo en el mapa de la derecha, corresponde a una planicie al sur de la localidad de Mejillones. B) Sector San Juan, Catalina, Los Vientos y El Médano, marcado con una estrella blanca en el mapa de la izquierda y con un pentágono azul en el mapa de la derecha, se ubica al interior de la localidad de Taltal. Los meteoritos carbonáceos provienen de este sector.



4 Laboratorio Polvo Cósmico

4.1 Equipos

Los equipos e insumos utilizados para las mediciones efectuadas durante este estudio pertenecen al laboratorio de Polvo Cósmico del Núcleo de Astronomía de la Universidad Diego Portales.

Para la preparación de muestra se contó con tamices, micro balanza digital, horno de convección natural, mortero de ágata, prensa hidráulica, anillos de sujeción y cucharillas y paletas de acero inoxidable,

Las mediciones del espectro de transmitancia se realizaron en el rango infrarrojo, con un espectrómetro FT-IR Bruker Vertex 80V. Para el procesamiento de datos, se utilizaron diversos *softwares* como OPUS, Octave 5.1.0, J Micro Vision v1.27 y OriginPro 8.

4.1.1 Espectroscopio

Para las mediciones de absorbancia se utiliza un espectrómetro FT-IR Bruker Vertex 80v, el cual está equipado con una serie de características como AAR (*Automatic Accessory Recognition*), ACR (*Automatic Component Recognition*) y protección de rendimiento que facilitan la realización de mediciones espectroscópicas y garantizan resultados de medición confiables.

La función AAR identifica automáticamente el accesorio instalado en el compartimento de muestra, realiza varias pruebas y carga automáticamente el archivo de experimento correspondiente, incluidos los parámetros de medición predefinidos. La función ACR reconoce automáticamente los componentes ópticos instalados como fuente, detector y divisor de haz. La tecnología *DigiTect* garantiza una transmisión de señal libre de interferencias y garantiza la relación señal/ruido más alto.

La configuración estándar del espectrómetro está equipada para la adquisición de datos en la región del infrarrojo medio. Opcionalmente, el espectrómetro puede

equiparse con diferentes componentes ópticos para cubrir todo el rango espectral, comenzando en el infrarrojo lejano (5cm^{-1}) hasta la región ultravioleta a (50.000 cm^{-1}). Las mediciones en este trabajo solo se fueron en el rango de 2 – 23 μm .

El compartimiento donde se coloca la pastilla con la muestra se trabaja en vacío, a una presión aproximada de 1 hPa, para evitar interferencias atmosféricas (vapor de agua o dióxido de carbono). El resultado es una medición óptima en donde el espectro no presenta bandas de absorción de vapor de H_2O o CO_2 .

Dieciséis mediciones son utilizadas para la obtención de cada espectro, con una resolución de 4cm^{-1} en el rango de 2 a 23 μm . La medición del *background* se realiza sin ninguna pastilla en la cámara y sometida al vacío, a una presión aproximada de 1 hPa.

Adicionalmente se mide una pastilla que contiene solo KBr, obteniendo el espectro puro que luego se sustrae de cada medición de muestra, disminuyendo la posible influencia del espectro del KBr en el espectro final medido.

Figura 4. Esquema interno del espectrómetro FT-IR Bruker Vertex 80v, con detalle del funcionamiento de cada pieza y accesorio, extraído del manual del equipo.

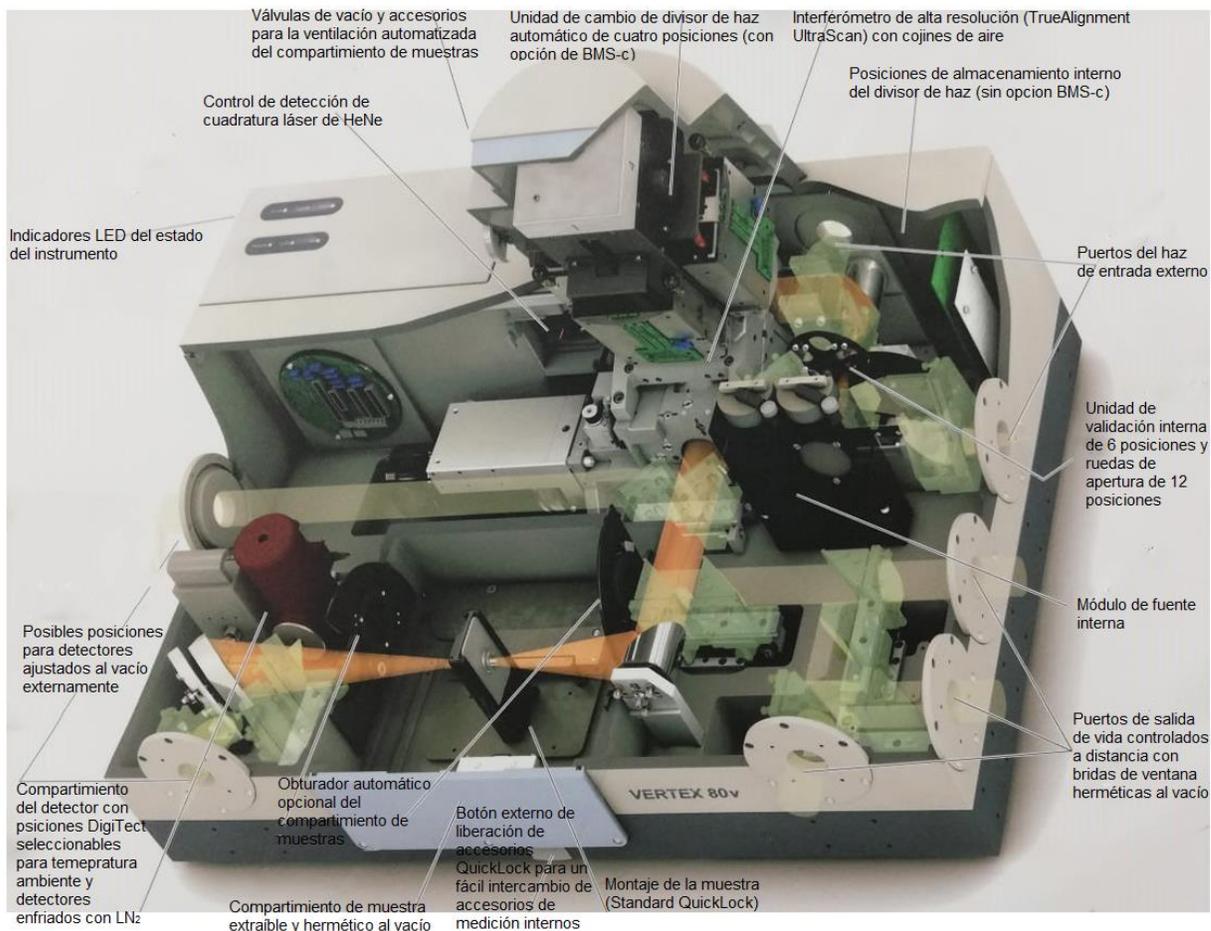


Figura 5. Espectrómetro FT-IR Bruker Vertex 80v, perteneciente al laboratorio de Polvo cósmico del Núcleo de Astronomía de la Universidad Diego Portales.

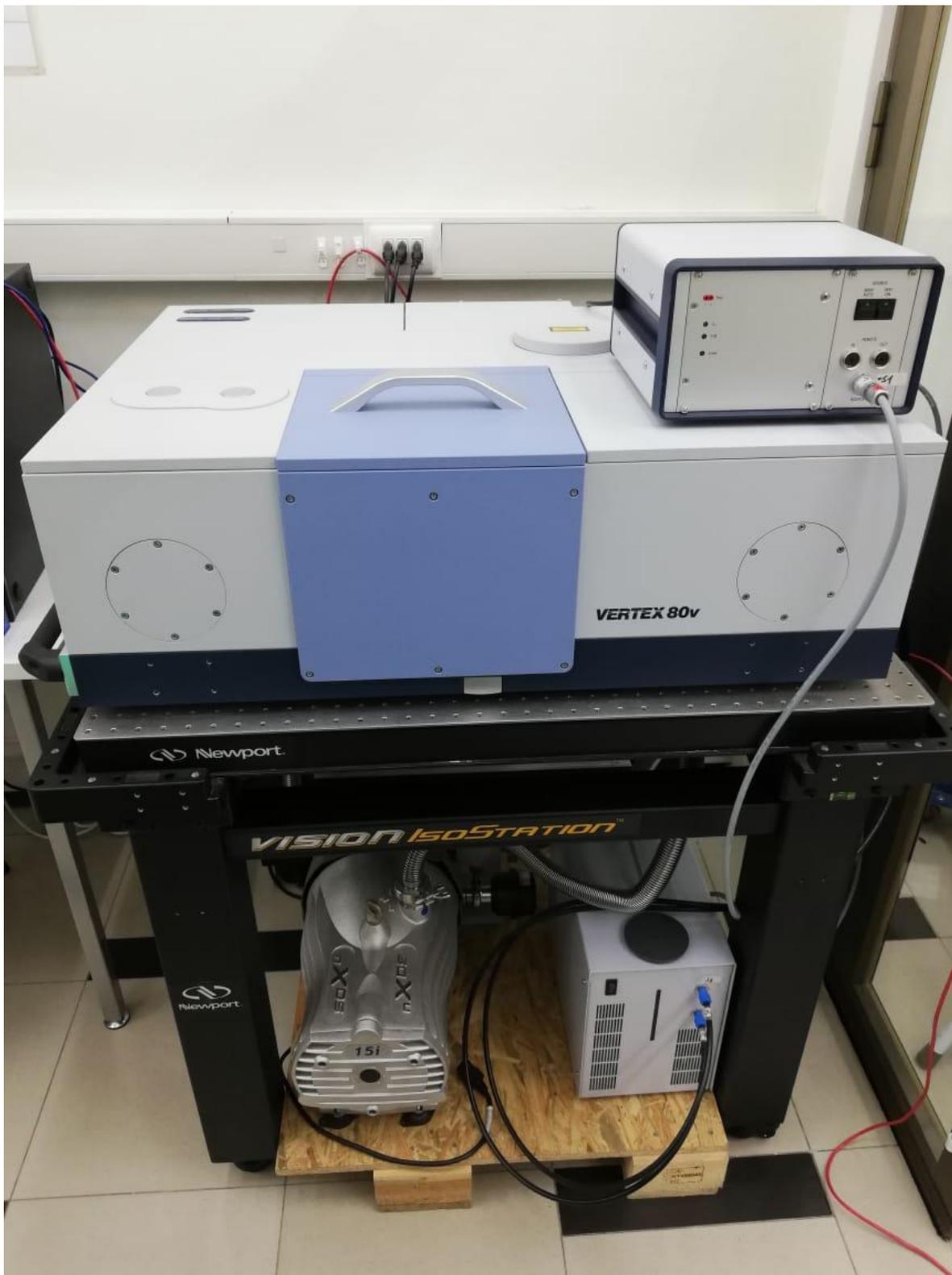
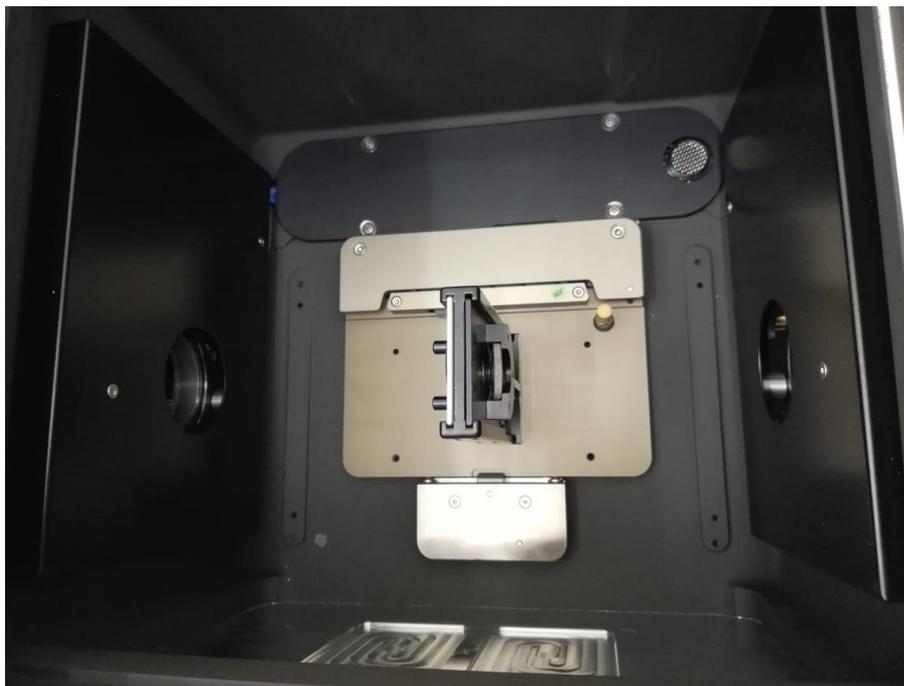


Figura 6. Soporte removible (Pike) en el cual se instala el anillo de sujeción que contiene la pastilla de KBr con la muestra. Posteriormente es el soporte el que se ingresa al compartimiento de muestras del espectrómetro FT-IR.



Figura 7. Compartimiento de muestra, hermético al vacío, donde se encuentra el montaje extraíble en el cual se instala el anillo de hacer con la pastilla de muestra.



4.1.2 Tamices

Para la medición de las muestras, estas se deben encontrar en formato polvo. En el caso de las muestras de meteorito, se muelen desde su formato inicial, durante diferentes periodos de tiempo hasta obtener distintos tamaños. Para esta molienda se utiliza un mortero de ágata.

Para las fases puras de minerales, al tener mayor cantidad de material y de mayor tamaño, las muestras son tamizadas, con lo que se obtienen mayor cantidad de rangos de tamaños. Se utiliza un tamizador digital BA200N Cisa de 11 cribas de acero inoxidable, con las que se obtienen tamaños de partícula en los rangos que se detallan en la tabla 8.

El equipo efectúa un tamizado electromagnético, y tiene un movimiento tridimensional, combinando un movimiento vertical de amplitud regulable con un movimiento de rotación de la muestra a tamizar por toda la superficie del tamiz. Con un sistema de cierre *Cisa-Press*, compuesto por 2 barras roscadas verticales de acero inoxidable, cabezal transversal de acero inoxidable con entradas para cada barra y 2 volantes de cierre rápido para la fijación de la columna de tamices al plato. El diámetro de los tamices acoplables es de 200 a 203mm.

Las muestras se tamizaron con 2 cribas superpuestas, a una amplitud de 0.5mm, con ciclos de 9s[on] - 1s [off] durante 10 minutos.

Figura 8. Imagen de tamizador analítico y cribas de acero inoxidable utilizadas en la separación de muestras. Solo las muestras de minerales puros fueron sometidas a este tipo de tamizaje, durante 10 minutos.



Figura 9. Detalle de los parámetros utilizados en el tamizador digital para el tamizaje de las muestras de minerales puros.



Tabla 8. Detalle de los tamaños de partículas que pasan por las distintas cribas utilizadas al momento de tamizar las muestras y la nomenclatura utilizada en este trabajo para los rangos obtenidos.

Nomenclatura	# Malla	Tamaño [um]
A-	400	<38
A	400 - 325	38 - 45
B	325 - 270	45 - 53
C	270 - 230	53 - 63
D	230 - 200	63 - 75
E	200 - 120	75 - 125
F	120 - 60	125 - 250
G	60 - 50	250 - 300
H	50 - 45	300 - 355
I	45 - 40	355 - 425
J	40 - 35	425 - 500

4.1.3 Fabricación de pastillas

Para la medición de las muestras, estas se deben encontrar en formato polvo, y ser mezcladas con Bromuro de Potasio (KBr) de grado infrarrojo (especial para mediciones del espectro infrarrojo), a una concentración conocida.

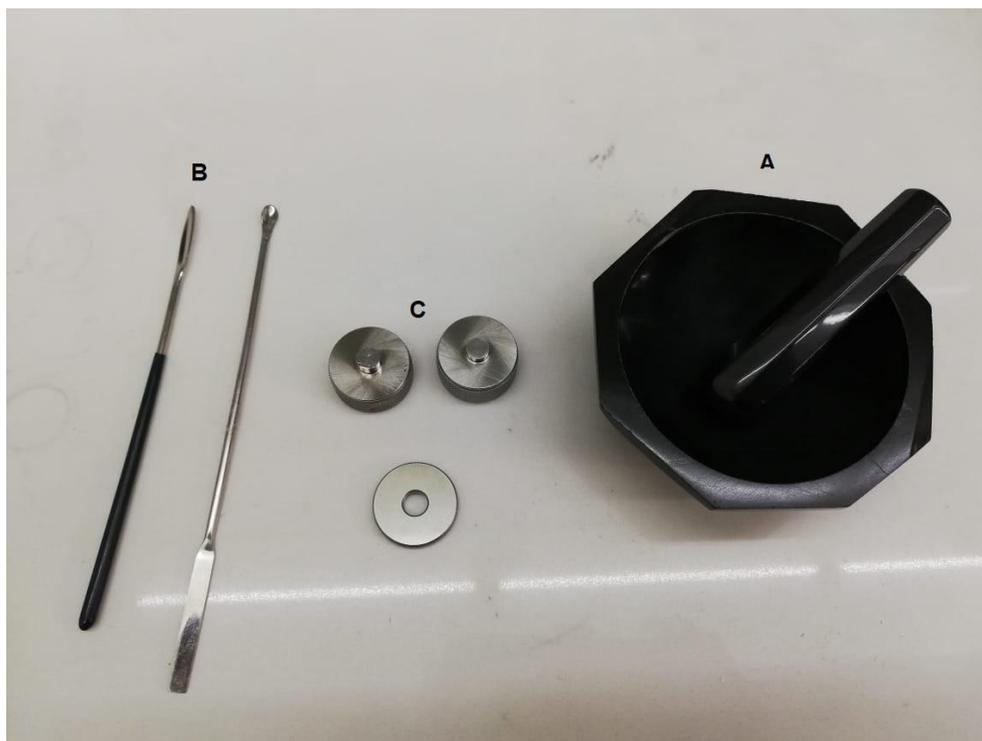
Esta mezcla se muele en un mortero de ágata a distintos periodos de tiempo, se mantienen en capsulas de vidrio y se dejan secar durante 12 horas en una estufa de laboratorio Memmert (horno de convección natural) a una temperatura de 110°C, para provocar la evaporación total del agua que exista en el KBr, y así obtener pastillas transparentes, disminuyendo el efecto de la humedad ambiental en las mediciones de los espectros.

Ya seca, la cantidad de mezcla que se mide es insertada en un portaobjetos con forma de dona (anillo) de 7mm de diámetro. Esta dona es sometida a una presión de 1.7 toneladas en una prensa hidráulica durante 2 minutos, obteniendo una pastilla transparente y sólida de la mezcla, la cual se pesa en una micro balanza, obteniendo la masa real de material a medir en la pastilla.

Figura 10. Estufa de laboratorio Memmert digital de 32 L, modelo UN30. Horno de convección natural, con textura cubierta de acero inoxidable con 2 puntos de bloqueo (cerradura de la puerta de compresión), y doble rejilla de acero inoxidable interna.



Figura 11. Materiales utilizados en la molienda y creación de pastillas de medición. A) Mortero de ágata, utilizado en la molienda de meteoritos y de la mezcla KBr-meteorito. B) Paletas de laboratorio de acero inoxidable, usadas en la manipulación de las muestras. C) Donas de acero inoxidable, para la creación de la pastilla.



El material en las pastillas y la cantidad de KBr de la mezcla son pesadas con una micro balanza analítica de Radwag modelo AS 220.2Y con precisión de 0.1mg en su medición y capacidad máxima de 220g.

La prensa hidráulica utilizada para la creación de las pastillas corresponde a la Mini-Pellet *Press* de Specac, prevista con un set de ensamblaje de pellets para pastillas de KBr de 7mm. Diseñada para producir un máximo de 2 toneladas de plomo que es suficiente para proporcionar una fuerza para la formación de pellets de excelente calidad.

El ensamblaje de pellets consta de un yunque superior, un yunque inferior y un soporte central para anillo. El yunque superior tiene una sección de émbolo central más larga que el yunque inferior. Cuando la muestra está suficientemente molida, se coloca en el orificio central del soporte del anillo, mientras descansa sobre el yunque inferior. El Bromuro de Potasio utilizado en la creación de las pastillas es Uvasol tipo espectroscopia IR.

Figura 12. Micro balanza analítica Radwag modelo AS 220.2Y con precisión de 0.1mg, utilizada en la medición de los distintos instrumentos utilizados (platinos, donas) como de las muestras (KBr puro, polvo de meteorito, mezcla, pastillas solidas).

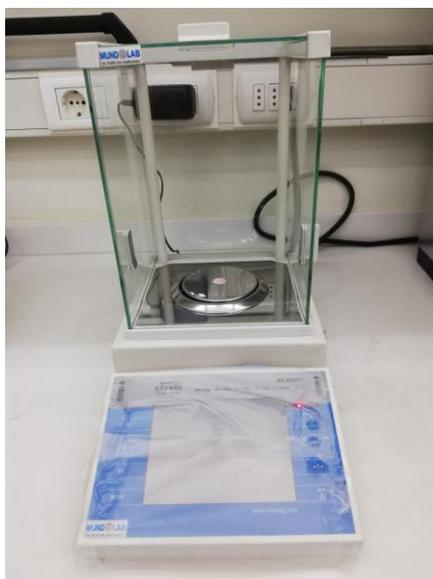


Figura 13. Prensa hidráulica para pellets Specac, diseñada para la preparación de pastillas de 7mm de KBr para análisis de FT-IR, con una capacidad máxima de aplicación de 2 toneladas. Las pastillas de este trabajo se someten a 1.7 toneladas durante 2 minutos en esta prensa.



Figura 14. Esquema con detalle de funcionamiento de Prensa hidráulica Specac. 1) Tornillo de avance: se gira a mano hasta que el ensamble de pellets de 7mm este asegurado. 2) Área de presión. 3) Perilla manual de presión para proporcionar una carga de tonelaje. 4) Tornillo central, se puede aplicar mayor apalancamiento al girarlo.

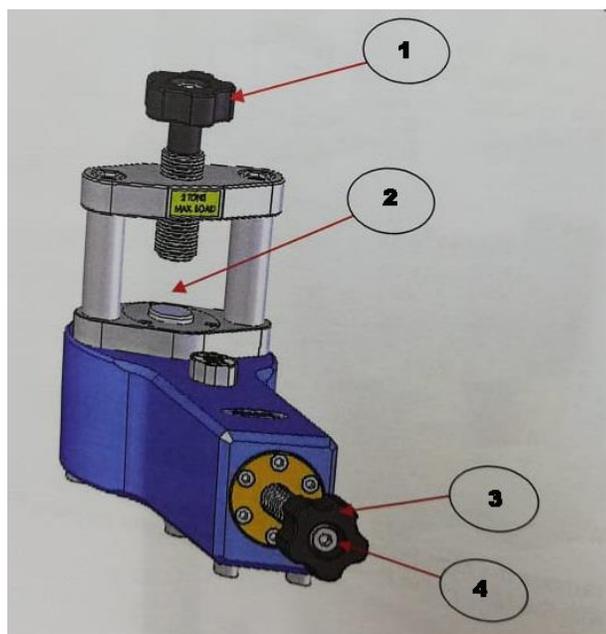


Figura 15. Matriz completa de pellets. Consta de: 1) Yunque superior 2) Soporte central para anillos de pellets. 3) Yunque inferior y 4) Una tapa de anillo extractor transparente Perspex. El yunque superior tiene una sección de émbolo central más larga que el yunque inferior.

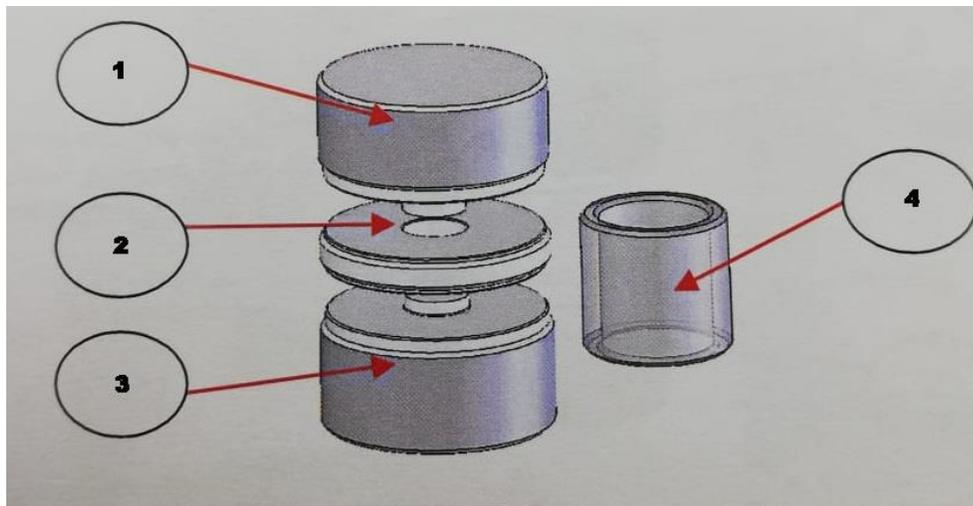


Figura 16. Para la preparación de las pastillas se utiliza Bromuro de Potasio Uvasol, especial para mediciones de espectroscopia infrarroja.

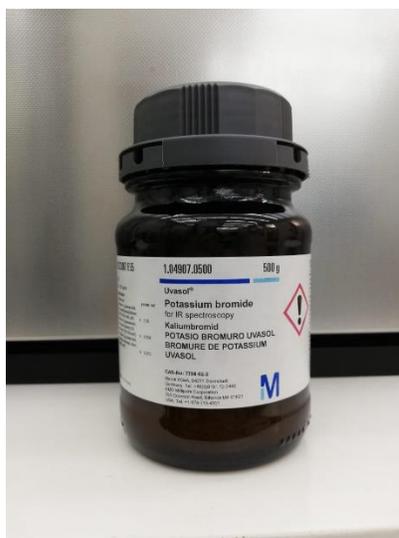


Figura 17. Limpiador ultrasónico de acero inoxidable Skymen. Genera ondas ultrasónicas que crean millones de burbujas de limpieza microscópicas para eliminar suciedad en minutos. Con ajuste de temporizador y de temperatura. Con canasta de limpieza de acero inoxidable para objetos pequeños.



4.2 Preparación de Muestras para espectroscopía FT-IR

Para estudiar la dependencia del espectro infrarrojo, los cambios en la forma e intensidad de los peaks, y el tamaño de grano del material, se preparan pastillas con muestras de distintos tamaños de partículas.

Las muestras de minerales puros (olivino, dióxido y enstatita) tienen originalmente un tamaño de grano heterogéneo entre 25 μ m y 675 μ m, por lo que se tamiza, obteniendo material con distintos rangos de tamaño, y siendo la más pequeña correspondiente a 38 μ m. Este polvo se mezcla con KBr de grado IR para la creación de la pastilla que se va a medir. Se procede a la preparación de pastillas con los tamaños extremos y tamaños intermedios y a su medición, obteniendo los espectros de las muestras.

Con los meteoritos se procede de manera diferente: las muestras iniciales varían de tamaño para cada tipo, por lo que la mezcla con KBr se hace con su tamaño inicial. Luego se procede a moler la mezcla en el mortero de ágata durante distintos periodos de tiempo (30 minutos, 60 minutos y 75 minutos), con el propósito de obtener muestras con distintos tamaños de granos.

Para investigar la relación entre el espectro obtenido y la concentración de material, y obtener una concentración óptima para la medición de los meteoritos, se midieron minerales puros con un mismo tamaño de partícula a distintas concentraciones (0.5% y 2%), y el meteorito Los Vientos 123, del cual se preparan muestras a concentraciones: 5%, 2%, 1%, 0.5% y 0.2%. Para el resto de las mediciones de meteoritos se mezclan con KBr a una concentración de 0.5% de material para los condritos ordinarios y de 0.7% para los condritos carbonáceos, con los que se obtienen espectros bien definidos.

4.3 Microscopía

Para un análisis de tamaño de partícula realista es necesario un estudio de microscopía de cada una de las muestras medidas en espectroscopía. Para esto se realizaron estudios de microscopía óptica en campo claro y campo oscuro, obtenidas con un microscopio Leica LM400. Las imágenes se procesan usando software *ImageJ*, obteniendo los tamaños de las partículas de cada microfotografía.

4.3.1 Preparación de muestras

Se estudiaron muestras de minerales puros no disueltos en KBr y de materiales para preparación de pastillas (mezcla de KBr con material de meteorito). En ambos casos, para una buena dispersión de las partículas y una óptima microfotografía, se debe disolver en líquido: para las muestras con KBr este debe ser disuelto en agua destilada; para las muestras puras de mineral o meteorito, este puede ser diluido en acetona P.A o agua destilada.

Se coloca una pequeña cantidad de la muestra en un vial de vidrio de 7 ml, con un nivel de líquido de 2 cm de altura. Para las muestras con KBr al 1% se utilizó una cucharada completa. Esta medida se aumenta/reduce proporcionalmente a la reducción/aumento de concentración, es decir, para una muestra al 0.5% de

concentración se colocó 2 cucharadas de la mezcla. Para muestras de minerales puros o solo meteorito se utiliza solo la punta de la cuchara de material.

Para una óptima dispersión de las partículas, se introduce la muestra 15 segundos en el baño ultrasónico. Luego se deja decantar para que el mineral baje al fondo del vial, y sea posible remover el exceso de líquido usando una pipeta desechable. Finalmente, se coloca una gota del líquido sobre un portaobjeto para la observación.

4.3.2 Microfotografía y escala

Para poder determinar la ubicación de los granos de mineral se tomaron imágenes con polarización y sin polarización, ambas en campo claro (TLBF) y con distintas magnificaciones de objetivo (10x, 20x, 50x y 100x), de distintas zonas de la muestra.

Las imágenes que se adquirieron directamente de la cámara conectada al microscopio se guardan con un tamaño de 5280x2968 pixeles, mientras que las que se guardan usando el software del computador guardan la imagen con un tamaño de 1920x1080 pixeles.

Se tienen imágenes de referencia de cámara de Neubauer obtenidas a cada magnificación disponible por el microscopio. Las imágenes que entrega la cámara son RGB de 5280x2968 pixeles fijos. En la cámara de Neubauer cada cuadrado grande corresponde a 200 μm , cada cuadrado pequeño es de 50 μm y la menor subdivisión corresponde a 5 μm . Por lo tanto, se puede determinar la escala real de la imagen, midiendo cuantos pixeles ocupa una longitud conocida.

Figura 18. Imagen de sección de cámara de Neubauer con el objetivo de aumento de 10x, y el detalle de escalas con relación a los pixeles de la imagen.

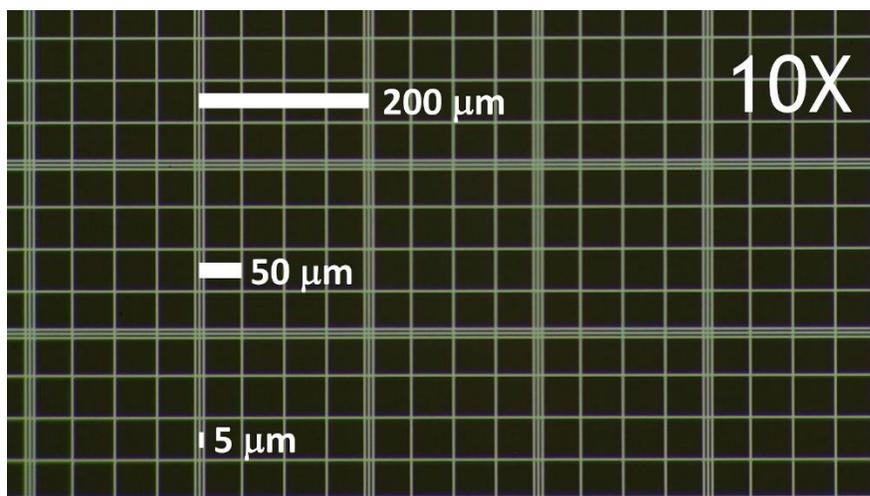


Tabla 9. Tabla que presenta la relación entre los valores de aumento que se utilizó para la toma de la fotografía, el tamaño en el que se guardó la imagen (píxeles) y el tamaño real (escala en μm).

Imagen de 5280x2968 píxeles	Imagen de 1920x1080 píxeles
10x - 1020 px - 200 μm	10x - 371 px - 200 μm
20x - 2044 px - 200 μm	20x - 747 px - 200 μm
50x - 1272 px - 50 μm	50x - 466 px - 50 μm
100x - 2562 px - 50 μm	100x - 935 px - 50 μm

4.4 Procesamiento de datos

Los datos obtenidos de la medición del espectrómetro corresponden a la transmitancia de las muestras. Luego, se procede al procesamiento de estos datos para el cálculo de la absorbancia, su normalización y la obtención de las bandas de los espectros.

Para esto se utilizan dos programas: Octave 5.1.0 para la obtención de la absorbancia a partir de la transmitancia, con la sustracción del espectro del KBr puro para minimizar su impacto en el espectro final y luego la normalización de estos datos; y OPUS, correspondiente al programa del mismo espectrómetro para la obtención de las bandas de absorción (*peaks*).

Con los datos finales se procede al manejo de estos para la obtención de los distintos gráficos presentados en este trabajo con el programa de OriginPro, versión 8.

5 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del estudio: espectros de absorbancia obtenidos para los minerales puros y de las 23 muestras de condritos ordinarios y carbonáceos, microscopía e histogramas y detalle del tamaño de partícula de las muestras.

En la primera sección se presentan los espectros de distintos minerales puros (olivino, diópsido y enstatita) con un mismo tamaño y variando la concentración y luego se muestran los espectros de los meteoritos, que corresponden a muestras con un mismo tamaño de grano y concentración de material en la pastilla para cada tipo de meteorito, que se presenta en la tabla 10. Para mejor observación de la variación de la forma e intensidad relativa de los peaks, las gráficas se presentan normalizadas y se aplica un corrimiento vertical entre los espectros, detallado en cada sección.

En todos los espectros se observa el peak correspondiente al OH, a 2.9 y 6.1 μm , con variaciones de intensidad para cada muestra [Gibb y Whittet 2002; Bowey y Hofmeister 2005]. Este está relacionado al grado de meteorización y/o alteración de la muestra.

De las mediciones de la cámara vacía y de las pastillas solo de KBr, se observa aumento de ruido en el espectro el cual comienza con un peak menor a 17 μm , y que probablemente corresponde a un cambio en el detector, que se vuelve realmente fuerte posterior a los 23 μm , razón por la que este estudio se centra en el espectro entre 2 y 23 μm .

Tabla 10. Muestras de meteoritos utilizados, detalle del tamaño de partícula, concentración y masa con que realizo la pastilla para la medición.

	Tamaño grano	% Concentración	Masa pastilla (mg)
Carbonáceos			
C008	Millarca (original)	0.7	31.6
V123	Millarca (original)	0.7	39.2
M216	Millarca (original)	0.7	28.3
Condritos tipo H			
ChileM1	1h	0.49	49.0
Cobija	1h	0.49	48.0
E. Imilac	1h	0.5	34.2
LaYesera01	1h	0.5	35.8
Rencoret	1h	0.48	25.9
SanJuan02	1h	0.54	40.7
Condritos tipo LL			
ChileM4	1h	0.5	39.8
LaYesera02	1h	0.49	39.1
Condritos tipo L			
ChileM7	1h	0.5	33.2
ChileM8	1h	0.5	32.2
ChileM9	1h	0.49	37.9
LaYesera03	1h	0.5	29.8
LaYesera04	1h	0.49	29.1
Lutschaunig	1h	0.5	34.4
PampaA	1h	0.5	32.1
PampaB	1h	0.5	27.3
PampaC	1h	0.5	33.9
PampaD	1h	0.5	37.5
PampaG	1h	0.49	34.5
SanJuan01	1h	0.54	41.6

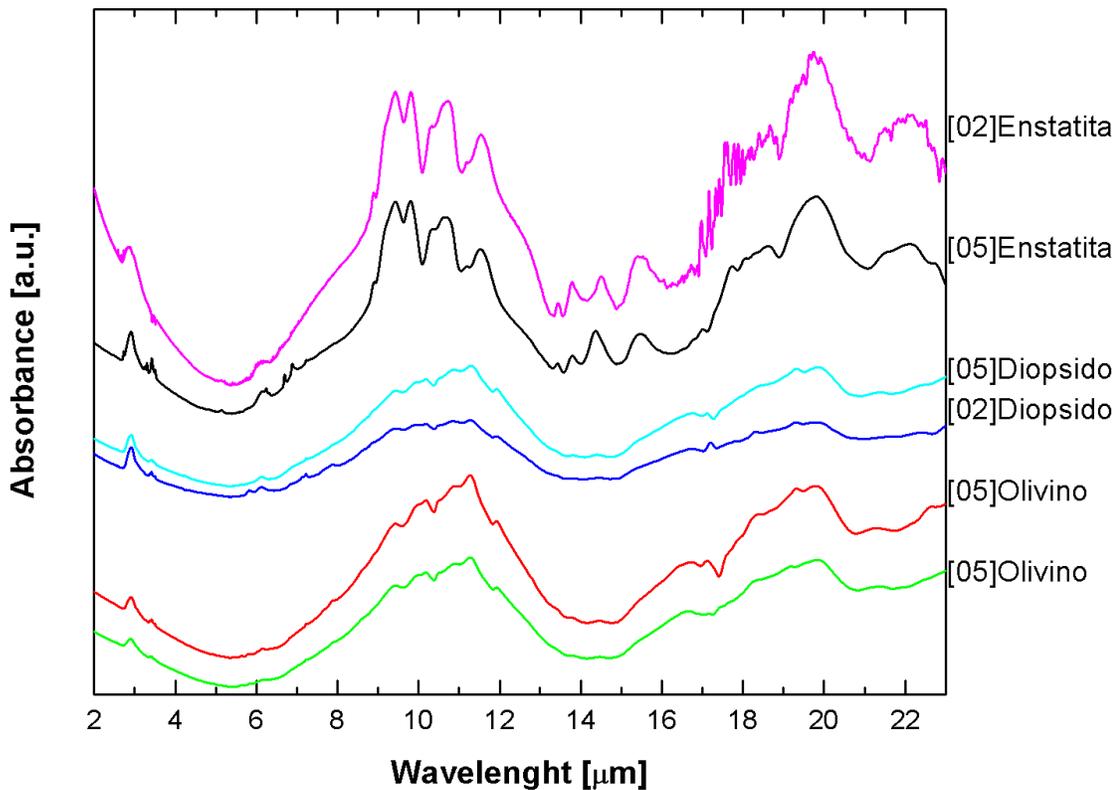
5.1 Absorbancia de minerales

A continuación, en la figura 19, se presentan las absorbancias para muestras de minerales puros olivino, diópsido y enstatita, con un tamaño de partícula inicial igual (menor a 38um) y a dos distintas concentraciones (0.5% y 2%)

Se aprecia que los espectros más definidos y nítidos se dan a una concentración de 0.5%, mientras que las muestras a un 2% presentan espectros más ruidosos o con menor definición (espectros planos), es por esto por lo que las siguientes mediciones de los meteoritos se realizaron con esta cantidad de material en la pastilla.

La disminución en la intensidad relativa de las bandas de absorción al aumentar la cantidad de material en la pastilla se debe a una saturación de la pastilla con material, por lo que granos de material pueden superponerse y dejan de ser visibles en la medición del espectro.

Figura 19. Gráfica de los espectros infrarrojos correspondientes a minerales puros: olivino, enstatita y diópsido, con un mismo tamaño de partícula (menor a 38 μm), variando la concentración de material en la pastilla. Para los datos [02] la concentración es de 2% y para [05] es de 0.5%. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical para una mejor apreciación de la forma de los espectros.



También se pueden observar la forma general del espectro de absorción en los minerales, como en el Olivino, donde la variación entre el extremo rico en Mg (Forsterita) y el extremo rico en Fe (Ferrosilita) cambia su forma en las características alrededor de los 10 μm y sufre un corrimiento en los peaks a los 20 μm [Burns y Huggins, 1972; Hofmeister, 1997; Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman, Dijkstra, Hofmeister y Speck, 2010]. La muestra medida en este trabajo de olivino corresponde a una composición intermedia.

De la misma manera existe una relación entre los corrimientos de peaks y la variación en el contenido de Fe-Mg de la enstatita, así como también una variación en su estructura interna: clinoenstatita y ortoestatita.

5.2 Absorbancia de Condritos Carbonáceos

Los espectros de los tres condritos carbonáceos son muy similares entre sí, en donde la mayor diferencia presente son variaciones en intensidad relativa de ciertas bandas de absorción. Los espectros se presentan en la figura 20 y el detalle de los peaks de absorción en la tabla 11.

En los espectros de los tres meteoritos presentados, se observan variados peaks alrededor de la zona de los 10 μm , característica correspondiente al grupo de los silicatos. Los peaks a 10.2, 11.3, 11.9, 16.3 y 19.7 μm son indicativos de la presencia de olivino, y por la forma puntiaguda a 10.2 y 19.7 μm este olivino es de composición más forsterítica, es decir, más rico en magnesio ($Fo > 60$) [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010].

Las pequeñas bandas, casi imperceptibles en la figura, entre 13 μm y 15 μm junto a 9.5, 14.7 y 19.7 μm indican presencia de piroxeno intermedio En_{50} [Koike, Tsuchiyama, Shibai, Suto, Tanabé, Chihara y Okada, 2000; Chihara *et al.*, 2002; Bowey, Morlok, Köhler y Grady, 2007], pero la forma puntiaguda del espectro en 10 μm indica predominancia del olivino en la muestra.

En la muestra de Los Vientos 123, se aprecian mayor cantidad de peaks en el sector de los 10 μm , lo que probablemente se debe a una mayor presencia de otro tipo de silicatos además de olivino y enstatita, como plagioclasa [8.7, 10, 10.9 y 15.4] [Chihara y Koike, 2017] y diópsido [9.2, 10.41, 10.86, 15.8 y 18.5] [Chukanov, 2014; Etzel y Benisek, 2008]. En el Médano 216 y Catalina 008 igualmente se observa el peak a 8.7 μm que puede corresponder a presencia de feldespatos albíta - anortita junto al peak en 20.8 μm [Chihara y Koike, 2017].

Igualmente, en las tres muestras de meteorito se aprecia un peak en 7.2 μm , en particular en Catalina 008, donde la intensidad relativa es mayor y con una forma bien definida (puntiaguda). Esa banda se presenta producto de material carbonoso en la muestra (C). [Keane, Tielens, Boogert, Schutte y Whittet, 2001; Gibb y Witthet 2002; Raunier, Chiavassa, Duvernay, Borget, Aycard, Dartois y d'Hendecourt, 2004].

Figura 20. Gráfica de espectro infrarrojo correspondientes a las tres muestras de condritos carbonáceos tipo orgueil. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical de 0.2, para una mejor apreciación de la forma de los espectros. En la gráfica, las líneas verticales corresponden a bandas de absorción características para ciertos minerales, en donde se tiene: celeste, para las bandas de agua (OH); verde, para las bandas de olivino; naranja, para las bandas de piroxeno y rosado para la banda de materia carbonosa. En cuanto a los espectros, el de color negro corresponde a la muestra de Los Vientos 123 (V123), el de color rojo a El Médano 216 (M216) y el azul a Catalina 008 (C008).

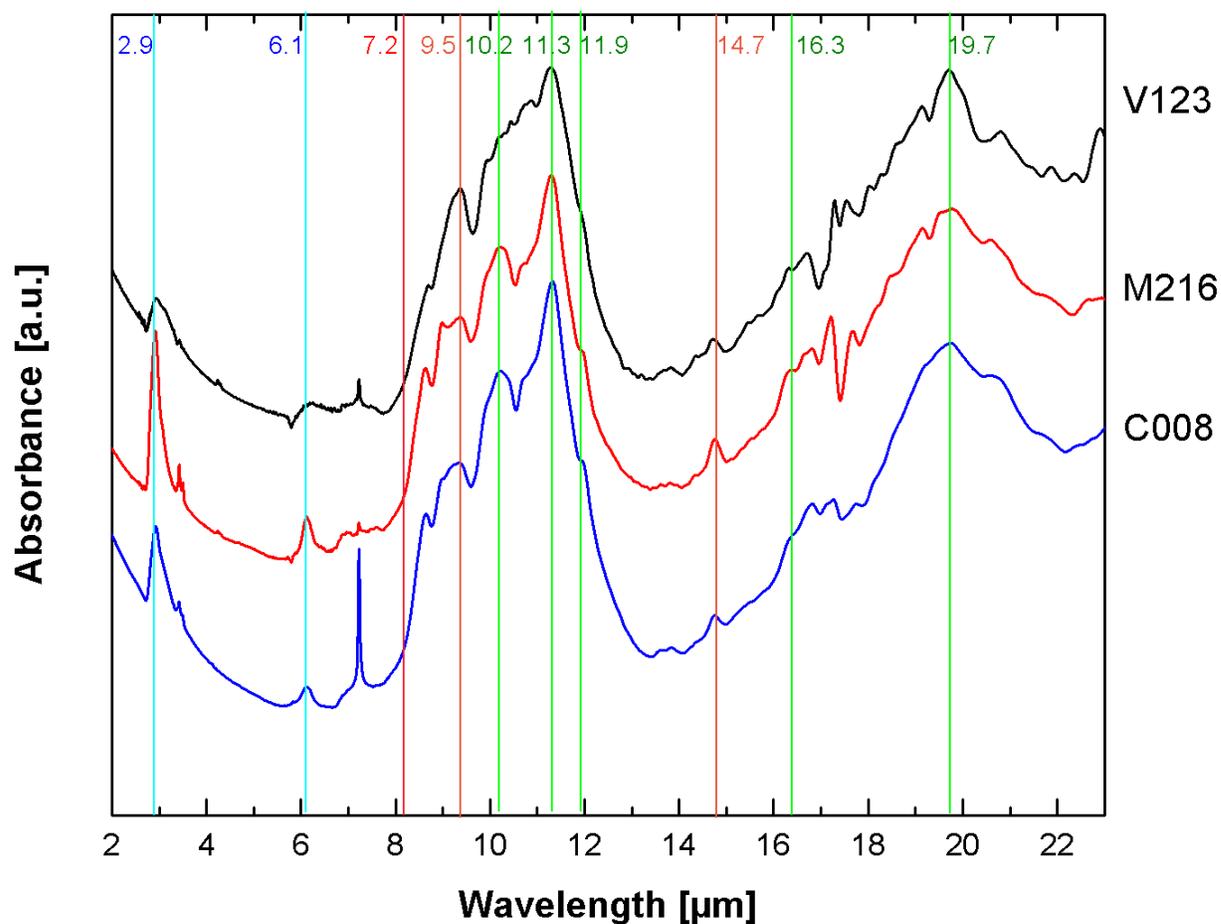


Tabla 11. Detalle de las bandas de absorción [*peaks*] presentes en los espectros de los tres condritos carbonáceos analizados. El tamaño de partículas de estas muestras corresponde al de la muestra inicial. Las bandas más fuertes se presentan en negrita, mientras que los peaks más débiles o presentes como hombros, se presentan subrayados.

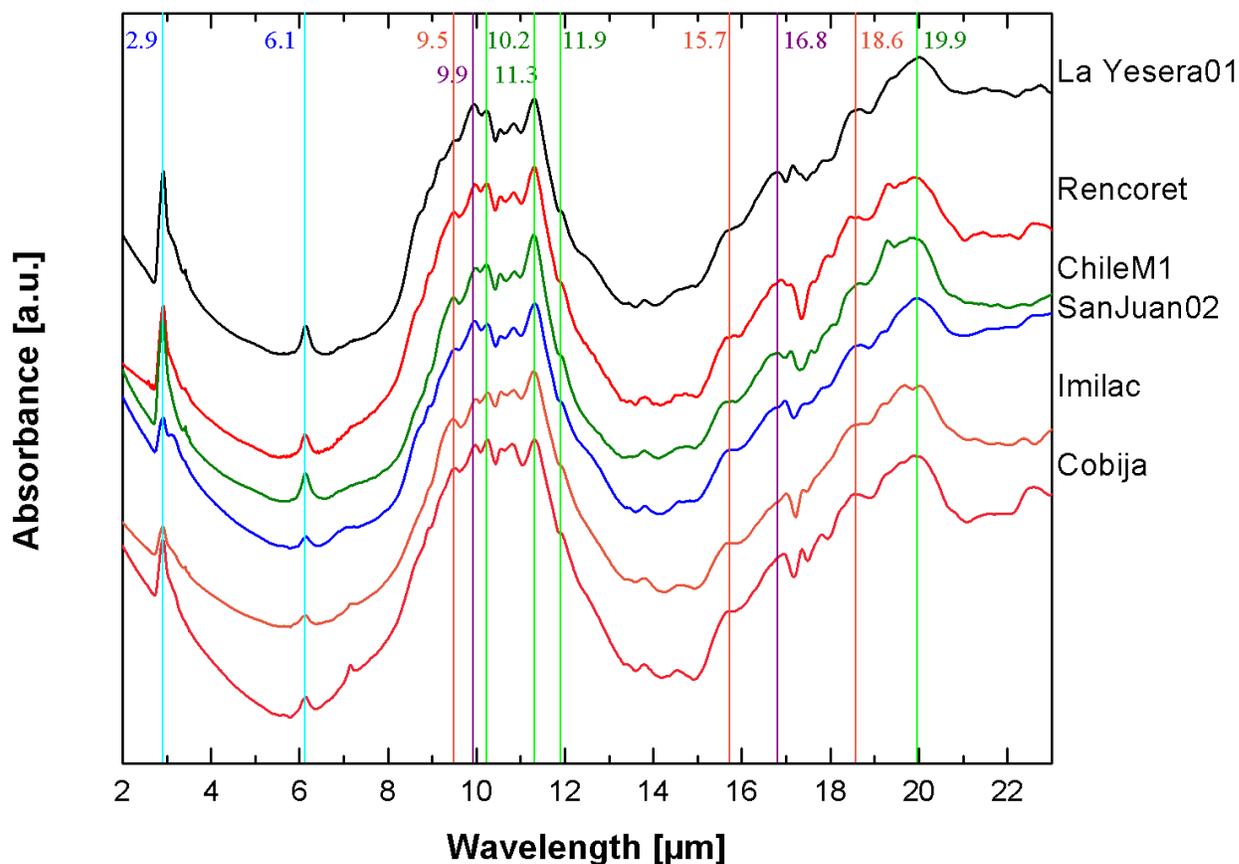
C008	M216	V123
2,92	2,92	2,95
		3,07
3,42	3,42	3,42

3,50	3,50	3,51
	4,23	4,24
	4,28	4,29
6,12	6,11	6,19
6,72	6,97	
7,22	7,22	7,22
7,48	7,61	7,57
8,64	8,63	8,69
	8,99	
9,35	9,37	9,38
		9,95
10,24	10,23	
		10,45
		10,89
11,32	11,30	11,30
		12,93
		13,21
		13,40
13,65	13,62	
13,81	13,80	13,84
	14,39	14,37
14,76	14,76	14,71
		15,49
	16,40	16,32
16,82	16,82	16,72
17,27	17,21	17,29
17,77	17,68	17,55
		18,04
		18,27
		18,62
	19,16	19,15
19,77	19,80	19,71
20,60	20,61	20,82
	21,62	21,89
		22,38

5.3 Absorbancia de Conditos Ordinarios tipo H

Al igual que con los condritos carbonáceos, los espectros de los seis condritos ordinarios pertenecientes al grupo H, son muy similares entre sí, en donde la diferencia observada corresponde principalmente a variaciones en intensidad relativa de ciertas bandas de absorción.

Figura 21. Gráfica de los espectros infrarrojos correspondientes a los condritos ordinarios pertenecientes al grupo H. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical de 0.2, para una mejor apreciación de la forma de los espectros. En la gráfica, las líneas verticales corresponden a bandas de absorción características para ciertos minerales, en donde se tiene: celeste, para las bandas de agua (OH); verde, para las bandas de olivino; naranja, para las bandas de piroxeno y morado para las bandas de feldespato.



Los espectros, mostrados en la figura 21, presentan una forma más compleja, de variados peaks, en la zona de los 10 μm con respecto a los condritos carbonáceos, lo que indica una mezcla de silicatos, dominada principalmente por las bandas de absorbancia puntiagudas y bien definidas a 10.2 y 11.3 μm , que corresponden a la presencia de olivino [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010]. Las bandas de absorción en 11.9 y 19.9 μm también corresponden a olivino y las leves diferencias en intensidad relativa entre 10.2 y 11.3 μm y pequeños corrimientos de los peaks de olivino en general, son producto de variaciones en la composición de este mineral dentro de las muestras, que se mueve dentro de la solución sólida forsterita-

fayalita, mostrando una predominancia de olivino forsterítico ($Fo > 50$) [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010].

Los pequeños peaks entre 13 μm y 15 μm se acentúan un poco más respecto a los condritos carbonáceos, y junto con los peaks a 9.5, 10.3, 10.7, 15.7, 18.6 y 19.8 μm se asocian a piroxeno enstatita. Las pequeñas variaciones en la posición de estas bandas son producto de la variación en la cristalografía del mineral: ortoenstatita (ortorrómbico) y clinoenstatita (monoclínico), y variaciones dentro de la composición de la solución sólida enstatita - ferrosilita [Koike *et al.*, 2000; Chihara *et al.*, 2002; Bowey *et al.*, 2007].

El peak 8.7 μm , aunque no sobresale en los espectros, indica presencia de feldespato plagioclasa, junto a los peaks a 9.9, 10.9, 16.0, 17.2 y 18.5 μm , y las variaciones en la posición de estos corresponde a diferencias en la composición dentro de la solución sólida de la plagioclasa albita – anortita [Chihara y Koike, 2017].

Algunas bandas de absorción pueden estar asociadas a más de un mineral, como el presente a 9.8 μm , que aparentemente indica presencia de albita y enstatita, lo que concuerda con otros peaks del espectro. De la misma manera, el peak a 15.6 μm indica presencia de enstatita, pero también puede ser producto de la presencia de OH-, lo que también concuerda con otros peaks en el espectro. Así mismo, las bandas presentes en 15.6 y 18.5 μm corresponden tanto a piroxeno enstatita como feldespato anortita. El detalle de los peaks presentes en los espectros de los condritos tipo H se presenta en la tabla 12.

Tabla 12. Detalle de las bandas de absorción [peaks] presentes en los espectros de los 6 condritos ordinarios del grupo H analizados. El tamaño de partículas de estas muestras corresponde a la mezcla molida durante 60 minutos. Las bandas más fuertes se presentan en negrita, mientras que los peaks más débiles o presentes como hombros, se presentan subrayados.

ChileM1	Cobija	E. Imilac	LaYesera01	Rencoret	SanJuan02
2,91	2,91	2,91	2,92	2,91	2,92
					3,09

			3,38	3,37	
3,42		3,41		3,41	3,41
3,50			3,50		
	5,66				5,71
6,13	6,15	6,15	6,14	6,12	6,16
	7,16	7,16		7,48	7,07
9,49	9,50	9,48	9,51	9,50	9,54
9,98	9,98	10,00	9,96	9,96	9,97
10,23	10,25	10,26	10,23	10,24	10,25
10,53	10,57	10,56	10,54	10,55	10,55
10,87	10,81	10,84	10,85	10,85	10,85
11,30	11,32	11,30	11,31	11,32	11,32
			11,90		
	13,40	13,40	13,44	13,47	13,40
13,79	13,81	13,82	13,80	13,82	13,80
	14,56	14,57		14,57	14,57
14,75			14,88	14,73	
15,64				15,67	
	15,75	15,72			15,74
15,81				15,84	
16,80	16,94	17,01	16,80	16,90	16,98
17,11	17,35	17,41	17,16	17,10	
17,58	17,80		17,84	17,94	
18,09	18,56			18,47	
18,67		18,79	18,66	18,66	18,71
19,29		19,22		19,32	
19,87		19,69			
	19,88	20,02	20,03	19,92	19,94
	21,58	21,28	21,49	21,46	
		21,80		22,07	
	22,61	22,37	22,48	22,58	22,66
			22,75		

5.4 Absorbancia de Condritos ordinarios tipo L-LL

Similar a los condritos ordinarios del grupo H, los espectros de los 14 condritos ordinarios pertenecientes al grupo L-LL, son muy similares entre sí, en donde la diferencia observada en los espectros corresponde a variaciones en intensidad relativa de ciertas bandas de absorción, exceptuando un par de muestras que presentan

variaciones considerables en bandas de absorción que no aparecen en los otros meteoritos.

Dentro de las diez muestras correspondientes a este tipo de condritos ordinarios, dos son del grupo LL, y ocho del grupo L. La variación en la diferencia entre estos meteoritos es mínima por lo que se agruparon para su presentación en la gráfica.

Los espectros generales de los meteoritos tipo L/LL mantienen rasgos similares a los condritos del grupo H, con leves variaciones que corresponden a las diferencias composicionales entre los minerales que se encuentran en estos meteoritos.

Se observa en los espectros presentados en la figura 22 que se mantiene una forma compleja de varios peaks alrededor de la zona de los 10 μm , correspondiente a la mezcla de silicatos, dominada principalmente por la banda de absorción bien definida y puntiaguda a 11.3 μm , correspondientes al olivino, junto con los peaks a 10.2, 11.9 y 20.1 μm [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010].

Se observa una mayor diferencia, con respecto a los condritos del grupo H, en la intensidad relativa entre 10.2 y 11.2 μm y los corrimientos de las bandas de absorción del olivino, lo que indicaría mayor variación composicional de este mineral en estas muestras, aunque siguen siendo más ricas en olivino forsterita que en olivino fayalita.

A 20 μm , la banda de absorción se desplaza entre 19.9 y 20.1 μm , también producto de la variación en el contenido de forsterita en el olivino. En las curvas que se encuentra en la parte inferior de la figura 22, desde Pampa A hasta Lutschaunig, el peak se vuelve más angosto y puntiagudo, similar a los condritos ordinarios del grupo H, mientras que, en las curvas superiores, desde Pampa G hasta Chile M8, este peak es más ancho y menos definido, lo que también se condice con la cantidad de olivino forsterítico [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010].

Igualmente se aprecian las pequeñas bandas de absorción entre 13 μm y 15 μm asociadas a piroxeno enstatita, junto con los peaks a 9.5, 10.3, 10.7, 15.7 y 18.6 μm , con variaciones debido a la cristalografía de este mineral: ortoenstatita (ortorrómbico) y clinoenstatita (monoclínico) y la composición de la solución sólida enstatita - ferrosilita [Koike *et al.*, 2000, Chihara *et al.*, 2002; Bowey *et al.*, 2007].

Se observa que los espectros ubicados en la parte superior de la figura 22, particularmente las muestras de Pampa G y La Yesera 03, presentan peaks menos definidos en 9 μm y con una signatura mas plana alrededor de los 10 μm . Esto corresponde a material no cristalino, es decir silicatos amorfos o vidrio de composición

de sílice, olivino y piroxeno. Los peaks en 10.42 μm y 19.23 μm son característicos de enstatita amorfa (vidrio) [Koike *et al.*, 2000], que se ven acentuados en estos espectros.

De la misma manera, el peak a 8.7 μm , que se observa mejor en algunos espectros, indica presencia de feldespato plagioclasa, junto a las bandas a 9.9, 10.9, 16.0, 17.2 y 18.5, y las variaciones en la posición de estos peaks corresponden a diferencias en los minerales de las muestras que varían su composición dentro de la solución sólida albita – anortita [Chihara y Koike, 2017].

Al igual que en los condritos ordinarios del grupo H, varias bandas de absorción pueden ser asociados a más de un mineral, que se repiten en los condritos ordinarios del grupo L. El detalle de los peaks de absorción de cada muestra se presenta en la tabla 13.

Figura 22. Gráfica de los espectros infrarrojos correspondientes a los condritos ordinarios pertenecientes al grupo L y LL. Los datos presentados se encuentran normalizados al máximo en el rango de 8 – 12 μm y con un corrimiento en el eje vertical de 0.2, para una mejor apreciación de la forma de los espectros. En la gráfica, las líneas verticales corresponden a bandas de absorción características para ciertos minerales, en donde se tiene: celeste, para las bandas de agua (OH); verde, para las bandas de olivino; naranja, para las bandas de piroxeno y morado para las bandas de feldespato.

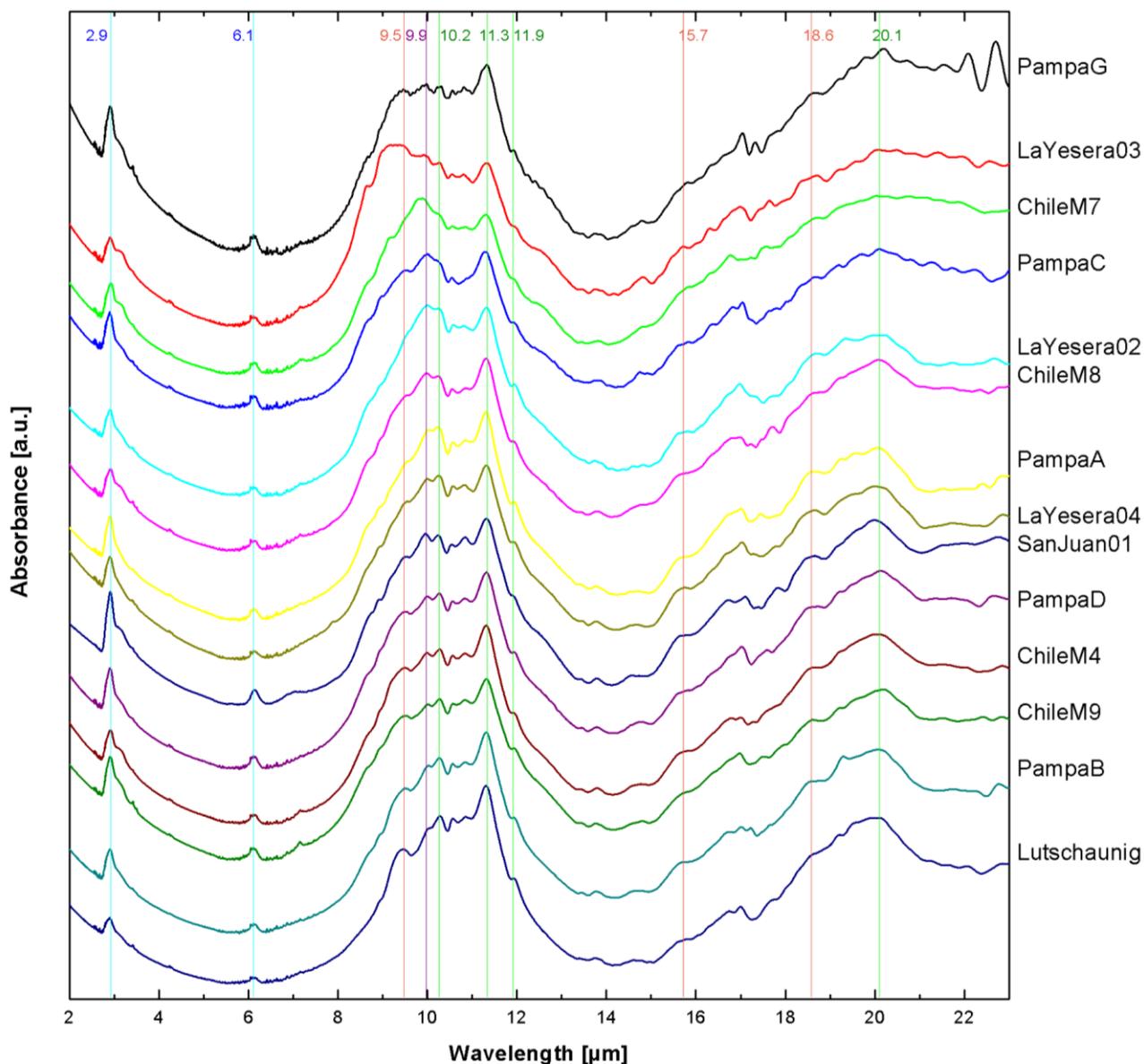


Tabla 13. Detalle de las bandas de absorción [peaks] presentes en los espectros de los 10 condritos ordinarios del grupo L-LL analizados. El tamaño de partículas de estas muestras corresponde a la mezcla molida durante 60 minutos. Las bandas más fuertes se presentan en negrita, mientras que los peaks más débiles o presentes como hombros, se presentan subrayados.

ChileM4	LaYesera02	ChileM7	ChileM8	ChileM9	LaYesera03	LaYesera04	Lutschaunig	PampaA	PampaB	PampaC	PampaD	PampaG	SanJuan01
2,52	2,55	2,58	2,55	2,53	2,60	2,58	2,52	2,58	2,55	2,56	2,58	2,53	
2,67	2,67	2,71	2,67	2,67	2,68	2,65	2,68	2,69	2,67	2,68	2,67	2,68	
2,90	2,90	2,92	2,90	2,92	2,90	2,90	2,90	2,86	2,91	2,92	2,91	2,92	2,91
		3,15	3,08		3,08			2,91		3,36		3,19	
	3,42	3,41	3,42	3,42	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,42	3,41
			3,50	3,50			3,50	3,49				3,50	
		4,23	4,23	4,23	4,23	4,23					4,23	4,24	
4,27	4,28	4,27					4,27	4,28		4,27	4,27		
			5,99	6,07	6,07	6,07	6,07						
6,11	6,11	6,16	6,16		6,16	6,11		6,16	6,11	6,11	6,11	6,11	6,12
7,21	7,16	7,22	7,21	7,16	7,21	7,62	7,48	7,35	7,20	7,47	7,47	7,47	7,05
					8,65							8,67	8,94
					9,19					9,00			
					9,46		9,48		9,50	9,49		9,47	
9,50				9,53		9,56				9,57	9,54		9,54
9,99	10,01	9,90	9,98	10,01	9,91	10,00		10,04	10,03	10,01	10,01	9,98	9,96
10,28	10,25		10,25	10,28	10,27	10,26	10,28	10,26	10,28		10,27	10,31	10,25
10,56	10,59	10,56	10,56	10,58	10,55	10,58	10,57	10,57	10,57	10,55	10,56	10,56	10,55
10,85	10,82	10,86	10,86	10,85	10,82	10,84	10,85	10,85	10,86		10,85	10,82	10,85
11,32	11,33	11,32	11,32	11,32	11,34	11,32	11,31	11,32	11,32	11,29	11,32	11,33	11,32
11,92	11,95		11,93	11,93		11,94	11,94	11,94	11,93		11,94	11,93	
13,44		13,46		13,43	13,46	13,44			13,46		13,45		13,43
13,79	13,75	13,83	13,80	13,76	13,76	13,78	13,73	13,78	13,78	13,78	13,79	13,77	13,80
					14,17								
	14,61						14,60	14,57					14,57
14,78	14,83		14,82	14,82	14,82	14,71	14,77	14,73	14,67	14,76	14,79	14,81	

ChileM4	LaYesera02	ChileM7	ChileM8	ChileM9	LaYesera03	LaYesera04	Lutschaunig	PampaA	PampaB	PampaC	PampaD	PampaG	SanJuan01
15,90	15,83	15,87			15,73	15,77	15,82			15,82	15,83	15,84	15,84
					16,32					16,38			
16,79	16,98	16,79	16,87	16,98	16,99		16,76		16,76	16,84			16,74
17,01		17,06	17,00			17,03	17,00	17,01	17,02	17,05	17,04	17,05	17,10
17,30		17,24	17,23						17,22				
		17,59	17,50	17,52	17,65			17,46			17,60	17,67	17,40
		17,84	17,72			17,79				17,83			17,84
18,73	18,72	18,73	18,73	18,62	18,72	18,68		18,64	18,69	18,70	18,73	18,74	18,66
	19,37			19,23	19,24		19,22	19,29	19,30	19,21	19,23	19,23	
				19,26	19,27							19,48	
								19,60		19,72		19,83	
20,07	20,16	20,05	20,09	20,23	20,10	20,04	20,08	20,07	20,10	20,12	20,16	20,21	20,00
					20,50								
		20,77			20,79					20,81		20,73	
		21,15								21,27		21,16	
21,48		21,49		21,53	21,42		21,59	21,52			21,41	21,54	21,57
21,95	21,71	21,89	21,65	22,44	21,97	21,75	22,06	22,44	21,75	21,76	21,72	22,09	22,05
			22,35						22,23	22,25			
22,86	22,66				22,56	22,87	22,85	22,87	22,78		22,68	22,71	22,77

5.5 Microfotografías

Se escogieron muestras representativas de los grupos de estudio (condritos tipo H, L y LL) y de minerales puros (Olivino) para la microscopía, de la cual se obtuvieron las microfotografías presentadas a continuación, junto con el detalle de imágenes procesadas para el estudio de tamaño de partícula real de las muestras.

Para una óptima estadística en relación con el tamaño de las partículas, se tomaron fotografías con la mayor cantidad de granos posibles, en campo claro (TLBF) y campo oscuro (ILDF), ambos con polarización.

Figura 23. Microfotografía de muestra de Olivino de tamaño B (45-53 μm), con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro polarizado (TLBF-P); arriba a la derecha en campo oscuro polarizado (ILDF-P); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución.

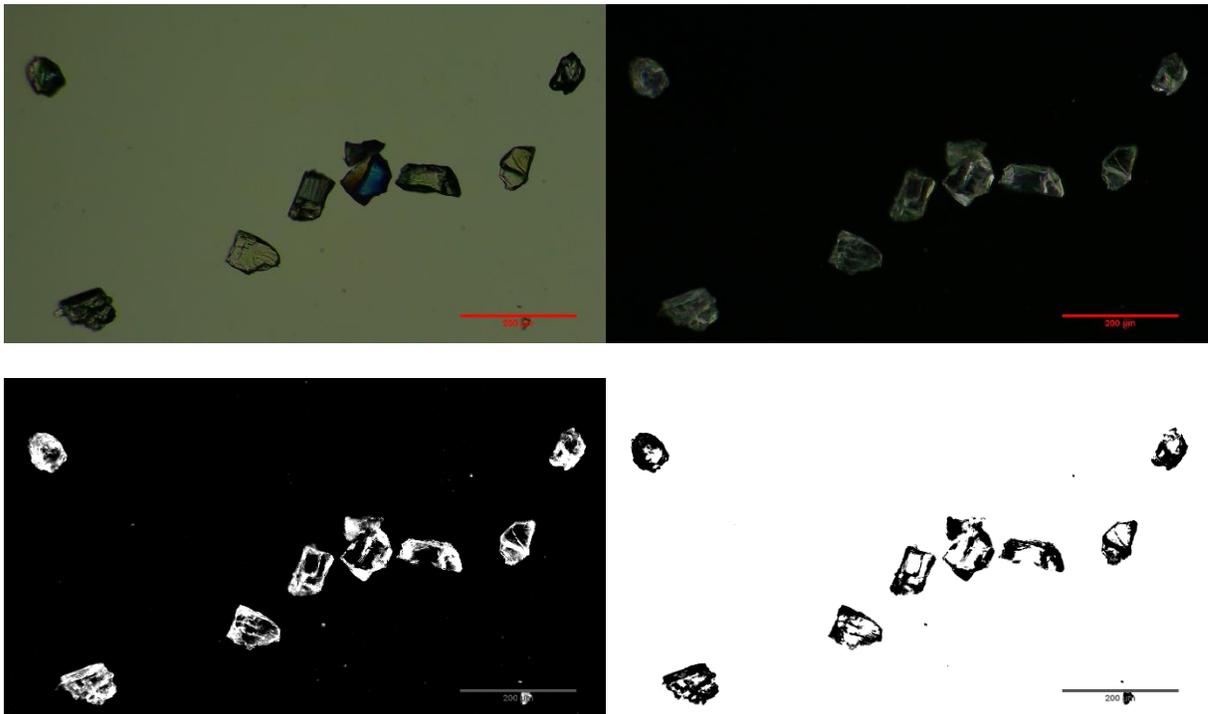


Figura 24. Microfotografías correspondientes a muestra de Los vientos 123, con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 3 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra tamizada con un tamaño de partícula D [63-75 μm]; segunda fila con el tamaño original de la muestra; tercera fila una muestra molida por 75 minutos.

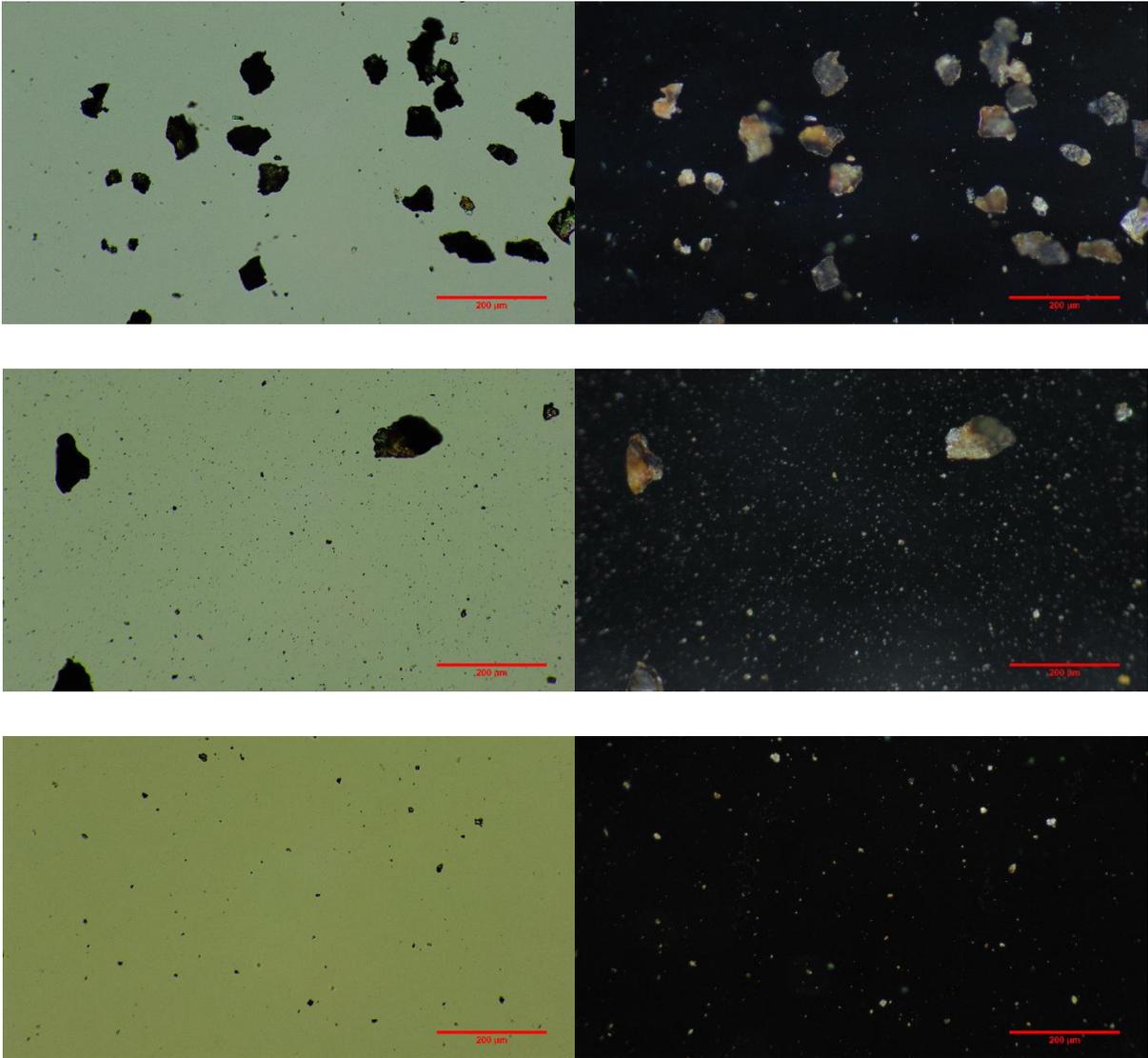


Figura 25. Microfotografías correspondientes a muestra Catalina 008, de tamaño original de la muestra con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro (TLBF); arriba a la derecha en campo oscuro (ILDF); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución.

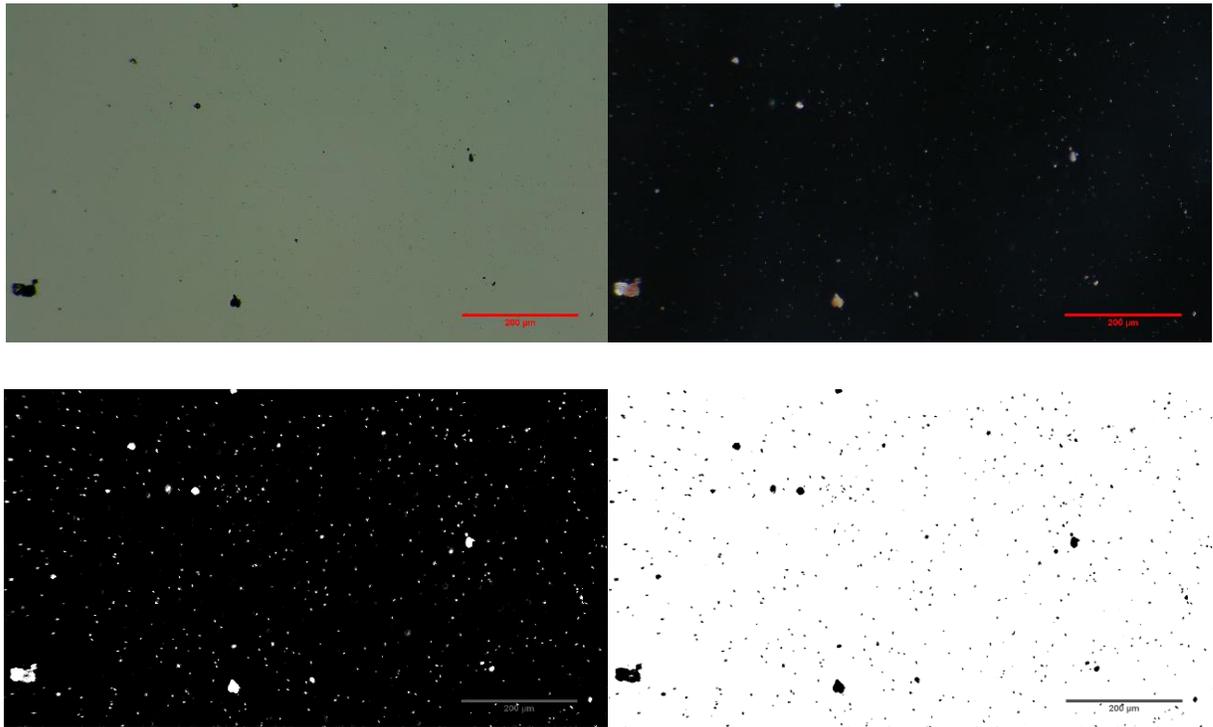


Figura 26. Microfotografías correspondientes a muestra La Yesera 01 (meteorito tipo H), con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 2 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra molida durante 30 minutos; segunda fila una muestra molida durante 60 minutos.

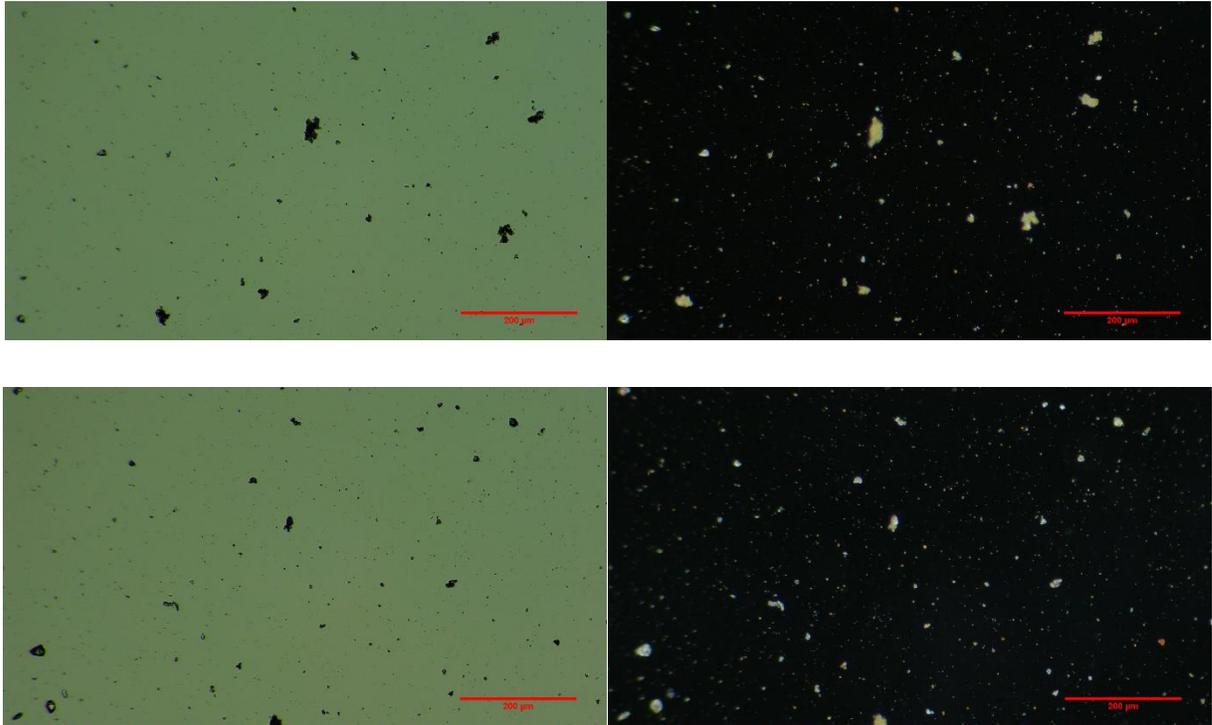


Figura 27. Microfotografías correspondientes a muestra Rencoret (meteorito tipo H), con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 2 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra molida durante 30 minutos; segunda fila una muestra molida durante 60 minutos

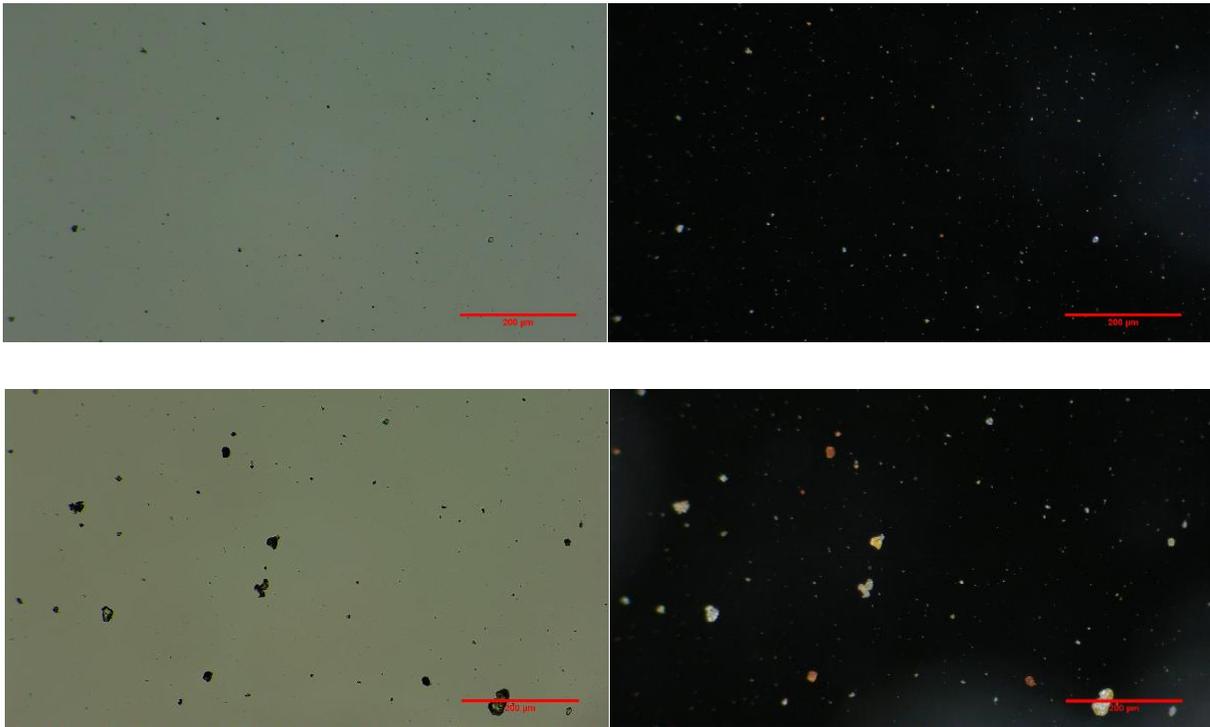


Figura 28. Microfotografías correspondientes a muestra de Chile M4 (meteorito tipo L), con un aumento de 10x. A la izquierda en campo claro (TLBF) y a la derecha en campo oscuro (ILDF). Se presentan muestras con 2 tamaños distintos de partícula: primera fila una muestra de tamaño original; segunda fila una muestra molida durante 75 minutos.

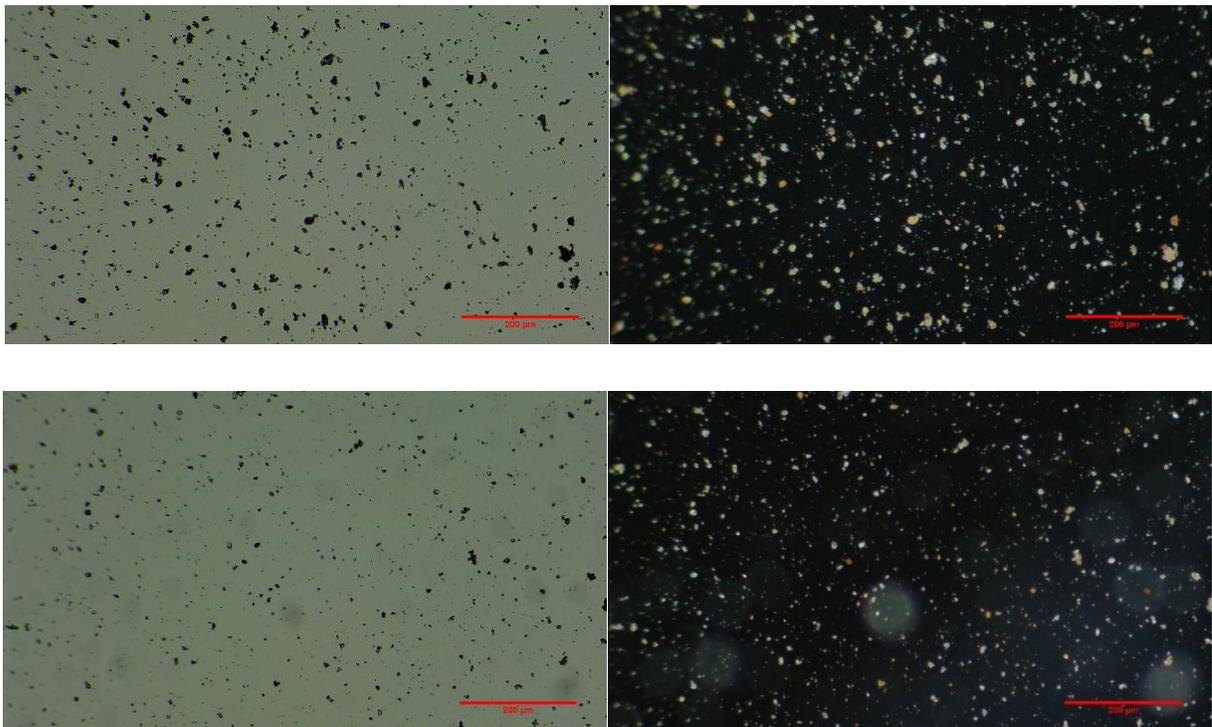


Figura 29. Microfotografías correspondientes a muestra Chile M7 (meteorito tipoL), molida durante 75 minutos, con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro (TLBF); arriba a la derecha en campo oscuro (ILDF); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución.

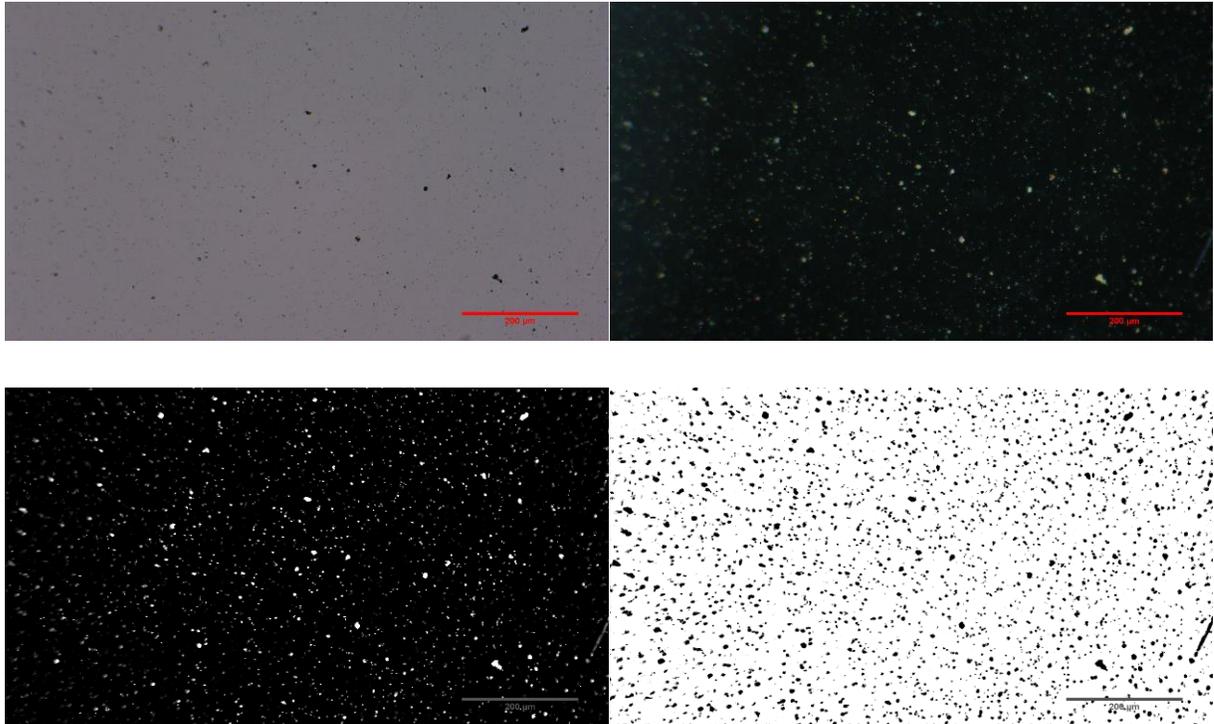
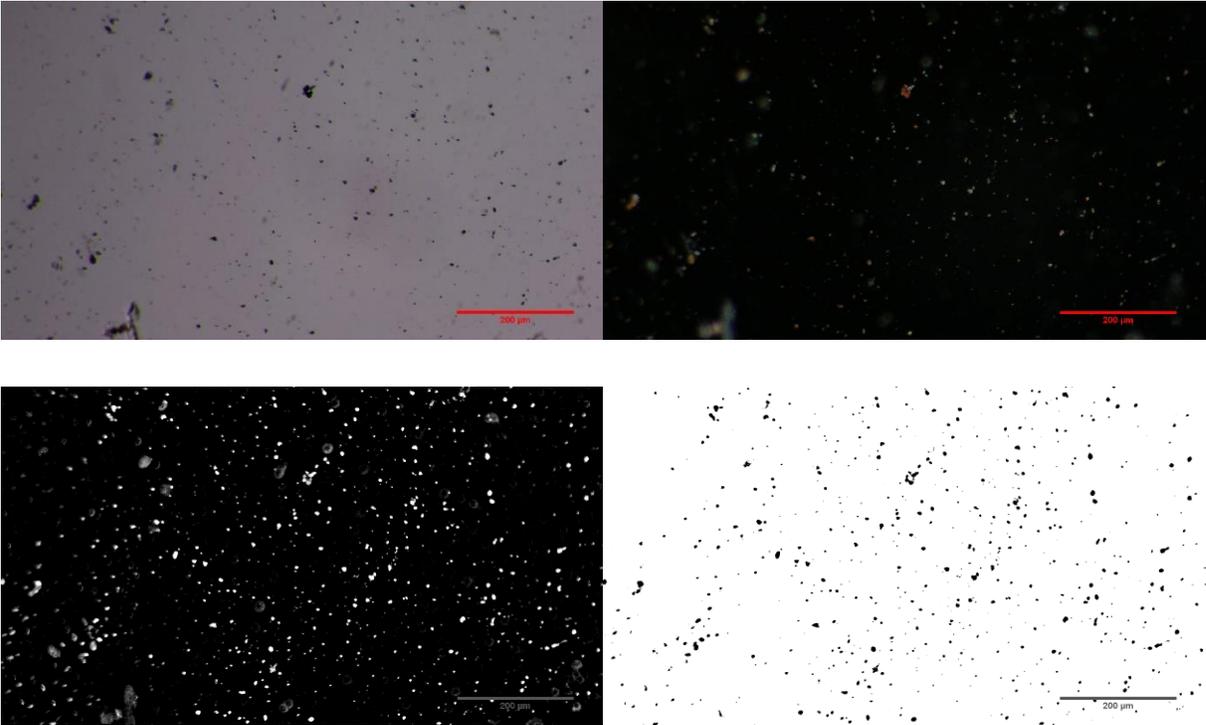


Figura 30. Microfotografías correspondientes a muestra La Yesera 03 (meteorito de tipo L), molida durante 75 minutos, con un aumento de 10x. Las fotos corresponden: arriba a la izquierda en campo claro (TLBF); arriba a la derecha en campo oscuro (ILDF); abajo (derecha e izquierda) fotos procesadas para lograr medir el tamaño de las partículas y su distribución.



6 Discusión

A continuación, se presenta el análisis de los espectros y las bandas de absorción características observadas para los condritos carbonáceos y condritos ordinarios de tipo H, L/LL, similitudes y diferencias que se pueden apreciar en cada uno de ellos.

También el análisis de la relación entre los espectros y el tamaño de partícula de las muestras medidas, tanto para minerales puros como para los meteoritos estudiados.

6.1 Absorbancia Condritos carbonáceos

En primer lugar, se presentan las bandas de absorción en 3.0 y 3.4 μm , que están asociadas con los modos de vibración de los enlaces de OH y CH respectivamente, y que son indicativos de moléculas de agua [Gibb y Whittet, 2002].

Otra de las características distintivas de los espectros de los condritos carbonáceos, son los peaks correspondientes al carbono presente en las muestras, que no se encuentran en los otros meteoritos condriticos. En particular el peak en 7.25 μm se presenta de forma muy definida, puntiaguda y especialmente intenso en la muestra Catalina 008.

Según Keane, el peak en 5.83 μm es característico del modo de vibración del enlace C=O del grupo carbonilo (Ketones, aldehídos, ácido carboxílico y ésteres), peak que se aprecia levemente en Los Vientos 123, pero no en las otras muestras. Sin embargo, a veces, muestras que no presentan el peak en 5.8 μm si presentan un peak fuerte cerca 7.24 μm [Keane *et al.*, 2001], que si se observa en los espectros de los 3 condritos carbonáceos estudiados. Este peak fuerte y puntiagudo en 7.25 μm también puede ser atribuido a la molécula HCOOH, el cual presenta una banda característica en 7.25 μm , producto del CH en HCOOH [Schutte, Boogert, Tielens, Whittet, Gerakines, Chiar y Graauw, 1999]. Otro compuesto que también presenta un peak en 5.81 μm es H₂CO, y que muestra otra banda en 6.68 μm , peak leve que se encuentra en El Médano 216. Agregando otra explicación plausible para el peak en 5.83 μm es según Raunier (2004), quien indica que normalmente en las observaciones astronómicas junto con esta banda se aprecia otra en 4.62 μm asignada a OCN-, por lo que propone que ambas deben ser por presencia de HNCO. Sin embargo, el 4.62 μm no es un peak

presente en los espectros, por lo que en este caso no correspondería a un compuesto presente en estas muestras.

Los siguientes peaks presentes, tanto alrededor de los 10 μm como de los 20 μm , se asignan a una mezcla de distintos silicatos, donde el mineral mayoritario es olivino forsterita-fayalita [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010], con presencia de piroxeno de composición intermedia En_{50} [Koike *et al.*, 2000; Chihara *et al.*, 2002; Chihara *et al.*, 2002] y en menor proporción feldespato plagioclasa albita-anortita [Chihara y Koike, 2017]. La predominancia del olivino implica que se encuentra en mayor cantidad relativa con respecto a los otros minerales.

Una diferencia entre estos espectros son los peaks presentes en el rango 8 a 9 μm . Este peak se puede deber a la influencia de distintos feldespatos plagioclasa: en los Vientos 123 se observa un solo peak a 8.7 μm , que puede indicar mayor influencia de plagioclasa Anortita, mientras que en el médano 216 y Catalina 008 se observan dos peaks, a 8.7 y 8.9 μm , que corresponderían de plagioclasa más Albitica [Salisbury, D'Aria y Jarosewich, 1991; Chihara y Koike, 2017].

En el rango de 10 a 11 μm de la muestra del meteorito Los Vientos 123, se aprecian variados peaks, que no se observan con tal intensidad en los otros dos condritos carbonáceos, lo que indicaría una mezcla con mayor influencia (proporción relativa) de otros silicatos como piroxeno.

6.2 Absorbancia Condritos ordinarios

Los condritos ordinarios presentan características similares a nivel de grupo, particularmente mineralógicas, por lo que su diferenciación es a un nivel más específico. En condritos equilibrados, es decir, de tipo petrológico 4-6, el ser H, L, LL también se refleja en el olivino: en porcentaje molar de Fayalita (%mol Fa); y el grafico de Co en kamacita vs Fayalita en olivinos [Rubin, 1990]. Para condritos no equilibrados, (tipo petrológico menos 3.5) no es un indicador fiable. El tipo petrológico también sirve para diferenciar entre meteoritos del mismo tipo, lo que habla de la diferencia en el estado de oxidación al momento de su formación, es decir diferentes momentos o diferentes lugares de la nebulosa solar [Rubin, 1990]. Es importante notar que la oxidación del Fe puede ocurrir en ambientes asteroidales, pero no dentro del cuerpo parental de condritos ordinarios tipo L 5/6 [Weisberg *et al.*, 2006]. Abundancias de elementos siderófilos también son usados para la diferenciación entre los condritos ordinarios: mientras los tipos H son los condritos con mayor contenido de estos elementos, los LL son los condritos ordinarios con menores cantidades de estos

elementos [Kallemeyn, Rubin, Wang y Wasson, 1989; Sears, Hasan, Batchelor y Lu, 1991].

Es por esto por lo que los espectros observados, tanto de condritos tipo H como de L y LL presentan forma general muy similar: peaks y bandas que corresponden a los mismos minerales mayoritarios (olivino, piroxeno y plagioclasa) con leves variaciones que se pueden acreditar a distintos factores.

El leve corrimiento que presenten estas bandas se correlaciona con la composición exacta del tipo de silicato presente, y directamente con la cantidad de Fe en estos minerales. Mayoritariamente se presentan olivino [Koike *et al.*, 2003; Hofmeister y Pitman, 2007; Pitman *et al.*, 2010] y piroxeno [Koike *et al.*, 2000; Chihara *et al.*, 2002; Chihara *et al.*, 2002] de composición intermedia, lo que no excluye que puedan estar presente minerales con composición de los extremos de ambas soluciones sólidas en menor cantidad y que se vean enmascaradas por la composición intermedia predominante en la muestra.

Los espectros ubicados en la parte superior de la figura 22, muestran existen un par de espectros que presentan un espectro diferente al de los demás, en particular las muestras de Pampa G y La Yesera 03. Los peaks en estas muestras son característicos de minerales silicatados amorfos (vidrio), los cuales suelen tener un espectro simple en el rango infrarrojo. Estos minerales vidriosos se presentan por someterse a diferentes presiones de choque, en particular para las muestras Pampa G y La Yesera 03, se asocian a muestras sometidas a presiones entre 30-36 GPa [Morlok, Koike, Tomioka, Mann y Tomeoka, 2010].

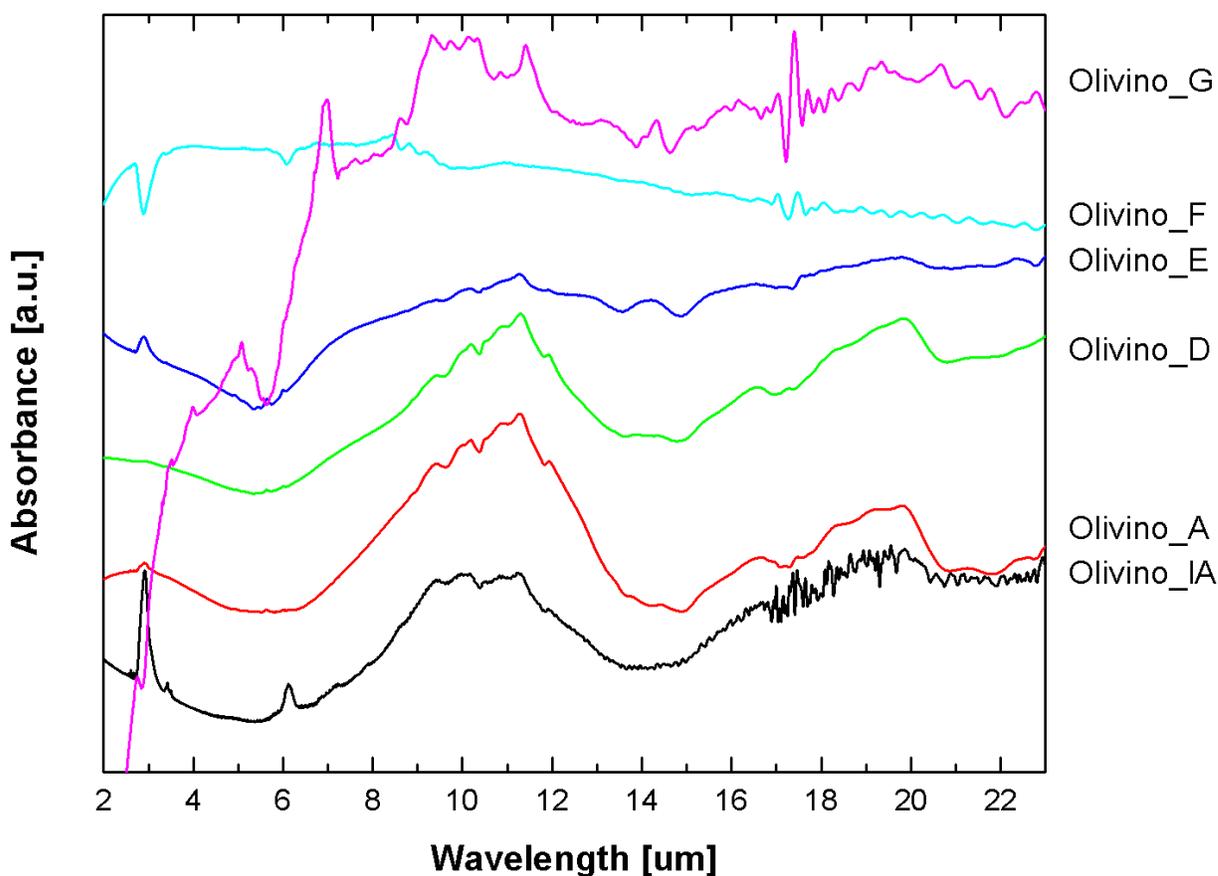
Por otra parte, por su escasa abundancia en la muestra, ciertas fases de minerales minoritarios, como magnetita, sulfuros y otros óxidos presentes no se observan en los espectros de absorbancia. En el caso de los sulfuros, también puede deberse al rango en el que se realizó la medición en este estudio, puesto que algunos casos, como FeS, presentan fuertes bandas de absorción después de los 23 μm [Hony, Bouwman, Kelle y Waters, 2002].

6.3 Absorbancia y tamaño de partículas

El efecto de la variación del tamaño de partícula de la muestra en el espectro de absorción se observa tanto en los minerales puros como en los meteoritos.

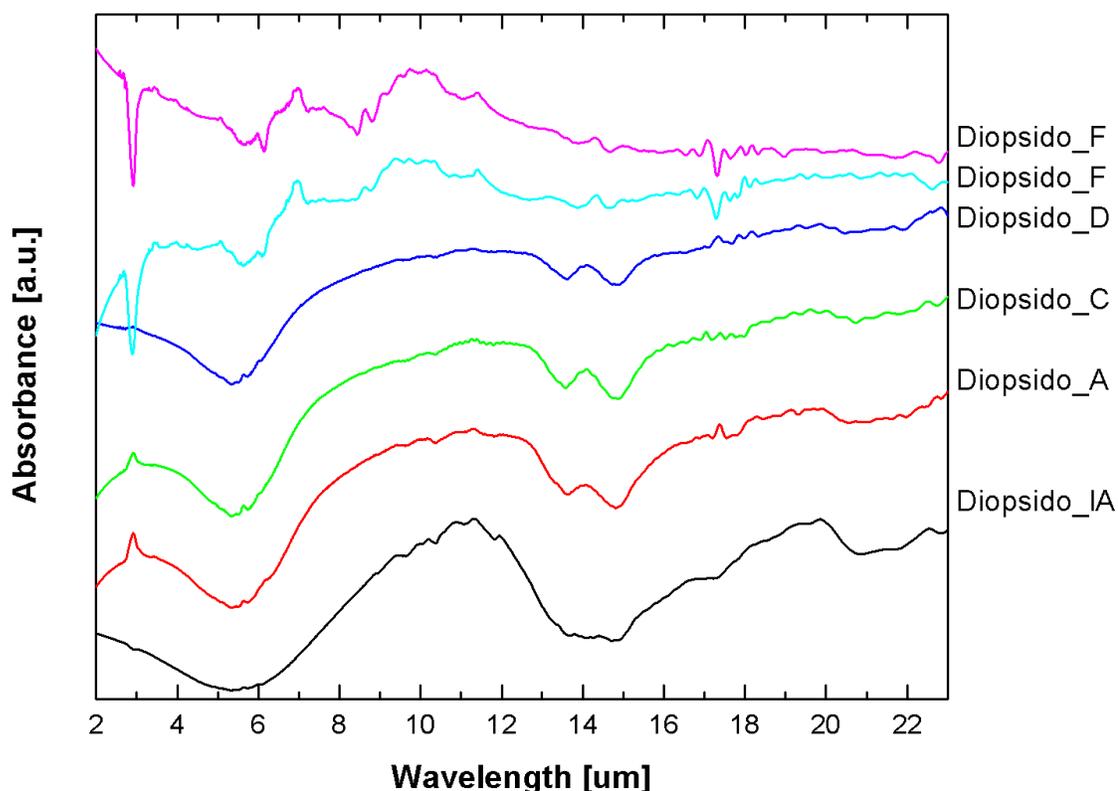
En la figura 31, se presentan los espectros de olivino de los distintos tamaños, especificados en la gráfica y presentados en la tabla 14. Se puede observar que, para tamaños muy grandes, la señal se pierde y no se observa el espectro real del olivino. Desde un rango menor a 75 μm (espectro azul), recién se empiezan a apreciar las bandas de absorción características del mineral. El ruido que se observa en el sector de los 20 μm en el espectro de menor tamaño (negro) se asocia con la baja concentración de material en la pastilla de esta medición, y no con el tamaño de la muestra. Para obtener espectros nítidos y con poco ruido a estos tamaños es mejor utilizar una concentración de 0.5% o mayor (variable hasta 1%).

Figura 31. Gráfica de espectro infrarrojo correspondientes a mediciones de olivino, con distintos tamaños obtenidos del tamizaje de las muestras. Los rangos de los tamaños corresponden a: G) 300 – 250 μm , F) 250 – 125 μm , E) 125 – 75 μm , D) 75 – 63 μm , A) 45 – 38 μm , IA) menor a 38 μm .



De la misma manera se puede apreciar el efecto del tamaño en la figura 32, donde se observan los espectros de absorbancia del diópsido, a distintos tamaños, especificados en la figura y tabulados en la tabla 14. Se puede apreciar los espectros mas ruidosos y con menor definición en los peaks de absorción en los tamaños mayores [125-250 μm], y con un espectro con mayor definición en los peaks en los tamaños mas pequeños de partículas [$<3 \mu\text{m}$].

Figura 32. Gráfica de espectro infrarrojo correspondientes a mediciones de diópsido, con distintos tamaños obtenidos del tamizaje de las muestras. Los rangos de los tamaños corresponden a: F) 250 – 125 μm , D) 75 – 63 μm , C) 63 – 53 μm , A) 45 – 38 μm , IA) menor a 38 μm .



En ambos casos se puede apreciar claramente que, en el rango de mediciones del infrarrojo medio, mientras aumenta el tamaño de las partículas medidas, las bandas características van desapareciendo, obteniendo un espectro más plano y con menor definición, hasta que, en tamaños grandes, solo se aprecia el espectro del KBr.

Tabla 14. Detalle de la nomenclatura utilizada para los distintos tamaños de partícula obtenidos luego del tamizaje.

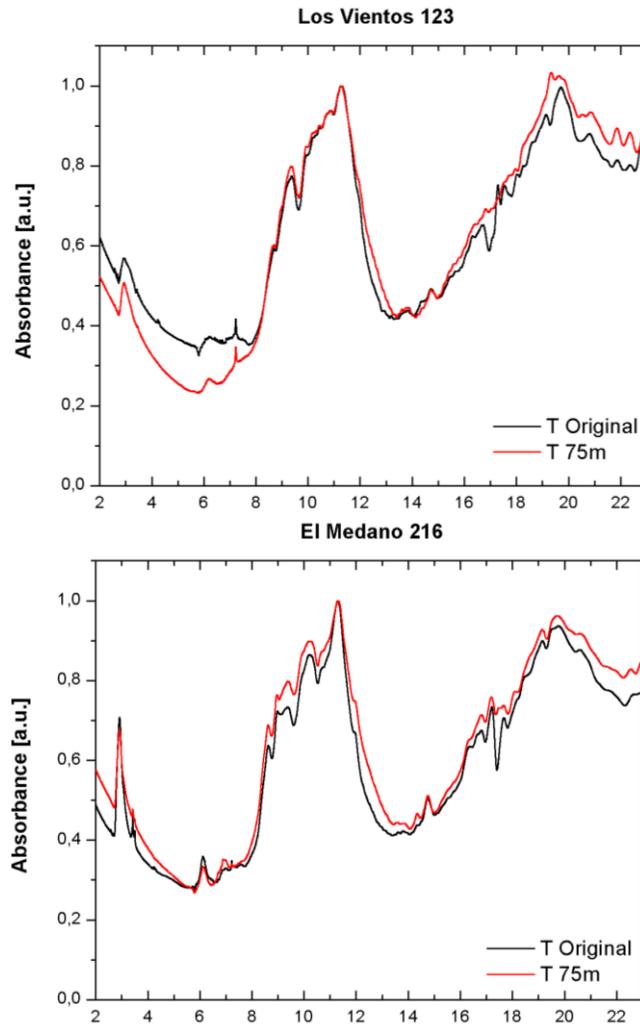
Nomenclatura	Tamaño [um]
A-	<38
A	38 - 45
B	45 - 53
C	53 - 63
D	63 - 75
E	75 - 125
F	125 - 250
G	250 - 300
H	300 - 355
I	355 - 425
J	425 - 500

En los espectros de meteoritos no se aprecia esta observación, puesto que, a pesar de la variación dependiendo de la muestra, los tamaños más grandes medidos de meteoritos son menores a 150 um (tamaño original).

De todas maneras, en los espectros de meteoritos si se puede observar una diferenciación entre las mediciones de las muestras con tamaño original y las molidas durante 60 minutos o 75 minutos, como se muestra en la figura 33, para condritos carbonáceos; en la figura 34, para condritos ordinarios tipo H; y en la figura 35, para condritos ordinarios tipo L/LL. De todas maneras, los espectros en estos rangos no varían mucho, principalmente porque las muestras de tamaño original contienen gran cantidad [%] de partículas pequeñas.

En los histogramas presentados, tanto para Rencoret como Chile M4, se puede observar que el tamaño promedio de las partículas es similar a pesar del tiempo de molienda de la mezcla, variando de 30 minutos, 60 minutos a 75 minutos. Esto puede deberse a que el tamaño original de las muestras ya tenía gran cantidad de particular pequeñas (3um a 5 um). También puede ser debido a que la relación entre el tiempo de moler las mezclas y el tamaño de partícula no es lineal, por lo que después de cierto tiempo de moler, el tamaño se mantiene similar.

Figura 33. Gráfica de espectros de absorción de los 3 meteoritos carbonáceos con dos tamaños distintos de granos. En negro se presenta la muestra de mayor tamaño (tamaño original) y en rojo el de la mezcla molida durante 75 minutos.



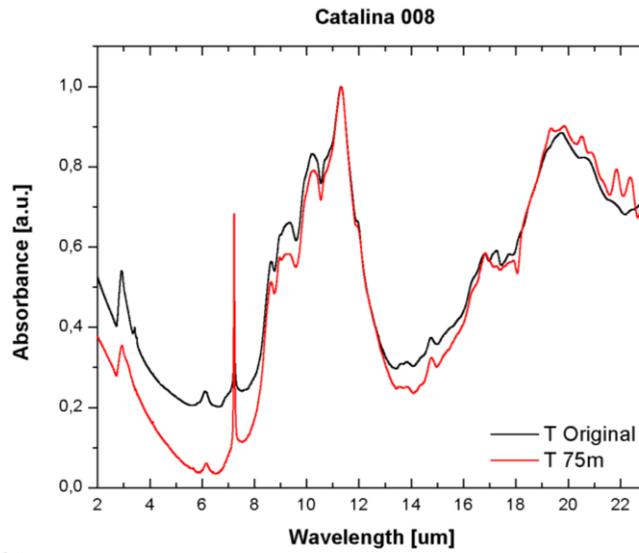
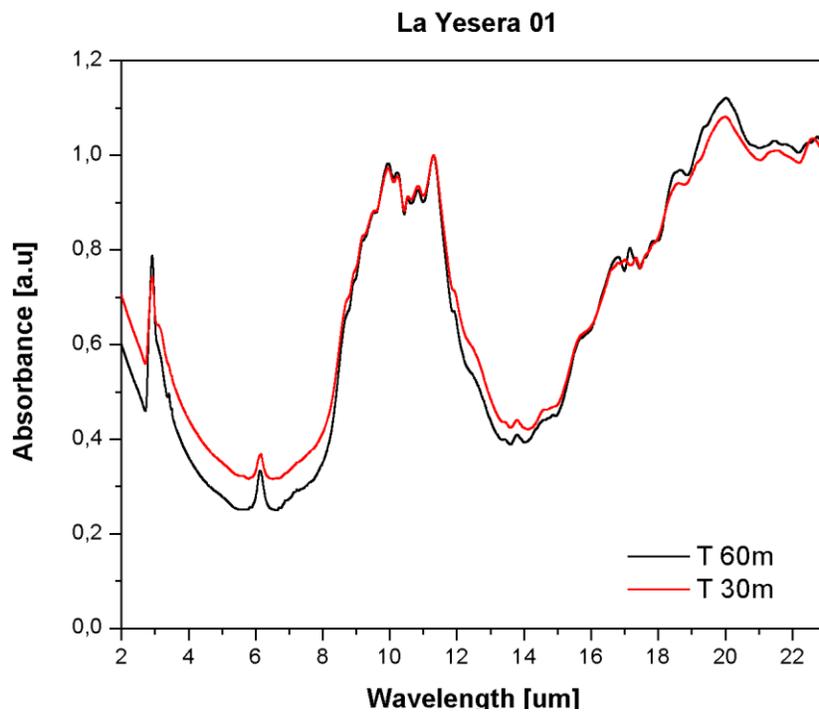


Figura 34. Gráfica del espectro de absorción de dos muestras de condritos ordinarios del grupo H: La Yesera 01 y Rencoret. Las muestras corresponden a la mezcla molida durante 60 minutos y la mezcla molida durante 75 minutos.



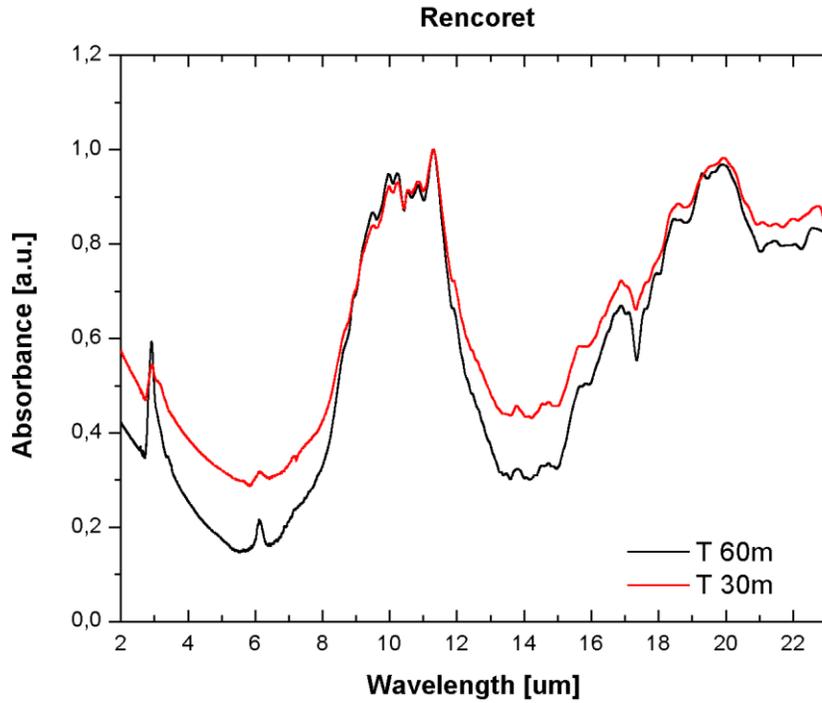
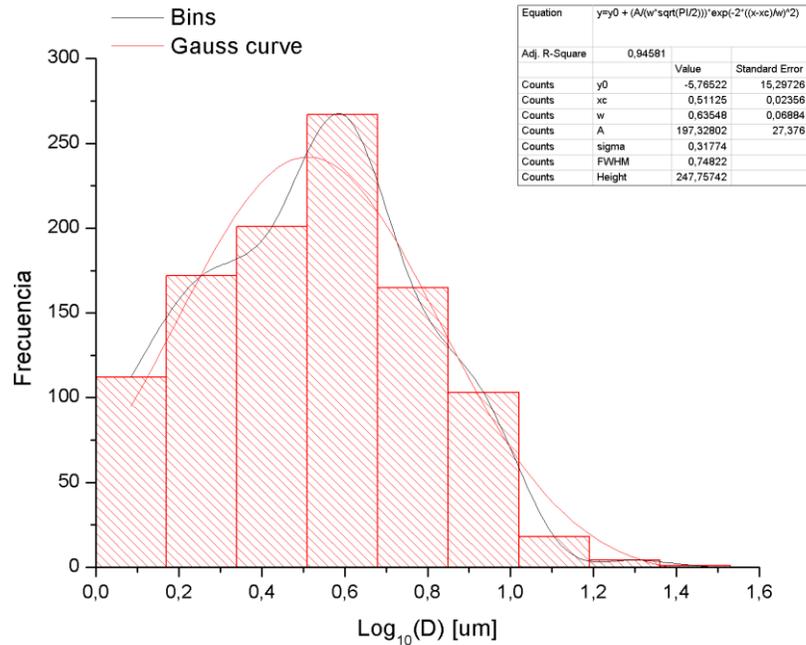
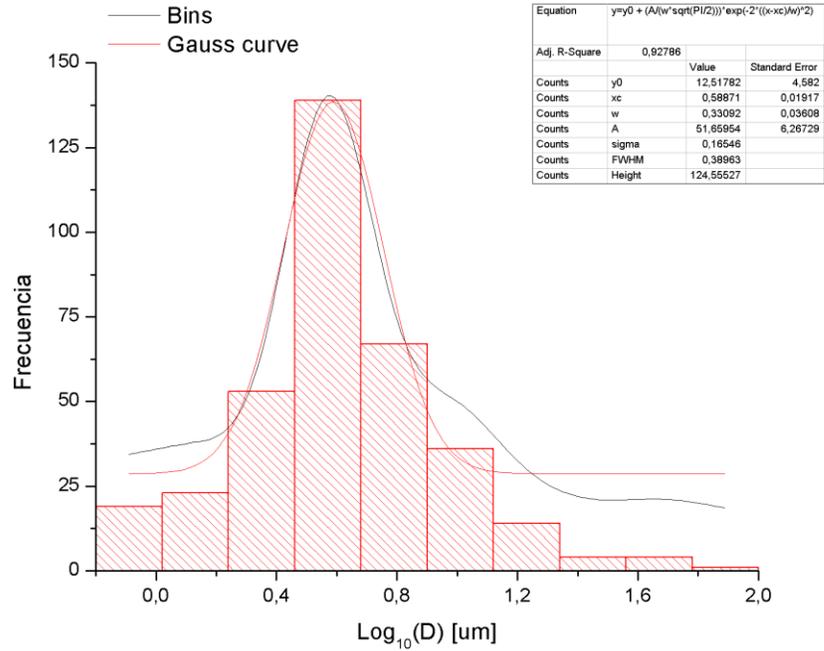
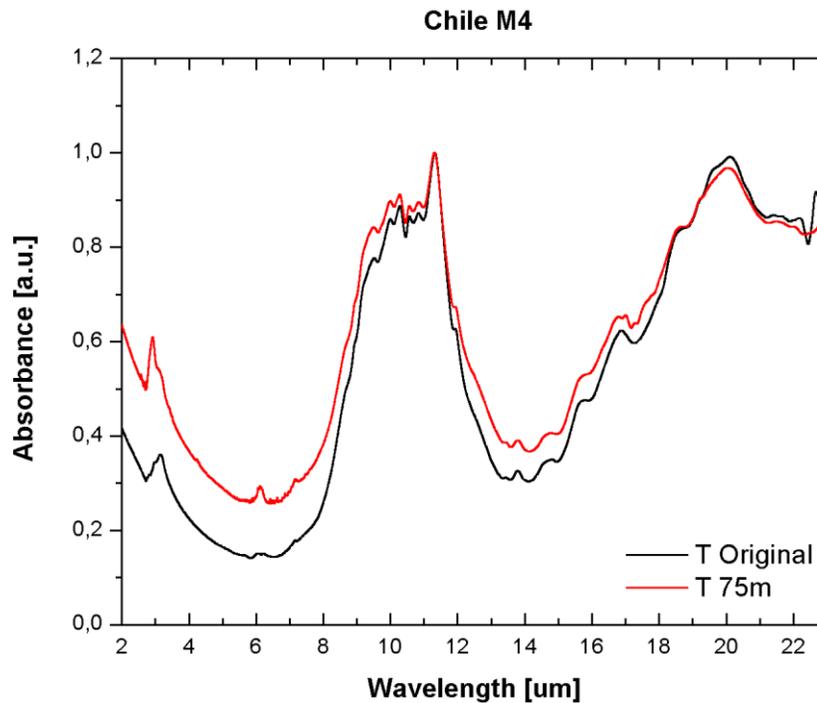


Figura 35. Histograma correspondiente al meteorito de Rencoret (condrito ordinario tipo H). El gráfico superior presenta el histograma para la muestra molida durante 30 minutos, mientras que el gráfico inferior corresponde al histograma de la muestra molida durante 75 minutos.





Grafica del espectro de absorbancia de dos muestras de condritos ordinarios del grupo L: Chile M4 y Chile M7. Las muestras corresponden a la mezcla con tamaño original y la molida durante 75 minutos para Chile M4; y la mezcla de tamaño original y la molida durante 60 minutos para Chile M7.



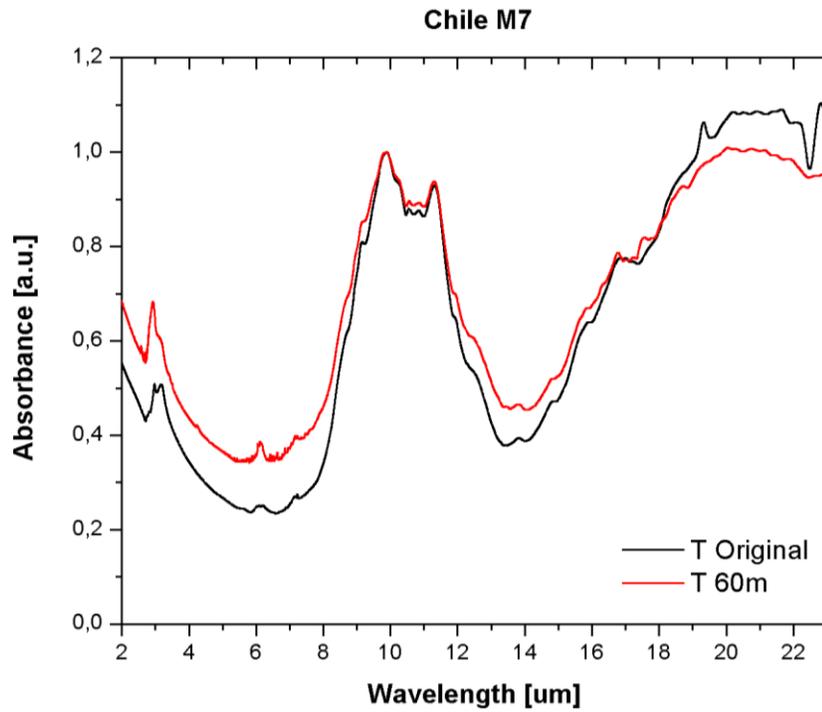
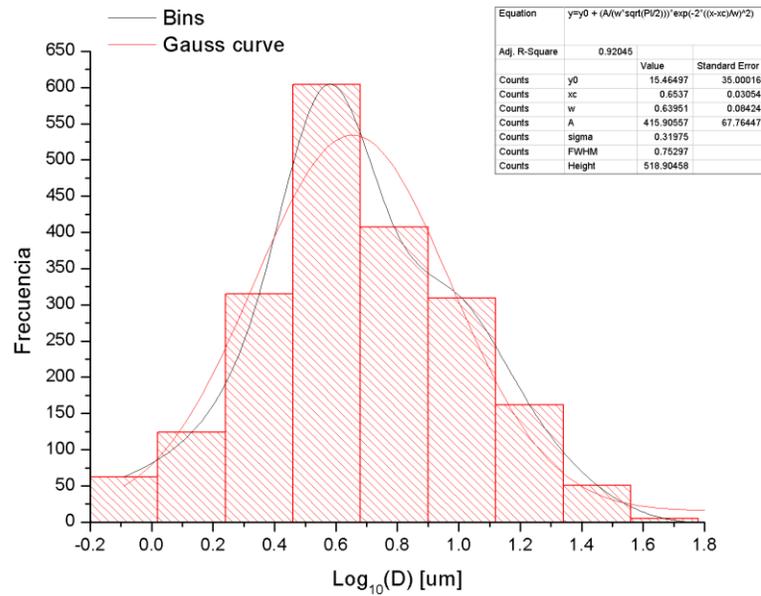
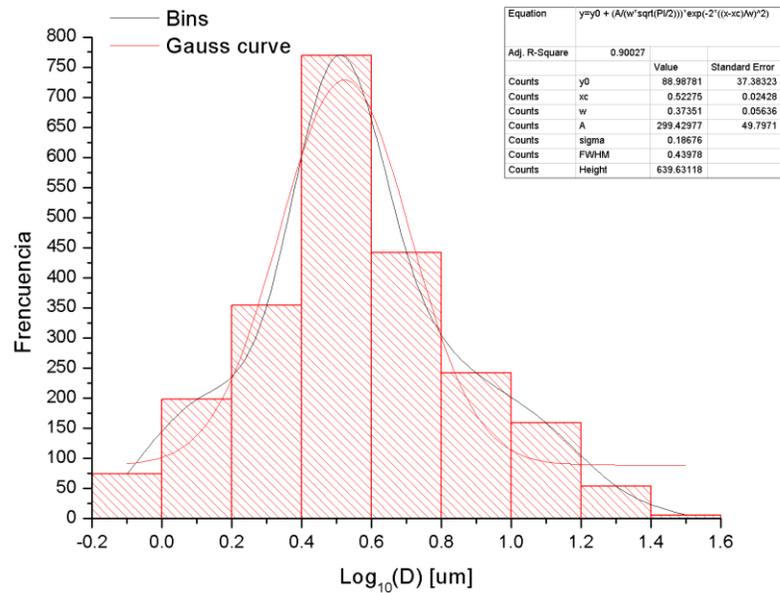


Figura 36. Histograma correspondiente a la muestra Chile M4 (condrito ordinario de tipo L). El gráfico superior presenta el histograma para la muestra de tamaño original, mientras que el gráfico inferior corresponde al histograma de la muestra molida durante 75 minutos





7 Conclusiones

Luego de construir un protocolo para la elaboración de las muestras de meteoritos con distinto tamaño de partícula, se logó medir sus espectros de absorbancia y caracterizar los tamaños de partículas de ciertas muestras de acuerdo con la microscopía e histogramas obtenidos. En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se concluye que:

- Es posible una caracterización de la mineralogía primaria de los meteoritos, desde su espectro de absorbancia, donde se puede inferir composiciones aproximadas de distintas fases minerales, como lo son olivino, piroxeno y plagioclasa.
- Para los condritos carbonáceos, a pesar de que la cantidad de materia carbonosa no sea mayoritaria en % peso en la muestra, las bandas de absorción relacionadas con este material se presentan de manera muy definida, siendo fácil su identificación con respecto a otro tipo de meteoritos.
- Las bandas de OH y H₂O son fácilmente identificables, y en un estudio mas detallado de este aspecto, se puede obtener los grados de meteorización y alteración de las muestras, y los minerales secundarios e hidratados.

- Es posible identificar meteoritos con material amorfo (vidrio), haciendo posible un estudio más detallado en este aspecto sobre el metamorfismo de choque sufrido por la muestra durante su evolución.
- Es necesario determinar protocolos de preparación de las muestras, las pastillas y de medición, para así obtener espectros bien definidos, minimizando el efecto de agentes externos, como lo son el mismo KBr, humedad del aire, y regulando factores que pueden afectar la medición como son la concentración de material en la mezcla de la pastilla, el efecto de la apertura del haz incidente del espectrómetro.
- A pesar de los protocolos desarrollados en este trabajo para la molienda y obtención de diferentes tamaños de grano con respecto al tiempo, la heterogeneidad en la mezcla puede influir al momento de la formación de la pastilla, midiendo tamaños arbitrarios que influyen en el espectro obtenido, por lo que es necesaria una caracterización del tamaño de las muestras para tener una interpretación realista de los datos obtenidos.
- Gracias a la caracterización del tamaño de las muestras mediante microscopía, se puede determinar la influencia del tamaño original de la muestra, que puede presentar espectros de absorbancia enmascarados por la cantidad de partículas menores a 10 μm presente en la muestra inicial. Para esto es necesario desarrollar un nuevo protocolo de tamizaje para tamaños menores a 38 μm , y así poder obtener espectros de rangos más restringidos de tamaños de partículas.

Dadas las nuevas tecnologías en desarrollo en el ámbito de la astronomía para la observación de discos protoplanetarios y estudio del polvo cósmico, y las nuevas misiones en desarrollo para la medición de estos, se tiene la necesidad de desarrollar un trabajo de laboratorio a la par de estos avances.

Mientras misiones como Spitzer no tenían la resolución para determinar el tamaño del polvo observado, es posible que con nuevas misiones como Speca se tenga esta capacidad, por lo que una librería con estos datos a la mano para la correlación de las mediciones es ideal en estos momentos de desarrollo.

Idealmente, a futuro, se pretende crear una librería de opacidad de meteoritos, comenzando con los estudiados en este trabajo y extendiendo la investigación a nuevas muestras recolectadas.

Se propone como estudios futuros, investigar esta misma relación del efecto del tamaño de partícula de muestras de meteoritos en relación con su opacidad, dado que este es el parámetro utilizado en astronomía para la investigación y caracterización del polvo estelar observado en discos protoplanetarios.

De la misma manera es ideal llegar a realizar una caracterización tanto de los espectros de absorbancia como de opacidad de estos mismos meteoritos en relación con otros parámetros que también provocan variaciones, como son la temperatura.

Bibliografía

Bowey, J. E., & Hofmeister, A. M. (2005). Overtones of silicate and aluminate minerals and the 5–8 μm ice bands of deeply embedded objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358(4), 1383-1393.

Bowey, J. E., Morlok, A., Köhler, M., & Grady, M. (2007). 2–16 μm spectroscopy of micron-sized enstatite (Mg, Fe) $2\text{Si}_2\text{O}_6$ silicates from primitive chondritic meteorites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 376(3), 1367-1374.

Brownlee, D. E., Tsou, P., Anderson, J. D., Hanner, M. S., Newburn, R. L., Sekanina, Z., ... & McDonnell, J. A. M. (2003). Stardust: Comet and interstellar dust sample return mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E10).

Bunch, T. E., & Rajan, R. S. (1988). Meteorite regolithic breccias. *Meteorites and the early solar system*, 144-164.

Burnett, D. S., Barraclough, B. L., Bennett, R., Neugebauer, M., Oldham, L. P., Sasaki, C. N., ... & Wiens, R. C. (2003). The Genesis discovery mission: Return of solar matter to Earth. *Space Science Reviews*, 105(3-4), 509-534.

Burns, R. G., & Huggins, F. E. (1972). Cation determinative curves for Mg-Fe-Mn olivines from vibrational spectra. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 57(5-6), 967-985.

Cazaux, C., Naderi, F., Whetsel, C., Beaty, D., Gershman, B., Kornfeld, R., ... & Sackheim, B. (2004). The NASA/CNES Mars sample return—a status report. *Acta Astronautica*, 54(8), 601-617.

Chihara, H., Koike, C., Tsuchiyama, A., Tachibana, S., & Sakamoto, D. (2002). Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicates-I. Mg-Fe pyroxenes. *Astronomy & Astrophysics*, 391(1), 267-273.

Chihara, H., Koike, C., & Tsuchiyama, A. (2007). Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicates-III. Melilite solid solution. *Astronomy & Astrophysics*, 464(1), 229-234.

Chihara, H., & Koike, C. (2017). Infrared absorption spectra of plagioclase feldspar: Dependencies of composition and temperature. *Planetary and Space Science*, 149, 94-99.

Chukanov, N. V. (2014). IR Spectra of minerals and reference samples Data. In *Infrared spectra of mineral species* (pp. 21-1701). Springer, Dordrecht.

Cooper, B. L., Salisbury, J. W., Killen, R. M., & Potter, A. E. (2002). Midinfrared spectral features of rocks and their powders. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E4), 1-1.

Della Corte, V., Palumbo, P., Rotundi, A., De Angelis, S., Rietmeijer, F. J., Bussoletti, E., ... & Zona, E. (2012). In situ collection of refractory dust in the upper stratosphere: the DUSTER Facility. *Space science reviews*, 169(1-4), 159-180.

Dodd, R. T., & Jarosewich, E. (1979). Incipient melting in and shock classification of L-group chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 44(2), 335-340.

Etzel, K., & Benisek, A. (2008). Thermodynamic mixing behavior of synthetic Ca-Tschermak–diopside pyroxene solid solutions: III. An analysis of IR line broadening and heat of mixing behavior. *Physics and Chemistry of Minerals*, 35(7), 399-407.

Flynn, G. J., Horz, F., Bajt, S., & Sutton, S. R. (1996, March). In-situ chemical analysis of extraterrestrial material captured in aerogel. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 27).

Fujiwara, A., Kawaguchi, J., & Uesugi, K. T. (2004). Role of sample return mission MUSES-C in asteroid study. *Advances in Space Research*, 34(11), 2267-2269.

Gattacceca, J., Valenzuela, M., Uehara, M., Jull, A. T., Giscard, M., Rochette, P., ... & Munayco, P. (2011). The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile). *Meteoritics & Planetary Science*, 46(9), 1276-1287

Gibb, E. L., & Whittet, D. C. B. (2002). The 6 micron feature in protostars: evidence for organic refractory material. *The Astrophysical Journal Letters*, 566(2), L113.

Gonzalez, J. F., Laibe, G., Maddison, S. T., Pinte, C., & Ménard, F. (2015). The accumulation and trapping of grains at planet gaps: effects of grain growth and fragmentation. *Planetary and Space Science*, 116, 48-56.

Grossman, J. N. (1994). The meteoritical bulletin, no. 76, 1994 January: The US Antarctic meteorite collection. *Meteoritics*, 29(1), 100-143.

Grossman, L. (1972). Condensation in the primitive solar nebula. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36(5), 597-619.

Hofmeister, A. M. (1997). Infrared reflectance spectra of fayalite, and absorption data from assorted olivines, including pressure and isotope effects. *Physics and Chemistry of Minerals*, 24(7), 535-546.

Hofmeister, A. M., & Pitman, K. M. (2007). Evidence for kinks in structural and thermodynamic properties across the forsterite–fayalite binary from thin-film IR absorption spectra. *Physics and Chemistry of Minerals*, 34(5), 319-333.

Hony, S., Bouwman, J., Keller, L. P., & Waters, L. B. F. M. (2002). The detection of iron sulfides in planetary nebulae. *Astronomy & Astrophysics*, 393(3), L103-L106.

Hutchinson R. 2004. Meteorites: A petrologic, chemical, and isotopic synthesis. Cambridge: Cambridge University Press.

Hutzler, A., Gattacceca, J., Rochette, P., Jull, T., Valenzuela, M., Cournede, C., ... & Braucher, R. (2011). New Dense Collection Area in Atacama Desert, Chile: Preliminary Results. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 74.

Jacquet, E. (2014). Transport of solids in protoplanetary disks: Comparing meteorites and astrophysical models. *Comptes Rendus Geoscience*, 346(1-2), 3-12.

Kallemeyn, G. W., Rubin, A. E., Wang, D., & Wasson, J. T. (1989). Ordinary chondrites: Bulk compositions, classification, lithophile-element fractionations and composition-petrographic type relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10), 2747-2767.

Keane, J. V., Tielens, A. G. G. M., Boogert, A. C. A., Schutte, W. A., & Whittet, D. C. B. (2001). Ice absorption features in the 5-8 μm region toward embedded protostars. *Astronomy & Astrophysics*, 376(1), 254-270.

Koike, C., Chihara, H., Tsuchiyama, A., Suto, H., Sogawa, H., & Okuda, H. (2003). Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicate-II. Natural and synthetic olivines. *Astronomy & Astrophysics*, 399(3), 1101-1107.

Lyon, R. J. P. (1963). Evaluation of infrared spectrophotometry for compositional analysis of lunar and planetary soils.

Mattingly, R., & May, L. (2011, March). Mars sample return as a campaign. In *2011 Aerospace Conference* (pp. 1-13). IEEE.

Molster, F. J., & Waters, L. B. (2003). The mineralogy of interstellar and circumstellar dust. In *Astromineralogy* (pp. 121-170). Springer, Berlin, Heidelberg.

Morlok, A., Koike, C., Tomioka, N., Mann, I., & Tomeoka, K. (2010). Mid-infrared spectra of the shocked Murchison CM chondrite: Comparison with astronomical observations of dust in debris disks. *Icarus*, 207(1), 45-53.

Muñoz Espadas, M. J. (2003). *Mineralogía, texturas y cosmoquímica de cóndrulos en condritas H4, H5, L5 y LL5* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones).

Mustard, J. F., & Hays, J. E. (1997). Effects of hyperfine particles on reflectance spectra from 0.3 to 25 μm . *Icarus*, 125(1), 145-163.

Pitman, K. M., Dijkstra, C., Hofmeister, A. M., & Speck, A. K. (2010). Infrared laboratory absorbance spectra of olivine: using classical dispersion analysis to extract peak parameters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406(1), 460-481.

Raunier, S., Chiavassa, T., Duvernay, F., Borget, F., Aycard, J. P., Dartois, E., & d'Hendecourt, L. (2004). Tentative identification of urea and formamide in ISO-SWS infrared spectra of interstellar ices. *Astronomy & Astrophysics*, 416(1), 165-169.

Rubin, A. E. (1990). Kamacite and olivine in ordinary chondrites: Intergroup and intragroup relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(5), 1217-1232.

Rubin, A. E., & Brearley, A. J. (1996). A critical evaluation of the evidence for hot accretion. *Icarus*, 124(1), 86-96.

Rubin, A. E., Scott, E. R., & Keil, K. (1997). Shock metamorphism of enstatite chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(4), 847-858.

Russell, S. S., Pillinger, C. T., Arden, J. W., Lee, M. R., & Ott, U. (1992). A new type of meteoritic diamond in the enstatite chondrite Abee. *Science*, 256(5054), 206-209.

- Salisbury, J. W., Walter, L. S., & Vergo, N. (1987). *Mid-infrared (2.1-25 μm) spectra of minerals* (No. 87-263). US Geological Survey.
- Salisbury, J. W., D'Aria, D. M., & Jarosewich, E. (1991). Midinfrared (2.5–13.5 μm) reflectance spectra of powdered stony meteorites. *Icarus*, 92(2), 280-297.
- Schutte, W. A., Boogert, A. C. A., Tielens, A. G. G. M., Whittet, D. C. B., Gerakines, P. A., Chiar, J. E., ... & Graauw, T. (1999). Weak ice absorption features at 7.24 and 7.41 μm in the spectrum of the obscured young stellar object W 33A.
- Scott, E. R., Keil, K., & Stoeffler, D. (1992). Shock metamorphism of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(12), 4281-4293.
- Scott, E. R. (2007). Chondrites and the protoplanetary disk. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 577-620.
- Sears, D. W. G., Hasan, F. A., Batchelor, J. D., & Lu, J. (1991). Chemical and physical studies of type 3 chondrites. XI-Metamorphism, pairing, and brecciation of ordinary chondrites. In *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings* (Vol. 21, pp. 493-512).
- Shirley, K. A., & Glotch, T. D. (2019). Particle Size Effects on Mid-Infrared Spectra of Lunar Analog Minerals in a Simulated Lunar Environment. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(4), 970-988.
- Stöffler, D., & Keil, K. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845-3867.
- Valenzuela Picón, E. M. (2011). Procesos de meteorización en condritos ordinarios del desierto de Atacama, norte de Chile: Nuevos antecedentes sobre meteorización de material extraterrestre en ambientes desérticos.
- Van Schmus, W. R., & Wood, J. A. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-765.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J., & Krot, A. N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the early solar system II*.
- Weisbin, C. R., & Rodriguez, G. (2000). NASA robotics research for planetary surface exploration. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 7(4), 25-34.
- Wlotzka, F. (1993). A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28.