



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

INCLUSIONES VÍTREAS EN CONDRITOS CARBONÁCEOS DEL DESIERTO DE ATACAMA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE

CLAUDIA SAMANTA ARAVENA GONZÁLEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

PROFESOR GUÍA

DANIEL MONCADA DE LA ROSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MILLARCA VALENZUELA PICÓN

CLAUDIA CANNATELLI

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Geóloga**

POR: Claudia Samanta Aravena González

FECHA: 01-04-2019

Prof. Guía: Daniel Moncada, PhD.

**INCLUSIONES VÍTREAS EN CONDRITOS CARBONACEOS DEL DESIERTO
DE ATACAMA, REGION DE ANTOFAGASTA, CHILE**

Alrededor de 40.000 toneladas de material extraterrestre cae anualmente a la tierra del cual solo un 1% es recuperable. La sistematización de campañas anuales de búsqueda en áreas de alta densidad de meteoritos, como El Médano, Catalina, Los Vientos y Paposos, ubicadas en el Desierto de Atacama, región de Antofagasta, han contribuido significativamente al incremento de la colección de meteoritos chilena.

Las caídas de los meteoritos, generan transformaciones del cuerpo original, este se fragmenta al entrar a la atmósfera terrestre. Para atribuir fragmentos a un mismo evento de caída, es necesario determinar sus características cualitativas y cuantitativas, para realizar un emparejamiento.

Los condritos de tipo carbonáceos son los meteoritos más complejos que se conocen, poseen una gran variedad de componentes, muchos de los cuales aún no se tiene conocimiento sobre sus condiciones de formación ni su relación con los procesos que dieron origen al sistema solar.

En este trabajo, tres muestras de tipo condrito carbonáceos (Catalina 008, El Médano 216 y Los Vientos 123) se analizan con espectroscopía Raman para determinar fases minerales en inclusiones vítreas presentes en cristales de olivino. La molécula de agua es identificada en el vidrio de inclusiones vítreas de Catalina 008 y El Médano 216, sumado a materia carbonosa en el meteorito Catalina 008.

Análisis de *Laser Ablation ICP-MS*, se realizan sobre estas inclusiones vítreas para comprender la química presente en estas inclusiones. Esto con la finalidad de comprender procesos de fraccionamiento de la nebulosa solar, considerando el modelo de condensación de líquido primario el que considera la formación de cóndrulos como resultado de condensación de la nebulosa solar primitiva.

Estudios de difracción de rayos X aplicados a estos meteoritos, permiten una mayor comprensión de las fases minerales presentes en los meteoritos estudiados.

Una caracterización petrográfica de tres muestras (RM 567, RM 568 y RM 569), sumado a un estudio macroscópico, permite realizar un emparejamiento para asociarlas a la misma caída del meteorito registrado El Médano 216.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, que me ha incentivado desde mi niñez a pensar en grande. Particularmente a mi mamá por enseñarme de primera fuente el significado de ser mujer en el campo de la investigación y por motivarme a desarrollar cada una de mis motivaciones. A mi papá por enseñarme que no hay excusas para no intentar concretar cualquiera de mis sueños y apoyarme en cada oportunidad que se me presentó de seguir aprendiendo. A mi hermano, quien implícitamente siempre me motiva a ser consecuente en el mundo y me desafía a transmitirlo.

También dedico esta tesis a cada grupo de amigos que me acompañó en cada una de mis etapas. A mis amigas y amigos de escuela de verano, a mis amigos y amigas con quien discutí de política, a mis amigas y amigos astrónomos a quienes sigo encontrándome en congresos y espacios de investigación. A mis amigas y amigos de mi carrera, a las distintas generaciones con las que compartí. A mis amigas y amigos que me sostuvieron en distintos procesos.

A mis compañeras y compañeros de la vida, con quienes sigo compartiendo, creciendo y creando.

A mi primer mentor, Patricio Rojo, quién iluminó mi camino en el mundo de la investigación cuando aún estudiaba el plan común de ingeniería y quién me inspiró e incentivó a conectar la geología y la astronomía.

A mi segunda mentora, Millarca Valenzuela, quien me ayudó a aterrizar ese mundo a espacios de discusión en congresos y en cada oportunidad que se presentó de poner a prueba mi perseverancia y mis conocimientos.

Al grupo de meteoritos y ciencias planetarias, nicho en el que comenzó este proyecto, donde comenzó mi interés en desarrollar mi motivación la comunicación de la ciencia.

A Daniel Moncada, mi guía de tesis, por su motivación, disposición y dedicación para ayudarme a resolver cada contratiempo que se presentó durante el desarrollo de este trabajo. Y por darme nuevas ideas para seguirme desarrollando.

A la música que me dio un lenguaje para comunicarme y me acompañó cada día solitario y colectivo en esta región.

A todas las experiencias que me han inspirado a pensar la vida de otra forma.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos FONDECIT 11170210 (Daniel Moncada) y 11171090 (Millarca Valenzuela) destinados a financiar esta tesis.

A Rodrigo Martínez, del Museo del meteorito de San Pedro de Atacama, por haber donado muestras de su propia colección para este estudio.

Al personal técnico del SERNAGEOMIN que me ayudaron en los distintos análisis. A Laura Varas, de la sala de petrografía por su calidez y su orientación en las sesiones de petrografía. A Eugenia Fonseca, por su disposición a reevaluar los datos de difracción de rayos X, luego de encontrar novedosos minerales en los meteoritos.

A Blanca Baccola, quien me orientó en todo el proceso universitario y de titulación. A Julio, del laboratorio de cortes, por tenerme los cortes en tiempos de alta demanda.

A los investigadores María Eugenia Varela de Argentina, Lydie Bonal, de Francia y Andreas Morlock de Alemania, quienes me orientaron en la forma de abordar varias de los resultados que se presentaron en este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	GENERALIDADES	0
1.2	MUESTRAS EN ESTUDIO	1
1.3	OBJETIVOS	2
1.4	HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	3
1.5	TRABAJOS ANTERIORES.....	3
II.	METODOLOGIA.....	5
2.1	ESTADO DEL ARTE DEL MATERIAL DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS.....	5
2.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS	5
2.3	CARACTERIZACIÓN DE INCLUSIONES VÍTREAS	5
2.4	ESPECTROSCOPIA RAMAN	6
2.5	ABLACIÓN LÁSER ICP-MS.....	8
2.6	PETROGRAFÍA Y CLASIFICACIÓN	12
2.7	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	16
2.8	ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE LOS DATOS	16
III.	MARCO TEORICO.....	18

3.1 DEFINICIONES GENERALES	18
3.2 CLASIFICACIÓN DE METEORITOS.....	18
3.3 METEORITOS TIPO CONDRITO.....	19
3.4 MINERALOGÍA DE CONDRITOS.....	20
3.5 CLASIFICACIÓN DE CONDRITOS	22
3.6 CONDRITOS CARBONÁCEOS Y CLASIFICACIÓN	23
3.7 CONDRITOS TIPO CO	26
3.8 PROCESOS SECUNDARIOS Y TERCARIOS	26
3.9 MATERIA ORGÁNICA EN CONDRITOS CARBONÁCEOS.....	28
3.10 INCLUSIONES.....	30
3.11 CONDENSACIÓN DE ELEMENTOS	33
IV. RESULTADOS.....	35
4.1 ESTUDIO MACROSCÓPICO.....	35
4.2 ESTUDIO DE INCLUSIONES VÍTREAS.....	38
4.3 ESTUDIO CON ESPECTROSCOPIA RAMAN	42
4.4 ESTUDIO CON LA-ICP-MS	54
4.5 ESTUDIO DE CONDRITOS NO CLASIFICADOS.....	68
4.6 ESTUDIO CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X	75
V. DISCUSIONES.....	79

5.1 METEORITO CATALINA 008	79
5.2 METEORITO EL MÉDANO 216	85
5.3 MUESTRA RM 567.....	86
5.4 MUESTRA RM 568	87
5.5 MUESTRA RM 569	88
5.3 METEORITO LOS VIENTOS 123	89
VI. CONCLUSIONES.....	79
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	92
VIII. ANEXOS.....	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.4: Interface del software <i>Crystal Sleuth</i> para análisis de espectros Raman .	7
Ilustración 2.5: Interface del <i>software AMS</i> , para análisis de inclusiones analizadas con <i>Laser Ablation ICP-MS</i>	9
Ilustración 2.6a: Microfotografía en luz transmitida a nicoles paralelos, nicoles cruzados y luz reflejada de El Médano 216 (De izq. a der.).	12
Ilustración 2.6b: Interface de software GIMP2. Selección de píxeles asociados a minerales opacos en microfotografía de El Médano 216.....	13
Ilustración 2.6c: Interface de software GIMP2. Selección de píxeles asociados a porosidad en microfotografía de El Médano 216.....	14
Ilustración 2.6d: Microfotografía en luz transmitida de El Médano 216, selección de píxeles interpretados como matriz.....	15
Ilustración 3.2: Clasificación de meteoritos, excluyendo meteoritos no agrupados. (..... 19
Ilustración 3.6a: Relación entre abundancias de elementos químicos en meteoritos CO, CM y CV, normalizados a la composición CI.	25
Ilustración 3.6b: Relación entre abundancias de elementos químicos en meteoritos CO, CM y CV, normalizados a la composición CI. (Cont.).....	25
Ilustración 3.9: Parámetros espectrales de bandas de materia carbonosa en condritos CO (FWHMG: ancho de la banda, ID/IG; Relación entre amplitudes de las bandas D y G, respectivamente). (Extraído de Bonal et al, (2016)).29
Ilustración 4.1 ^a : Muestra RM 567 encontrada en el desierto de Atacama. Imagen de Rodrigo Martínez.	36

Ilustración 4.1b: Muestra RM 568 encontrada en el desierto de Atacama. Imagen de Rodrigo Martínez.	37
Ilustración 4.1c: Muestra RM 569 encontrada en el desierto de Atacama. Imagen de Rodrigo Martínez.	37
Ilustración 4.2a: Microfotografía de inclusiones vítreas tipo 1 y 2, en olivino de Los Vientos 123.	38
Ilustración 4.2b: Microfotografía de inclusiones vítreas tipo 3 en muestra RM-568 y tipo 4 en RM-569.	39
Ilustración 4.2c: Microfotografía del condrito Catalina 008. En la imagen, se encierran las inclusiones posiblemente de tipo fluidas en cristal de olivino.	39
Ilustración 4.2d: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas (T3) en cristal de olivino. Muestra RM 567.	40
Ilustración 4.2e: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con cristales (T4) en cristal de olivino. Muestra RM 568.	40
Ilustración 4.2f: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con burbuja (T2) en cristal de olivino. Muestra RM 569.	41
Ilustración 4.2g: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con burbuja (T2) en cristal de olivino. Muestra Catalina 008.	41
Ilustración 4.2h: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con burbuja (T2) alineadas en cristal de olivino. Muestra Los Vientos 123.	42
Ilustración 4.3a: Espectro Raman obtenido en cristal de olivino en condrito RM 567 (Fo: Olivino Forsterita).	43

Ilustración 4.3b: Espectro Raman obtenido en cristal de olivino en condrito RM 568 (Fo: Olivino Forsterita).....	44
Ilustración 4.3c: Espectro Raman obtenido en cristal de olivino en condrito RM 569, de tres inclusiones de una MIAs (Fo: Olivino Forsterita).	45
Ilustración 4.3d: Espectro Raman obtenido en inclusión vítrea de una familia de inclusiones (MIA1) y cristal de olivino huésped en condrito Catalina 008 (Fo: Olivino Forsterita).....	46
Ilustración 4.3e: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI2-1 y MI2-2) de una misma familia de inclusiones (MIA2) en condrito Catalina 008 (Fo: Olivino Forsterita, Cr: Cromita).....	47
Ilustración 4.3f: Ajuste con función polinómica inversa, centrada en el máximo de las Bandas D y G obtenidas de espectros Raman de vidrio y burbuja de inclusión vítrea MI2-1, de la MIA2 del condrito Catalina 008.	48
Ilustración 4.3g: Ajuste polinómico inverso de Bandas D y G obtenidas en vidrio y burbuja de inclusión vítrea en Catalina 008 y comparación con ajustes realizados en otros meteoritos por Bonal et al., (2016).....	49
Ilustración 4.3h: Espectros Raman obtenidos en dos familias de inclusiones vítreas MIA1 (MI1) y MIA2 (MI2-1 y MI2-2) en condrito Catalina 008.....	50
Ilustración 4.3i: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI1-1 y MI1-2) de una misma familia de inclusiones (MIA1) en condrito El Médano 216 (Fo: Olivino Forsterita, Cr: Cromita).....	51

Ilustración 4.3j: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI1-1 y MI1-2) de una misma familia de inclusiones (MIA1) en condrito El Médano 216.	52
Ilustración 4.3k: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI1-1 y MI1-2) de una misma familia de inclusiones (MIA1) en condrito Los Vientos 123 (Fo: Olivino Forsterita).....	53
Ilustración 4.4 ^a 1: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en una inclusión vítrea (MI1) de una familia (MIA2) de condrito RM567.	55
Ilustración 4.4 ^a 2: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (MI2 y 3) de una familia (MIA2) de condrito RM567.	56
Ilustración 4.4 ^a 3: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para RM 567.....	57
Ilustración 4.4b1: Diagrama realizado con resultados 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en una inclusión vítrea (MI1) de una familia (MIA1) de condrito RM568.	58
Ilustración 4.4b2: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en tres inclusiones vítreas (MI2, MI3 y MI4) de una familia (MIA1) de condrito RM568.	59
Ilustración 4.4b3: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (MI5 y MI6)) de una familia (MIA1) de condrito RM568.	60
Ilustración 4.4b4: Concentraciones obtenidas con LA-ICPMS para RM 568	61

Ilustración 4.4c1: Diagrama realizado con resultados de 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (MI1, MI2, MI3 y MI4)) de una familia (MIA1) de condrito RM569.....	62
Ilustración 4.4c2: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para RM 569 y comparadas mediante metodología propuesta.....	63
Ilustración 4.4d1: Diagrama realizado con resultados de 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (Izquierda: MI1 (con burbuja) y Derecha: MI2 (con burbuja y cristales)) de una familia (MIA1) de condrito Catalina 008.	64
Ilustración 4.4d2: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para Catalina 008 y comparadas mediante metodología propuesta.....	65
Ilustración 4.4e1: Diagrama realizado con resultados de 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en cinco inclusiones vítreas de una familia (MIA1) de condrito Los Vientos123	66
Ilustración 4.4d: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para Los Vientos 123	67
Ilustración 4.5a: Microfotografía, bolsones de kamacita y troilita en luz reflejada. En Muestra RM 567.....	69
Ilustración 4.5b: Microfotografía. Microvenillas de choque rellenas con opacos en cristal de olivino a luz reflejada. Muestra RM 567.	70
Ilustración 4.5c: Microfotografía. Óxidos (cromita) reemplazando kamacita en luz reflejada en meteorito RM 567.	70

Ilustración 4.5d: Microfotografía, fracturas planares en cristal de olivino a luz polarizada (Izquierda) y luz transmitida (Derecha)	72
Ilustración 4.5e: Luz reflejada a nicoles cruzados. Se observan los reflejos internos que se asocian a hematita.....	72
Ilustración 4.5f: Presencia de mineral interpretado como Masquelinita, a luz reflejada polarizada y transmitida polarizada.	73
Ilustración 4.5g: Microfotografía. Microvenillas de choque en luz reflejada en meteoriot RM 569.	74
Ilustración 5.1a: Las bandas D y G no se observan en el olivino huésped.	80
Ilustración 5.1b: Ajuste lorentziano de las bandas D y G	81
Ilustración 5.1c: Ajuste gaussiano de las bandas D y G	81
Ilustración 5.1d: Datos obtenidos con ajuste polinómico en trabajo realizado por Bonal et al., (2016).....	83
Ilustración A1.1: Mapa de cortes de sección delgada de Catalina 008.....	99
Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS	99
* Ilustración A1.2: Mapa de cortes de sección delgada de Los Vientos 123	100
Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS	100
Ilustración A1.2: Mapa de cortes de sección delgada de RM567.	101
Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS	101

Ilustración A1.2: Mapa de cortes de sección delgada de RM568.	102
Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS	102
Ilustración A1.3: Mapa de cortes de sección delgada de RM567.....	103
Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS	103
Ilustración A2.1: Hoja de cálculo de porcentajes modales en meteoritos no registrados	104
Ilustración A2.2: Hoja de cálculo de porcentajes modales en meteoritos no registrados	105
Ilustración A3.1: Espectro Raman obtenido en muestra RM567.....	106
Ilustración A3.3: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI1.....	106
Ilustración A3.4: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI1 en 2000 a 4000 cm^{-1}	107
Ilustración A3.5: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI2	107
Ilustración A3.6: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI3	107
Ilustración A3.7: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de muestra Catalina 008	108
Ilustración A3.8: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de muestra Catalina 008 entre 2000 a 4000 cm^{-1}	108
Ilustración A3.9: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA2, de muestra Catalina 008	108

Ilustración A3.10: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA2 de muestra Catalina 008 entre 2000 a 4000 cm^{-1}	109
Ilustración A3.11: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA2 en muestra Catalina 008	109
Ilustración A3.12: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA1 en muestra El Mèdano 216	109
Ilustración A3.13: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA1 en muestra El Mèdano 216 entre 2000 a 4000 cm^{-1}	110
Ilustración A3.14: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA1 en muestra El Mèdano 216	110
Ilustración A3.15: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA1 en muestra El Mèdano 216 entre 2000 a 4000 cm^{-1}	110
Ilustración A3.16: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA1 en muestra Los Vientos 123	111
Ilustración A3.17: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA2 en muestra Los Vientos 123	111
Ilustración A3.18: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA2 en muestra Los Vientos 123	111
Ilustración A3.19: Espectro Raman obtenido en burbuja de tres inclusiones vítreas de una MIA en muestra Los Vientos 123 entre 2000 a 4000 cm^{-1}	112
Ilustración A3.19: Espectro Raman obtenido en vidrio de tres inclusiones vítreas de una MIA en muestra Los Vientos 123 entre 2000 a 4000 cm^{-1}	112

Ilustración A4.1: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 567.....	113
Ilustración A4.2: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 567.....	113
Ilustración A4.3: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 568	114
Ilustración A4.4: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 568	114
Ilustración A4.5: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 568	115
Ilustración A4.6: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 569	115
Ilustración A4.7: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 569	116
Ilustración A4.8: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en Catalina 008	116
Ilustración A4.9: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en Catalina 008	117
Ilustración A4.10: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en Los Vientos 123.....	117
Ilustración A4.1: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en Los Vientos 123.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Resumen de datos de condritos carbonáceos en estudio, oficializados.....	1
Tabla 3.4a: Tipos de inclusiones refractarias.	20
Tabla 3.4b: Ocurrencia de minerales más representativos presentes en cóndrulos, CAIs y matriz de condritos. (abun: abundante; menor; rara)	21
Tabla 3.5: Resumen de abundancia de inclusiones refractarias, cóndrulos, Fe-Ni metálico y otras propiedades clave de grupos de condritos.	22
Tabla 3.6: Características texturales de los condritos carbonáceos	24
Tabla 4.1a: Características macroscópicas de condritos registrados.	35
Tabla 4.2a: Fases minerales y sus respectivos máximos representativos en Raman (Los picos alfa, aparecen subrayados; El resto de los picos corresponden a picos beta, los que no se identificaron en todas las muestras).	42
Tabla 4.3: Parámetros obtenidos de ajuste polinómico inverso (F ID/IG: razón entre las amplitudes de las banda D y G, respectivamente).....	48
Tabla 4.4: Familias de inclusiones vítreas estudiadas.....	54
Tabla 4.5: Porcentajes modales de los condritos estudiados	68
Tabla 4.6a: Minerales reconocidos en Los Vientos 123.....	76
Tabla 4.6b: Minerales reconocidos en El Médano 216.....	76
TABLA 4.6c: Minerales reconocidos en Catalina 008.....	77
Tabla 5.2: Susceptibilidad magnética de El Médano 216 y muestras asociadas.....	86

I. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Alrededor de 40.000 toneladas de material extraterrestre cae anualmente a la tierra del cual solo un 1% es recuperable (Hutchison, 2004). La sistematización de campañas anuales de búsqueda en áreas de alta densidad de meteoritos, como El Médano, Catalina, Los Vientos y Paposo, ubicadas en el Desierto de Atacama, región de Antofagasta, han contribuido significativamente al incremento de la colección de meteoritos chilena. Ésta actualmente cuenta con 1.301 meteoritos de los cuales 193 corresponden a meteoritos hallados solo en este último año, según la base de datos obtenida en el Meteoritical Bulletin (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>), organismo encargado de oficializar los nuevos hallazgos de meteoritos en el mundo, actualizado al 6 de diciembre del 2018. Del total del registro nacional, 23 meteoritos son del tipo condrito carbonáceo.

Las caídas de los meteoritos, generan transformaciones del cuerpo original, este se fragmenta al entrar a la atmósfera terrestre. Las características que influyen en la forma en que estas piezas se encuentran en superficie, depende principalmente de las particularidades del meteoroide, las que determinan el momento de ruptura, el número de fragmentos producidos, el tamaño, entre otras características (Casado, 2012). Para atribuir fragmentos a un mismo evento de caída, es necesario determinar sus características cualitativas y cuantitativas, para realizar un emparejamiento. Con estas se puede reconstruir una elíptica de distribución (Strewnfield), la cual permite describir su dirección de caída y sentido (Benoit et al., 2000). Es así como el estudio de diferentes fragmentos de meteoritos encontrados en un sector específico y su emparejamiento, permiten asociarlos a un mismo evento de caída, con ello caracterizar su elipse de distribución permitirá comprender de mejor manera el fenómeno de entrada de un cuerpo a nuestro planeta (Casado, 2012).

Los condritos de tipo carbonáceos son los meteoritos más complejos que se conocen, poseen una gran variedad de componentes, muchos de los cuales aún no se tiene conocimiento sobre sus condiciones de formación ni su relación con los procesos que dieron origen al sistema solar. Las moléculas orgánicas más antiguas que pueden ser estudiadas en laboratorio son traídas a la Tierra justamente gracias a la caída de estos (Gilmour, 2003). En el pasado algunos investigadores han creído encontrar un origen biológico a estos componentes orgánicos (McKay et al., 1996), sin embargo, hasta la fecha, no ha sido comprobado y éstos han sido atribuidos a contaminación terrestre (Stephan et al., 2003).

Es así es como los condritos carbonáceos resultan ser un laboratorio natural que contiene moléculas orgánicas producto de la evolución química de nuestro sistema solar. Comprender la fuente de estas moléculas orgánicas en meteoritos, en particular sus cuerpos parentales asteroidales, la nebulosa solar primitiva y los procesos físico-químicos involucrados en su formación, han constituido una de las principales motivaciones de investigación en el mundo de la astrobiología y las ciencias planetarias. Este trabajo es pionero en esta área de investigación.

1.2 MUESTRAS EN ESTUDIO

El museo del meteorito ubicado en San Pedro de Atacama, Chile, cuenta con una colección que supera las 3.200 muestras de meteoritos encontrados en el desierto de Atacama, las que son estudiadas, clasificadas y certificadas por tres instituciones científicas: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, *The University of California, Los Angeles (UCLA)* (E.E.U.U) y *European Centre Research And Teaching In Geosciences De L'environnement (CEREGE)* (Francia). Seis fragmentos de condritos carbonáceos fueron donados por el museo del meteorito al repositorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), para ser estudiados. Las muestras corresponden a Catalina 008, El Médano 216 y Los Vientos 123, oficializados en el Meteoritical Bulletin (Tabla 1.1). Los otros tres no se han clasificado, aunque se atribuyen a fragmentos del meteorito El Médano 216, según su descubridor, Rodrigo Martínez De Los Ríos.

Tabla 1.1: Resumen de datos de condritos carbonáceos en estudio, oficializados. W: Grado de meteorización, χ : Susceptibilidad magnética (10^{-9} m³/kg), $\Delta^{17}\text{O}$: Isotopía de oxígeno (‰), Mod: moderado, Mín: mínimo.

Nombre	Tipo	W	Masa (g)	χ	$\Delta^{17}\text{O}$	Referencia
Catalina 008	CO3	Mod.	98	4.05	-4.84	MB. No. 102 (2013)
El Médano 216	CO3	Mín.	1323	4.46	-	MB No. 103 (2014)
Los Vientos 123	CO3.1	Bajo	575	4.74	5.04	MB No.105 (2016)

Catalina 008: Fue encontrado en Antofagasta, Chile, el 3 de Julio del 2011, por Rodrigo Martínez en el Desierto de Atacama. Se observa como una roca oscura con

corteza de fusión parcialmente conservada. Su petrografía fue realizada por J. Gattacceca (CEREGE, Francia).

El Médano 216: Encontrado en Antofagasta, Chile, el 22 de Junio del 2011, por Rodrigo Martínez en el Desierto de Atacama. Se observa como una roca marrón. Su estudio petrográfico fue realizado por J. Gattacceca (CEREGE, Francia). Las muestras RM 567, RM 568 y RM 569, corresponden, en principio, a fragmentos asociados a la misma caída de este meteorito, ya que fueron encontrados dentro de la elíptica de distribución asociados a los fragmentos principales de El Médano 216. Eso no necesariamente es así, puesto que dentro de una misma elipse de dispersión se pueden encontrar fragmentos de distintas caídas (McCoy et al., 1995; Shaddad et al., 2010). También, se han reportados casos de caídas de meteoritos completamente heterogéneos (Verish, 2001), lo que complica el emparejamiento y requiere de dataciones para su resolución (Benoit et al., 2000).

Los Vientos 123: Fue encontrado en Antofagasta, Chile, el 27 de Enero del 2015, por Rodrigo Martínez en el Desierto de Atacama. Se observa como una roca con corteza de fusión, que al ser cortada, revela un interior oscuro y se pueden observar pequeños cóndrulos. El estudio petrográfico fue realizado por J. Gattacceca (CEREGE, Francia), posee estudios con espectroscopía Raman en materia orgánica poli-aromática (Bonal et al., 2016).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Estimar atributos de la nebulosa solar primitiva, a través del estudio y la caracterización de fases minerales y componentes en inclusiones vítreas de 3 meteoritos carbonáceos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar las inclusiones vítreas presentes en cristales de olivino de 6 muestras de condritos carbonáceos tipo CO
2. Interpretar componentes presentes en inclusiones vítreas con espectroscopía Raman

3. Comparar inclusiones vítreas en términos químicos, utilizando resultados de análisis realizados con ablación láser ICP-MS
4. Clasificar petrográficamente las muestras asociados a la elipse El médano 216
5. Comparar los resultados de la clasificación de las muestras asociadas a la elipse de dispersión de El Médano 216 con los resultados de los fragmentos clasificados inicialmente
6. Identificar la mineralogía constituyente de 3 condritos carbonáceos, utilizando resultados de análisis con difracción de rayos x

1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO

- I. Las muestras pueden presentar componentes orgánicos asociadas a la formación de la nebulosa solar
- II. Los condritos carbonáceos revelan patrones de fraccionamiento asociados a procesos de condensación ocurridos en la nebulosa solar primitiva
- III. Las muestras RM 567, RM 568 y RM 569 corresponden a condritos carbonáceos
- IV. Las muestras RM 567, RM 568 y RM 569 corresponden a fragmentos de la elipse de El Médano 216

1.5 TRABAJOS ANTERIORES

Una familia de inclusiones vítreas (*MIAs*) es un fundido atrapado en irregularidades de un cristal durante su formación, en un mismo tiempo. Los primeros estudios fueron realizados por [Roedder \(1981, 1984\)](#), quien propuso distintas formas de crecimiento de un cristal y los diferentes tipos de *MIAs* a través de su estudio petrográfico.

Basada en estudios de *MIAs* en olivinos ([Kurat, 1997](#); [Varela, 2002](#)) encontrados en cóndrulos y matriz de meteoritos carbonáceos y meteoritos ordinarios, la formación de *MIAs* se asocia al atrapamiento de líquidos remanentes desde una delgada capa líquida de interfase, que sostiene el crecimiento de cristales

de olivino desde el vapor de la nebulosa solar (Varela et al., 2005). Este modelo se denominó *The primary Liquid Condensation Model (PLCM)* (Varela & Kurat, 2009). La implicancia de esto radica en que bajo este supuesto, el estudio de inclusiones permite estimar la composición del líquido primario que formó los cristales de olivino constituyentes de meteoritos, condensados desde la nebulosa solar primitiva.

La espectroscopía Raman es una técnica no destructiva que permite identificar fases mineralógicas, a través de espectros obtenidos por excitación de superficies minerales con una luz de 514 nm. Cada fase mineral tiene picos específicos que le caracterizan, los que pueden ser identificados en espectros obtenidos con esta técnica, con lo que se puede interpretar su presencia en la muestra analizada.

El metamorfismo termal experimentado en condritos (Van Schmus, 1967) puede ser estimado por la determinación de estructuras modificadas en materia carbonosa poli-aromática presente en la matriz, identificadas con espectroscopía Raman. Bonal et al., (2016) estudió una serie de meteoritos utilizando esta técnica, entre ellos el meteorito Los Vientos 123, una muestra de esta investigación, obteniendo espectros en granos de matriz que correlaciona con el metamorfismo experimentado. Basada en este estudio, este trabajo pretende ampliar el uso de esta técnica al estudio de inclusiones y evaluar su aplicación para estos fines.

Varios estudios han buscado estandarizar la química de distintos meteoritos, a través del análisis de abundancia de elementos químicos en roca total y su promedio por categoría de meteorito, respecto de la clasificación establecida para meteoritos (Krot et al., 2014). Esto ha permitido establecer una abundancia promedio de elementos químicos, por tipo de meteoritos. El trabajo realizado por Kallemeyn & Wasson, (1981), establece un método de clasificación de condritos carbonáceos asociados a su composición de roca total. Este estudio se basa en esta clasificación química para comparar la química de inclusiones vítreas, obtenidas con Ablación Láser, respecto de la química de roca total. Buscando identificar posibles patrones de fraccionamiento asociados a la formación de olivinos como condensado de una nebulosa solar.

II. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1 ESTADO DEL ARTE DEL MATERIAL DE ESTUDIO Y METODOLOGÍAS

El primer paso de este trabajo de investigación comenzó con una revisión bibliográfica sobre condritos carbonáceos, con el objetivo de contextualizar las principales discusiones que se desarrollan en la actualidad en torno a este tipo de meteoritos y sobre los estudios previos en ellos. Esto permitió establecer algunas preguntas e hipótesis que motivaron las primeras propuestas de investigación sobre condritos carbonáceos y los primeros objetivos de este trabajo.

2.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La preparación de muestras permitió determinar la calidad del material, esto es evaluar la presencia de inclusiones para ser analizadas, revisar que las muestras presentaran baja alteración que permitiera estudios petrográficos, entre otras cosas, y con ello estimar los alcances de este trabajo.

Con los 6 fragmentos de condritos carbonáceos que se disponen, se realizaron 6 secciones delgadas de doble pulido (90 μm) en el Laboratorio de Cortes de la Universidad de Chile. Posterior a ello, se realiza un estudio petrográfico para determinar la presencia o no, de inclusiones vítreas y las características de éstas, para determinar la factibilidad de ser estudiadas con Espectroscopía Raman y Ablación Láser ICP-MS.

El desarrollo de estos cortes y en general la manipulación de estas muestras, significan un desafío en términos del alto riesgo de contaminación terrestre que implica. Es por ello, que para disminuir la pérdida de material durante el corte, se utilizó una sierra nueva y para evitar alteración, se utilizó alcohol en vez de agua en el proceso de corte.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE INCLUSIONES VÍTREAS

Una vez listos los cortes transparentes de doble pulido, se realizó un mapa de cortes, utilizando un scanner de alta resolución marca *EPSON Perfection V370*

Photo. Utilizando un microscopio óptico *Olympus Model BX41*, del Laboratorio de Inclusiones Fluidas y Vítreas de la Universidad de Chile, se realizó un barrido de los cortes, en búsqueda de inclusiones vítreas. Estas se buscaron principalmente en cristales de olivino y piroxeno, pues constituyen la mineralogía primaria de condritos.

Empleando un campo de visión de entre 0,25 mm a 0,1mm, se pudo identificar familias de inclusiones vítreas primarias, utilizando los criterios descritos por **Roedder (1984)**, las que fueron ubicadas en el mapa de cortes, para facilitar su identificación (**ver Anexo I**).

Una vez determinada la efectiva presencia de inclusiones vítreas en las muestras de estudio, se caracterizaron, determinando los tipos de familias de inclusiones vítreas, en base a los componentes que presentaban. Esto significa, determinar la presencia de fundido, cristales y burbujas en las familias de inclusiones identificadas en las muestras.

Posterior a esto y para fines de esta investigación, se seleccionaron las familias de inclusiones vítreas que poseían 2 o más inclusiones vítreas primarias, que presentaban fase gaseosa, como posibles candidatas para ser analizadas en laboratorios de *Virginia Tech*, USA.

2.4 ESPECTROSCOPIA RAMAN

La espectroscopía Raman se ha utilizado durante mucho tiempo como una herramienta en el análisis de inclusiones fluidas y vítreas debido a la alta resolución que posee, a la baja cantidad de material que requiere y a su versatilidad en la medición de las fases fluidas y solutas/sólidas dentro de una inclusión no expuesta (**Frezzotti, 2012**).

Es una técnica no destructiva, que constituye una poderosa herramienta para determinar la presencia de CO₂ en inclusiones vítreas y fluidas, pues posee una huella espectral muy característica y fácil de reconocer en los espectros obtenidos con esta técnica (**Lamadrid et al., 2017**).

2.4.1 Metodología Raman

En *Virginia Tech*, USA, el Dr. Daniel Moncada, realizó análisis utilizando el equipo *JY Horiba HR800*, equipado con un láser verde (514 nm) del *Vibrational Spectroscopy Lab* (Blacksburg, Virginia). Con ello obtuvo espectros Raman, a temperatura ambiente (~22 °C). La calibración se realizó con un suministro comercial de CO₂ (99.999% de alta pureza), previo al experimento.

2.4.2 Reducción de espectros

Una vez obtenidos los espectros, se trabajaron utilizando el software *Crystal Sleuth*, proporcionado por RRUFF™ Project (ver Ilustración 2.4). Este software está desarrollado para la investigación y análisis de espectros, capaz de analizar y manipular paquetes de datos Raman. Éste utiliza algoritmos que permiten remover el ruido de fondo a través de una interface que también permite comparar múltiples espectros. También permite localizar automática y manualmente posiciones de máximos en espectros y reconocer minerales desde una base de datos.

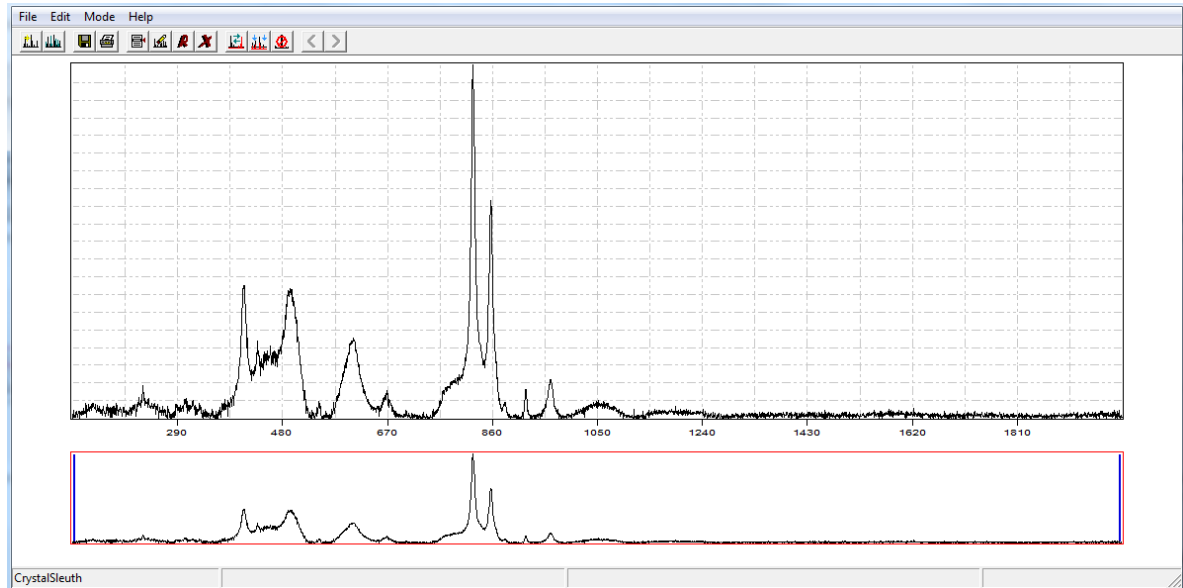


Ilustración 2.4: Interface del software *Crystal Sleuth* para análisis de espectros Raman

2.4.3 Interpretación de espectros

El reconocimiento de los máximos, se hizo principalmente de forma manual, utilizando el software *Crystal Sleuth* para determinar las posiciones de los picos de los espectros Raman y posteriormente se asignaron minerales en base a bibliografía seleccionada y a la base de datos disponible en el mismo programa.

La fuente principal de información se obtuvo de [Frezzotti et al., \(2012\)](#). Trabajo en el cual se determinaron los patrones de una serie de compuestos y minerales, con sus máximos representativos, los que se correlacionaron con los picos identificados manualmente en los espectros y de este modo se interpretó la presencia de los componentes en las inclusiones estudiadas.

2.5 ABLACIÓN LÁSER ICP-MS

Ablación Láser ICP-MS es una técnica, que consiste en remover material de la superficie de un sólido mediante la irradiación con un rayo láser, ionizando la muestra, para posteriormente ser analizados con un espectrómetro de masa. Esta herramienta se puede utilizar para analizar inclusiones que no han sido expuestas (pero que deben estar cerca de la superficie para poder remover el cristal huésped y acceder a la composición de la inclusión), permitiendo determinar las concentraciones de elementos mayores y elementos traza. Debido a que es una técnica destructiva, debería ser el paso final en el proceso analítico de las inclusiones vítreas.

Este análisis fue realizado por el Dr. Daniel Moncada, en el “*Laser Ablation ICP-MS Laboratory*” de *Virginia Tech* (Blacksburg, Virginia), utilizando un equipo *Agilent 7500ce ICP-MS* que posee un *GeoLas 193 nm ArF excimer laser*. El láser se enfoca con un microscopio polarizado *Olympus*, equipado con oculares para ver muestras en luz reflejada y transmitida.

2.5.1 Procedimiento con LA-ICP-MS

El instrumento fue calibrado utilizando un estándar de vidrio NIST 610, que se analizó a intervalos regulares durante cada sesión analítica para corregir la descalibración del instrumento con el uso. Las muestras fueron irradiadas en una celda de ablación de 1.5 cm³, utilizando un láser de 150 mJ. El tamaño del rayo se ajustó dependiendo del tamaño de la inclusión, procurando irradiar y ablacionar la inclusión completamente. El material removido fue transportado desde la celda de ablación por un flujo de gas de He con una velocidad de 0.7 mL/min y posteriormente con gas de Ar a una velocidad de 1.03 L/min antes de introducirlo en el plasma. El ICP-MS fue operado a una potencia de 1500 W, con un tiempo de permanencia de 10 ms por isótopo.

Se analizaron 39 isótopos en inclusiones vítreas con burbuja encontradas en cristales de olivino. Se obtuvieron concentraciones en ppm de Na²³, Mg²⁵, Al²⁷, Si²⁸, K³⁹, Ca⁴⁰, Ti⁴⁹, V⁵¹, Cr⁵², Mn⁵⁵, Fe⁵⁶, Co⁵⁹, Ni⁶², Cu⁶³, Ga⁶⁹, Ge⁷², Ge⁷⁴, As⁷⁵, Rb⁸⁵, Sr⁸⁸, Y⁸⁹, Zr⁹⁰, Nb⁹³, Mo⁹⁸, Rh¹⁰³, Ag¹⁰⁷, Ba¹³⁸, La¹³⁹, Ce¹⁴⁰, Nd¹⁴³, Sm¹⁴⁷, Eu¹⁵³, Ta¹⁸¹, W¹⁸², Re¹⁸⁵, Au¹⁹⁷, Pb²⁰⁸, Th²³² y U²³⁸.

2.5.2 Procesamiento de datos

Los datos sin procesar de LA-ICP-MS se redujeron utilizando el *Software “AMS Laser Ablation ICP-MS”* (ver Ilustración 2.5) (Pelch, 2015), el cual posee una

plataforma para la reducción de datos de fase sólida e inclusión fluida. También fue necesario emplear *Microsoft Excel*, para correlacionar las familias de inclusiones vítreas analizadas y normalizar las concentraciones obtenidas. Posterior a ello, se utilizó el programa *JMP Statistical Discovery™* desarrollado por SAS, para realizar gráficos comparativos entre las composiciones de familias de inclusiones.



Ilustración 2.5: Interface del *software AMS*, para análisis de inclusiones analizadas con *Laser Ablation ICP-MS*

2.5.3 Interpretación de datos

Del procesamiento de datos, se realizan gráficos de intensidad de señal respecto del tiempo de análisis para cada isótopo analizado.

La interpretación de los datos obtenidos, se realizó principalmente en base a la bibliografía seleccionada, considerando trabajos anteriores que utilizan LA-ICP-MS para analizar cóndrulos (Bland et al., 2003; Pack et al., 2005) y relacionándolo con teorías de condensación de rocas (Lodders, 2003; Ebel, 2006; Varela & Zinner, 2018).

Se realizó una comparación entre las concentraciones de elementos de roca total en condritos tipo CO, normalizados a la concentración de Mg y a la concentración de elementos característica de condritos tipo CI (Kallemeyn & Wasson, 1981), estos últimos considerados iguales a la composición de la fotosfera solar, sin contar sus elementos volátiles.

El procedimiento para replicar las comparaciones químicas de roca total para condritos propuesto por Kallemeyn & Wasson, (1981), y aplicarlas a las inclusiones vítreas estudiados con LA-ICPMS, consistió en normalizar los resultados obtenidos a 100% óxidos utilizando el *software* AMS. De esta normalización se obtuvo datos de concentración de isótopos en partes por millón, que se utilizaron para este fin. Esto se realiza de esta manera, pues los análisis no poseen un estándar interno, de modo que las concentraciones en ppm, corresponden a abundancias asumiendo a cada elemento su presencia en forma de óxidos. Lo mencionado anteriormente constituye una gran limitante, pero se utiliza a pesar de esta incertidumbre para poder obtener valores referenciales comparables.

De la normalización de los datos a 100% óxidos, se obtiene un valor de concentración de referencia en partes por millón para cada elemento. Ésta es normalizada a la concentración de magnesio en ppm de cada inclusión respectivamente. Ambas proporciones fueron posteriormente normalizadas a las concentraciones del mismo elemento, obtenidos en roca total promedio de condritos carbonáceos tipo CI, también normalizadas a magnesio de los mismos, las que se graficaron para ser comparadas entre sí. Esto resumido en la siguiente ecuación:

$$\frac{\frac{[\text{Elemento químico en Inclusión vítrea (ppm)}]}{[\text{Mg de Inclusión vítrea (ppm)}]}}{\frac{[\text{Elemento químico en CI promedio (ppm)}]}{[\text{Mg en CI promedio (ppm)}]}}$$

Del mismo modo la concentración de cada elementos químico promedio de roca total de condritos tipo CO (extraído de Kallemeyn & Wasson, (1981)), se normalizó a la concentración de magnesio promedio de los mismos, obteniendo una segunda proporción entre los elementos químicos respecto del magnesio. El

que, al igual que el caso anterior, se comparó con la concentración promedio del mismo elemento en un condrito tipo CI, en relación a su concentración promedio de magnesio. Esto se representa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\frac{[\text{Elemento químico en CO promedio (ppm)}]}{[\text{Mg en CO promedio (ppm)}]}}{\frac{[\text{Elemento químico en CI promedio (ppm)}]}{[\text{Mg en CI promedio (ppm)}]}}$$

De este modo, para cada inclusión vítrea, se tiene una forma de comparar el fraccionamiento isotópico del líquido condensado la nebulosa, evidenciado en la composición de la inclusión vítrea estudiada y se compara con el fraccionamiento químico de un condrito tipo CO promedio, respecto de la fotosfera solar. Esta misma comparación podría revelar información sobre la temporalidad de eventos de formación en meteoritos, considerando que la composición de una inclusión vítrea se asociará temporalmente a eventos de condensación de la nebulosa solar, que temporalmente son necesariamente previos a la formación de la roca completa, por lo que su química correspondería al resultado de todos los procesos de formación de todos los componentes que constituyen al meteorito en su totalidad y su matriz.

Se graficaron solo los elementos de los cuales se realizaron análisis, previa revisión de los límites de detección (LOD) de cada elemento. Aunque algunos elementos fueron analizados, tales como el Au o el As, en la mayoría de los casos, las concentraciones de estos elementos eran menores a los LOD. En estos casos se graficó el dato disponible de concentración de elementos de roca total CO, pero no se graficó dato de la inclusión analizada. No se graficó ningún dato nulo obtenido, solo las concentraciones distintas a cero que eran mayores al LOD. Para una mejor comprensión de los elementos trazas, los gráficos se presentan en escala logarítmica.

Con esta relación, este trabajo propone una forma de estimar una posible temporalidad en términos químicos. Esto considerando que las inclusiones se formaron durante la formación de olivinos, estas al ser considerados condensados de la nebulosa solar, temporalmente pertenecerían a una etapa inicial de formación de los componentes de meteoritos, el que posteriormente, producto de otros procesos de la nebulosa, tales como la acreción de sus componentes, formaron al condrito en su totalidad. Por ende la comparación química de una inclusión en un componente con la química de roca total, revelaría una evolución de las condiciones físico-químicas en el tiempo.

2.6 PETROGRAFÍA Y CLASIFICACIÓN

Considerando la gran dificultad para realizar la petrografía con las secciones de doble pulido realizadas, por su mayor grosor, se realizaron secciones delgadas (30 μm) de los 6 fragmentos de condritos carbonáceos, con los rechazos excedentes de las secciones realizadas anteriormente, en el Laboratorio de cortes de la Universidad de Chile.

Una vez listos, se realiza la petrografía de los meteoritos no clasificados, RM567, RM568 y RM569, utilizando imágenes obtenidas por una cámara en un microscopio óptico marca Olympus, de la sala de petrografía del SERNAGEOMIN, a cargo de la Dra. Laura Varas.

2.6.1 Metodología de trabajo

Considerando las dimensiones de cada sección delgada, se escogieron entre 5 y 7 campos visuales representativos. De ellos se capturaron imágenes con campos de visión de 2 mm de radio, en luz transmitida, luz polarizada y luz reflejada (ver Ilustración 2.6a).

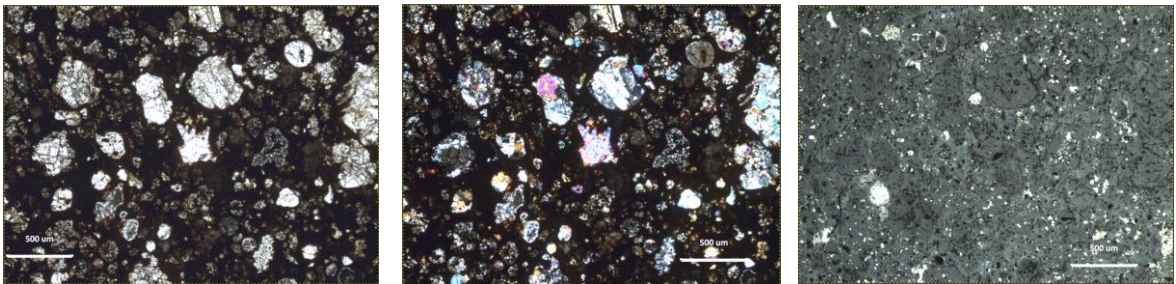


Ilustración 2.6a: Microfotografía en luz transmitida a nicols paralelos, nicols cruzados y luz reflejada de El Médano 216 (De izq. a der.).

Se utilizó el software libre GIMP2, para tratar las imágenes capturadas de las secciones delgadas de cada meteorito. Con éste, se pudo realizar un conteo de píxeles de las imágenes utilizando selectores de color y criterios visuales. Esto permitió calcular porcentajes modales de los diferentes componentes de un condrito tipo CO, basándose en los criterios texturales de clasificación (Weisberg et al., 2006) y que se presentan en el marco teórico de este trabajo.

Primero se trabajaron las imágenes en luz reflejada. Con un selector de color y un Umbral B/N medio (ver Ilustración 2.6b: Interface de software GIMP2. Selección de píxeles asociados a minerales opacos en microfotografía de El Médano

216), se estimó el porcentaje de metales, seleccionando los píxeles con colores asociados a los metales presentes en las muestras (troilita, kamacita y cromita).

Con un selector de color y un Umbral B/N muy bajo, se seleccionaron los píxeles más oscuros, los que se asociaron a porosidad del condrito. Utilizando un histograma, herramienta proporcionada por GIMP2 (ver Ilustración 2.6c), se obtiene la cantidad de píxeles asociada a la selección realizada, que se compara con la cantidad total de píxeles de la imagen completa. De esta manera se calculan los porcentajes modales para opacos y porosidad de las secciones.

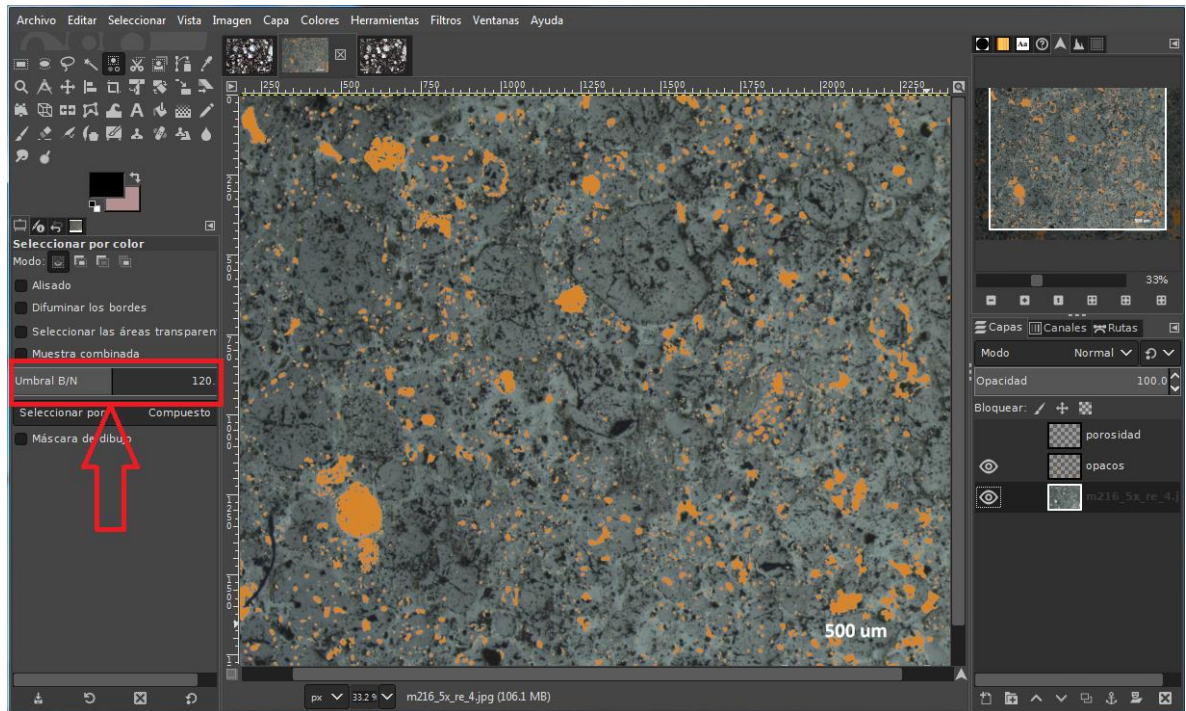


Ilustración 2.6b: Interface de software GIMP2. Selección de píxeles asociados a minerales opacos en microfotografía de El Médano 216
*(Flecha indica herramienta Umbral B/N para escoger tolerancia de colores).

Este criterio respecto a la tolerancia de colores (umbral B/N) se establece de esta manera, pues los metales a luz reflejada poseen colores claros que resaltan respecto de los minerales silicatados en colores grises más oscuros. De esta manera el umbral B/N se escoge medio para abarcar desde los colores blanco (asociado a kamacita), hasta los colores beige (asociado a troilita) y blanco grisáceo (asociado a cromita). Para determinar la porosidad, se considera que un píxel completamente negro se asociará a zonas del corte transparente que no reflejan luz. De este modo

se escogen los píxeles más oscuros y se aplica una baja tolerancia, para no seleccionar los componentes vítreos de la muestra que también poseen los colores más oscuros (pero no completamente negros) a luz reflejada.

Las imágenes a luz transmitida y polarizada, se trabajaron de la misma manera. El conteo de píxeles que se realizó para cada imagen, se promedió para obtener una estimación del porcentaje medio de matriz de cada muestra estudiada con este método. Utilizando un selector de color, se seleccionaron los píxeles con los colores que se interpretaron como matriz (ver Ilustración 2.6d).

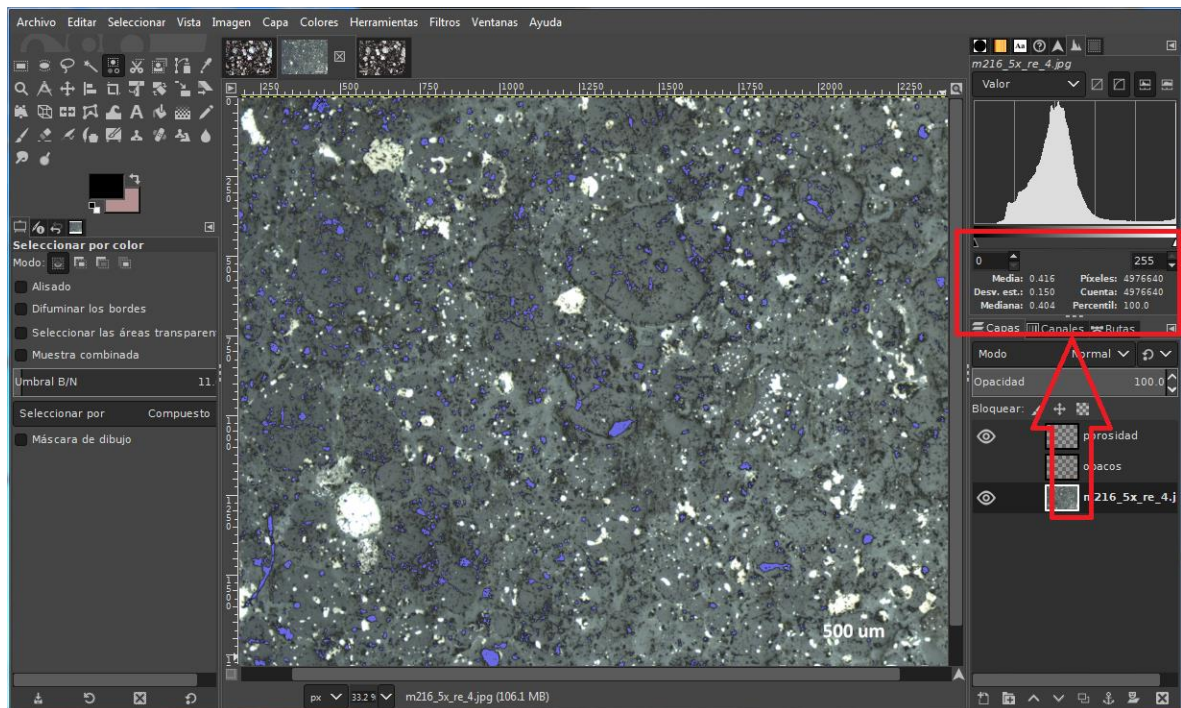


Ilustración 2.6c: Interface de software GIMP2. Selección de píxeles asociados a porosidad en microfotografía de El Médano 216.

*(Flecha indica herramienta histograma para conteo de píxeles).

Una vez estimado el porcentaje de matriz en las microfotografías a luz transmitida, se utilizaron criterios visuales a microscopio óptico, descritos previamente por Rubin (1989), para clasificar los tipos de componentes presentes en las muestras, determinar su porcentaje modal y realizar una clasificación basada en criterios petrográficos. Para el conteo de píxeles, cálculo de porcentajes de opacos, matriz y porosidad, registro de componentes y sus respectivas abundancias, se utilizó una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

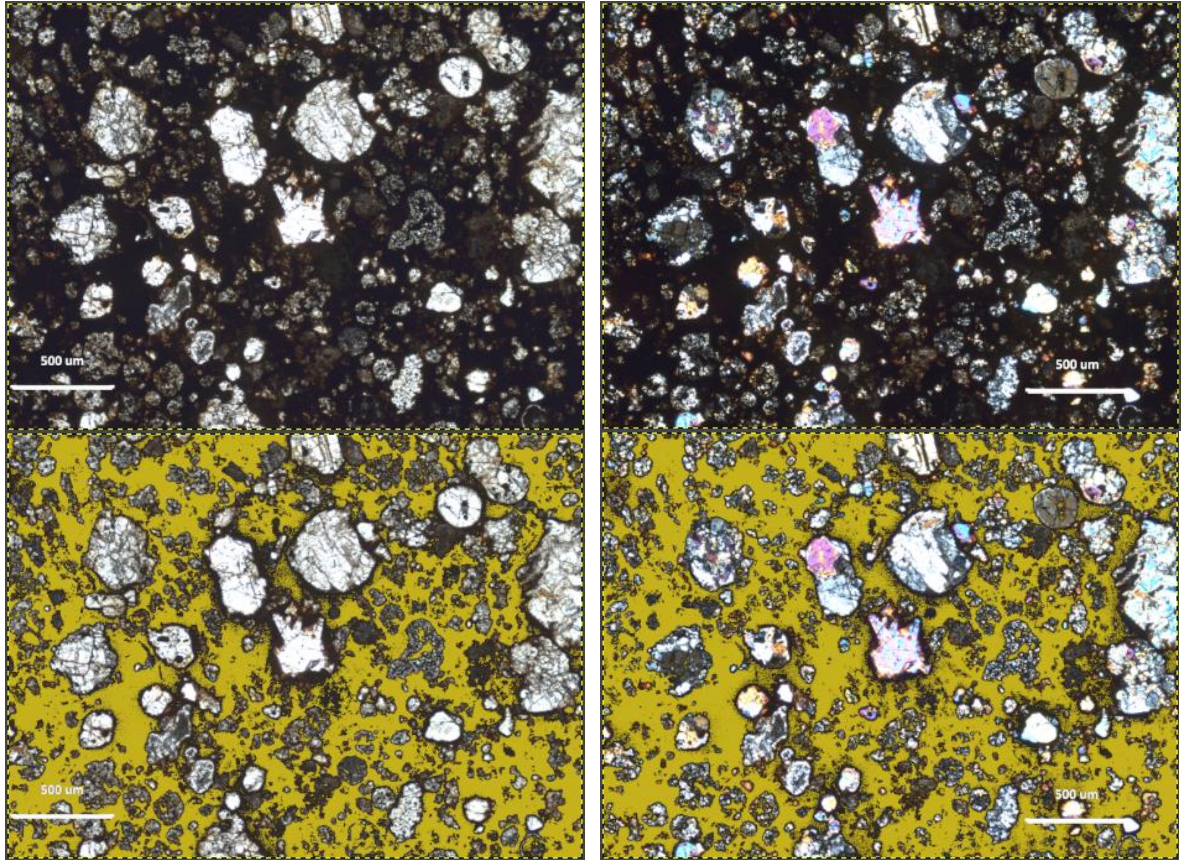


Ilustración 2.6d: Microfotografía en luz transmitida de El Médano 216, selección de píxeles interpretados como matriz.

*(Izquierda: nícoles paralelos, derecha: nícoles cruzados)

2.6.2 Clasificación de los condritos

Con la proporción de componentes obtenida del procedimiento anterior, se realizó una primera clasificación de los meteoritos, utilizando los criterios de clasificación descritos por [Scott & Krot \(2014\)](#). Posteriormente, se determinaron los parámetros de clasificación de cada meteorito, obteniendo el tipo petrológico ([Van Schmus & Wood, 1967](#)), el metamorfismo de choque ([Scott et al., 1992](#); [Stöffler & Keil, 1991](#)) y el grado de meteorización terrestre ([Wlotzka, 1993](#)).

2.6.3 Emparejamiento

Utilizando los criterios descritos por [Bischoff & Geiger \(1995\)](#), se realiza una comparación de los parámetros petrográficos de clasificación de estado de choque y

meteorización. Datos de susceptibilidad magnética y densidad obtenidos por investigadores de la Universidad de Atacama (Pinto et al., 2018), también se utilizaron para poder comparar las muestras.

Con todos los resultados expuestos anteriormente, se realizó emparejamiento de las muestras de meteorito no clasificados RM 567, RM 568 y RM 569, con respecto a los parámetros de clasificación obtenidos de El médano 216, sumado a la información extraída del *Meteoritical Bulletin* y los datos disponibles de otros estudios de emparejamiento de estas muestras, realizadas por Pinto et al. (2018).

2.7 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Con el objetivo de poseer un mayor entendimiento de la mineralogía de roca total presente, se prepararon muestras de polvo tamaño arena fina en el Laboratorio de Molienda del SERNAGEOMIN, con un mortero de ágata, de los meteoritos Catalina 008, El Médano 216 y Los Vientos 123. Una vez preparados los polvos, estos fueron analizados en el Laboratorio de Mineralogía y Microscopía del SERNAGEOMIN, a cargo de la Dra. Eugenia Fonseca.

2.7.1 Metodología

Una vez recibidos los polvos, se realizó una segunda molienda en mortero de ágata bajo 200 mallas. El barrido se realizó en un difractómetro marca *Panalytical*, modelo *X`Pert PRO*. Este instrumento ocupa radiación $K\alpha$ de Cu de corriente 40 mA y 45 kV de voltaje. El rango de barrido utilizado fue entre 0° y 100° .

2.7.2 Interpretación

Los gráficos de difracción de rayos X, fueron obtenidos directamente del programa de interpretación *High Score Plus*, el que permiten hacer análisis cualitativos y cuantitativos utilizando el método *Rietveld*. De este análisis se obtuvieron los valores de espaciamiento cristalográfico, intensidad *peak* y ángulo 2θ , los que fueron comparados con la base de datos del software utilizado y en base a un porcentaje de coincidencia se obtuvo tablas donde se incluyó las posibles fases mineralógicas presentes.

2.8 ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE LOS DATOS

Con los datos obtenidos en las etapas anteriores, se interpretan posibles componentes en inclusiones vítreas mediante la interpretación de los máximos

identificados en los espectros obtenidos con técnica Raman, según la metodología propuesta.

Las concentraciones de elementos mayores y traza, obtenidas con Ablación Láser ICP-MS, se compararon entre las diferentes muestras analizadas y se buscaron patrones de fraccionamientos para interpretar posibles procesos de condensación y diferenciación de elementos desde la nebulosa solar.

El estudio petrográfico realizado con los tratamientos de imágenes, previamente explicadas, permitió establecer una clasificación de las muestras no registradas asociadas a la elipse de El Médano 216, utilizando criterios petrográficos con microscopía óptica, según la bibliografía propuesta, criterios magnéticos con datos de susceptibilidad magnética, entre otros aspectos como la densidad y la distancia entre las muestras.

Con los resultados de los análisis con difracción de rayos X se pudo determinar la mineralogía de roca total de los meteoritos registrados. Esto sumado a todo lo anterior, se evaluaron las hipótesis previamente establecidas para este trabajo, con lo cual se realizan las conclusiones finales de este estudio.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 DEFINICIONES GENERALES

Un meteorito es un objeto que ha caído a la Tierra desde el espacio. Cuando pasa a través de la atmósfera, genera destellos de luz ("estrellas fugaces"), este fenómeno se denomina meteoro. Pequeños escombros extraterrestres y granos de polvo de cometas también causan este fenómeno.

Un meteorito se define como un objeto sólido y natural, de tamaño mayor a 10 μm , derivado de un cuerpo celeste, que es transportado por medios naturales desde el cuerpo en el que se formó, hasta una región fuera de su influencia gravitacional dominante del mismo y que posteriormente colisionó con un cuerpo natural o artificial más grande que sí mismo (el que también podría ser su cuerpo parental) (Rubin & Grossman, 2010).

Mientras que algunos meteoritos se encuentran inmediatamente después de su caída -por lo que son denominados como "meteoritos caídos" (*falls*)-, la gran mayoría ha permanecido en la Tierra durante decenas de miles de años antes de su descubrimiento, estos son denominados "hallazgos" (*finds*). Del registro mundial de meteoritos, el 2% de los meteoritos corresponden a caídos y 98% a meteoritos encontrados según *The Meteoritical Bulletin* actualizado al 27/10/2018 (<https://meteoritical.org/about-meteorites/meteorites>).

3.2 CLASIFICACIÓN DE METEORITOS

Basado principalmente en las características petrográficas y mineralógicas, en la química de roca total y en las composiciones isotópicas de oxígeno, la clasificación de este material extraterrestre se divide en tres grandes grupos: Condritos, acondritos primitivos y acondritos. Particularmente los condritos se subdividen en 15 grupos, 3 ordinarios (H, L, LL), 8 carbonáceos (CI, CM, CO, CV, CK, CR, CH, CB), 2 enstatita (EH, EL), y los condritos R y K (Weisberg et al., 2006). Esta agrupación proporciona etiquetas descriptivas para clases de meteoritos con orígenes similares, historias de formación que pueden derivarse del mismo cuerpo asteroidal o planetario, y revelan posibles problemas genéticos entre varias clases (Scott & Krot, 2014) (ver Ilustración 3.2).

Clasificación de meteoritos

Weisberg et al, 2006

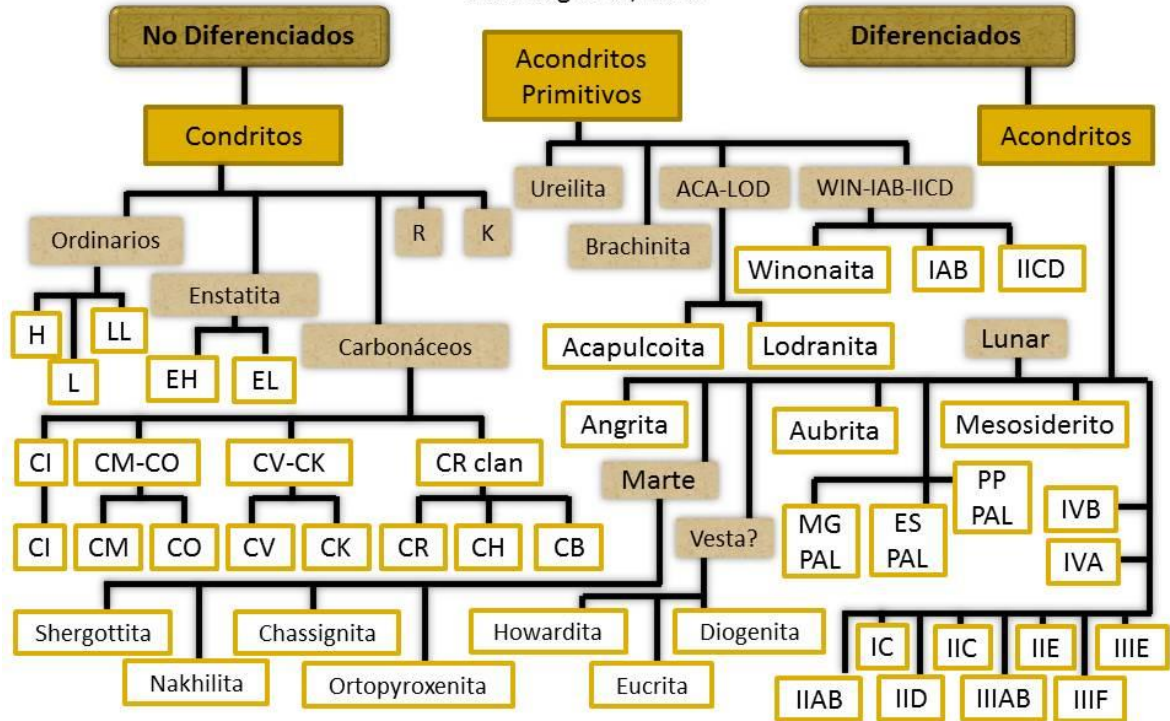


Ilustración 3.2: Clasificación de meteoritos, excluyendo meteoritos no agrupados. (ACA - acapulcoita, LOD - lodranita, WIN - winonaita, MG PAL - grupo principal palasita, ES PAL - Eagle Station palasita, PP PAL - palasita piroxeno)

*Extraído y modificado de [Weisberg et al. \(2006\)](#)

3.3 METEORITOS TIPO CONDRITO

Los condritos son las rocas más antiguas conocidas, asociadas a los orígenes del sistema solar (c. 4567 Ma.). La abundancia de sus elementos químicos no volátiles, es similar a la abundancia de elementos de la fotosfera del sol ([Asplund et al., 2009](#)). Son principalmente ultramáficos en composición, la que consiste principalmente en silicatos de hierro y magnesio. Están constituidos principalmente por cóndrulos, partículas ígneas redondeadas de cristalización rápida (minutos a horas) ([Scott & Krot, 2014](#)), compuestas principalmente por olivino, piroxeno, vidrio y en menor proporción, minerales de Fe-Ni, como kamacita y/o taenita, y troilita, un sulfuro de hierro, que pueden tener tamaños entre 0.01 - 10 mm.

Actualmente, la definición de condrito se ha ampliado con los nuevos hallazgos de meteoritos en la Antártica y en el desierto del Sahara, que presentan características fuera de lo esperado, esto que ha conllevado el cuestionamiento y la modificación de las definiciones establecidas. En general, los condritos son tan diversos en sus características mineralógicas y estructurales, que no es posible describir un condrito típico.

Los componentes principales que constituyen en distintas proporciones a los condritos son: cóndrulos (<5% - 70%), metal Fe-Ni (<0.1 - 70%), inclusiones refractarias (0.01 - 3 vol.% de inclusiones ricas en Ca-Al (CAI) y agregados de olivino ameboides (AOA)) y una matriz de grano fino (1 - 80 %) (Scott & Krot, 2003).

3.4 MINERALOGÍA DE CONDRITOS

Los componentes de meteoritos son muy diversos. En su complejidad, albergan múltiples fases minerales, que componen tanto a sus cóndrulos, Inclusiones Calco-Aluminosas refractarias (CAIs) y matriz.

3.4.1 Inclusiones refractarias ricas en Ca-Al

Las inclusiones calco-aluminosas son objetos sub-redondeados muy irregulares rodeados por capas en sus bordes. Son comunes en meteoritos carbonáceos y poseen importantes pistas sobre los eventos y procesos que tenían lugar antes o durante la formación del Sistema Solar. Basada en su petrografía, textura y mineralogía, se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 3.4a: Tipos de inclusiones refractarias.

Tipo de inclusión	Características principales
Tipo A	De grano fino, abundante en melilita rica en Al. Espinela, hibonita, perovskita y fassaita (Al-, Ti- diópsido) accesorios.
Tipo B	Las más abundantes, pueden tener tamaños mayores a 2 cm. Compuestas por melilita, fassaita, anortita y espinela. Usualmente encierran objetos redondeados de tamaños menores a 1mm.
Tipo C	Ricas en anortita, pobres en melilita. Ocurren como listones poikilíticamente encerrados en piroxeno o masa cristalina fina. Sus texturas revelan solidificación de gotas de fundido.

Forsterítica	Poseen composiciones menores refractarias en las Tipo A, B y C. Olivino, pobre en CaO, y espinela encerrada poikiliticamente en fassaita.
Rica en espinela de grano fino	Interpretadas como agregados de granos de espinela micrométricos, intercrecidos con perovskita, hibonita y rara melilita.
Agregado de olivino aмебоide (AOA)	Compuesto predominantemente por olivino, feldespatoides y piroxenos. Con nódulos esféricos de espinela, ± perovskita, ± melilita.
Agregado de hibonita porosa	Muy raras y esencialmente compuesta por hibonita.
Núcleo fraccionado no identificados (FUN)	Objetos ricos en hibonita en forma de anillos, con anomalías isotópicas, tales como enriquecimiento de ^{48}Ca y ^{50}Ti . Encontrado en algunos tipos de meteoritos carbonáceos

*Extraída y modificada de [Hutchison \(2004\)](#)

3.4.2 *Minerales en condritos*

La diversidad de componentes que constituyen los meteoritos, comprende una amplia gama de fases minerales. Considerando la presencia de éstos en cóndrulos, CAIs y matriz. Los minerales más representativos se presentan a continuación:

Tabla 3.4b: Ocurrencia de minerales más representativos presentes en cóndrulos, CAIs y matriz de condritos. (abun: abundante; menor; rara)

Mineral	Fórmula	Ocurrencia		
		Cóndrulos	CAIs	Matriz
Olivino	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	abun	menor	abun
Enstatita	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_6$	abun	-	abun
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	rara	menor	rara
Diópsido-augita	$(\text{Ca, Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	menor	abun	menor
Gehlenita	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Si,Al})_2\text{O}_7$	-	abun	-
Akermanita	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	-	abun	-

Melilita	$(Ca,Na)_2(Al,Mg)(Si,Al)_2O_7$	-	abun	-
Espinela	$MgAl_2O_4$	rara	menor	rara
Cromita	$FeCr_2O_4$	menor	-	rara
Magnetita	Fe_3O_4	rara	-	menor
Kamacita	Fe,Ni	abun	-	abun
Taenita	FeNi	abun	-	abun
Troilita	FeS	abun	rara	abun

*Extraída y modificada de [Hutchison \(2004\)](#).

El olivino magnésico, enstatita, espinela y taenita son minerales primarios de alta temperatura. La cromita, es la espinela más común presente en condritos. Los minerales fassaita y la solución sólida gehlenita-akermanita, son consideradas fases primarias de alta temperatura en CAIs. La presencia de gehlenita es indicativa de CAIs tipo A, mientras que la melilita es indicativa de CAIs tipo B. La troilita es el sulfuro más común presente en condritos.

Algunos de los minerales secundarios más comunes, son el olivino férrico que es un mineral metamórfico, la magnetita indicativa de alteración acuosa y la kamacita, formada por enfriamiento ([Hutchison, 2004](#)).

3.5 CLASIFICACIÓN DE CONDRITOS

Basado en la proporción de sus componentes, se han podido reconocer 15 grupos de condritos de los que cuales, 13 de ellos, comprenden 3 clases: Carbonáceos (C), Ordinarios (O) y Enstatita (E). Estas clases se definen según su isotopía de oxígeno y según la similitud entre la abundancia de elementos litófilos refractarios y la abundancia de estos elementos en el sol ([Weisberg et al., 2006](#)) (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5: Resumen de abundancia de inclusiones refractarias, cóndrulos, Fe-Ni metálico y otras propiedades clave de grupos de condritos.

Grupo	Refract. lit. /Mg rel. CI	CAI (vol. %)	Cónd. diam. prom (mm)	Cónd. (vol.%)	Metal (vol.%)	Matriz (vol.%) ^{*c}	Frec. de caída (%)	Ejemplos
Carbonáceos								
CI	1.00	<0.01	None	<5	<0.01	95	0.5	Ivuna,

								Orgueil
CM	1.15	1.2	0.3	20	0.1	70	1.6	Murchison
CO	1.13	1.0	0.15	40	1-5	30	0.5	Ornans
CV	1.35	3.0	1.0	45	0-5	40	0.6	Vigarano, Allende
CR	1.03	0.12	0.7	50-60	5-8	30-50	0.3	Renazzo
CH	1.00	0.1	0.02- 0.09	~70	20	5	0	ALH 85085
CBa	1.0	<0.1	~5	40	60	<5	0	Bencubbin
CBb	1.4	0.1	~0.5	30	70	<5	0	QUE 94411
CK	1.21	0.2	0.8	15	<0.01	75	0.2	Karoonda
Ordinarios								
H	0.93	0.01- 0.2	0.3	60-80	8	10-15	34.4	Dhajala
L	0.94	<0.1	0.5	60-80	3	10-15	38.1	Khohar
LL	0.9	<0.1	0.6	60-80	1.5	10-15	7.8	Semarkona
Enstatita								
EH	0.87	<0.1	0.2	60-80	8	<0.1-10	0.9	Qingzhen, Abee
EL	0.83	<0.1	0.6	60-80	15	<0.1-10	0.8	Hvittis
Otros								
K	0.9	<0.1	0.6	20-30	6-9	70	0.1	Kakangari
R	0.95	<0.1	0.4	>40	<0.1	35	0.1	Rumuruti

*Extraído y modificado de **Scott & Krot (2014)**

3.6 CONDRITOS CARBONÁCEOS Y CLASIFICACIÓN

Los condritos carbonáceos, se denominan con letras, refiriéndose al nombre de un condrito caído representativo del grupo. Según sus parámetros de clasificación y la proporción de sus componentes, se dividen en ocho grupos: CI (por Ivuna), CM (por Mighei), CR (por Renazzo), CO (por Ornans), CV (por Vigarano), CK (por Karoonda), CH (por ALH-85085) y CB (por Bencubbin). El término carbonáceo en meteoritos, no es el más adecuado, pues de los 8 grupos que

comprende la clase de meteoritos carbonáceos, solo los condritos CI, CM y CR son enriquecidos significativamente en carbono, respecto de los no carbonáceos (Hutchison, 2004).

Algunas características que poseen los meteoritos carbonáceos (salvo por algunas excepciones) son:

- Tasas de abundancia promedio de elementos litófilos refractarios/Mg en relación a condritos CI ≥ 1.00
- Composiciones isotópicas de oxígeno que grafican cerca o bajo la línea de fraccionamiento terrestre. $\Delta^{17}\text{O} \leq -2\text{‰}$ (excepto CI)
- Abundancia de inclusiones refractarias ≥ 0.1 vol.% (excepto CI)
- Tasas de abundancia modal de matriz/cóndrulos ≥ 0.9 (excepto CH y CB)

El enriquecimiento en ^{54}Cr y ^{50}Ti , es otra de las características que permiten distinguir a condritos carbonáceos de no carbonáceos en un gráfico $\epsilon^{54}\text{Cr}$ versus $\epsilon^{50}\text{Ti}$.

Algunas características texturales de los condritos carbonáceos, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.6: Características texturales de los condritos carbonáceos (Extraído y modificado de Hutchison (2004)).

	CI	CM	CO	CV	CK	CR	CH
Tipo Petrológico	1	1-2	3	2-3	3-6	1-3	2
Tamaño de cóndrulo (mm)	-	0.27	0.15	1.0	0.8	0.7	<0.1
Matriz (vol.%)	99	70	30	40	75	30-50	5
Cóndrulos (vol.%)	0	20	40	45	15	55	~70
CAIs (vol.%)	0	5	13	10	4	0.5	0.1
Metal (vol.%)	0	0.1	1-5	1-5	tr	5-8	~20

Basado en estudios químicos de roca total, los meteoritos carbonáceos también se han clasificado según la relación entre sus elementos mayores y trazas, normalizados a Mg y a condritos tipo CI. Los patrones obtenidos en diagramas tipo araña (ver Ilustración 3.6a y 3.6b) han permitido comparar en términos químicos las diferencias entre carbonáceos tipo CO, CV y CR (Kallemeyn & Wasson, 1981).

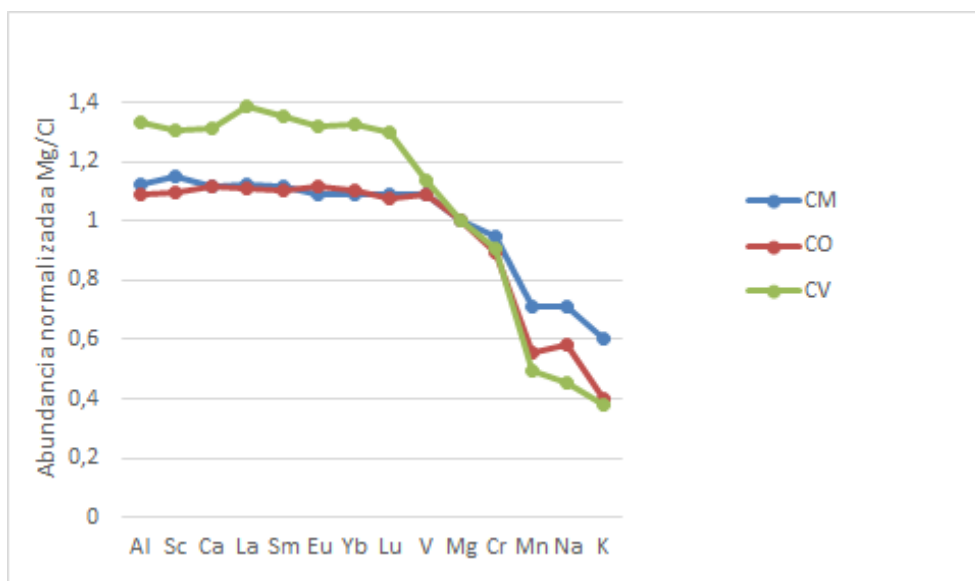


Ilustración 3.6a: Relación entre abundancias de elementos químicos en meteoritos CO, CM y CV, normalizados a la composición CI.

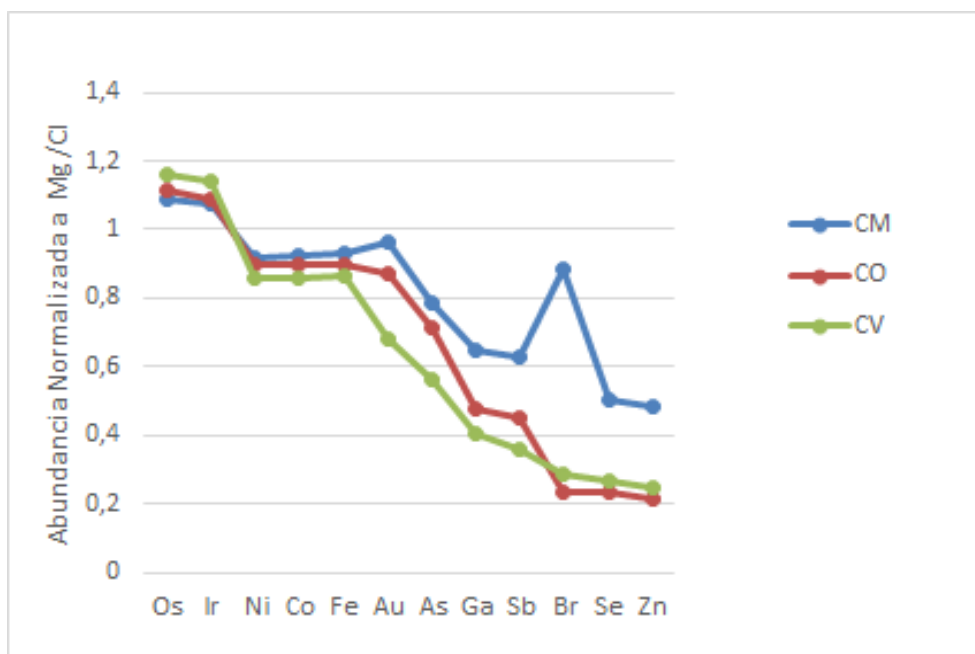


Ilustración 3.6b: Relación entre abundancias de elementos químicos en meteoritos CO, CM y CV, normalizados a la composición CI. (Cont.)

3.7 CONDRITOS TIPO CO

Las características asociadas a la proporción y composición de componentes que constituyen este tipo de meteorito y que permiten identificarlos son:

- 1) 35-45 Vol.% de abundancia de cóndrulos redondeados, relativamente pequeños (~150 um) (Rubin, 1989)
- 2) Alta proporción de cóndrulos de metales ricos en Mg-Fe, cóndrulos ferrosos (tipo II) también son muy comunes
- 3) Abundancia de CAIs y AOAs (~10% en volumen)
- 4) Una abundancia relativamente baja de matriz (30-45% vol.)
- 5) Una secuencia metamórfica (3.0-3.7), análoga en varias formas a la de condritos ordinarios de tipo 3 (McSween, 1977a; Scott & Jones, 1990)
- 6) Minerales de alteración secundaria en cóndrulos y CAIs que son similar a los que aparecen en condritos tipo CV (por ejemplo, nefelina, sodalita, olivino ferroso, hedenbergita, andradita e ilmenita, con filosilicatos virtualmente ausentes (Keller & Buseck, 1990; Rubin, 1998; Rubin et al., 1985; Russell et al., 1998; Tomeoka et al., 1992)

3.8 PROCESOS SECUNDARIOS Y TERCIARIOS

3.8.1 Metamorfismo y alteración

El tipo petrológico, corresponde a un parámetro de clasificación secundario con el que se estima el grado de alteración termal o acuosa experimentado por un condrito, en su asteroide parental. Acorde a lo anterior, los condritos se pueden dividir en tipos petrológicos que varían de 1 a 6. El tipo 1 representa un alto grado de alteración acuosa, en relación un tipo petrológico 2. Esta diferencia se basa principalmente en la abundancia de hidrosilicatos. El tipo 3, representa un condrito “no equilibrado”, es decir, uno que evidencia poca o nula alteración secundaria.

En la práctica, muy pocos condritos con tipo petrológico 3 son verdaderamente prístinos. Esto gatilla la necesidad de establecer subclasificaciones para condritos con baja alteración. Actualmente, los condritos ordinarios y carbonáceos tipo CO y CV, con tipo petrológico 3, comúnmente se subdividen en 10 subtipos (3.0 -3.9), en el cual el más prístino corresponde al subtipo 3.0 (Sears et al., 1991).

Tipos petrológicos entre 4 y 6, se denominan equilibrados y corresponden a grados crecientes de equilibrio químico alcanzado gracias al aumento de temperatura en sus cuerpos parentales, sin haber llegado a una temperatura tal que

hubieran experimentado fusión o diferenciación ígnea, por lo que conservan en gran medida los registros de los procesos físicos y químicos en la nebulosa solar (Van Schmus, 1967).

3.8.2 Procesos de impacto

El grado de metamorfismo de choque, es otro parámetro de clasificación de procesos terciarios. Este relaciona parámetros mineralógicos y texturales generados producto de impactos experimentados en los asteroides parentales.

Basados en los efectos observados en cristales de plagioclasa y olivino, en condritos de tipo ordinario, se definen 6 estados de choque, este es representado por la letra “S”, de esta manera el metamorfismo se expresa en una escala de S1 a S6, en el cual un estado de choque S1 corresponde a un condrito que ha experimentado escasos choques y/o de baja presión (<4-5 GPa) y un S6, corresponde a un condrito que ha experimentado múltiples y fuertes impactos (75-90 GPa) (Stöffler & Keil, 1991).

Basado en los estudios realizados por Stöffler & Keil, (1991) en condritos ordinarios, el trabajo de Scott et al., (1992), propone una aplicación de estos criterios al estudio de metamorfismo de choque en condritos de tipo carbonáceo. Estos criterios se basan principalmente en las evidencias registradas en sus componentes, tales como texturas de cristales de olivino y troilita.

3.8.3 Meteorización terrestre

Un parámetro de clasificación terciario, corresponde al grado de meteorización terrestre (*Weathering*). Se aplica principalmente a los hallazgos de meteoritos y corresponde al estado de oxidación que presenta un meteorito debido al desequilibrio de sus componentes minerales con el medio ambiente terrestre, una vez que cae a la Tierra, y que aumenta con el transcurso del tiempo (Wlotzka, 1993).

Este parámetro de clasificación se representa con la letra “W” y varía entre un W0 y W6. En el cual, para condritos ordinarios, posee las siguientes características

W0: Sin oxidación visible de metales o sulfuros. Escasa limonita.

W1: Anillos con oxidación menor alrededor de metales y troilita. Venas con oxidación menor.

W2: Oxidación moderada de metales. Reemplazo entre 20-60%.

W3: Fuerte oxidación de metal y troilita, reemplazo de entre 60-95%

W4: Oxidación completa (>95%) de metal y troilita, pero sin alteración de silicatos.

W5: Comienzan a alterar silicatos máficos, principalmente a través de fracturas.

W6: Reemplazo masivo de silicatos por minerales de arcilla y óxidos.

Aunque estos criterios están establecidos para condritos ordinarios, no existen suficientes estudios sobre meteorización terrestre en condritos carbonáceos, por lo que se utilizan estos mismos para la determinación de este parámetro, en la caracterización de las muestras en este estudio.

3.9 MATERIA ORGÁNICA EN CONDRITOS CARBONÁCEOS

Los condritos carbonáceos, dependiendo del tipo, pueden contener hasta un 5% de carbono en múltiples formas, incluyendo materia orgánica, carbonatos y cantidades menores de material de granos presolares exóticos, como diamante, grafito y carburo de silicio.

La materia orgánica en condritos carbonáceos se presenta de dos maneras: como compuestos moleculares de bajo y de alto peso molecular. Las primeras son denominadas moléculas “libres”, constituyen menos del 25% de la materia orgánica presente y se pueden extraer con solventes orgánicos comunes, mientras que las segundas son denominadas “macromoléculas”, que constituyen el 75% restante de la materia orgánica presente y que son muy resistentes a solventes y ácidos. Ambas formas requieren diferentes métodos analíticos (Hayatsu & Anders, 1981).

Entre la materia orgánica extraíble, se encuentran ácidos carboxílicos, ácido sulfónico y fosfónico, aminoácidos, hidrocarburos aromáticos, componentes heterocíclicos, hidrocarburos alifáticos, aminas y amidas, alcoholes, aldehídos, cetonas y azúcares (Gilmour, 2003). El uso de espectroscopía Raman, permite identificar este tipo de compuestos.

El estudio de materia orgánica presente en la matriz de meteoritos carbonáceos, ha permitido establecer algunas correlaciones entre el grado de orden estructural de esta y el metamorfismo termal experimentado por el condrito en su cuerpo parental. A través de la parametrización de las curvas obtenidas en espectros Raman, asociadas la presencia de materia orgánica carbonosa poli-aromática se han podido subclasificar condritos carbonáceos y en particular condritos carbonáceos tipo CO (Bonal, et al. 2016).

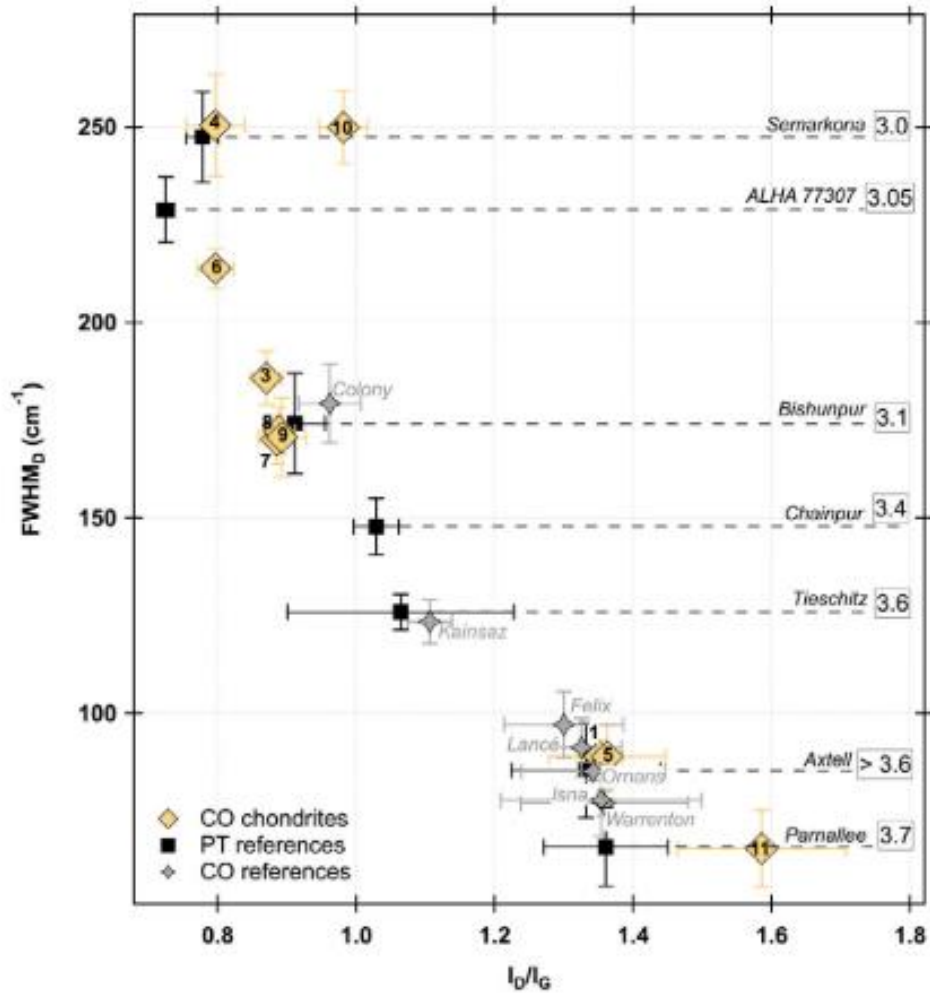


Ilustración 3.9: Parámetros espectrales de bandas de materia carbonosa en condritos CO (FWHM_D: ancho de la banda, I_D/I_G; Relación entre amplitudes de las bandas D y G, respectivamente). (Extraído de Bonal et al, (2016)).

Es importante destacar que particularmente los condritos tipo CO, no poseen tanta materia orgánica como otros condritos carbonáceos (menos de un 1%wt de los meteoritos caídos) (Pearson et al., 2006). Esto inhibe el uso de técnicas analíticas convencionales y el acceso a la historia metamórfica del grupo.

3.10 INCLUSIONES

Una inclusión corresponde a un material atrapado en las irregularidades de un cristal durante su crecimiento. Según la bibliografía, usualmente se hace la distinción entre una inclusión fluida, para aquellas que atraparon un fluido que permanece en gran parte en fase fluida a la temperatura de la superficie; E inclusión fundida para aquellas que se han vuelto sólidos en superficie, no obstante, considerando que existe una continuidad entre estos dos extremos, se puede hablar de un mismo concepto, entendiendo que los procesos de captura, los métodos de estudio y los problemas atribuidos a la interpretación de los datos son básicamente los mismos (Roedder, 1984).

3.10.1 Antecedentes

El hallazgo de sales solubles (sulfato de magnesio), coexistiendo con sulfuro de calcio y componentes orgánicos, permitió delimitar por primer vez algunas condiciones termales bajo los 300° C en este tipo de meteoritos y el rol de los sulfuros en la química orgánica (Buddhue, 1941). La presencia de hidrocarburos, evidenciaba las condiciones reductoras a las que los meteoritos han sido sometidos en sus cuerpos parentales. Por otro lado, existe una amplia evidencia de oxidación pre-terrestre, tal como la presencia de espinela magnética en condritos CI.

Estudios en el meteorito caído Orgueil, recogido pocas horas después de su aterrizaje, permitió dimensionar la rápida oxidación que puede experimentar un meteorito en la tierra, gracias a la observación de las reacciones que sufrían sus minerales férricos.

Trabajos posteriores, estudiaron la isotopía del agua expulsada al someter los meteoritos a altas temperaturas, lo cuales no tenían la misma relación D / H que al ser sometidos a temperaturas más bajas (Boato, 1954). Esto permitió presumir un origen pre-terrestre, considerando el desequilibrio isotópico con respecto al agua de la atmósfera terrestre. También sugirió la presencia de agua en meteoritos como grupos hidroxilo, en vez de moléculas de agua propiamente tal.

Considerando todo lo anterior, se han podido deducir que en su origen, los meteoritos se encuentran en condiciones de baja temperatura. Esto posteriormente se contrastó con la mineralogía de alta temperatura (olivino y piroxeno) presente en condritos carbonáceos, lo que permitió plantear las primeras teorías de origen de meteoritos, las que se exponen a continuación (DuFresne & Anders, 1962):

- 1) Origen por acumulación de polvo cósmico desde la nebulosa solar, sin haber sido extensamente alterado.
- 2) Origen por acumulación de minerales pulverizados elaborados en un cuerpo planetesimal, los que fueron dispersados y reacumulados posteriormente.
- 3) Material originado por (1), (2) o ambos, que fue sometido a alteración considerable posterior al proceso de acumulación final.

El retorno de la misión Apollo en 1969, con las primeras muestras lunares, fue el puntapié inicial que motivó el estudio de inclusiones en muestras extraterrestres (Roedder, 2002). Los estudios realizados por Roedder (Roedder, 1984; Roedder, 2002), permitieron una mayor comprensión de los procesos de formación de inclusiones vítreas en rocas terrestres y extraterrestres, en muestras lunares y basaltos terrestres. Estos se basaban en procesos de diferenciación planetaria por cristalización fraccionada en sistemas magmáticos.

Con el tiempo, la relevancia del agua y la alteración acuosa en cuerpos del sistema solar, se fue incrementando. Algunos condritos, se consideraron por mucho tiempo material primitivo que había experimentado muy pocos cambios desde su formación, siendo alterados por interacción con agua líquida durante los primeros 10 millones de años después de su formación en sus asteroides parentales (Zolensky & McSween, 1988). No obstante, estudios en condritos carbonáceos CV3, evidenciaron diferentes grados de alteración en sus componentes constituyentes, lo que complicó aún más la posibilidad de revelar los procesos de alteración experimentados. La heterogeneidad de los componentes de un condrito, explicarían una alteración igualmente heterogénea (Krot et al., 1995).

Los primeros reportes del descubrimiento y caracterización de inclusiones fluidas acuosas en sales de halita (NaCl) en el condrito ordinario H5, Monahans, confirmó la existencia de fluidos acuosos en cuerpos extraterrestres y los primeros acercamientos al conocimiento sobre la naturaleza del agua en el sistema solar primitivo (Zolensky et al., 1998).

El estudio de inclusiones fluidas se siguió desarrollando en el tiempo y también se fue complementando con el desarrollo tecnológico. La espectroscopía Raman se posicionó como una importante herramienta para el estudio y análisis de inclusiones, cuyos resultados se pudieron aplicar para medir rangos de pH, estados de oxidación en fluidos y estimar condiciones P-T. El desarrollo de catálogos para facilitar la interpretación de minerales mediante esta técnica, ha sido ampliamente utilizado en la investigación de inclusiones fluidas y vítreas, como soporte para análisis de laboratorio (Frezzotti et al., 2012).

3.10.2 Origen de inclusiones en condritos

El origen de las inclusiones vítreas ha sido estudiado ampliamente desde una perspectiva magmática terrestre, no obstante, en condritos, el estudio de inclusiones vítreas está directamente relacionada al estudio de la formación de cóndrulos.

Desde los primeros trabajos de Merrill (Merrill, 1930; Merrill & Foshag, 1943) que los cóndrulos han sido intensamente estudiados. Sin embargo, no ha habido un real consenso sobre la naturaleza de las gotas de líquido de las cuales los cóndrulos supuestamente se forman (Zanda, 2004), ni de los diferentes procesos involucrados durante y posterior a la formación de estos (Wood, 1996). En la actualidad algunos trabajos aún consideran la formación de cristales en cóndrulos como productos de precipitación desde un fundido y la mesostasis (material intersticial) como un líquido residual del fundido (Mc Sween, 1977b; Roedder, 1981; Hewins, 1997; Zanda, 2004).

Existen dos principales modelos de formación de cóndrulos en la nebulosa solar (Engler et al., 2007):

- 1) Las gotas de fundido, desde las cuales los cóndrulos se forman, por la fusión de sólidos pre-existentes durante un calentamiento transitorio y local, generando un fundido que posteriormente cristalizó. (Ciesla, 2005; Dullemond et al., 2014). Esto implica que si el sistema es cerrado, las propiedades de los cóndrulos solo dependería de las de sus precursores (Grossman & Wasson, 1983; Hewins, 1991; Hezel & Palme, 2007). Mientras que si el sistema se considera abierto, otros procesos, tales como la evaporación y re-condensación, podrían jugar algún rol importante.
- 2) Los cóndrulos se forman de la directa condensación de la nebulosa solar en líquidos y cristales (Blander & Katz, 1967; Wood & McSween, 1977; Kurat, 1988; Krot et al., 2001; Krot et al., 2002).

Estudios de inclusiones vítreas en cristales de olivino (Kurat et al., 1997; Varela et al., 2002), confirman la presencia de líquido, o fundido precursor, en la nebulosa solar, demostrando que éste facilita la condensación de los principales minerales silicatados. Esto da pie a un modelo de formación de cóndrulos alternativo, el modelo de Condensación Líquida Primaria (PLC), que permitiría explicar el crecimiento de cristales individuales a través de un proceso en el cual el líquido primero se condensa y para luego ocurrir la nucleación de un cristal, con las especies que están sobresaturadas en el vapor (Varela & Zinner, 2018). El núcleo del cristal continuaría creciendo sólo desde el líquido que lo forma, a través de una

delgada capa interfase entre el cristal en crecimiento y el vapor (Varela et al., 2005). Bajo este modelo, la variación de la cantidad de líquido primario involucrado en la formación de cóndrulos durante diferentes estados evolutivos de la nebulosa solar, también permite explicar la formación de cóndrulos no porfíricos ricos en Mg (Varela et al., 2006) y cóndrulos no porfíricos ricos en piroxeno (Engler et al., 2007).

Considerando el modelo PLC, explicado anteriormente, el estudio de inclusiones vítreas en cristales de olivino, permitiría obtener información sobre el líquido condensado primario y por consecuencia, de la nebulosa solar primitiva.

3.11 CONDENSACIÓN DE ELEMENTOS

El trabajo desarrollado por Lodders (2003), ha permitido correlacionar la abundancia de elementos químicos de la fotosfera solar y de condritos tipo CI. Con ello se han podido determinar temperaturas de condensación de elementos químicos.

La temperatura de condensación de los elementos ha sido ampliamente utilizada para diagnosticar procesos de fraccionamiento químico en astronomía, ciencias planetarias y meteoríticas. Muchos estudios se han dedicado a encontrar tendencias en la volatilidad de elementos químicos, expresados en términos de temperaturas de condensación (Larimer, 1967; Grossman, 1972; Grossman & Larimer, 1974; Boynton, 1975; Fegley & Lewis, 1980; Saxena & Eriksson, 1983; Fegley & Palme, 1985; Kornacki & Fegley, 1986; Palme & Fegley, 1990).

EL 50% de la temperatura de condensación, permite agrupar elementos según su volatilidad a 10^{-4} bares, de la siguiente manera (Lodders, 2003):

- 1) Los elementos ultra refractarios con 50% de temperatura de condensación sobre los 1650 K son los metales Os, Re, y W, los elementos litófilos Al, Hf, Sc, Th, Y, Zr, y las tierras raras pesadas Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, y Lu.
- 2) Los elementos altamente refractarios con 50% de temperatura de condensación entre 1650 y 1500 K, son los metales Ir, Mo, y Ru, y los elementos litófilos Ca, Nb, Ta, Ti, U, y las tierras raras livianas La, Pr, Nd, y Sm.
- 3) Elementos refractarios con 50% de temperatura de condensación entre 1500 y 1360 K. Estos incluyen los metales Pt y Rh, y los elementos litófilos Ba, Be, Ce, Sr, V y Yb.

- 4) Los elementos comunes (Mg, Si y Fe), con 50% de temperatura de condensación entre los 1360 y 1290 K condensan junto a los metales Co, Cr, Ni y Pd, y Eu litófilo.
- 5) Los elementos moderadamente volátiles tienen 50% de temperatura de condensación entre 1290 y 704 K, previos a la aparición de FeS. Este grupo contiene los elementos siderófilos Ag, As, Au, Bi, Cu, Ga, Ge, P, Pb, Sb y Te, los elementos litófilos Cs, B, K, Li, Na, Mn, Rb y Zn, y los halógenos Cl y F.
- 6) Los elementos volátiles, con rangos de 50% de temperatura de condensación entre 704 y 371 K, es determinada por la condensación de Troilita, marcando el máximo final del rango de temperatura, donde también aparecen los elementos calcófilos Cd, In, S, Se y Tl, y el elemento siderófilo Sn y los halógenos Br y I.
- 7) Los elementos altamente volátiles (si los hay), condensan con 50% temperatura de condensación bajo los 371 K. Estos son C, N, O, gases nobles y Hg condensado.

IV. RESULTADOS

4.1 ESTUDIO MACROSCÓPICO

Los meteoritos en estudio fueron encontrados en el desierto de Atacama chileno, por el coleccionista privado, dueño del Museo del Meteorito, Rodrigo Martínez. Todos estos corresponden a meteoritos de clase condrito tipo CO₃. Algunas de sus características macroscópicas principales, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.1a: Características macroscópicas de condritos registrados.

Nombre Oficial	Código	Masa	Aspecto Externo
Catalina 008	-	98 g	Roca única, color oscura, presenta costra de fusión
El Médano 216	RM330	1323 g	Roca única, color marrón opaco
Los Vientos 123	-	575 g	Roca única, presenta costra de fusión. Su interior oscuro expuesto, revela pequeños cóndrulos
El Médano 389	RM567	1186 g	100% Barniz desierto
-	RM568	3071 g	100% Barniz desierto
-	RM569	1242 g	100% Barniz desierto

*Fuente: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>

La muestra RM567 (ver Ilustración 4.1^a), posee un nombre oficializado en el *Meteoritical Bulletin*, no obstante, debido a que este fue encontrado cerca de la misma zona donde se encontró El Médano 216, al igual que los meteoritos RM568 (ver Ilustración 4.1b) y RM 569 (ver Ilustración 4.1c), se propuso evaluar la

posibilidad de realizar un emparejamiento de estas muestras, sumadas a otros dos fragmentos que no son parte de este estudio, para asociarlos a una misma caída y con ello, definir su elíptica de distribución.



Ilustración 4.1^a: Muestra RM 567 encontrada en el desierto de Atacama. Imagen de Rodrigo Martínez.

Los parámetros de emparejamiento de las muestras, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.1b: Parámetros de emparejamiento de condritos asociados a El Médano 216

Código	Latitud	Longitud	Densidad	Susceptibilidad
El Médano 216	24°48'27.5"S	24°48'27.5"S	3.37 (g/cm ³)	4.49 (10 ⁻⁹ m ³ /kg)
RM 567	24°46'55.5"S	24°46'55.5"S	3.37 (g/cm ³)	4.49 (10 ⁻⁹ m ³ /kg)
RM 568	24°47'52.1"S	24°47'52.1"S	3.37 (g/cm ³)	4.44 (10 ⁻⁹ m ³ /kg)
RM 569	24°48'11.3"S	24°48'11.3"S	3.36 (g/cm ³)	4.45 (10 ⁻⁹ m ³ /kg)



Ilustración 4.1b: Muestra RM 568 encontrada en el desierto de Atacama. Imagen de Rodrigo Martínez.



Ilustración 4.1c: Muestra RM 569 encontrada en el desierto de Atacama. Imagen de Rodrigo Martínez.

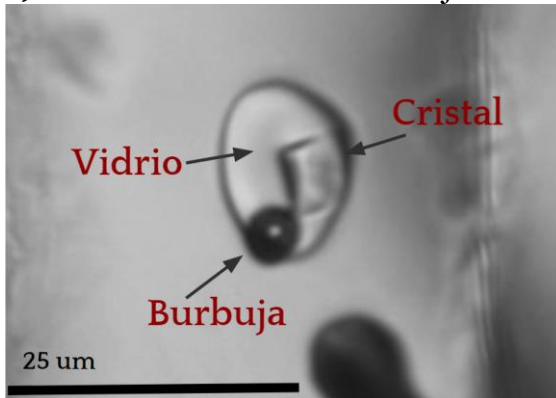
4.2 ESTUDIO DE INCLUSIONES VÍTREAS

El estudio de inclusiones vítreas se realizó a través de observaciones realizadas con microscopio óptico para inclusiones, y análisis usando espectroscopía Raman y LA-ICP-MS. El estudio con microscopía óptica permitió en principio determinar la presencia de inclusiones vítreas en las muestras estudiadas, con lo que posteriormente se tomaron los análisis correspondientes para poder revelar la química y mineralogía de sus componentes.

4.2.1 Tipos de inclusiones vítreas

La presencia de familias de inclusiones vítreas fue confirmada en cristales de olivino. Se determinaron cuatro tipos de inclusiones vítreas, en base a la cantidad y tipo de fases que le constituían (Ver Ilustración 4.2^a y 4.2b).

a) T1: Vidrio + Cristal + Burbuja



b) T2: Vidrio + Burbuja

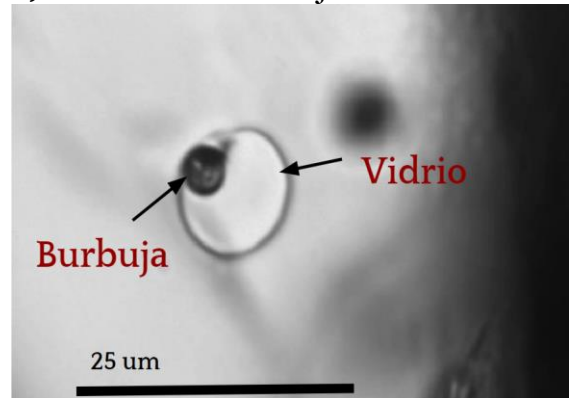
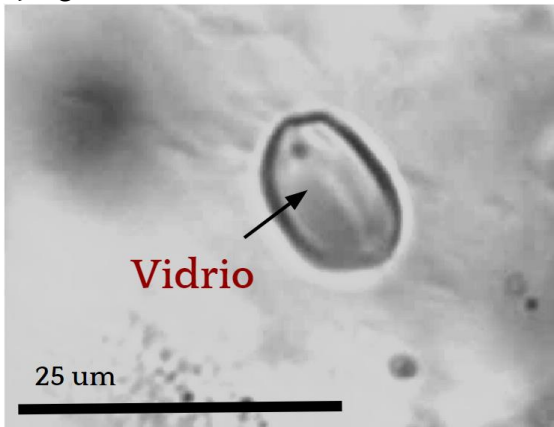


Ilustración 4.2a: Microfotografía de inclusiones vítreas tipo 1 y 2, en olivino de Los Vientos 123.

La posible presencia de inclusiones fluidas primarias se reportaron en un cristal de olivino en el condrito Catalina 008. Estas se reconocieron por un tamaño de su burbuja considerablemente mayor a las inclusiones vítreas circundantes (Ver Ilustración 4.2b). Estas no fueron analizadas, no obstante se propone su estudio para trabajos futuros.

c) T3: Vidrio



d) T4: Vidrio + Cristal

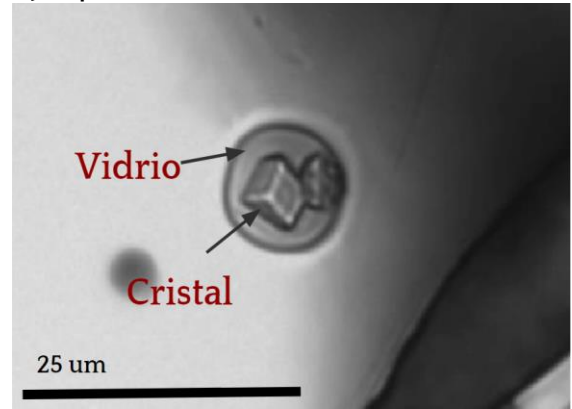


Ilustración 4.2b: Microfotografía de inclusiones vítreas tipo 3 en muestra RM-568 y tipo 4 en RM-569.

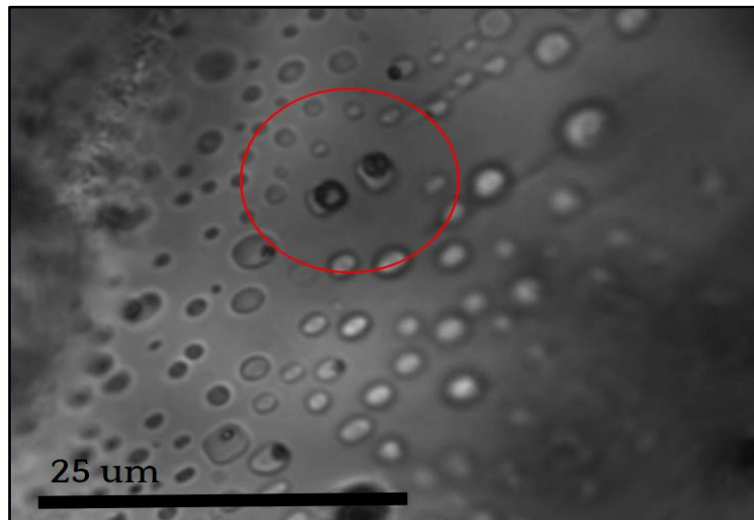


Ilustración 4.2c: Microfotografía del condrito Catalina 008. En la imagen, se encierran las inclusiones posiblemente de tipo fluidas en cristal de olivino

Los grupos de dos o más inclusiones vítreas primarias fueron consideradas como familias, las que fueron ubicadas en los mapas de corte anteriormente desarrollados (ANEXO I). Estas poseían tamaños entre 16 μm y 60 μm (Ver Ilustraciones 4.2d, 4.2e, 4.2f, 4.2g y 4.2h)

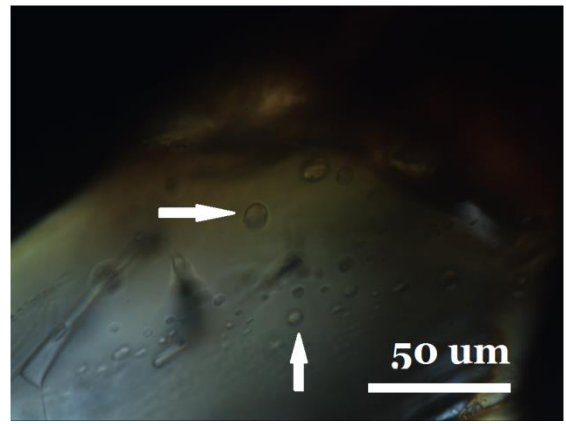
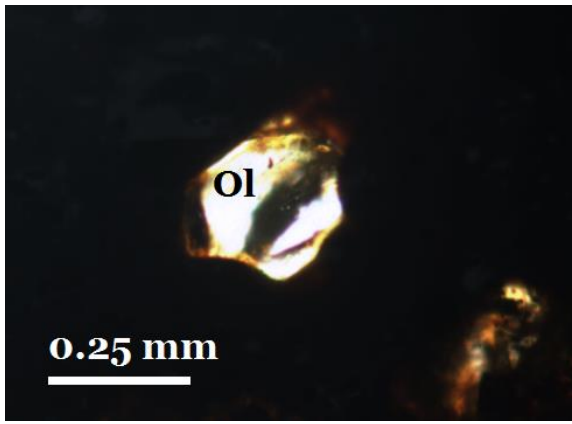


Ilustración 4.2d: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas (T3) en cristal de olivino. Muestra RM 567.

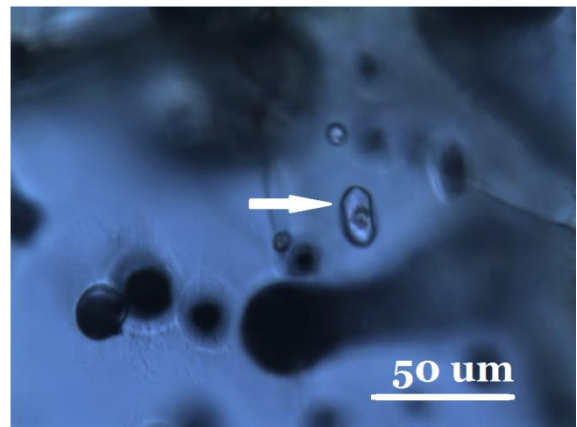
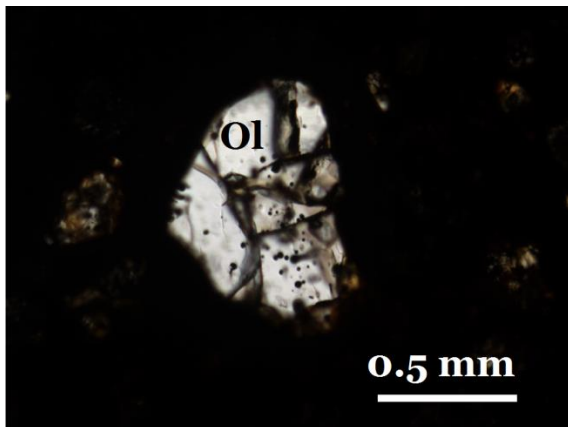


Ilustración 4.2e: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con cristales (T4) en cristal de olivino. Muestra RM 568.

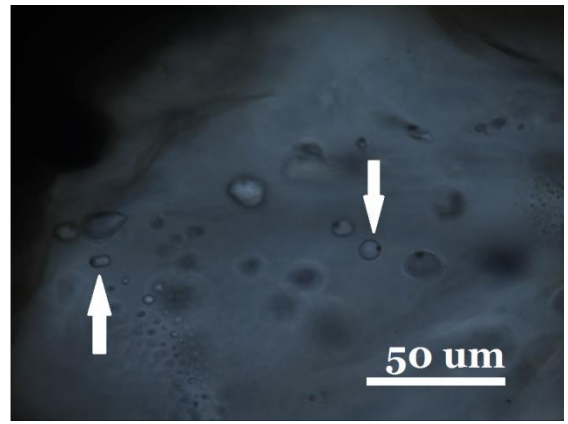
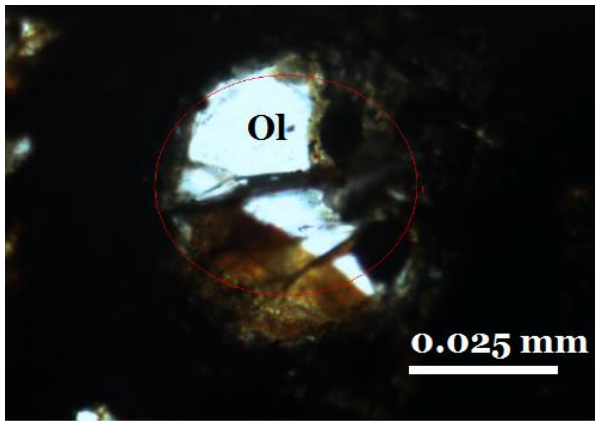


Ilustración 4.2f: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con burbuja (T2) en cristal de olivino. Muestra RM 569.

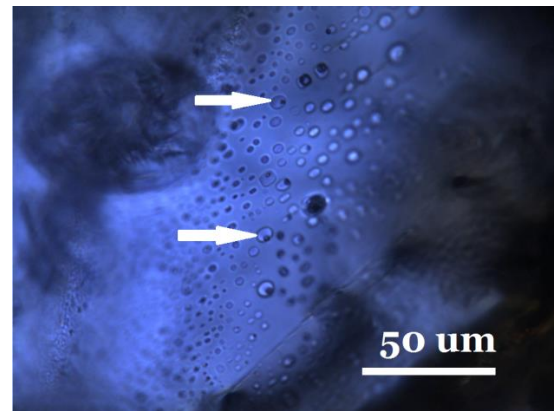
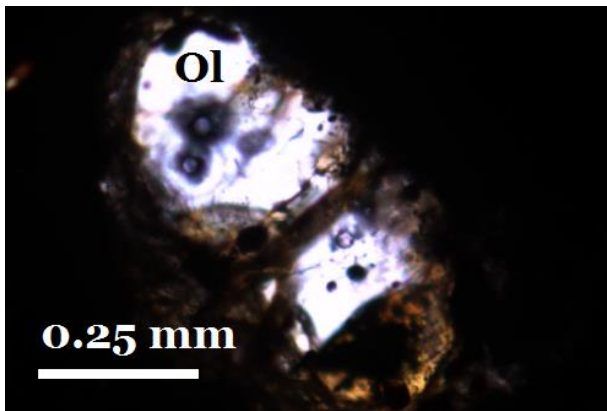


Ilustración 4.2g: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con burbuja (T2) en cristal de olivino. Muestra Catalina 008.

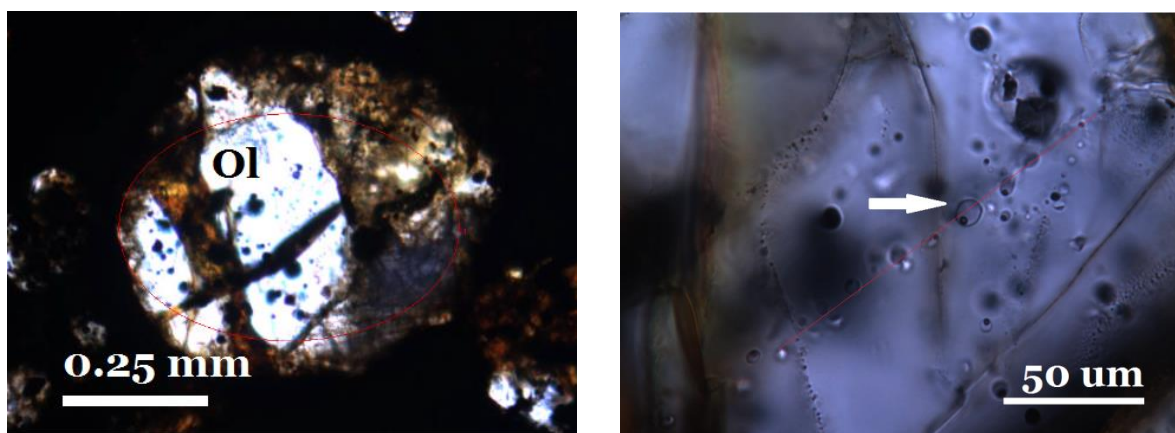


Ilustración 4.2h: Microfotografías en luz transmitida. Familia de inclusiones vítreas con burbuja (T2) alineadas en cristal de olivino. Muestra Los Vientos 123.

Para los análisis posteriores que se desarrollaron con Espectroscopía Raman, se escogieron solo las familias de inclusiones vítreas que presentaban fase gaseosa entre sus componentes (tipo 1 y tipo 2).

4.3 ESTUDIO CON ESPECTROSCOPIA RAMAN

Siguiendo el procedimiento descrito en la metodología, se realizaron espectros con datos obtenidos del análisis de cristal huésped, vidrio de inclusiones y su respectiva burbuja, para poder comparar los picos principales y lograr un mejor entendimiento.

Para determinar posibles fases minerales, se consideraron solo lo máximos representativos presentes en los espectros analizados, que se correlacionaron con espectros descritos por [Frezzotti et al., \(2012\)](#). Las fases encontradas y sus respectivos picos representativos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.2a: Fases minerales y sus respectivos máximos representativos en Raman (Los picos alfa, aparecen subrayados; El resto de los picos corresponden a picos beta, los que no se identificaron en todas las muestras).

Fase mineral	Máximos representativos (Número de onda / Raman shift [cm^{-1}])
Olivino Forsterita	227, 303, 423, 548, 608, <u>824</u> , <u>856</u> , 882, 921, <u>964</u>
Materia carbonosa poli-aromática	<u>1355</u> , <u>1607</u>

4.3.1 RM 567

Los espectros obtenidos de la muestra 567 (Ver Ilustración 4.3^a), muestran picos interpretados como la fase de olivino forsterita. Se puede observar que los espectros superpuestos reflejan que el cristal de olivino huésped, el vidrio de la inclusión vítrea y la burbuja presentan las mismas fases.

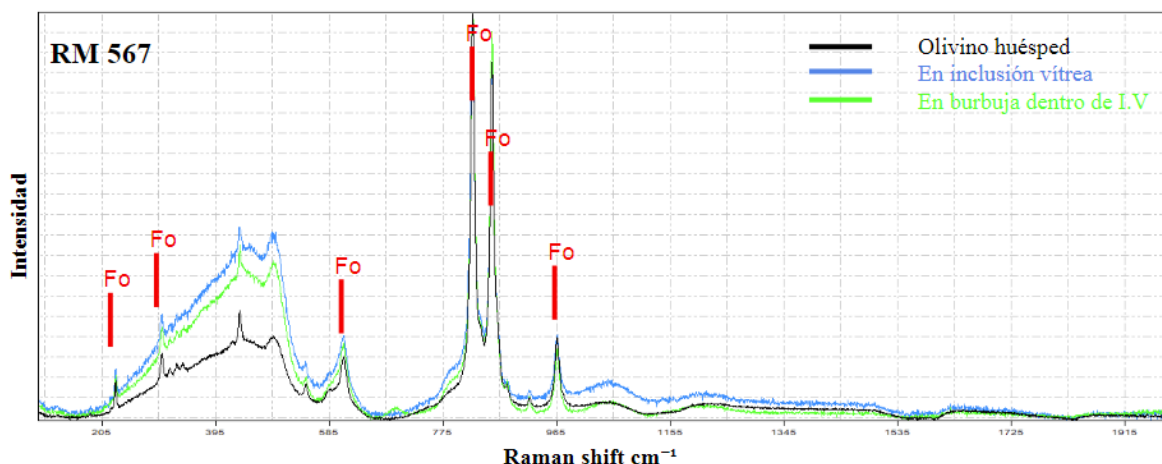


Ilustración 4.3a: Espectro Raman obtenido en cristal de olivino en condrito RM 567 (Fo: Olivino Forsterita).

Otros picos presentes en el espectro no fueron interpretados por fases minerales de manera sencilla. El software utilizado, reconoce algunos patrones que identifica como posibles fases, pero con bases de datos con espectros obtenidos de la irradiación de rayos en otra frecuencia a la utilizada para estos análisis (514 nm).

Es posible que los picos no interpretados correspondan a fases minerales distintas. Considerando la presencia de estos tanto en cristal, inclusión y burbuja, se propone revisar por otros métodos posibles fases presentes

4.3.2 RM 568

Como el caso anterior, los espectros obtenidos en esta muestra (Ver Ilustración 4.3b) son similares para cada zona de la inclusión (olivino huésped, vidrio de inclusión vítrea y burbuja dentro de inclusión vítrea), presentando 5 picos representativos de la fase olivino forsterita.

Se propone revisar con otros métodos, la posible presencia de otras fases minerales, asociados a los picos no interpretados.

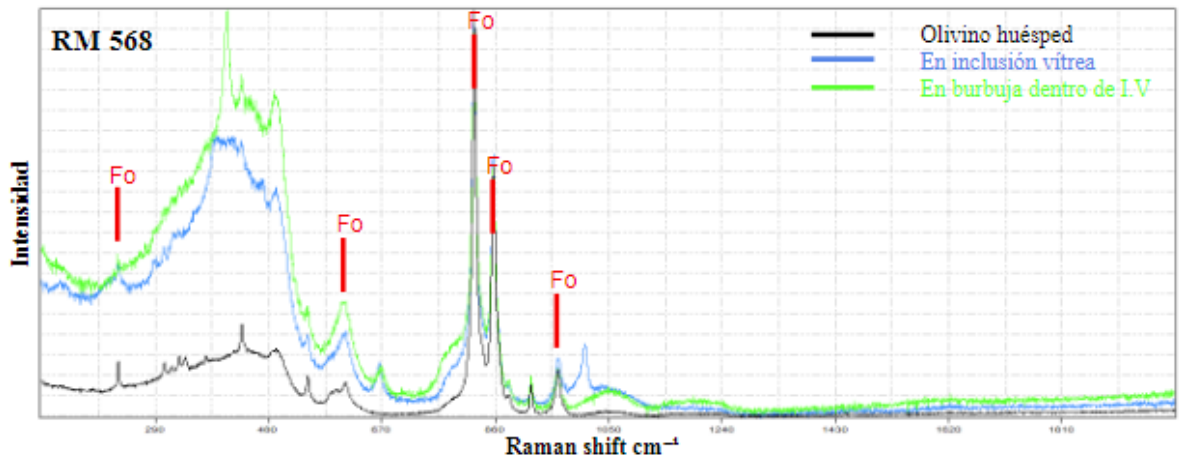


Ilustración 4.3b: Espectro Raman obtenido en cristal de olivino en condrito RM 568 (Fo: Olivino Forsterita).

4.3.3 RM 569

Los espectros obtenidos en la muestra RM 569 de 3 inclusiones vítreas, presentan características muy similares entre sí (Ver Ilustración 4.3c). En todas ellas se identificaron 6 picos interpretados como la presencia de la fase mineral de olivino forsterita.

Se observan algunas diferencias en la burbuja de cada inclusión. Los picos de fases minerales no identificadas o no interpretadas por poseer menos de 3 picos representativos de una fase mineral conocida, se presentan con distintas intensidades.

Otra observación es la presencia de un nuevo pico importante cercano a los 1000 cm^{-1} , en el vidrio de la inclusión vítrea. Esto podría representar algún error de la medición, o la presencia de alguna otra fase mineral. Se sugiere la posible presencia de otras fases minerales, por lo que se propone realizar análisis con otros métodos.

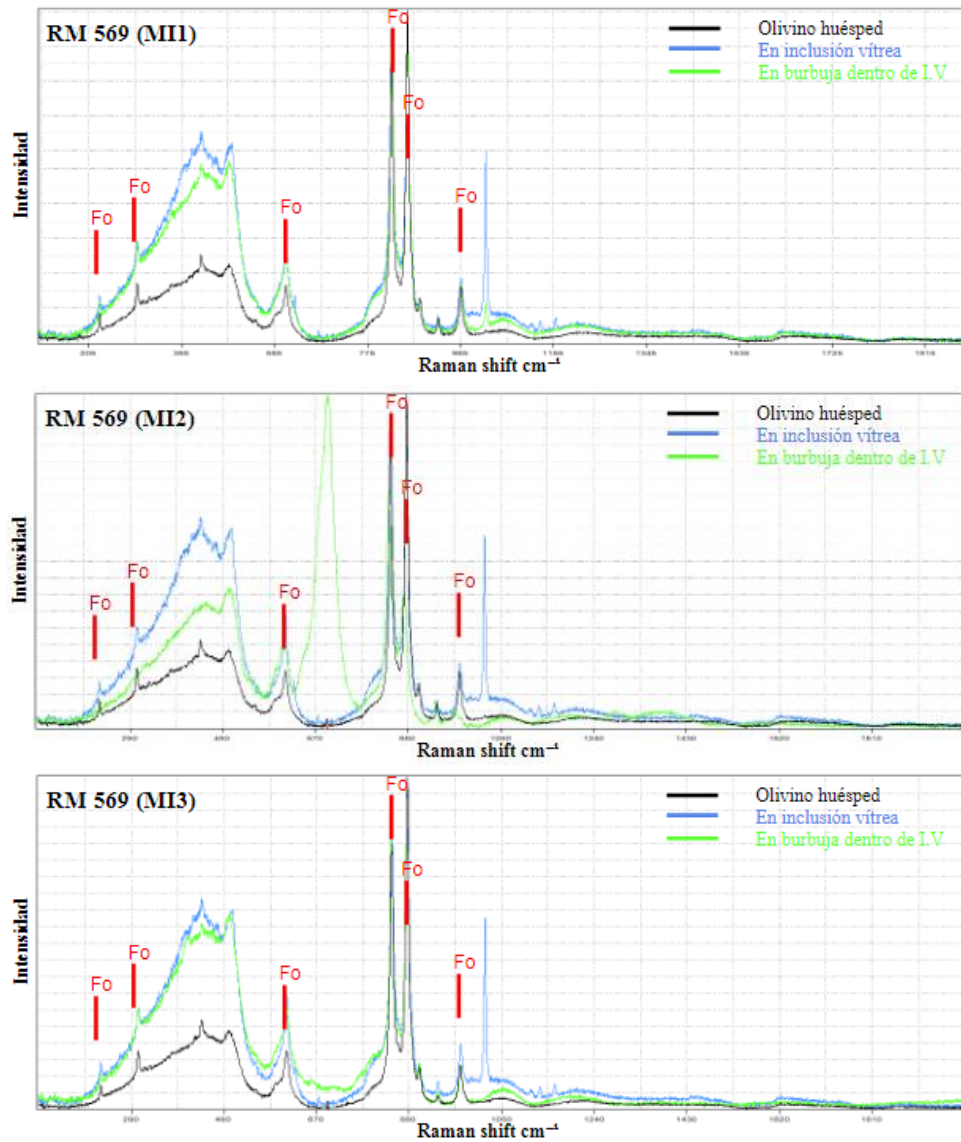


Ilustración 4.3c: Espectro Raman obtenido en cristal de olivino en condrito RM 569, de tres inclusiones de una MIAs (Fo: Olivino Forsterita).

4.3.4 Catalina 008

En este meteorito se analizaron dos familias de inclusiones. De la primera familia (MIA1), seis picos fueron interpretados como la presencia de la fase mineral de olivino forsterita (Ver Ilustración 4.3d). Otros picos también se observan, pero no se logra interpretar directamente la presencia de otra fase mineral.

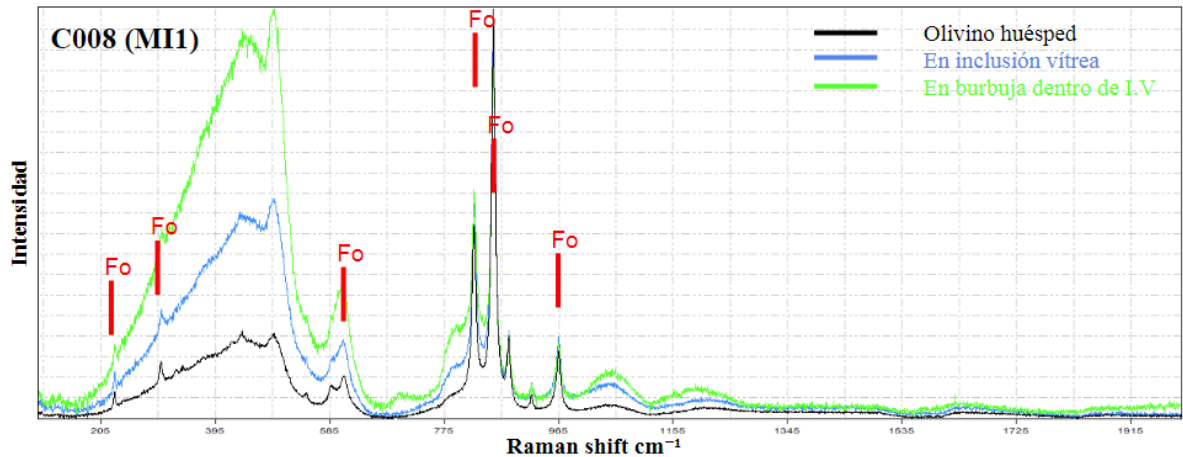


Ilustración 4.3d: Espectro Raman obtenido en inclusión vítrea de una familia de inclusiones (MIA1) y cristal de olivino huésped en condrito Catalina 008 (Fo: Olivino Forsterita).

En el caso de una segunda familia de inclusiones (MIA2) en otro cristal de olivino, se observan dos tipos de inclusiones (Ver Ilustración 4.3e). Ambas presentan 6 picos representativos de la fase olivino forsterita y algunos picos asociados a fases minerales no identificadas.

Particularmente la inclusión MI2-1, presenta dos Bandas, atribuidas según la bibliografía, a materia carbonosa poli-aromática (Bonald et al., 2016). Estas bandas se encontraron en el vidrio y burbuja de una inclusión vítrea de la muestra, pero no en el cristal huésped (ver figura de arriba en Ilustración 4.3e).

Utilizando el trabajo propuesto por Bonald et al., (2016) se aplica la misma metodología de este trabajo, para intentar caracterizar el metamorfismo termal experimentado por esta muestra. La sutileza de esto, es que el trabajo mencionado, realiza un ajuste gaussiano-lorentziano sobre las bandas D y G obtenidos con espectros Raman del análisis de la matriz de condritos carbonáceos tipo CO.

En este caso, al realizar un ajuste de las Bandas D y G, utilizando una función polinómica inversa, con máximo centrado (Ver Ilustración 4.3f), se determinó el ancho de ambas curvas y la relación entre sus intensidades máximas (ver Tabla 4.3). Con estos parámetros se buscó determinar el grado estructural de la materia carbonosa poli-aromática, que se relaciona a un grado de metamorfismo termal, sugerido por la bibliografía, para, por consecuencia, estimar una subclasificación petrológica para este condrito CO. La elección de este ajuste, se argumentará en la sección de discusiones de este documento.

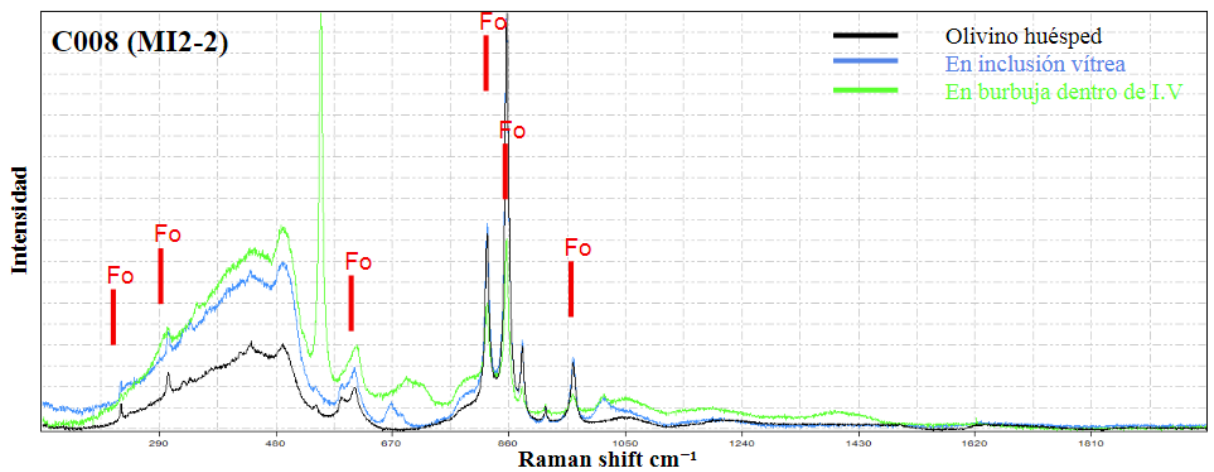
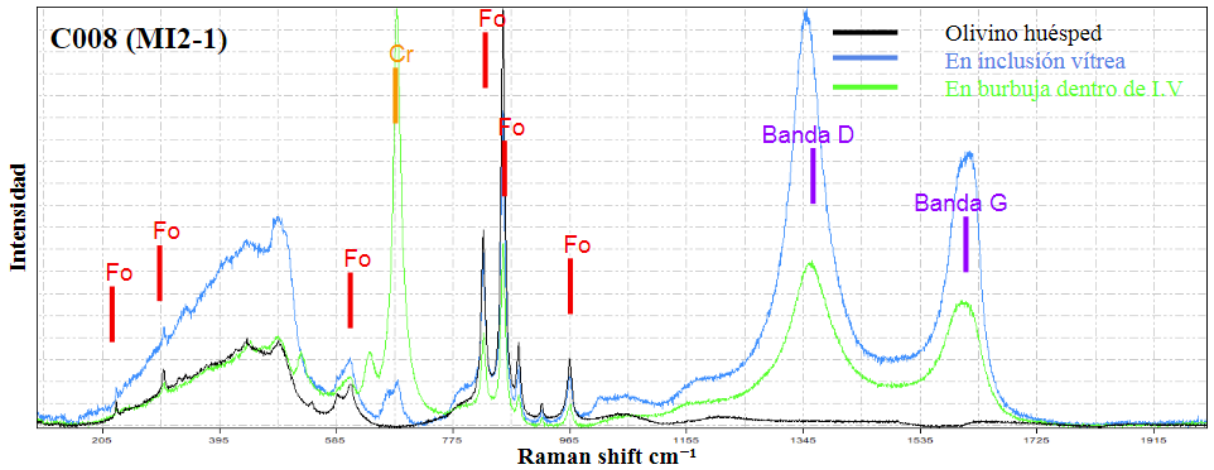


Ilustración 4.3e: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI2-1 y MI2-2) de una misma familia de inclusiones (MIA2) en condrito Catalina 008 (Fo: Olivino Forsterita, Cr: Cromita).

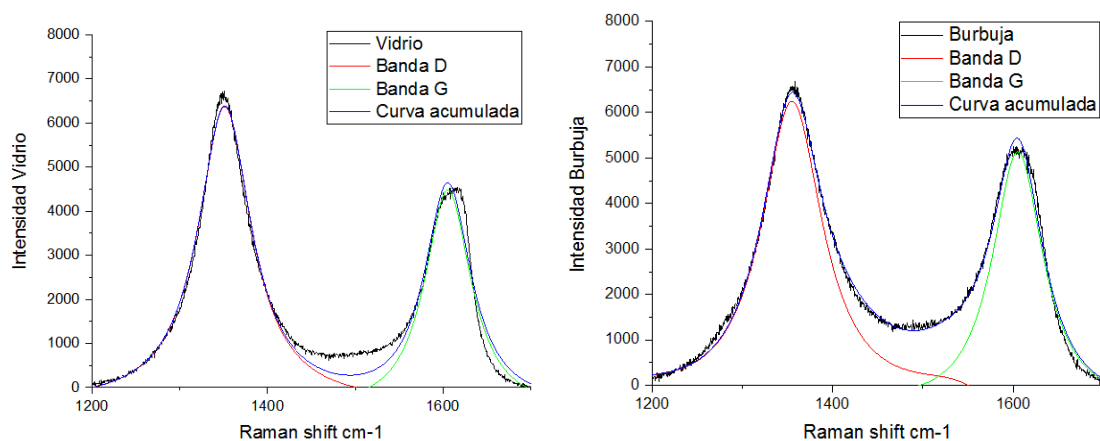


Ilustración 4.3f: Ajuste con función polinómica inversa, centrada en el máximo de las Bandas D y G obtenidas de espectros Raman de vidrio y burbuja de inclusión vítrea MI2-1, de la MIA2 del condrito Catalina 008.

Tabla 4.3: Parámetros obtenidos de ajuste polinómico inverso (F ID/IG: razón entre las amplitudes de las banda D y G, respectivamente).

Ajuste	Polinómico inverso	
Ecuación	$y=y_0+A/(1 + A1*(2*(x-xc)/w)^2 + A2*(2*(x-xc)/w)^4 + A3*(2*(x-xc)/w)^6)$	
Máximos	Banda D	Banda G
	Vidrio Burbuja	Vidrio Burbuja
Posición	1351.33 ± 0.1 1355.09 ± 0.1	1605.67 ± 0.2 1605.14 ± 0.1
Ancho	246.9 197.8	134.4 126.3
Amplitud	6775.0 ± 57.6 7185.8 ± 22.6	4884.9 ± 37.3 6075.3 ± 18.8
ID/IG	1.38 ± 0.02 1.18 ± 0.00	

Los parámetros obtenidos del ajuste polinómico inverso de las bandas D y G de la inclusión MI2-1, se compararon con lo realizado por [Bonaf et al., \(2016\)](#) (Ver Ilustración 4.3g). De esta comparación, se rescata que ambos ajustes no aparecen en la línea de tendencia de los condritos previamente estudiados. Posibles razones se argumentarán en las discusiones de este trabajo.

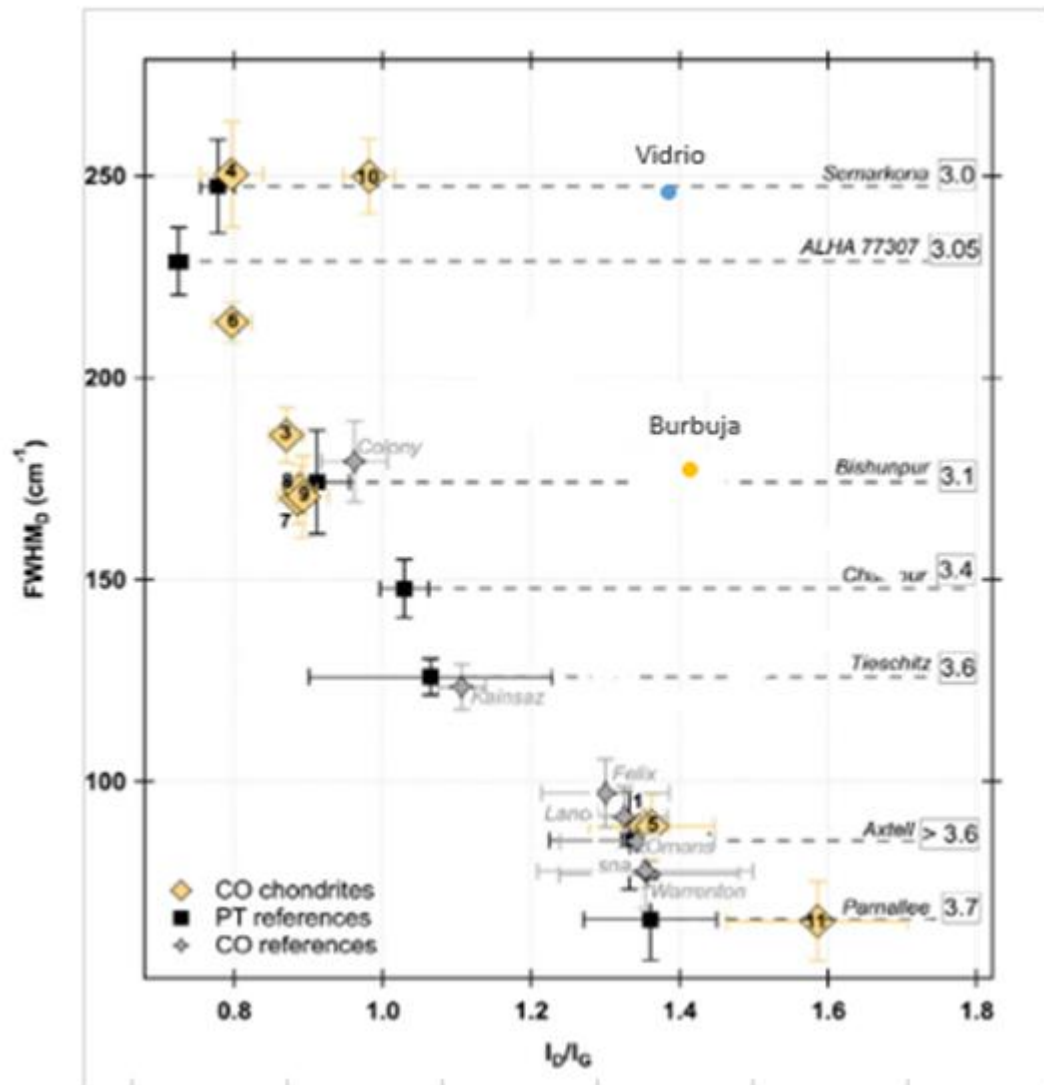


Ilustración 4.3g: Ajuste polinómico inverso de Bandas D y G obtenidas en vidrio y burbuja de inclusión vítrea en Catalina 008 y comparación con ajustes realizados en otros meteoritos por Bonal et al., (2016)

Otra particularidad de los espectros obtenidos con Raman en las inclusiones vítreas de ambas familias (MI1, MI2-1 y MI2-2), es la identificación de una curva con intensidad *peak* cercana a los 3.300 cm^{-1} (Ver Ilustración 4.3h). Esto según Frezzotti et al., (2012), se interpreta como la presencia de la molécula de H_2O . Considerando que estos espectros se obtuvieron de una inclusión vítrea, se propone la hipótesis de una posible molécula de agua en la estructura cristalina del olivino analizado.

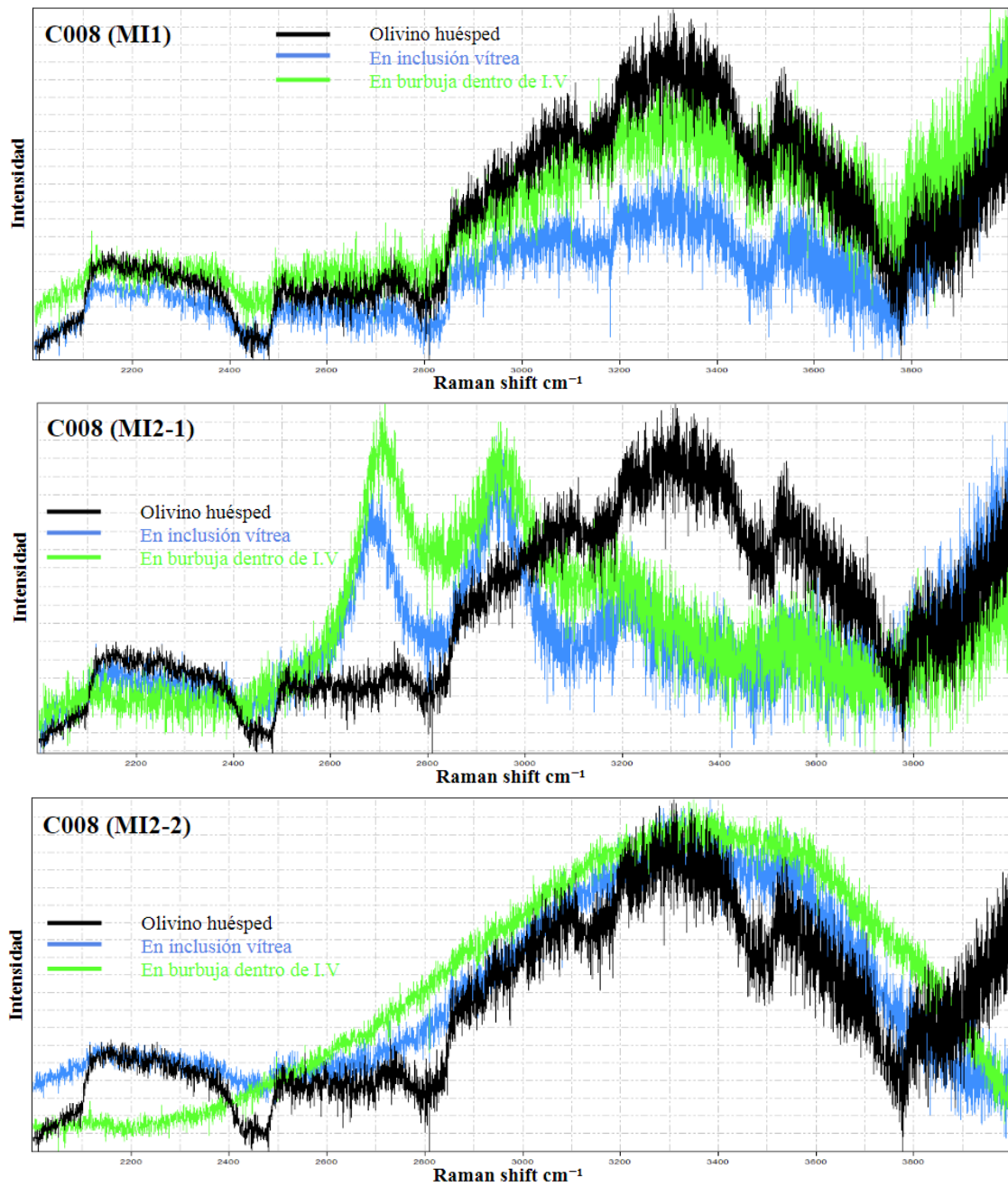


Ilustración 4.3h: Espectros Raman obtenidos en dos familias de inclusiones vítreas MIA1 (MI1) y MIA2 (MI2-1 y MI2-2) en condrito Catalina 008.

4.3.5 El Médano 216

Para el caso de los resultados obtenidos en El Médano 216, nuevamente se hace presente la fase de olivino en dos inclusiones (MI1 y MI2) de una misma familia (MIA1), presentando 6 de los *peaks* representativos de olivino forsterita (Ver Ilustración 4.3i).

Otras fases menos evidentes, podrían también estar presente. Particularmente la inclusión MI1, presenta un pico que podría ser interpretado como una fase mineral de cromita, bastante acorde a la mineralogía esperada para este tipo de muestras.

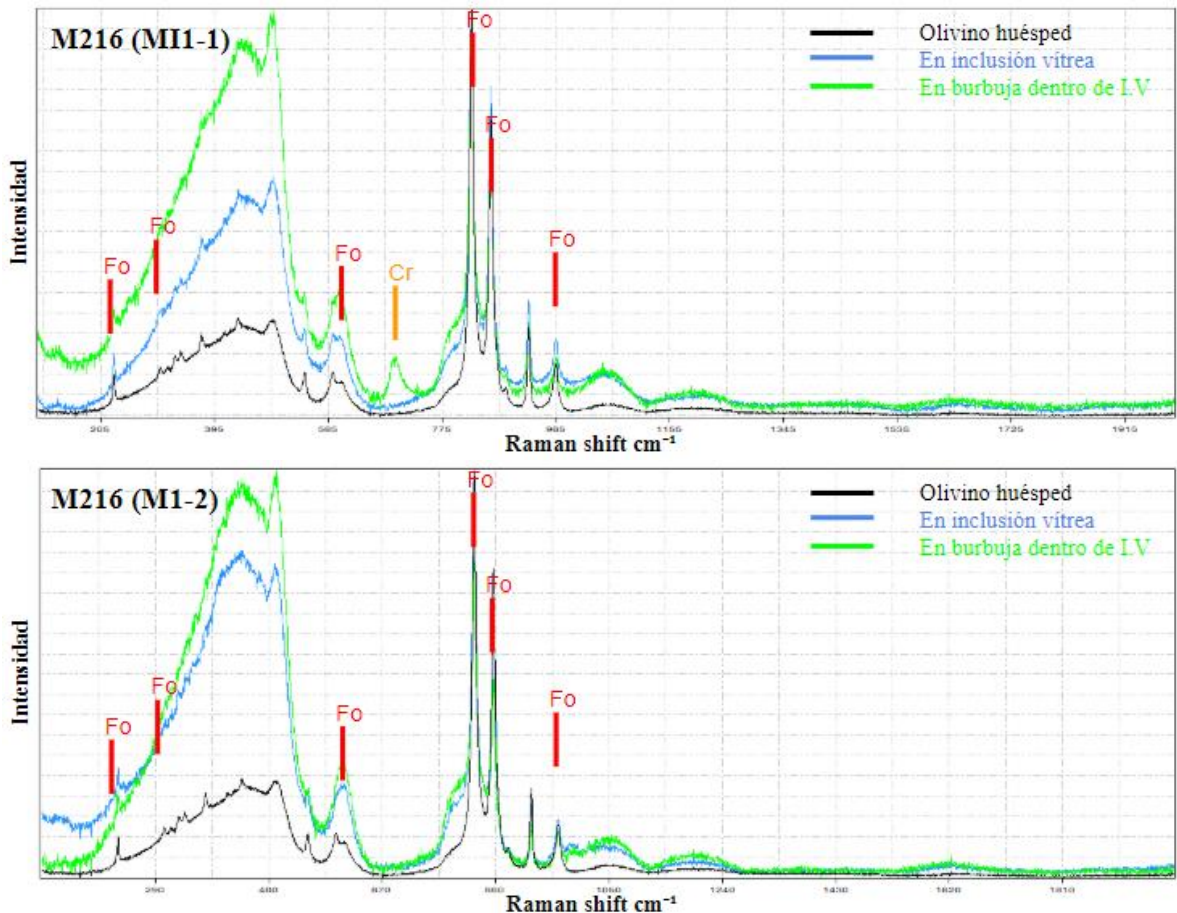


Ilustración 4.3i: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI1-1 y MI1-2) de una misma familia de inclusiones (MIA1) en condrito El Médano 216 (Fo: Olivino Forsterita, Cr: Cromita).

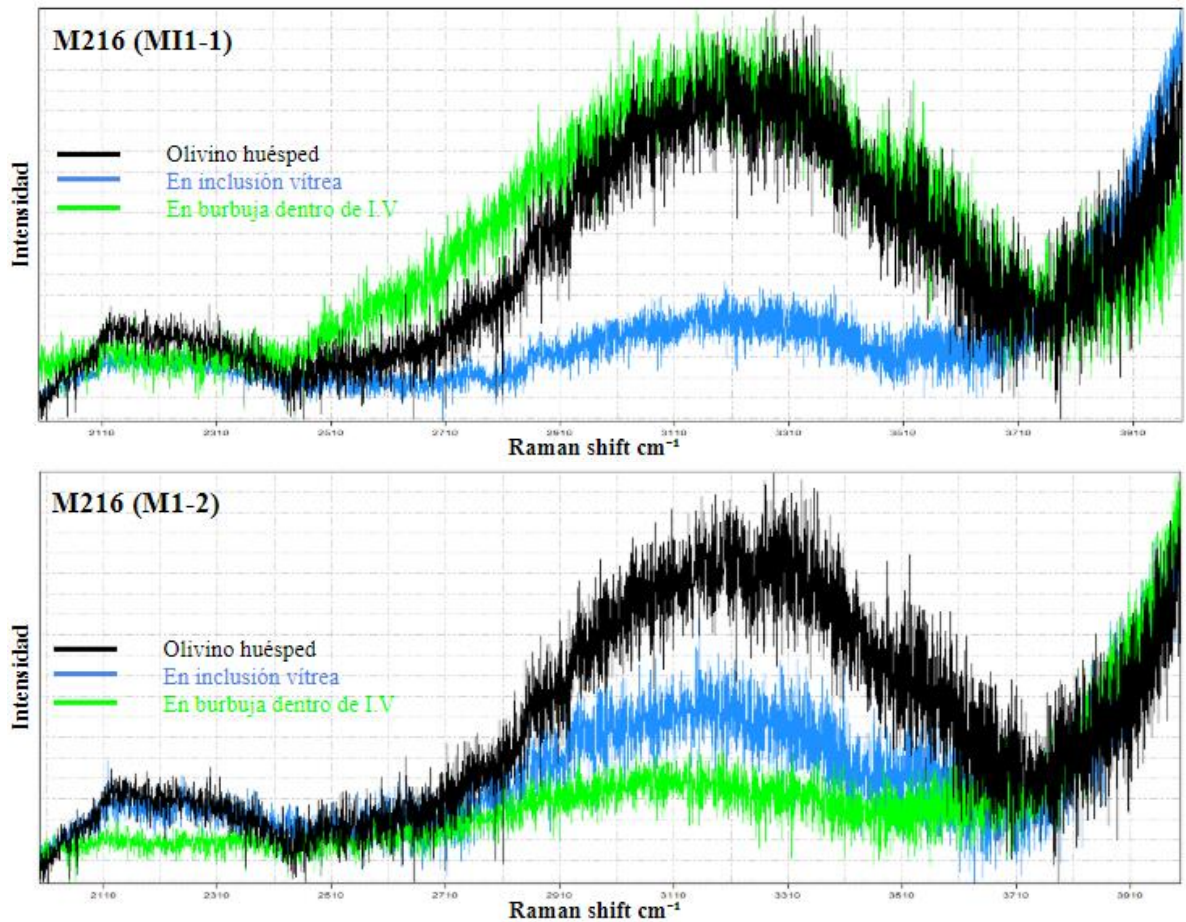


Ilustración 4.3j: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI1-1 y MI1-2) de una misma familia de inclusiones (MIA1) en condrito El Médano 216.

Otra observación de esta muestra, es que al igual que lo obtenido en Catalina 008, El Médano 216 presenta evidencias de la posible presencia de la molécula H_2O . Este hallazgo es altamente relevante para en esta investigación. Comprender los procesos que implicarían la generación de este fenómeno, se aleja de los alcances de este trabajo, no obstante se documenta para ser considerado en estudios futuros.

4.3.5 Los Vientos 123

Los espectros obtenidos en tres inclusiones vítreas asociadas a la familia MIA1 (MI1) y la familia MIA2 (MI2-1 y MI2-2) (Ver Ilustración 4.3k), presentan las mismas características entre sí. De lo que se pueden identificar 6 picos interpretados como la fase olivino forsterita y otros otros picos menos representativos de otras posibles fases minerales que se propone revisar a futuro.

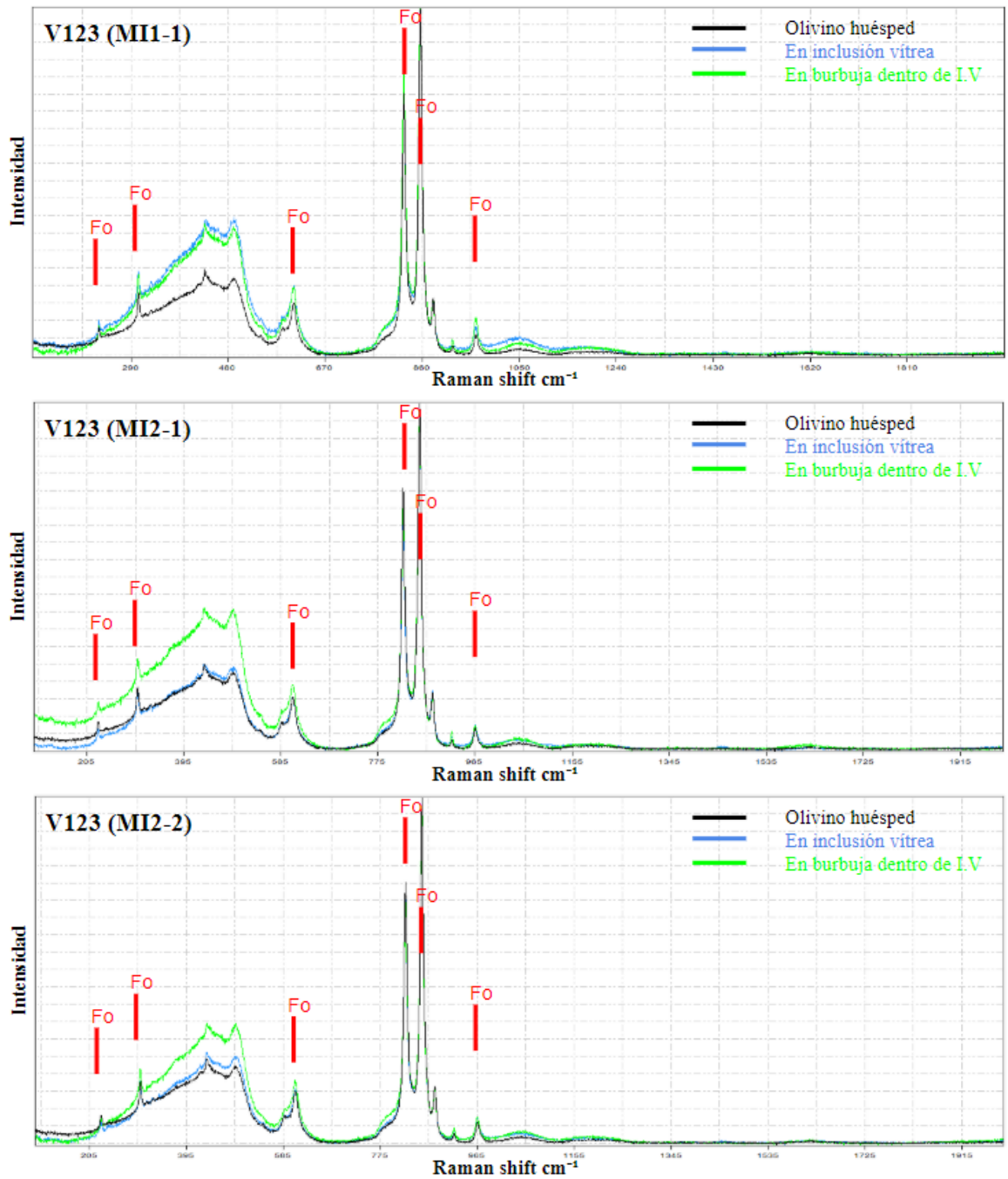


Ilustración 4.3k: Espectros Raman obtenidos en dos inclusiones vítreas (MI1-1 y MI1-2) de una misma familia de inclusiones (MIA1) en condrito Los Vientos 123 (Fo: Olivino Forsterita).

4.4 ESTUDIO CON LA-ICP-MS

Con los análisis realizados de inclusiones vítreas, previamente analizadas con espectroscopía Raman, se obtuvo la concentración de 39 isótopos. Para poder establecer relaciones entre familias de inclusiones vítreas, fue necesario primero aunar criterios. Uno de ellos, fue la importancia de comparar familias del mismo cristal, las que muchas veces se componían de inclusiones vítreas de tipos distintos, es decir, poseían fases distintas entre sí.

Las familias empleadas para la obtención de gráficos comparativos, tienen las siguientes características:

Tabla 4.4: Familias de inclusiones vítreas estudiadas

	Familia	Muestra	# MIs*	Tipos
1	SP1_MI_1-1	567	6	Tipo 2
2	SP2_MI_1-1	567	3	Tipo 2
3	SP2_MI_3-1	567	3	Tipo 2
4	SP1-1_MI_1-1	568	7	Tipo 2, 3 y 4
5	SP1-1_MI_2-1	568	2	Tipo 3
6	SP1-1_MI_3-1	568	3	Tipo 2
7	SP_1_MI_2-1	569	4	Tipo 3
8	SP_1_MI_3-3	569	3	Tipo 3
9	SP_1_MI_4-1	569	2	Tipo 3
10	SP_2_MI_1-1	569	2	Tipo 2
11	Ca_MI_1-1	Catalina 008	2	Tipo 1 y 2
12	Ca_MI_2-1	Catalina 008	2	Tipo 3
13	Ca_MI_3-1	Catalina 008	2	Tipo 1
14	Ca_MI_4-1	Catalina 008	3	Tipo 2 y 3
15	Ca_MI_5-1	Catalina 008	3	Tipo 4

16	V123_MI_1-1	Los Vientos 123	7	Tipo 2 y 4
17	V123_MI_2-1	Los Vientos 123	2	Tipo 2

*#Mis: Número de inclusiones vítreas que constituyen la MIA

De los resultados obtenidos, se representaron los elementos Fe⁵⁶, Mn⁵⁵, Cr⁵⁷, Ti⁴⁹, Ca⁴⁰, K³⁹, Si²⁸, Al²⁷ y Mg²⁵. Considerando que los datos obtenidos corresponden a intensidad de señal y no a abundancia, se establecen relaciones entre estas intensidades de señal para comprender la química de las inclusiones a grandes rasgos y establecer comparaciones entre inclusiones vítreas de una misma familia.

4.4.1 Características químicas de RM 567

Los diagramas obtenidos en tres inclusiones (MI1, MI2 y MI3) de una misma familia de inclusiones (MIA2) (Ver Ilustración 4.4^{a1} y 4.4^{a2}), revelan un incremento desde la inclusión MI1 a la MI3 en la abundancia de algunos de los elementos analizados. Esta se evidencia por un aumento de señal en la curva presente entre los 100 y los 130 segundos de análisis.

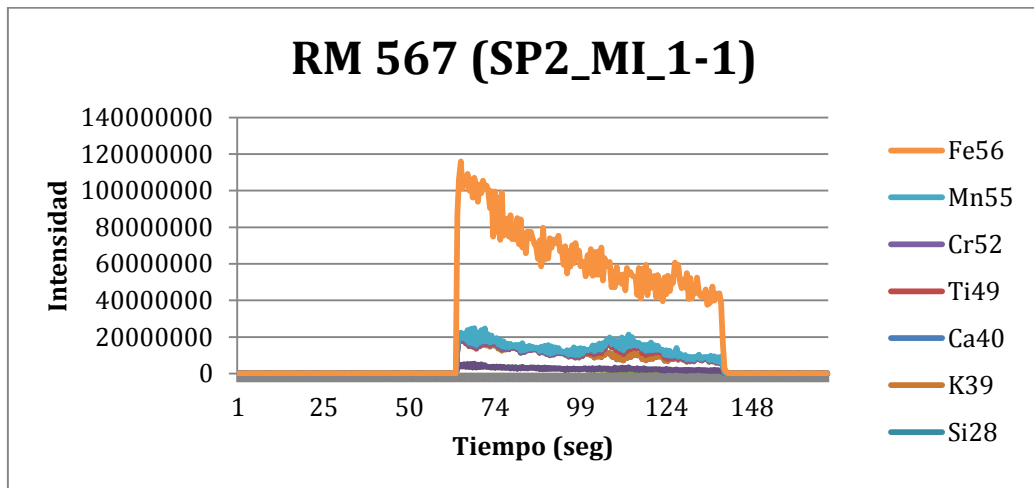


Ilustración 4.4^{a1}: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en una inclusión vítrea (MI1) de una familia (MIA2) de condrito RM567.

Una observación interesante reflejada en estos diagramas, es que la inclusión MI1 de esta familia, no presenta una curva tan notoria en la señal de aluminio y magnesio, que si se observa en MI2 y MI3. Otro aspecto a destacar, es la

notoria curva de hierro y silicio, presente en MI3, en comparación con las otras dos inclusiones.

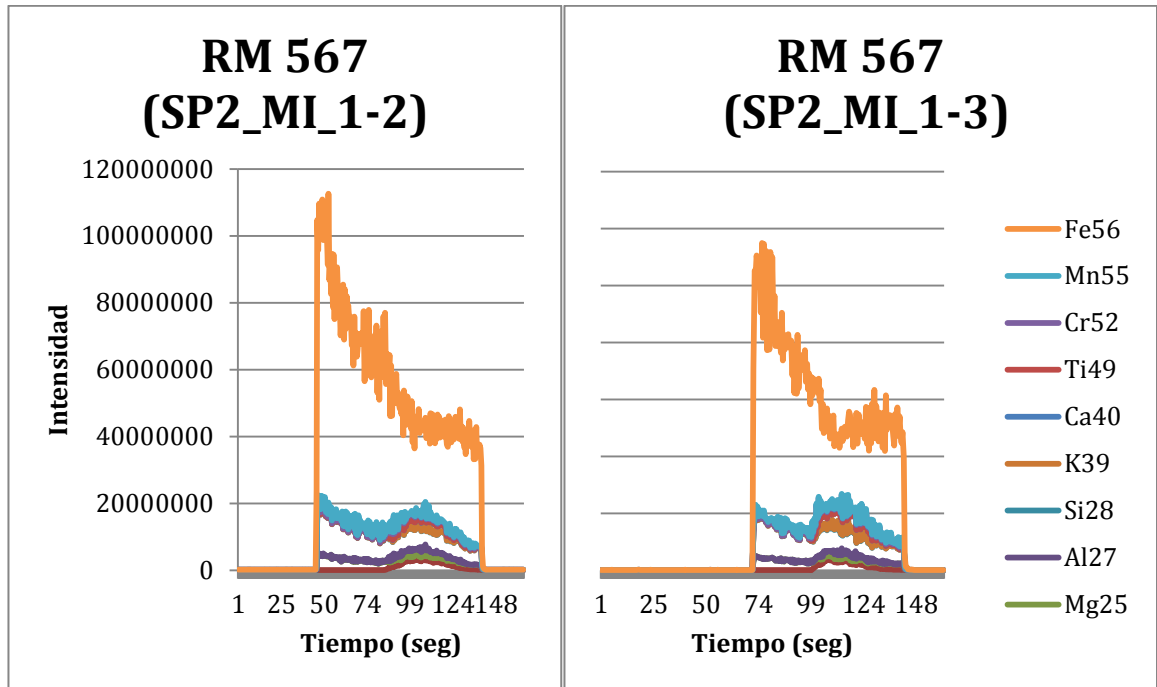


Ilustración 4.4^{a2}: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (MI2 y 3) de una familia (MIA2) de condrito RM567.

Respecto a la comparación de elementos químicos entre las inclusiones vítreas estudiadas y la abundancia promedio de condritos CO (Ver Ilustración 4.4^{a3}). Los elementos Aluminio y Calcio, muy refractarios, se presentan cercanos al fraccionamiento de roca total, esto podría implicar que estos serían elementos muy relevantes en los estadios iniciales de condensación, durante la formación de olivinos y que en eventos posteriores, los mismos no tiendan a formar parte de los otros componentes de este condrito. Estos elementos se asocian a temperaturas de condensación entre los 1650 K y 1650K a 1500 K, respectivamente.

Por otro lado, el comportamiento de elementos altamente refractarios (1650 K a 1500 K), tales como el Lantano y Samario, en principio debieran tener una tendencia similar a los elementos muy refractarios, no obstante ambos se presentan en cantidades traza respecto de la concentración de roca total. Esto tiene sentido, pues no son elementos mayores, pero observando el patrón de roca total CO, permite suponer que estos elementos se asocian a otros componentes de

meteoritos, por lo que no tienden a ser preponderantes en el proceso de condensación de los olivinos aquí estudiados.

Los elementos menos refractarios tales como el Vanadio y Cesio (1500 K a 1360 K), se presentaron también deprimidos en comparación a la concentración de roca total. Considerando que representan elementos traza, se puede argumentar de la misma manera que el comportamiento del lantano y samario. Notando que el Vanadio es ligeramente más compatible con la fase olivino, en comparación con los otros elementos traza expuestos, evidenciado por una mayor cercanía a la curva de abundancia de roca total CO.

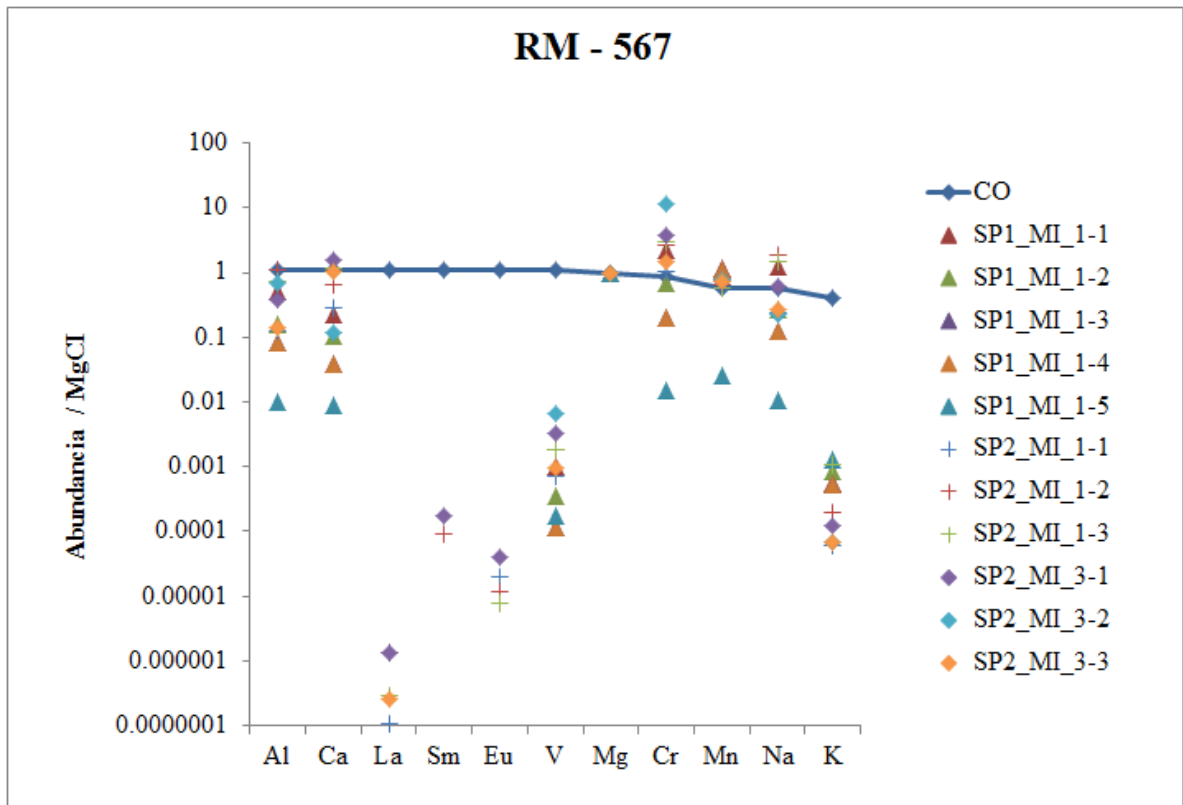


Ilustración 4.4^{a3}: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para RM 567

Los elementos comunes tales como el Hierro, Cobalto, Cromo, Níquel y Europio (1360 K a 1290 K), mostraron comportamientos diferentes. El Hierro y Cromo se asemejan a las concentraciones de roca total, mientras que el Cobalto, Níquel y Europio, presentan un comportamiento más deprimidos respecto de la tendencia de roca total CO.

Los elementos moderadamente volátiles estudiados tales como el Arsénico, Oro y Galio (1290 K a 704 K), no fueron detectados, posiblemente presentes bajo el límite de detección o completamente ausentes. El Potasio, se presentó en bajas concentraciones, mientras que el Sodio y Manganeseo poseían comportamientos similares a los elementos comunes, con concentraciones en relaciones similares a la roca total CO.

Elementos más volátiles (704 K a 371 K) y altamente volátiles (< 371 K) no fueron detectados por este análisis.

4.4.2 Características químicas de RM 568

Los resultados obtenidos de los análisis en inclusiones vítreas, se presentan en las Ilustraciones 4.4b1, 4.4b2 y 4.4b3.

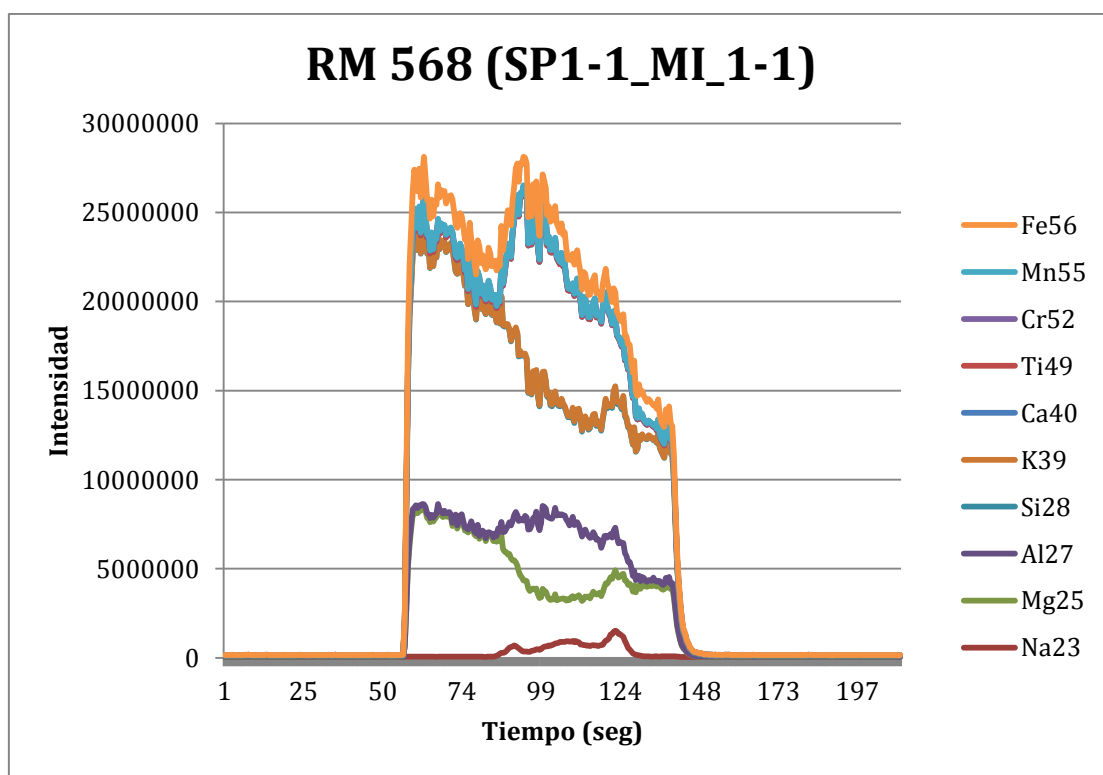


Ilustración 4.4b1: Diagrama realizado con resultados 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en una inclusión vítrea (MI1) de una familia (MIA1) de condrito RM568.

En la Ilustración 4.4b1 se puede ver una curva asociada a la ablación de la inclusión vítrea MI1, entre los 80 y 130 segundos de análisis, el incremento notorio

de la intensidad de la señal del Hierro, Silicio y Cromo, se observan en contraposición a la disminución del Magnesio y Potasio en el mismo rango de tiempo.

Para el caso de las inclusiones MI2, MI3 y MI4, en general todos los elementos presentan un incremento de la intensidad señal, salvo en la MI3 (Ver Ilustración 4.4b2), la cual tiene un pequeño incremento de señal en Aluminio, respecto de los otros elementos, que en caso de las otras inclusiones van de la mano con el comportamiento de Magnesio.

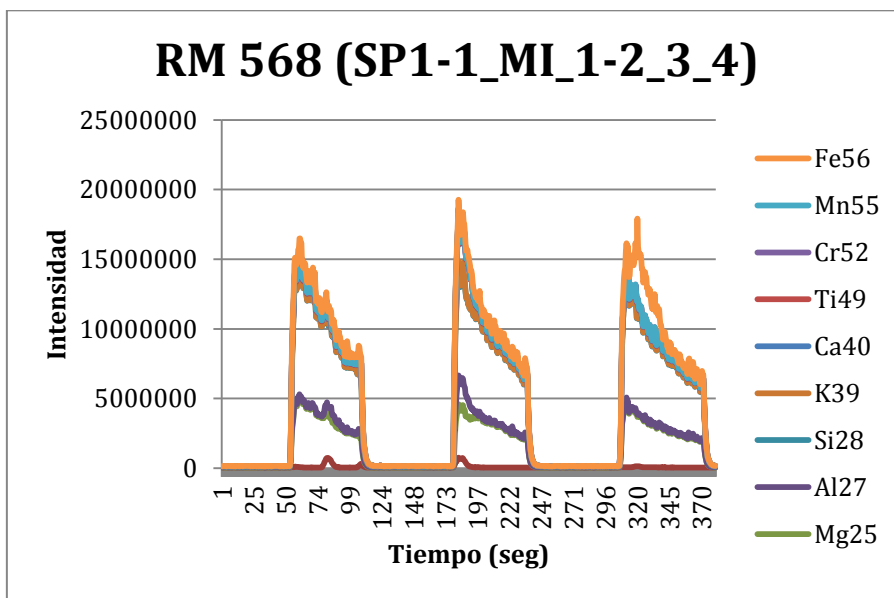


Ilustración 4.4b2: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en tres inclusiones vítreas (MI2, MI3 y MI4) de una familia (MIA1) de condrito RM568.

Las familias MI5 y MI6 presentan comportamientos similares de las intensidades de señales de Aluminio y Magnesio de la inclusión MI1 analizada de esta misma familia (Ver Ilustración 4.4b3), presentándose el Magnesio deprimido respecto del Aluminio.

Estas diferencias se pueden deber a que particularmente esta familia posee 3 tipos de inclusiones distintas. La inclusión MI1 no posee burbuja, y la inclusión presenta un vidrio deprimido en Magnesio respecto del olivino huésped. Por otro lado, la inclusión MI2, presenta un incremento de señal entre los 74 y 90 segundos de análisis, los que pueden deberse a la inclusión, que presenta mayor contenido de Aluminio, Magnesio y Titanio dentro respecto del olivino huésped.

Las otras inclusiones MI3, MI4, MI5 y MI6, corresponden a inclusiones con cristales en su interior, considerando el incremento de señal entre los 173 y 185 segundos, correspondientes a la inclusión, ésta presentaría las mismas características que el cristal huésped, por lo que los cristales posiblemente sean de olivino también.

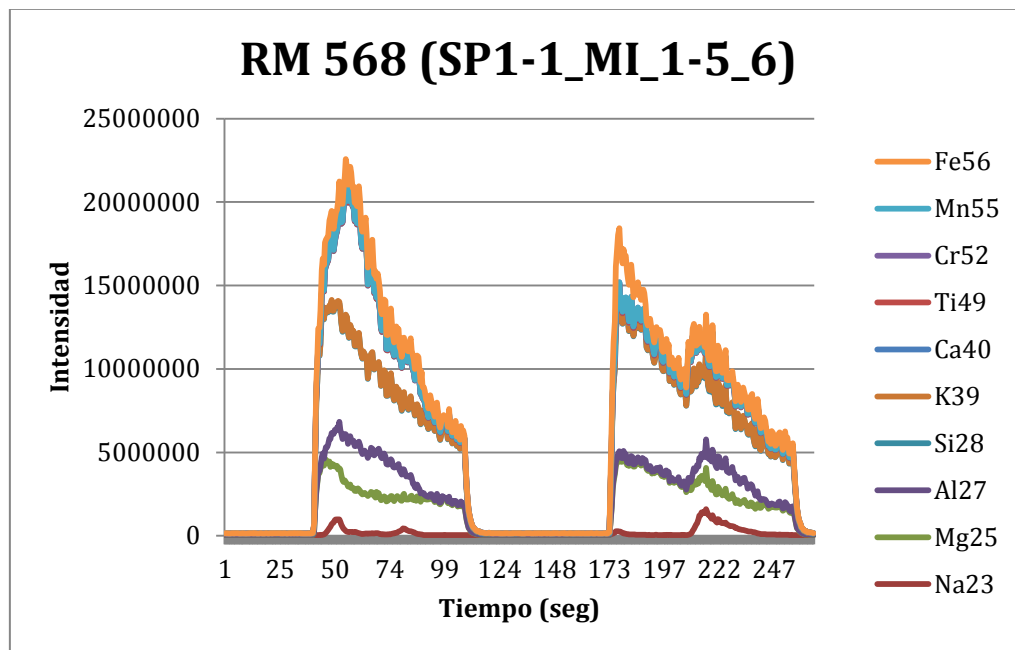


Ilustración 4.4b3: Diagrama realizado con resultados 9 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (MI5 y MI6)) de una familia (MIA1) de condrito RM568.

Según la comparación de elementos refractarios (Ver Ilustración 4.4b4), se observan comportamientos similares a la muestra RM 567, con Aluminio y Calcio cercanos a la tendencia de la roca total y concentraciones de Lantano, Samario, Vanadio y Cesio deprimidas respecto de la concentración promedio de un condrito tipo CO.

El metal Cromo, mostró un comportamiento cercano a la concentración de roca total, mientras que el Hierro, a diferencia del caso anterior en la muestra RM 567, se observa deprimido en relación a las concentraciones promedio de roca total, en órdenes de concentraciones similar al Níquel e igualmente deprimidas al resto de los elementos comunes Cobalto y Europio.

Como en el caso anterior, el Arsénico y el metal Oro, tampoco superaron los límites de detección, no obstante, el elemento Ga si se presentó en cantidades traza,

comportándose de manera similar al Manganeso y Potasio. En particular el Sodio si poseía cantidades que superaron la línea de tendencia de concentración de roca total de un condrito CO, al igual que el caso visto anteriormente.

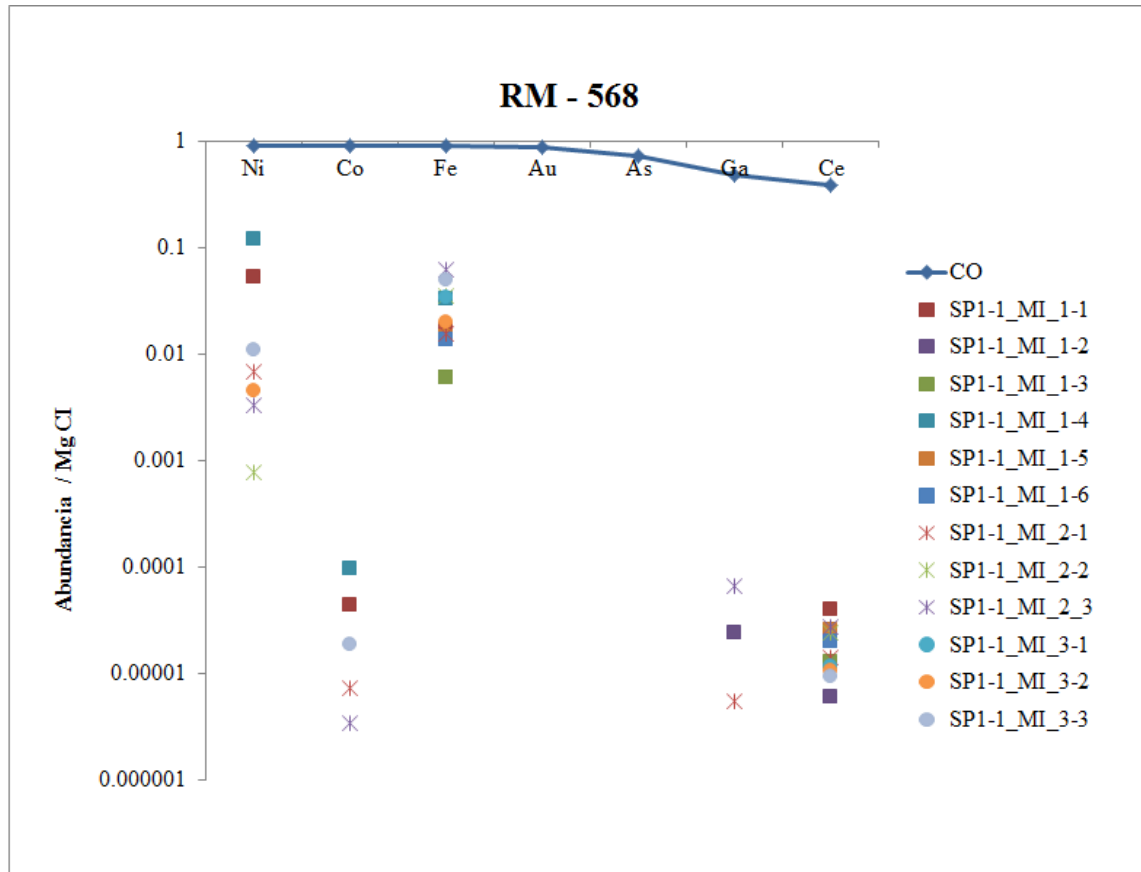


Ilustración 4.4b4: Concentraciones obtenidas con LA-ICPMS para RM 568

4.4.3 Características químicas de RM 569

Los resultados obtenidos en esta muestra, revelan para la familia de inclusiones MIA2, cuatro inclusiones vítreas que aparentemente decrecen en la intensidad de señal asociada al Hierro (Ver Ilustración 4.4c1). Para poder comprender mejor este resultado, es interesante poder correlacionar espacialmente la posición de estas inclusiones, para determinar el sentido en que decrece esta abundancia.

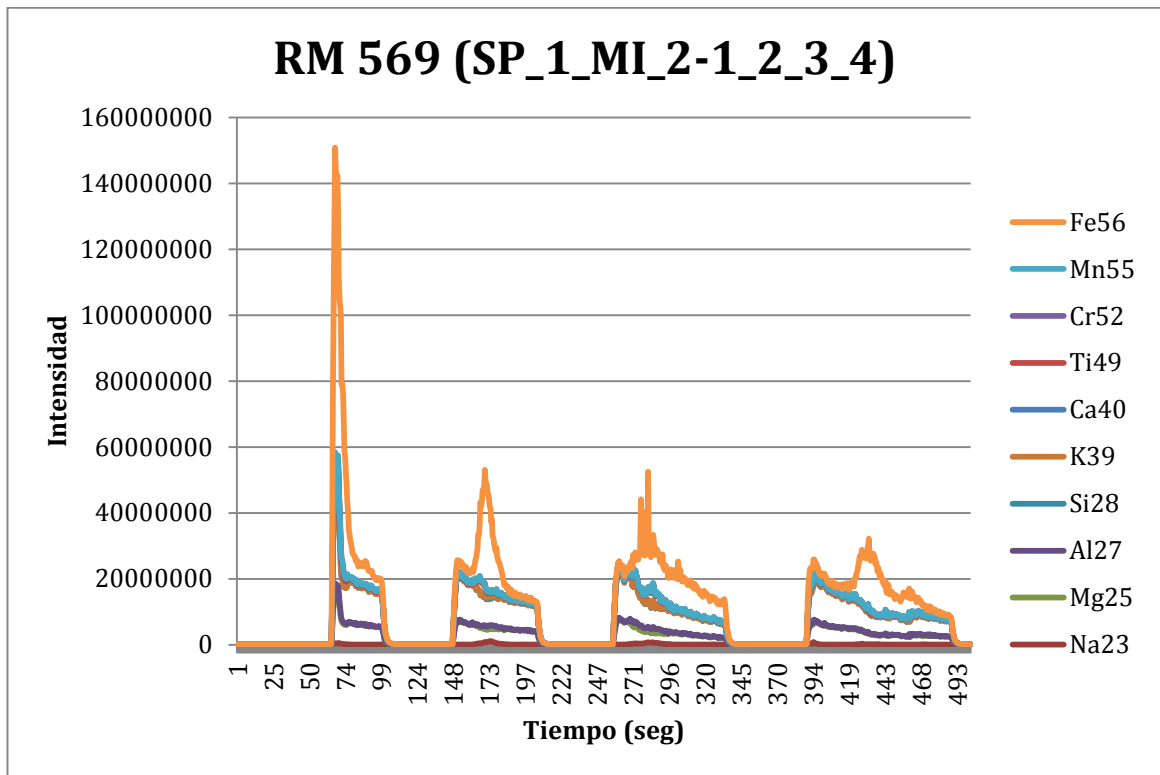


Ilustración 4.4c1: Diagrama realizado con resultados de 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (MI1, MI2, MI3 y MI4)) de una familia (MIA1) de condrito RM569.

Los elementos refractarios Aluminio, Calcio, Samario, Vanadio y Cesio mostraron el mismo comportamiento del caso anterior, con Vanadio menor a la concentración de roca total y Lantano, Samario y Cesio en cantidades considerablemente menores respecto de la tendencia de la roca CO (Ver Ilustración 4.4.c.2).

El Hierro, Cromo y Níquel presentan comportamientos similares, cercanas a la concentración de roca total, mientras que el Cobalto y Europio en cantidades considerablemente menores, similar a la relación entre el Lantano, Samario y Cesio con la roca total.

En esta muestra se identificó una mayor cantidad de elementos moderadamente volátiles, marcando la presencia de concentraciones de Arsénico y Galio, deprimidos respecto de la roca total, al igual que el Potasio. Relaciones similares entre Manganeso y Sodio también se reportaron, aunque el Sodio se presentaba de una manera más consistente con las concentraciones de roca total.

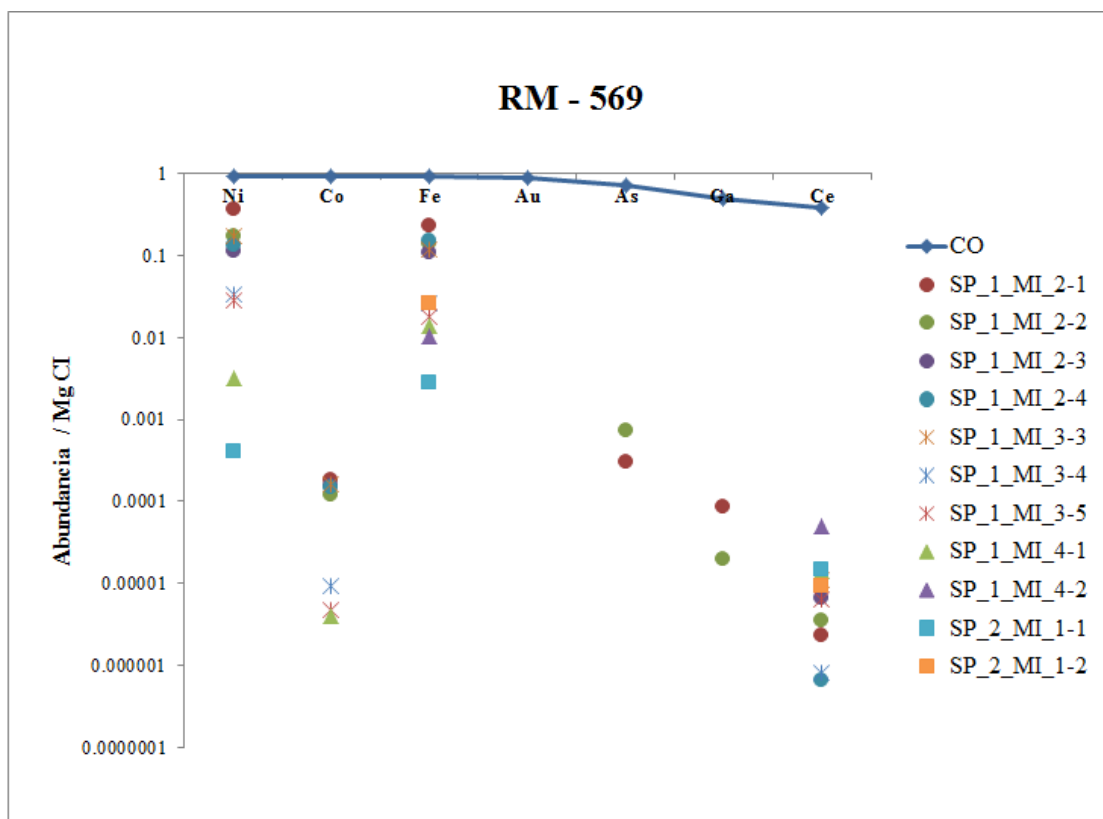


Ilustración 4.4c2: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para RM 569 y comparadas mediante metodología propuesta

4.4.4 Características químicas de Catalina 008

Los gráficos obtenidos para los análisis de inclusiones con LA-ICPMS, reflejan para dos inclusiones vítreas (MI1: con burbuja y MI2: con burbuja y cristales) de una familia de inclusiones vítreas (MIA1), algunas diferencias en la intensidad de las señales de 9 elementos estudiados (Ver Ilustración 4.4d1).

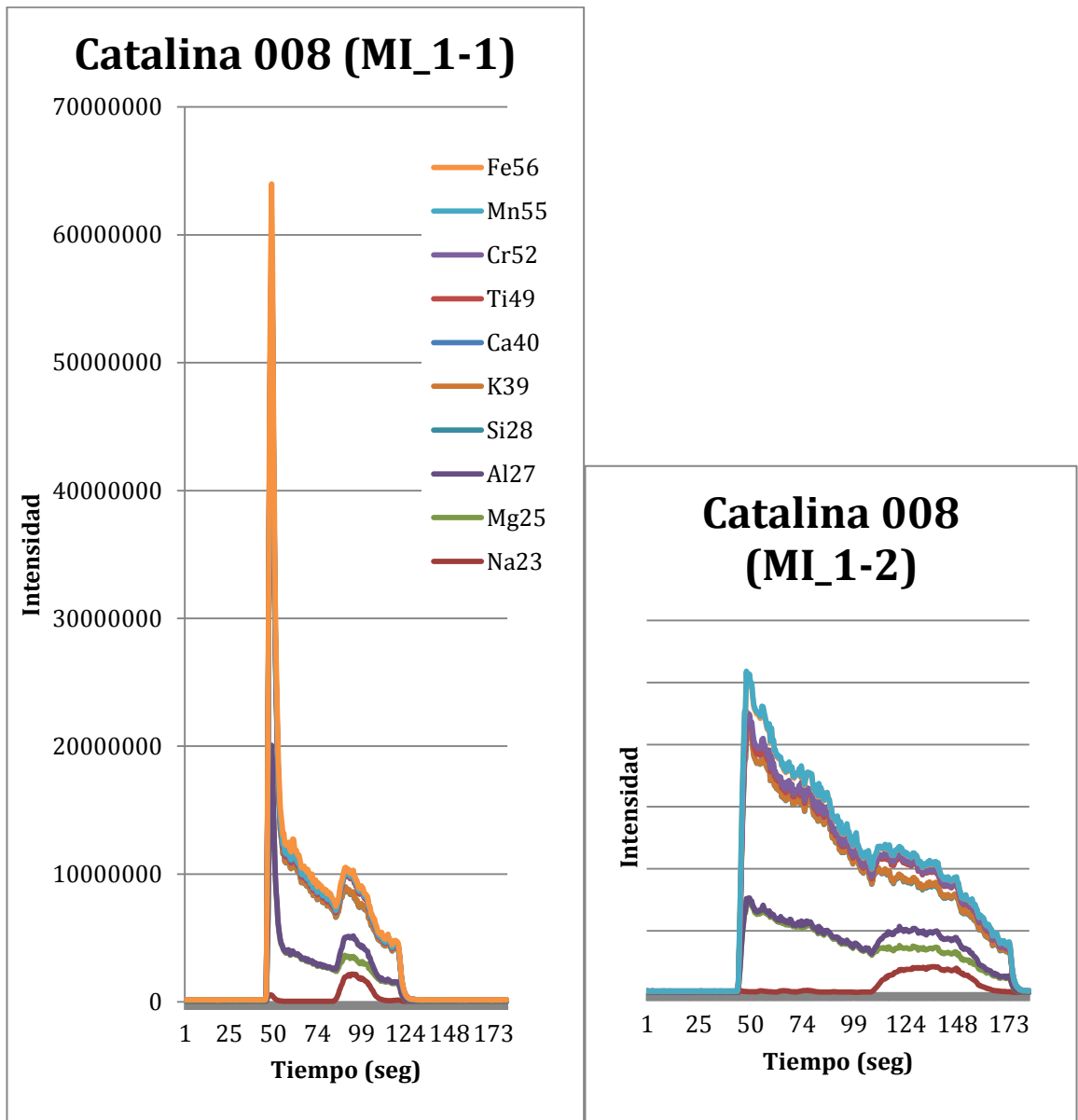


Ilustración 4.4d1: Diagrama realizado con resultados de 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en dos inclusiones vítreas (Izquierda: MI1 (con burbuja) y Derecha: MI2 (con burbuja y cristales)) de una familia (MIA1) de condrito Catalina 008.

De los diagramas se desprende la intensidad del Aluminio más fuerte en la inclusión de que la intensidad de señal del Magnesio. Otra observación es la intensidad de Sodio, el que no se presenta en el cristal huésped, pero que sin embargo aparece en la inclusión vítrea. Considerando el comportamiento de los

elementos en los diagramas, es posible inferir que los cristales que se encuentran dentro de la inclusión MI2, seguramente corresponde a la misma fase olivino. Se propone observar otros elementos químicos para apoyar esta hipótesis.

De la comparación de elementos con los promedios de concentraciones de roca total CO, se observa que los elementos Calcio y Cromo presentaron órdenes y comportamientos similares, al igual que los elementos Aluminio y Sodio. Los elementos altamente refractarios se presentaron como en los casos anteriores, cercanos al comportamiento de un condrito CO. El elemento Vanadio, se presenta deprimido respecto de las concentraciones de roca total CO, mientras que el Lantano, Samario y Cesio en cantidades traza.

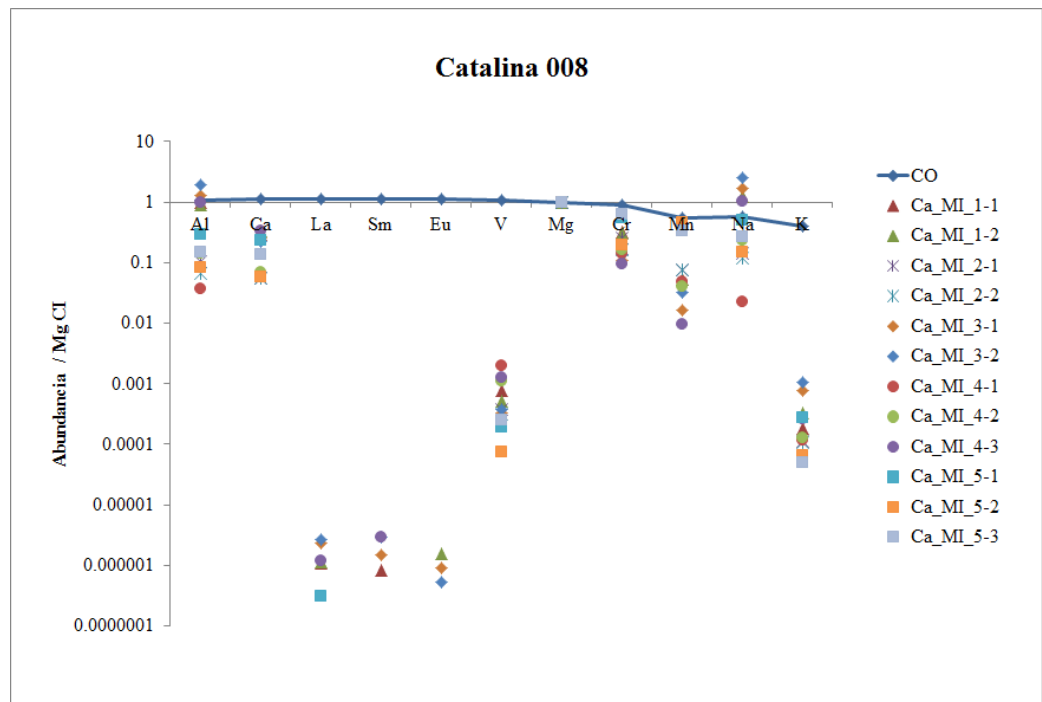


Ilustración 4.4d2: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para Catalina 008 y comparadas mediante metodología propuesta.

Los elementos comunes Hierro, Cromo y Níquel, se presentaron similares a los casos anteriores, con concentraciones menores y cercanas a la línea de tendencia y con Cobalto y Europio en concentraciones considerablemente menores.

De los elementos moderadamente volátiles, tales como Potasio y Cesio mostraron comportamientos similares, deprimidos respecto de la línea de

concentración CO, mientras que el Manganeso y Sodio tienen comportamientos similares a los elementos comunes.

4.4.5 Características químicas de Los Vientos 123

El diagrama realizado para cinco inclusiones vítreas de Los Vientos 123, reflejan un comportamiento similar entre sí. Todas las inclusiones son de tipo vítrea con burbuja, a excepción de la MI2 (Ver Ilustración 4.4e1)

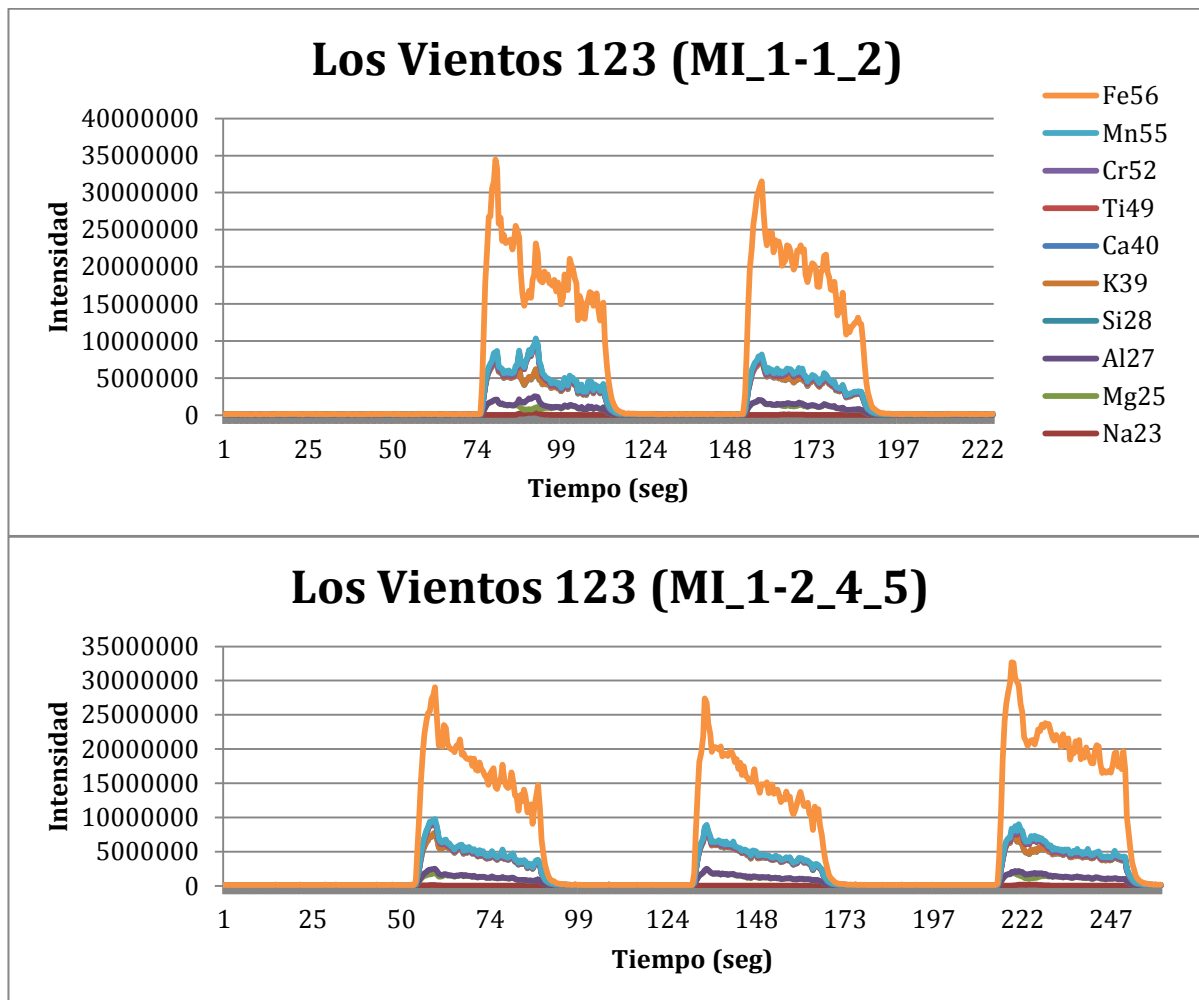


Ilustración 4.4e1: Diagrama realizado con resultados de 10 elementos químicos obtenidos con LA-ICPMS en cinco inclusiones vítreas de una familia (MIA1) de condrito Los Vientos123

Particularmente la inclusión MI1 (diagrama superior izquierdo, entre los 80 y 95 segundos, presenta un pico interesante de observar, respecto de las otras. La que se caracteriza por un incremento en la intensidad señal de Silicio y una disminución de Magnesio en la misma.

El caso de las comparaciones de concentraciones obtenidas para Los Vientos 123, arrojan comportamientos similares para los elementos Aluminio, Calcio, Cromo, Manganeso, Sodio y Hierro, con poco fraccionamiento, lo que permite inferir que las inclusiones vítreas allí presente pertenecen a un meteorito muy primitivo, que presenta casi la misma composición promedio de un condrito CO.

Los elementos altamente refractarios Aluminio, Calcio, Lantano, Samario, Vanadio y Cesio se comportaron de la misma manera que los casos anteriores. Los elementos comunes Cobalto y Europio, deprimidos respecto de la línea de roca total, en cantidades trazas. Por otro lado, el Cromo presenta relaciones de composición muy similar a la línea de tendencia de condritos CO. Elementos moderadamente volátiles Oro, Arsénico y Galio no se detectaron, mientras que el Manganeso tenía un comportamiento similar al Cromo y al Sodio, aunque con mayor variación en este último.

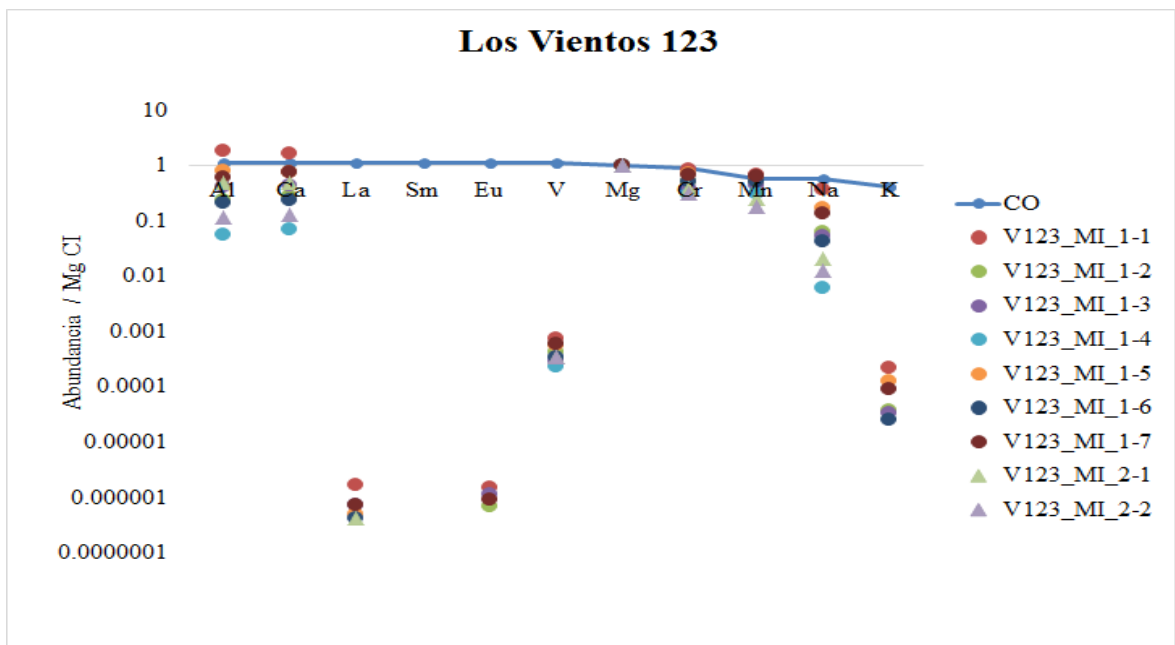


Ilustración 4.4d: Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS para Los Vientos 123

4.5 ESTUDIO DE CONDRITOS NO CLASIFICADOS

Posteriormente, los meteoritos no clasificados, que se suponen fragmentos de El Médano 216, fueron también estudiados con microscopio óptico, para determinar sus características texturales.

4.5.1 Características petrográficas generales

Para poder realizar una clasificación de los condritos asociados a la elipse de El Médano 216, se calcularon porcentajes modales de los componentes presentes en los condritos estudiados, siguiendo la metodología de tratamiento de imágenes, descrita previamente en la metodología de este trabajo.

Los datos y cálculos de porcentajes, se adjuntan en el [ANEXO II](#). Los resultados generales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.5: Porcentajes modales de los condritos estudiados

Muestra	#*	Opacos (%vol.)	Porosidad (%vol.)	Matriz (%vol.)	Cónd. (%vol.)	C.P. (%vol.)	CAIs (%vol.)	Cónd. (mm)
567	6	3.7	13	44.3	32.9	28.8	3.3	0.145
568	5	3	8.3	33.5	50.7	45	2.6	0.126
569	7	3.2	9	50.8	29	24.5	3.2	0.14
El médano 216	4	6	2.4	47.1	32.2	27.5	3.7	0.15

*#: Número de áreas representativas estudiadas de cada muestra, Cónd: Cóndrulos; C.P.: Cóndrulos porfíricos; CAIs: Inclusiones Calco-alumínicas.

4.5.2 Características de RM 567

Aspecto general de la muestra: Textura condrítica granoblástica, ligeramente meteorizado, por el color anaranjado de su matriz. Porosidad media (13%).

Componentes: Cóndrulos. Corresponden aproximadamente un 32% del volumen, el tamaño promedio es de 0.15 mm, que van desde los 0.05 mm hasta los 0.9 mm de diámetro, con formas esféricas a subredondeadas. Los cóndrulos que presenta son en su mayoría de porfíricos (29%), tipo POP y PO. Presenta escasos cóndrulos tipo OB (<0.1%) de tamaños menores a 0.4mm, Piroxeno radial (0.5%), de 0.13 mm de diámetro promedio y Criptocristalino (0.08%) de aspecto vítreo, con

tamaños entre 60 y 300 μm de diámetro. **Matriz.** Corresponde a aproximadamente un 45% del volumen total de la muestra. Textura granoblástica, con cristales euhedrales y subhedrales de olivino y piroxeno, de tamaños menores a 50 μm . **CAIs.** (3.3%) Posee inclusiones calco-alumínicas de variados tamaños entre 80 μm hasta 100 μm .

Mineralogía: Olivino. (20%) Inhomogéneos, con nula alteración, con zonación ígnea, presentan fracturas planares (S3) en fragmentos de cóndrulos y fragmentos cristalinos. **Piroxeno.** (<20%), con diámetros entre 0.5mm y 0.05mm, 0.25mm en promedio. **Troilita.** Escasa (<2%) de tamaños menores a 0.4mm, con diámetros promedio de 60 μm en muchos casos policristalina. **Kamacita.** (3% aprox) de tamaño promedio de 60 μm . Aparece como granos subredondeada y bolsones, muchas veces reemplazada entre un 20 a 60% (W2) **Óxidos.** En microvenillas de choque (Ver Ilustración 4.5a), venillas interconectadas (W2) (Ver Ilustración 4.5b), en algunos casos, reemplazados por completo (W3) (Ver Ilustración 4.5c). **Alteración. Smectita y serpentinita.** Reemplazando cóndrulos de olivino.

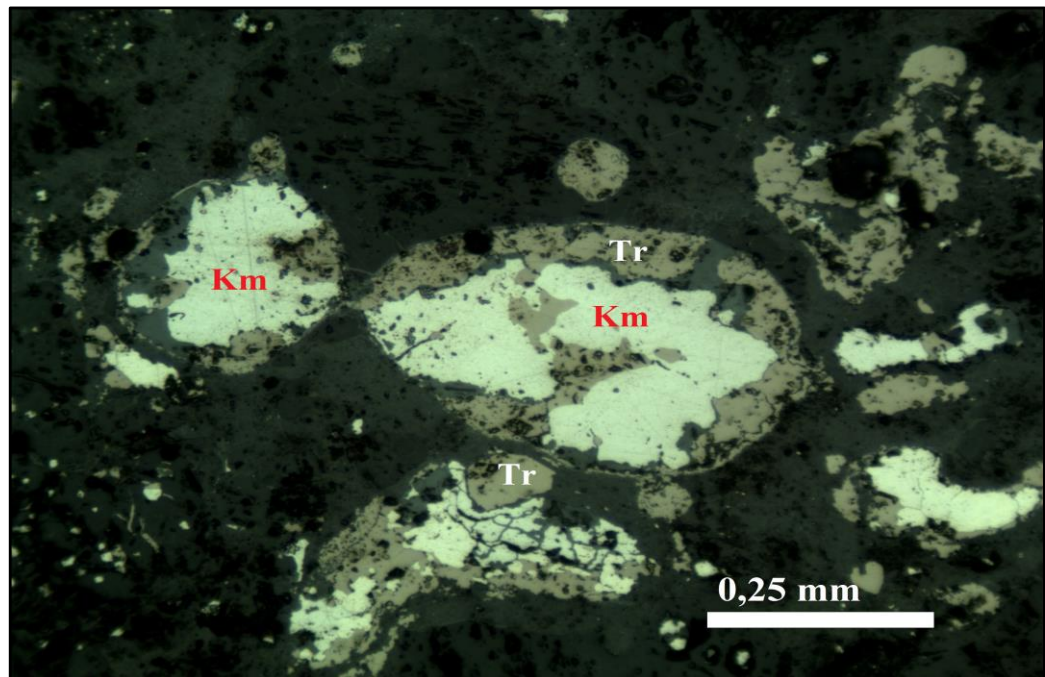


Ilustración 4.5a: Microfotografía, bolsones de kamacita y troilita en luz reflejada.
En Muestra RM 567

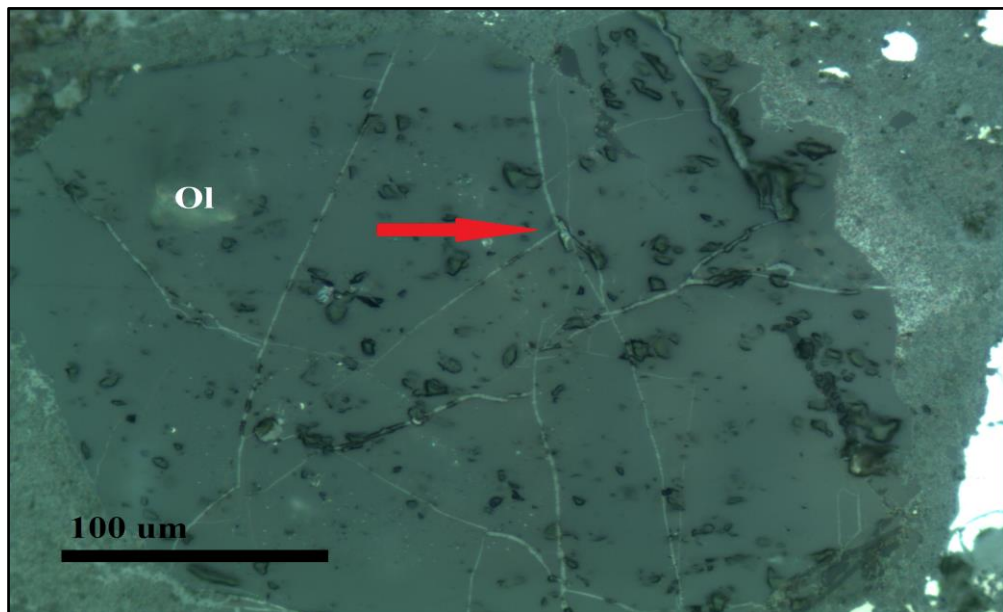


Ilustración 4.5b: Microfotografía. Microvenillas de choque rellenas con opacos en cristal de olivino a luz reflejada. Muestra RM 567.

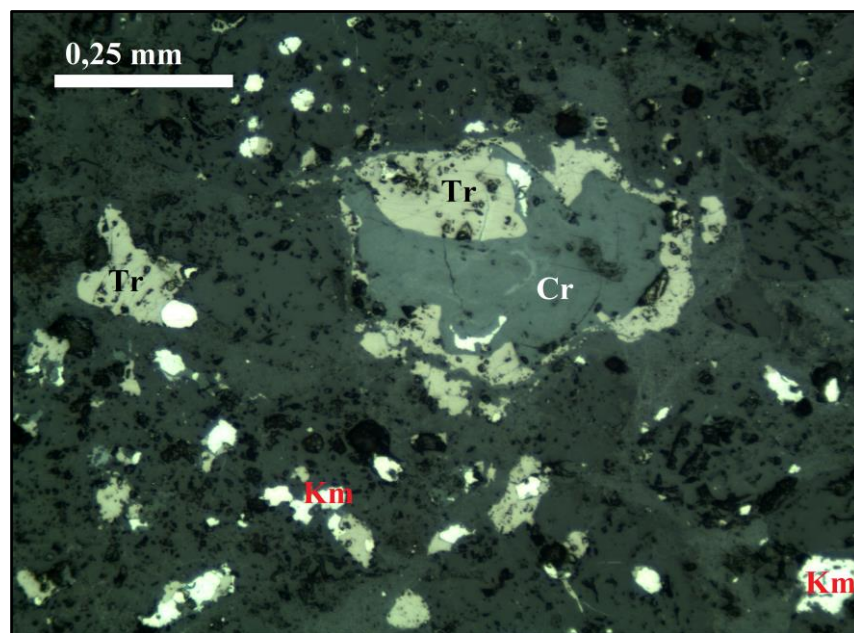


Ilustración 4.5c: Microfotografía. Óxidos (cromita) reemplazando kamacita en luz reflejada en meteorito RM 567.

4.5.3 Características de RM 568

Aspecto general de la muestra. Textura condrítica granoblástica. Porosidad baja-media (8.3%)

Componentes: Cóndrulos. Constituyen aproximadamente un 51% del volumen de la muestra, con tamaños que varían entre los 0.04 mm hasta los 0.55 mm, con un tamaño medio de 0.13 mm de diámetro, poseen formas esféricas a subesféricas, en general presenta un aspecto muy cristalino. Poseen en su gran mayoría cóndrulos porfíricos (45% vol.), de tipo PO y POP. Presenta cóndrulos OB (1.3 vol.%) de tamaños de diámetro menores a 0.4mm, y 0.2 mm de diámetro promedio. Posee piroxeno radial (1.4%vol.) y criptocristalino (0.4%vol.) de tamaños pequeños, menores a los 0.4mm. **Matriz.** Representa aproximadamente el 34% del total de la muestra, tiene textura granoblástica, posee cristales de olivino y piroxeno, euhedrales a subhedrales, de tamaños menores a 120 μm . **CAIs.** Cerca de un 2.6%vol. corresponde a inclusiones calco-alumínicas, de tamaños menores a 200 μm .

Mineralogía: Olivino. (20 vol%) En cóndrulos y como fragmentos en componentes y matriz de tamaños menores a 0.3 mm. **Piroxeno.** (30 vol%) Ortopiroxenos, con birrefringencia en blanco gris, de tamaños menores a 0.3 mm de diámetro, algunos presentan macla, de alteración alto relieve y presentan fractura planar (Ver imagen 4.5.d). **Kamacita.** (<2 vol%) De tamaños menores a 0.25 mm, diámetros promedios de 50 μm . En formas subredondeadas y como bolsones, asociada a la troilita, presenta leves anillos de reemplazo de óxidos alrededor (Wo-1). **Troilita.** (< 1 vol%) Poseen tamaños menores a 0.4 mm de diámetro, diámetros promedios de 50 μm Policristalinas, dentro de cóndrulos se observan pleocroicas. Presenta manchas de limonita en muchos casos (Wo), se observan leves anillos de reemplazo de óxidos alrededor (Wo-1). **Óxidos.** Reemplazando kamacita y presente en finas venas de choque rellenas con óxidos en olivino. Como óxidos de Hierro, se presenta posible hematita, presentando reflejos internos a nicols cruzados y en luz reflejada en un sector del corte (Ver Ilustración 4.5e). Se observa un cristal de un mineral con aspecto de plagioclasa, con baja birrefringencia y venas de choque, que se asocia a posible Masquelinita (Ver imagen 4.5f).

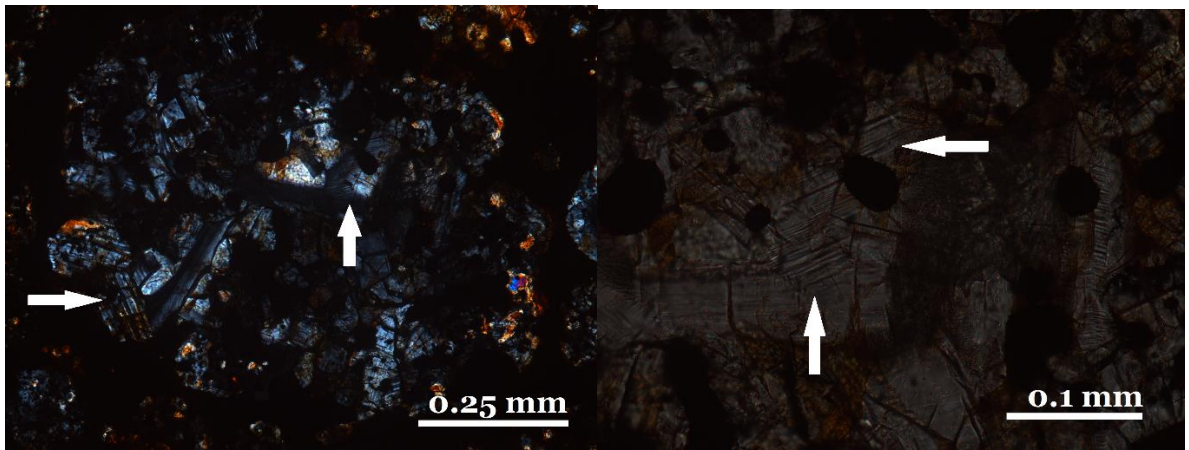


Ilustración 4.5d: Microfotografía, fracturas planares en cristal de olivino a luz polarizada (Izquierda) y luz transmitida (Derecha)

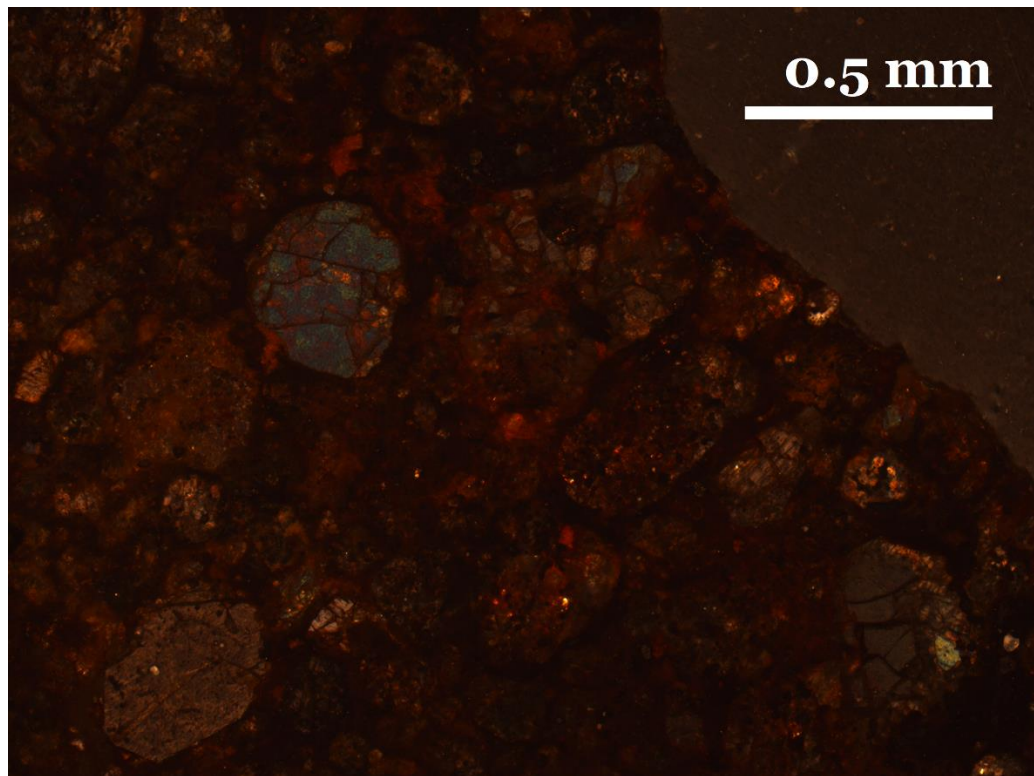


Ilustración 4.5e: Luz reflejada a nicols cruzados. Se observan los reflejos internos que se asocian a hematita.

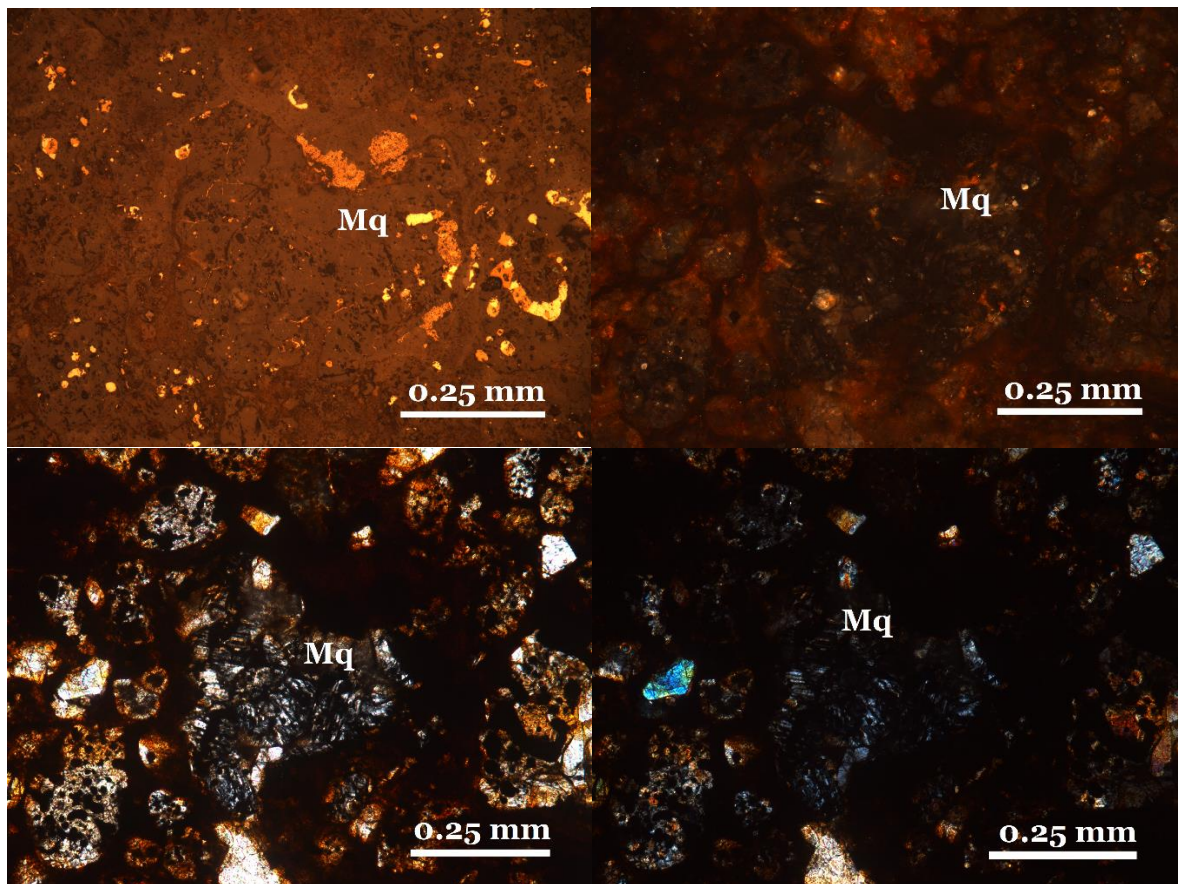


Ilustración 4.5f: Presencia de mineral interpretado como Masquelinita, a luz reflejada polarizada y transmitida polarizada.

4.5.4 Características de RM 569

Aspecto general de la muestra: Textura condritica granoblástica, posee un leve color anaranjado, asociado a meteorización (limonita). Porosidad media.

Componentes: Cóndrulos. Corresponden a un 29% del volumen total de la muestra, sus tamaños varían entre 0.85 mm a los 0.04 mm de diámetro, con promedios de aproximadamente 0.14 mm de diámetro. Posee formas esféricas a subesféricas, mal definidas. La mayor cantidad corresponden a cóndrulos de tipo porfíricos (25%vol.), de tipo PO y POP. Posee un 1%vol. de piroxeno radial y un 0.2%vol. de cóndrulos de tipo criptocristalino. **Matriz.** Corresponde a aproximadamente un 51%, posee una textura granoblástica, con cristales de olivino y piroxeno euhedrales a subhedrales, menores a 50 µm de tamaño. **CAIs.** Cerca de

un 3.2% del volumen total de la muestra, corresponde a inclusiones calco-alumínicas de tamaños menores a 250 μm .

Mineralogía: Olivino. (15 vol.%) De tamaños de diámetro menor a 0.5 mm) Presentes como cóndrulos subredondeados y en fragmentos homogéneos. **Piroxeno.** (10 vol.%) De tamaños de diámetro menores a 120 μm . En cóndrulos tipo POP, también como fragmentos con fracturas planares. **Kamacita.** (< 2 vol%) de tamaños menores a 0.3 mm y un promedio de 10 μm de diámetro. Principalmente en granos subredondeados, muchas veces rodeando óxidos. **Troilita.** (< 1 vol.%) De tamaños menores a 0.2 mm y promedio 10 μm de diámetro. Con manchas de limonita (Wo), rodeando óxidos, también se observa policristalina. **Óxidos.** Reemplazando metales (20-60%) (W2) y presente en escasas microvenillas de choque (S2-3) (Ver Ilustración 4.5g)

Alteracion. Smectita y serpentinita Reemplazando cóndrulos de olivino. (Ver Ilustración 4.5h)

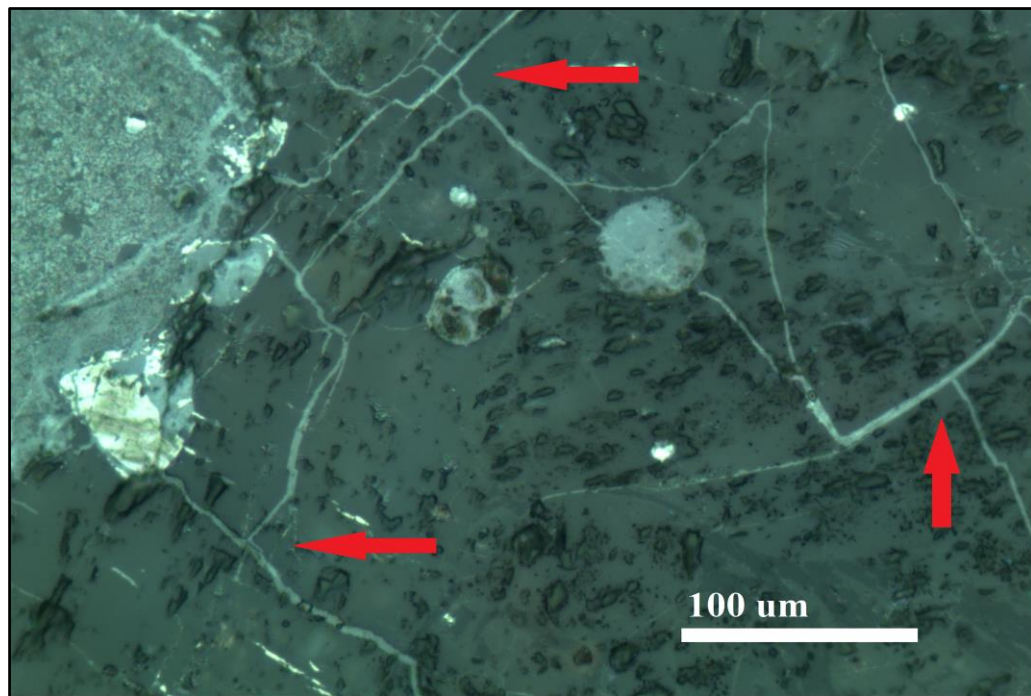


Ilustración 4.5g: Microfotografía. Microvenillas de choque en luz reflejada en meteorito RM 569.

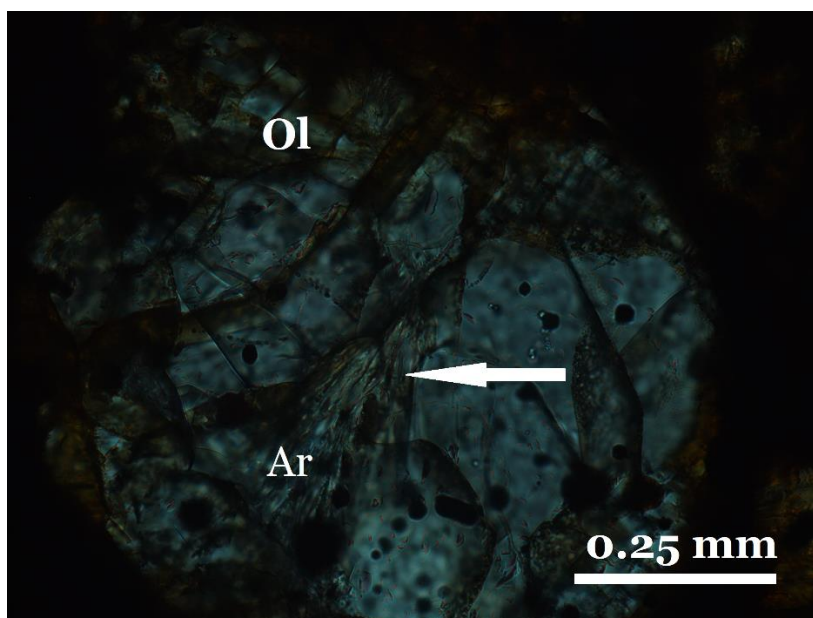


Ilustración 4.5h: Arcilla esmectita/serpentina reemplazando olivino en muestra 569 a luz transparente

4.6 ESTUDIO CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Del análisis con difracción de rayos X, se obtuvo espectros que se interpretaron con un software de tratamiento de datos. Los datos obtenidos, se adjuntan en el [ANEXO V](#).

Los minerales obtenidos, interpretados de la identificación de picos en un software de interpretación, arrojaron la presencia de múltiples fases minerales. En el caso de los metales, su bajo porcentaje respecto del total, no permitió que el software interpretara su presencia automáticamente. Correlacionando la bibliografía y las observaciones realizadas previamente con microscopía óptica, se tenía la certeza de la presencia de estos metales, por lo que se forzó al programa de interpretación a buscar patrones para su reconocimiento. Estos fueron considerados, sólo para score mayores o iguales a 3.

Utilizando estos criterios, los minerales identificados en Los Vientos 123, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.6a: Minerales reconocidos en Los Vientos 123

Mineral	Fórmula Química	Score	D (A°) medido líneas principales	Ángulo 2θ
Magnetita	Fe ₃ O ₄	28	2.530 (86.10) 2.977 (52.92) 1.478 (36.10)	35.47 30.01 62.87
Clinoenstatita	Mg Si O ₃	22	2.871 (100) 2.53 (86.10) 2.45 (68.44)	31.14 35.47 36.58
Troilita	Fe ₁₂ S ₁₂	8	2.530 (86.10) 2.977 (52.92) 3.874 (44.03)	35.47 30.01 22.95
Forsterita	Mg _{1.77} Fe _{.23} (Si O ₄)	20	2.530 (86.10) 2.456 (68.44) 2.977 (52.92)	35.47 36.58 30.01
Cromita	(Mg _{0.43} Fe _{0.58}) ₈ (Cr _{1.19} Al _{0.77} Ti _{0.03}) ₈ O ₃₂	20	2.530 (86.10) 2.977 (52.92) 1.616 (17.60)	35.47 30.01 56.97
Kamacita	Fe Ni	8	2.530 (86.10) 2.019 (4.60)	35.47 44.88

Estos mismos criterios aplicados al reconocimiento de minerales en El Médano 216, arrojó la presencia de las siguientes fases minerales:

Tabla 4.6b: Minerales reconocidos en El Médano 216

Mineral	Fórmula Química	Score	D (A°) medido líneas principales	Ángulo 2θ
---------	-----------------	-------	----------------------------------	-----------

Enstatita	Mg Si O ₃	8	2.458 (100) 2.506 (99.75) 2.774 (97.71)	36.55 35.82 35.26
Olivino Forsterita	Mg ₈ Si ₄ O ₁₆	12	2.458 (100) 2.506 (99.75) 2.774 (97.71)	36.55 35.82 35.26
Kamacita	Fe Ni	7	2.018 (22.71)	44.91
Cromita	Al _{5.78} Fe _{5.50} Mg _{3.55} Zn _{0.04} Cr ₉ Ni _{0.02} Ti _{0.11} O ₃₂	4	2.506 (99.75) 2.957 (46.59) 1.394 (20.47)	35.82 30.22 67.12
Troilita	Fe ₁₂ S ₁₂	4	2.506 (99.75) 1.753 (76.54) 2.957 (46.59)	35.82 52.15 30.22

En el caso de Catalina 008, se utilizaron los mismos criterios. El hallazgo del mineral akermanita con un alto score, que según la bibliografía, es un mineral atribuido a la presencia de Inclusiones Calco-Alumínicas, incentivó a forzar al programa a reconocer la presencia de más minerales asociados a la presencia de CAIs, de lo que se obtuvo lo siguiente:

TABLA 4.6c: Minerales reconocidos en Catalina 008

Mineral	Fórmula Química	Score	D (A°) medido líneas principales	Ángulo 2θ
Akermanita	Mg ₂ Ca ₄ Si ₄ O ₁₄	30	2.478 (100) 2.874 (98.67) 2.791 (79.37)	36.24 31.10 32.06
Magnetita	Fe ₃ O ₄	18	2.53 (81.26) 2.971 (44.45) 1.397 (15.43)	35.36 30.07 66.98
Olivino Forsterita	(Mg _{1.215} Fe _{0.785}) Si O ₄	21	2.478 (100) 2.538 (81.26) 2.791 (79.37)	36.24 35.36 32.06
Kamacita	(Fe , Ni)	14	2.26 (19.50)	44.72

Enstatita	Mg Si O ₃	20	2.478 (100) 2.874 (98.67) 2.538 (81.26)	36.24 31.10 35.36
Troilita	Fe S	4	2.874 (98.67) 2.971 (44.45) 1.474 (31.78)	31.1 30.07 62.99
Cromita	Al _{4.37} Fe _{4.50} Mg _{3.66} Si _{0.02} Zn 0.06 Cr _{11.38} Ni _{0.02} Ti _{0.03} O ₃₂	9	2.478 (100) 2.375 (16.05) 1.376 (15.92)	36.24 37.87 68.14
Melilita	Ge _{8.92} Si _{3.08} Ca ₂₀ O ₄₄	15	2.478 (100) 2.874 (98.67) 2.538 (81.26)	36.24 31.10 35.36
Gehlenita	Ca ₂ Al ₂ Si O ₇	27	2.791 (79.37) 1.765 (42.32) 1.474 (31.78)	32.06 51.79 62.99
Anortita	Ca Al ₂ (Si O ₄) ₂	3	2.971 (44.45) 1.765 (42.32) 3.168 (37.87)	30.07 51.79 28.16
Fassalita	Ca _{1.00} Mg _{0.39} Ti _{0.35} Ti _{0.13} Al 0.13 (Al _{0.74} Si _{1.26}) O ₆	5	2.538 (81.26) 2.971 (44.45) 2.267 (43.05)	35.36 30.07 39.74

V. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio abren algunas incógnitas respecto a la formación de inclusiones en estas muestras y la fuente de materia orgánica. Los condritos carbonáceos constituyen una fuente natural de estas, no obstante, los meteoritos tipo CO, no poseen cantidades representativas de materia orgánica (menos de un 1%wt) (Pearson et al., 2006). El hallazgo de aparentes inclusiones fluidas en olivino, la señal de materia orgánica en la burbuja de una inclusión vítrea, entre otras particularidades de las muestras estudiadas, se discutirán en esta sección.

5.1 METEORITO CATALINA 008

El hallazgo de varias particularidades en este meteorito le otorga una especial atención en este trabajo. En primer lugar, se encontraron inclusiones vítreas de cuatro tipos, lo que refleja rápidamente, la gran heterogeneidad de los componentes que le constituyen.

El hallazgo de inclusiones fluidas en un cristal de olivino abre nuevas incógnitas para poner atención en estudios futuros. Las inclusiones se encontraban entre una familia de inclusiones vítreas y se identificaron por su morfología más cúbica en comparación con las inclusiones vítreas circundantes y por una burbuja considerablemente mayor en volumen (>80% de la inclusión). Estas inclusiones aparentemente primarias, no presentaban fracturas en su cristal huésped, ni conexión con otras inclusiones que evidencien formación en procesos secundarios. Es necesario revisar esta familia, para poder verificar su naturaleza. Esta discusión no es parte de este trabajo, no obstante se realiza esta observación por ser considerada en estudios futuros.

El estudio de las inclusiones vítreas presentes en las muestras con espectroscopía Raman, permite fácilmente identificar la presencia de la fase olivino forsterita de su cristal huésped y en el vidrio de la inclusión. Eso resulta consistente con las inclusiones escogidas para este análisis.

La presencia de materia carbonosa dentro de una burbuja de una inclusión vítrea fue interpretada a través de la identificación de las bandas D y G en espectros Raman. Para obtener los espectros, se irradia la muestra con un láser (ver en Metodología), el que se enfoca en el eje vertical para poder estudiar la inclusión, el primer espectro que se enfoca corresponde al cristal huésped, pues la inclusión analizada no se encontraba expuesta. Este espectro obtenido posee todos los

atributos que posteriormente se observan en los espectros obtenidos en el vidrio de la inclusión vítrea. Este último además presenta las bandas D y G, que se observan también en la burbuja, la que presenta la mayor amplitud de estas bandas (ver Ilustración 5.1).

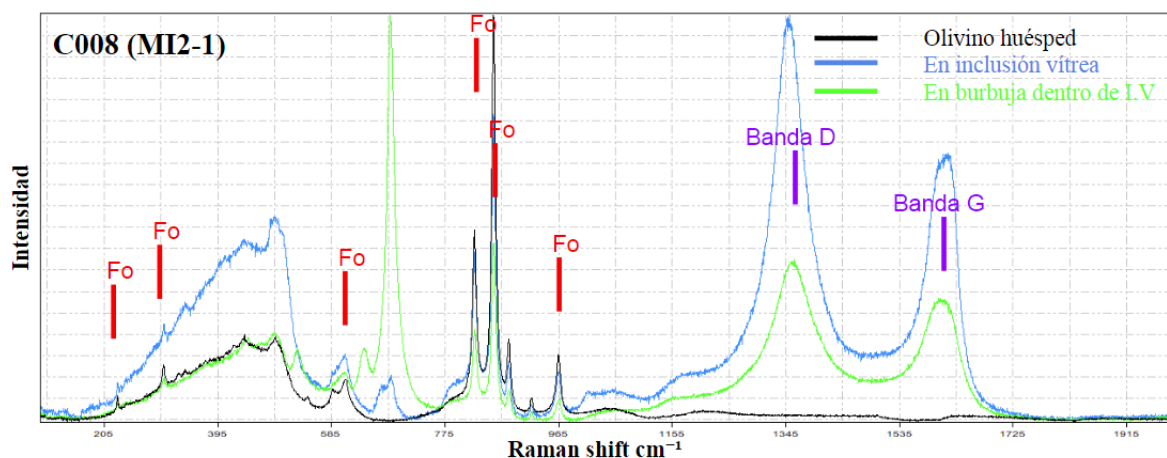


Ilustración 5.1a: Las bandas D y G no se observan en el olivino huésped.

Esta observación, permite descartar la posibilidad de contaminación terrestre, debido a que las bandas se presentan solo en los espectros obtenidos en la inclusión vítrea y en la burbuja.

Estudios realizados previamente, han obtenido la presencia de estas bandas en la matriz de condritos tipo CO (Bonafant et al., 2016), o en el vidrio de inclusiones vítreas (Varela et al., 2000), pero no en la burbuja de la inclusión. Esto abre nuevas incógnitas para descifrar la presencia de esta materia en la burbuja de una inclusión.

Suponiendo que la formación de estas inclusiones es primaria y que efectivamente se formaron en condiciones primitivas, se buscaron ajustes para estas curvas. Los trabajos revisados anteriormente en este rubro realizan ajustes gaussianos-lorentzianos. Esta función combinada no estaba disponible con el software de tratamiento de datos ORIGIN empleado. Por lo que en un principio se realizaron ajustes independientes. El ajuste lorentziano representa muy bien la curva del espectro asociado a la banda D, no obstante la banda G del espectro era sobrepasada por la amplitud de la curva lorentziana generada (Ilustración 5. 2).

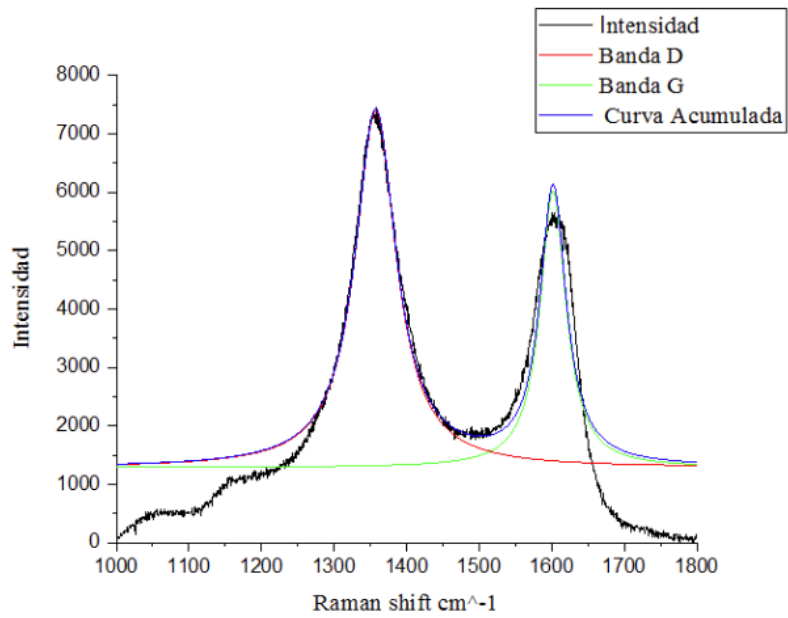


Ilustración 5.1b: Ajuste lorentziano de las bandas D y G

De manera exactamente inversa, el ajuste gaussiano realizado, sobrepasaba a la banda D del espectro obtenido (ver Ilustración 5.3).

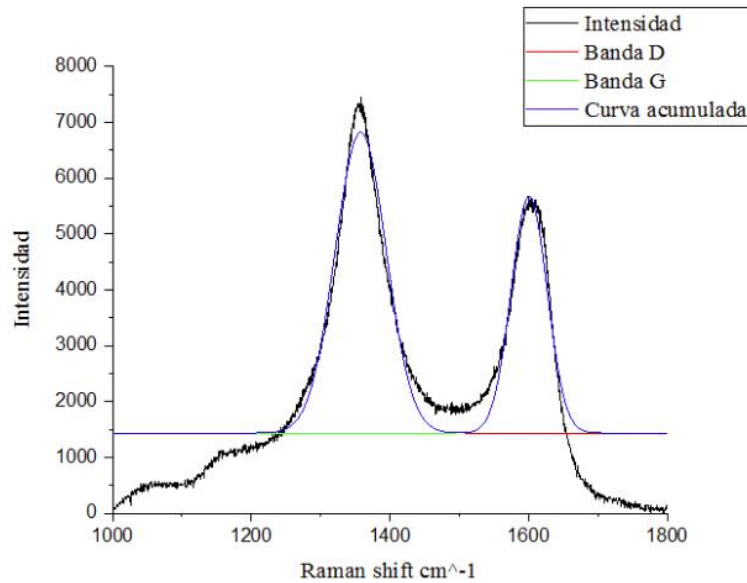


Ilustración 5.1c: Ajuste gaussiano de las bandas D y G

Una opción ofrecida por el software con el que se trabajó, es un ajuste polinómico inverso, el cual modela de mejor manera las amplitudes y ancho de ambas bandas (ver Ilustración 4.7).

La tasa ID/IG obtenidas del ajuste de los espectros del vidrio y burbuja de la inclusión, se ubicaron en el gráfico con los datos de referencia de condritos CO (Bonafant et al., 2016). Esto arrojó resultados poco consistentes con el trabajo utilizado de referencia (ver Ilustración 5.4). Esta inconsistencia puede justificarse porque para realizar el ajuste polinómico fue necesario restar amplitud en ambas curvas, subiendo el eje x a una posición $y_0 = 408.46$, para el caso del ajuste del espectro del vidrio e $y_0 = 941.07$ para el espectro de la burbuja, pues la curva tendía a ajustarse polinómicamente al espectro real. Aun sin realizar este ajuste del eje en el espectro de la burbuja, los resultados no se presentan en las zonas de tendencia de los condritos CO realizados por el trabajo utilizado de referencia.

Los datos obtenidos de los ajustes lorentzianos y gaussianos, fueron aún más inconsistentes con los resultados planteados, los que presentaban datos fuera del gráfico de referencia, con relaciones ID/IG mayores a 2.0.

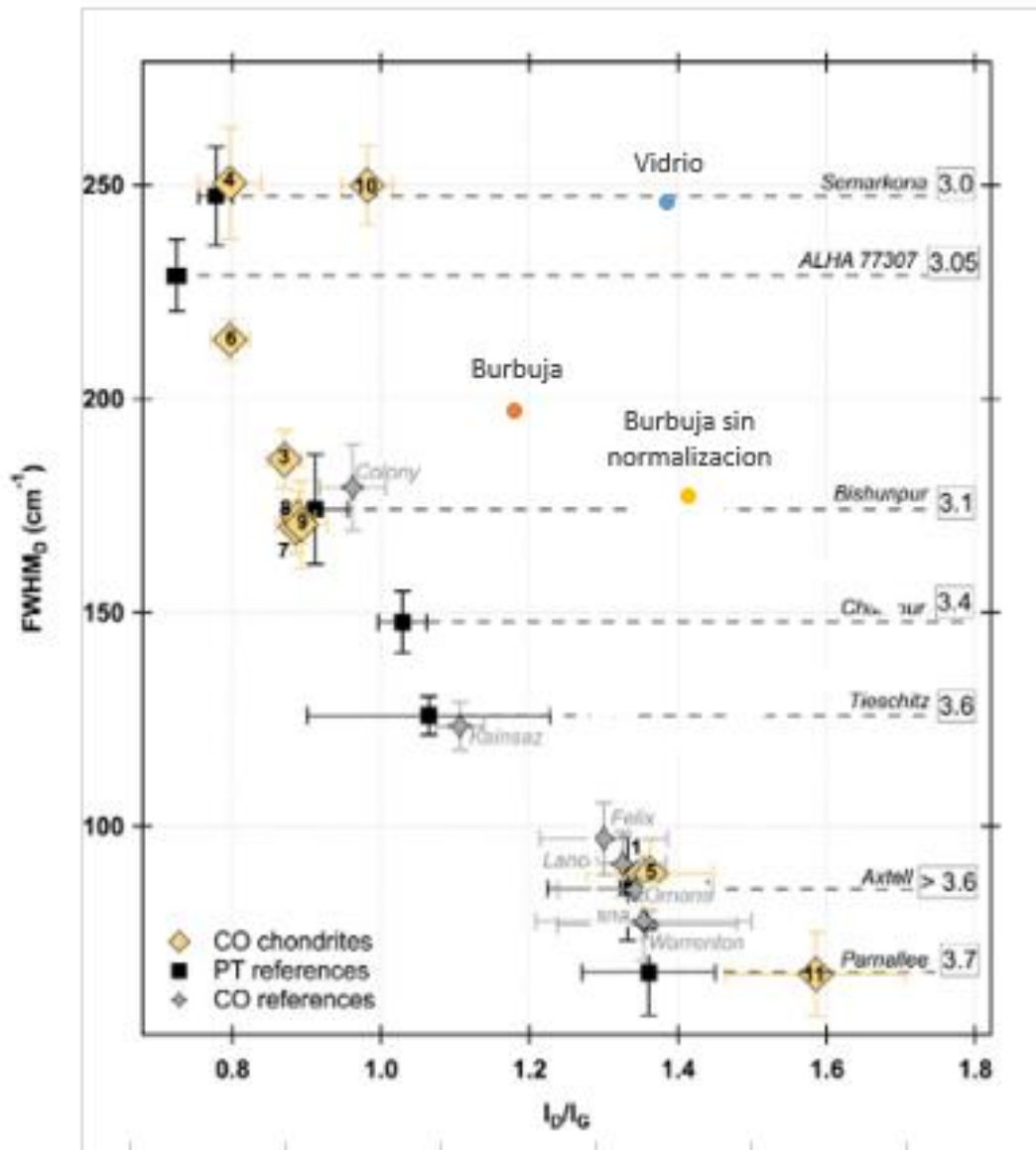


Ilustración 5.1d: Datos obtenidos con ajuste polinómico en trabajo realizado por Bonal et al., (2016)

Una posible solución es que al generar un ajuste más preciso con un y_0 correctamente ubicado en el eje x, implicaría una la relación entre las amplitudes I_D/I_G más cercana a 1.0, en este caso, suponiendo que el ancho de las curvas también será mayor, puesto que se mediría más cercana a la base de la curva, el resultado se desplazaría a la izquierda del gráfico de referencia obteniendo resultados correspondientes a un meteorito muy primitivo. Como este análisis se realiza en una inclusión vítrea, es necesario utilizar un mayor número de espectros que permitan reducir el error asociado para obtener valores más concluyentes.

Los datos obtenidos con LA-ICP-MS, permiten establecer un orden de condensación de elementos durante la formación de los condritos, en relación con el crecimiento de sus olivinos constituyentes. La normalización a Mg, permite establecer una comparación con las tendencias que se presentan en trabajos anteriores que permiten comparar tipos de condritos carbonáceos. El Mg es un elemento común, mayoritario e indudablemente presente en la formación de olivino forsterita, por lo que la normalización de las concentraciones respecto a este elemento tenga sentido en términos conceptuales. La temperatura de condensación de este elemento pertenece a un rango entre los 1360 K y 1290 K.

Observando las concentraciones de elementos expuestas en los resultados, se pueden observar concentraciones de Al y Ca en relaciones cercanas a 1.0, la composición de un condrito CI y por consiguiente, de la fotosfera solar. El hecho de que la concentración de un elemento sea cercana a 1.0 implica que la abundancia se asemeja a los estadios iniciales de la nebulosa solar, con lo que se podría ubicar temporalmente durante las primeras etapas de formación del sistema solar, previo al fraccionamiento. Considerando que en particular este estudio se realizó en un condrito CO, lo que se esperaría es que los elementos analizados también presenten el fraccionamiento característico de estos condritos.

La presencia de familias de inclusiones vítreas enriquecidas en Al y K o en relación 1:1 con la fotosfera solar, podría ser indicativo de un cristal de olivino formado desde un reservorio con estas características y por consiguiente, formadas en etapas iniciales con estos elementos refractarios. Este es el caso de la familia de inclusiones MIA3 y MIA4. Otras familias deprimidas en estos elementos, se asocian a olivinos formados en etapas posteriores, en los cuales el Al y Ca ya formaron parte de otras estructuras cristalinas.

La alta presencia de anortita e inclusiones calco alumínicas refractarias determinadas por los análisis con difracción de rayos X, tales como las fases minerales akermanita, melilita, gehlenita y fassalita, permiten establecer una coexistencia de componentes constituyentes de este meteorito altamente refractarios con olivinos formados posteriormente a la condensación de estas inclusiones refractarias y por consecuencia, deprimidas en estos elementos.

El olivino magnésico, enstatita, espinela y taenita son minerales primarios de alta temperatura. Los minerales fassaita y la solución sólida gehlenita-akermanita, son consideradas fases primarias de alta temperatura en CAIs. La presencia de gehlenita es indicativa de CAIs tipo A, mientras que la melilita es indicativa de CAIs tipo B.

La baja concentración de Fe en las inclusiones es consistente con los resultados, en las cuales el olivino forsterita alto en Mg, se relaciona a etapas primitivas de condensación, mientras que el Fe, a estadios posteriores. El enriquecimiento en Na de algunas inclusiones también revelan una mayor concentración de elementos volátiles en el reservorio. A este elemento se le atribuyen T° de condensación menores a los altamente refractarios.

5.2 METEORITO EL MÉDANO 216

Este meteorito, es actualmente estudiado por otros investigadores, pues se han encontrado fragmentos que se atribuyen a la misma caída. Esta investigación se encuentra actualmente vigente y este trabajo permite también contribuir con ello, pretendiendo caracterizar las muestras RM 567, RM 568 y RM 569; Y con ello obtener nuevos aspectos con los cuales integrar o descartar estas muestras como parte de la elipse de El Médano 216. Para una verificación más concluyente, es necesario realizar análisis de isotopía de oxígeno, lo que no es parte de este trabajo.

En primer lugar, este meteorito no se estudió con espectroscopía Raman ni Ablación Láser ICP-MS, pues esta muestra no fue enviada a Virginia, con el objetivo de en principio poseer otros análisis. Lo que se realizó fue mapas de elementos químicos, los que no fueron empleados para los fines este estudio.

Según *The Meteoritical Bulletin*, este meteorito figura como un condrito tipo CO, de tipo petrológico 3 y un bajo grado de meteorización terrestre y una susceptibilidad magnética χ : 4.46. Sumado a los porcentajes modales obtenidos del tratamiento de imágenes de áreas representativas de este meteorito, se establece una comparación entre estos datos y las muestras en cuestión que se pretenden verificar.

El estudio de difracción de rayos X de el médano 216, revelan fases mineralógicas comunes para este tipo de meteoritos, con una alta presencia de olivino forsterita, enstatita, minerales de alta temperatura, kamacita, troilita y cromita.

La susceptibilidad magnética medida por estudios realizados por investigadores de la universidad de Atacama, en conjunto con el coleccionista de meteoritos Rodrigo Martínez, obtienen las siguientes mediciones de las muestras asociadas a la elipse.

Tabla 5.2: Susceptibilidad magnética de El Médano 216 y muestras asociadas

Muestra	Densidad (g/cm³)	Susceptibilidad magnética (χ)
El médano 216	3.37	4.49
RM 567	3.37	4.49
RM 568	3.37	4.44
RM 569	3.36	4.45

En principio la variación no es significativa, no obstante, la muestras más similar bajo este criterio magnético, corresponde a la muestras RM 567. Otros criterios petrográficos serán revisados en las secciones que se presentan a continuación.

5.3 MUESTRA RM 567

Las familias de inclusiones reportadas en los cristales de olivino, consistieron en inclusiones vítreas de tipo 2, es decir, que presentaban una fase vítrea y una burbuja. Otros tipos de inclusiones vítreas no fueron determinadas. Esto en principio permite, como primera observación, inferir una homogeneidad mayor de los componentes olivinos que le constituyen, no obstante solo 3 familias fueron estudiadas, por lo que un estudio más detallado de las familias en otros cristales, permitiría ser más categórica con esta aseveración.

Las observaciones y características petrográficas, a partir de la obtención de porcentajes modales de esta muestra, son consistentes con las características determinadas para condritos tipo CO. Particularmente los porcentajes modales obtenidos de sus componentes son muy similares a lo observado en El Médano 216, al igual que el tamaño promedio de sus cóndrulos (0.145 mm) lo que lo sitúa como un excelente candidato para ser un fragmento más asociado a la caída de este meteorito.

Los parámetros de clasificación le otorgan características de un estado de choque S1, y una meteorización terrestre moderada W2-3. Aunque el estado de choque no está determinado para El médano 216, la meteorización experimentada por esta muestra es mayor al bajo grado sugerido en la clasificación de este meteorito registrado en *The Meteoritical Bulletin*. Esto implicaría un mayor tiempo de residencia de esta muestra, respecto de El Médano 216, pero la diferencia no es

tan significativa, lo que podría ser parte de la degradación natural de una mala conservación de esta muestra.

Los criterios de susceptibilidad magnética (χ : 4.49) y densidad (3.37 g/cm³), sumado a los criterios mencionados anteriormente, permiten considerar esta muestra como un posible candidato a fragmento de la misma caída de El Médano 216.

5.4 MUESTRA RM 568

Esta muestra presentó una susceptibilidad magnética menos consistente (χ : 4.44) con las observaciones realizadas en El Médano 216 (χ : 4.49) y una densidad igual (3.37 g/cm³). No obstante, los porcentajes modales de matriz y cóndrulos obtenidos de este estudio (33.5% y 50.7%, respectivamente) difieren respecto de los obtenidos para El Médano 216 (47.1% y 32.2%, respectivamente), siendo significativamente mayor el porcentaje de cóndrulos respecto de la matriz en comparación con el Médano 216. Sumado a esto, el promedio de tamaño de cóndrulos obtenido (0.126 mm) es menor a lo observado en El Médano 216 (0.15 mm).

El estado de choque definido para esta muestra, en base a las observaciones de sus componentes, indican un estado de choque S1-2, similar al caso anterior. Aunque difiere en términos de meteorización terrestre, presentando considerablemente menos registros de desequilibrio por residencia en la superficie de la tierra. Se atribuyó un parámetro W 0-1, lo que implica una caída y una conservación mayor de sus características intrínsecas.

El estudio de las inclusiones vítreas de este meteorito, con espectroscopía Raman, revelan la presencia de la fase olivino forsterita, no obstante las burbujas no presentan señales importantes que revelen una fase fluida rica en carbono, tal como el caso observado en Catalina 008.

Las concentraciones obtenidas con Ablación Láser ICP-MS, revelan un enriquecimiento de los elementos Cr, Na y Fe, respecto de la línea de fraccionamiento de un condrito tipo CO, esto puede implicar una formación en estadios posteriores de la nebulosa solar. El enriquecimiento de Cr y Fe, considerados elementos comunes, se relacionan a T° de condensación menores, entre los 1360 K y 1290 K.

Aunque se han reportado caso con una alta heterogeneidad en un mismo meteorito caído, la homogeneidad de sus inclusiones y las características

anteriormente mencionadas, sugieren que este meteorito posiblemente también pertenece a la elíptica de distribución de El Médano 216

5.5 MUESTRA RM 569

Los análisis realizados en esta muestra, revelan una densidad menor (3.36 g/cm³) al Médano 216 (3.37 g/cm³) y una susceptibilidad magnética, también menor (χ : 4.45) a la medida en El Médano 216 (χ : 4.49).

En términos de porcentajes modales, también se asemeja a las características de El Médano 216, mostrando similitudes en los porcentajes de matriz (50.8), cóndrulos (29%) y tamaño promedio de estos últimos (0.14). El porcentaje de matriz es mayor (respecto de 47.1%) y el porcentaje de cóndrulos es menor (respecto de 32.2%) a El Médano 216, pero no difiere significativamente del meteorito en comparación.

Los parámetros de clasificación obtenidos para este meteorito, en base a las observaciones con microscopio óptico, le otorgan un estado de choque moderado S1-2 un grado de meteorización moderado a bajo < W2, bastante similar al meteorito de la elipse.

Los estudios realizados en sus cristales de olivino, obtienen para esta muestra, familias de inclusiones principalmente de tipo 3, es decir con solo una fase vítrea, lo que revela cierta homogeneidad en sus componentes de olivino y también una baja presencia de volátiles, al no presentar burbuja. Las fases determinadas por espectroscopía Raman, revelan la presencia de olivino forsterita, consistentes con los cristales huésped de las familias de inclusiones estudiadas.

Las concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS revelan el enriquecimiento en Al y Ca de una sola inclusión de la familia 4 de esta muestra, no obstante todas las familias en general se encuentran deprimidas en los elementos analizados. Esto podría significar que la formación de cristales de olivino, se generó en un tiempo común, y que la adhesión de otros elementos químicos está asociado a otro momento de la nebulosa solar, pudiendo ser anteriores, con temperaturas mayores a la condensación de los elementos constituyentes de olivino forsterita (1360 K y 1290 K).

En base a las observaciones señaladas anteriormente, suponiendo que la diferencia magnética puede constituir una heterogeneidad singular en la roca, este

meteorito también podría constituir un fragmento más de la caída del meteorito El Médano 216.

5.3 METEORITO LOS VIENTOS 123

Las inclusiones estudiadas en este meteorito, solo fueron dos familias en cristales de olivino distintos. Las inclusiones vítreas identificadas, corresponden a inclusiones tipo 2 y tipo 4, las últimas sin fase gaseosa, pero con cristales. El estudio con espectroscopía Raman, revelan al igual que los casos anteriores, la fase de olivino forsterita, otras fases no fueron consideradas, puesto que no presentaban más de tres picos representativos. Esto sigue siendo consistente con los cristales de las familias de inclusiones vítreas escogidas para este análisis.

Los resultados realizados con LA-ICP-MS, revelan una significativa depresión en la concentración de elementos Fe y Ni, esto podría implicar estadios muy primitivos de formación, aunque no se presentan patrones de enriquecimiento significativos de elementos altamente refractarios (Al y Ca). No obstante, la subclasificación realizada por [Bonal et al., \(2016\)](#), en base a materia orgánica identificada en la matriz de estas muestras, la presencia de las bandas D y G con espectroscopía Raman, esto no se refleja en las inclusiones vítreas estudiadas, lo que implicaría una formación inicial de los cristales de olivino, en condiciones de alta temperatura, y la formación de la matriz de este condrito, en condiciones de mayor fugacidad de oxígeno y menor temperatura, que permitieron la presencia de esta materia orgánica. La subclasificación realizada por el trabajo anteriormente señalado, indica para este meteorito una muy baja exposición a metamorfismo termal (CO 3.1), lo que implica que este es un meteorito significativamente prístino.

Considerando lo anteriormente expuesto, se propone para trabajos futuros, un estudio más detallado de las familias de inclusiones vítreas presentes, para poder descartar la efectiva presencia de materia orgánica, puesto que ya fue determinada por trabajos anteriores en su matriz. Esto permitiría establecer una evolución de las características del reservorio de la nebulosa solar que dio origen a este meteorito, con mayor precisión.

VI. CONCLUSIONES

El estudio de inclusiones vítreas en meteoritos son una ventana al conocimiento de las condiciones físico químicas primitivas de la nebulosa solar. La presencia de 4 tipos de inclusiones vítreas fue reportada, en base a las fases que las componían. Estas son: inclusión tipo 1, compuesta por vidrio, cristal y burbuja, tipo 2 con vidrio y burbuja, tipo 3 de solo vidrio y tipo 4 con vidrio y cristales (Ver [Ilustración 4.4](#)).

La presencia de burbujas de gran tamaño (>80 vol%) en inclusiones dentro de una familia de inclusiones vítreas (Ver [Ilustración 4.5](#)), hace suponer la presencia de inclusiones fluidas en un cristal de olivino de Catalina 008. Considerando lo poco común de las inclusiones de este tipo en el mineral de olivino, considerado de alta temperatura, se propone su estudio para trabajos futuros.

El análisis con espectroscopía Raman constituye una técnica muy útil para analizar condritos carbonáceos por su eficacia a la hora de determinar componentes químicos, permitiendo conservar la integridad de la muestra, esto es muy importante considerando el escaso material extraterrestre que se posee para estos estudios.

La presencia de materia orgánica poli-aromática se reportó en el meteorito Catalina 008. Estudios anteriores determinan la ocurrencia de materia orgánica en Los Vientos 123, con análisis Raman en granos de la matriz de este condrito. Esto no se reflejó en los análisis Raman realizados en las familias de inclusiones vítreas. No obstante, tampoco se puede descartar. La presencia de materia orgánica y posibles componentes hidratados, constituyen una gran pista para seguir investigando las repercusiones que podría significar en términos del origen de la vida en nuestra tierra.

Los análisis con LA-ICP-MS permiten establecer comparaciones con las concentraciones de familias inclusiones vítreas normalizadas a Mg y a meteoritos tipo CI de patrones de fraccionamiento tipo CO de roca total.

Los estudios de las muestras RM 567, RM 568 y RM 569, confirman características texturales propias de condritos tipo CO. Los tipos de inclusiones vítreas presentes en las familias de inclusiones estudiadas, sumado a las concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS, la fase de olivino forsterita identificada

con espectroscopía Raman y las mediciones de densidad y susceptibilidad magnética realizadas por investigadores de la Universidad de Atacama, permiten realizar un emparejamiento de las muestras RM 567, RM 568 y RM 569 con la caída del meteorito El Médano 216.

La mineralogía obtenida con los análisis de difracción de rayos X, revelan la presencia de olivino, enstatita, cromita y taenita primarios de alta temperatura, también la presencia común del sulfuro de hierro troilita y kamacita en las muestras estudiadas. En los Vientos 123, se reporta la presencia de magnetita, asociada a alteración acuosa del condrito. En Catalina 008, se encuentran minerales primarios indicadores de una gran abundancia de CAIs, una alta cantidad de gehlenita indicativa de CAIs tipo A, menor cantidad de melilita indicativa de CAIs tipo B, anortita y fassaita.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. (2009). The chemical composition of the Sun. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 47, 481-522.
- Benoit, P. H., Sears, D. W., Akridge, J. M., Bland, P. A., Berry, F. J., & Pillinger, C. T. (2000). The non-trivial problem of meteorite pairing. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(2), 393-417.
- Bischoff, A., & Geiger, T. (1995). Meteorites from the Sahara: Find locations, shock classification, degree of weathering and pairing. *Meteoritics*, 30(1), 113-122.
- Bland, P. A., Alard, O., Gounelle, M., & Rogers, N. W. (2003). Trace element variation in carbonaceous chondrite matrix.
- Blander, M., & Katz, J. (1967). Condensation of primordial dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(6), 1025-1034.
- Boato, G. (1954). The isotopic composition of hydrogen and carbon in the carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6(5-6), 209-220.
- Bonal, L., Quirico, E., Flandinet, L., & Montagnac, G. (2016). Thermal history of type 3 chondrites from the Antarctic meteorite collection determined by Raman spectroscopy of their polyaromatic carbonaceous matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 189, 312-337.
- Bouvier, A., Gattacceca, J., Grossman, J., & Metzler, K. (2017). The Meteoritical Bulletin, No. 105. *Meteoritics and Planetary Science*, 52, 2411-2411.
- Boynton, W. V. (1975). Fractionation in the solar nebula: condensation of yttrium and the rare earth elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(5), 569-584.
- Buddhue, J. D. (1941). Some soluble constituents of meteorites.
- Ciesla, F. J. (2005, December). Chondrule-forming Processes--An Overview. In *Chondrites and the protoplanetary disk* (Vol. 341, p. 811).
- Dullemond, C. P., Stammler, S. M., & Johansen, A. (2014). Forming chondrules in impact splashes. I. Radiative cooling model. *The Astrophysical Journal*, 794(1), 91.
- DuFresne, E. R., & Anders, E. (1962). On the chemical evolution of the carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26(11), 1085-1114.
- Ebel, D. S. (2006). Condensation of rocky material in astrophysical environments. *Meteorites and the early solar system II*, 1, 253-277.

- Engler, A., Varela, M. E., Kurat, G., Ebel, D., & Sylvester, P. (2007). The origin of non-porphyrific pyroxene chondrules in UOCs: Liquid solar nebula condensates?. *Icarus*, 192(1), 248-286.
- Fegley Jr, B., & Lewis, J. S. (1980). Volatile element chemistry in the solar nebula: Na, K, F, Cl, Br, and P. *Icarus*, 41(3), 439-455.
- Fegley Jr, B., & Palme, H. (1985). Evidence for oxidizing conditions in the solar nebula from Mo and W depletions in refractory inclusions in carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 72(4), 311-326.
- Frezzotti, M. L., Tecce, F., & Casagli, A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1-20.
- Gilmour, I. (2003). Structural and isotopic analysis of organic matter in carbonaceous chondrites. *Treatise on Geochemistry*, 1, 711.
- Grossman, L. (1972). Condensation in the primitive solar nebula. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36(5), 597-619.
- Grossman, L., & Larimer, J. W. (1974). Early chemical history of the solar system. *Reviews of Geophysics*, 12(1), 71-101.
- Grossman, J. N., & Wasson, J. T. (1983). The compositions of chondrules in unequilibrated chondrites an evaluation of models for the formation of chondrules and their precursor materials. In *Chondrules and their Origins* (pp. 88-121).
- Hayatsu, R., & Anders, E. (1981). Organic compounds in meteorites and their origins. In *Cosmo-and geochemistry* (pp. 1-37). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hewins, R. H. (1991). Retention of sodium during chondrule melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(4), 935-942.
- Hewins, R. H. (1997). Chondrules. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1), 61-83.
- Hezel, D. C., & Palme, H. (2007). The conditions of chondrule formation, Part I: Closed system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(16), 4092-4107.
- Hutchison, R. (2004). *Meteorites* (p. 520)
- Kallemeyn, G. W., & Wasson, J. T. (1981). The compositional classification of chondrites—I. The carbonaceous chondrite groups. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(7), 1217-1230.
- Keller, L. P., & Buseck, P. R. (1990). Matrix mineralogy of the Lancé CO₃ carbonaceous chondrite: A transmission electron microscope study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(4), 1155-1163.
- Kornacki, A. S., & Fegley Jr, B. (1986). The abundance and relative volatility of refractory trace elements in Allende Ca, Al-rich inclusions: implications

for chemical and physical processes in the solar nebula. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(3-4), 217-234.

- Krot, A. N., Scott, E. R., & Zolensky, M. E. (1995). Mineralogical and chemical modification of components in CV3 chondrites: Nebular or asteroidal processing?. *Meteoritics*, 30(6), 748-775.
- Krot, A. N., Meibom, A., Russell, S. S., Alexander, C. M. D., Jeffries, T. E., & Keil, K. (2001). A new astrophysical setting for chondrule formation. *Science*, 291(5509), 1776-1779.
- Krot, A. N., Meibom, A., Weisberg, M. K., & Keil, K. (2002). The CR chondrite clan: Implications for early solar system processes. *Meteoritics & Planetary Science*, 37(11), 1451-1490.
- Kurat, G. (1988). Primitive meteorites: An attempt towards unification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 325(1587), 459-482.
- Kurat, G., Varela, M. E., Hoppe, P., & Clocchiatti, R. (1997). Glass inclusions in Renazzo olivine: Condensates from the solar nebula?. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 32.
- Kurat, G., Varela, M. E., & Zinner, E. (2010, March). Chondrule Tieschitz XII Revisited: Reading a Very Old Logbook. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 41, p. 1315).
- Lamadrid, H. M., Moore, L. R., Moncada, D., Rimstidt, J. D., Burruss, R. C., & Bodnar, R. J. (2017). Reassessment of the Raman CO₂ densimeter. *Chemical Geology*, 450, 210-222.
- Larimer, J. W. (1967). Chemical fractionations in meteorites—I. Condensation of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(8), 1215-1238.
- Larimer, J. W., & Anders, E. (1967). Chemical fractionations in meteorites—II. Abundance patterns and their interpretation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(8), 1239-1270.
- Lodders, K. (2003). Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *The Astrophysical Journal*, 591(2), 1220.
- McCoy, T. J., Ehlmann, A. J., & Keil, K. (1995). The Travis County, Texas, meteorites. *Meteoritics*, 30(3), 348-351.
- McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., Chillier, X. D. F., Maechling, C. R. & Zare, R. N. (1996). Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273(5277), 924-930.
- McSween Jr, H. Y. (1977a). Carbonaceous chondrites of the Ornans type: A metamorphic sequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(4), 477-491.

- McSween Jr, H. Y. (1977b). On the nature and origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(3), 411-418.
- Merrill, G. P. (1930). Composition and structure of meteorites. *Bulletin of the United States National Museum*.
- Merrill, G. P., & Foshag, W. F. (1943). Minerals from earth and sky: Part I. The story of meteorites.
- Pack, A., Palme, H., & Shelley, J. M. G. (2005). Origin of chondritic forsterite grains. *Geochimica et cosmochimica acta*, 69(12), 3159-3182.
- Palme, H., & Fegley Jr, B. (1990). High-temperature condensation of iron-rich olivine in the solar nebula. *Earth and Planetary Science Letters*, 101(2-4), 180-195.
- Pearson, V. K., Sephton, M. A., Franchi, I. A., Gibson, J. M., & Gilmour, I. (2006). Carbon and nitrogen in carbonaceous chondrites: Elemental abundances and stable isotopic compositions. *Meteoritics & Planetary Science*, 41(12), 1899-1918.
- Pelch, M. A., Appold, M. S., Emsbo, P., & Bodnar, R. J. (2015). Constraints from fluid inclusion compositions on the origin of Mississippi Valley-Type mineralization in the Illinois-Kentucky district. *Economic Geology*, 110(3), 787-808.
- Pinto, G., Martínez, R., Menzies, A., Flores, L. & Aravena, S. (2018) Strewn field of the Carbonaceous Chondrite Médano 216 (RM 330) Antofagasta region, northern Chile. congreso geológico chileno, N°15, 1440. Concepción.
- Roedder, E. (1981). Significance of Ca-Al-rich silicate melt inclusions in olivine crystals from the Murchison type-II carbonaceous chondrite. *Bulletin de Minéralogie*, 104(4), 339-353.
- Roedder, E. (1984). Occurrence and significance of magmatic inclusions and silicate liquid immiscibility. *Acta Geologica Polonica*, 34(1-2), 139-178.
- Roedder, E. (2002). Fluid Inclusions, Encyclopedia of Physical Sciences and Technology.
- Rubin, A. E. (1989). Size-frequency distributions of chondrules in CO₃ chondrites. *Meteoritics*, 24(3), 179-189.
- Rubin, A. E. (1998). Correlated petrologic and geochemical characteristics of CO₃ chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(3), 385-391.
- Rubin, A. E. & Grossman, J. N. (2010) Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science* 45: 114–122.
- Rubin, A. E., James, J. A., Keck, B. D., Weeks, K. S., Sears, D. W., & Jarosewich, E. (1985). The Colony meteorite and variations in CO₃ chondrite properties. *Meteoritics*, 20(2), 175-196.
- Russell, S. S., Huss, G. R., Fahey, A. J., Greenwood, R. C., Hutchison, R., & Wasserburg, G. J. (1998). An isotopic and petrologic study of calcium-

aluminum-rich inclusions from CO₃ meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4), 689-714.

- Ruzicka, A., Grossman, J., Bouvier, A., Herd, C. D., & Agee, C. B. (2015). The meteoritical bulletin, no. 102. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(9), 1662-1662.
- Ruzicka, A., Grossman, J., Bouvier, A., & Agee, C. B. (2017). The Meteoritical Bulletin, No. 103. *Meteorit. Planet. Sci.*, 52, 1014.
- Shaddad, M. H., Jenniskens, P., Numan, D., Kudoda, A. M., Elsir, S., Riyad, I. F., Ali, A. E., Alameen, M., Alameen N. M., Eid, O., Osman, A. T., Abubaker, M. I., Yousif, M., Chesley, S. R., Chodas, P. W., Albers, J., Edwards, W. N., Brown, P. G., Kuiper, J. & Friedrich, J. M. (2010). The recovery of asteroid 2008 TC₃. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(10-11), 1557-1589.
- Saxena, S. K., & Eriksson, G. (1983). Low-to medium-temperature phase equilibria in a gas of solar composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 65(1), 7-16.
- Scott, E. R., & Jones, R. H. (1990). Disentangling nebular and asteroidal features of CO₃ carbonaceous chondrite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(9), 2485-2502.
- Scott, E. R. D., & Krot, A. N. (2003). Chondrites and their components. *Treatise on geochemistry*, 1, 711.
- Scott, E. R. D., & Krot, A. N. (2014). Chondrites and their components. *Meteorites and cosmochemical processes*, 65-137.
- Sears, D. W., Batchelor, J. D., Lu, J., & Keck, B. D. (1991). Metamorphism of CO and CO-like chondrites and comparisons with type 3 ordinary chondrites. *Antarctic Meteorite Research*, 4, 319.
- Stephan, T., Jessberger, E. K., Heiss, C. H., & Rost, D. (2003). TOF-SIMS analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in Allan Hills 84001. *Meteoritics & Planetary Science*, 38(1), 109-116.
- Stöffler, D., & Keil, K. (1991). Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), 3845-3867.
- Scott, E. R., Keil, K., & Stöffler, D. (1992). Shock metamorphism of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(12), 4281-4293..
- Tomeoka, K., Nomura, K., & Takeda, H. (1992). Na-bearing Ca-Al-rich inclusions in the Yamato-791717 CO carbonaceous chondrite. *Meteoritics*, 27(2), 136-143.
- Van Schmus, W. R., & Wood, J. A. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-765.

- Varela, M. E., Kurat, G., Hoppe, P., & Brandstätter, F. (2002). Chemistry of glass inclusions in olivines of the CR chondrites Renazzo, Acfer 182, and El Djouf 001. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(9), 1663-1679.
- Varela, M. E., Kurat, G., & Zinner, E. (2005). A liquid-supported condensation of major minerals in the solar nebula: evidence from glasses in the Kaba (CV3) chondrite. *Icarus*, 178(2), 553-569.
- Varela, M. E., Kurat, G., & Zinner, E. (2006). The primary liquid condensation model and the origin of barred olivine chondrules. *Icarus*, 184(2), 344-364.
- Varela, M. E., Metrich, N., Bonnin–Mosbah, M., & Kurat, G. (2000). Carbon in glass inclusions of Allende, Vigarano, Bali, and Kaba (CV3) olivines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(22), 3923-3930.
- Varela, M. E., Zinner, E., & Kurat, G. (2009, March). Chondrule Tieschitz IIIM: Clues to the Origin of Early Liquids?. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 40).
- Varela, M. E., Zinner, E., & Kurat, G. (2010). Chondrule Acfer I: Trace element abundances reflect vapor fractionation. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 73.
- Varela, M. E., & Zinner, E. (2018). Unraveling the role of liquids during chondrule formation processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 221, 358-378.
- Verish, R. S. (2001). Gold Basin: Overlapping Strewn Fields or Heterogeneous Meteoroid?. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 36, A213.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J., & Krot, A. N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification.
- Wlotzka, F. (1993). A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28.
- Wood, J. A. (1996). Unresolved issues in the formation of chondrules and chondrites. *Chondrules and the protoplanetary disk*, 55-69.
- Wood, J. A., & McSween, H. Y. (1977, December). 5. Chondrules as Condensation Products. In *International Astronomical Union Colloquium* (Vol. 39, pp. 365-373). Cambridge University Press.
- Zanda, B. (2004). Chondrules. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1-2), 1-17.
- Zolensky, M. E., Bodnar, R. J., Gibson, E. K., Nyquist, L. E., Reese, Y., Shih, C. Y., & Wiesmann, H. (1999). Asteroidal water within fluid inclusion-bearing halite in an H5 chondrite, Monahans (1998). *Science*, 285(5432), 1377-1379.
- Zolensky, M., & McSween Jr, H. Y. (1988). Aqueous alteration. *Meteorites and the early solar system*, 114-143.

ANEXOS

ANEXO I

Mapa de cortes con familia de inclusiones vítreas

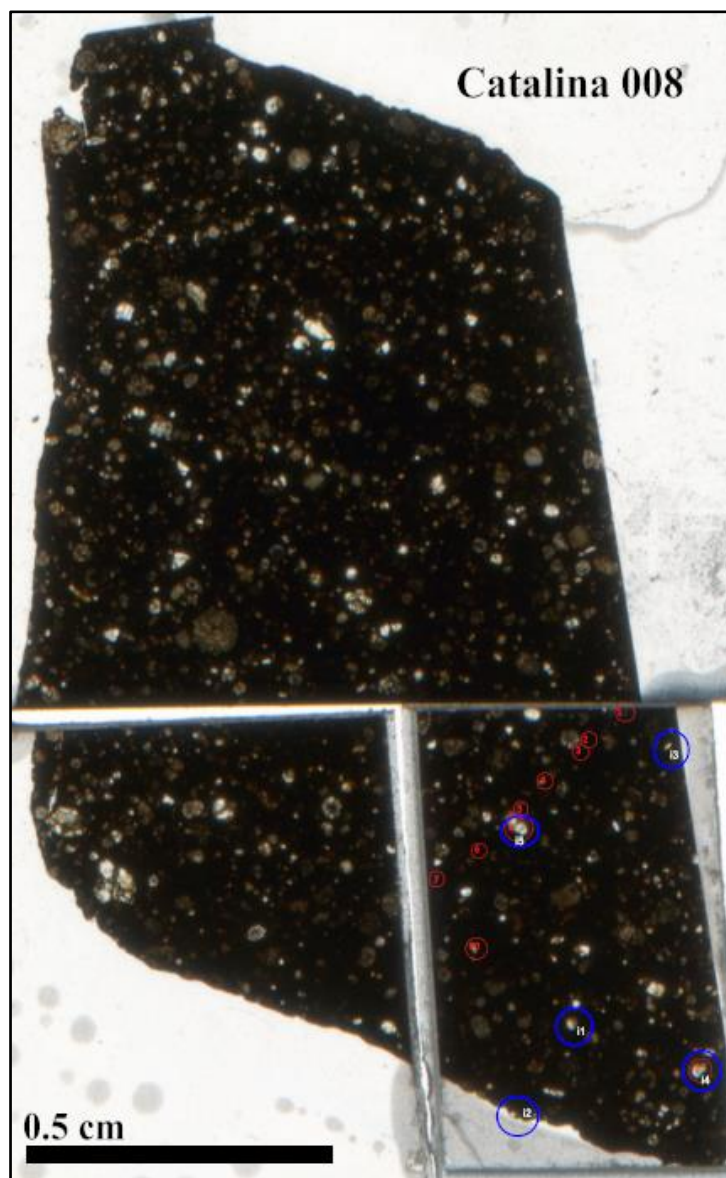


Ilustración A1.1: Mapa de cortes de sección delgada de Catalina 008. Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS

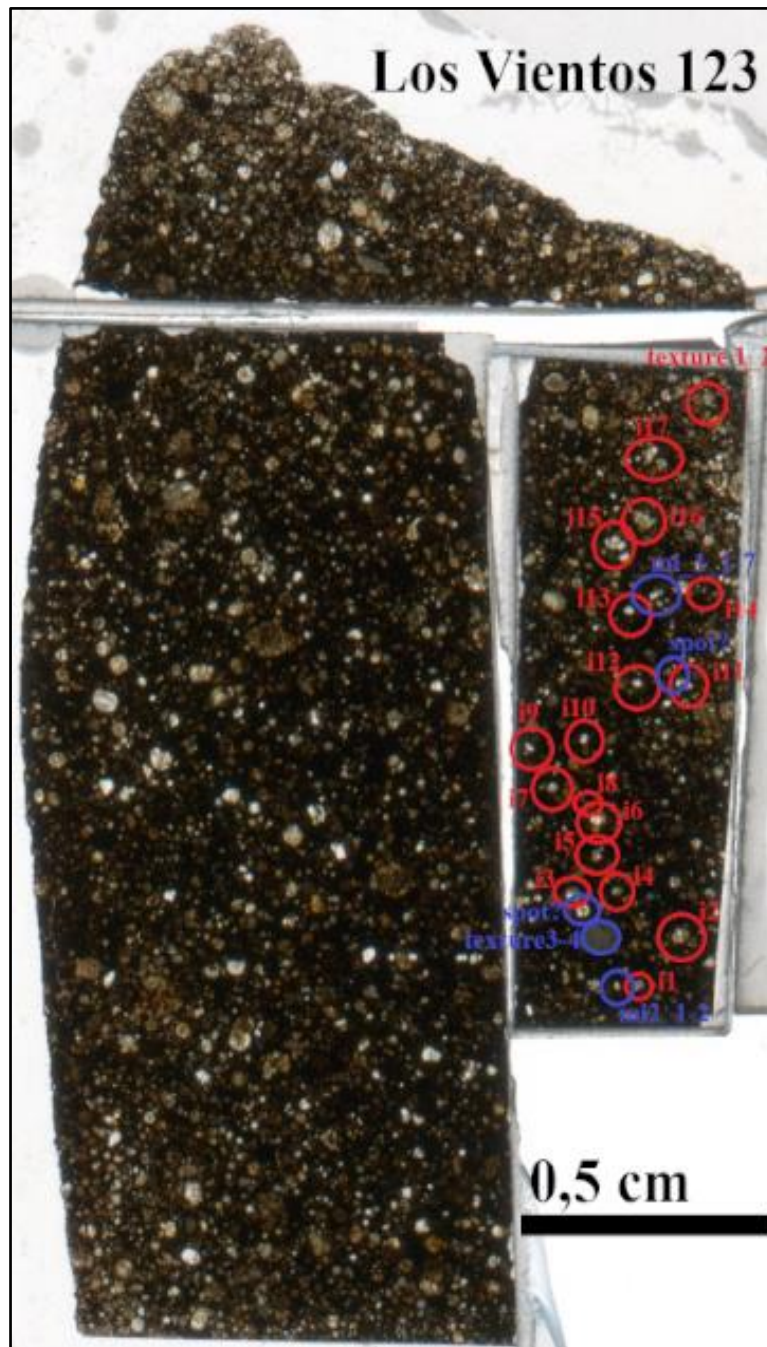


Ilustración A1.2: Mapa de cortes de sección delgada de Los Vientos 123
Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS

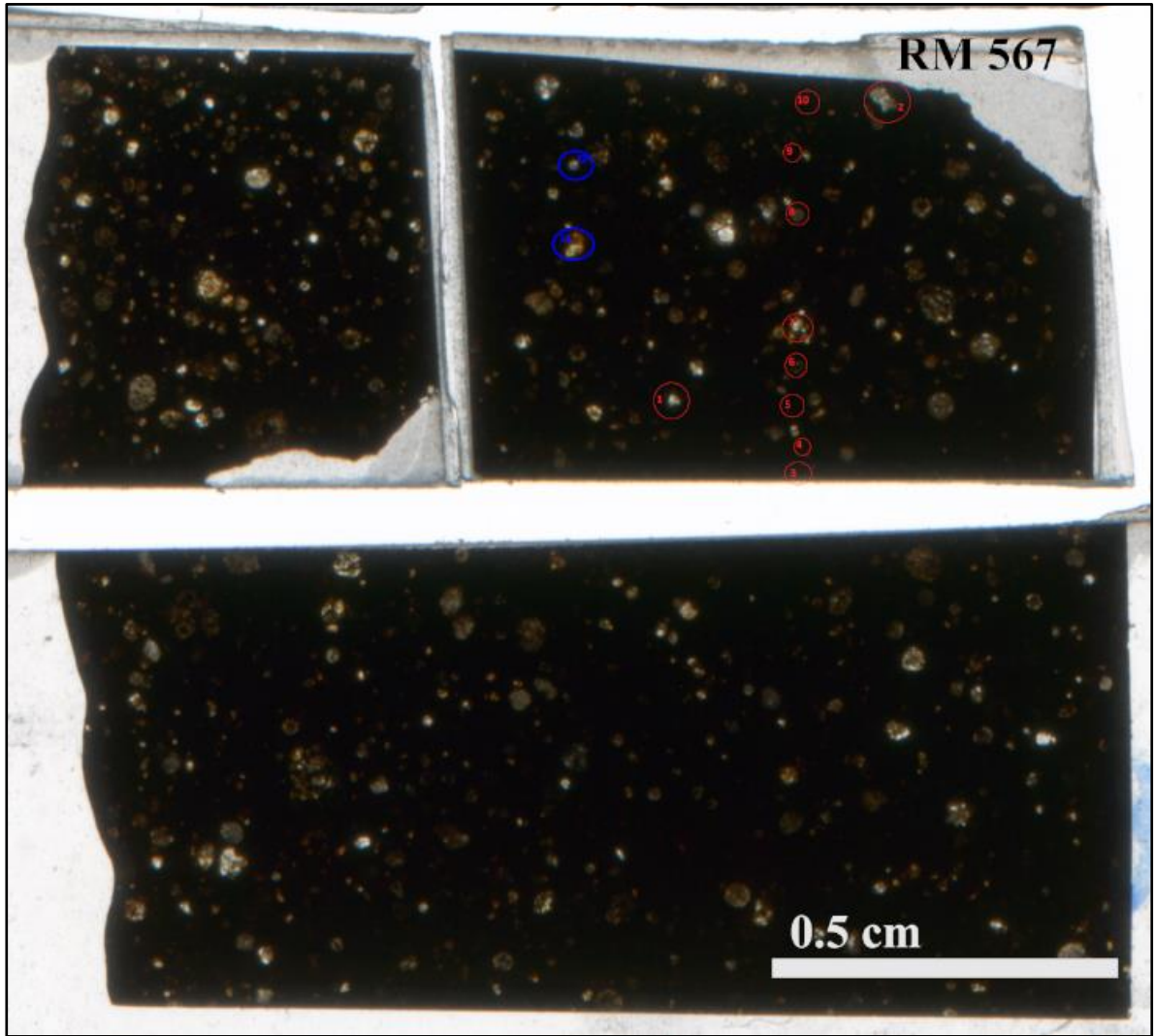


Ilustración A1.2: Mapa de cortes de sección delgada de RM567. Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS

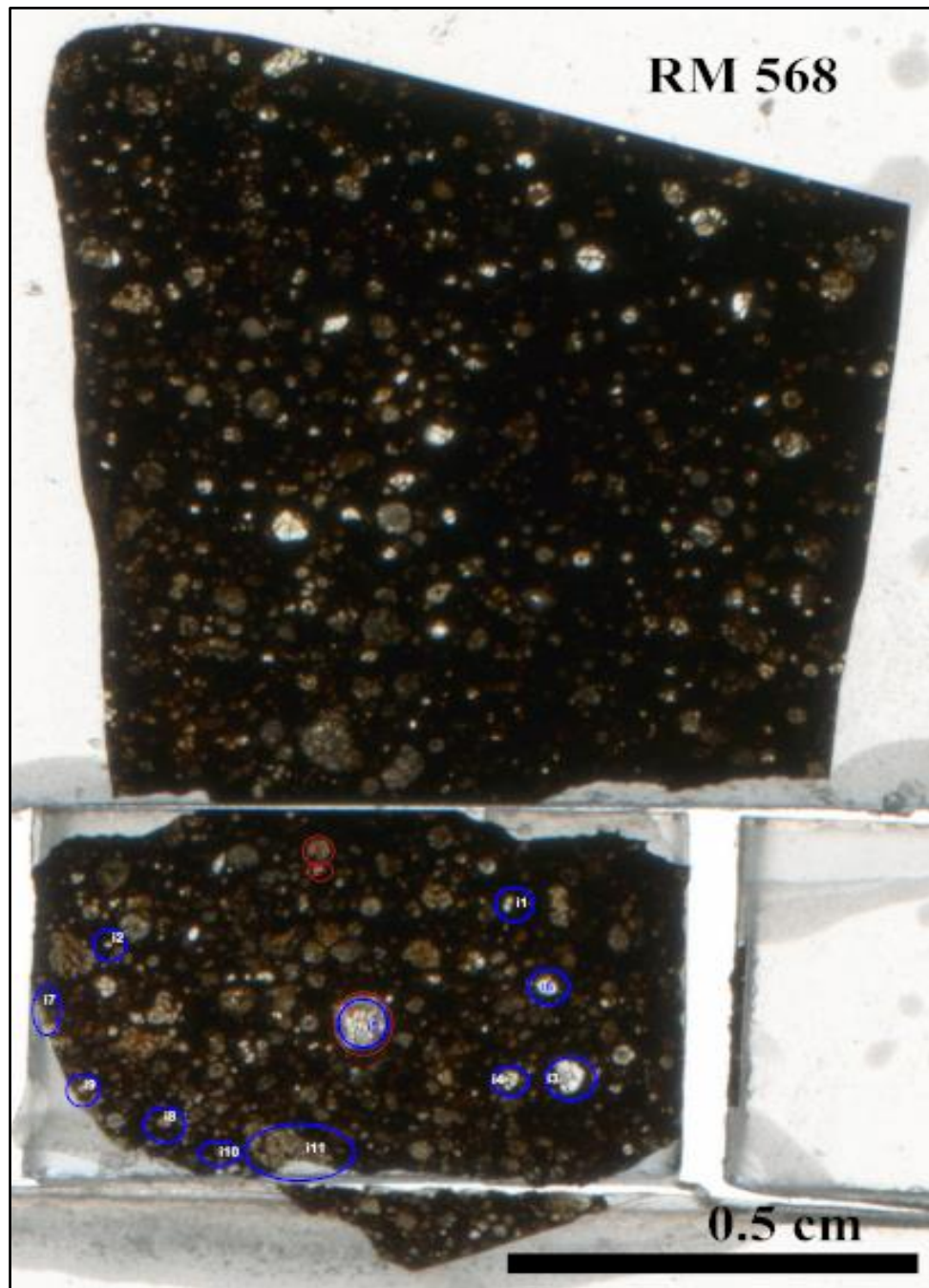


Ilustración A1.2: Mapa de cortes de sección delgada de RM568. Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS

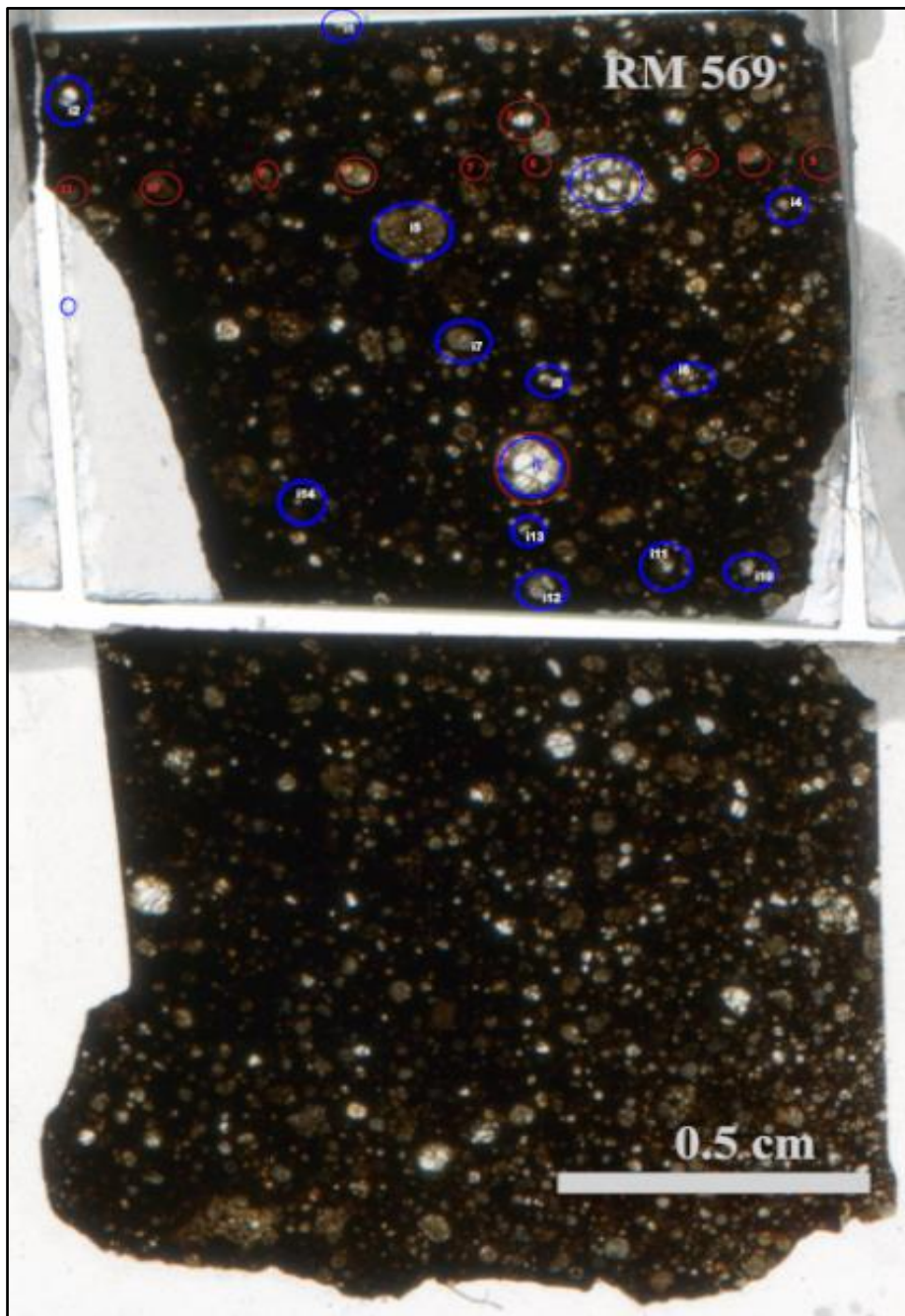


Ilustración A1.3: Mapa de cortes de sección delgada de RM567. Los círculos azules corresponden a cristales con familias de inclusiones y los rojos, cristales con MIAs, analizadas con LA-ICP-MS

ANEXO II

Hoja de cálculo de porcentajes modales

Corte	total pixeles	opacos (px)	opacos (%)	porosidad (px)	porosidad (%)	Matriz np (px)	Matriz nv (px)	Matriz total (px)	Matriz (%) im
RM567	100								
567_5x_1	497640	188832	3.3894766	959957	19.22897778	2379232	2244680	2311956	48.46616319
567_5x_2	497640	314430	6.31818248	393122	7.889345743	2478588	2032058	2254423	45.30010208
567_5x_3	497640	128520	2.542277521	951062	19.11052437	2144234	1882588	1913401.5	38.44785748
567_5x_4	497640	215487	4.32968618	548528	11.02205604	2019513	2135164	2077353.5	41.74208904
567_5x_5	497640	148911	2.952011789	374874	7.528853871	2510928	2344683	2427944.5	48.78882203
567_5x_6	497640	147720	2.968287747	647538	13.01154688	2594884	2839514	2802199	52.2882708
567_5x_ave	497640	186625	3.750020084	645313.5	12.96685113	2245562.833	2179529.667	2264546.25	45.50351743
RM568	100								
568_5x_1	497640	215740	4.335053369	304782	6.124252508	2112303	1915333	2013818	40.46541442
568_5x_2	497640	148830	2.950384165	453023	9.102891166	1230381	2144773	1837577	33.90686737
568_5x_3	497640	108148	2.173072565	438157	8.804275689	1800830	1480989	1640764.5	32.98932268
568_5x_4	497640	161873	3.252656411	467200	9.387860082	1209154	1620883	1415018.5	28.43320966
568_5x_5	497640	111672	2.243923811	408334	8.205013825	2189082	1866366	1892223.5	38.02210629
568_5x_ave	497640	148832.2	2.891018036	414299.2	8.324877829	1708150	1751610.6	1729880.3	34.76000474
RM569	100								
569_5x_1	497640	112295	2.256839281	410187	8.241848904	2890766	2686015	2778390.5	55.82884141
569_5x_2	497640	87490	1.758013439	381280	7.660992155	2886182	2087584	2468873	50.17183204
569_5x_3	497640	207850	4.178512887	285300	5.893722351	2894078	2279768	2591638	52.08208751
569_5x_4	497640	108804	2.185284387	278211	5.650160302	2742723	2261925	2502324	50.28139488
569_5x_5	497640	168070	3.36051633	756335	15.19770397	2638733	2160472	2386602.5	48.21732133
569_5x_6	497640	130498	2.62221087	550375	11.05916843	2296807	1771191	2033899	40.86891659
569_5x_7	497640	294412	5.918878987	481549	9.678181748	2744888	2073659	2409273.5	48.41164923
569_5x_ave	497640	156769.8571	3.150114478	450171	9.045881424	2730588.143	2187232	2458900.071	49.40883953
M216	100								
M216_5x_1	497640	315173	6.330048	100157	2.012542589	2625629	2380855	2658442	53.41841082
M216_5x_2	497640	289148	5.8187194573	171827	3.452870878	2345434	1791900	2088997	41.58754366
M216_5x_3	497640	333143	6.493198213	121095	2.433283229	2194082	2802377	2392229.5	48.08928304
M216_5x_4	497640	307587	6.180615837	87910	1.786452888	1742492	1888500	1806548	36.30051601
M216_5x_ave	497640	301012.75	6.048513556	120247.25	2.4162233644	2295009.25	2168433	2231721.125	44.84393336

Ilustración A2.1: Hoja de cálculo de porcentajes modales en meteoritos no registrados

Matriz-opacos	Matriz (%)	Matriz promedio	condrulos (vol%)	condrulos (mm)	C Porfiricos %	CAIs %	Px Radial %	EO %	C %
43.0668876	48.3815468		26	0.15	23		3	0	0
38.88168383	50.28253801		33.5	0.1	30		2	0.5	1
35.90537864	39.34719811		36	0.12	30		3	3	0
37.41211942	47.14797534		36.5	0.16	35		1	0	0.5
45.83481023	57.51833433		31	0.16	30		1	0	0
49.32000305	39.02018229		35	0.18	25		10	0	0
41.75349734	46.94979544	44.35164539	33	0.145	28.83333333	3.33333333	0.58333333	0.16666666	0.08333333
36.13035105	45.04089412		42.5	0.1	40		2	0	0.5
30.85958317	36.84662964		49	0.12	45		2	1	0.5
30.79825008	43.02263384		44	0.13	40		2	0	2
25.18055355	28.85948351		58.5	0.16	50		2	4	2
35.77818588	25.05106256		59.5	0.12	50		5	2	0.5
31.76898571	35.38410413	33.57654542	50.7	0.126	45	2.6	5	1.4	1.3
53.57280213	54.50231481		30	0.14	25		5	0	0
48.4132495	55.58099441		30	0.14	25		5	0	0
47.90557485	63.88976498		23	0.08	20		3	0	0
48.09510031	61.28355533		29	0.16	25		2	1	1
45.08125689	55.1882447		24.5	0.13	22		2	0	0.5
38.24570852	38.3185206		44	0.19	35		3	6	0
42.49577024	58.40783387		23	0.14	20		3	0	0
46.25872505	55.44706124	50.85289315	29.07142857	0.14	24.57142857	3.285714286	3	1	0
47.08593282	62.6644094		27	0.19	26		2	0	0
36.58034889	53.88013455		34.5	0.13	30		3	1	0
41.59606882	53.57353556		32.5	0.14	25		5	2	0.5
30.11980017	52.0529313		35	0.14	30		5	0	0
38.7954197	55.5352527	47.1653362	32.25	0.15	27.5	3.75	0.75	0	0.25

Ilustración A2.2: Hoja de cálculo de porcentajes modales en meteoritos no registrados

ANEXO III
Espectros obtenidos con Raman

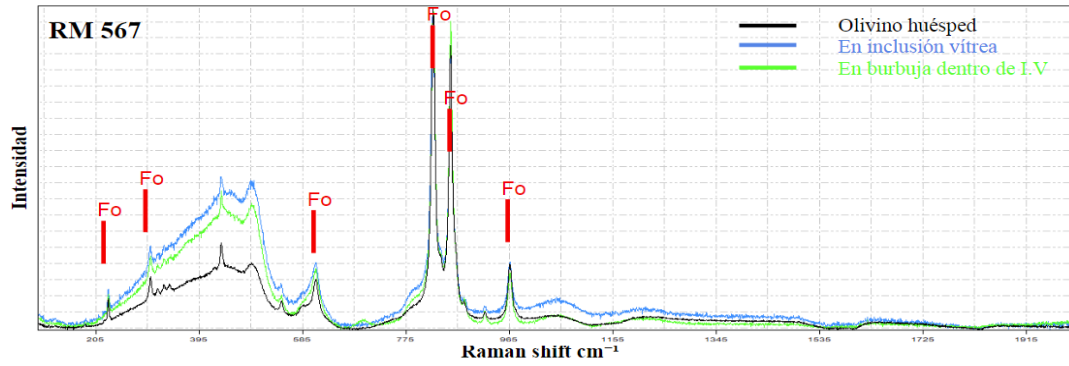


Ilustración A3.1: Espectro Raman obtenido en muestra RM567

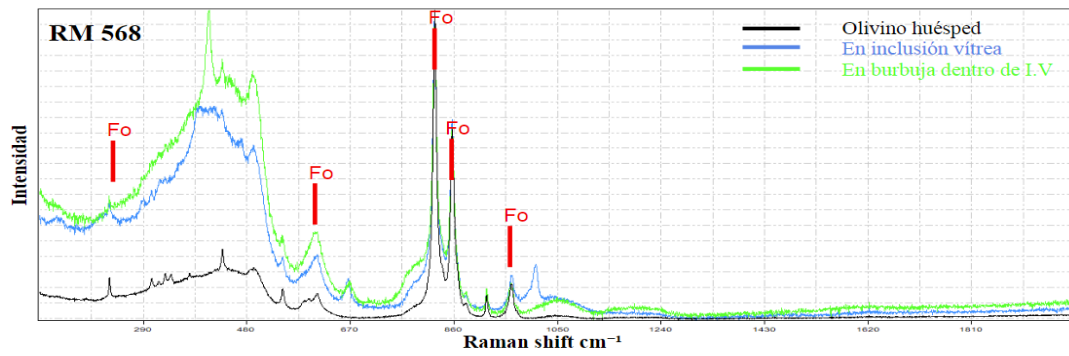


Ilustración A3.2: Espectro Raman obtenido en muestra RM568

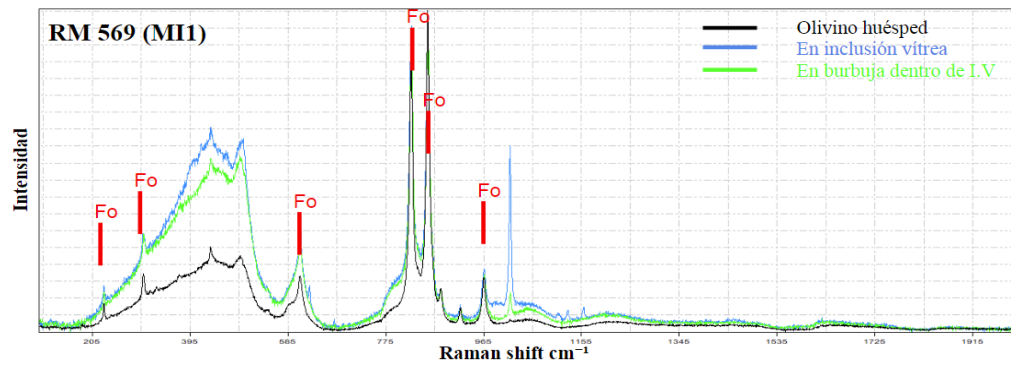


Ilustración A3.3: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI1

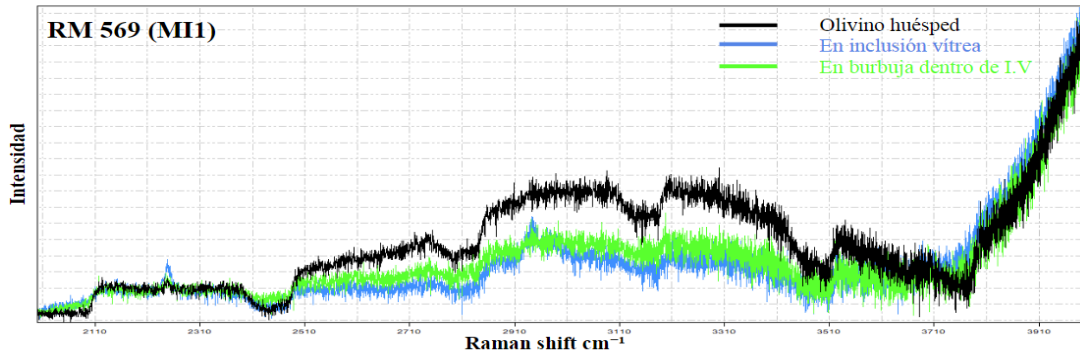


Ilustración A3.4: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI1 en 2000 a 4000 cm^{-1}

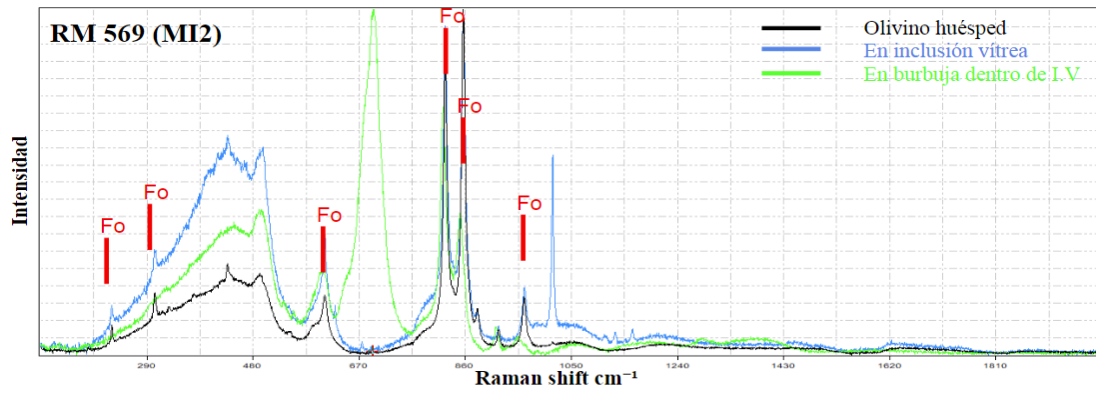


Ilustración A3.5: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI2

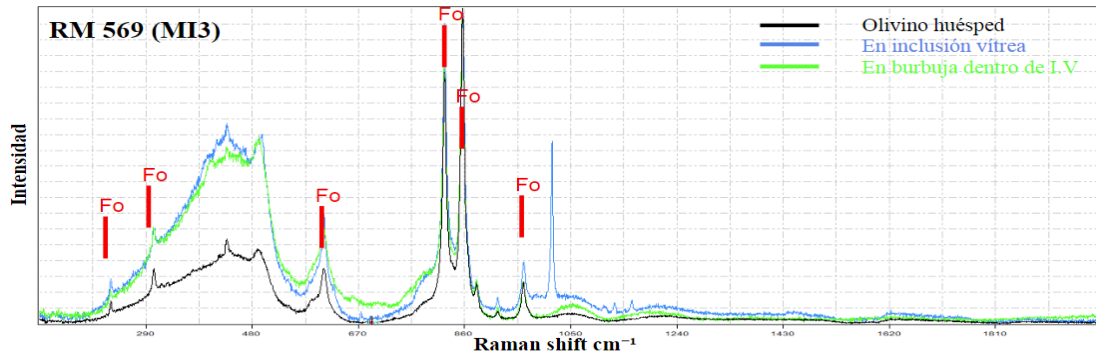


Ilustración A3.6: Espectro Raman obtenido en muestra RM569 en MI3

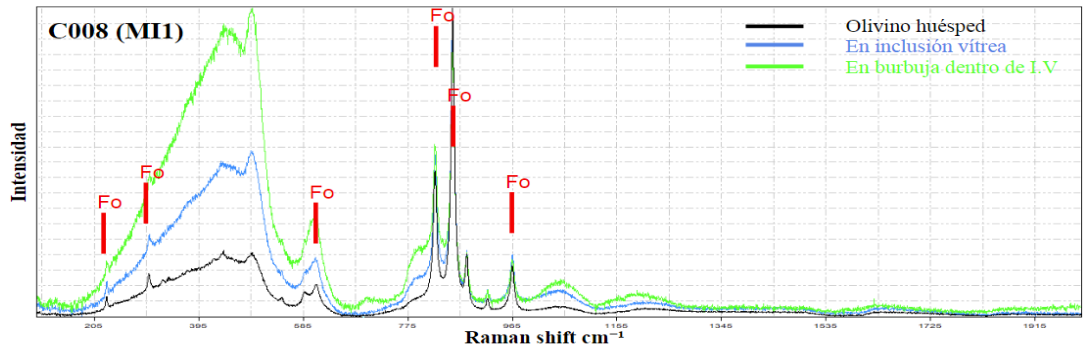


Ilustración A3.7: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de muestra Catalina 008

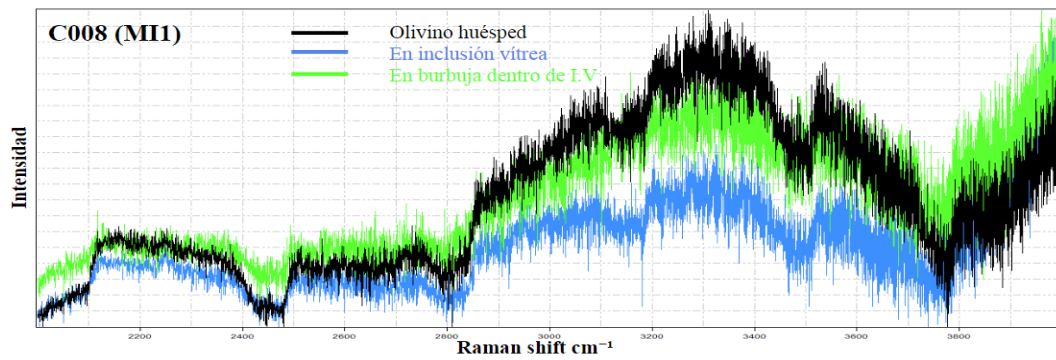


Ilustración A3.8: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de muestra Catalina 008 entre 2000 a 4000 cm^{-1}

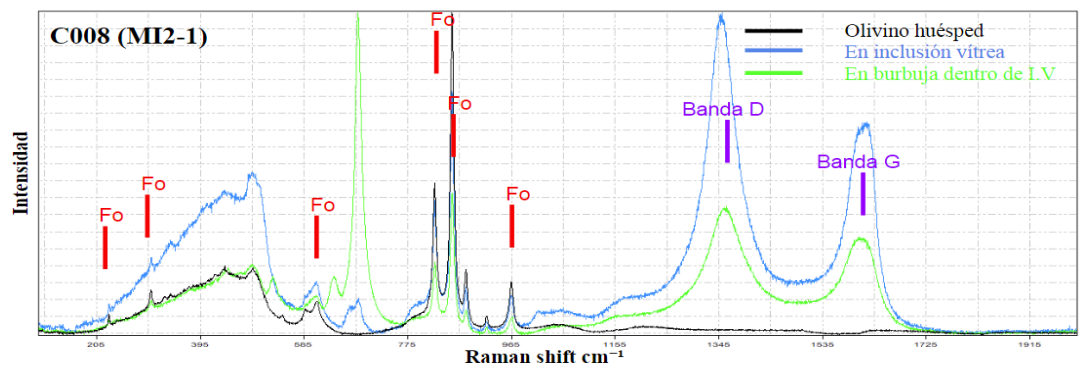


Ilustración A3.9: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA2, de muestra Catalina 008

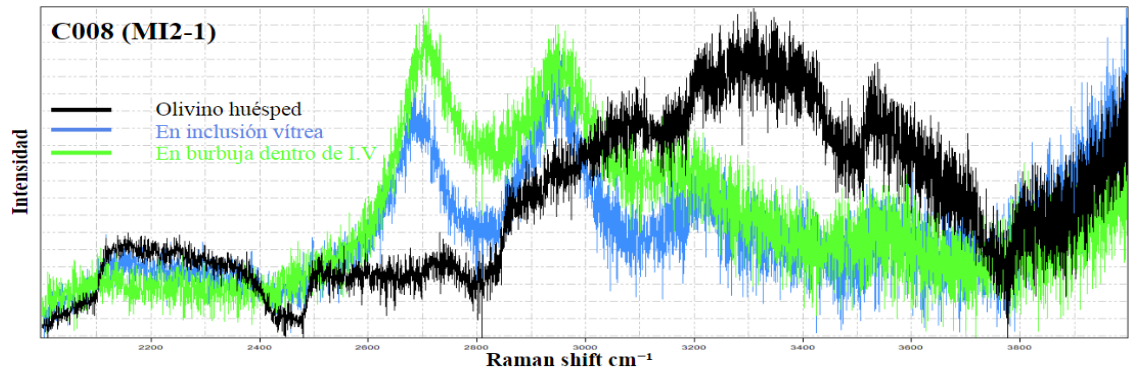


Ilustración A3.10: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA2 de muestra Catalina 008 entre 2000 a 4000 cm^{-1}

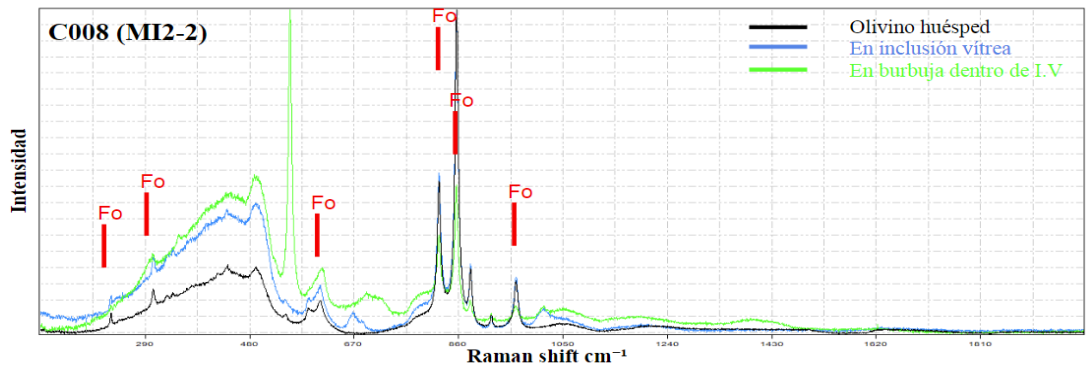


Ilustración A3.11: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA2 en muestra Catalina 008

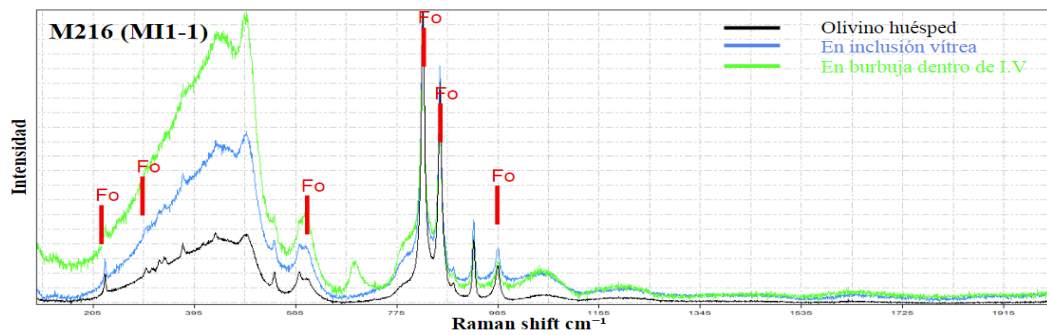


Ilustración A3.12: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA1 en muestra El Mèdano 216

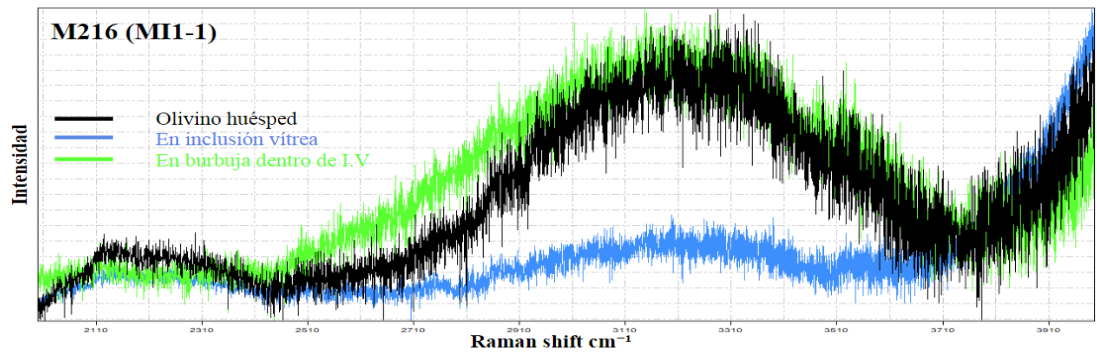


Ilustración A3.13: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA1 en muestra El Mèdano 216 entre 2000 a 4000 cm^{-1}

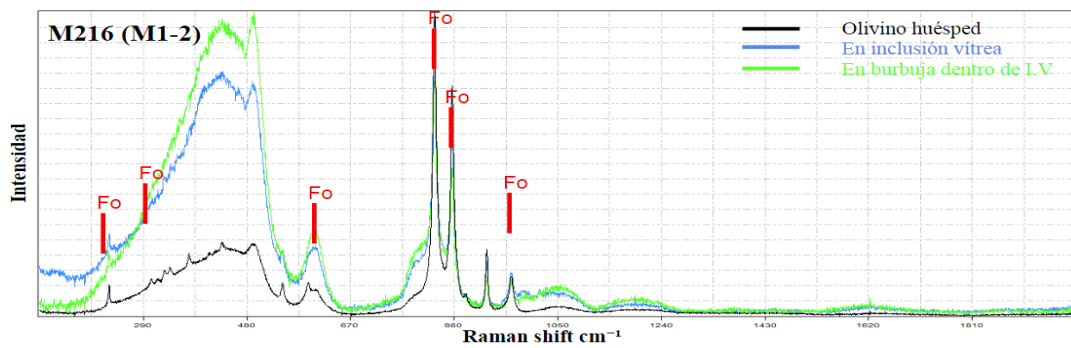


Ilustración A3.14: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA1 en muestra El Mèdano 216

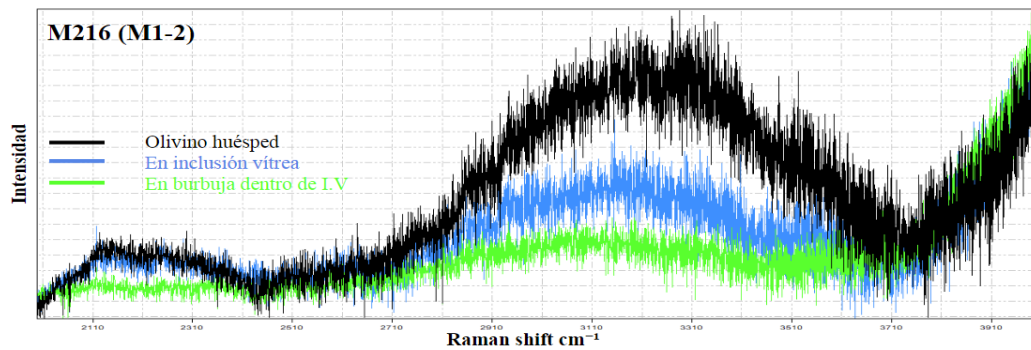


Ilustración A3.15: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA1 en muestra El Mèdano 216 entre 2000 a 4000 cm^{-1}

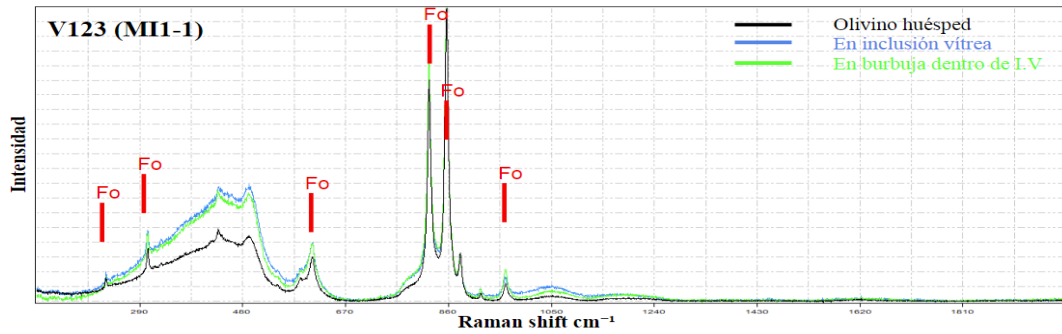


Ilustración A3.16: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA1 en muestra Los Vientos 123

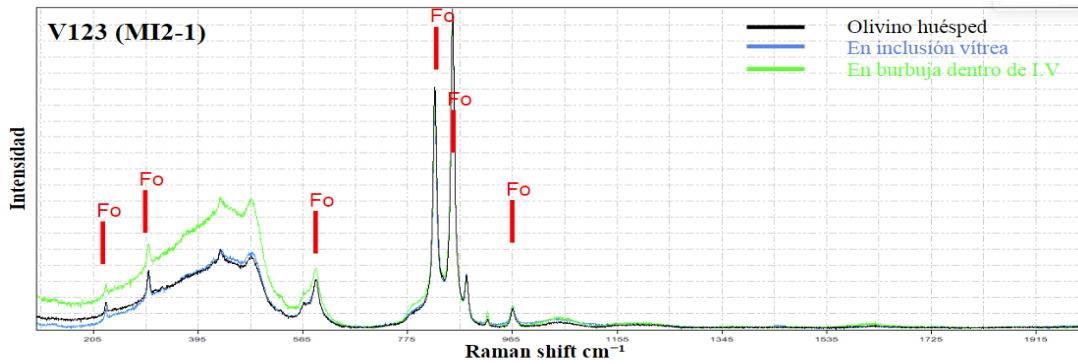


Ilustración A3.17: Espectro Raman obtenido en inclusión MI1 de MIA2 en muestra Los Vientos 123

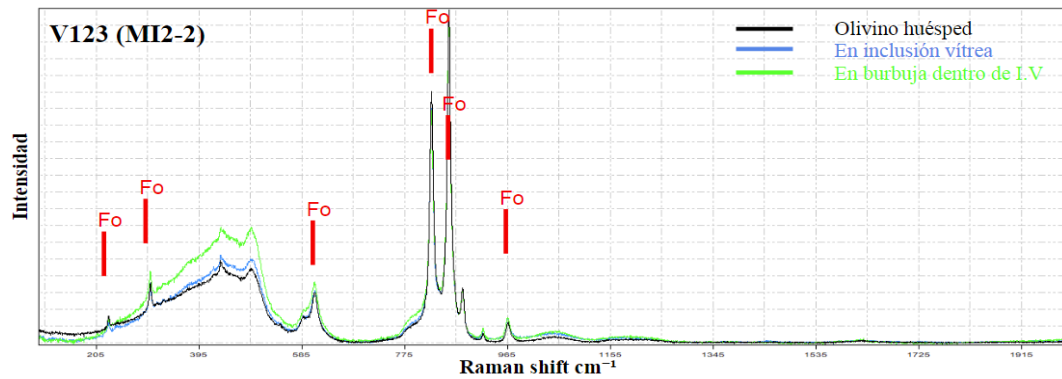


Ilustración A3.18: Espectro Raman obtenido en inclusión MI2 de MIA2 en muestra Los Vientos 123

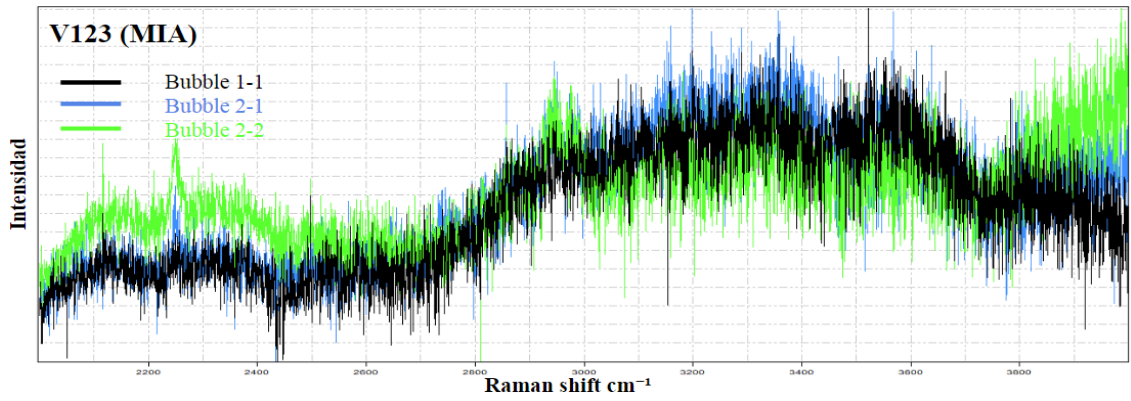


Ilustración A3.19: Espectro Raman obtenido en burbuja de tres inclusiones vítreas de una MIA en muestra Los Vientos 123 entre 2000 a 4000 cm^{-1}

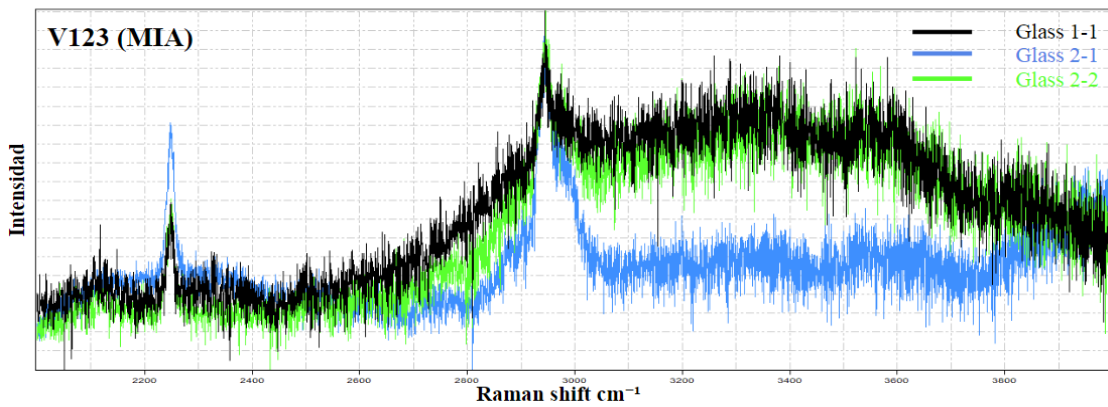


Ilustración A3.19: Espectro Raman obtenido en vidrio de tres inclusiones vítreas de una MIA en muestra Los Vientos 123 entre 2000 a 4000 cm^{-1}

ANEXO IV

Concentraciones obtenidas con LA-ICP-MS

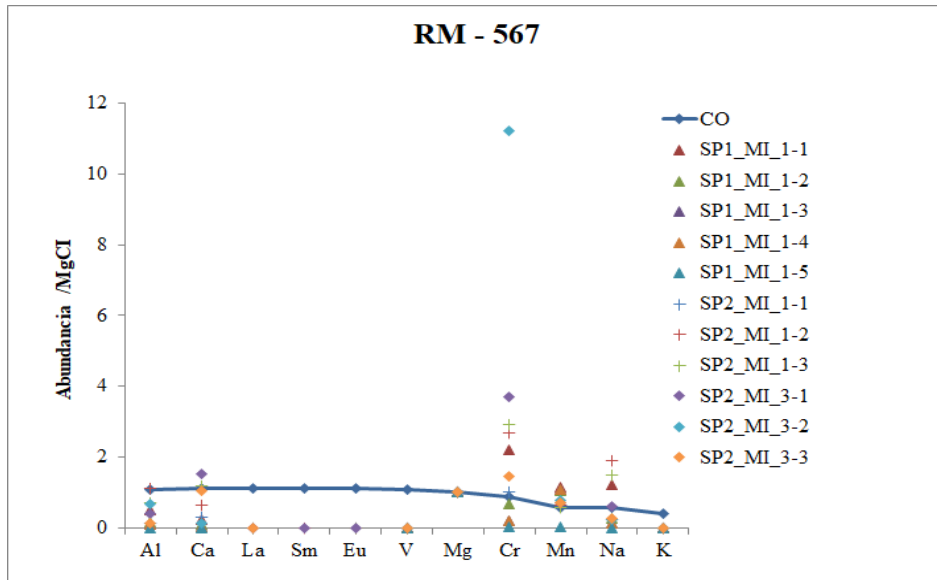


Ilustración A4.1: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 567

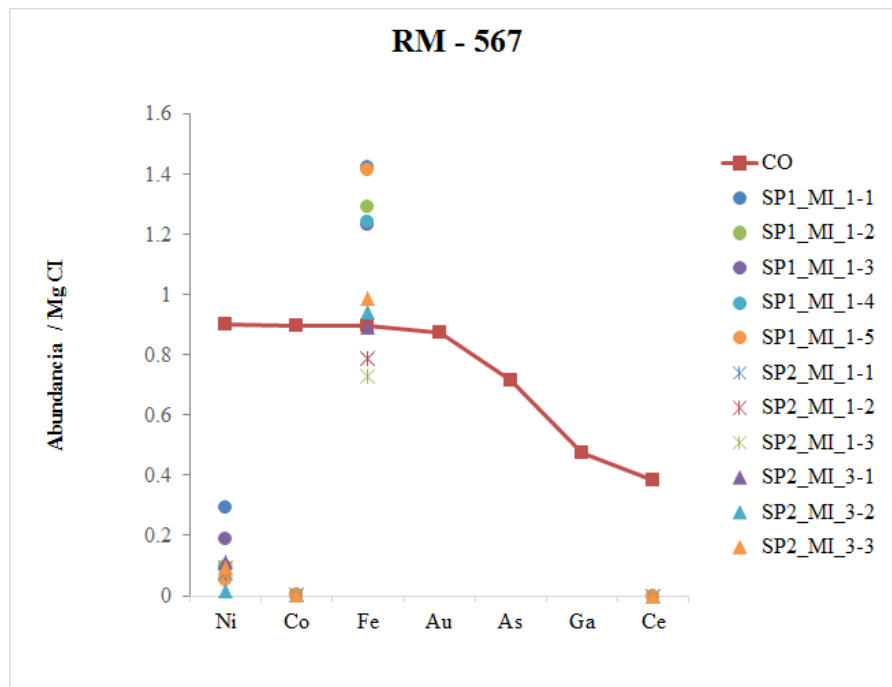


Ilustración A4.2: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 567

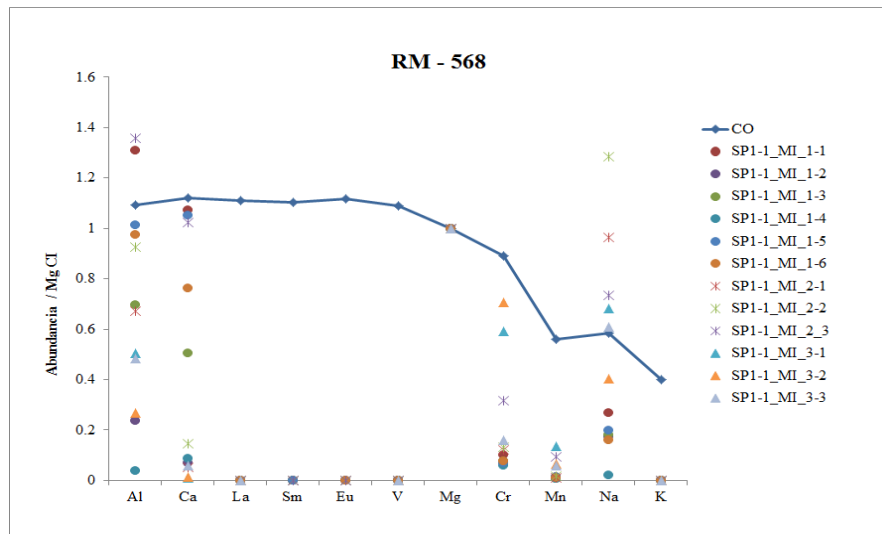


Ilustración A4.3: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 568

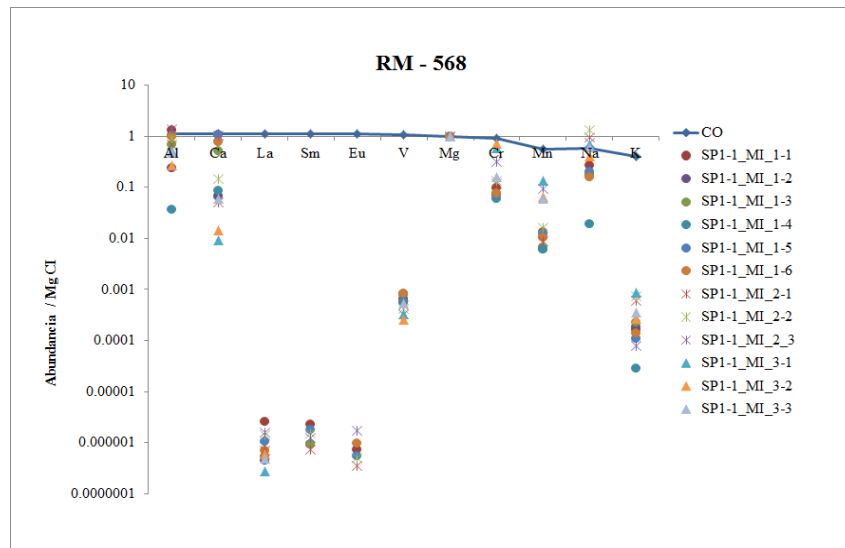


Ilustración A4.4: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 568

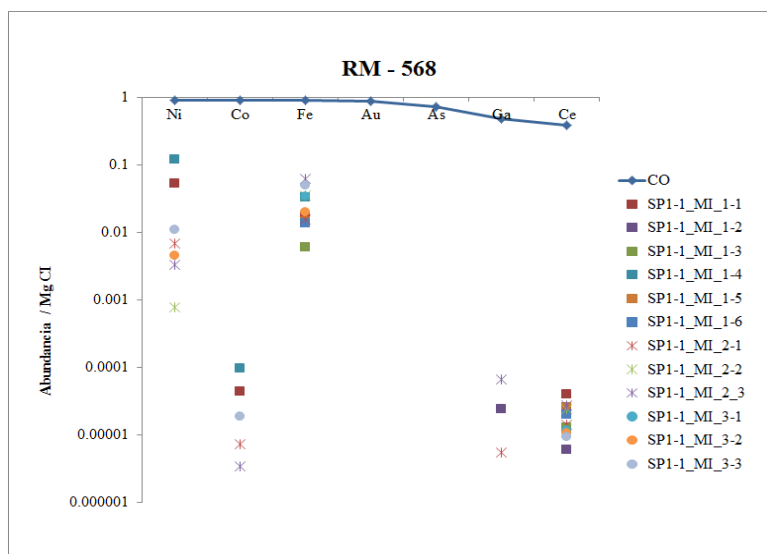


Ilustración A4.5: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 568

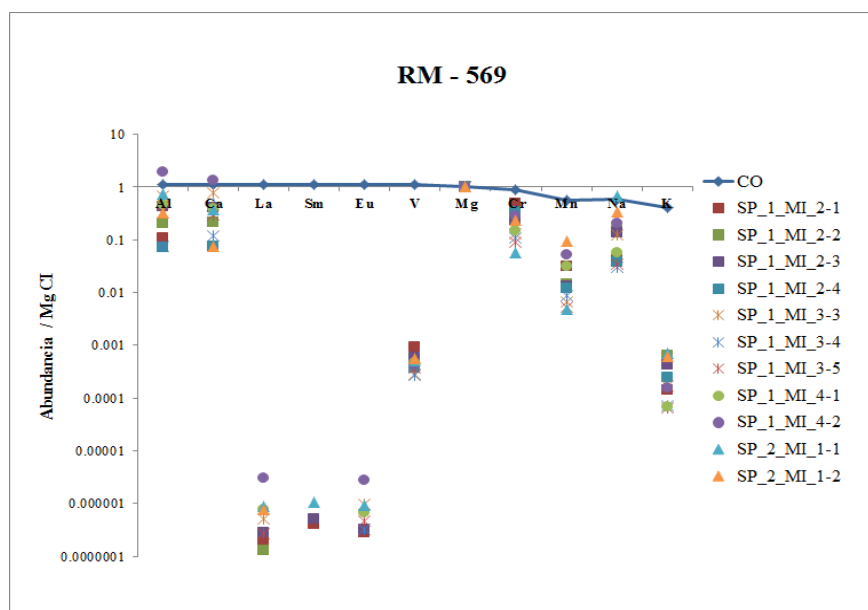


Ilustración A4.6: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 569

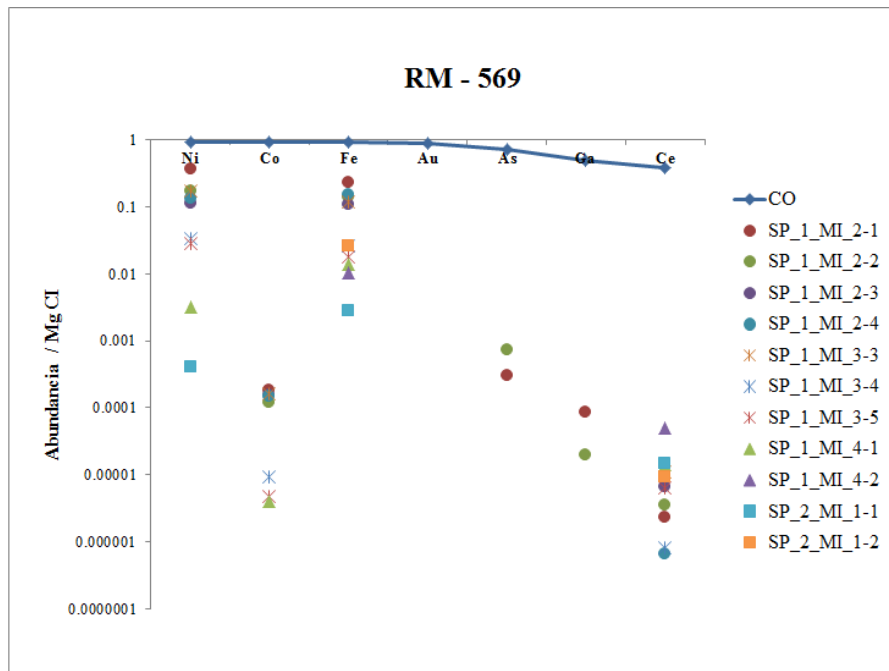


Ilustración A4.7: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en muestras RM 569

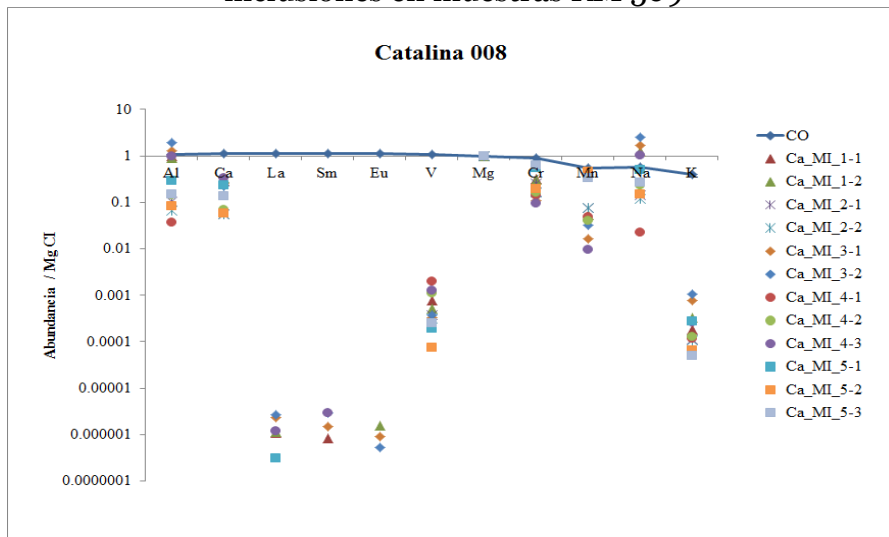


Ilustración A4.8: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en Catalina 008

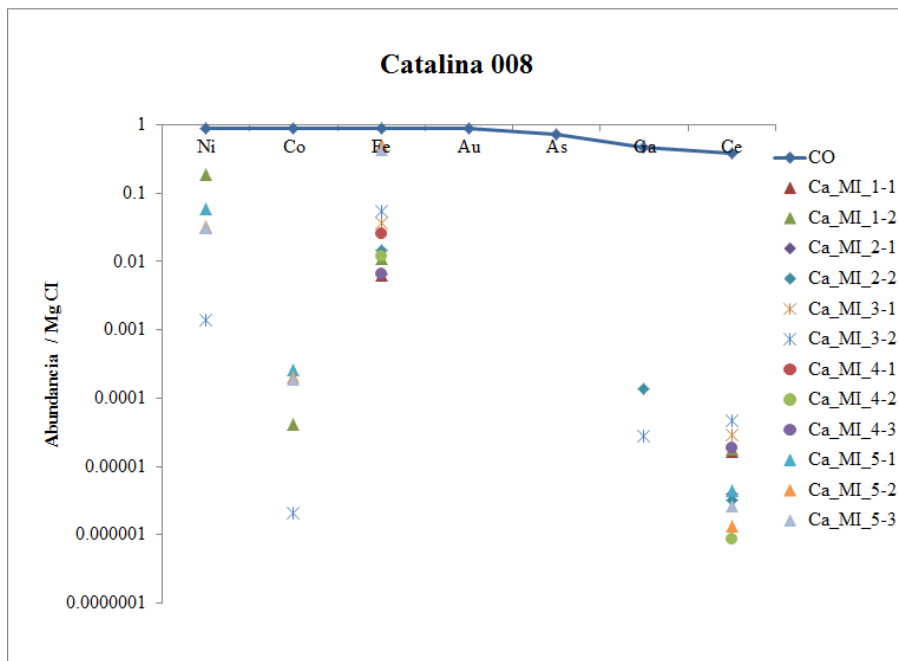


Ilustración A4.9: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en Catalina 008

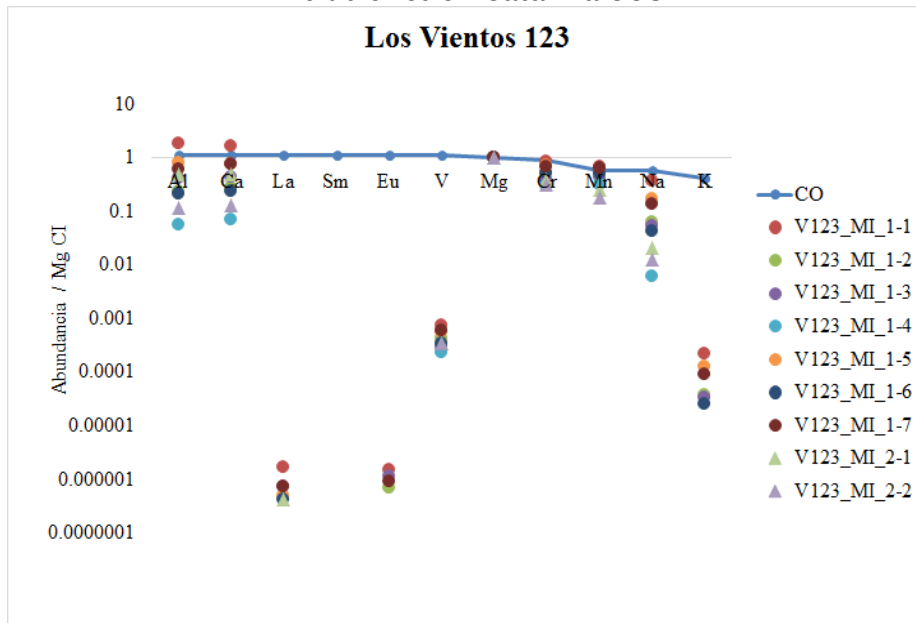


Ilustración A4.10: Relación entre abundancias de 12 isótopos de familias de inclusiones en Los Vientos 123

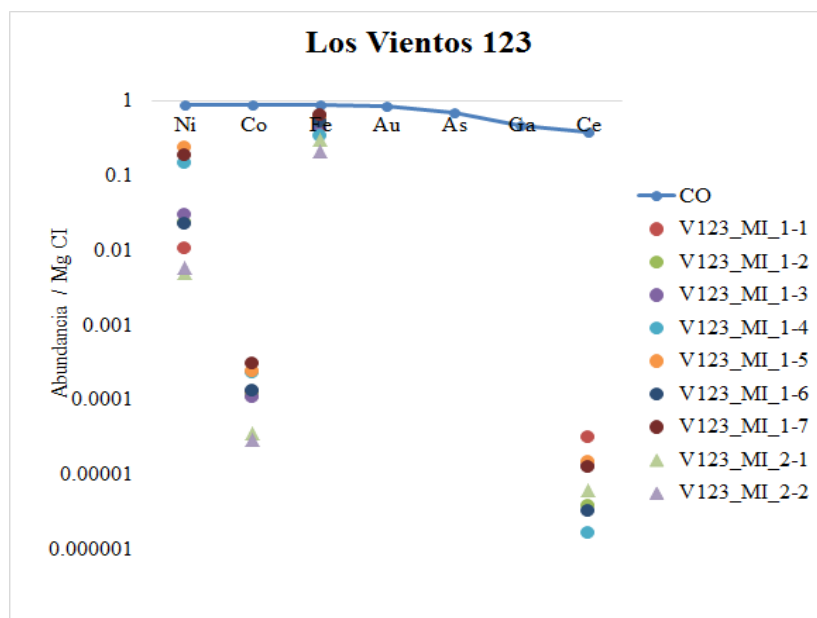


Ilustración A4.1: Relación entre abundancias de 7 isótopos de familias de inclusiones en Los Vientos 123

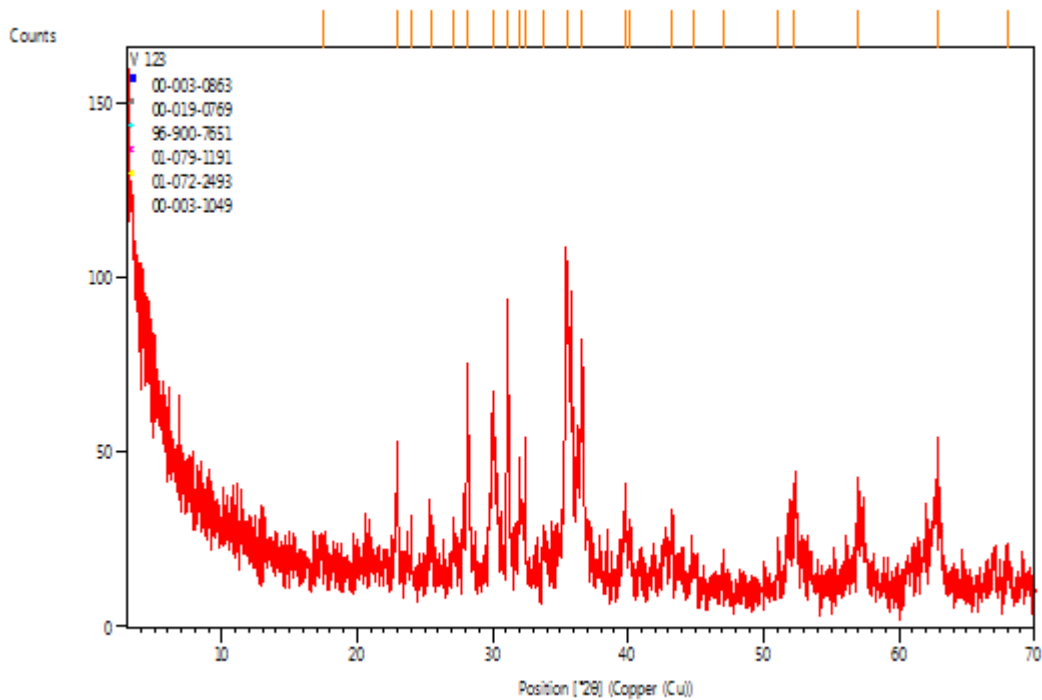
ANEXO V: Espectros obtenidos con difracción de rayos X

Parámetros de escaneo de Los Vientos 123

Dataset Name V₁₂₃
File name C:\RAYOS X\Report
2018\DRX\Millarca\V 123.xrdml
Sample Identification V 123
Comment
Configuration=SNGM_RT_SPINNER,
Owner=User-1, **Creation date=**20-10-2016
12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta);
Minimum step size 2Theta:0.001; **Minimum**
step size Omega:0.001
Sample stage=Reflection-Transmission
Spinner PW3064/60; **Minimum step size**
Phi:0.1
Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement
program=C:\PANalytical\Data
Collector\ProgramsARCILLAS_RT_SPINNER

.xrdmp, Identifier={40CE248E-AE17-4A5C-9216-A267D9081D66}
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCHE_SC.xrdmp, Identifier={8168BE19-C6DF-4F2C-A727-153D0C4331D7}
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time 29-10-2018 10:28:55
Operator DRX
Raw Data Origin XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis Gonio
Start Position [$^{\circ}2\theta$] 3.0124
End Position [$^{\circ}2\theta$] 70.0604
Step Size [$^{\circ}2\theta$] 0.0170
Scan Step Time [s] 24.1300
Scan Type Continuous
PSD Mode Scanning
PSD Length [$^{\circ}2\theta$] 2.12
Offset [$^{\circ}2\theta$] 0.0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [$^{\circ}$] 0.2177
Specimen Length [mm] 10.00
Measurement Temperature [$^{\circ}$ C] 25.00
Anode Material Cu
K-Alpha1 [\AA] 1.54060
K-Alpha2 [\AA] 1.54443
K-Beta [\AA] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffraction Type 0000000000030722
Diffraction Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Gráfico obtenido de Los Vientos 123



Lista de patrones minerales identificados en Los Vientos 123

Visible	Ref.Code	Score	Nombre Componente	Displ. [°2θ]	Scale Fac.	Fórmula Química
*	00-003-0863	28	Iron Oxide	0.00 0	0.897	Fe₃ O₄
*	00-019-0769	22	Magnesium Silicate	0.00 0	0.782	Mg Si O₃
*	96-900-7651	11	Troilite	0.00 0	0.386	Fe_{12.00} S_{12.00}
*	01-079-1191	8	Magnesium Iron Silicate	0.00 0	0.227	Mg_{1.77} Fe_{.23} (Si O₄)
*	01-072-2493	20	Magnesium Iron Chromium Aluminum Titanium Oxide	0.00 0	0.563	(Mg_{0.43} Fe_{0.58})₈ (Cr_{1.19} Al_{0.77} Ti_{0.03})₈ O₃₂
*	00-003-	8	Iron Nickel	0.00	0.092	Fe Ni

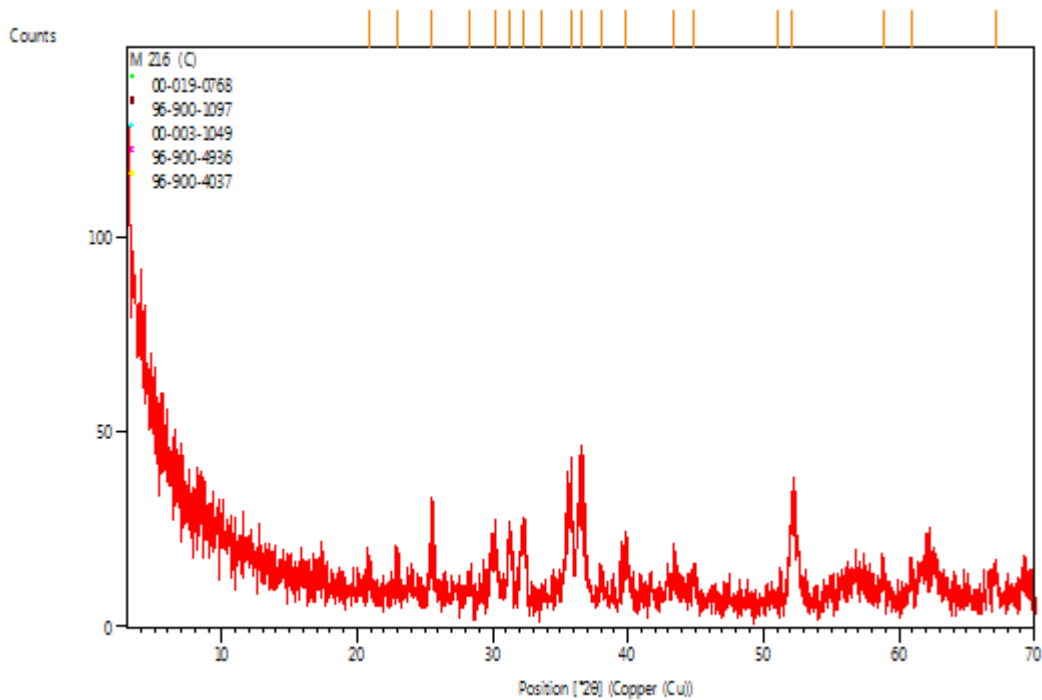
1049			o	
------	--	--	---	--

Parámetros de escaneo de El Médano 216

Dataset Name M 216 (C)
File name C:\RAYOS X\Report
 2018\DRX\Millarca\M 216 (C).xrdml
Sample Identification M 216 (C)
Comment
 Configuration=SNGM_RT_SPINNER,
 Owner=User-1, Creation date=20-10-2016
 12:17:22
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta);
 Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum
 step size Omega:0.001
 Sample stage=Reflection-Transmission
 Spinner PW3064/60; Minimum step size
 Phi:0.1
 Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement
 program=C:\PANalytical\Data
 Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER
 .xrdmp, Identifier={40CE248E-AE17-4A5C-
 9216-A267D9081D66}
 Batch program=C:\PANalytical\Data
 Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp,
 Identifier={8168BE19-C6DF-4F2C-A727-
 153D0C4331D7}
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD
 Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time 29-10-2018
 10:42:58
Operator DRX
Raw Data Origin XRD measurement
 (*.XRDML)
Scan Axis Gonio
Start Position [°2θ] 3.0124
End Position [°2θ] 70.0604
Step Size [°2θ] 0.0170
Scan Step Time [s] 24.1300
Scan Type Continuous

PSD Mode Scanning
PSD Length [$^{\circ}2\theta$] 2.12
Offset [$^{\circ}2\theta$] 0.0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [$^{\circ}$] 0.2177
Specimen Length [mm] 10.00
Measurement Temperature [$^{\circ}\text{C}$] 25.00
Anode Material Cu
K-Alpha1 [\AA] 1.54060
K-Alpha2 [\AA] 1.54443
K-Beta [\AA] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffractometer Type 0000000000030722
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Gráfico obtenido de El Médano 216



Lista de patrones minerales identificados en El Médano 216

Visible	Ref.Code	Score	Nombre Componente	Displ. [°2θ]	Scale Fac.	Fórmula Química
*	00-019-0768	8	Magnesium Silicate	0.000	0.153	Mg Si O₃
*	96-900-1097	12	Olivine	0.000	0.697	Mg_{8.00} Si_{4.00} O_{16.00}
*	00-003-1049	7	Iron Nickel	0.000	0.078	Fe Ni
*	96-900-4936	4	Chromite	0.000	0.011	Al_{5.78} Fe_{5.50} Mg_{3.55} Zn_{0.04} Cr_{9.00} Ni_{0.02} Ti_{0.11} O_{32.00}
*	96-900-4037	4	Troilite	0.000	0.134	Fe_{12.00} S_{12.00}

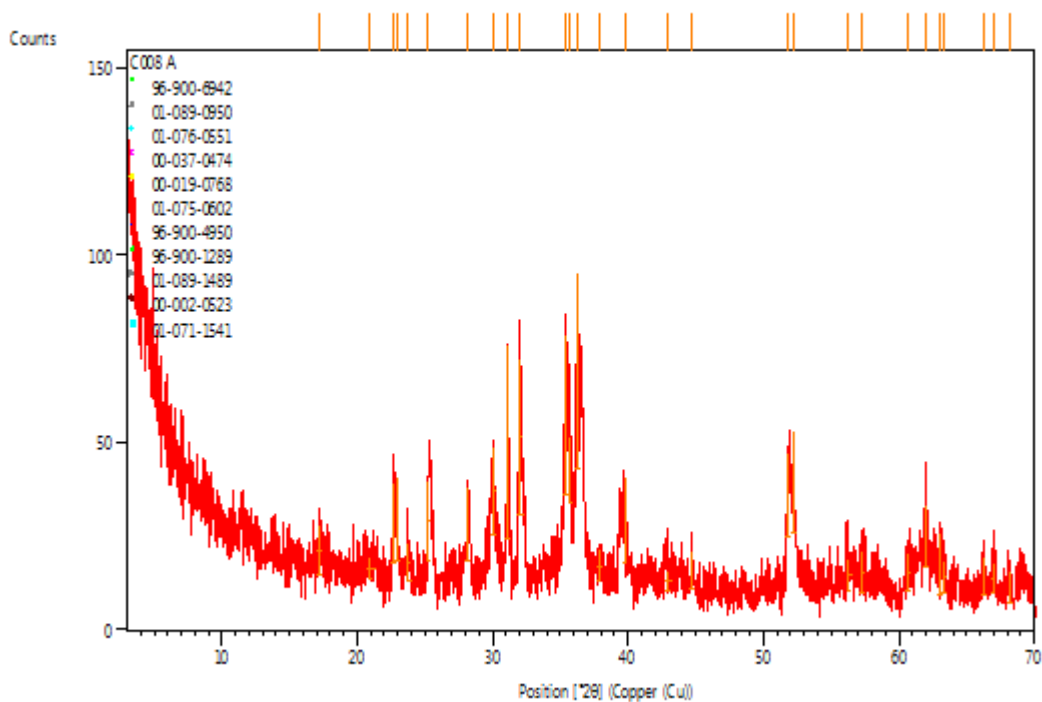
Parámetros de escaneo de Catalina 008

Dataset Name **Co08 A**
File name **C:\RAYOS X\Report**

2018\DRX\Millarca\Coo8 A.xrdml
Sample Identification Coo8 A
Comment
 Configuration=SNGM_RT_SPINNER,
 Owner=User-1, Creation date=20-10-2016
 12:17:22
 Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta);
 Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum
 step size Omega:0.001
 Sample stage=Reflection-Transmission
 Spinner PW3064/60; Minimum step size
 Phi:0.1
 Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement
 program=C:\PANalytical\Data
 Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER
 .xrdmp, Identifier={40CE248E-AE17-4A5C-
 9216-A267D9081D66}
 Batch program=C:\PANalytical\Data
 Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp,
 Identifier={CEA45BDF-C143-472A-A1F8-
 28C398AEC332}
 PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD
 Upper Level = 11.43 (keV)
 Measurement Start Date/Time 26-10-2018
 10:01:59
 Operator DRX
 Raw Data Origin XRD measurement
 (*.XRDML)
 Scan Axis Gonio
 Start Position [$^{\circ}2\theta$] 3.0124
 End Position [$^{\circ}2\theta$] 70.0604
 Step Size [$^{\circ}2\theta$] 0.0170
 Scan Step Time [s] 24.1300
 Scan Type Continuous
 PSD Mode Scanning
 PSD Length [$^{\circ}2\theta$] 2.12
 Offset [$^{\circ}2\theta$] 0.0000
 Divergence Slit Type Fixed
 Divergence Slit Size [$^{\circ}$] 0.2177
 Specimen Length [mm] 10.00
 Measurement Temperature [$^{\circ}C$] 25.00

Anode Material Cu
K-Alpha1 [Å] 1.54060
K-Alpha2 [Å] 1.54443
K-Beta [Å] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffractometer Type 0000000000030722
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Gráfico obtenido de Catalina 008



Lista de patrones minerales identificados en Catalina 008

Visible	Ref.Code	Score	Nombre Componente	Displ. [°2θ]	Scale Fac.	Fórmula Química
---------	----------	-------	----------------------	-----------------	---------------	-----------------

*	96-900-6942	30	Akermanite	0.00 0	0.586	Mg _{2.00} Ca _{4.00} Si _{4.00} O _{14.00}
*	01-089-0950	18	Iron Oxide	0.00 0	0.282	Fe ₃ O ₄
*	01-076-0551	21	Magnesium Iron Silicate	0.00 0	0.541	(Mg _{1.215} Fe _{0.785}) Si O ₄
*	00-037-0474	14	Iron Nickel	0.00 0	0.155	(Fe , Ni)
*	00-019-0768	20	Magnesium Silicate	0.00 0	0.771	Mg Si O ₃
*	01-075-0602	4	Iron Sulfide	0.00 0	0.576	Fe S
*	96-900-4950	9	Chromite	0.00 0	0.114	Al _{4.37} Fe _{4.50} Mg _{3.66} Si _{0.02} Zn _{0.06} Cr _{11.38} Ni _{0.02} Ti _{0.03} O _{32.00}
*	96-900-1289	15	Melilite	0.00 0	0.262	Ge _{8.92} Si _{3.08} Ca _{20.00} O _{44.00}
*	01-089-1489	27	Calcium Aluminum Silicate	0.00 0	0.682	Ca ₂ Al ₂ Si O ₇
*	00-002-0523	3	Calcium Aluminum Silicate	0.00 0	0.727	Ca Al ₂ (Si O ₄) ₂
*	01-071-1541	5	Calcium Magnesium Titanium Aluminum Silicate	0.00 0	1.236	Ca _{1.00} Mg _{0.39} Ti _{0.35} Ti _{0.13} Al _{0.13} (Al _{0.74} Si _{1.26}) O ₆