



**IPICYT**

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**“ESTUDIO DE MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES:  
PETROLOGÍA, HISTORIAS TÉRMICAS Y CONSERVACIÓN  
DE LA MATERIA ORGÁNICA”.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

Presenta:

**HUGO ALBERTO JIMÉNEZ BAHAMÓN**

Co-directores de tesis:

**Dr. Sanjeet Kumar Verma**

**Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz**



## **Constancia de aprobación de la tesis**

La tesis “**Estudio de micrometeoritos experimentales: Petrología, historias térmicas y conservación de la materia orgánica**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Hugo Alberto Jiménez Bahamón** y aprobada el **03 de febrero de 2021** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. Sanjeet Kumar Verma**

Codirector de la tesis

---

**Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz**

Codirectora de la tesis

---

**Dr. Héctor López Loera**

Miembro del Comité Tutoral

---

**Dr. Alejandro Heredia Barbero**

Miembro del Comité Tutoral



## **Créditos Institucionales**

En primer lugar, agradezco al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT) por haberme aceptado y dado la oportunidad de ser parte de su programa de posgrado en Geociencias Aplicadas.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca N° 941888 otorgada para desarrollar este trabajo de maestría.

La investigación fue financiada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN117619.

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

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

Al Dr. Héctor Cruz Ramírez por su asesoría para utilizar el dispositivo Citlalmitl con el que se fundió el material. El dispositivo se encuentra en el Laboratorio de Óptica Cuántica del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, a cargo del Dr. Alfred U'Ren a quien se agradece la confianza por permitir el trabajo en su laboratorio.

A la M.Sc. Patricia Hernández Reséndiz por su apoyo y discusiones para fundir el material.

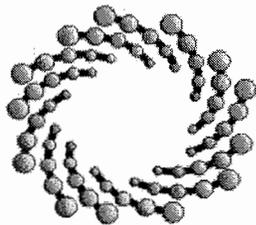
A la química Claudia Camargo Raya, Laboratorio de Evolución Química del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM por su apoyo en la preparación de las soluciones, análisis de las muestras y asesoría química en el laboratorio.

A la Dra. Alicia Negrón Mendoza, jefa del Departamento de Química de Radiaciones, por la oportunidad para trabajar en el Laboratorio de Evolución Química del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.

A la Dra. Adriana Meléndez, Instituto de Geología, UNAM por su apoyo para analizar las muestras en el FT\_IR.

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

Se agradece al técnico académico Raúl Rangel del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM por la elaboración del portamuestras de cobre utilizado en este trabajo y por su apoyo en el desarrollo de la estructura protectora para el láser de CO<sub>2</sub>.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 068 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 3 días del mes de febrero del año 2021, se reunió a las 16:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

**Dr. Sanjeet Kumar Verma** \_

**Presidente**

**IPICYT**

**Dr. Héctor López Loera**

**Secretario**

**IPICYT**

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Hugo Alberto Jiménez Bahamón**

sobre la Tesis intitulada:

*Estudio de micrometeoritos experimentales: petrología, historias térmicas y conservación de la materia orgánica.*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. Sanjeet Kumar Verma** \_

**Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz (UNAM)**

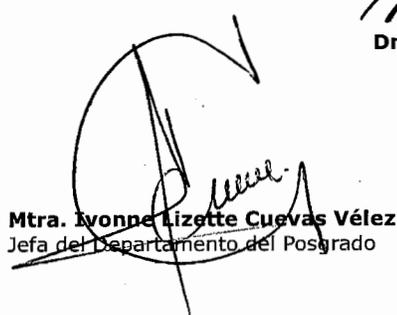
El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 17:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 3 días del mes de febrero de 2021.

  
**Dr. Marcial Bonilla Marin**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



*A mis padres, Adriana y Hugo,  
por los valores inculcados y por motivarme a cumplir mis sueños.*

*A mis hermanos, Vanessa Andrea y Luis Fernando,  
por las risas y por estar pendientes de mi a pesar de la distancia.*

*A mis amigos localizados en diversas partes del mundo,  
por ser la familia que uno decide escoger.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, agradezco a mi mamá y a mi papá, porque a pesar de que nos separan miles de kilómetros al momento de escribir este trabajo, el amor, el cariño y la preocupación se sintieron como si los tuviera a mi lado, y por ser esa fuerza que me motiva a ser cada día mejor hijo, hermano, amigo y profesional.

Le agradezco enormemente a mi mejor amigo Andrés Libardo Sandoval, que, de no haber sido por él, es bastante probable que esta nueva etapa académica no hubiese sucedido en tierras mexicanas.

Gracias a los amigos que hice durante mi paso por México, ya que sus enseñanzas, consejos y colaboración durante este tiempo fue muy valiosa; además, hicieron esta aventura más loca de lo que pensaba: Rubí Hernández, Oscar “Príncipe” Guevara, Erik “Gorritas” Martínez, Jonathan Hernández, Candy Hernández, Jocelyn Almaguer, Randall Guevara, Armando Calderón, América Morales, Edgar Camargo, Daniel Arias, Fernanda Ruíz y Karla González.

A mis amigos que se encuentran en otros países, por estar pendientes en algún momento de mí y de cómo se desarrollaba esta aventura: Mónica “Moka” Gómez, Laurita Ortiz, Paula Sarmiento, Lalita Calderón, Carito Latorre, Jorge “Kike” Ruiz, Cynthia Obregón y Alexandra Albarracín.

Mil gracias a la Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz por haberme permitido trabajar con ella, por todo su apoyo, confianza, paciencia, tiempo, consejos y dedicación brindadas para la realización de este trabajo. Las enseñanzas brindadas, el aprendizaje adquirido y el hambre de conocimiento son algo que llevaré por siempre.

Gracias al Dr. Sanjeet Kumar Verma, Dr. Alejandro Heredia Barbero y Dr. Héctor López Loera por su apoyo, críticas constructivas y sugerencias durante la realización de este trabajo.

A Ivonne Cuevas, Teresa “Tere” Casas y Edith Rodríguez, por siempre tener una buena disposición y colaborarnos a los estudiantes cada vez que teníamos alguna duda, por pequeña que fuera.

Gracias a la vida, por haberme dado la oportunidad de disfrutar al máximo de esta experiencia.

## CONTENIDO

Constancia de aprobación de la tesis .....	II
Créditos Institucionales .....	III
Acta de examen .....	V
DEDICATORIA .....	VI
AGRADECIMIENTOS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
RESUMEN .....	XXI
ABSTRACT .....	XXII

### CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 HIPÓTESIS .....	2

### CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

2. GENERALIDADES .....	3
2.1 ASTEROIDES .....	4
2.1.1 Asteroides tipo espectral S .....	4
2.1.2 Asteroides tipo espectral C .....	4
2.1.3 Asteroides tipo espectral M .....	4

2.1.4 Asteroides tipo espectral E .....	4
2.1.5 Asteroides tipo espectral R .....	5
2.1.6 Asteroides tipo espectral U .....	5
2.2 COMETAS .....	5
2.2.1 Cometas de período largo .....	6
2.2.1.1 Cometas dinámicamente “nuevos” .....	6
2.2.1.2 Cometas que regresan .....	6
2.2.2 Cometas de período corto .....	6
2.2.2.1 Cometas de la familia Júpiter .....	6
2.2.2.2 Cometas tipo Halley .....	6
2.3 METEOROIDES .....	7
2.4 MICROMETEORITOS .....	8
2.4.1 MMs fundidos .....	11
2.4.1.1 CSs tipo I .....	11
2.4.1.2 CSs tipo G .....	11
2.4.1.3 CSs tipo S .....	12
2.4.2 MMs parcialmente fundidos .....	13
2.4.3 MMs sin fundir .....	14
2.4.3.1 MMs finogranulares .....	14
2.4.3.2 MMs gruesogranulares .....	16
2.4.3.3 MMs refractarios .....	18
2.4.3.4 MMs ultracarbonáceos .....	20
2.5 DL – ALANINA .....	22

## **CAPÍTULO III – METODOLOGÍA**

<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	23
<b>3.1 SELECCIÓN DE MINERALES</b> .....	23
<b>3.2 LAVADO, SECADO, TAMIZADO Y PESADO DE MINERALES</b> .....	24
<b>3.3 PREPARACIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR</b> .....	25
<b>3.4 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS EXPERIMENTALES</b> .....	26
<b>3.5 FUSIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR</b> .....	27
<b>3.6 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA</b> .....	29
<b>3.7 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO – DSC</b> .....	30

## **CAPÍTULO IV – RESULTADOS**

<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b> .....	32
<b>4.1 FORMA Y TAMAÑO</b> .....	33
<b>4.2 COMPONENTES CRISTALINOS Y TEXTURAS</b> .....	35
<b>4.2.1 Cristales barrados de olivino y piroxeno</b> .....	36
<b>4.2.2 Textura escoriácea</b> .....	37
<b>4.2.3 Piroxeno radial (PR)</b> .....	38
<b>4.3 HISTORIAS TÉRMICAS</b> .....	39
<b>4.3.1 Tiempos y temperaturas – Experimento 1</b> .....	39
<b>4.3.2 Tiempos y temperaturas – Experimento 2</b> .....	44
<b>4.3.3 Tiempos y temperaturas – Experimento 4</b> .....	50
<b>4.4 COMPONENTE ORGÁNICO</b> .....	53

4.4.1 Experimento 2 – Columna 6 .....	53
4.4.2 Experimento 3 .....	55
4.4.3 Experimentos 1, 2 y 4 .....	57
4.5 ANÁLISIS .....	58
4.5.1 Espectroscopía Infrarroja .....	58
4.5.2 Calorimetría Diferencial de Barrido – DSC .....	68

## **CAPÍTULO V – DISCUSIÓN**

5. DISCUSIÓN .....	73
5.1 FORMA DE LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES .....	73
5.2 DESARROLLO TEXTURAL EN LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES .....	75
5.2.1 Textura de olivino y piroxeno barrado .....	75
5.2.2 Textura escoriácea .....	77
5.2.3 Textura de piroxeno radial (PR) .....	79
5.3 HISTORIAS TÉRMICAS Y PARÁMETROS LIBRES DE LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES .....	81
5.3.1 Experimento 1 .....	83
5.3.2 Experimento 2 .....	84
5.3.3 Experimento 4 .....	85
5.4 CRISTALIZACIÓN DE LOS MICROMETEORITOS.....	86
5.4.1 Experimento 1 .....	87
5.4.2 Experimento 2 .....	88

5.4.3 Experimento 4 .....	90
5.5 COMPONENTE ORGÁNICO .....	92
5.6 CLASIFICACIÓN DE LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES .....	99
5.6.1 MMs parcialmente fundidos .....	100
5.6.2 MMs sin fundir .....	100
5.6.3 Descripción de material precursor residual .....	102
<b>CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES</b>	
6. CONCLUSIONES .....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
ANEXOS .....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Comparación de tamaños de diferentes cuerpos celestes según Genge <i>et al.</i> (2008), Rubin y Grossman (2010) y la Unión Astronómica Internacional (2017). Nótese las ambigüedades entre los rangos de tamaño establecidos para un mismo término. ....	9
<b>Tabla 2.</b> Descripción y características generales de los subtipos dentro de los cuales se dividen las esférulas cósmicas (CSs) tipo S según Genge <i>et al.</i> (2008). ....	12
<b>Tabla 3.</b> División y características básicas de los subtipos dentro de los cuales se dividen los micrometeoritos gruesogranulares (CgMMs) condríticos según Genge <i>et al.</i> (2008)...	18
<b>Tabla 4.</b> Parámetros experimentales específicos implementados durante el proceso de fusión del material precursor (olivino, piroxeno y alanina) para los cuatro experimentos. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO <sub>2</sub> , siendo 95% el valor máximo. ....	33
<b>Tabla 5.</b> Características físicas y desarrollo textural de los olivinos y piroxenos empleados en los micrometeoritos experimentales, ordenados de acuerdo a la temperatura máxima alcanzada. Cabe notar que la definición de las barras de olivino y piroxeno se hace bajo la lupa binocular, ya que por el tamaño es difícil apreciarlos a simple vista. ....	37
<b>Tabla 6.</b> Condiciones y resultados experimentales de los micrometeoritos 3-3 y 6-6 pertenecientes al experimento 1. Las imágenes muestran el micrometeorito experimental obtenido dentro de su correspondiente orificio en el portamuestras junto con el material precursor que no fundió. <i>T<sub>mx</sub></i> corresponde al tiempo en la temperatura máxima, el cual es necesario para calcular la tasa de enfriamiento y la pendiente. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO <sub>2</sub> . ....	43
<b>Tabla 7.</b> Condiciones y resultados experimentales de los micrometeoritos 3-3, 4-2, 3-5 y 4-5 pertenecientes al experimento 2. Las imágenes en la parte superior de las casillas muestran el material precursor previo al proceso de fusión y las imágenes de la parte inferior muestran el micrometeorito experimental resultante posterior al proceso de fusión. <i>T<sub>mx</sub></i> corresponde al tiempo en la temperatura máxima, el cual es necesario para calcular la tasa de enfriamiento y la pendiente. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO <sub>2</sub> . ....	48
<b>Tabla 7 – Continuación.</b> ....	49
<b>Tabla 8.</b> Condiciones y resultados experimentales de los micrometeoritos 5-4 y 3-5 pertenecientes al experimento 4. Las imágenes muestran el micrometeorito experimental resultante posterior al proceso de fusión en su respectivo orificio del portamuestras. <i>T<sub>mx</sub></i> corresponde al tiempo en la temperatura máxima, el cual es necesario para calcular la tasa de enfriamiento y la pendiente. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO <sub>2</sub> . ....	52

**Tabla 9.** Definición cuantitativa de los parámetros libres (en negrilla) deducidos para los micrometeoritos experimentales generados que involucran sus historias térmicas resultantes. .... 86

**Tabla 10.** Valor en porcentaje de cada elemento agregado como material precursor a los micrometeoritos utilizados para espectrometría infrarroja, previo al proceso de fusión. Nótese que el rango de DL – Alanina empleada se encuentra entre 15% – 91%. .... 92

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Clasificación general de micrometeoritos. .... 10
- Figura 2.** Proporción y tipos de micrometeoritos pertenecientes a la colección “CONCORDIA”. CS hace referencia a las esférulas cósmicas (MMs fundidos), ScMM indican los micrometeoritos escoriáceos (MMs parcialmente fundidos), CgMM hacen alusión a micrometeoritos gruesogranulares, FgMM (F) y FgMM (C) indican los micrometeoritos finogranulares porosos y compactos respectivamente y UCMM hace alusión a los micrometeoritos ultracarbonáceos; los cuales hacen parte de los MMs sin fundir. Tomado y modificado de Koschny *et al.* (2019). .... 21
- Figura 3.** Imágenes microscópicas (a-c) y de electrones retrodispersados (d-f) de micrometeoritos. a), d) Esférulas cósmicas (CSs) vítreas tipo S. b), e) MMs parcialmente fundidos con amplia cantidad de vesículas que favorece la textura escoriáceo. c), f) MMs sin fundir con forma subangular, fracturas de deshidratación (FD) y magnetita framboidal (Mt). Escala de las barras en a), b) y c) = 150  $\mu\text{m}$ ; en d) = 20  $\mu\text{m}$  y en e), f) = 50  $\mu\text{m}$ . Tomado y modificado de Genge *et al.* (2008) y Folco y Cordier (2010). .... 22
- Figura 4.** Portamuestras de cobre utilizado para realizar los fundidos experimentales de micrometeoritos ultracarbonáceos. Dentro de los orificios del portamuestras se agregan los silicatos y la alanina para posteriormente ser fundidos con el láser de CO<sub>2</sub>. .... 25
- Figura 5.** Plano lateral que muestra la estructura general y partes principales de Citlälmitl (nombre del instrumento utilizado para crear los micrometeoritos experimentales). Las flechas moradas indican el camino que sigue el láser de CO<sub>2</sub> hasta llegar al portamuestras (Pm) ubicado en la cámara de fusión. Una lente (L) amplía o disminuye el diámetro del láser. Gracias a dos picomotores, un espejo (E) dirige el haz del láser hacia un orificio del portamuestras y un pirómetro (P) apunta en la misma dirección para determinar la temperatura máxima del fundido. Adaptada de Hernández – Reséndiz *et al.* (2020). .... 29
- Figura 6.** Perfil esquemático del interior de un instrumento enfocado a la calorimetría diferencial de barrido (DSC). A, corresponde al termopar donde se pone el crisol con la muestra y B es el termopar donde se ubica el crisol vacío que se usa de referencia. Las líneas y puntos rojos muestran el flujo de calor constante a través de una plancha de calentamiento que afecta a ambos crisoles. .... 32
- Figura 7.** Imágenes bajo la lupa binocular de algunos micrometeoritos generados durante el experimento 1. Pueden apreciarse las formas obtenidas posterior al proceso de fusión obteniendo partículas redondeadas (a), subredondeadas (b), subangulosas (c) y angulosas (d). La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ . .... 34
- Figura 8.** Micrometeoritos experimentales vistos bajo la lupa binocular. a) La buena agrupación entre los cristales de olivino (Ol) y piroxeno (Px) posterior a la irradiación con el láser de CO<sub>2</sub>. No se ven remanentes morfológicos y del hábito propio de dichos cristales. Aumento 3x. b) La asociación entre el olivino y piroxeno es buena, sin embargo, hacia la

parte externa de la partícula pueden apreciarse secciones prismáticas propias del olivino. Aumento 2x. La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ . ..... 35

**Figura 9.** Textura de olivinos y piroxenos barrados en los micrometeoritos experimentales vistos bajo la lupa binocular (señaladas con flechas amarillas y azules, respectivamente). Las muestras a) 6-6, b) 4-6 y e) 5-5 pertenecen al experimento 1, las cuales son vistas con un aumento 2x; c) 2-3 y d) 3-2 se generaron en el experimento 2 y son vistas con aumento 3x; f) 1-3 se formó en el experimento 4 y es vista con el aumento 3x. Nótese cómo las barras del olivino y/o piroxeno son más evidentes y diferenciables en a), b) y c), teniendo en cuenta la información de la Tabla 5. La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ . ..... 36

**Figura 10.** Textura escoriácea en los micrometeoritos experimentales vistos bajo la lupa binocular. Las partículas a) 2-1 y b) 3-5 pertenecen al experimento 1 mientras que el conjunto de partículas en c) 3-1 hace parte del experimento 2. Nótese cómo en c) 3-1 se desarrolla principalmente sobre el piroxeno tanto la textura escoriácea (vesículas en superficie) como la textura radial. La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ . ..... 38

**Figura 11.** Textura de piroxeno radial (PR) en el micrometeorito experimental visto bajo la lupa binocular. Partícula 4-5 formada en el experimento 2 compuesta totalmente por enstatita (aumento 3x). La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ . ..... 38

**Figura 12.** Curvas de pulso de calentamiento de los micrometeoritos 3-3 (a) y 6-6 (b) generados en el experimento 1 donde se emplea la temperatura en función del tiempo para ambas partículas. Nótese en la parte superior derecha de cada gráfica se encuentra el perfil – curva de “onda de choque” ideal. Puede resaltarse el calentamiento rápido dentro de los primeros 10 segundos ( $tm$ ) y el enfriamiento progresivo de las partículas hasta completar los 120 segundos ( $t$ ). Los polígonos 1 – 5 indican puntos donde posiblemente se presenten diferentes etapas de cristalización en el micrometeorito. .... 42

**Figura 13.** Curvas de pulso de calentamiento de los micrometeoritos 3-3 (a), 4-2 (b), 3-5 (c) y 4-5 (d) generados en el experimento 2 donde se emplea la temperatura en función del tiempo para ambas partículas. En la parte superior derecha de cada gráfica se encuentra el perfil – curva de “onda de choque” ideal. Puede resaltarse el calentamiento rápido dentro de los primeros 10 segundos ( $tm$ ) y el enfriamiento progresivo de las partículas hasta completar los 240 segundos ( $t$ ) en (a) y (b) y 120 segundos ( $t$ ) en (c) y (d). Los polígonos 6 – 10 indican puntos donde posiblemente se presenten diferentes etapas de cristalización en el micrometeorito. .... 46

**Figura 13 – Continuación.** ..... 47

**Figura 14.** Curvas de pulso de calentamiento de los micrometeoritos 5-4 (a) y 3-5 (b) generados en el experimento 4 donde se emplea la temperatura en función del tiempo para ambas partículas. Puede apreciarse en la parte superior derecha de cada gráfica se encuentra el perfil – curva de “onda de choque” ideal. Se resalta el calentamiento progresivo dentro de los primeros 6 segundos ( $tm$ ) y el enfriamiento rápido de las partículas hasta completar los 8

segundos (*t*). Los polígonos 11 – 13 indican puntos donde posiblemente se presenten diferentes etapas de cristalización en el micrometeorito. .... 51

**Figura 15.** Imágenes bajo la lupa binocular de las ubicaciones 6-1, 6-3 y 6-6 del portamuestras con presencia solo de DL – Alanina. La fila superior muestra el hábito de los cristales de alanina antes de ser sometidos al proceso de fusión. La fila inferior muestra el material transformado posterior al proceso de fusión. Nótese que en 6-1 (b) se enfoca en la parte superior del orificio y en 6-3 (b) y 6-6 (b) se enfoca en base del orificio. .... 55

**Figura 16.** Imágenes bajo la lupa binocular del portamuestras con DL – Alanina en 7 de los 36 orificios. a) Cristales pequeños de alanina después de haber sido expuesta a luz UV, pero antes del proceso de irradiación. Compárese el tamaño cristalino con respecto a las imágenes de a) en la Figura 15. b) Ubicación 3-6 del portamuestras (encerrado en amarillo) que señala la diferencia entre un orificio irradiado con otros que no. c) Portamuestras con los respectivos orificios irradiados. Nótese el hilo de material algodonoso (señalado con las flechas) ubicado sobre las posiciones 1-1 y 6-2. d) Acercamiento de la ubicación 3-6 donde se aprecia la transformación de la alanina en el material blanco compacto (izq.) y el material algodonoso junto con su relieve (der.). .... 57

**Figura 17.** Imágenes de algunos orificios del portamuestras donde se aprecia el micrometeorito formado, los silicatos que no fundieron y el aminoácido remanente posterior al proceso de fusión. Nótese que el aminoácido remanente no se filtra debajo de los micrometeoritos experimentales o cristales de más de 250  $\mu\text{m}$  (experimentos 1 y 2, columna derecha) mientras que en los cristales de menos de 250  $\mu\text{m}$  se conserva intersticialmente. 58

**Figura 18.** Espectros infrarrojos de los cristales de olivino (azul) y piroxeno (negro) utilizados como material precursor en la generación de micrometeoritos. Ambos cristales fueron pulverizados previamente para una mejor lectura de parte del instrumento, las cuales se realizaron de manera independiente y sin mezclarse entre sí. .... 61

**Figura 19.** Espectro infrarrojo de la DL – Alanina utilizada como material orgánico precursor en la generación de micrometeoritos. Para señalar cada grupo funcional del aminoácido se representa en azul claro (grupo amino), verde claro, (grupo carboxilo) y naranja (grupo metilo). Los puntos y líneas de colores indican bandas y rangos importantes dentro del espectro con lo que se reconoce cada grupo funcional. La línea punteada separa la región de la huella dactilar ( $< 1500 \text{ cm}^{-1}$ ) con la región de los grupos funcionales ( $4000 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ ). .... 62

**Figura 20.** Espectros infrarrojos de la DL – Alanina posterior al experimento 3. Dos espectros corresponden a la alanina con textura “algodonosa” (negro y rojo) y un espectro representa la alanina “compacta” (azul). Nótese que, a pesar de las diferencias en el porcentaje de transmitancia, los espectros siguen un patrón en cuanto a su forma, sin embargo, las flechas y el rectángulo gris azulado resaltan leves cambios notorios entre los espectros negro – rojo y el azul. .... 63

- Figura 21.** Espectros infrarrojos de los micrometeoritos 3-2 (superior) y 6-2 (inferior) en comparación directa con los espectros infrarrojos base del olivino (azul), piroxeno (verde) y la DL – Alanina (lila). El rectángulo muestra la zona en la cual el espectro del micrometeorito y el de la DL – Alanina son similares, teniendo en cuenta el número de onda y la amplitud en los valores de transmitancia (T). ..... 65
- Figura 22.** Espectros infrarrojos de los micrometeoritos 4-2 (superior) y 5-6 (inferior) en comparación directa con los espectros infrarrojos base del olivino (azul), piroxeno (verde) y la DL – Alanina (lila). Los rectángulos muestran la zona en la cual el espectro del micrometeorito y el de la DL – Alanina son similares, teniendo en cuenta el número de onda y la amplitud en los valores de transmitancia (T). ..... 66
- Figura 23.** Espectros infrarrojos de los micrometeoritos 1-4 (superior) y 5-5 (inferior) en comparación directa con los espectros infrarrojos base del olivino (azul), piroxeno (verde) y la DL – Alanina (lila). Los rectángulos muestran la zona en la cual el espectro del micrometeorito y el de la DL – Alanina son similares, teniendo en cuenta el número de onda y la amplitud en los valores de transmitancia (T). ..... 67
- Figura 24.** Curva calorimétrica endotérmica de la DL – Alanina. Se indican los puntos de la curva y los valores más relevantes como la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura de inicio de fusión ( $T_{eo}$ ), temperatura del punto mínimo del pico de fusión ( $T_m$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía (H). Nótese que para hallar  $T_{eo}$  se usa la intersección de rectas tangentes a la curva con origen en  $T_i$  y  $T_m$  respectivamente. .... 69
- Figura 25.** Curva calorimétrica endotérmica de la DL – Alanina<sub>(s)</sub> mezclada con olivinos y piroxenos. Se indican los puntos de la curva y los valores más relevantes como la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura de inicio de fusión ( $T_{eo}$ ), temperatura del punto mínimo del pico de fusión ( $T_m$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía (H). Nótese que para hallar  $T_{eo}$  se usa la intersección de rectas tangentes a la curva con origen en  $T_i$  y  $T_m$  respectivamente. .... 71
- Figura 26.** Curva calorimétrica endotérmica de la DL – Alanina<sub>(sol.)</sub> mezclada con olivinos y piroxenos. Se indican los puntos de la curva y los valores más relevantes como la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura de inicio de fusión ( $T_{eo}$ ), temperatura del punto mínimo del pico de fusión ( $T_m$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía (H). Nótese que para hallar  $T_{eo}$  se usa la intersección de rectas tangentes a la curva con origen en  $T_i$  y  $T_m$  respectivamente. .... 72
- Figura 27.** Curva calorimétrica del micrometeorito 4-5 generado en el experimento 1. Nótese el comportamiento constante de la curva durante el calentamiento, donde no se evidencia presencia del aminoácido debido a la ausencia de curvas endotérmicas en los primeros 300 °C. .... 73
- Figura 28.** Desarrollo de texturas y anillos ígneos en micrometeoritos experimentales obtenidos. a) Las líneas amarillas marcadas muestran zonas donde la textura de piroxeno radial se desarrolla en los límites del anillo ígneo. b) Las líneas amarillas indican los sectores

donde se forma la textura de olivino barrado justo a los límites de formación del anillo ígneo.  
..... 78

**Figura 29.** Las líneas amarillas marcadas sobre el micrometeorito experimental obtenido muestran el desarrollo de la textura de piroxeno radial (PR). La imagen indica el punto de nucleación de la textura la cual se encuentra en el centro del cristal. .... 80

**Figura 30.** a) Fragmento de un UCAMM donde todas las zonas color gris oscuro es material orgánico (Tomado y modificado de Sandford *et al.*, 2016). b) Detalle del material sin fundir en el experimento 4 en donde la alanina (Ala) de grano fino se depositó entre los cristales de silicato (Si). .... 81

**Figura 31.** Ángulos de entrada cenital (ZA) para partículas provenientes del espacio. Con ZA bajos, los MMs presentan temperaturas más altas, más pérdida de masa y menor tiempo de vuelo. Tomado y modificado de Rudraswami *et al.* (2015). .... 82

**Figura 32.** Ubicación de los polígonos situados en los termogramas de los micrometeoritos experimentales 3-3 y 6-6 del experimento 1. La línea punteada vertical indica la presión a la cual se realizaron los experimentos mientras que las líneas punteadas horizontales muestran las temperaturas a las que posiblemente empezaron a cristalizar los silicatos. Tomado y modificado de Michel *et al.* (2013). .... 88

**Figura 33.** Ubicación de los polígonos situados en los termogramas de los micrometeoritos experimentales 3-3, 4-2, 3-5 y 4-5 del experimento 2. La línea punteada vertical indica la presión a la cual se realizaron los experimentos mientras que las líneas punteadas horizontales muestran las temperaturas a las que posiblemente empezaron a cristalizar los silicatos. Tomado y modificado de Michel *et al.* (2013). .... 90

**Figura 34.** Ubicación de los polígonos situados en los termogramas de los micrometeoritos experimentales 5-4 y 3-5 del experimento 4. La línea punteada vertical indica la presión a la cual se realizaron los experimentos mientras que las líneas punteadas horizontales muestran las temperaturas a las que posiblemente empezaron a cristalizar los silicatos. Tomado y modificado de Michel *et al.* (2013). .... 91

**Figura 35.** Comparación directa de los espectros infrarrojos de los micrometeoritos 1-4 (superior) y 5-5 (inferior) con los datos publicados en Dartois *et al.* (2018) con respecto a los UCAMMs. Los rectángulos azules con bordes anaranjados delimitan el área donde coinciden el espectro de los silicatos en los MMs experimentales con el de los UCAMMs. Los rectángulos grises con bordes rojos indican el área en el cual el espectro de la DL – Alanina y los MMs experimentales son similares y pueden tener en común algún enlace con los UCAMMs. Los enlaces en verde son similitudes que aplican entre los MMs experimentales y los UCAMMs mientras que los enlaces en rojo son similitudes que no aplican entre MMs.  
..... 95

**Figura 36.** Curvas calorimétricas DSC – 1, DSC – 2 y DSC – 3 donde se indica con una línea punteada de color morado la zona donde se presenta el abombamiento endotérmico leve desde el punto  $T_f$  hasta el final de las gráficas. El área que encierra la línea morada con la

curva calorimétrica puede hacer referencia al cambio de fase de la DL – Alanina de líquido a gaseoso o a su descomposición total debido a las altas temperaturas de exposición. .... 97

**Figura 36** – Continuación. .... 98

## RESUMEN

Todos los años suceden al menos diez lluvias de estrellas importantes cuya tasa de meteoros por hora puede variar según qué tan densa sea la corriente de desechos cósmicos que atraviesa nuestro planeta. Esas famosas lluvias de estrellas son básicamente meteoroides de tamaño milimétrico que, al entrar en contacto con la atmósfera terrestre, se calientan por fricción hasta tal punto que generan el calor suficiente para dejar en el cielo un rastro fulgurante y luminoso. Mucho de ese material interplanetario proviene de escombros asteroidales o cometarios, y debido a su tamaño y velocidades relativas de entrada de km/s se vaporizan antes de caer en la superficie terrestre; sin embargo, algunas partículas bajo las condiciones de ingreso atmosférico adecuado sobreviven a dicha fricción atmosférica.

Cuando los fragmentos caen a la superficie del planeta y tienen tamaños inferiores a 2 milímetros y mayores a 10 micrómetros, se habla de micrometeoritos (MMs). A pesar de su tamaño, los micrometeoritos se clasifican en grupos y nos brindan información específica de los componentes de sus cuerpos parentales, y su importancia radica en que varios de ellos albergan en su estructura materia orgánica compleja (MMs ultracarbonáceos). En este trabajo, se reprodujeron de manera experimental 60 micrometeoritos compuestos de olivino (forsterita), piroxeno (enstatita) y aminoácido (DL – Alanina) mediante irradiación con un láser de CO<sub>2</sub>, con el fin de simular partículas de tipo ultracarbonáceo y de analizar si su interacción con los silicatos permite la conservación del aminoácido. Las historias térmicas obtenidas permiten establecer las fases de cristalización y los parámetros bajo los cuales los MMs experimentales estarían ingresando al planeta si provinieran del espacio, de igual forma, los análisis de espectrometría infrarroja y calorimetría diferencial de barrido permiten evidenciar el comportamiento del aminoácido y la cantidad del mismo que se conserva con los silicatos.

Las texturas desarrolladas, morfología, tamaño de los silicatos utilizados, contenido de material orgánico e historias térmicas de los MMs experimentales permitió clasificar al 85% de las partículas obtenidas como MMs sin fundir y el 15% como MMs parcialmente fundidos; mientras que lo más parecido a los MMs ultracarbonáceos lo representa el material remanente silicatado que no fundió en donde se sublimó gran parte del aminoácido.

**Palabras clave:** Micrometeoritos, aminoácido, DL – Alanina, láser de CO<sub>2</sub>, sublimación.

## ABSTRACT

At least ten major meteor showers occur every year. The meteor rate per hour can vary depending on how dense is the stream of cosmic debris runs through our planet. These famous meteor showers are basically millimeter-sized meteoroids. When they come into contact with the Earth's atmosphere, they heat up to such an extent that they generate enough heat to leave a brilliant and luminous trail in the sky. Much of this interplanetary material comes from asteroidal and cometary debris. Due to its size and relative entry velocities of km/s, it vaporizes before falling to the Earth's surface; however, some particles under adequate atmospheric entry conditions survive such atmospheric friction.

When the fragments fall to the planet's surface and have sizes smaller than 2 millimeters and greater than 10 micrometers, we speak of micrometeorites (MMs). Despite their size, micrometeorites are classified in groups and provide us specific information of the components of their parental bodies, and their importance lies in the fact that several of them harbor complex organic matter (ultracarbonaceous MMs) in their structure. In this work, 60 micrometeorites composed of olivine (forsterite), pyroxene (enstatite) and amino acid (DL-Alanine) were experimentally reproduced by irradiation with a CO<sub>2</sub> laser, in order to simulate ultracarbonaceous type particles and to analyze whether its interaction with silicates allows the conservation of the amino acid. The thermal histories obtained allow establishing the crystallization phases and the parameters under which the experimental MMs would be entering the planet if they came from space. Similarly, the infrared spectrometry and differential scanning calorimetry analysis allow evidence of the amino acid's behavior and the quantity of the same that is conserved with the silicates.

The developed textures, morphology, size of the silicates used, the content of organic material and the experimental MMs' thermal histories allowed classifying 85% of the particles obtained as unmelted MMs and 15% as partially melted MMs. Simultaneously, the closest thing to ultracarbonaceous MMs is represented by the remaining silicate material that did not melt, where much of the amino acid was sublimated.

**Keywords:** Micrometeorites, amino acid, DL-Alanine, CO<sub>2</sub> laser, sublimation.

# CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

Las etapas tempranas de formación de nuestro sistema solar se caracterizaron, entre otras cosas, por la colisión abundante y repetitiva de cuerpos rocosos planetesimales, dando paso a lo que hoy conocemos como planetas, planetas enanos, satélites y cuerpos menores (cometas, asteroides y meteoroides) (Rubin y Grossman, 2010) y con el paso del tiempo este ha logrado una especie de estabilidad que hace que el choque entre cuerpos planetarios sea menos común. Sin embargo, hoy en día todavía sigue habiendo colisiones que desvían la trayectoria principal que traía determinado objeto enviándolo en diferentes direcciones, siendo cualquier planeta uno de sus destinos.

Anualmente caen a la Tierra miles de toneladas de material interplanetario (Love y Brownlee, 1993) proveniente de diferentes cuerpos parentales encontrados en nuestro Sistema Solar, como los mencionados anteriormente. Sin embargo, la mayoría de estos elementos no son percibidos por el ser humano, ya que su tamaño puede variar entre cientos de metros hasta micras y, por ende, no todos brillan o dejan un rastro fulgurante al momento de atravesar la atmósfera terrestre; e inclusive existe la posibilidad que queden en suspensión y atrapados en una de las capas que compone la atmósfera.

A las partículas de polvo extraterrestre que han sido capturados por la Tierra y cuyo tamaño es menor a 1 milímetro (1000 micrómetros) se les conoce como *micrometeoritos* (Genge *et al.*, 2008), los cuales se clasifican en diferentes grupos dependiendo de qué tan fundidos llegaron a la superficie terrestre, teniendo en cuenta su textura pre-atmosférica y composición mineralógica previa y posterior a su entrada a la Tierra.

Es de suponerse que este tipo de material por su dimensión es prácticamente invisible al momento de encontrarse con nuestro planeta y, sumado a lo anterior, aproximadamente el 90% de micrometeoritos y polvo interplanetario se vaporiza en el tope de la atmósfera o durante su ingreso (Prasad *et al.*, 2013), quedando un remanente de partículas bastante bajo, volviendo el trabajo de encontrarlos para su estudio aún más complicado.

La importancia del estudio de los micrometeoritos radica en que se piensa, son muestras representativas de asteroides y cometas; por ende, pueden brindar información

determinante de la edad en la que se formaron tanto los cuerpos parentales de dicho material como la evolución del sistema solar. Los micrometeoritos son la llave para evaluar bajo determinados parámetros las condiciones y relaciones que debieron haber existido para que los actuales grupos de clasificación de micrometeoritos conserven hasta el día de hoy su composición y características químico - mineralógicas, especialmente en los micrometeoritos ultracarbonáceos.

## **1.1 JUSTIFICACIÓN**

Los micrometeoritos son partículas de polvo extraterrestre que han sido capturados por la Tierra y que se piensa, son muestras representativas de material asteroidal y/o cometario. Sin embargo, dentro de los diversas grupos y clases de micrometeoritos caracterizados, existe una que carece de investigación detallada debido a la poca cantidad de muestras recolectadas. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es reconocer la importancia de la conservación de algunos componentes de la materia orgánica en micrometeoritos ultracarbonáceos y su posible aporte al desarrollo de la vida temprana en el planeta.

## **1.2 OBJETIVOS**

Conocer, entender y replicar experimentalmente de la forma más aproximada las condiciones de ingreso dentro de la cual los componentes orgánicos encontrados en los micrometeoritos ultracarbonáceos se conservan e interaccionan con los silicatos presentes de su mineralogía típica.

## **1.3 HIPÓTESIS**

A finales de la década de los 70 y durante la década de los 90, varios científicos realizaron al menos dos expediciones importantes para recuperar partículas cósmicas milimétricas atrapadas en los casquetes glaciares de la Antártida y en Groenlandia, siendo el continente antártico la zona de la cual más se recuperó la mayor cantidad de material.

Maurette *et al.* (1992) indican que cerca de 15 000 micrometeoritos fueron recuperados de 260 toneladas de hielo azul antártico fundido proveniente de Cap Prudhomme después de que una expedición similar en Groenlandia (1986) fuera exitosa tras recolectar cerca de 400 esférulas vítreas y sin fundir. Por otro lado, Taylor *et al.* (2000) analizaron y clasificaron cerca de 1600 micrometeoritos recolectados de un pozo de agua del polo sur

(SPWW) cerca de la base Amundsen – Scott en la Antártida, lo que permitió profundizar en el estudio de la micrometeorítica y posteriormente proceder con una clasificación más concreta de micrometeoritos.

Sin embargo, se han reportado una mínima cantidad de partículas clasificadas dentro de la clase de “micrometeoritos ultracarbonáceos” haciendo que el estudio de sus características texturales y químico – mineralógicas sea reducido. La hipótesis que se plantea en este trabajo es que algunos aminoácidos contenidos en la materia orgánica de los micrometeoroides se preservan al paso por la atmósfera debido a la protección de los silicatos que los rodean.

Por lo anterior, se utilizará un láser de CO<sub>2</sub> para reproducir de manera experimental micrometeoritos de tipo ultracarbonáceos para ver el comportamiento de la materia orgánica presente en este tipo de objetos y, confirmar si antes y después del proceso de fundido, los silicatos adjuntos juegan un papel importante en la conservación de dicho material, haciendo énfasis en la definición de los parámetros de entrada en la atmósfera de las partículas, las temperaturas que pueden llegar a alcanzar durante su ingreso y sobre todo, si quedan remanentes del material orgánico utilizado en la estructura del micrometeorito que se refleje en la textura del fundido.

## **CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO**

### **2. GENERALIDADES**

La composición de nuestro sistema solar, en cuanto a cuerpos celestes se refiere, es bastante alta y variada, ya que además de tener al Sol y sus planetas (con sus respectivos satélites), también se encuentran los denominados “cuerpos menores”. Dentro de este pequeño pero numeroso grupo se encuentran los asteroides, cometas y meteoroides, a los cuales se les asocia como los principales productores de micrometeoritos y partículas de polvo interplanetarias (IDP por sus siglas en inglés) capturadas por nuestro planeta (Genge *et al.*, 1997).

## **2.1 ASTEROIDES**

Los asteroides son cuerpos celestes menores de composición rocosa que se caracterizan por ser más pequeños que un planeta, pero más grandes que un meteoroides. La mayoría de sus órbitas se ubican principalmente en el cinturón de asteroides (entre Marte y Júpiter) a una distancia media del Sol de 2.2 – 3.3 unidades astronómicas (Kerrod, 1985); sin embargo, algunos asteroides se encuentran acumulados en dos de los puntos de Lagrange de Júpiter mientras que otros cruzan las órbitas de los demás planetas. Estos cuerpos se clasifican en tipos espectrales donde los parámetros observacionales juegan un papel fundamental, teniendo en cuenta la composición superficial, color y albedo (fracción de luz solar que refleja) del objeto.

### **2.1.1 Asteroides tipo espectral S**

Estos cuerpos compuestos principalmente por minerales silicatados (olivinos y piroxenos) aunque también contienen porcentajes pequeños de minerales metálicos. Suelen asociarse a meteoritos metálico – rocosos y condritas (Bowell *et al.*, 1978; McCord y Gaffey, 1974).

### **2.1.2 Asteroides tipo espectral C**

Son asteroides que se caracterizan por tener tonalidades muy oscuras, aparentemente debido a la alta presencia de minerales opacos con un alto contenido de carbono y su mineralogía es bastante similar a los meteoritos condriticos carbonáceos (Bowell *et al.*, 1978; Johnson y Fanale, 1973) los cuales representan una fuente importante de material rico en materia orgánica que pudiera llegar a la Tierra, tanto en el pasado, así como en el presente.

### **2.1.3 Asteroides tipo espectral M**

Son objetos cuya composición se basa en minerales metálicos ricos en hierro y níquel o minerales silicatados ricos en hierro, por ende, su albedo es generalmente alto y son bastante brillantes. Mineralógicamente se les puede asociar a meteoritos metálicos o meteoritos condriticos de enstatita (Bowell *et al.*, 1978; Zellner y Gradie, 1976).

### **2.1.4 Asteroides tipo espectral E**

Pocos cuerpos pertenecen a este tipo, pero se distinguen de los demás porque contienen minerales de baja opacidad y carecen de hierro ferroso, por ende, su albedo es bastante alto (mucho más que el de los asteroides tipo M). Suelen asociarse a meteoritos acondríticos de enstatita o aubritas (Zellner y Gradie, 1976).

### **2.1.5 Asteroides tipo espectral R**

Son asteroides con las tonalidades más rojizas en el sistema fotométrico UBV (Ultravioleta – Azul – Visible por sus siglas en inglés), con albedos moderadamente altos y espectros de alto contraste espectral visible e infrarrojo (Bowell *et al.*, 1978).

### **2.1.6 Asteroides tipo espectral U**

Aplica para los objetos que no han podido ser clasificados en ninguno de los tipos espectrales anteriores. Bowell *et al.* (1978) indican que el tipo espectral U no implica que se carece de información o que los datos que se obtienen de determinado asteroide son poco útiles, sino que se refieren a los objetos que se sabe que están intrínsecamente fuera de los dominios de las otras cinco clases.

## **2.2 COMETAS**

Los cometas son cuerpos celestes menores que se distinguen por tener tamaños entre 1 a 50 kilómetros de diámetro. Su lugar de formación se encuentra entre el cinturón de Kuiper (30 – 55 UA) y la nube de Oort (1 año luz), y a pesar de encontrarse a distancias considerablemente grandes, orbitan alrededor del Sol siguiendo trayectorias elípticas con ángulos oblicuos al plano del sistema solar. Composicionalmente se refieren a ellos como cuerpos híbridos, ya que se cree que su núcleo (lugar donde más se concentra su masa) es rocoso y está cubierto por capas de hielo o una mezcla conglomerática de hielo y rocas (Kerrod, 1985; Erickson, 2003).

A medida que el cometa se acerca al Sol, el hielo presente se empieza a sublimar dando lugar a la cabellera o coma que están compuestas de gas y polvo y a medida que el cometa va alcanzando su menor distancia al Sol, se genera la cola que los caracteriza que son partículas de gas y polvo ionizados por el viento solar y que se ubican en sentido contrario al Sol (Erickson, 2003). Muchas de las partículas de polvo liberadas durante el paso del cometa

son interceptadas por la Tierra, si es que el camino de las órbitas se llega a cruzar y es lo que genera principalmente las lluvias de meteoros en la Tierra.

Según Levison (1996) y Erickson (2003) los astrónomos clasifican a los cometas en dos grupos con base en el tiempo que toman en dar una vuelta al Sol, y que por ende está relacionado con su distancia al mismo.

### **2.2.1 Cometas de período largo**

Se originan en la nube de Oort con órbitas de hasta 200 años o más. Entran a la región interplanetaria desde direcciones aleatorias, lo cual es de esperarse debido al repositorio esférico que contiene estos cuerpos. Este grupo se divide en dos subgrupos, y tiene su fundamento en la dinámica de estos objetos, basándose en la distribución de su semi eje mayor,  $a$ .

**2.2.1.1 Cometas dinámicamente “nuevos”:** Son cometas que se distinguen por tener órbitas hiperbólicas (Langland-Shula y Smith, 2011) y la distribución con base en su semi eje mayor “ $a$ ” es mayor o igual a 10.000 unidades astronómicas ( $a \geq 10.000$  UA).

**2.2.1.2 Cometas que regresan:** Estos objetos tienen órbitas con una alta excentricidad (Langland-Shula y Smith, 2011) pero su distribución con base en su semi eje mayor “ $a$ ” es menor a 10.000 unidades astronómicas ( $a < 10.000$  UA).

### **2.2.2 Cometas de período corto**

Estos objetos se destacan por tener órbitas menores a los 200 años. También se divide en dos subgrupos, principalmente por la inclinación de la órbita de los cometas con respecto a la eclíptica.

**2.2.2.1 Cometas de la familia Júpiter:** Se llaman así porque se ven dinámicamente afectados por el planeta Júpiter durante una parte de su trayectoria. Sus órbitas cuentan con baja excentricidad (Langland-Shula y Smith, 2011) y el plano de esta está típicamente inclinado no más de  $40^\circ$  con respecto a la eclíptica; por ende, tiene períodos de traslación menores a 20 años.

**2.2.2.2 Cometas tipo Halley:** Poseen órbitas con alta excentricidad (Langland-Shula y Smith, 2011) y su plano de inclinación con respecto a la eclíptica es de  $41^\circ$ , por lo tanto,

tienen períodos de traslación entre 20 – 200 años. Entran a la región planetaria al azar y desde todas direcciones.

### 2.3 METEOROIDES

Hace aproximadamente 4 568 millones de años la colisión entre cuerpos rocosos planetesimales durante la formación primigenia del sistema solar fue típico de su momento, sin embargo, actualmente se tiene una especie de estabilidad que hace que los choques entre cuerpos celestes no sean tan comunes. Las colisiones suelen presentarse entre asteroides ubicados en el cinturón de asteroides o entre cometas cuyas órbitas se interceptan con la de otros asteroides, generando fragmentos de roca de tamaños menores a decenas de metros.

Según la Unión Astronómica Internacional ([UAI](#), 2017), un meteoroides es un objeto natural sólido de un tamaño aproximado entre 30 micrómetros y 1 metro que se mueve o proviene del espacio interplanetario. Sin embargo, aclaran que los límites de tamaño aproximado no son un límite físico, sino fueron definidos por acuerdo. Lo anterior se debe a que hay numerosos cuerpos mayores a 1 metro que suelen estar dominados por escombros asteroidales en vez de escombros cometarios; mientras que los abundantes cuerpos menores a 30 micrómetros tienden a irradiar bien el calor y no se vaporizan durante una entrada a la atmósfera.

Por otro lado, autores como Rubin y Grossman (2010) indican que un meteoroides es un objeto natural sólido con tamaño entre 10 micrómetros y 1 metro que se mueve en el espacio interplanetario; lo cual genera ambigüedades en cuanto a los tamaños empleados en artículos científicos y los establecidos por la UAI (Tabla 1). Sin embargo, el factor común en la definición de un meteoroides es que tal cuerpo celeste se encuentra viajando por el espacio, pero una vez este se encuentra en dirección de choque hacia un planeta con atmósfera su terminología cambia.

Apenas el meteoroides entra en contacto con la atmósfera puede que ocurran dos cosas: la primera es que el objeto a su paso por la atmósfera no tolere los fenómenos físicos asociados (fricción, ablación, altas temperaturas e ionización) favoreciendo la formación de un rastro fulgurante en el cielo. A lo anterior se le conoce como *meteoro*. La segunda opción es que, si el meteoroides sobrevive a la fricción de la atmósfera, no se vaporiza y choca con

la superficie del planeta se le llama *meteorito* ([Sociedad Americana de Meteoritos – AMS, 2020](#)). Además, existen términos que suelen confundirse por los anteriormente definidos como bólido y bola de fuego. Un bólido hace referencia a una luz emitida por un meteoroide o asteroide que a su paso por la atmósfera explota, mientras que una bola de fuego es un meteoro mucho más brillante que la magnitud del planeta Venus (magnitud -4,5).

Los meteoritos son cuerpos de roca silicatados, metálicos o mixtos, provenientes del espacio exterior que han sobrevivido su paso por la atmósfera y han caído en la superficie de la Tierra (Faure y Mensing, 2007; Norton y Chitwood, 2008). Con base en las definiciones anteriores y aunque no existe una clasificación establecida, se deduce que los tipos genéricos de meteoroides son iguales a los de los meteoritos.

## **2.4 MICROMETEORITOS**

Así como existen tamaños establecidos para meteoroides y meteoritos, también existen partículas que no son mayores a los 2 milímetros que viajan por el espacio hasta que son capturadas por un planeta o la atmósfera de este. Según Rubin y Grossman (2010) tanto un micrometeoroides como un micrometeorito son partículas cuyo tamaño varía entre 10 micrómetros y 2 milímetros.

Sin embargo, la diferencia entre estos dos términos radica en que la partícula es un micrometeoroides siempre y cuando no se vea atrapado por la atmósfera, pero una vez esto sucede o inclusive sobrevive a la fricción y cae a la superficie del planeta, ahí se habla de un micrometeorito. Según Genge *et al.* (2008) los micrometeoritos (MMs) son partículas de polvo extraterrestre que han sido capturados por la Tierra cuyo tamaño no supera 1 milímetro de diámetro (1000 micrómetros). Para este trabajo, se tomará la definición de IDP y micrometeorito según la establecida por Rubin y Grossman (2010) (Tabla 1). Estas partículas pueden dividirse en dos grandes grupos con base en sus tamaños: los micrometeoritos son aquellos cuyo tamaño se encuentra entre 10 y 2000 micrómetros y suelen ser recolectados en la superficie terrestre, y las partículas de polvo interplanetario (IDP) son aquellos que tienen tamaños menores a 10 micrómetros y la mayoría son recolectados en la estratósfera terrestre.

**Tabla 1.** Comparación de tamaños de diferentes cuerpos celestes según Genge *et al.* (2008), Rubin y Grossman (2010) y la Unión Astronómica Internacional (2017). Nótese las ambigüedades entre los rangos de tamaño establecidos para un mismo término.

Términos	Genge <i>et al.</i> (2008)	Rubin y Grossman (2010)	UAI (2017)
Meteoroides	N/D	10 $\mu\text{m}$ – 1 m	30 $\mu\text{m}$ – 1 m
Meteoritos	N/D	> 10 $\mu\text{m}$	Variable
Micrometeoritos	~30 $\mu\text{m}$ – 1000 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$ – 2 mm	< 1 mm
IDPs	< 30 $\mu\text{m}$	< 10 $\mu\text{m}$	< 30 $\mu\text{m}$

Aunque la diferencia entre un meteorito y un micrometeorito pareciera que radica solo en el tamaño, la verdad es que cada uno de estos cuerpos aporta información distinta tanto de su proveniencia como de su composición. Los meteoritos poseen características estructurales, mineralógicas, petrográficas y químicas que les permiten ser clasificados en tipos, clases y subclases, brindando información suficiente para saber de qué están hechos y, por ende, vienen siendo excelentes muestras representativas de la naturaleza y origen de sus cuerpos parentales en escalas superiores a las centimétricas.

Los micrometeoritos, por el contrario, tienen la desventaja de que su tamaño milimétrico restringe de cierto modo la información que pueda obtenerse de ellos para saber con exactitud el cuerpo parental al que pertenecen, ya que mineralógica y químicamente hablando, dos muestras de micrometeoritos pueden provenir de un mismo cuerpo pero de distintas zonas del mismo; sin embargo, estas partículas nos brindan información específica de los componentes de sus cuerpos parentales al estar compuestos exclusivamente de la matriz, inclusiones refractarias o cóndrulos de este (Genge *et al.*, 1997).

Es por eso que Genge *et al.* (2008) establecieron una clasificación general de micrometeoritos con base en sus características morfológicas, texturales y composicionales (Figura 1). Desde entonces algunos autores han tomado en cuenta esta clasificación para incluir en algún grupo las partículas recolectadas en las expediciones realizadas a finales del siglo XX y las que pudieran encontrarse inclusive en el tejado de nuestras casas. Otros, como Folco y Cordier (2015), simplifican la clasificación propuesta por Genge *et al.* (2008) ya que, según ellos, varias de las partículas tienen características petrográficas y morfológicas descriptivas similares donde pueden omitirse algunos tipos y/o subtipos.

# CLASIFICACIÓN DE MICROMETEORITOS

Con base en la clasificación de Genge *et al.* (2008)

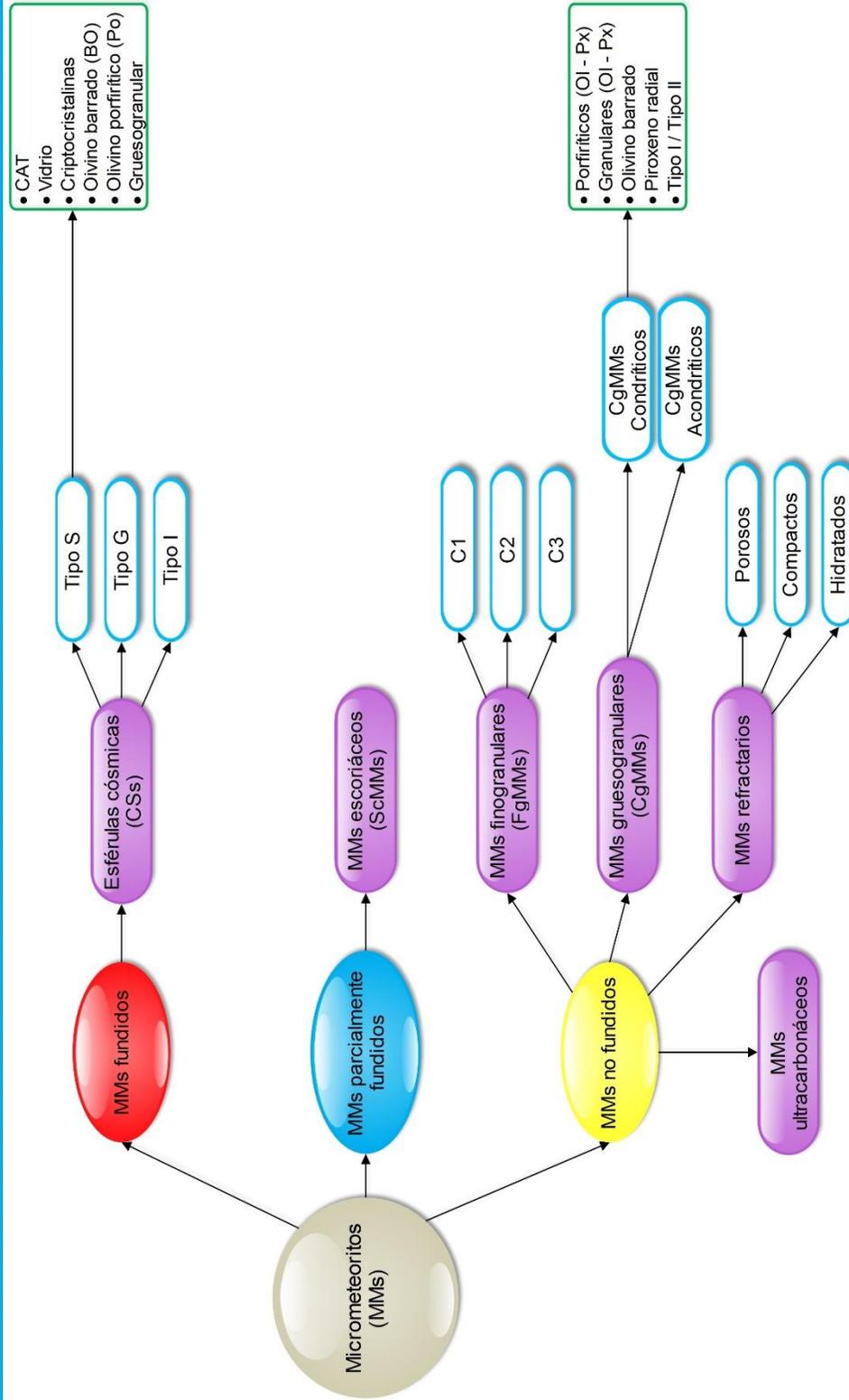


Figura 1. Clasificación general de micrometeoritos.

Los micrometeoritos pueden dividirse en dos grandes grupos con base en su textura preatmosférica: MMs finogranulares (FgMMs) que están compuestos principalmente de una masa porosa de grano fino y MMs gruesogranulares (CgMMs) que están formados por cristales silicatados sin contenido de agua en su estructura y vidrio mesostásico. Sin embargo, dicha clasificación es bastante genérica porque la textura antes de entrar a la atmósfera, mineralogía e inclusive la composición de partículas cambia cuando el micrometeorito atraviesa la atmósfera terrestre y se sobrecalienta.

Debido a lo anterior, la clasificación se realiza en tres grandes grupos dependiendo de qué tan fundidos llegaron a la superficie terrestre, teniendo en cuenta su textura preatmosférica y composición mineralógica previa y posterior a su entrada a la Tierra: MMs fundidos, MMs parcialmente fundidos y MMs sin fundir.

#### **2.4.1 MMs fundidos**

Los micrometeoritos fundidos se caracterizan por ser partículas esféricas a subesféricas que han sido sometidas a un grado bastante alto de fusión favoreciendo su formación como gotas de fundido durante el ingreso a la atmósfera terrestre, por ende, existe solo una clase de MMs fundidos y se les conoce como esférulas cósmicas (CSs). Se diferencian de las partículas ígneas no fundidas (MMs sin fundir) por tener solo una capa de fusión alrededor (la cual es superficial) siendo esa la correspondiente al ingreso y contacto con la atmósfera; además, textural y mineralógicamente son diferenciables del resto de micrometeoritos ya que pueden desarrollar vesículas durante su calentamiento y están compuestas de vidrio mesostásico con posibles fenocristales. Debido a su diversidad composicional y mineralógica, las esférulas cósmicas se dividen en tres tipos.

**2.4.1.1 CSs tipo I:** Son esférulas cuyo contenido en óxidos de hierro (wüstita y magnetita) es bastante alto, aunque fases ricas en níquel pueden aparecer como intercrecimientos finos en los bordes de contacto de la wüstita y la magnetita y en muy pocas proporciones pueden encontrarse glóbulos pertenecientes a los elementos del grupo del platino (Genge *et al.*, 2008; Folco y Cordier, 2015).

**2.4.1.2 CSs tipo G:** Pueden catalogarse como las esférulas intermedias entre el tipo I y el tipo S, ya que son partículas con un alto contenido magnetita dendrítica en una matriz vítrea

silicatada con posible desarrollo de vesículas en su estructura. Esto genera un rango de texturas y mineralogía más específicas y únicas que el de las esférulas típicas.

**2.4.1.3 CSs tipo S:** Son el tipo de esférulas cósmicas más común que existe ya que están compuestas principalmente de silicatos ferromagnesianos y vidrio con una leve presencia de óxidos de hierro. Debido a la variedad de texturas de enfriamiento encontradas en este tipo de esférulas, se subdividen en 6 subtipos (Tabla 2).

**Tabla 2.** Descripción y características generales de los subtipos dentro de los cuales se dividen las esférulas cósmicas (CSs) tipo S según Genge *et al.* (2008).

CSs tipo S	
CAT	Poseen olivinos con textura barrada (sin Fe en su estructura) junto con altas concentraciones de Ca, Al, Ti. Poseen una tasa Mg/Si bastante alta.
Vítreas	Se componen casi en su totalidad de vidrio (cuyo color puede variar) y pueden desarrollar vesículas por las temperaturas a las que se ven expuestas.
Criptomicrocristalinas	Están compuestas de cristales micrométricos de olivino y magnetita junto con vidrio. Dependiendo del tamaño de los cristales se puede generar una textura esquelética (finos) o nodular (gruesos).
Olivino barrado (BO)	Tienen forma ovoide y están dominadas por el crecimiento paralelo de cristales esqueléticos de olivino dentro de vidrio mesostásico con posible contenido de óxidos ferroniquelíferos.
Olivino porfirítico (Po)	Poseen texturas microporfiríticas compuestas por microfenocristales de olivino con morfologías esqueléticas y óxidos de Fe embebidos en una matriz vítrea mesostática.
Gruesogranulares	Son esférulas con más del 50% de minerales relicícos ( $Ol_{For}$ , En), por lo que pueden considerarse los CgMMs como posibles partículas precursoras.



Según Taylor *et al.* (2000), las partículas cósmicas que recuperaron durante la expedición en la Antártida en el fondo del SPWW (cerca de 1600 ejemplares) corresponden en su totalidad a esférulas cósmicas, donde el 2% son CSs tipo I, el 1% corresponde a CSs tipo G y el 97% hacen parte de las CSs tipo S.

#### **2.4.2 MMs parcialmente fundidos**

Los micrometeoritos parcialmente fundidos son partículas que se distinguen por tener bordes suaves y levemente redondeados, su forma es irregular y la presencia de vesículas es relativamente alta. Lo anterior permite que solo exista una clase de MMs parcialmente fundidos y se les cataloga como micrometeoritos escoriáceos (ScMMs). Sin embargo, las características anteriormente mencionadas no son un rasgo distintivo de este tipo de micrometeoritos ya que representan una serie gradacional entre las CSs que se forman a las más altas temperaturas (CAT) y los micrometeoritos escoriáceos (Genge *et al.*, 2008).

Aunque no se sabe con certeza el motivo de su formación, una manera de diferenciar las CSs de los ScMMs es el desarrollo de una capa externa o “cascarones” de magnetita en las partículas escoriáceas (Toppani *et al.*, 2001).

Mineralógicamente, los ScMMs están dominados por cristales relictos de olivino (principalmente forsterita) y piroxeno (principalmente enstatita), aunque también es posible encontrar óxidos de hierro y filosilicatos termalmente alterados. Dichos relictos se encuentran embebidos en una matriz vesicular dominada por una mesostasis de olivino fayalítico microporfirítico (cristales con tamaños menores a 1  $\mu\text{m}$ ) contenidos en una fase vítrea silicatada intersticial. Algunas partículas estudiadas muestran que también es posible encontrar áreas con fragmentos de una matriz finogranular (similares a los encontrados en los micrometeoritos sin fundir) inmersos en la matriz mesostática vítrea, haciendo de esta otro componente relicto dentro de esta clase; pero lo más recalable es que los ScMMs que contienen en su estructura fragmentos de matriz relicta pueden considerarse como un grupo gradacional entre los ScMMs y los MMs sin fundir (Genge *et al.*, 2008; Folco y Cordier, 2015). Lo anterior puede evidenciarse sobre todo en los ScMMs con tamaño de grano grueso, ya que durante el ingreso a la atmósfera terrestre estas partículas se calientan progresivamente y funden en la parte externa, generando cambios texturales, composicionales y mineralógicos en dicha área lo que favorece el desarrollo de anillos ígneos (Genge, 2006).

Como es de esperarse, los cristales relictos pueden variar en su tamaño de grano, por lo que es posible (pero no obligatorio) dividir los ScMMs en dos tipos: micrometeoritos escoriáceos finogranulares (Fg) y micrometeoritos escoriáceos gruesogranulares (Cg). Dicho esto, Genge *et al.* (2008) proponen una notación que relaciona el porcentaje de matriz relíctica finogranular o minerales no fundidos en los ScMMs. Se indica que, si los ScMMs finogranulares tienen un volumen o contenido superior al 50% de matriz relíctica finogranular, entonces se denote la partícula como Fg/ScMMs; pero si ocurre que el volumen de matriz relíctica finogranular es menor al 50% entonces la partícula puede denotarse como Sc/FgMMs. De igual forma, si los ScMMs gruesogranulares tienen un contenido superior al 50% de minerales de tamaño de grano grueso sin fundir, se denote la partícula como Cg/ScMMs; pero si el micrometeorito tiene menos del 50% de minerales gruesogranulares sin fundir entonces la partícula puede denotarse como Sc/CgMMs.

### **2.4.3 MMs sin fundir**

Los micrometeoritos sin fundir son partículas que brindan la mayor cantidad de información acerca de la naturaleza de sus cuerpos parentales. Se caracterizan por no ser tan esféricas y por tener una redondez muy leve, favoreciendo la formación de bordes subangulosos. Cabe aclarar que, aunque este grupo de clasificación se exprese como “sin fundir”, solo indica que al momento de entrar a la atmósfera terrestre no se sometieron a temperaturas tan altas como los grupos de micrometeoritos anteriormente definidos y, por ende, la tasa de fusión sobre el objeto no es tan alta. Debido a la variedad mineralógica y textural que compone el grupo, este se divide en MMs finogranulares, MMs gruesogranulares, MMs refractarios y MMs ultracarbonáceos (Genge *et al.*, 2008).

**2.4.3.1 MMs finogranulares:** Los MMs finogranulares (FgMMs) son objetos que se caracterizan por tener una masa porosa finogranular con cristales de tamaño micrométrico y son muy similares a las matrices finogranulares de los meteoritos condriticos carbonáceos tipo CI, CM y CR (especialmente por su mineralogía). Esta clase de partículas tiene cierta complejidad mineralógica, por lo que Genge *et al.* (1997) sugieren dividir los FgMMs en dos tipos con base en la alteración termal a la que fueron sometidos los minerales presentes en la partícula durante su ingreso a la atmósfera.

**a) FgMMs alterados:** Este tipo de partículas suelen estar compuestas de vidrio intersticial homogéneo con cristales micrométricos de olivinos y piroxenos anhedrales, producto de la deshidratación volatilizada de los filosilicatos (grupo de la smectita y serpentina) y posterior alteración de los silicatos amorfos ricos en hierro. También pueden contener vesículas subesféricas, fracturas de deshidratación y anillos de magnetita.

**b) FgMMs no alterados:** Son el tipo de partículas que conservan de cierta manera un hábito acicular generada por silicatos amorfos ricos en hierro que se pudieron haber generado por la volatilización y deshidratación parcial de los filosilicatos. Carece de anillos de magnetita, lo cual podría indicar que este tipo de MMs son uno de los que menos se ven afectados por la fusión durante su ingreso a la atmósfera.

La complejidad de estas partículas también es evidente en el ámbito textural, por lo que Genge y Grady (2002) sugieren dividir los FgMMs en tres tipos con base en su homogeneidad textural, mineralógica y química.

**c) FgMMs tipo C1:** Son partículas compactas químicamente homogéneas, por ende, tienen una porosidad muy baja; raramente tienen cristales de olivino y piroxeno aislados mayores a 4  $\mu\text{m}$ , lo que las hace afines a una matriz de condritas carbonáceas tipo petrológico 1 (ver Anexo 1). Pueden encontrarse fases de magnetita framboidal.

**d) FgMMs tipo C2:** Este tipo de partículas también son compactas pero su nivel de porosidad es levemente más alto que el de los FgMMs tipo C1. Son químicamente heterogéneas (particularmente en las proporciones Fe/Mg y Fe/Si). Pueden encontrarse cristales de olivino y piroxeno de más de 4  $\mu\text{m}$  y son afines a las condritas carbonáceas tipo petrológico 2 (ver Anexo 1).

**e) FgMMs tipo C3:** Estos MMs son porosos, con hasta 50% de volumen en poros, con alta cantidad de cristales euhedrales y/o subhedrales de olivino magnésico y piroxeno con tamaños superiores a los 4  $\mu\text{m}$  unidos a fases menores intersticiales de silicatos aciculares o “en forma de hoja” (posiblemente proveniente de filosilicatos deshidratados). Pueden ser afines a las condritas carbonáceas tipo petrológico 3 (ver Anexo 1) y es común la presencia de magnetita framboidal.

Genge *et al.* (2008) mencionan que aparte de los cristales aislados de olivino y piroxeno, en los FgMMs pueden desarrollarse fases mineralógicas menores que incluyen magnetita framboidal, sulfuros, hidróxidos, metales y minerales refractarios típicos de las inclusiones de calcio y aluminio (CAI por sus siglas en inglés). Dichas fases pueden indicar algunas características del cuerpo del cual proviene el micrometeorito, pero no es algo que tenga una fuerte influencia en la determinación de este.

**2.4.3.2 MMs grueso granulares:** Los MMs grueso granulares (CgMMs) son partículas que se caracterizan por tener texturas ígneas dominadas por olivinos, piroxenos y vidrio mesostásico (con contenido de sulfuros y/u óxidos de hierro, feldespatos y minerales metálicos ferroniquelíferos). Muchas de las partículas que pertenecen a esta clase en las colecciones de MMs muestran características texturales y mineralógicas que las hacen afines y asemejan a cuerpos condriticos; sin embargo, existen algunas que están compuestas de un solo tipo de cristal (generalmente olivino o piroxeno) o tienen afinidad mineralógica

con cuerpos acondriticos. Por lo anterior, Genge *et al.* (2008) sugieren que los CgMMs deberían dividirse en tres tipos.

**a) CgMMs condriticos:** Son el tipo de micrometeoritos grueso granulares que abunda más en las colecciones micrometeoríticas. Se caracterizan por poseer cristales con texturas condriticas embebidos en matrices vítreas mesostáticas. Debido a la variedad textural encontrada en este tipo de objetos, se dividen en 5 subtipos (Tabla 3) siguiendo un esquema petrológico similar al de las condritas (Genge *et al.*, 2005).

La textura de olivino barrado (OB) se caracteriza por desarrollar uno o varios conjuntos de cristales alargados de olivino acomodados entre sí de forma paralela que pueden llegar a cruzarse en uno o varios puntos a lo largo de la partícula (Gooding y Keil, 1981). Mientras tanto, la textura de piroxeno radial (PR) consiste en cristales de piroxeno con bajo contenido en calcio (ferrosilita y enstatita) que desarrollan un hábito acicular, los cuales se irradian desde un punto focal o nódulo asemejando arreglos en forma de abanico. La zona de nucleación desde la cual se extiende esta textura suele estar ubicada en proximidades a la superficie del cristal (Gooding y Keil, 1981) y es posible que sobre un solo cristal se desarrollen de varios puntos de nucleación de abanicos, generando intersecciones texturales en varias zonas de la partícula.

La principal razón por la que ocurren estas texturas es por una rápida tasa de enfriamiento a la cual se vieron sometidos pequeños cristales de nucleación que sobrevivieron a un proceso de fusión previo a altas temperaturas (Lofgren y Russell, 1986).

Así como sucede con los ScMMs, Genge *et al.* (2008) proponen una notación o manera de nombrar a los CgMMs dependiendo de su composición mineralógica, textura y población química. Por ejemplo, se expresa que, si la partícula está compuesta de olivino (y/o piroxeno), corresponde texturalmente al subtipo porfirítico (o granular) y la población química que rige la muestra es tipo I (o tipo II), entonces deberá nombrarse la partícula como un CgMMs porfirítico (granular) de olivino (y/o piroxeno) de tipo I (o tipo II).

Como se muestra en la Tabla 3, dependiendo de la composición química de los cristales de olivino – piroxeno y la abundancia de metales y sulfuros, es posible definir una “población química” en los CgMMs condriticos. Esta población química (tipo I y tipo II) se refiere al porcentaje de concentración molar de magnesio o hierro en los cristales que componen la muestra. El límite entre los subtipos I y II es 10% mol fayalita y/o ferrosilita (Grossman *et al.*, 1988), donde los CgMMs tipo I contienen menos del 10% mol (< 10% mol Fa y/o Fs) mientras que los CgMMs tipo II contienen más del 10% mol (> 10% mol Fa y/o Fs). Cabe aclarar que no necesariamente los micrometeoritos gruesogranulares condriticos provienen o se originaron de fragmentos de cóndrulos con dichas características químicas.

Por otro lado, es posible que un solo CgMMs condritico presente texturalmente una variedad finogranular adjunta, evidenciando que al menos cierto número de FgMMs y CgMMs pueden provenir de un mismo cuerpo parental (Genge, 2006); por lo anterior, la partícula puede denotarse como Fg/CgMMs.

Los CgMMs condriticos pueden llegar a ser subesféricos y subredondeados, lo cual (morfológicamente) puede facilitar la confusión con las CSs; sin embargo, cabe recordar que mientras las CSs solo generan una capa de fusión externa durante su ingreso a la atmósfera, los CgMMs condriticos pueden desarrollar anillos ígneos por fusión parcial, cascarones de magnetita y existe el desarrollo de fenocristales de piroxeno. Lo anterior no suele desarrollarse en las CSs debido a las rápidas tasas de enfriamiento que experimentan las esférulas.

**b) CgMMs acondríticos:** Al igual que sucede con los meteoritos acondríticos, estas partículas se caracterizan principalmente por ser materiales ígneos que sufrieron procesos de diferenciación y por carecer de cóndrulos o texturas que asemejan condritas. La escasez de este tipo de cuerpos es tal, que hasta el momento solo se ha reportado una única muestra de afinidad acondrítica cuya mineralogía consta de pigeonita con lamelas de exsolución de augita, anortita, cuarzo y óxidos de hierro; siendo posiblemente proveniente de un asteroide basáltico (Gounelle *et al.*, 2009).

**c) CgMMs de cristal sencillo:** Prácticamente son MMs que constan de un solo tipo de cristal (olivino o piroxeno) que puede o no carecer de anillos de magnetita.

**Tabla 3.** División y características básicas de los subtipos dentro de los cuales se dividen los micrometeoritos gruesogranulares (CgMMs) condríticos según Genge *et al.* (2008).

Subtipos de CgMMs condríticos	
Porfíricos (Ol - Px)	Son partículas ígneas dominadas por olivino - piroxeno y/o fenocristales de olivino - piroxeno embebidos en una matriz vítrea.
Granulares (Ol - Px)	Son partículas ígneas dominadas por piroxeno y/u olivino sin una cantidad relevante de vidrio matricial.
Olivino barrado	Son MMs ígneos dominados por cristales de olivino con barras de crecimiento paralelo embebidos en una matriz vítrea.
Piroxeno radial	Son MMs ígneos dominados por cristales de piroxeno cuyo crecimiento es radial – dendrítico y están embebidos en una matriz vítrea.
Tipo I / Tipo II (población química)	Los CgMMs tipo I constan de cristales de olivino y/o piroxenos ricos en Mg y tienen un alto contenido de sulfuros ferroniquelíferos. Los CgMMs tipo II constan de cristales de olivino y/o piroxenos ricos en Fe, contienen una menor cantidad de sulfuros, pero existe una mayor presencia de óxidos de hierro.

**2.4.3.3 MMs refractarios:** Los MMs refractarios son una clase de partículas que se caracterizan por estar compuestas de minerales refractarios (minerales que tienen la capacidad de resistir altas temperaturas sin descomponerse pero normalmente no se

encuentran en cantidades abundantes), los cuales suelen encontrarse en las inclusiones de calcio y aluminio (CAIs) que están presentes en los meteoritos condriticos; lo que permite deducir que no se componen de cóndrulos o fragmentos de ellos y establece de una mejor manera su proveniencia o cuerpo parental.

Todavía no existe una clasificación estrictamente definida para esta clase de cuerpos, debido a que dentro del material recolectado en las colecciones de micrometeoritos existen muy pocas muestras de dicha naturaleza. Además, de las partículas que se han estudiado la mayoría pueden clasificarse como FgMMs con fragmentos de minerales refractarios, razón por la cual Folco y Cordier (2015) no incluyen una clase aparte para los MMs refractarios, sino que los agregan como un apartado extra en la clase de los FgMMs. Genge *et al.* (2008) sugieren que dichas partículas se clasifiquen como FgMMs refractarios, y que al final se agregue el mineral refractario encontrado de mayor proporción (por ejemplo, FgMMs refractario con espinela).

A pesar de lo anterior, existen MMs con un alto porcentaje de minerales refractarios cuya textura puede variar o están asociados con minerales productos de alteración, razón por la cual es posible dividirlos en tres tipos.

**a) MMs refractarios porosos:** Este tipo de partículas se distinguen por estar compuestas de fragmentos porosos o con espacios entre sus componentes y están dominadas por minerales refractarios.

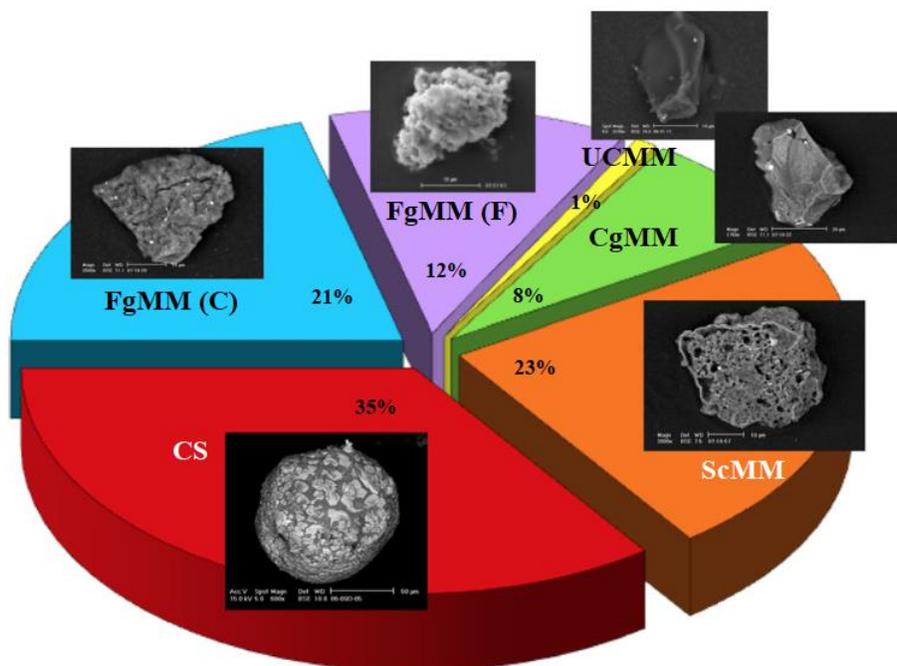
**b) MMs refractarios compactos:** Son la contraparte de los MMs refractarios porosos, ya que son partículas que se caracterizan por no mostrar espacios entre sus componentes o ser agregados de fragmentos compactos y están dominadas por minerales refractarios.

**c) MMs refractarios hidratados:** Podrían catalogarse como los micrometeoritos más sencillos de clasificar dentro de esta clase, ya que son partículas dominadas por minerales refractarios rodeados por filosilicatos ricos en hierro o sus respectivas alteraciones. Se les llama hidratados porque la textura que muestran es muy similar a la alteración acuosa que muestran ciertas condritas carbonáceas y como se sabe, los filosilicatos son minerales que en su estructura pueden albergar moléculas de agua.

**2.4.3.4 MMs ultracarbonáceos:** La última clase perteneciente a los MMs sin fundir son los MMs ultracarbonáceos (UCMMs), los cuales fueron recolectados del hielo antártico cerca a la estación de investigación franco – italiana “CONCORDIA” (ubicada en el domo C en la meseta antártica) durante dos expediciones realizadas en los años 2000 y 2002 respectivamente (Duprat *et al.*, 2007). También han sido identificadas esta clase de partículas en la colección de micrometeoritos antárticos (AMMs) recolectados en 1996 por el equipo Japonés de Expedición e Investigación Antártica (JARE por sus siglas en inglés) cerca a la estación de investigación japonesa “Domo Fuji” localizada en el domo F en la meseta antártica (Noguchi y Nakamura, 2000).

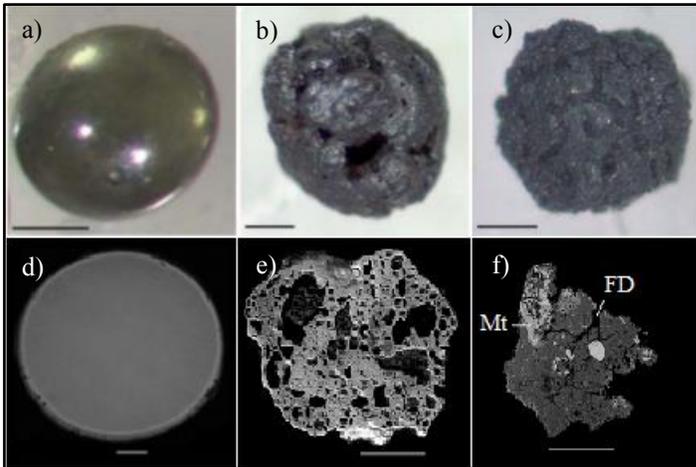
En la actualidad se tienen estudiadas muy pocas partículas que han sido clasificadas como MMs ultracarbonáceos, e inclusive solo se tienen reportados e identificados tres objetos con tamaños superiores a 200  $\mu\text{m}$  dentro de esta clase de micrometeoritos (Nakamura *et al.*, 2005) los cuales pertenecen a la colección de AMMs “Domo Fuji”. De igual forma, Koschny *et al.* (2019) indican que aproximadamente el 1% de los micrometeoritos estudiados e identificados en la última década junto con los pertenecientes a colección “CONCORDIA” son de carácter ultracarbonáceo (Figura 2), razón por la cual ésta es la clase de micrometeoritos que menos ejemplares tiene para estudiar más a detalle.

Mineralógicamente se caracterizan por ser partículas esféricas a subesféricas compuestas entre un 50 – 90% de materia orgánica y redes de carbono amorfo repartidas sobre toda la superficie (valores superiores a los encontrados en las condritas carbonáceas tipo CI y CM); junto con agregados muy finogranulares de silicatos máficos como olivino, piroxeno bajo en calcio, pirrotina y kamacita. Se han reportado fases vítreas incluidas en la materia carbonosa que se asemejan a los sulfuros y metales embebidos con vidrio (GEMS por sus siglas en inglés) encontrados en las IDPs (Dobrica *et al.*, 2012). Los silicatos encontrados en estas muestras tienen una composición heterogénea, lo cual indica que son materiales desequilibrados pero que se encuentran muy bien conservados; favoreciendo el hecho de brindar información confiable acerca de su cuerpo parental que sugiere ser de proveniencia cometaria.



**Figura 2.** Proporción y tipos de micrometeoritos pertenecientes a la colección “CONCORDIA”. CS hace referencia a las esférulas cósmicas (MMs fundidos), ScMM indican los micrometeoritos escoriáceos (MMs parcialmente fundidos), CgMM hacen alusión a micrometeoritos gruesogranulares, FgMM (F) y FgMM (C) indican los micrometeoritos finogranulares porosos y compactos respectivamente y UCMM hace alusión a los micrometeoritos ultracarbonáceos; los cuales hacen parte de los MMs sin fundir. Tomado y modificado de Koschny *et al.* (2019).

Es evidente que, gracias a las múltiples expediciones y recolecciones de material extraterrestre en distintos sitios del planeta, los MMs fundidos, parcialmente fundidos y sin fundir poseen características que por más de 30 años han venido siendo establecidas y que recientemente son mucho más específicas, hasta el punto en que podemos diferenciarlos entre sí con base en su morfología, textura y composición químico-mineralógica (Figura 3). Lo anterior es una pieza clave en el entendimiento de la cantidad de flujo de material extraterrestre que cae en la Tierra anualmente, la evolución dinámica del polvo interplanetario que ha viajado por millones de años en el espacio y un aporte a la caracterización y cuantificación del material orgánico e inorgánico que está ingresando al planeta y cómo se preservan durante su entrada a la atmósfera.



**Figura 3.** Imágenes microscópicas (a-c) y de electrones retrodispersados (d-f) de micrometeoritos. a), d) Esférulas cósmicas (CSs) vítreas tipo S. b), e) MMs parcialmente fundidos con amplia cantidad de vesículas que favorece la textura escoriácea. c), f) MMs sin fundir con forma subangular, fracturas de deshidratación (FD) y magnetita framboidal (Mt). Escala de las barras en a), b) y c) = 150  $\mu\text{m}$ ; en d) = 20  $\mu\text{m}$  y en e), f) = 50  $\mu\text{m}$ . Tomado y modificado de Genge *et al.* (2008) y Folco y Cordier (2010).

## 2.5 DL – ALANINA

Los componentes ricos en carbono en meteoritos condriticos carbonáceos son bastante complejos, ya que tras varios estudios en condritas carbonáceas reconocidas (dentro de las que se destaca Murchison) se ha encontrado un alto contenido de materia orgánica y se han establecido al menos dos fases dentro de las cuales se encuentra el material orgánico macromolecular y la materia orgánica soluble – solvente (Sephton, 2002). Dentro de los tipos de materia orgánica encontrados en la condrita carbonácea Murchison (CM2) se encuentran hidrocarburos alifáticos y aromáticos, aminoácidos, ácidos carboxílicos, sulfónicos y fosfóricos, alcoholes, aldehídos, cetonas, azúcares, aminos, amidas, heterociclos de nitrógeno y sulfuro y material macromolecular. También es posible encontrar fases inorgánicas de carbono en las condritas carbonáceas como grafito, carbonatos, diamante y carburo de silicio.

Por otro lado, Dobrica *et al.* (2012) mencionan que el tipo de material carbonoso encontrado en los micrometeoritos ultracarbonáceos corresponde a grafito, grafito, nanoestructuras carbonosas, carbón, entre otros; materiales que son bastante complicados de adquirir y utilizar por su tamaño, porcentaje de concentración, composición exacta y forma en la que se presentan dentro de la partícula como tal. Con base en lo anterior, Sephton (2002) menciona los tipos de materia orgánica encontrada en la condrita carbonácea Murchison y su abundancia, siendo los aminoácidos un tipo molecular común.

La alanina ( $C_3H_7NO_2$ ) es un aminoácido alifático monocarboxílico que se encuentra en las proteínas que producen los seres vivos (L – Alanina) y de manera abiótica (D – Alanina). Se caracteriza por ser de color blanco, tener una masa molar de 89.09 g/mol, una solubilidad de 166.5 g/L, por cristalizar en el sistema ortorrómbico y por ser una partícula enantiómera quiral, lo que significa que es una molécula que posee una reflexión especular pero su reflexión no puede superponerse a la molécula, permitiendo la existencia de dos isómeros del aminoácido (D y L). Lo anterior establece la razón bajo la cual se determinó usar DL – Alanina en los experimentos.

## **CAPÍTULO III – METODOLOGÍA**

### **3. METODOLOGÍA**

Según varios autores (Nakamura *et al.*, 2005; Genge *et al.*, 2008; Dobrica *et al.*, 2012), de las expediciones realizadas en las últimas décadas y colecciones micrometeoríticas existentes se han estudiado muy pocas partículas con características texturales y mineralógicas que permiten clasificarlos como MMs ultracarbonáceos, lo cual ha dificultado de cierta manera su estudio, ya que para preservarlas es necesario emplear métodos no destructivos.

En este capítulo se explican los procesos que se siguieron para crear, obtener y estudiar los fundidos experimentales que simulan micrometeoritos ultracarbonáceos. Se empezó con una recopilación bibliográfica enfocada en MMs para conocer sus características generales, su proveniencia, posibles cuerpos parentales y procesos térmicos a los cuales se ven sometidos durante su ingreso a la atmósfera terrestre. Eventualmente se hizo énfasis en las características físicas, químicas y componentes mineralógicos de los MMs ultracarbonáceos para poder replicarlos de la mejor manera posible en los laboratorios del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Autónoma de México (UNAM).

#### **3.1 SELECCIÓN DE MINERALES**

Bajo la lupa binocular “Motic SMZ – 168 Series” se escogieron como materiales precursores cristales de olivino y piroxeno puros con alto contenido en magnesio (forsterita y enstatita respectivamente), es decir, con el menor número de inclusiones o asociaciones

mineralógicas internas. Dichos cristales pertenecen a rocas que fueron recolectadas durante una salida de campo previamente realizada en la zona de Joya Honda en San Luis Potosí, México; sector que se caracteriza por tener rocas ultramáficas y xenolitos del manto expuestos en superficie (Dávalos – Elizondo *et al.*, 2016; Levresse *et al.*, 2016). Las rocas obtenidas fueron posteriormente molidas y tamizadas obteniendo fracciones entre 0.1 – 1 y 1 – 2 milímetros, siendo la fracción más fina en utilizarse para la selección.

### **3.2 LAVADO, SECADO, TAMIZADO Y PESADO DE MINERALES**

Una vez los cristales de olivino y piroxeno fueron seleccionados, se agregaron en vasos de precipitado diferentes y se utilizó ácido clorhídrico al 10% con la cantidad suficiente para sumergirlos en su totalidad. Después se introdujeron los vasos al ultrasonido “Branson 1200” durante 5 minutos; luego se desechó el ácido (siendo neutralizado con bicarbonato de sodio hasta lograr un pH mayor a 7) y posteriormente se agregó agua destilada a los vasos con los minerales, poniéndolos de nuevo en el ultrasonido por otros 5 minutos (el paso anterior se repite al menos dos veces). Por último, se desecha el agua destilada contenida en los vasos de precipitado y los minerales se ponen en cajas de Petri previamente lavadas con agua destilada; donde dichos recipientes se llevan al horno por 24 horas a temperaturas aproximadas entre 60 – 70° C para secar los minerales.

Para confirmar que los minerales quedaron secos y sin residuos de agua después de haber sido llevados al horno de calentamiento, se meten las cajas de Petri a un desecador durante una noche y luego se pesan. Se meten de nuevo al horno por 1 hora y se vuelven a pesar, si el peso de las cajas con los minerales se mantiene entonces ya están totalmente secos. Después de tener los minerales secos se procede a molerlos con un mortero de ágata mientras se cubren con papel encerado para evitar que se pierda material durante el proceso. Una vez todos los cristales fueron molidos se tamizan con un tamiz que tiene cuatro filtros (1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm) y un depósito final al cual caen los granos cuyo tamaño es menor a los 0.125 mm. Los fragmentos que quedan en cada fracción del tamiz son guardados en bolsas de papel para luego ser pesados.

Por último, se utilizó la balanza analítica “OHAUS Pioneer” para pesar el material antes de moler, después de moler y después de tamizar para calcular y registrar tanto el peso

(en miligramos) como el porcentaje de material que se perdió entre los procedimientos mencionados anteriormente.

### 3.3 PREPARACIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR

Para realizar los fundidos es necesario tener un portamuestras con múltiples orificios donde puedan agregarse los minerales y sea posible realizar varios experimentos a la vez, esto con el fin de evitar variabilidad y mantener las condiciones durante el proceso de fusión. Un portamuestras de cobre con 36 orificios semiesféricos distribuidos equitativamente (Figura 4), cada uno de 3 mm de diámetro por 2 mm de profundidad fue utilizado para mezclar los silicatos y el aminoácido para generar los micrometeoritos experimentales. Este portamuestras fue elaborado en los talleres del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.

En la búsqueda de replicar de la mejor manera posible micrometeoritos ultracarbonáceos, era necesario utilizar al menos un componente orgánico previamente encontrado en condritas carbonáceas, y la alanina posee características que la hacen relativamente fácil de manejar. Para ello, en el Laboratorio de Evolución Química del Instituto de Ciencias Nucleares se realizó una solución de DL – Alanina diluida en agua destilada y concentrada al 90%; y para evitar su cristalización se mantuvo bien sellada y refrigerada a temperaturas aproximadas entre 4 – 6° C.



**Figura 4.** Portamuestras de cobre utilizado para realizar los fundidos experimentales de micrometeoritos ultracarbonáceos. Dentro de los orificios del portamuestras se agregan los silicatos y la alanina para posteriormente ser fundidos con el láser de CO<sub>2</sub>.

Antes de agregar la alanina a los silicatos, éstos estuvieron expuestos a luz ultravioleta durante 3 horas 30 minutos (solo en el experimento 1); después se agregó 1 mg en peso (1  $\mu$ L) de alanina a los silicatos para posteriormente dejarse a exposición de la luz ultravioleta (entre 8 – 22 horas) buscando una mejor integración de la alanina con los cristales de olivino y piroxeno. Una vez transcurrido este tiempo y habiendo comprobado que la alanina se adhirió bien a los silicatos, se procedió con la fusión de las muestras.

### **3.4 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS EXPERIMENTALES**

Antes de proceder con la fusión del material precursor, es necesario definir y establecer los parámetros de fusión que van a regir los experimentos y su finalidad. En total se realizaron cuatro experimentos a una presión atmosférica de 780 mbar, cada uno con variaciones en el tamaño y peso de los silicatos empleados, el peso del aminoácido y los tiempos de duración total de cada uno de los experimentos.

Para el experimento 1, el peso utilizado tanto de olivino como de piroxeno trató de mantenerse en igualdad de proporciones, o que por lo menos no hubiera diferencia superior a 0.2 mg uno del otro. A todas las muestras se les agregó 1 mg en peso (1  $\mu$ L) de alanina. El tamaño de los cristales que se utilizó fue variable, ya que se agregó a las dos primeras columnas del portamuestras cristales de 0.25 mm (250  $\mu$ m), en las siguientes tres columnas se usaron cristales de 0.5 mm (500  $\mu$ m) y a la última columna se agregaron cristales de 1 mm (1000  $\mu$ m).

Para el experimento 2, el peso de la alanina agregada a las muestras se mantuvo, pero el tamaño y peso de los silicatos cambió drásticamente, ya que decidió utilizarse un solo cristal de olivino y piroxeno para todos los orificios del portamuestras y el tamaño utilizado en cada una de las seis columnas fue diferente. Para la primera columna, solo se agregaron cristales de 0.25 mm, para la segunda columna solo se tomaron en cuenta cristales de 0.5 mm, para la tercera columna se utilizó la fracción menor a 0.125 mm (< 125  $\mu$ m), por ende, esta fue la única columna que tuvo más de un cristal durante el experimento. La cuarta columna constaba de solo cristales de piroxeno de 0.5 mm con alanina, en la quinta columna

se utilizaron cristales de olivino de 0.5 mm con alanina y para la sexta columna solo se agregó alanina.

El experimento 3 se caracterizó por emplear únicamente 2 mg (2  $\mu$ L) de alanina en solo 7 de los 36 orificios del portamuestras, esto con el fin de analizar más de cerca tanto el comportamiento del aminoácido durante el proceso de fusión como los cambios morfológicos que presentaba posteriores a dicho proceso. Los orificios se escogieron estratégicamente para evitar que se transmitiera calor entre las muestras mientras eran sometidos a la irradiación del haz del láser, ya que esto podría afectar los resultados e interpretaciones finales.

Para el experimento 4, se retomó la mezcla entre silicatos y alanina, manteniendo la cantidad de aminoácido agregado a los silicatos en 1 mg y conservando la proporción del peso entre los olivinos y piroxenos lo más cercano posible. Sin embargo, la configuración de los materiales en el portamuestras fue diferente ya que solo se utilizaron las columnas 1, 3 y 5 (18 orificios), esto con el fin de evitar la transmisión de calor entre las muestras durante el proceso de fusión para evitar el calentamiento de las otras muestras antes de su respectiva irradiación.

### **3.5 FUSIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR**

En esta etapa es necesario utilizar un instrumento que reproduzca eficientemente procesos de alta energía como la formación de cóndrulos y la entrada de micrometeoritos a la atmósfera terrestre; así como tener un mejor control en las tasas de calentamiento y enfriamiento.

Por eso se utilizó un láser “SYNRAD 48 – 5” (Mukilteo, Washington, Estados Unidos) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que genera pulsos que emiten en infrarrojo medio con una longitud de onda de 10.6  $\mu$ m o 10 600 nm y una potencia de 50 W, el cual se encuentra montado en una estructura de acero hecha y adaptada por investigadores del Instituto de Ciencias Nucleares y de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). También se encuentra asociado a dos lentes focales (200 mm y 50 mm respectivamente) que modifican el diámetro del haz del láser y un espejo controlado por dos picomotores “New Focus 8821” que dirige el camino óptico del láser hacia cada uno de los

orificios del portamuestras; que a su vez se encuentra en una cámara que puede estar a presión atmosférica ambiente (0.77 atm en Ciudad de México) o puede inducirse al vacío (entre  $10^{-2}$  y  $10^{-5}$  atm). Un pirómetro “Lumasese modelo Impac 140” ubicado en una de las entradas de la cámara está posicionado para registrar la temperatura durante la cual los cristales y el aminoácido están siendo fundidos para registrar la historia térmica de cada micrometeorito; mientras que una cámara de vídeo se encuentra ubicada en otra de las entradas para que el procedimiento en el interior de la cámara sea visible hacia el exterior. Cabe resaltar que todo el camino óptico del láser se encuentra aislado dentro de la estructura de acero, ya que el manejo de este tipo de láseres requiere adecuaciones y altas medidas de seguridad (Figura 5).

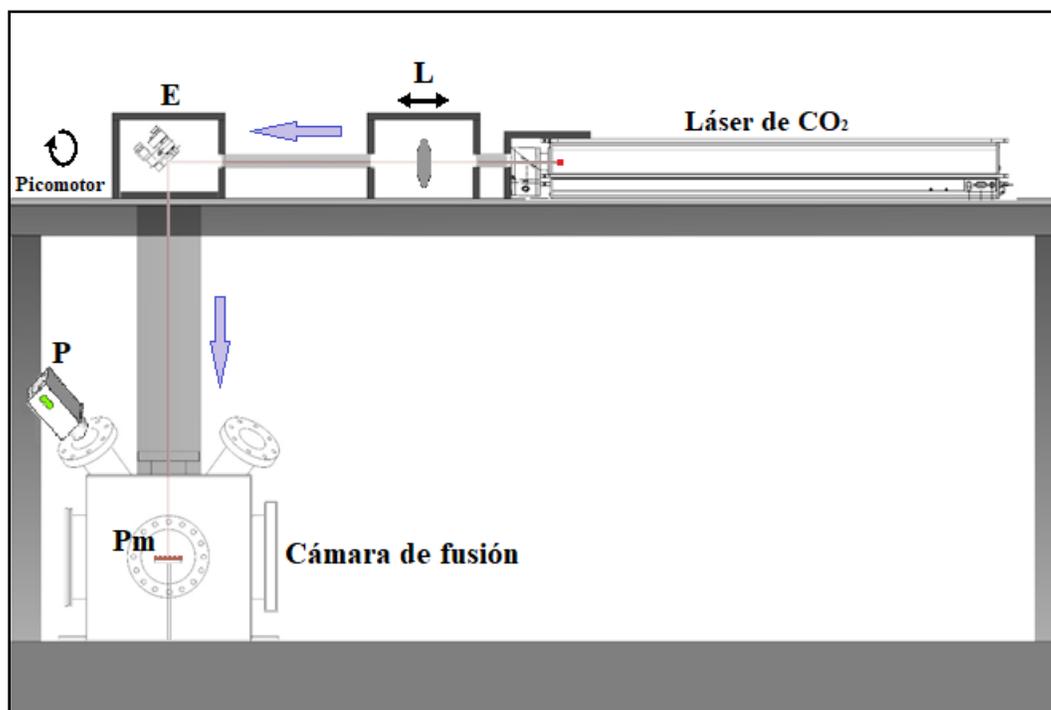
Aunque el láser de  $\text{CO}_2$  induce a las muestras de forma perpendicular, el pirómetro se encuentra ubicado en una de las esquinas de la cámara a determinado ángulo, por lo que hay que realizar una corrección trigonométrica sobre la temperatura registrada por el instrumento para conocer la temperatura real a la cual se están fundiendo las muestras. Dichos valores se obtienen mediante la siguiente fórmula brindada por la alumna de doctorado Patricia Hernández Reséndiz (com. pers., Hernández – Reséndiz *et al.*, 2020):

$$Temperatura\ real = - \frac{Temperatura\ registrada}{0.83} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Antes de fundir deben establecerse los parámetros de fusión, lo cual se hace por medio del programa “LabView” que fue desarrollado por el Dr. Héctor Cruz Ramírez del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM y por la alumna de doctorado Patricia Hernández Reséndiz. En este programa es posible indicar el ciclo de trabajo, la potencia, la frecuencia de las pulsaciones y emisividad del láser; el tiempo al cual se somete cada muestra desde el inicio del experimento hasta el pico máximo de temperatura (fusión), el tiempo total de cada muestra que incluye calentamiento y enfriamiento y el tipo de perfil – curva que simula la entrada de un objeto extraterrestre con la atmósfera.

Una vez se tienen dichos parámetros definidos, se introduce el portamuestras cargado con los materiales precursores y se procede con la fusión de cada una de las muestras, direccionando el láser y el pirómetro a la casilla elegida. La temperatura se registra durante la irradiación gracias al pirómetro y una vez terminado el experimento los micrometeoritos experimentales se pesan de nuevo con la balanza analítica. Es necesario mencionar que se

realizó un registro fotográfico anterior y posterior al proceso de irradiación con una cámara montada sobre la lupa binocular para identificar tanto la posición del material precursor como las texturas generadas por los fundidos después de ser irradiadas.



**Figura 5.** Plano lateral que muestra la estructura general y partes principales de Citlälmitl (nombre del instrumento utilizado para crear los micrometeoritos experimentales). Las flechas moradas indican el camino que sigue el láser de CO<sub>2</sub> hasta llegar al portamuestras (Pm) ubicado en la cámara de fusión. Una lente (L) amplía o disminuye el diámetro del láser. Gracias a dos picomotores, un espejo (E) dirige el haz del láser hacia un orificio del portamuestras y un pirómetro (P) apunta en la misma dirección para determinar la temperatura máxima del fundido. Adaptada de Hernández – Reséndiz *et al.* (2020).

La descripción física de los micrometeoritos experimentales se realiza principalmente con base en la forma, tamaño y texturas obtenidas después del proceso de fusión, razón por la cual palabras como esfericidad y redondez son utilizadas. Según Krumbein (1941) la esfericidad se define como la similitud que tiene una partícula con respecto a una esfera mientras que la redondez es la medida descriptiva de la curvatura de los bordes de una partícula, es decir, qué tan agudos o suaves son los bordes de la misma. Por otro lado, la descripción química de los micrometeoritos experimentales se realiza teniendo en cuenta principalmente los análisis realizados en laboratorio.

### 3.6 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

La espectroscopía infrarroja es un método analítico no destructivo que se caracteriza por resaltar las particularidades químicas de compuestos orgánicos e inorgánicos usando la región del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo (el cual es menos energético que otros intervalos del espectro como la región ultravioleta o el visible). Lo anterior se logra gracias a que la radiación infrarroja promueve transiciones de estado energético en una molécula entre niveles de energía vibracionales y rotacionales (Cross y Jones, 1969), lo que ocasiona que todos y cada uno de los compuestos o materiales analizados tengan un comportamiento único y, por ende, se genera un espectro que surge como resultado de las variaciones de dichas formas de energía interna llamado espectro vibratorio – rotacional (Ostrooumov, 2007) que determina de manera directa las frecuencias de vibración del compuesto analizado.

A partir de la generación de los micrometeoritos ultracarbonáceos experimentales era necesario corroborar que los silicatos no habían sufrido algún cambio químico al haber sido sometidos a altas temperaturas, pero, sobre todo, era sumamente importante confirmar si la alanina había sobrevivido al proceso de irradiación y si había alcanzado a incorporarse a los fundidos dentro de su estructura; lo cual se logró utilizando espectroscopía infrarroja. Para esto, se utilizó el equipo “PerkinElmer FT – IR Spectrum 100” que utiliza un atenuador horizontal de reflectancia total (HATR) y cuyo rango de lectura es entre 650 y 4000  $\text{cm}^{-1}$  (infrarrojo medio), ubicado en el Laboratorio de Espectroscopía Óptica del Instituto de Ciencias Nucleares.

Con el programa “Spectrum 6.2.0” fue posible definir los parámetros de medición de cada muestra (haciendo 14 lecturas con el equipo por cada fundido), aprovechando que utiliza ajustes derivativos para obtener una mejor resolución de cada una de las bandas de frecuencia de transmitancia infrarroja (en  $\text{cm}^{-1}$ ) y su respectivo porcentaje. Dichos valores fueron posteriormente comparados con los reportados en la literatura para grupos químicos funcionales de componentes orgánicos y silicatos (Flett, 1963; Cross y Jones, 1969; Ostrooumov, 2007).

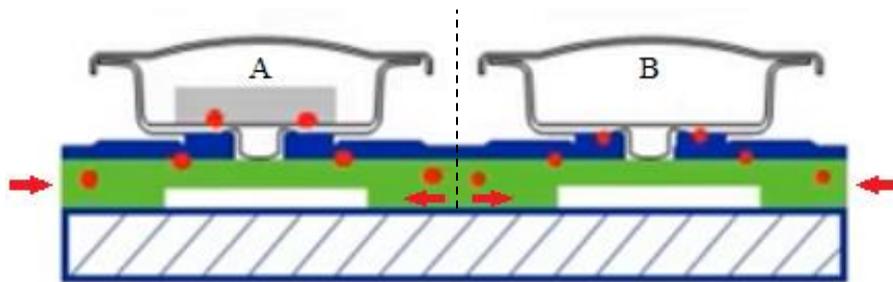
### **3.7 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO - DSC**

La calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés) es una técnica termoanalítica cuantitativa que mide los cambios de energía en función de la temperatura y

el tiempo generados por una variación en el comportamiento de las propiedades de un material. Dichos cambios permiten identificar y medir con exactitud las transiciones de fase endotérmicas o exotérmicas que ocurren en el material de estudio con base en un material de referencia (Gabbott, 2008). Lo anterior se logra utilizando dos crisoles (que están hechos de materiales con muy buena conductividad térmica) los cuales se ubican cada uno en un termopar del calorímetro. Uno de los crisoles estará vacío (referencia) y el otro contendrá el material a analizarse, para después proceder a calentarse definiendo previamente la temperatura máxima a la que se quiere llegar y la tasa de calentamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) sobre la cual irá aumentando la temperatura. Al finalizar, se obtiene una gráfica de energía vs. temperatura donde pueden apreciarse períodos de inestabilidad, temperaturas donde hubo transiciones de fase y liberación – absorción de energía (picos exotérmicos – endotérmicos respectivamente).

La necesidad de realizar este tipo de análisis radica principalmente en conocer el punto de fusión de la DL – Alanina, ya que durante los experimentos 2 y 3 el pirómetro rara vez registraba temperaturas superiores a  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que podía significar que el aminoácido se estaba descomponiendo antes de que tuviera la posibilidad de poder incorporarse en la estructura de los silicatos. También se analizó el comportamiento individual del olivino y piroxeno y varios micrometeoritos experimentales con el fin de determinar si después de haber sido irradiados, se registraba dentro de la curva del DSC el punto de fusión de la alanina previamente determinado.

Para esto se utilizó el “DSC – 100 Differential Scanning Calorimeter” cuyo rango de energía varía de  $0 - \pm 500\text{ mW}$  y su rango de temperatura se encuentra entre la temperatura ambiente -  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ubicado en el Laboratorio de Espectroscopía Óptica del Instituto de Ciencias Nucleares. Se utilizaron crisoles de aluminio y cerámica, ya que pueden soportar temperaturas de  $500$  y  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente; el crisol de referencia se ubicó en el termopar izquierdo y el que contiene la muestra en el termopar derecho (Figura 6). Con el programa DSC – Software se definieron los parámetros de calentamiento, indicando un máximo de temperatura de  $500 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una tasa de calentamiento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ; logrando determinar el comportamiento del aminoácido mientras se ve sometido a un aumento progresivo de temperatura, los valores en los cuales hay transiciones de fase y los valores de entalpía.



**Figura 6.** Perfil esquemático del interior de un instrumento enfocado a la calorimetría diferencial de barrido (DSC). A corresponde al termopar donde se pone el crisol con la muestra y B es el termopar donde se ubica el crisol vacío que se usa de referencia. Las líneas y puntos rojos muestran el flujo de calor constante a través de una plancha de calentamiento que afecta a ambos crisoles.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los productos obtenidos posterior a la generación de los micrometeoritos experimentales son de gran utilidad para tener una idea cercana de las condiciones aproximadas a las cuales son sometidos durante su ingreso a la atmósfera. Cabe mencionar que existen parámetros específicos (Tabla 4) que son controlados previos al proceso de fusión (tamaño de los cristales precursores, tiempo de duración de cada experimento y contenido del aminoácido agregado a cada muestra), parámetros variables que no pueden ser controlados (peso del micrometeorito obtenido, temperatura máxima alcanzada y tasa de enfriamiento) y parámetros libres que no interfieren en el desarrollo del experimento pero que de manera intrínseca pueden deducirse con base en los datos obtenidos (velocidad y ángulo de entrada de la partícula).

En total se realizaron 97 experimentos, de los cuales 84 fueron dirigidos a la formación de micrometeoritos mientras que los 13 restantes se realizaron directamente sobre alanina. De esos 84 experimentos hechos para formar micrometeoritos, 60 fundieron la mayoría o totalidad del material precursor puesto en el orificio del portamuestras y donde se obtuvo una partícula experimental (71%), sin embargo, 24 de ellas se calentaron mas no fundieron todo el material precursor (29%). Por ende, los resultados presentados se basan en los 60 experimentos que generaron un fundido tipo micrometeorito y los 13 experimentos enfocados al aminoácido.

**Tabla 4.** Parámetros experimentales específicos implementados durante el proceso de fusión del material precursor (olivino, piroxeno y alanina) para los cuatro experimentos. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO<sub>2</sub>, siendo 95% el valor máximo.

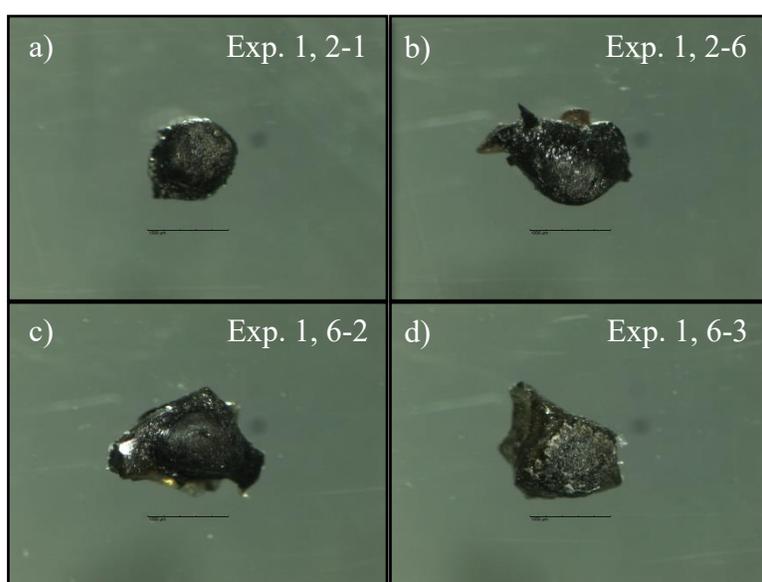
EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2
Minerales precursores: Olivino y piroxeno. Tamaño de los precursores: 250 – 1000 μm Tiempo: $T(s)= 120$ $tm(s)= 10$ Aminoácido: 1 μL (1 mg)  C.T.: 95 % Frecuencia: 20 kHz Emisividad: 85 Perfil: Onda de choque	Minerales precursores: Olivino y piroxeno. Tamaño de los precursores: < 125 – 500 μm Tiempo: $T(s)= 360, 240, 120$ $tm(s)= 30, 10$ Aminoácido: 1 – 2 μL (1 – 2 mg)  C.T.: 95% Frecuencia: 20 kHz Emisividad: 85 Perfil: Onda de choque
EXPERIMENTO 3	EXPERIMENTO 4
Material precursor: Alanina Tiempo: $T(s)= 30$ $tm(s)= 6$ Aminoácido: 2 μL (2 mg)  C.T.: 95% Frecuencia: 20 kHz Emisividad: 95 Perfil: Onda de choque	Minerales precursores: Olivino y piroxeno. Tamaño de los precursores: 125 – 500 μm Tiempo: $T(s)= 8$ $tm(s)= 6$ Aminoácido: 1 μL (1 mg)  C.T.: 95% Frecuencia: 20 kHz Emisividad: 85 Perfil: Onda de choque

#### 4.1 FORMA Y TAMAÑO

Dependiendo de la manera en la que estén posicionados los materiales precursores en el portamuestras y la incidencia del haz láser de CO<sub>2</sub>, así mismo se genera una partícula con determinada forma. Durante los experimentos nos dimos cuenta que el material precursor funde cuando el rayo del láser es normal a la cara cristalina para evitar reflexiones. Los micrometeoritos obtenidos experimentalmente son esféricos o subsféricos pero su nivel de redondez es variable y esta característica va de la mano con la temperatura máxima que

alcanzaron durante el proceso de fusión, es decir, a mayor temperatura, mejor fusión del material y por ende una superficie más homogénea y redondeada se obtendrá.

En el experimento 1, se obtuvieron 36/36 micrometeoritos los cuales se clasificaron como 6 redondeados, 17 subredondeados, 9 subangulosos y 4 angulosos (Figura 7). Para el experimento 2, se produjeron 13/30 micrometeoritos siendo catalogados 4 como redondeados, 4 subredondeados, 1 subanguloso y 4 angulosos. Para el experimento 4, se obtuvieron 11/18 micrometeoritos y estos fueron separados de manera que se clasificaron como 2 redondeados, 3 subredondeados, 2 subangulosos y 4 angulosos.



**Figura 7.** Imágenes bajo la lupa binocular de algunos micrometeoritos generados durante el experimento 1. Pueden apreciarse las formas obtenidas posterior al proceso de fusión obteniendo partículas redondeadas (a), subredondeadas (b), subangulosas (c) y angulosas (d). La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ .

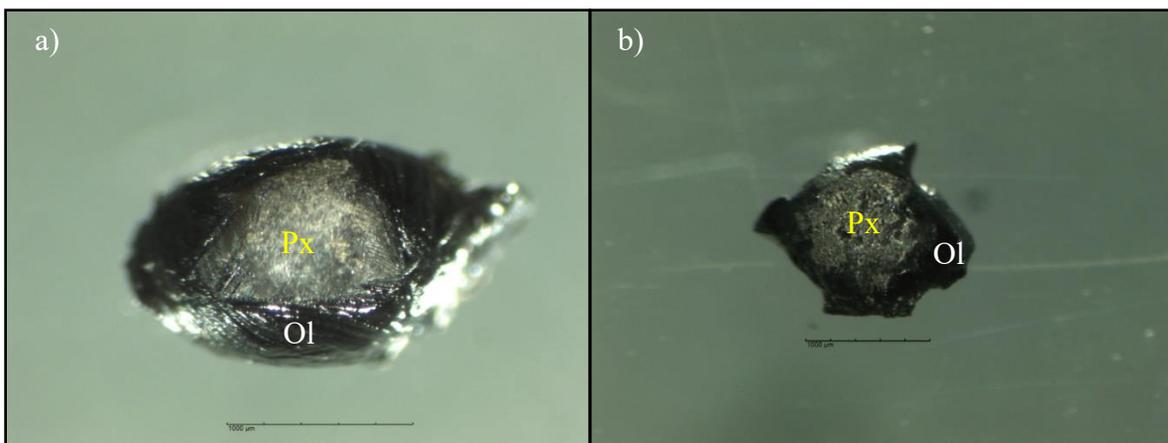
En cuanto al tamaño se refiere, esta característica varía dependiendo de qué tan pequeños o grandes eran los cristales de olivino y piroxeno antes de ser fundidos y la cantidad de cristales utilizados para la formación del micrometeorito. Para el caso del experimento 1 se utilizaron varios cristales de silicatos con un rango de tamaño entre 250 – 1000  $\mu\text{m}$  obteniendo partículas con tamaños entre 1030 – 2500  $\mu\text{m}$  aproximadamente. Para el experimento 2 solo se utilizó un cristal de olivino y/o piroxeno para cada columna del portamuestras (con excepción de la columna 3 donde se usó la fracción menor a 125  $\mu\text{m}$  y por ende habían más de dos cristales) obteniendo partículas con tamaños entre 460 – 2140  $\mu\text{m}$ ; sin embargo, dentro de los orificios del portamuestras de la columna 3 se obtuvo más de una partícula con tamaños menores a 1020  $\mu\text{m}$ . En el experimento 4 también se empleó un solo cristal de olivino y piroxeno con rangos entre 125 – 500  $\mu\text{m}$  (excepto para la columna 1

donde se usó la fracción de 125  $\mu\text{m}$ ), dando partículas resultantes con tamaños entre 710 – 1750  $\mu\text{m}$ .

Un aspecto importante para tener en cuenta es que en las columnas donde se usaron las fracciones iguales o menores a 125  $\mu\text{m}$ , se obtuvieron varias partículas dentro del mismo orificio las cuales se caracterizan por ser bastante redondeadas y por tener tamaños que no pasan de los 1020  $\mu\text{m}$ . Esto indica que, a pesar de haber muchos cristales de igual tamaño en un mismo lugar, la competencia que se presenta entre éstos al momento de fundir no es tanta permitiendo que los cristales de la parte inferior del orificio sirvan como sustrato mientras que los de la parte superior se funden desarrollando buena esfericidad y redondez. Cabe destacar que, en estos experimentos, la alanina quedaba retenida entre los cristales de silicato que no se fundieron, pero este aspecto se tratará más adelante en el apartado 4.4.

## 4.2 COMPONENTES CRISTALINOS Y TEXTURAS

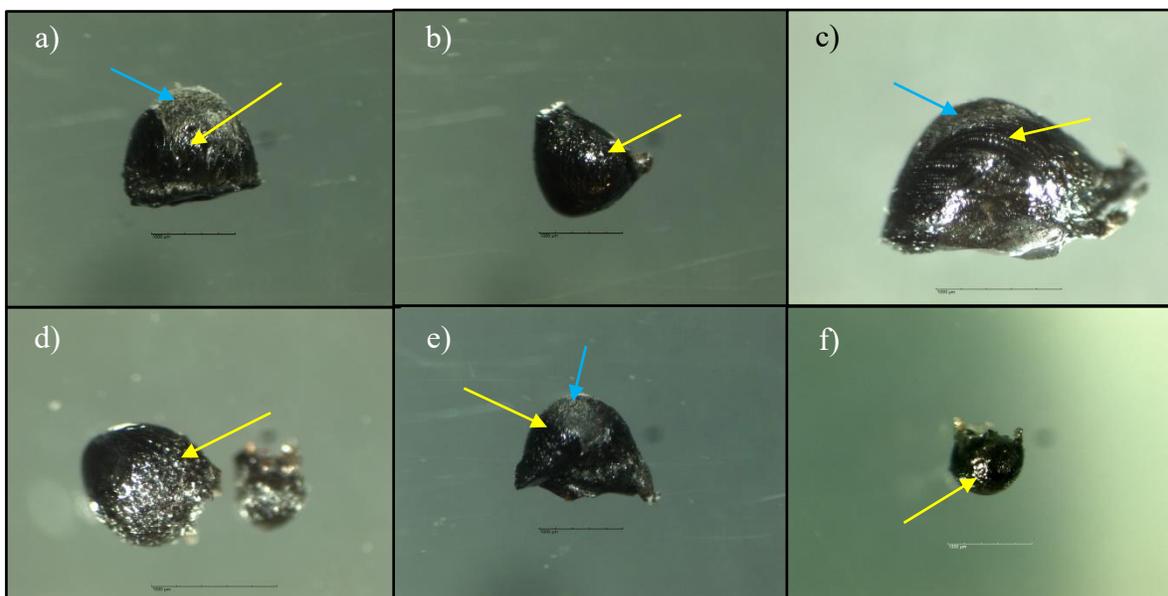
Bajo la lupa binocular puede apreciarse que en los micrometeoritos experimentales obtenidos, muchos de los cristales de olivino y piroxeno se mezclaron entre sí debido a las temperaturas alcanzadas, cambiando por completo su hábito y morfología. En otras partículas, dicho cambio fue parcial ya que en determinadas zonas se aprecia la mezcla entre los dos minerales (especialmente hacia la zona que se vio expuesta al láser de  $\text{CO}_2$ ), sin embargo, hacia los bordes es evidente que los minerales no cambiaron suficientemente su apariencia al no verse tan afectados por la energía del haz del láser (Figura 8).



**Figura 8.** Micrometeoritos experimentales vistos bajo la lupa binocular. a) Experimento 2, 2-3. Se observa una agrupación entre los cristales de olivino (Ol) y piroxeno (Px) posterior a la irradiación con el láser de  $\text{CO}_2$ . No se ven remanentes morfológicos y del hábito propio de dichos cristales. Aumento 3x. b) En el experimento 1, 3-4 se observa que el piroxeno se encuentra en la parte central generando superficies redondeadas, mientras que el olivino no se fundió por completo y presenta bordes angulosos y subangulosos. Aumento 2x. La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.1 Cristales barrados de olivino y piroxeno

Es la textura encontrada más representativa de los micrometeoritos experimentales dado que la mayoría de estos son una mezcla de ambos silicatos, y reciben el nombre de “barrados” debido a la manera en que los cristales se posicionan entre sí. Al menos el 83% de los micrometeoritos obtenidos en los cuatro experimentos presentan barras de olivino y barras de piroxeno, sin embargo, la abundancia y el desarrollo textural se evidencia mejor en unas partículas que en otras (Figura 9), sobre todo en los micrometeoritos del experimento 1 (6-6, 4-6, 5-5) se exponen de manera más clara las texturas con respecto a las partículas de los experimentos 2 (2-3, 3-2) y del experimento 4 (1-3).



**Figura 9.** Textura de olivinos y piroxenos barrados en los micrometeoritos experimentales vistos bajo la lupa binocular (señaladas con flechas amarillas y azules, respectivamente). Las muestras a) 6-6, b) 4-6 y e) 5-5 pertenecen al experimento 1, las cuales son vistas con un aumento 2x; c) 2-3 y d) 3-2 se generaron en el experimento 2 y son vistas con aumento 3x; f) 1-3 se formó en el experimento 4 y es vista con el aumento 3x. Nótese cómo las barras del olivino y/o piroxeno son más evidentes y diferenciables en a), b) y c), teniendo en cuenta la información de la Tabla 5. La línea de escala corresponde a 1000 µm.

Al comparar las temperaturas máximas alcanzadas de los micrometeoritos en cuestión con el crecimiento y definición de las barras, se evidencia una relación directamente proporcional indicando que, a mayor temperatura, los olivinos y piroxenos barrados están mejor desarrollados. De igual forma, las tasas de enfriamiento calculadas para cada micrometeorito muestran que el desarrollo textural sobre los cristales y su hábito particular es más apreciable con tasas de enfriamiento más rápidas (Tabla 5). En este caso, la intensidad

de energía irradiada sobre las partículas no juega un papel importante en el desarrollo de la textura ya que el ciclo de trabajo del láser de CO<sub>2</sub> incidió con el mismo porcentaje de su capacidad y, por ende, el valor de potencia (W) en todas las muestras no varía.

**Tabla 5.** Características físicas y desarrollo textural de los olivinos y piroxenos empleados en los micrometeoritos experimentales, ordenados de acuerdo a la temperatura máxima alcanzada. Cabe notar que la definición de las barras de olivino y piroxeno se hace bajo la lupa binocular, ya que por el tamaño es difícil apreciarlos a simple vista.

MUESTRA (# exp.)	6-6 (Exp. 1)	4-6 (Exp. 1)	2-3 (Exp. 2)	3-2 (Exp. 2)	5-5 (Exp. 1)	1-3 (Exp. 4)
Temperatura máxima (°C)	1897	1466	1455	1381	1304	1255
Tasa de enfriamiento (°C/s)	6.3	4.5	4.8	-	3.7	447.4
Potencia del láser (W)	51.7	51.7	51.7	51.7	51.7	51.7
Tamaño de los cristales (µm)	1000	500	500	< 125	500	125
Definición de las barras	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno	Bueno	Aceptable

#### 4.2.2 Textura escoriácea

Puede decirse que es la segunda textura más característica de los micrometeoritos experimentales ya que, a diferencia de los olivinos y piroxenos barrados, el número de partículas que desarrollaron algún tipo de esta manifestación textural es menor, siendo aproximadamente el 15% de los micrometeoritos obtenidos en los cuatro experimentos realizados. Al igual que sucede con las rocas volcánicas, esta textura se origina cuando los volátiles están escapando del sistema en el que se encuentran dejando pequeñas vesículas de forma irregular, las cuales se aprecian en la superficie del micrometeorito (Figura 10).

La generación de esta textura se atribuye en principal medida a la interacción entre los silicatos con la alanina en solución, además, hay que tener en cuenta que el material precursor del experimento 1 fue el único que se vio expuesto a luz ultravioleta antes (con el

fin de facilitar la adherencia del componente orgánico a los silicatos) y después de agregar la alanina a los orificios del portamuestras. Lo anterior concuerda con que fueron algunas partículas de dicho experimento donde hubo más desarrollo de esta textura con respecto a los demás, que solo se expusieron a la luz ultravioleta después de agregar la alanina a los silicatos.

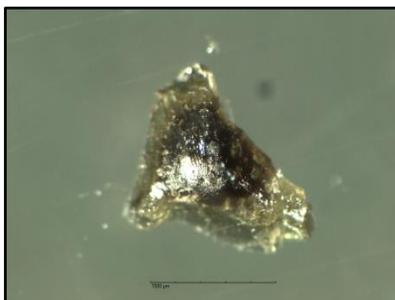


**Figura 10.** Textura escoriácea en los micrometeoritos experimentales vistos bajo la lupa binocular. Las partículas a) 2-1 y b) 3-5 pertenecen al experimento 1 mientras que el conjunto de partículas en c) 3-1 hace parte del experimento 2. Nótese cómo en c) 3-1 se desarrolla principalmente sobre el piroxeno tanto la textura escoriácea (vesículas en superficie) como la textura radial. La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ .

De igual forma, cabe mencionar que la generación de la textura escoriácea en este trabajo no discrimina el tipo de cristal utilizado, ya que en varias de las partículas donde ésta se genera también se encuentran texturas de piroxeno y olivino barrado.

#### 4.2.3 Piroxeno radial (PR)

A diferencia de las texturas mencionadas anteriormente, la cantidad de partículas que presentan alguna manifestación textural que evidencie un piroxeno radial es muy baja, siendo nada más el 2% de los micrometeoritos obtenidos en los cuatro experimentos realizados (Figura 11). Recibe este nombre por la forma en la cual se acomodan los núcleos cristalinos aciculares del piroxeno, ya que se forma una especie de abanico que irradia desde un punto específico en la superficie del cristal (generalmente el centro) hacia los bordes.



**Figura 11.** Textura de piroxeno radial (PR) en el micrometeorito experimental vistos bajo la lupa binocular. Partícula 4-5 formada en el experimento 2 compuesta totalmente por enstatita (aumento 3x). La línea de escala corresponde a 1000  $\mu\text{m}$ .

### 4.3 HISTORIAS TÉRMICAS

Las transformaciones a las cuales el material precursor se sometió al momento de verse expuesto al láser de CO<sub>2</sub> hicieron que dentro de un tiempo previamente definido (parámetro establecido) hubiera variabilidad tanto en los valores de las temperaturas alcanzadas por el material precursor como en el cálculo posterior de las tasas de enfriamiento (parámetros variables). Esto permite analizar los cambios en sus historias térmicas y características sobre las partículas obtenidas, lo cual se logra utilizando un perfil exponencial que simula la entrada de cuerpos extraterrestres a la atmósfera terrestre llamado “perfil de onda de choque” (Hernández – Reséndiz *et al.*, 2020), que indica un aumento abrupto en la temperatura en los primeros segundos y luego un enfriamiento progresivo y constante en el resto de la corrida.

Las Figuras 12, 13 y 14 representan lo anteriormente mencionado de manera gráfica para determinados micrometeoritos experimentales, además también se incluyen polígonos numerados que indican posibles puntos donde se presentan diferentes etapas de cristalización los cuales se interpretarán con más detalle en el capítulo 5.4. Las historias térmicas se describen a continuación en tres partes, ya que para los experimentos 1, 2 y 4 se utilizaron diferentes tiempos durante los procedimientos.

#### 4.3.1 Tiempos y temperaturas – experimento 1

Debido a que los micrometeoritos provenientes del espacio traen una trayectoria aleatoria, éstos pueden entrar al planeta desde cualquier ángulo y con velocidades que varían entre 11 km/s y 73 km/s (Love y Brownlee, 1991; Trigo – Rodríguez, 2013), por ende, dicha información no es posible reproducirla directamente mediante los experimentos hechos en este trabajo. Sin embargo, el tiempo de ingreso de la partícula en la atmósfera influye bastante en las temperaturas alcanzadas, procesos de ablación, tasas de enfriamiento, texturas y componentes mineralógicos finales.

Es por eso que se escogieron tiempos que intentaran simular el tiempo máximo de vuelo de una partícula no mayor a 1000  $\mu\text{m}$  desde el primer momento que toca la atmósfera hasta que llega a superficie ( $t$ ), teniendo presente el tiempo aproximado en el cual la partícula alcanzaría su máxima temperatura ( $tm$ ); sin embargo, el ángulo de entrada también debe ser

tomado en cuenta ya que este debe ser lo más concordante posible con el tiempo  $T$  seleccionado.

Los micrometeoritos obtenidos dentro en este experimento se caracterizan por tener un tiempo total ( $t$ ) de 120 segundos cada uno, dentro de los cuales el tiempo medio ( $tm$ ) o punto máximo de potencia emitida sobre cada partícula es de 10 segundos. Lo anterior se traduce en que dentro de los primeros 10 segundos del experimento el material precursor se calentó con la potencia máxima del láser y los 110 segundos restantes corresponden a un proceso de enfriamiento progresivo natural controlado.

Por otro lado, se tuvieron que hacer correcciones a las temperaturas obtenidas por el pirómetro, ya que este apunta con cierto ángulo desde una de las esquinas de la cámara de fusión hacia la partícula durante el experimento (Figura 5), haciendo esto se pueden adquirir las temperaturas máximas y mínimas reales alcanzadas.

De los 36 micrometeoritos generados en este experimento 1 se obtuvieron temperaturas con un rango entre 1105 °C (temperatura máxima más baja alcanzada) y 1897 °C (temperatura máxima más alta alcanzada), las cuales se encuentran relativamente cerca a  $tm$  (s)= 10 (Figura 12). Sin embargo, cabe mencionar que para varios micrometeoritos experimentales la temperatura máxima alcanzada no siempre se encuentra en  $tm$ , sino que puede encontrarse en un rango de 5 segundos antes o hasta 20 segundos después de  $tm$ .

El tamaño del material precursor donde se obtuvo una temperatura de 1105 °C era de 500  $\mu\text{m}$  y el micrometeorito resultante (3-3) tiene un tamaño aproximado de 1650  $\mu\text{m}$ , mientras que el material precursor del cual se obtuvo una temperatura máxima de 1897 °C era de 1000  $\mu\text{m}$  obteniendo un micrometeorito (6-6) con tamaño aproximado de 1620  $\mu\text{m}$ . Bajo la lupa binocular puede apreciarse que ambas partículas se crearon consumiendo la mayoría del material precursor, tienen formas redondeadas a subredondeadas y desarrollaron bastante bien texturas de olivino barrado y piroxeno radial (Tabla 6).

La tasa de enfriamiento ( $k$ ) es calculada para todos los micrometeoritos experimentales tomando la última temperatura registrada por el pirómetro en el tiempo total  $T$  y la temperatura máxima en su respectivo segundo, reemplazando dichos valores en la siguiente fórmula:

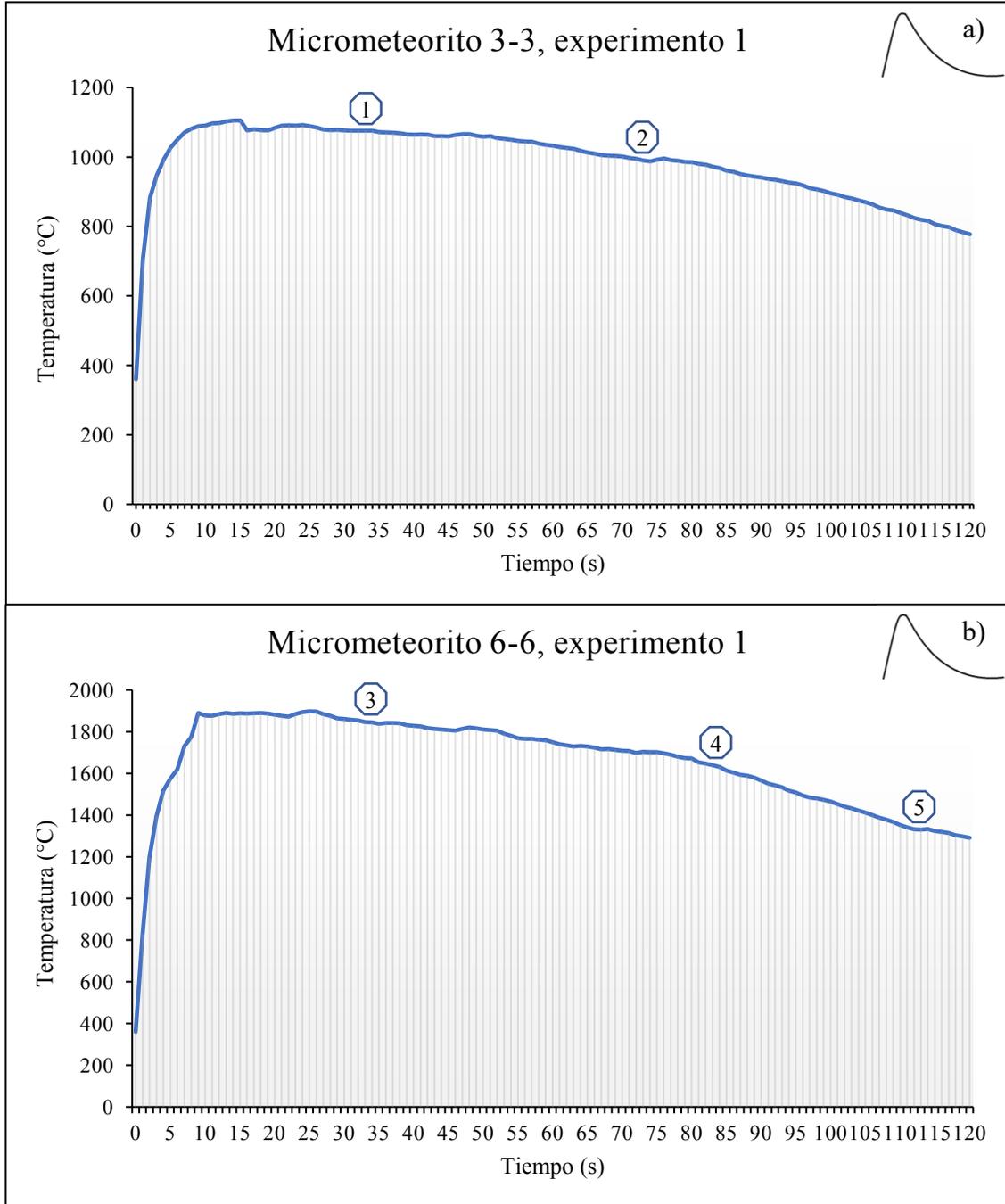
$$k = - \frac{(\text{Última temperatura registrada} - \text{Temperatura máxima})}{(\text{Tiempo total} - \text{Tiempo en temperatura máxima})} \quad \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} \right]$$

Para los micrometeoritos mencionados anteriormente (3-3 y 6-6), la tasa de enfriamiento calculada fue 3.1 °C/s y 6.4 °C/s respectivamente.

Otra manera de calcular la rapidez con la cual va disminuyendo la temperatura del micrometeorito desde su punto máximo de temperatura es hallando la pendiente de la recta utilizando los valores del ciclo de trabajo (C.T.) del láser. Básicamente se hace el mismo procedimiento que se hace para calcular  $k$ , solo que en este caso se toman los valores del C.T. registrados para las temperaturas final registrada y máxima con los respectivos tiempos en los cuales esto ocurrió. Posteriormente dichos valores se reemplazan en la siguiente fórmula:

$$\text{Pendiente} = - \frac{(\text{Valor de C.T. final} - \text{Valor de C.T. en temperatura máxima})}{(\text{Tiempo total} - \text{Tiempo en temperatura máxima})}$$

Los valores de la pendiente calculada para los micrometeoritos 3-3 y 6-6 fueron -0.57 y -0.61 respectivamente. En el Anexo 2 se encuentran los datos de todos los micrometeoritos obtenidos en el experimento 1.



**Figura 12.** Curvas de pulso de calentamiento de los micrometeoritos 3-3 (a) y 6-6 (b) generados en el experimento 1 donde se emplea la temperatura en función del tiempo para ambas partículas. Nótese en la parte superior derecha de cada gráfica se encuentra el perfil – curva de “onda de choque” ideal. Puede resaltarse el calentamiento rápido dentro de los primeros 10 segundos ( $tm$ ) y el enfriamiento progresivo de las partículas hasta completar los 120 segundos ( $t$ ). Los polígonos 1 – 5 indican puntos donde posiblemente se presenten diferentes etapas de cristalización en el micrometeorito.

**Tabla 6.** Condiciones y resultados experimentales de los micrometeoritos 3-3 y 6-6 pertenecientes al experimento 1. Las imágenes muestran el micrometeorito experimental obtenido dentro de su correspondiente orificio en el portamuestras junto con el material precursor que no fundió.  $T_{m}$  corresponde al tiempo en la temperatura máxima, el cual es necesario para calcular la tasa de enfriamiento y la pendiente. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO<sub>2</sub>.

EXPERIMENTO	TAMAÑO (µm)		TEMPERATURA (°C)		TIEMPO			TASA DE ENFRIAMIENTO		C.T. (%)		
	Material precursor	Partícula	Última registrada	Máxima	T(s)	$T_m$ (s)	$T_{mx}$ (s)	Pendiente	(°C/s)	$T_{m}$	$T_{mx}$	
Micrometeorito 3-3		500	1650	778	1105	120	10	15	-0.57	3.1	94.8	34.9
Micrometeorito 6-6		1000	1620	1291	1897	120	10	25	-0.61	6.4	93.2	34.9

### 4.3.2 Tiempos y temperaturas – experimento 2

Los micrometeoritos obtenidos en este experimento se distinguen por presentar diversidad en sus tiempos totales ( $t$ ). Para este caso se intentó dentro del mismo experimento realizar corridas con variaciones temporales sobre las seis filas del portamuestras, siendo así 360, 240 y 120 segundos los períodos de tiempos elegidos. Por ende, para los tiempos medios ( $tm$ ) también se presentó variabilidad, siendo 30 segundos para  $T= 360$  y 10 segundos para  $T= 240$  y 120. Lo anterior quiere decir que dentro de los primeros 30 o 10 segundos del experimento el material precursor se calentó con la potencia máxima del láser y los 330, 230 y 110 segundos restantes corresponden al proceso de enfriamiento progresivo respectivamente.

La distribución de tiempos en el portamuestras se realizó de la siguiente manera: para la fila 1 se utilizó  $T(s)= 360$  y  $tm(s)= 30$ , para las filas 2, 3, 4 y 6 se utilizó  $T(s)= 240$  y  $tm(s)= 10$  y para la fila 5 se utilizó  $T(s)= 120$  y  $tm(s)= 10$ .

De las 30 corridas realizadas para generar los micrometeoritos, solo 13 produjeron al menos una partícula fundida de manera parcial o total que permitiera catalogarlas como micrometeoritos experimentales, por ende, los valores de temperaturas obtenidas de estas partículas son los que se usarán como resultados exitosos para el cálculo de las historias térmicas; sin embargo, hay que mencionar que la temperatura máxima más baja alcanzada del experimento fue de 673 °C (ubicación 5-3 en el portamuestras, material precursor no fundió) y la temperatura máxima más alta alcanzada del experimento fue de 1626 °C (ubicación 2-5 en el portamuestras, material precursor no fundió).

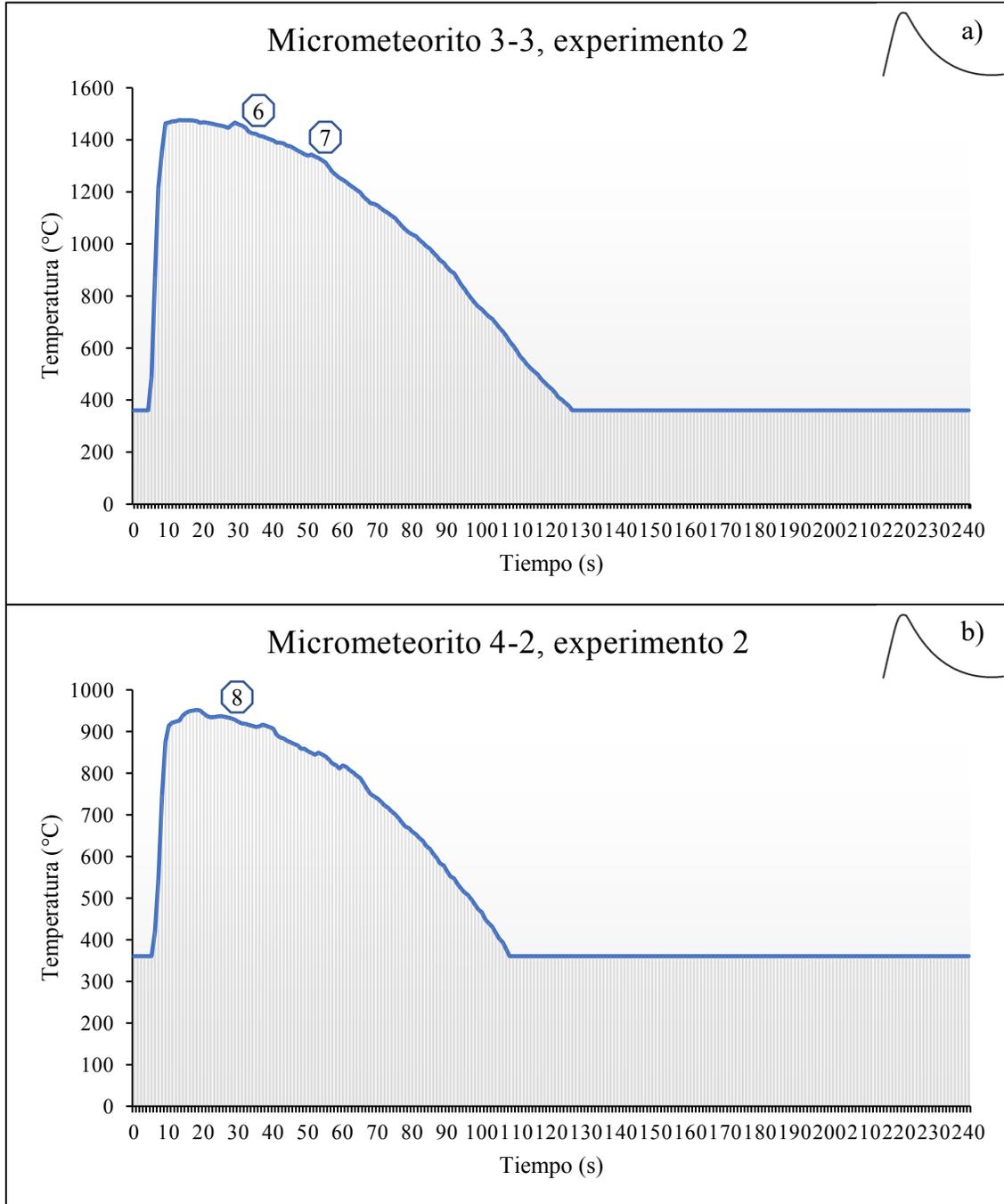
En cuanto a los 13 micrometeoritos obtenidos de este experimento, los rangos de temperaturas obtenidas se presentan en tres grupos, ya que fueron tres los valores utilizados para  $T$ . Para la fila 1, solo se generó un micrometeorito, por lo cual la temperatura máxima registrada para  $T(s)= 360$  es de 1213 °C; sobre la fila 5 cuyo  $T(s)= 120$ , se formaron 3 micrometeoritos y su rango de temperatura varía entre 1032 °C (temperatura máxima más baja) y 1439 °C (temperatura máxima más alta). Por último, en los micrometeoritos generados en las filas 2, 3, 4 y 6 donde  $T(s)= 240$ , la temperatura máxima más baja se registró en 952 °C y la temperatura máxima más alta fue de 1476 °C. Comparando los puntos máximos de las temperaturas se aprecia que para las filas 2 – 6, éstas se encuentran cerca a

$t_m$  (s)= 10 (Figura 13), sin embargo y al igual que en el experimento 1, la temperatura máxima alcanzada no se registró exactamente a los 10 segundos, sino hasta inclusive 10 segundos después de  $t_m$ .

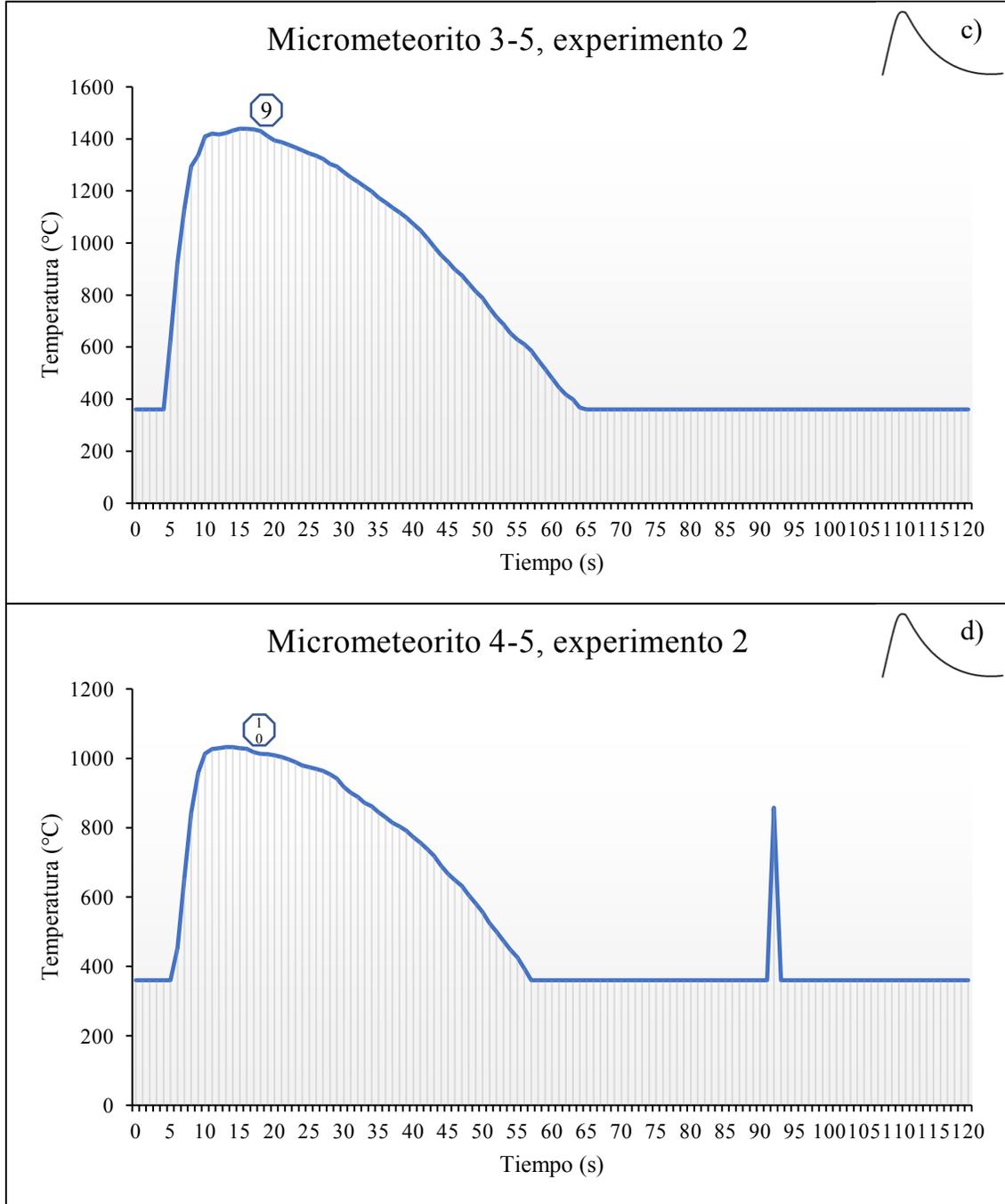
En cuanto al tamaño del material precursor se refiere, los micrometeoritos obtenidos cuyos valores de temperatura máxima fueron los más altos (3-1 para la fila 1, 3-5 para la fila 5 y 3-3 entre las filas 2, 3, 4 y 6) coinciden en que los cristales utilizados eran menores a 125  $\mu\text{m}$ , dando como resultado partículas con tamaños aproximados de 730 – 960  $\mu\text{m}$ , 1520  $\mu\text{m}$  y 460 – 980  $\mu\text{m}$  respectivamente. Por otro lado, los micrometeoritos formados cuyos valores de temperatura máxima fueron los más bajos (4-5 para la fila 5 y 4-2 entre las filas 2, 3, 4 y 6) también presentan coincidencias en cuanto al tamaño de los cristales precursores, ya que eran de 500  $\mu\text{m}$ , obteniendo partículas de 1480  $\mu\text{m}$  y 1170  $\mu\text{m}$  respectivamente. A pesar de no haberse generado un micrometeorito en 2-5, cabe mencionar que el material precursor del cual se obtuvo la temperatura máxima más alta alcanzada del experimento tenía cristales de 500  $\mu\text{m}$  de tamaño.

Bajo la lupa binocular se puede ver que múltiples partículas se crearon en una sola ubicación del portamuestras, por ejemplo, en 3-1 y 3-3 se formaron hasta tres micrometeoritos donde el material precursor era menor a 125  $\mu\text{m}$ . Una característica notable en dicha columna es que solo se fundió la parte superior del material precursor, sin embargo, después del proceso de fusión parte de la alanina quedó como remanente de manera intersticial en el sustrato de silicatos que no se fundió. En cuanto a su forma, los micrometeoritos policristalinos tienen formas redondeadas y desarrollaron bastante bien texturas de olivino barrado y escoriácea; no obstante, los micrometeoritos monocristalinos tienen forma subangulosa a angulosa y sobre ellos se desarrolló levemente la textura de piroxeno radial (Tabla 7).

Para los micrometeoritos mencionados anteriormente (3-3, 4-2, 3-5 y 4-5), la tasa de enfriamiento calculada fue 4.9  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 2.7  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 10.3  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  y 6.3  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  respectivamente; mientras que los valores de la pendiente calculada para las mismas partículas fueron -0.42, -0.42, -0.89 y -0.88 respectivamente. En el Anexo 3 se encuentran los datos de todos los micrometeoritos obtenidos en el experimento 2.



**Figura 13.** Curvas de pulso de calentamiento de los micrometeoritos 3-3 (a), 4-2 (b), 3-5 (c) y 4-5 (d) generados en el experimento 2 donde se emplea la temperatura en función del tiempo para ambas partículas. En la parte superior derecha de cada gráfica se encuentra el perfil – curva de “onda de choque” ideal. Puede resaltarse el calentamiento rápido dentro de los primeros 10 segundos ( $tm$ ) y el enfriamiento progresivo de las partículas hasta completar los 240 segundos ( $t$ ) en (a) y (b) y 120 segundos ( $t$ ) en (c) y (d). Los polígonos 6 – 10 indican puntos donde posiblemente se presenten diferentes etapas de cristalización en el micrometeorito.



**Figura 13 – Continuación.**

**Tabla 7.** Condiciones y resultados experimentales de los micrometeoritos 3-3, 4-2, 3-5 y 4-5 pertenecientes al experimento 2. Las imágenes en la parte superior de las casillas muestran el material precursor previo al proceso de fusión y las imágenes de la parte inferior muestran el micrometeorito experimental resultante posterior al proceso de fusión.  $T_{mx}$  corresponde al tiempo en la temperatura máxima, el cual es necesario para calcular la tasa de enfriamiento y la pendiente. C.T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO<sub>2</sub>.

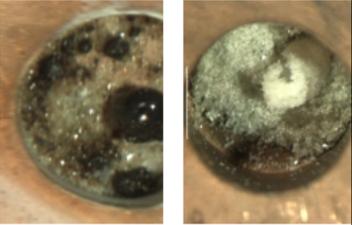
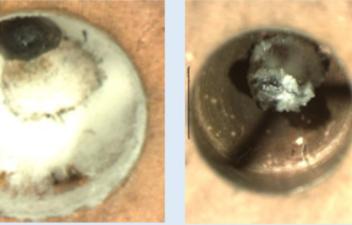
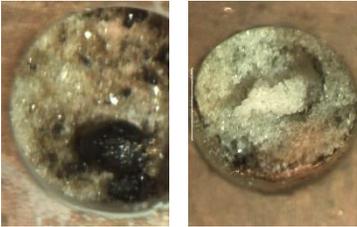
EXPERIMENTO	TAMAÑO (µm)		TEMPERATURA (°C)		TIEMPO			TASA DE ENFRÍAMIENTO		C.T. (%)	
	Material precursor	Partícula	Última registrada	Máxima	T(s)	$T_m(s)$	$T_{mx}(s)$	Pendiente	(°C/s)	$T_{mx}$	$T_m$
 Micrometeorito 3-3	< 125	460 - 980	360	1476	240	10	13	-0.42	4.9	94.8	0.01
 Micrometeorito 4-2	500 – solo piroxeno	1170	360	952	240	10	18	-0.42	2.7	93.9	0.01

Tabla 7 – Continuación.

EXPERIMENTO 2	TAMAÑO (µm)		TEMPERATURA (°C)		TIEMPO			TASA DE ENFRIAMIENTO		C.T. (%)		
	Material precursor	Partícula	Última registrada	Máxima	T(s)	tm(s)	Tmx(s)	Pendiente	(°C/s)	En Tmx	En T	
		< 125	1520	360	1439	120	10	15	-0.89	10.3	93.2	0.01
		500 – solo piroxeno	1480	360	1032	120	10	14	-0.88	6.3	93.9	0.01

### 4.3.3 Tiempos y temperaturas - experimento 4

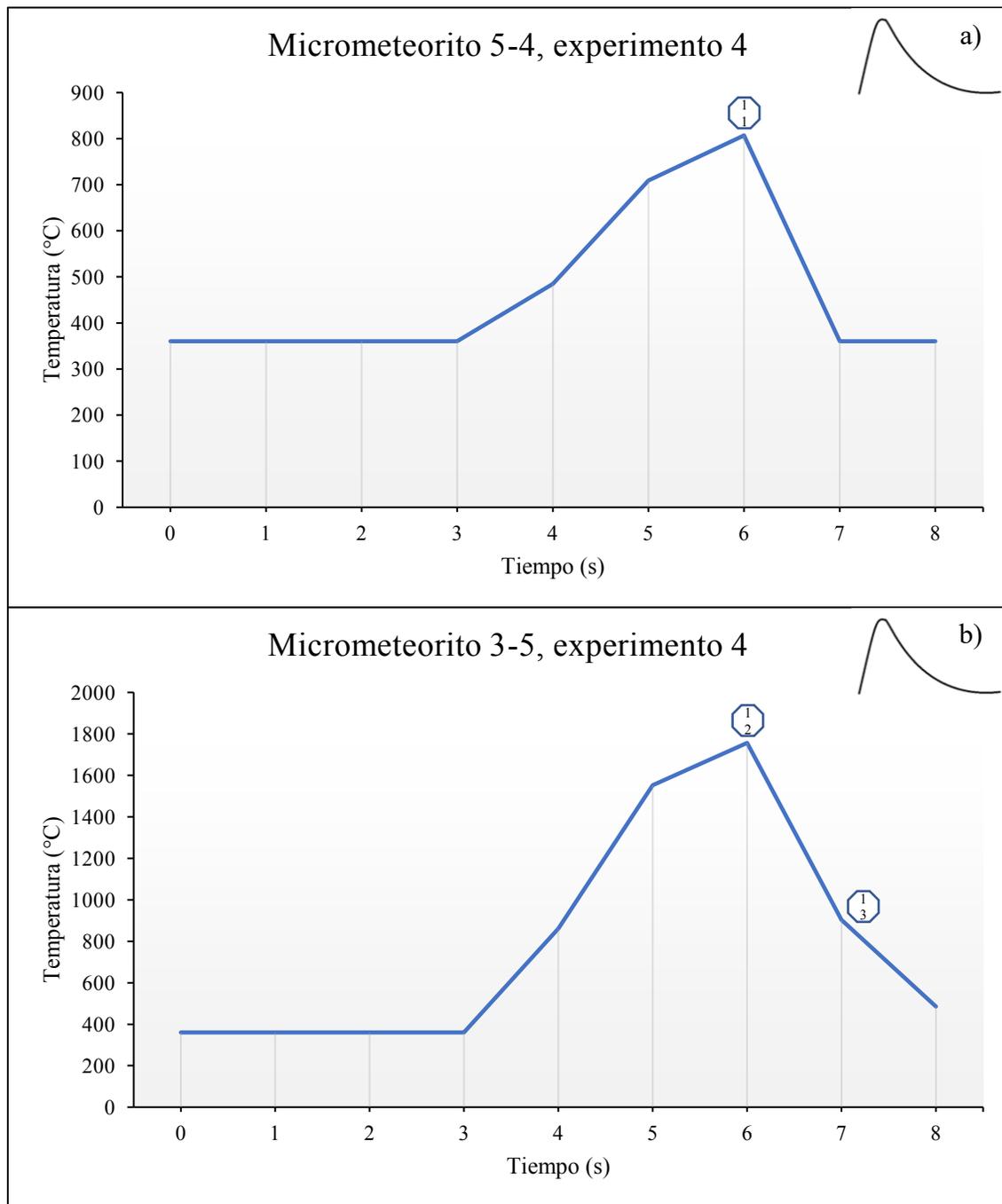
Los micrometeoritos generados en este experimento sobresalen por tener el tiempo total ( $t$ ) de menor duración ya que es de 8 segundos, dentro de los cuales el tiempo medio ( $tm$ ) establecido para cada partícula es de 6 segundos. Lo anterior quiere decir que dentro de los primeros 6 segundos del experimento el material precursor se calentó con la potencia máxima del láser y los 2 segundos restantes corresponden al proceso de enfriamiento.

De los 11 micrometeoritos generados en este experimento se obtuvieron temperaturas con un rango entre 807 °C (temperatura máxima más baja alcanzada) y 1756 °C (temperatura máxima más alta alcanzada), las cuales a diferencia de los experimentos 1 y 2, se encuentran en la mayoría de los casos exactamente en  $tm$  (s)= 6 (Figura 14). Sin embargo, los pocos micrometeoritos que registraron su temperatura máxima alcanzada en un tiempo diferente a  $tm$  lo hicieron con una diferencia cuyo rango es de 1 segundo antes de  $tm$  (en 5 segundos). Al igual que en el experimento 2, hay que mencionar que la temperatura máxima más baja alcanzada del experimento fue de 688 °C (ubicación 5-3 en el portamuestras), sin embargo, este valor no se toma en cuenta debido a que el material precursor no fundió.

El tamaño del material precursor donde se obtuvo una temperatura de 807 °C era de 250  $\mu\text{m}$  y el micrometeorito resultante (5-4) tiene un tamaño aproximado de 710  $\mu\text{m}$ , mientras que el material precursor del cual se obtuvo una temperatura máxima de 1756 °C era de 500  $\mu\text{m}$  obteniendo un micrometeorito (3-5) con tamaño aproximado de 1000  $\mu\text{m}$ . A pesar de no haberse generado un micrometeorito en 5-3, cabe mencionar que el material precursor del cual se obtuvo la temperatura máxima más baja alcanzada del experimento tenía cristales de 250  $\mu\text{m}$  de tamaño.

Al ver los micrometeoritos bajo la lupa binocular, se observan múltiples formas y diferentes grados de fusión. En el caso de las partículas que registraron las temperaturas máximas más alta y baja (3-5 y 5-4 respectivamente) se aprecia que solo uno de los dos cristales agregados (olivino para 3-5, piroxeno para 5-4) fundieron de forma parcial, por ende, los micrometeoritos obtenidos terminaron siendo monocristalinos con formas angulosas principalmente y sin desarrollar texturas relevantes (Tabla 8). Por otro lado, los micrometeoritos ubicados sobre columna 1 se crearon consumiendo al menos la mitad del

material precursor y tienen formas redondeadas a subredondeadas con un muy buen desarrollo textural de olivino barrado.



**Figura 14.** Curvas de pulso de calentamiento de los micrometeoritos 5-4 (a) y 3-5 (b) generados en el experimento 4 donde se emplea la temperatura en función del tiempo para ambas partículas. Puede apreciarse en la parte superior derecha de cada gráfica se encuentra el perfil – curva de “onda de choque” ideal. Se resalta el calentamiento progresivo dentro de los primeros 6 segundos ( $t_m$ ) y el enfriamiento rápido de las partículas hasta completar los 8 segundos ( $t$ ). Los polígonos 11 – 13 indican puntos donde posiblemente se presenten diferentes etapas de cristalización en el micrometeorito.

**Tabla 8.** Condiciones y resultados experimentales de los micrometeoritos 5-4 y 3-5 pertenecientes al experimento 4. Las imágenes muestran el micrometeorito experimental resultante posterior al proceso de fusión en su respectivo orificio del portamuestras.  $T_{mx}$  corresponde al tiempo en la temperatura máxima, el cual es necesario para calcular la tasa de enfriamiento y la pendiente. C. T. corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo empleado por el láser de CO<sub>2</sub>.

EXPERIMENTO 4	TAMAÑO (µm)		TEMPERATURA (°C)		TIEMPO			TASA DE ENFRIAMIENTO		C.T. (%)		
	Material precursor	Partícula	Última registrada	Máxima	T(s)	$t_{mx}(s)$	$T_{mx}(s)$	Pendiente	(°C/s)	$E_n$	$E_n T$	
Micrometeorito 5-4		250	710	360	807	8	6	6	-47.49	223.3	95	0.01
Micrometeorito 3-5		500	1000	360	1756	8	6	6	-47.49	698.1	95	0.01

Para los micrometeoritos mencionados anteriormente (5-4 y 3-5), la tasa de enfriamiento calculada fue 223.3 °C/s y 698.1 °C/s respectivamente; mientras que el valor de la pendiente calculada para ambas partículas fue de -47.49. Es evidente que los valores en la tasa de enfriamiento para este experimento son mucho más altos que en los experimentos 1 y 2, y esto se debe al poco tiempo disponible entre  $t_m$  y  $T$  (2 segundos) y al mismo valor de  $T$  en sí; lo cual favorece el proceso de enfriamiento en lapsos de tiempo muy cortos hasta tal punto que puedan denominarse dichos valores como un sobreenfriamiento de la partícula. En el Anexo 4 se encuentran los datos de todos los micrometeoritos obtenidos en el experimento 4.

#### **4.4 COMPONENTE ORGÁNICO Y TEXTURAS**

Aunque los experimentos 1, 2 y 4 estuvieron dedicados en principio a la generación de micrometeoritos, el experimento 3 y la columna 6 del experimento 2 se enfocaron exclusivamente en el comportamiento del material orgánico o aminoácido (DL – Alanina) utilizado como material precursor junto con el olivino y enstatita. El comportamiento de la alanina se describe a continuación en tres secciones, ya que la cantidad y tiempos utilizados en la columna 6 del experimento 2 y el experimento 3 fueron diferentes; además, se describen brevemente las características del aminoácido remanente en los experimentos 1, 2 y 4 junto con los cristales precursores que no fundieron en el proceso.

##### **4.4.1 Experimento 2 – columna 6**

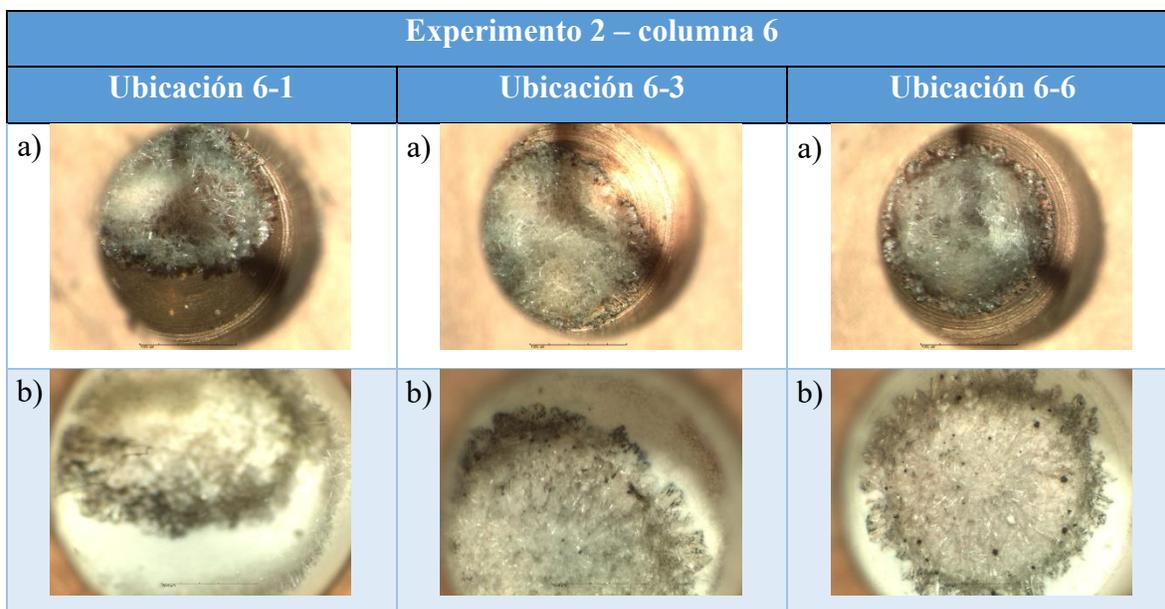
Al finalizar el experimento 1 fue evidente la ausencia y/o cambio en la forma y textura de la alanina posterior al proceso de fusión, razón por la cual se decidió emplear una de las columnas del portamuestras en el experimento 2 para evaluar más a detalle el comportamiento de la alanina al ser irradiada por el láser de CO<sub>2</sub>. Esto quiere decir que los tiempos utilizados sobre la columna 6 del portamuestras incluyeron todos los tiempos empleados sobre las seis filas en el experimento, es decir, la posición 6-1 fue afectada por  $T(s)= 360$  y  $t_m(s)= 30$ , las posiciones 6-2, 6-3, 6-4 y 6-6 fueron irradiadas con  $T(s)= 240$  y  $t_m(s)= 10$  y sobre la posición 6-5 se empleó  $T(s)= 120$  y  $t_m(s)= 10$ . A diferencia de las otras columnas, donde se agregó 1 µL (1 mg) de alanina, en la columna 6 se agregaron 2 µL (2 mg) de alanina con el fin de reemplazar en parte la ausencia de los silicatos y tener más contenido de aminoácido para evaluar.

Previo al proceso de fusión, los silicatos con alanina estuvieron expuestos 22 horas bajo luz ultravioleta con el fin de mejorar la adherencia del aminoácido a los silicatos (columnas 1 – 5) pero la alanina de la columna 6 se agregó aproximadamente 15 minutos antes de llevar a cabo el experimento. Debido a que la alanina cristaliza en contacto con el medio ambiente sumamente rápido, los orificios de la columna 6 estaban llenos de cristales de alanina con hábito tabular y acicular (Figura 15).

Durante el desarrollo del experimento y gracias a una ventana en la cámara de fusión, hay una cámara de vídeo que permite ver lo que está pasando en el interior durante el experimento, y se evidenció que las altas temperaturas que alcanzaban los silicatos ubicados en orificios contiguos durante su irradiación afectaban los demás orificios donde no se había irradiado y, por ende, la alanina allí ubicada reaccionaba levemente. Una vez finalizado el experimento, los cambios en la alanina fueron bastante evidentes y muy parecidos a los remanentes de los demás orificios del portamuestras.

Donde antes había cristales euhedrales tabulares y aciculares de alanina, ahora había una capa blanca levemente compacta hacia el fondo de los orificios del portamuestras (similar al talco), sin embargo, hacia el exterior de las paredes del orificio e inclusive saliendo de ellos se encontraba un material blanco algodonoso que bajo la lupa binocular lucían como “copos” compuestos de finos cristales aciculares (Figura 15). De igual forma, era evidente el sector donde el láser de CO<sub>2</sub> había apuntado en los orificios con alanina, ya que se resaltaba un borde casi negro dentro del cual había (para el momento de la observación bajo la lupa binocular) cristales tabulares y aciculares como los que habían antes de ser irradiados. A pesar de que mucho del material generado posterior a la irradiación parecía alanina, no había seguridad de que el material blanco compacto y algodonoso fuera el aminoácido.

En cuanto a los valores de temperatura alcanzados, la ubicación 6-2 alcanzó un valor máximo de 427 °C mientras que los demás registraron 361 °C. Cabe resaltar que la temperatura mínima que alcanza a registrar el pirómetro es de 360 °C (300 °C si no hubiera corrección por ángulo), por lo tanto, se deduce que la alanina se descompone mucho antes de que el pirómetro pueda registrar cambios térmicos o los tiempos de exposición fueron bastante largos para lograr registrar algún tipo de cambio.



**Figura 15.** Imágenes bajo la lupa binocular de las ubicaciones 6-1, 6-3 y 6-6 del portamuestras con presencia solo de DL – Alanina. La fila superior muestra el hábito de los cristales de alanina antes de ser sometidos al proceso de fusión. La fila inferior muestra el material transformado posterior al proceso de fusión. Nótese que en 6-1 (b) se enfoca en la parte superior del orificio y en 6-3 (b) y 6-6 (b) se enfoca en base del orificio.

Con base en lo anterior y gracias a la facilidad de replicabilidad, se realizó otro experimento dedicado específicamente a analizar el comportamiento de la alanina durante el proceso de fusión y los aparentes cambios morfológicos que presenta después, con las debidas precauciones tomadas en cuenta durante las observaciones hechas en este experimento.

#### 4.4.2 Experimento 3

En este experimento solo se utilizaron 7 de los 36 orificios del portamuestras, esta vez distribuyendo la ubicación de los puntos de irradiación (1-1, 1-4, 3-6, 4-3, 6-2, 6-4 y 6-6) de manera que el calor generado en determinado orificio no afectara las demás muestras, ya que en el experimento 2 se comprobó que la alanina es bastante susceptible al calor del láser. De igual forma, los tiempos utilizados para el experimento se redujeron considerablemente, siendo  $T(s)=30$  y  $tm(s)=6$ . Por último, el contenido agregado de alanina a cada orificio del portamuestras se mantuvo en  $2\ \mu\text{L}$  (2 mg).

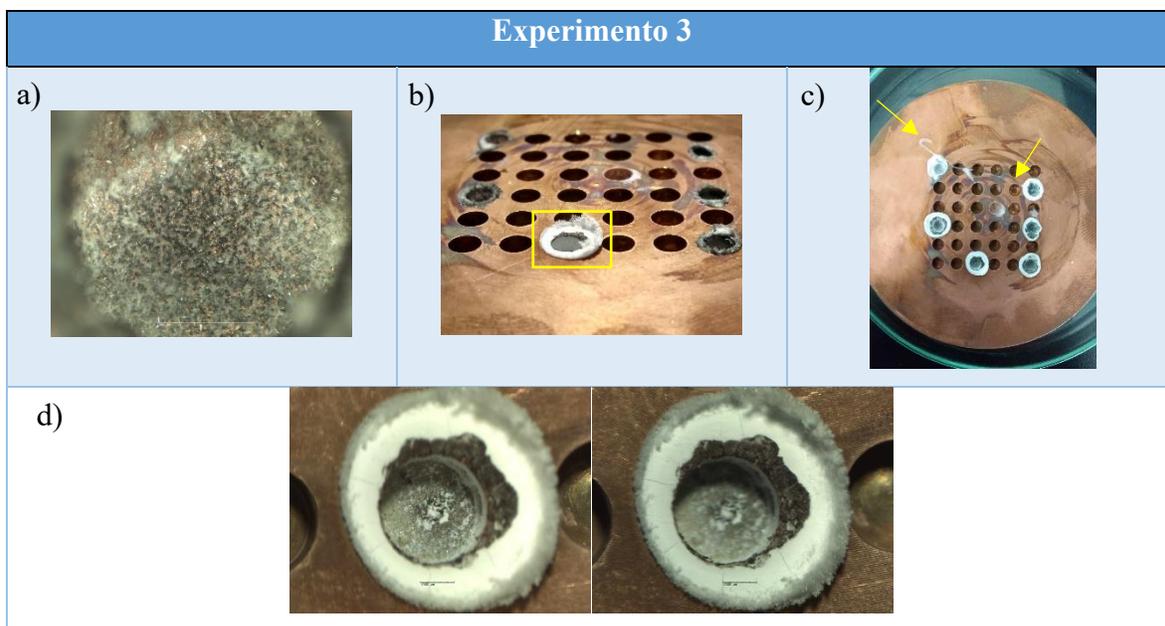
Previo al proceso de fusión, se agregó la alanina en sus respectivos orificios, pero esta vez se dejó expuesta bajo luz ultravioleta durante 21 horas, para ver si el proceso de

cristalización y los cristales como tal cambiaban su hábito o forma de alguna manera. El único cambio evidente bajo la lupa binocular fue el color y tamaño de los cristales, ya que eran mucho más pequeños que cuando se dejaron cristalizar normalmente (Figura 16) y presentaban una coloración blanca con tonalidades oscuras, sin embargo, su forma y hábito siguió siendo el mismo. Antes de ser irradiadas, se llevó la alanina de la ubicación 4-3 para espectroscopía infrarroja para ver si había algún cambio en su estructura o composición.

Durante el desarrollo del experimento y utilizando de nuevo la cámara de vídeo pudo observarse directamente y de manera clara el proceso de transformación de la alanina al ser irradiada por el láser de CO<sub>2</sub>, evidenciando que la volatilización del aminoácido sucede de un estado sólido a gaseoso casi inmediata. No obstante, al analizar los valores registrados por el pirómetro se confirmó que todas las ubicaciones tenían valores máximos de 361 °C, lo cual indica que la temperatura a la cual la alanina reacciona y se volatiliza debía ser menor a 360 °C.

En cuanto a los cambios en la forma de la alanina, estos fueron bastante notorios ya que al igual que en el experimento anterior, donde había cristales tabulares y aciculares ahora se encontraba una cantidad pequeña de polvo blanco compacto (similar al talco) en la base del orificio y abundante hacia las paredes del orificio del portamuestras, y el material blanco algodonoso sobresalía mucho más hacia los bordes y hacia arriba, hasta tal punto que durante la irradiación en la ubicación 1-1, una hilera de dicho material algodonoso salió expedido verticalmente y luego cayó sobre el portamuestras (Figura 16). El desarrollo de cristales posterior a la irradiación en la zona de polvo blanco no fue tanta como en la zona del material algodonoso, donde pequeñas agujas hacían parte de dicha textura.

Debido a que el comportamiento del aminoácido y el desarrollo textural posterior fueron similares para ambos experimentos, se tomó cantidad suficiente tanto del material blanco compacto como del material blanco algodonoso y se llevaron a análisis químicos para comprobar que si seguía siendo alanina o si el aminoácido había sufrido modificaciones estructurales.



**Figura 16.** Imágenes bajo la lupa binocular del portamuestras con DL – Alanina en 7 de los 36 orificios. a) Cristales pequeños de alanina después de haber sido expuesta a luz UV, pero antes del proceso de irradiación. Compárese el tamaño cristalino con respecto a las imágenes de a) en la Figura 15. b) Ubicación 3-6 del portamuestras (encerrado en amarillo) que señala la diferencia entre un orificio irradiado con otros que no. c) Portamuestras con los respectivos orificios irradiados. Nótese el hilo de material algodonoso (señalado con las flechas) ubicado sobre las posiciones 1-1 y 6-2. d) Acercamiento de la ubicación 3-6 donde se aprecia la transformación de la alanina en el material blanco compacto (izq.) y el material algodonoso junto con su relieve (der.).

#### 4.4.3 Experimentos 1, 2 y 4

Dado que la DL – Alanina hace parte de los materiales precursores utilizados para la generación de los micrometeoritos experimentales, es necesario describir sus características posteriores a la irradiación con el láser de CO<sub>2</sub> en los experimentos 1, 2 y 4. La primera cualidad que comparten estos tres experimentos es que, independiente del tiempo de exposición al láser, en ninguno de ellos se generó material blanco con textura “algodonosa” hacia las paredes y la base de los orificios del portamuestras; no obstante, hacia los bordes y tan solo en algunos orificios se formó alanina con dicha textura, aunque no tan predominante como se observó en el experimento 3. De manera contraria, el polvo blanco compacto era el material predominante hacia las paredes y base de los orificios del portamuestras (Figura 17).



**Figura 17.** Imágenes de algunos orificios del portamuestras donde se aprecia el micrometeorito formado, los silicatos que no fundieron y el aminoácido remanente posterior al proceso de fusión. Nótese que el aminoácido remanente no se filtra debajo de los micrometeoritos experimentales o cristales de más de 250  $\mu\text{m}$  (experimentos 1 y 2, columna derecha) mientras que en los cristales de menos de 250  $\mu\text{m}$  se conserva intersticialmente.

Otra cualidad que comparten los tres experimentos es que el polvo blanco compacto está compuesto por cristales muy finos del aminoácido y de cierta manera bordean los silicatos que no fundieron dentro del portamuestras; es decir, el aminoácido se esparce por la base y paredes del orificio del portamuestras sin meterse debajo de los silicatos cuyo tamaño fuera mayor a los 250  $\mu\text{m}$ . Por el contrario, cuando había cristales con tamaño menor a 250  $\mu\text{m}$  se observó que el aminoácido de alguna forma se conserva de manera intersticial entre los silicatos, pero jamás debajo de ellos.

## 4.5 ANÁLISIS

### 4.5.1 Espectroscopía Infrarroja

Para corroborar si los silicatos utilizados para la formación de los micrometeoritos habían sufrido algún cambio cristaloquímico al haber sido sometidos a tan altas temperaturas (incluyendo la confirmación de adherencia y supervivencia del aminoácido), fue necesario usar espectroscopía infrarroja con un rango de lectura entre 4000 y 650  $\text{cm}^{-1}$  (infrarrojo medio). Para estos análisis las partículas fueron elegidas de manera aleatoria, seleccionando seis muestras del experimento 1 (1-4, 2-2, 3-2, 4-2, 5-3 y 6-2), tres muestras del experimento 2 (3-1, 4-2 y 5-6), una muestra del experimento 3 (4-3) y tres muestras del experimento 4 (1-4, 3-5 y 5-5); dando así un total de 13 análisis.

Según Ostrooumov (2007) y el software público [CrystalSleuth](#) (Laetsch y Downs, 2006), el olivino (forsterita) tiene un rango de bandas de reconocimiento destacables entre

1050 – 750  $\text{cm}^{-1}$ , y para las muestras al menos 3 bandas importantes fueron reconocidas (978, 879 y 837  $\text{cm}^{-1}$ ) lo cual nos permite tener un espectro base del olivino (Figura 18) y, de presentarse algún cambio en las partículas, tener con qué compararlo.

De igual forma, el piroxeno (enstatita) se caracteriza por tener un rango de bandas destacables entre 1125 – 650  $\text{cm}^{-1}$  (Ostrooumov, 2007; Laetsch y Downs, 2006) y en las muestras experimentales al menos se reconocieron cuatro bandas importantes (1061, 923, 847 y 692  $\text{cm}^{-1}$ ) lo que permitió tener un espectro base del piroxeno (Figura 18) para poder comparar con un posible cambio en la composición mineralógica de los micrometeoritos.

En cuanto a la alanina se refiere, Flett (1963), Cross y Jones (1969) y Anitha y Muruganatham (2014) indican que este aminoácido tiene un rango de bandas importantes entre 4000 – 650  $\text{cm}^{-1}$ , del cual las señales registradas menores a 1500  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a la región del espectro característico del mineral (bandas que surgen de la deformación compleja en la molécula) y las señales entre 4000 – 1500  $\text{cm}^{-1}$  hacen parte de la región de los grupos funcionales del aminoácido (manifestaciones regionales características de tipos específicos de enlaces). Dichas características fueron buscadas e interpretadas con la alanina utilizada en los experimentos, lo cual nos permite tener un espectro base (Figura 19) para evaluar si alguna banda propia del aminoácido aparece en los micrometeoritos y si los materiales blancos de diferentes texturas obtenidos en el experimento 3 corresponden o no a DL – Alanina.

El factor más sencillo de comprobar con los análisis de espectroscopía infrarroja corresponde a los cambios de fase que presentó la alanina y las texturas encontradas en el portamuestras posteriores al experimento 3. Teniendo el espectro base de la alanina como estándar, se tomó una cantidad suficiente tanto del material blanco compacto como del material blanco algodonoso con el fin de obtener sus respectivos espectros. Una vez finalizado el proceso, los espectros resultantes fueron comparados entre sí junto con el espectro base de la alanina, corroborando que dichos materiales seguían correspondiendo al aminoácido, sin embargo, cabe resaltar que fueron evidentes algunas diferencias en determinados puntos del espectro (Figura 20).

Una de las diferencias entre las bandas está relacionada con la transmitancia. La transmitancia (T) hace referencia a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo en determinada

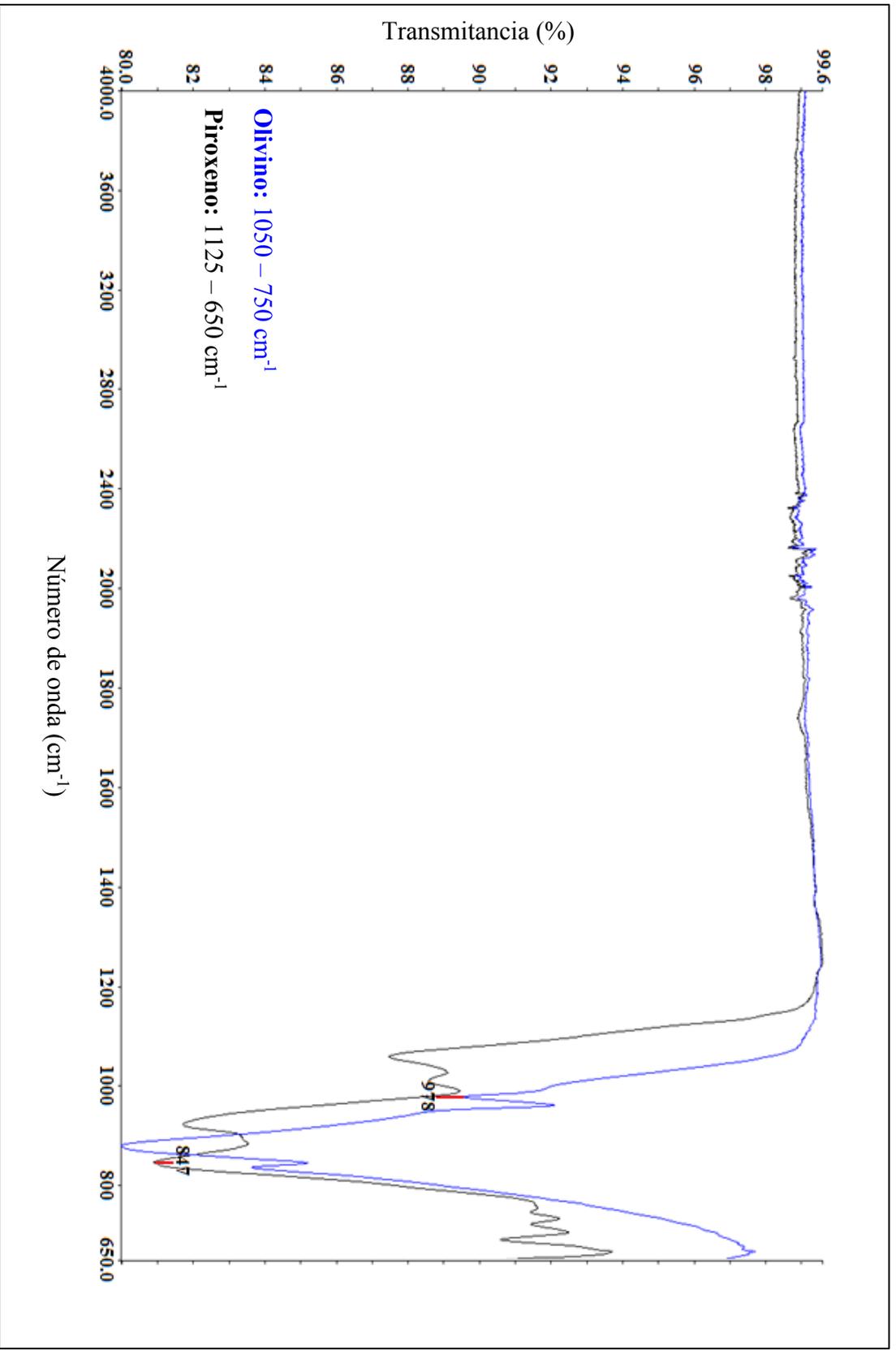
cantidad de tiempo y longitud de onda, siendo el cociente entre la cantidad de luz transmitida por la muestra ( $I$ ) y la cantidad total de luz incidente ( $I_0$ ). Dicho valor puede expresarse en porcentaje al ser multiplicado por 100, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$T[\%] = \frac{I}{I_0} \cdot 100$$

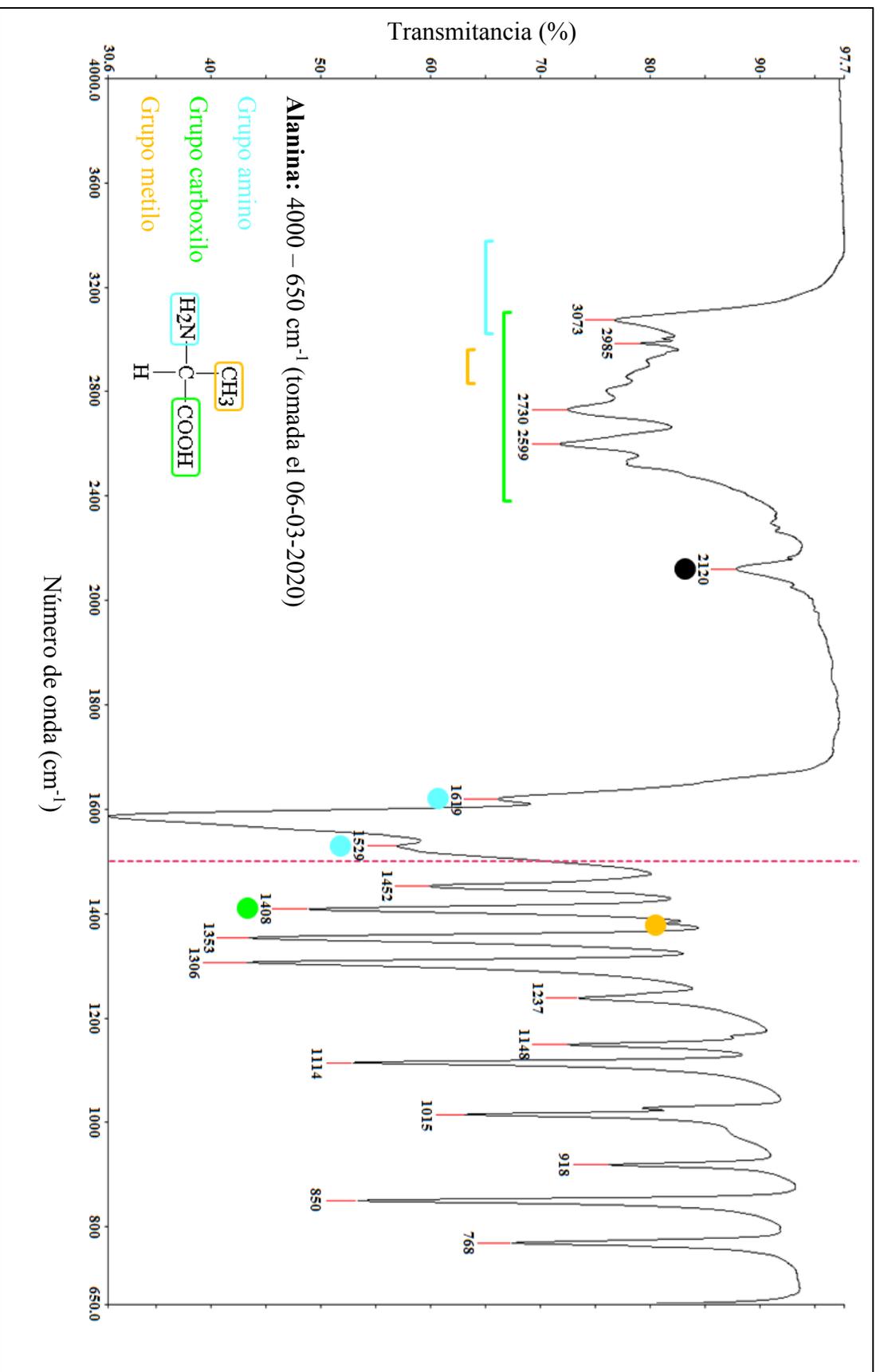
Este valor puede verse afectado por la presión del pistón del instrumento durante las mediciones y la superficie de la muestra al momento del análisis. Debido a que la fuerza aplicada del pistón durante todo el análisis infrarrojo fue de 140, lo anterior se fundamentaría con la textura de la muestra; lo que tiene sentido si se tiene en cuenta que los espectros de la alanina “algodonosa” tienen valores de transmitancia más altos que el de la alanina “compacta”.

La otra diferencia encontrada entre los espectros indica que a pesar de que tener un comportamiento de lectura similar entre ellos, algunas bandas tienen variaciones en la pendiente o curvaturas leves en determinado número de onda como se muestra en la Figura 20. Esto puede corresponder a leves modificaciones en el ordenamiento de la estructura o en los enlaces moleculares de la alanina posterior al proceso de fusión, ya que se trata de un mismo material que desarrolla texturas distintas al ser sometido a temperaturas muy altas.

De igual forma, cabe mencionar que el espectro de la alanina irradiada con luz UV en el experimento 3 (4-3) fue comparada con el espectro base de la alanina, dando como resultado el mismo patrón de bandas, con leves diferencias en los valores de transmitancia ya que la alanina del experimento 3 se dejó cristalizar durante 21 horas.



**Figura 18.** Espectros infrarrojos de los cristales de olivino (azul) y piroxeno (negro) utilizados como material precursor en la generación de micrometeoritos. Ambos cristales fueron pulverizados previamente para una mejor lectura de parte del instrumento, las cuales se realizaron de manera independiente y sin mezclarse entre sí.



**Figura 19.** Espectro infrarrojo de la DL – Alanina utilizada como material orgánico precursor en la generación de micrometeoritos. Para señalar cada grupo funcional del aminoácido se representa en azul claro (grupo amino), verde claro, (grupo carboxilo) y naranja (grupo metilo). Los puntos y líneas de colores indican bandas y rangos importantes dentro del espectro con lo que se reconoce cada grupo funcional. La línea punteada separa la región de la huella dactilar ( $< 1500 \text{ cm}^{-1}$ ) con la región de los grupos funcionales ( $4000 – 1500 \text{ cm}^{-1}$ ).

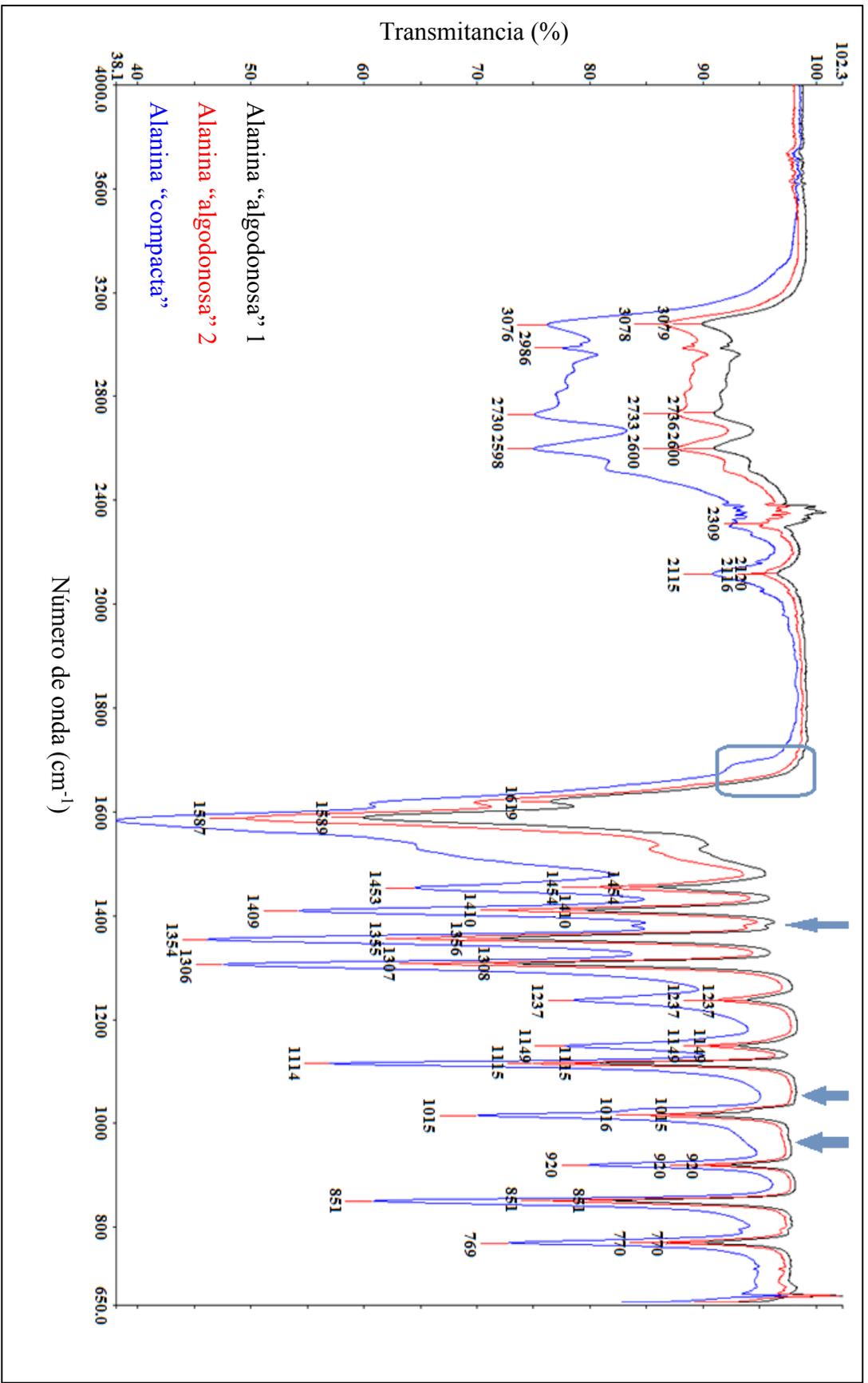
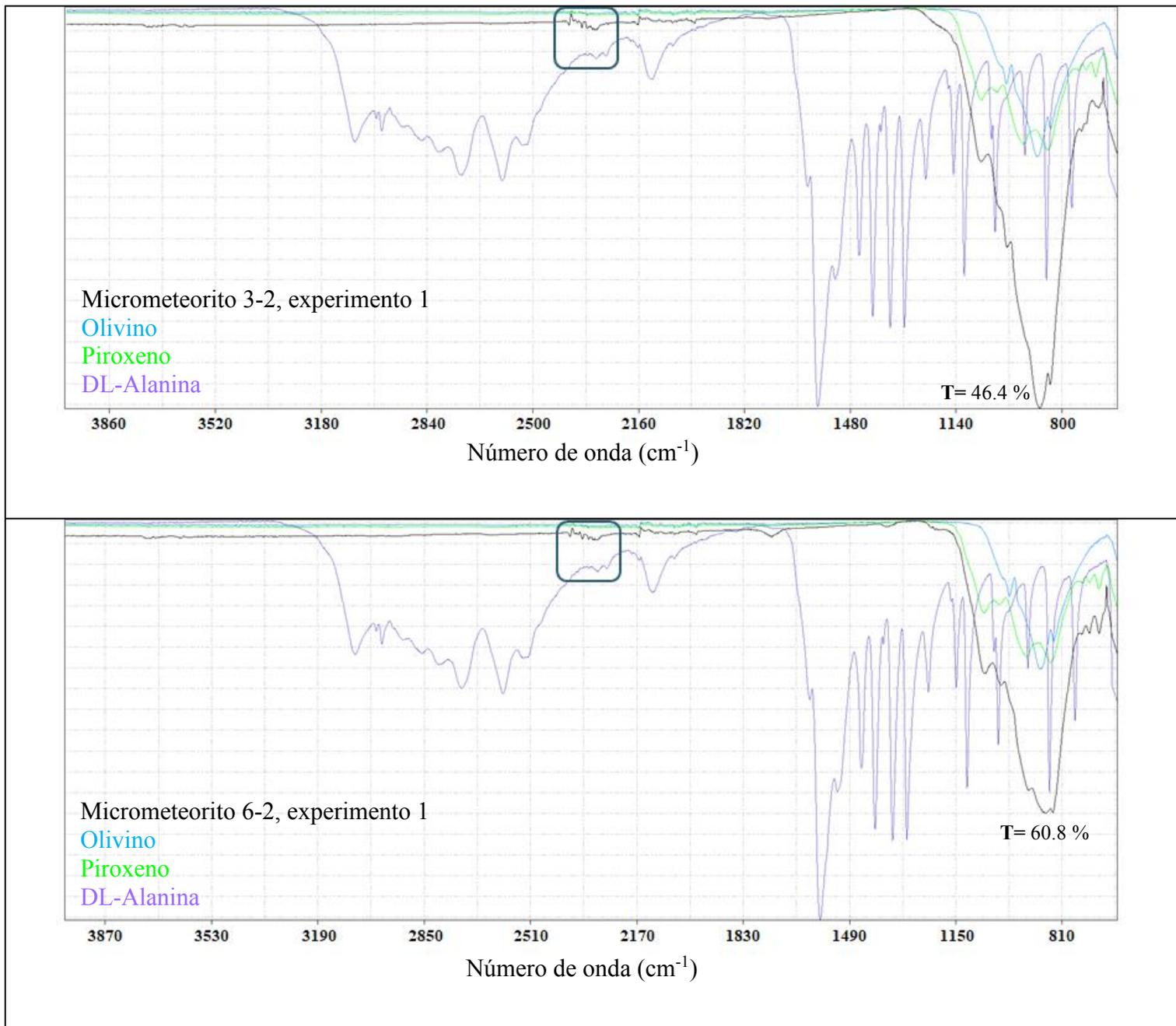


Figura 20. Espectros infrarrojos de la DL – Alanina posterior al experimento 3. Dos espectros corresponden a la alanina con textura “algodonosa” (negro y rojo) y un espectro representa la alanina “compacta” (azul). Nótese que, a pesar de las diferencias en el porcentaje de transmitancia, los espectros siguen un patrón en cuanto a su forma, sin embargo, las flechas y el rectángulo gris azulado resaltan leves cambios notorios entre los espectros negro – rojo y el azul.

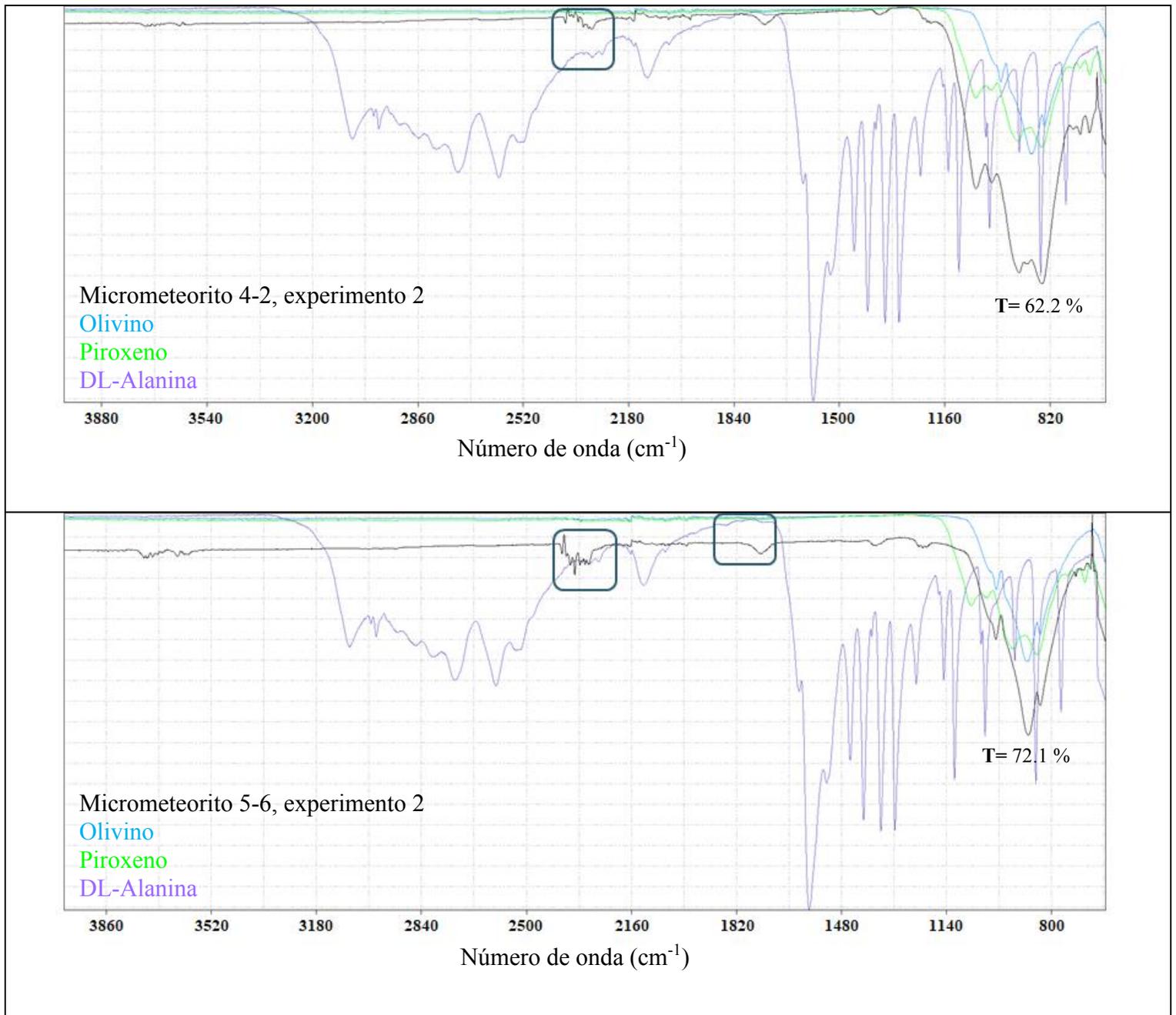
El factor de mayor importancia dentro del análisis infrarrojo era confirmar que la alanina resistió de alguna manera y cantidad en los micrometeoritos experimentales, ya que el aminoácido fue sometido a temperaturas muy altas. Para ello, los micrometeoritos previamente mencionados fueron molidos, cuidando que partículas ajenas que pudieran estar en el ambiente cayeran en el polvo y afectaran los espectros finales. Como resultado, 12 espectros infrarrojos procedentes de los micrometeoritos fueron obtenidos, revisados, sobrepuestos y comparados minuciosamente con los espectros base del olivino, piroxeno y alanina para tener certeza al momento de indicar una banda propia de la alanina en el micrometeorito; destacando dos espectros de los experimentos 1, 2 y 4.

El espectro infrarrojo del micrometeorito 3-2 del experimento 1 muestra una predominancia en el contenido de olivino y piroxeno evidente entre los  $1300 - 650 \text{ cm}^{-1}$ , mientras que en el rango entre  $2370 - 2270 \text{ cm}^{-1}$  algunas bandas del fundido corresponden con la de la alanina. Para el micrometeorito 6-2 del mismo experimento se observa un comportamiento similar, ya que entre  $1150 - 650 \text{ cm}^{-1}$  resalta el contenido de los silicatos mientras que entre  $2315 - 2270 \text{ cm}^{-1}$  existe una correlación entre las bandas del fundido y del aminoácido (Figura 21). Teniendo en cuenta la comparación entre los espectros y sus respectivos valores de transmitancia se puede ver que la presencia del aminoácido es muy baja para los micrometeoritos de este experimento.

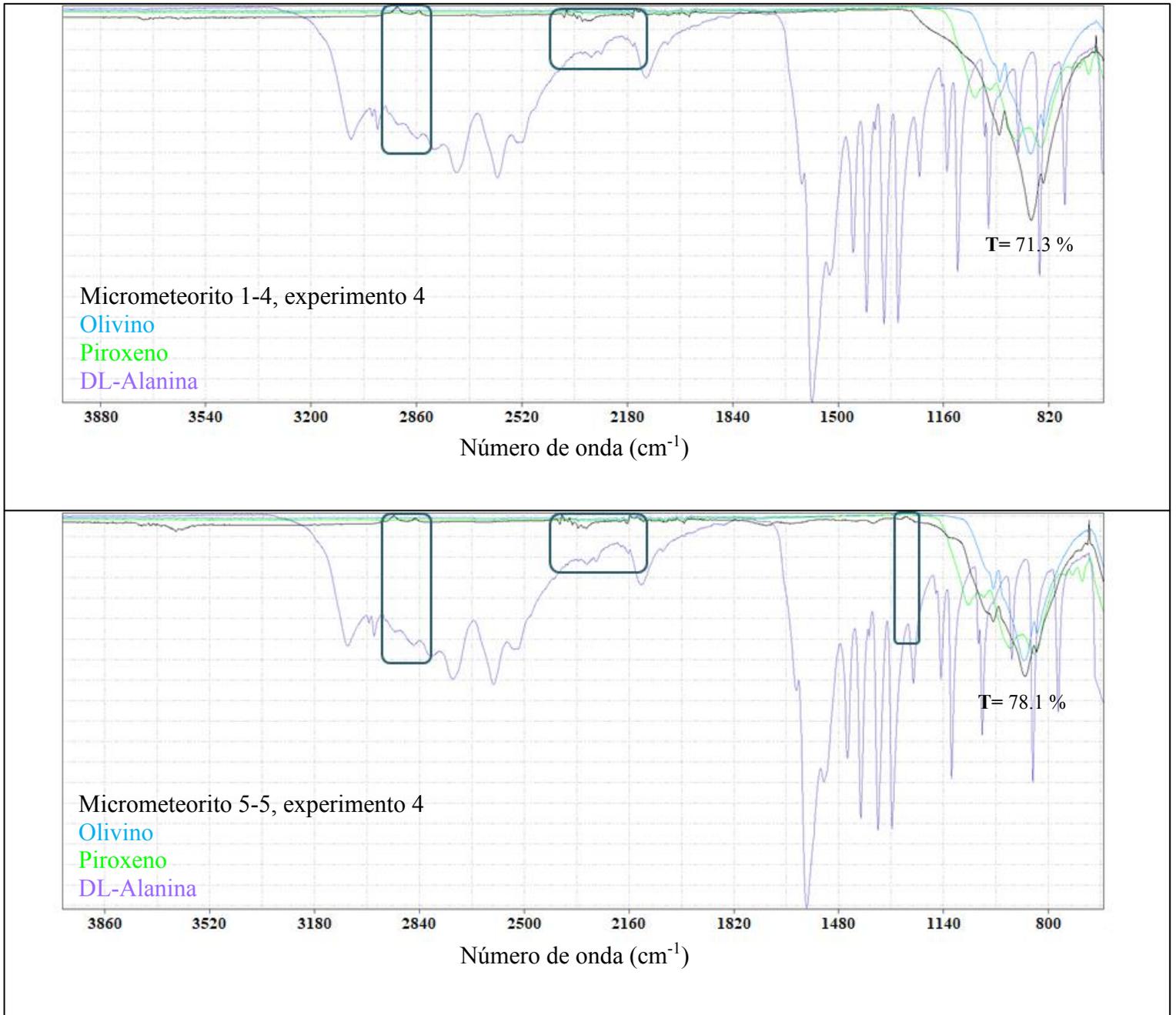
El espectro infrarrojo del micrometeorito 4-2 del experimento 2 indica un comportamiento casi idéntico únicamente en el contenido de piroxeno, reconocible entre los  $1140 - 650 \text{ cm}^{-1}$ , mientras que entre  $2325 - 2280 \text{ cm}^{-1}$  puede apreciarse una relación entre los espectros del fundido y la alanina. En el micrometeorito 5-6 del mismo experimento se presenta un patrón prácticamente igual entre  $1140 - 650 \text{ cm}^{-1}$  relacionado solo en el contenido de olivino, sin embargo, entre  $1760 - 1725 \text{ cm}^{-1}$  y entre  $2320 - 2270 \text{ cm}^{-1}$  se evidencia una correlación entre las bandas del aminoácido y del micrometeorito (Figura 22). Con base en lo anterior, es evidente que el reconocimiento de bandas similares entre la alanina y los micrometeoritos de este experimento son un poco más notorias que las del experimento 1, sin embargo, la amplitud en los valores de transmitancia sigue siendo bajas, lo cual indica que la conservación del aminoácido en las partículas de este experimento es baja.



**Figura 21.** Espectros infrarrojos de los micrometeoritos 3-2 (superior) y 6-2 (inferior) en comparación directa con los espectros infrarrojos base del olivino (azul), piroxeno (verde) y la DL – Alanina (lila). El rectángulo muestra la zona en la cual el espectro del micrometeorito y el de la DL – Alanina son similares, teniendo en cuenta el número de onda y la amplitud en los valores de transmitancia (T).



**Figura 22.** Espectros infrarrojos de los micrometeoritos 4-2 (superior) y 5-6 (inferior) en comparación directa con los espectros infrarrojos base del olivino (azul), piroxeno (verde) y la DL – Alanina (lila). Los rectángulos muestran la zona en la cual el espectro del micrometeorito y el de la DL – Alanina son similares, teniendo en cuenta el número de onda y la amplitud en los valores de transmitancia (T).



**Figura 23.** Espectros infrarrojos de los micrometeoritos 1-4 (superior) y 5-5 (inferior) en comparación directa con los espectros infrarrojos base del olivino (azul), piroxeno (verde) y la DL – Alanina (lila). Los rectángulos muestran la zona en la cual el espectro del micrometeorito y el de la DL – Alanina son similares, teniendo en cuenta el número de onda y la amplitud en los valores de transmitancia (T).

Para el experimento 4, el espectro infrarrojo del micrometeorito 1-4 indica que estaba formado en su mayoría de olivino y en muy bajas cantidades de piroxeno debido a la comparación de las bandas entre  $1140 - 650 \text{ cm}^{-1}$ , sin embargo, se encontraron al menos dos zonas en el espectro donde las bandas de la alanina y el micrometeorito se correlacionan bastante bien (entre  $2938 - 2838 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 2300 \text{ cm}^{-1}$  y  $\sim 2183 \text{ cm}^{-1}$ ). Para la muestra 5-5 sucede algo similar, ya que se reconoce el olivino en mayores proporciones con respecto al piroxeno entre  $1140 - 650 \text{ cm}^{-1}$ , no obstante, se registran al menos cuatro zonas donde hay similitudes y correlaciones altas entre el espectro del fundido y la alanina (entre  $2925 - 2840 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 2305 \text{ cm}^{-1}$ , entre  $2190 - 2180 \text{ cm}^{-1}$  y  $\sim 1255 \text{ cm}^{-1}$ ) (Figura 23). Lo anterior indica que los parámetros experimentales establecidos para el desarrollo del experimento 4 jugaron un papel importante en la conservación del aminoácido en los micrometeoritos experimentales generados, y a pesar de que los valores de transmitancia indican que no es en cantidades considerables, es evidente que si es mayor con respecto a los demás experimentos.

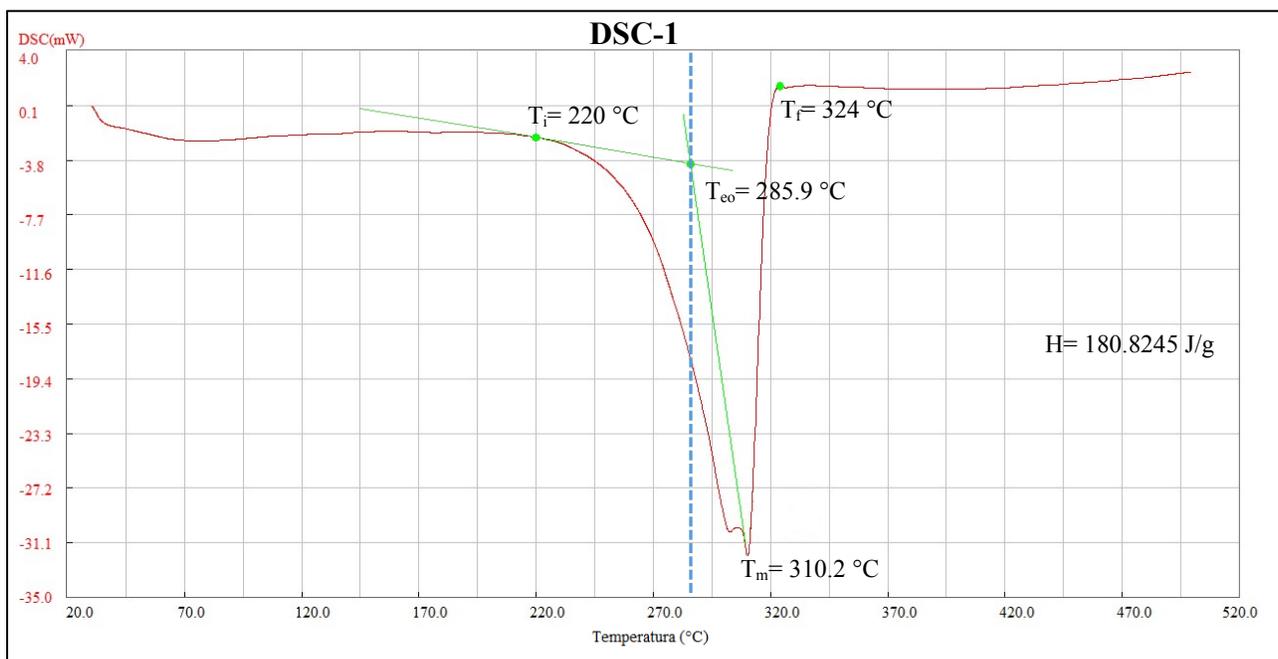
#### **4.5.2 Calorimetría Diferencial de Barrido – DSC**

Conocer el punto de fusión y comportamiento de la DL – Alanina es de suma importancia, ya que durante los experimentos 2 y 3 el pirómetro casi siempre registró temperaturas inferiores a  $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que podía significar que el aminoácido se estaba sublimando tan pronto el láser de  $\text{CO}_2$  hacía contacto con el aminoácido, disminuyendo la posibilidad de que pudiera incorporarse adecuadamente a la superficie de los silicatos. Cuatro análisis de DSC se llevaron a cabo, uno de ellos en un crisol de aluminio que soporta hasta  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  donde se evaluó el comportamiento de la alanina pura. Los tres análisis restantes se realizaron en crisoles de cerámica que resisten hasta  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  donde se analizó la alanina en estado sólido mezclada con los silicatos (olivino y piroxeno), alanina en solución (conc. 90%) mezclada con los silicatos y se trituro el micrometeorito 4-5 del experimento 1 para ver si había algún indicio de conservación de la alanina.

En el análisis de la alanina pura (DSC-1) el instrumento se programó para que alcanzara un máximo de  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  con una tasa de calentamiento de  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  sin ningún tiempo de retención en la temperatura máxima, donde fueron utilizados  $15.0 \text{ mg}$  de alanina en el desarrollo del análisis mientras que la temperatura ambiente era de  $29.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura inicial del instrumento era  $30.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . En la Figura 24 se aprecia el comportamiento

del aminoácido donde se grafica energía (mW) con relación a la temperatura (°C). Entre los 20 y 70 °C se observa un período leve de inestabilidad que corresponde a la evaporación del agua<sub>(g)</sub> contenida en el crisol al inicio del experimento, seguido de un período de equilibrio en el cual no se destaca ningún cambio en la curva hasta los 220 °C ( $T_i$ ). En ese momento se da inicio a la formación de una curva endotérmica, lo que indica un ingreso de flujo de calor o energía en el sistema que se traduce en el inicio de un cambio físico de la alanina.

A partir de ese punto, es posible determinar la temperatura de fusión del aminoácido la cual inicia en 285.9 °C ( $T_{eo}$ ), en 310.2 °C ( $T_m$ ) y a -32.83 mW se registra el punto mínimo del pico de fusión y 324 °C ( $T_f$ ) es la temperatura donde finaliza la fusión del aminoácido sin quedar remanente alguno. Desde ese punto hasta 500 °C la curva se comporta de forma constante sin experimentar más cambios calorimétricos. La entalpía (H) mide los cambios térmicos o flujos de energía que entran o salen del sistema a presión contante y ésta se calcula hallando el área bajo la curva de la gráfica generada durante el análisis, la cual tuvo un valor de 180.82 J/g.



**Figura 24.** Curva calorimétrica endotérmica de la DL – Alanina. Se indican los puntos de la curva y los valores más relevantes como la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura de inicio de fusión ( $T_{eo}$ ), temperatura del punto mínimo del pico de fusión ( $T_m$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía (H). Nótese que para hallar  $T_{eo}$  se usa la intersección de rectas tangentes a la curva con origen en  $T_i$  y  $T_m$  respectivamente.

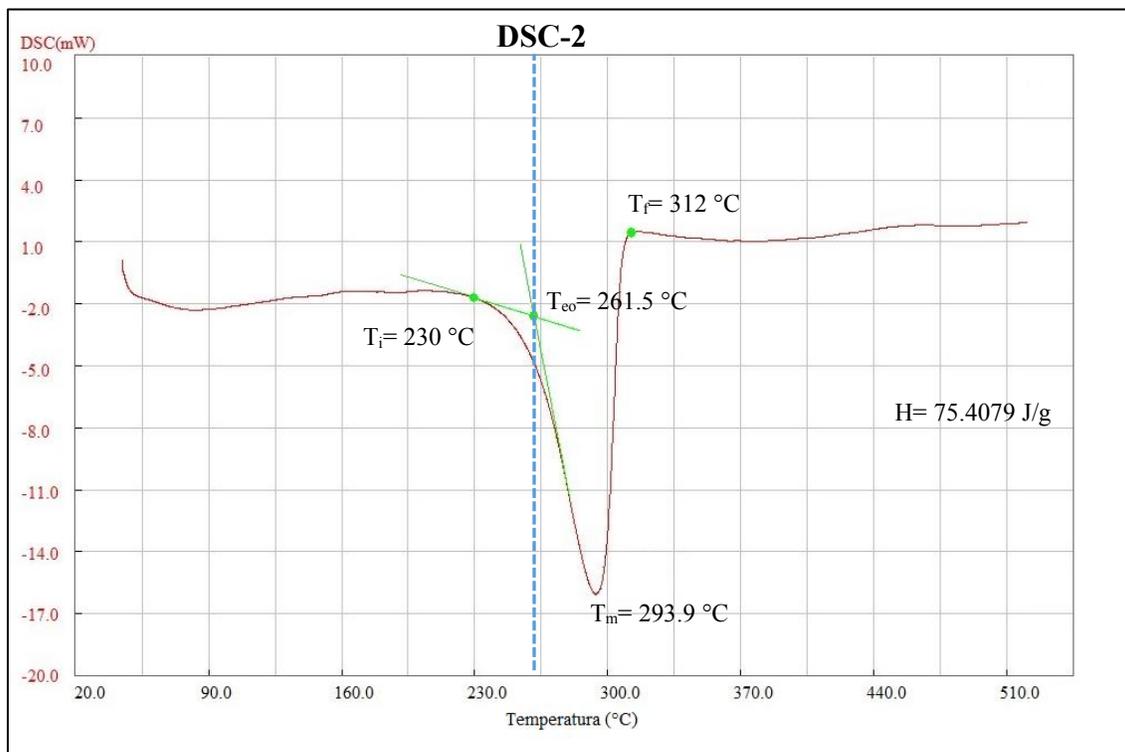
El análisis correspondiente a la alanina<sub>(s)</sub> mezclada con olivino y piroxeno (DSC-2) el instrumento fue programado para que alcanzara un máximo de 700 °C con una tasa de calentamiento de 10 °C/min sin ningún tiempo de retención en la temperatura máxima, donde se utilizaron 10.0 mg de alanina, 5.5 mg de olivino y 5.5 mg de piroxeno para el desarrollo del análisis mientras que la temperatura ambiente era de 33.8 °C y la temperatura inicial del instrumento era 44.3 °C. Cabe mencionar que los silicatos utilizados en la mezcla corresponden a la fracción más fina del tamizado (0.125 mm).

En este caso, entre los 40 y 80 °C se observa una fase que corresponde a la evaporación del agua<sub>(g)</sub> contenida en el crisol al inicio del experimento y continúa un período de equilibrio en el cual no se destaca ningún cambio en la curva hasta los 230 °C ( $T_i$ ). En ese momento inicia la formación de la curva endotérmica que baja progresivamente hasta alcanzar el punto mínimo del pico de fusión registrando valores de 293.9 °C ( $T_m$ ) y -16.08 mW. El inicio de la fusión del aminoácido se registra en 261.5 °C ( $T_{eo}$ ), la temperatura final se marca en 312 °C ( $T_f$ ) y el valor calculado de la entalpía ( $H$ ) fue de 75.40 J/g (Figura 25). Comparando los datos de temperatura y energía con DSC-1, es evidente que se registraron valores menores en DSC-2, sin embargo, el desarrollo de la curva calorimétrica fue bastante similar.

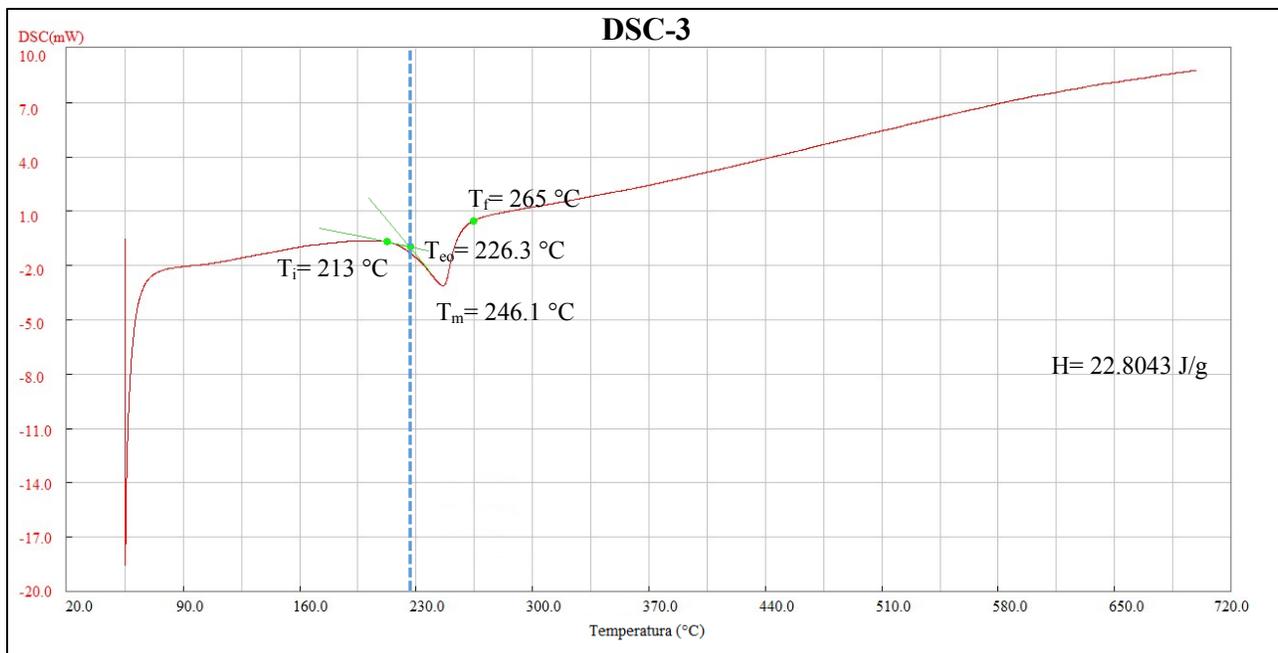
El análisis correspondiente a la alanina<sub>(sol.)</sub> mezclada con olivino y piroxeno (DSC-3) el instrumento también se programó para que alcanzara un máximo de 700 °C con una tasa de calentamiento de 10 °C/min sin ningún tiempo de retención en la temperatura máxima, donde se utilizaron 10.3 mg de alanina concentrada al 90%, 5.0 mg de olivino y 5.0 mg de piroxeno para el desarrollo del análisis mientras que la temperatura ambiente era de 38.0 °C y la temperatura inicial del instrumento era 55.0 °C. Al igual que en DSC-2, los silicatos utilizados en la mezcla corresponden a la fracción más fina del tamizado (0.125 mm).

El comportamiento de esta curva es algo diferente a las demás, ya que a partir de los 55 °C hay un descenso abrupto (primera curva endotérmica) que corresponde a la evaporación del agua<sub>(l)</sub> que hace parte de la solución de alanina; una vez ya no hay agua en el sistema, la curva marca un ascenso progresivo y retoma su equilibrio hasta aproximadamente los 213 °C ( $T_i$ ). A partir de ese punto inicia la formación de la segunda curva endotérmica correspondiente a la alanina, que alcanza el punto mínimo del pico de

fusión registrando valores de 246.1 °C ( $T_m$ ) y aproximadamente -3.5 mW. El inicio de la fusión del aminoácido se registra en 226.3 °C ( $T_{eo}$ ), la temperatura final se marca en 265 °C ( $T_f$ ) y el valor calculado de la entalpía (H) fue de 22.80 J/g (Figura 26). Comparando los datos de temperatura y energía registrados en DSC-1 y DSC-2, es evidente que se registraron valores mucho menores en DSC-3 y la pendiente de la curva de fusión es menos pronunciada respecto a los otros análisis.



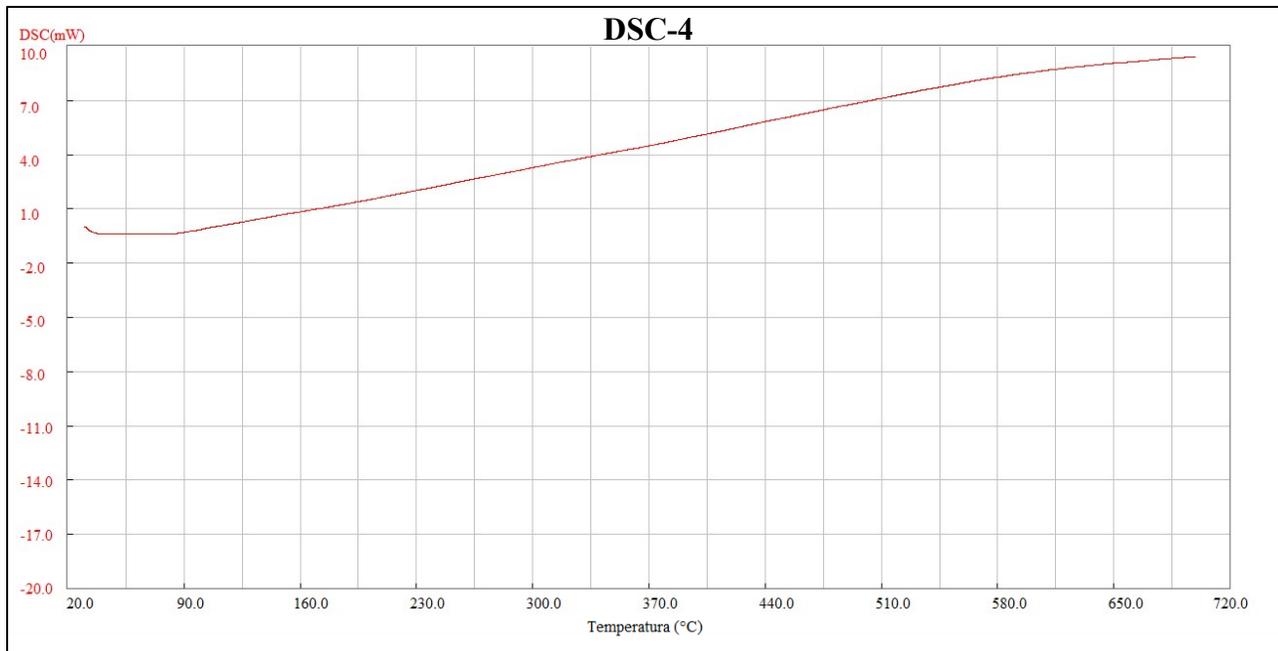
**Figura 25.** Curva calorimétrica endotérmica de la DL – Alanina<sub>(s)</sub> mezclada con olivinos y piroxenos. Se indican los puntos de la curva y los valores más relevantes como la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura de inicio de fusión ( $T_{eo}$ ), temperatura del punto mínimo del pico de fusión ( $T_m$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía (H). Nótese que para hallar  $T_{eo}$  se usa la intersección de rectas tangentes a la curva con origen en  $T_i$  y  $T_m$  respectivamente.



**Figura 26.** Curva calorimétrica endotérmica de la DL – Alanina<sub>(sol.)</sub> mezclada con olivinos y piroxenos. Se indican los puntos de la curva y los valores más relevantes como la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura de inicio de fusión ( $T_{co}$ ), temperatura del punto mínimo del pico de fusión ( $T_m$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía ( $H$ ). Nótese que para hallar  $T_{co}$  se usa la intersección de rectas tangentes a la curva con origen en  $T_i$  y  $T_m$  respectivamente.

El último análisis de calorimetría (DSC-4) se realizó en el micrometeorito 4-5 procedente del experimento 1, donde el instrumento se programó para que alcanzara un máximo de 700 °C con una tasa de calentamiento de 10 °C/min sin ningún tiempo de retención en la temperatura máxima. El peso del micrometeorito triturado fue de 1.3 mg mientras que la temperatura ambiente era de 29.5 °C y la temperatura inicial del instrumento era 30.0 °C. En este caso se esperaba que, si había algo de alanina en la estructura del micrometeorito, esto debía apreciarse en la curva calorimétrica, sin embargo, durante todo el procedimiento la curva tuvo un comportamiento constante sin ningún cambio a lo largo de los 700 °C (Figura 27), por lo que no se registraron valores de entalpía y temperaturas de fusión.

Cabe aclarar que para ninguno de los análisis calorimétricos se presentaron curvas relacionadas con la fusión de los silicatos ya que éstas deberían evidenciarse con temperaturas más altas (superiores a 900 °C), sin embargo, el instrumento no alcanza a soportar dichos valores.



**Figura 27.** Curva calorimétrica del micrometeorito 4-5 generado en el experimento 1. Nótese el comportamiento constante de la curva durante el calentamiento, donde no se evidencia presencia del aminoácido debido a la ausencia de curvas endotérmicas en los primeros 300 °C.

## CAPÍTULO V – DISCUSIÓN

### 5. DISCUSIÓN

#### 5.1 FORMA DE LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES

De acuerdo con Dobrica *et al.* (2012), varios de los micrometeoritos ultracarbonáceos recuperados de la Antártida pertenecientes a la colección CONCORDIA se distinguen tanto por su morfología como por el exceso de contenido de carbono. A pesar de que no mencionan las características morfológicas de manera explícita, algunas imágenes muestran que son partículas subesféricas, subredondeadas y con tonalidades negras; también son finogranulares, irregulares y presentan una textura “esponjosa y suave” tal como indican Duprat *et al.* (2010) y Love y Brownlee (1991). De los 60 micrometeoritos experimentales obtenidos, 12 están clasificados como redondeados (20%), 24 como subredondeados (40%), 12 como subangulosos (20%) y 12 como angulosos (20%) y sus tonalidades varían entre verde y café oscuros debido a los silicatos que los componen mineralógicamente.

Tal y como se ve en la Figura 7, algunas partículas desarrollaron muy buena redondez mientras que otras, aún después del proceso de fusión, exponen los bordes de los cristales precursores. Una forma de explicar lo anterior es que la zona que se ve expuesta de frente al láser de CO<sub>2</sub> es la que recibe de manera directa la irradiación, lo cual se traduce en un mejor desarrollo de esfericidad; contrario a la zona posterior la cual presenta leves irregularidades dado que el láser no alcanza a irradiar de manera completa dicha zona (omitiendo el hecho de que muchas veces el haz del láser no cae directamente sobre el material precursor, lo cual perjudica el aumento de temperatura). Las partículas se fundieron mejor cuando la disposición de los granos precursores era perpendicular al haz del láser, por lo que suponemos que es más efectiva la absorción de la radiación infrarroja y se evitan las reflexiones, el cual es un fenómeno similar al que ocurre durante el análisis de varios métodos espectroscópicos.

Además, al comparar los micrometeoritos experimentales obtenidos con aquellos que provienen directamente del espacio, es evidente que muchos de ellos (especialmente los micrometeoritos fundidos y parcialmente fundidos) presentan una buena esfericidad debido a las altas temperaturas que alcanzan durante su ingreso a la atmósfera; asimismo, cabe recalcar que no todos los meteoroides vienen orientados mientras están ingresando al planeta, es decir, que una sola cara no está recibiendo toda la fricción. Algunos ejemplos de meteoritos orientados son Morito o Lafayette (Grady, 2000), y aunque estos meteoritos son macroscópicos, quiere decir que es posible encontrar micrometeoritos orientados. Sin embargo, la gran mayoría de micrometeoroides vienen girando y rotando durante su trayectoria de ingreso lo cual genera abrasión y altas temperaturas en todas las zonas y caras de la partícula favoreciendo la esfericidad en los micrometeoritos.

Comparando las características morfológicas de los micrometeoritos ultracarbonáceos en las imágenes de Dobrica *et al.* (2012) y las que mencionan Duprat *et al.* (2010) con los micrometeoritos generados experimentalmente, es evidente que ninguna de ellas aplica a las partículas obtenidas, lo cual significa que los micrometeoritos experimentales reproducidos no son ultracarbonáceos morfológicamente hablando, sin embargo, éstos se asemejan más a esférulas cósmicas (MMs fundidos) y MMs gruesogranulares condriticos (MMs sin fundir) con base en la descripción de Genge *et al.* (2008). Sin embargo, en el experimento 3 las estructuras formadas por la alanina irradiada

dieron lugar a texturas de alanina “compacta” y alanina “algodonosa”. Esta última textura recuerda la estructura de los micrometeoritos ultracarbonáceos, a pesar de no haber agregado silicatos al experimento. Por otra parte, cabe mencionar que en los experimentos 2 y 4 en donde se utilizaron silicatos con tamaños menores a 250  $\mu\text{m}$ , los sustratos no fundidos retuvieron el aminoácido. En estos casos, la alanina presentó una textura “compacta” con tamaño de grano muy fino entre los poros de los silicatos, lo cual recuerda de nueva cuenta a los micrometeoritos ultracarbonáceos.

## **5.2 DESARROLLO TEXTURAL EN LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES**

Los micrometeoritos experimentales obtenidos se caracterizan por ser partículas que desarrollaron tres texturas compuestas en primera instancia por la mezcla de cristales silicatados (olivino y piroxeno) y en cierta medida por la alanina, ambos utilizados como material precursor. Como se indica en la sección 4.2, dichas texturas se desarrollaron mejor en unas partículas que en otras ya que son controladas directamente tanto por la temperatura máxima alcanzada como por el tiempo de exposición a la energía del haz del láser, permitiendo un cambio en el hábito de los cristales y en la morfología de la partícula; sin embargo, algunos micrometeoritos obtenidos desarrollaron parcialmente alguna de esas texturas.

Además, se ha encontrado en cóndrulos de meteoritos condriticos y en algunos micrometeoritos fundidos y no fundidos que el olivino y piroxeno desarrollan hábitos y texturas que están directamente relacionadas con la temperatura máxima que alcanzaron (Gooding y Keil, 1981; Genge *et al.*, 2005; Genge *et al.*, 2008;). Dichas texturas son apreciables bajo la lupa binocular y se forman específicamente para cada tipo de silicato, es decir, independiente de la mezcla entre los minerales precursores, los olivinos produjeron texturas tales como los cristales esqueletales (barrados de olivino) de ellos mientras que los piroxenos obtuvieron texturas dendríticas (radiales de piroxeno).

### **5.2.1 Texturas de olivino y piroxeno barrado**

Cervantes de la Cruz *et al.* (2015) mencionan que el espacio, grosor y largo de las barras de olivino puede variar debido a la intensidad de energía irradiada sobre los cristales,

temperatura máxima alcanzada y tasas de enfriamiento. Debido a que los micrometeoritos experimentales fueron analizados solo de manera macroscópica, no es posible determinar de manera exacta el largo y grosor de las barras de olivino y piroxeno, así como el espacio entre las mismas; no obstante, puede determinarse la definición de formación de las barras de olivino bajo la lupa binocular y hacer una comparativa entre los MMs obtenidos en los respectivos experimentos. Lo mismo sucede con la intensidad de la energía, ya que para todas las partículas el láser emitió con una potencia promedio de 51.74 W, sin embargo, es posible hacer una comparación directa en cuanto al desarrollo de la textura con la temperatura máxima alcanzada, el tiempo de duración del experimento y sus respectivas tasas de enfriamiento.

50 de 60 micrometeoritos experimentales (83%) desarrollaron al menos en algún punto de su superficie textura de olivino y/o piroxeno barrado, de los cuales 29 pertenecen al experimento 1, 10 al experimento 2 y 11 al experimento 4. Tal y como se expresa en la Tabla 5, de forma cualitativa se establece una “excelente” definición de las barras de olivino y/o piroxeno cuando éstas son bastante evidentes bajo una lupa binocular con aumento 1x y no cuesta trabajo diferenciar dirección, grosor y posición de una con respecto a la otra; una “buena” definición indica que es posible reconocer algunos sectores en superficie con barras de olivino, sin embargo, su continuidad y grosor a lo largo de la partícula son apreciables con un mayor acercamiento (aumento de 2x – 3x con lupa binocular) y una definición “aceptable” establece que las barras de olivino y/o piroxeno apenas se aprecian con aumentos superiores a 4x y gracias a patrones lineales generales, aun así, es bastante complicado diferenciar cada barra de olivino por si sola. Con base en lo anterior, 8 micrometeoritos experimentales tienen un excelente desarrollo de barras de olivino, 20 partículas destacan un buen desarrollo y 22 se clasifican con definición de barras aceptable.

Tanto el desarrollo textural de los olivinos y piroxenos barrados como del piroxeno radial va de la mano con la temperatura, el tiempo de duración de los experimentos, tasas de enfriamiento y grado de sobreenfriamiento (Lofgren y Lanier, 1990). Con base en los parámetros experimentales específicos y variables definidos previamente, el mayor número de partículas donde se desarrollan olivinos y/o piroxenos barrados es en los micrometeoritos

generados del experimento 1, cuyas temperaturas van desde 1105 hasta 1897 °C, con tiempo de fusión de 120 s y con las tasas de enfriamiento más altas, las cuales van de 3.1 a 7.5 °C/s.

La tasa de enfriamiento (°C/s o °C/h) y grado de sobreenfriamiento ( $\Delta T$ ) (Donaldson, 1976; Lofgren y Russell, 1986; Lofgren y Lanier, 1990; Castro-Dorado, 2015) controlan la morfología, tamaño, densidad de núcleos cristalinos, longitud, velocidad y tasa de crecimiento de los cristales de manera sistemática y secuencial tanto de manera natural como experimental. A medida que  $\Delta T$  aumenta o la tasa de enfriamiento es mayor, los olivinos y piroxenos pasan de formar cristales grandes, poliédricos y cortos a cristales pequeños dendríticos o enrejados alargados; no obstante, cabe mencionar que las tasas de enfriamiento que dan origen a esta textura solo son superadas por las que permiten la formación de piroxenos radiales (PR).

A pesar de no poder definir la morfología y tamaño de los olivinos y piroxenos presentes en los micrometeoritos, es clara la elongación de los cristales en forma de barra y los valores de las tasas de enfriamiento de cada partícula. Cervantes de la Cruz *et al.* (2015) muestran que en los olivinos, las barras son sinónimo de cristales dendríticos que crecieron como resultado de la propagación de pequeños cristales tipo “*hopper*” alineados, lo cual corresponde a tasas de enfriamiento y/o grados de sobreenfriamiento altos, por ende y con base en lo anterior, se esperaría que la textura de olivino y piroxeno barrado estuviera generada por el crecimiento rápido de cristales de tamaño muy pequeño, favoreciendo la formación de cadenas de cristales enrejados o cristales plumosos o dendríticos.

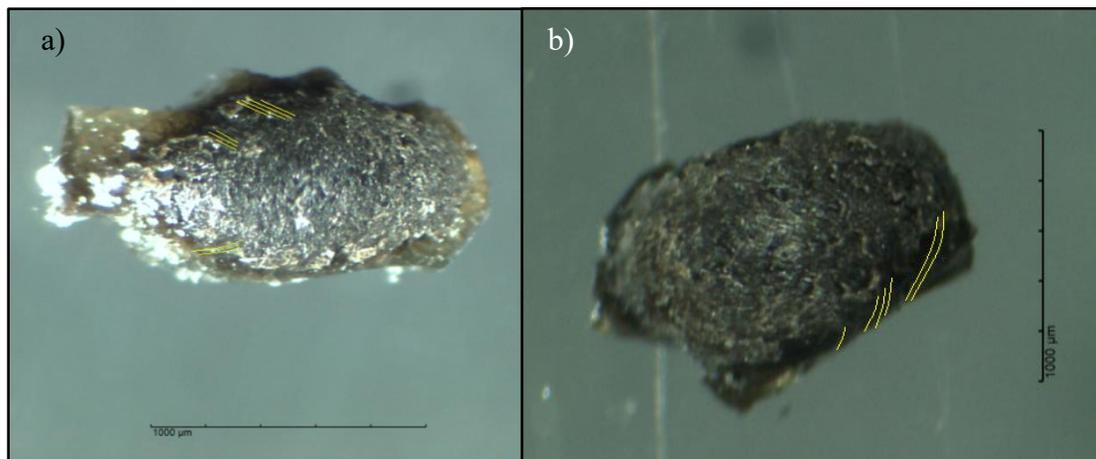
### **5.2.2 Textura escoriácea**

La textura escoriácea es más reconocida a nivel geológico por ser un vidrio vesiculado presente en rocas ígneas extrusivas, sin embargo, para el caso de la micrometeorítica, la presencia de esta textura permite deducir en cierta manera los aspectos termodinámicos de entrada del micrometeorito. En este experimento, solo 9 de 60 micrometeoritos experimentales (15%) desarrollaron en alguna parte de la superficie esta textura caracterizada por presencia de vesículas, de los cuales 7 pertenecen al experimento 1 y 2 al experimento 2. Como se evidencia, ninguna partícula realizada en el experimento 4 desarrolló esta textura, lo cual indica que 6 segundos de exposición bajo el láser de CO<sub>2</sub> no es tiempo suficiente para

que se desarrolle este tipo de textura, siendo la ausencia de altas temperaturas el factor más influyente.

Por otro lado, esta textura tiene como característica que, en algunas partículas se genera una especie de costra que rodea a los silicatos en la zona donde impactó el láser y sobre ella se encuentran las vesículas cuyo origen se atribuye en principio a la sublimación de la DL – Alanina durante el proceso de fusión. Según Genge (2006), en algunos MMs parcialmente fundidos o MMs sin fundir ricos en olivino y piroxeno (forsterita y enstatita principalmente) puede generarse un cascarón ígneo escoriáceo como producto de la fusión atmosférica, a lo que se conoce como borde o anillo ígneo. A pesar de que los anillos ígneos presentan una mineralogía levemente diferente, no fue posible comprobar la formación de minerales distintos a los utilizados como material precursor ya que el análisis infrarrojo no lo indica; sin embargo, las características que muestran los MMs experimentales obtenidos coinciden el desarrollo del cascarón vesicular mencionado por Genge (2006).

Por último, cabe mencionar que el hecho de que se generen anillos ígneos en los micrometeoritos experimentales no limita el desarrollo textural de olivinos barrados o piroxenos radiales sobre las partículas; sin embargo, dichas texturas son más notorias hacia los límites de formación del anillo (Figura 28).



**Figura 28.** Desarrollo de texturas y anillos ígneos en micrometeoritos experimentales obtenidos. a) Las líneas amarillas marcadas muestran zonas donde la textura de piroxeno radial se desarrolla en los límites del anillo ígneo. En la orilla derecha se observa una coloración anaranjada, es posible que se deba a la presencia de hematita. b) Las líneas amarillas indican los sectores donde se forma la textura de olivino barrado justo a los límites de formación del anillo ígneo.

### 5.2.3 Textura de piroxeno radial (PR)

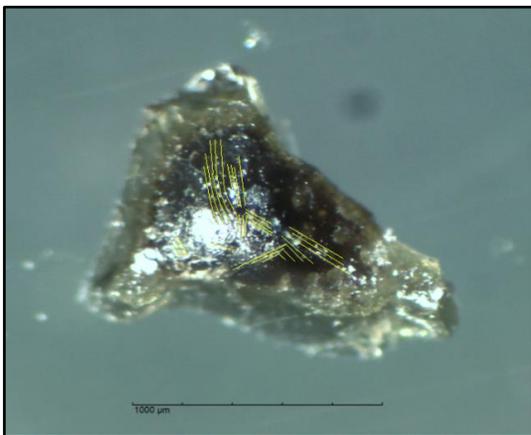
De manera similar a los olivinos y piroxenos barrados, la textura de piroxeno radial tiene su origen principalmente en cristales que crecen rápidamente debido a tasas de enfriamiento y grados de sobreenfriamiento muy altos, generando hábitos aciculares, radiales y a menudo con forma esferulítica (Lofgren y Russell, 1986). De igual forma, al haber realizado un análisis macroscópico en los micrometeoritos experimentales, solo es posible determinar qué tanto se distingue esta textura con base en la evidencia de la definición de las agujas radiales de piroxeno, no obstante, puede relacionarse lo anterior con los parámetros experimentales específicos y variables.

Solo 1 de 60 micrometeoritos experimentales (2%) desarrolló al menos en algún sector de su superficie textura de piroxeno radial, siendo este generado en el experimento 2. Teniendo en cuenta las características bajo las cuales se estableció un excelente, bueno y aceptable desarrollo textural de los olivinos y piroxenos barrados, se hace un análogo para el piroxeno radial donde se compara cualitativamente la textura con base en la definición de formación de dichas agujas radiales y con base en lo anterior, el micrometeorito experimental tiene un buen desarrollo textural.

Relacionando la definición textural con los parámetros experimentales específicos y variables definidos con anterioridad, la partícula que presenta la textura de piroxeno radial se encuentra en el experimento 2, donde su temperatura máxima es de 1032 °C, con tiempo de fusión de 120 s y una tasa de enfriamiento de 6.3 °C/s.

Es evidente que la cantidad de micrometeoritos experimentales que desarrollaron la textura de piroxeno radial es mucho menor que las que desarrollaron olivino y piroxeno barrado, y esto según Lofgren y Russell (1986) se debe posiblemente a que la densidad de núcleos cristalinos de piroxeno que se preservaron posterior al punto máximo de temperatura no fueron tan pequeños (comparados con el olivino) y que a pesar de formarse con el grado más alto de sobreenfriamiento, el crecimiento rápido de agujas de cristales dendríticos o esqueléticos se desarrolló en pocas zonas, lo cual concuerda con la poca cantidad de micrometeoritos experimentales que destacan un excelente desarrollo textural.

La ubicación del centro de nucleación de la textura radial del piroxeno se encuentra trazando la continuidad de los cristales aciculares hasta su punto de cristalización radial. Según Lofgren y Russell (1986), para casos experimentales es posible que varios puntos de crecimiento se encuentren tanto en los bordes de contacto con otro cristal como en el centro o inclusive el interior de la partícula, lo cual coincide para el micrometeorito obtenido (Figura 29).

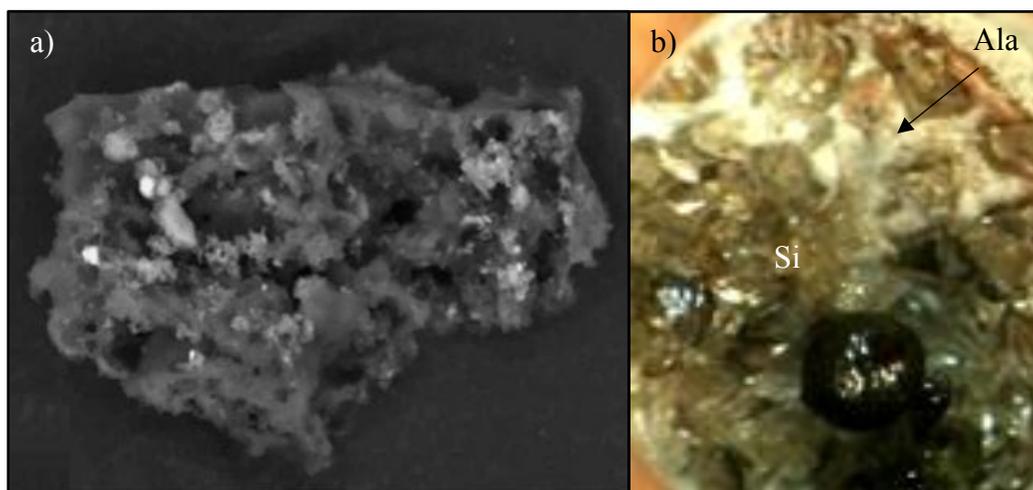


**Figura 29.** Las líneas amarillas marcadas sobre el micrometeorito experimental obtenido muestran el desarrollo de la textura de piroxeno radial (PR). La imagen indica el punto de nucleación de la textura la cual se encuentra en el centro del cristal.

Haciendo una comparación directa con los UCMMs provenientes directamente del espacio, Nakamura *et al.* (2005) mencionan que están compuestos principalmente de material carbonoso amorfo con apariencia “arrugada” y que dentro de ellos se encuentran alojados unos objetos esféricos que corresponden a silicatos que fueron fundidos durante su entrada atmosférica a 1600 °C aproximadamente.

Dichas partículas esféricas también son mencionadas por Dobrica *et al.* (2012), donde indican que se encuentran como agregados cristalinos y vítreos compuestos por olivinos, piroxenos y sulfuros de hierro con bajo contenido en níquel, cementados por una fase vítrea rica en silicio y alojados en la matriz de material carbonoso. En los MMs experimentales obtenidos, los silicatos poco fundidos o sin fundir que quedan en el sustrato, son los que alojan una mayor cantidad de componente orgánico entre ellos después del proceso de fusión, lo cual indica que texturalmente esas partículas obtenidas se parecen más a los UCMMs, tal como se observa en el sustrato del experimento 4 de la Figura 17 en donde el componente orgánico se depositó como material fino intersticial a los granos del silicato remanente. Mientras que el material que llega a fundirse se parece más a los CgMMs, los cuales pueden

alojar algo de material orgánico, tal como se observó en los espectros infrarrojos de la Figuras 23 y 30.



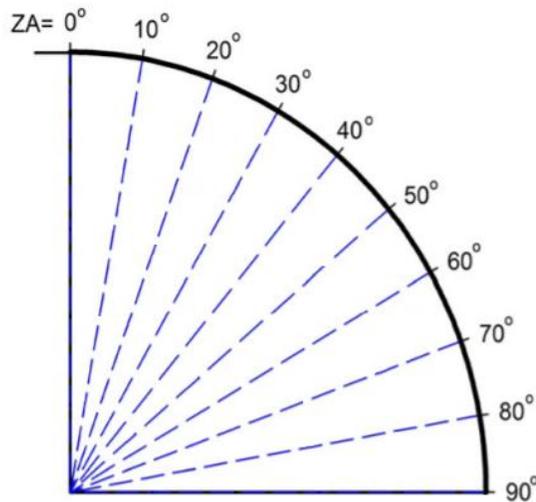
**Figura 30.** a) Fragmento de un UCAMM donde todas las zonas color gris oscuro es material orgánico (Tomado y modificado de Sandford *et al.*, 2016). b) Detalle del material sin fundir en el experimento 4 en donde la alanina (Ala) de grano fino se depositó entre los cristales de silicato (Si).

### 5.3 HISTORIAS TÉRMICAS Y PARÁMETROS LIBRES DE LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES

Durante la explicación del desarrollo y resultados experimentales se mencionan los parámetros específicos como el tiempo de duración de los experimentos que simula el tiempo máximo de vuelo de una partícula desde su entrada a la atmósfera hasta su llegada a la superficie del planeta; de igual forma se han mencionado los parámetros variables como la temperatura máxima de una partícula que alcanza su valor más alto con base en el tiempo experimental preestablecido.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente mencionados es posible deducir factores que jamás intervinieron en los experimentos pero que juegan un papel importante en micrometeoritos que provienen directamente del espacio como lo son el ángulo y la velocidad de entrada de la partícula (parámetros libres), y es aquí donde las historias térmicas en conjunto con las texturas obtenidas sirven como termómetros y podrían sugerir la representación más aproximada de dichos parámetros libres.

Love y Brownlee (1991) indican que el ángulo de vuelo en la parte superior de la atmósfera es a lo que se denomina ángulo de entrada, no obstante, para este trabajo se utiliza el ángulo de entrada cenital (ZA) utilizado por Rudraswami *et al.* (2015) donde un ángulo de entrada de  $0^\circ$  denota un vuelo vertical descendente y un ángulo de entrada de  $90^\circ$  significa un vuelo horizontal (Figura 31).



**Figura 31.** Ángulos de entrada cenital (ZA) para partículas provenientes del espacio. Con ZA bajos, los MMs presentan temperaturas más altas, más pérdida de masa y menor tiempo de vuelo. Tomado y modificado de Rudraswami *et al.* (2015).

Con base en Love y Brownlee (1991), Greshake *et al.* (1998), Toppani *et al.* (2001) y Rudraswami *et al.* (2016) se establecieron los tiempos de duración de los experimentos que de manera indirecta sugieren el ángulo al cual pudiera haber entrado el micrometeorito; es decir, los tiempos de vuelo más cortos se relacionan con ángulos bajos y viceversa. Partículas con ángulos de entrada bajos (cerca de  $0^\circ$ ) alcanzan temperaturas más altas que las partículas con ángulos de entrada altos (cerca de  $90^\circ$ ) si éstas tienen el mismo tamaño, masa y tiempo de vuelo.

Por otro lado, trabajos previos de modelación numérica mencionan que las velocidades de entrada de micrometeoritos pueden ir desde 11 hasta 73 km/s siguiendo una distribución de velocidad preestablecida; sin embargo, la mayoría de los trabajos experimentales manejan velocidades de entrada entre 11 y 21 km/s, donde se asocian las partículas cometarias a velocidades de 11 – 12 km/s mientras que las partículas asteroidales se les atribuyen velocidades entre 20 – 21 km/s. Lo anterior significa que las partículas

cometarias generalmente se calientan más durante su entrada atmosférica que las partículas asteroidales si éstas tienen tamaño, masa y ángulo de entrada similar.

### 5.3.1 Experimento 1

Las historias térmicas de los micrometeoritos obtenidos en este experimento muestran que las partículas alcanzaron temperaturas entre 1105 y 1897 °C en un lapso de 120 s, lo cual indica que, si estos objetos provinieran directamente del espacio, el tiempo de vuelo sería lo suficientemente largo como para favorecer la generación de valores térmicos altos y, por ende, el desarrollo de texturas escoriáceas y cristalinas de olivino barrado y/o piroxeno radial como las que se obtuvieron. Además, las características anteriores concuerdan con aquellas que pueden ser encontradas fácilmente en MMs fundidos y MMs parcialmente fundidos.

Toppani *et al.* (2001) utilizan en sus experimentos tiempos de hasta 120 s, sin embargo, dicho valor ya es relativamente alto porque eso se traduce en ángulos de entrada cenital superiores a 70° con base en la relación ángulo de entrada – tiempo de vuelo previamente mencionada, lo cual limita una correspondencia con los valores máximos de temperatura obtenidos. Por otro lado, el rango de temperaturas del experimento puede asociarse a cualquier ángulo de entrada, por lo que tomar un valor de temperatura promedio es lo más adecuado para que la relación tiempo/temperatura/ángulo de entrada sea coherente. La temperatura promedio del experimento 1 es de 1482 °C, el cual sigue siendo un valor térmico levemente alto para un tiempo de 120 s, sin embargo, esto reduce los posibles ángulos de entrada a un rango entre 70° y 80° con base en los datos obtenidos por Love y Brownlee (1991). Lo anterior permite establecer como punto final una velocidad de entrada que sea acorde a las características anteriormente mencionadas.

Las partículas obtenidas en este experimento tienen tamaños superiores a 1030 µm, pero menores a 2500 µm por lo que se asume que tanto el ángulo como la velocidad de entrada no varían en exceso por el tamaño y masa de la partícula; además, según Love y Brownlee (1991), los únicos MMs que pueden alcanzar una temperatura entre 1400 y 1500 °C con tiempos cercanos a 120 s, tamaños relativamente grandes y ángulos entre 70° – 80° son aquellos que ingresan a la atmósfera con velocidades estimadas en 20 – 21 km/s, lo cual permite deducir que si los MMs de este experimento provinieran del espacio, tendrían una proveniencia cometaria (sin tener en cuenta la composición mineralógica).

### 5.3.2 Experimento 2

El principal motivo por el cual se utilizaron tiempos extremadamente largos se debió a que en la literatura ningún experimento relacionado a micrometeoritos utilizó tiempos que superaran los 120 s ya que no son lógicos, sin embargo, visualizar los cambios desarrollados en el material precursor es importante para comparar con valores previamente utilizados.

Las historias térmicas de los micrometeoritos obtenidos en este experimento son un poco más complicadas de manejar debido al uso de tiempos de 120, 240 y 360 s, razón por la cual se discutirán con más precisión las historias térmicas y parámetros de las partículas que fueron generadas con un tiempo de duración experimental de 240 s.

Dichas partículas alcanzaron temperaturas entre 952 y 1476 °C lo cual indica que, si estos objetos provinieran del espacio, el tiempo de vuelo ya sería extremadamente largo lo cual no permitiría la generación de valores térmicos tan altos y, por ende, el desarrollo de las texturas mencionadas no sería tan predominantes (tal y como se menciona en el capítulo 5.2); no obstante, sus características concuerdan con aquellas que pueden ser encontradas en MMs parcialmente fundidos en su mayoría.

Teniendo en cuenta la relación ángulo de entrada – tiempo de vuelo, se entiende el ángulo equivalente a un tiempo de vuelo de 240 s tendría que ser mayor a 80°, sin embargo, no es posible que partículas provenientes del espacio ingresen con ángulos superiores a 83° ya que rebotarían en la atmósfera y se desviarían regresando al espacio interplanetario (Love y Brownlee, 1991), lo cual limita de nuevo una correspondencia con los valores máximos de temperatura. Debido a lo anterior, se calculó la temperatura promedio para hallar una relación tiempo/temperatura/ángulo de entrada coherente.

La temperatura promedio del experimento 2 es de 1245 °C, el cual es un valor ligeramente alto para un tiempo de 240 s, no obstante, y comparando con los datos de Love y Brownlee (1991) el ángulo de entrada no puede ser menor a 80° bajo ninguna circunstancia. Además, el ángulo y la velocidad de entrada tampoco variarían mucho porque las partículas obtenidas en este experimento tienen tamaños que no superan las 2140 μm.

Los MMs que pueden alcanzar una temperatura máxima de 1250 °C con tiempos similares a 240 s, tamaños que varían entre mediano – grande y un ángulo de entrada de 80°

– 83° son aquellos que ingresan a la atmósfera con velocidades estimadas en 11 – 12 km/s, lo cual nos deja sugerir que, si los MMs de este experimento provinieran del espacio, tendrían una proveniencia asteroidal (que coincidiría con su composición mineralógica).

### 5.3.3 Experimento 4

Las historias térmicas de los micrometeoritos obtenidos en este experimento muestran que las partículas alcanzaron temperaturas entre 807 y 1756 °C en un lapso de 8 s, es decir que, si dichos objetos provinieran del espacio interplanetario, el tiempo de vuelo sería extremadamente corto favoreciendo la generación de valores térmicos muy altos y, por ende, el desarrollo de texturas cristalinas de olivino barrado y/o piroxeno radial como las que se obtuvieron (e inclusive texturas vítreas). Además, las características mencionadas concuerdan con aquellas que pueden ser encontradas fácilmente en MMs fundidos.

A diferencia del experimento 2, el tiempo de 8 s es más realista y como es de esperarse, ampliamente utilizado en trabajos experimentales de micrometeoritos y al contrario que los anteriores experimentos, el ángulo de entrada para partículas con tiempos de vuelo tan cortos se calcula entre 0° y 50° dependiendo del tamaño y temperatura de las partículas (Love y Brownlee, 1991). Al igual que los primeros dos experimentos, el rango de temperaturas máximas obtenidas es bastante amplio, por lo que se calcula su promedio para hallar una relación concordante con el tiempo y el ángulo de entrada.

La temperatura promedio del experimento 4 es de 1281 °C, valor que es levemente bajo para un tiempo de 8 s tomando en cuenta los datos de Love y Brownlee (1991), pero que en Toppani *et al.* (2001) y Rudraswami *et al.* (2016) son valores coherentes. Esto restringe los ángulos de entrada a un rango entre 25° y 45°, ya que las partículas obtenidas tienen tamaños mayores a 710 µm y la temperatura promedio no es tan alta como para adquirir ángulos de entrada menores.

Según Love y Brownlee (1991), los MMs que pueden alcanzar una temperatura entre 1250 y 1350 °C con tiempos cercanos a 8 s, tamaños variables entre mediano – grandes y ángulos entre 25° – 45° son aquellos que ingresan a la atmósfera con velocidades estimadas en 11 – 12 km/s, lo cual permite deducir que, si los MMs de este experimento provinieran

del espacio, tendrían origen asteroidal (que coincide con su composición mineralógica pero no con la cantidad de aminoácido contenido en ellas).

Teniendo en cuenta lo discutido a lo largo de esta sección se propone que las texturas resultantes junto con los valores de tiempo y temperatura de las historias térmicas son los parámetros más importantes para deducir los valores aproximados de los parámetros libres que hubieran afectado a los micrometeoritos si éstos provinieran del espacio exterior. En la Tabla 9 se indica de manera más explícita el tiempo de duración, el rango de temperaturas, la velocidad de entrada y el rango de ángulos de entrada estimados para cada uno de los experimentos enfocados en la generación de micrometeoritos experimentales.

**Tabla 9.** Definición cuantitativa de los parámetros libres (en negrilla) deducidos para los micrometeoritos experimentales generados que involucran sus historias térmicas resultantes.

<b>EXPERIMENTO 1</b>	Tiempo: 120 s Temperaturas: 1105 – 1897 °C (1482 °C promedio) <b>Ángulo de entrada:</b> 70° – 80° <b>Velocidad de entrada:</b> 20 – 21 km/s
<b>EXPERIMENTO 2</b>	Tiempo: 240 s Temperaturas: 952 – 1476 °C (1245 °C promedio) <b>Ángulo de entrada:</b> 80° – 83° <b>Velocidad de entrada:</b> 11 – 12 km/s
<b>EXPERIMENTO 4</b>	Tiempo: 8 s Temperaturas: 807 – 1756 °C (1281 °C promedio) <b>Ángulo de entrada:</b> 25° – 45° <b>Velocidad de entrada:</b> 11 – 12 km/s

#### 5.4 FASES DE CRISTALIZACIÓN DE LOS MICROMETEORITOS

En el capítulo 4 se muestran las historias térmicas obtenidas de dos micrometeoritos generados en el experimento 1, cuatro micrometeoritos generados en el experimento 2 y dos micrometeoritos pertenecientes al experimento 4 (Figuras 12 – 14). Sobre ellas se marcaron algunos polígonos con un número en su interior que indican las posibles zonas donde el olivino y/o piroxeno que componen la partícula empiezan a cristalizar. Dichos puntos no se

establecieron de manera aleatoria, ya que en ellos se aprecia que después de la temperatura máxima alcanzada, el enfriamiento de las partículas es relativamente progresivo y sin ningún cambio abrupto tanto en la trayectoria como en la pendiente del termograma; sin embargo, al analizarlos más de cerca se observa que hay partes donde mientras se enfrían las partículas hay un pico de aumento en la temperatura muy pequeño, lo cual se piensa que puede corresponder a momentos en los cuales empiezan a cristalizar los silicatos en el micrometeorito experimental.

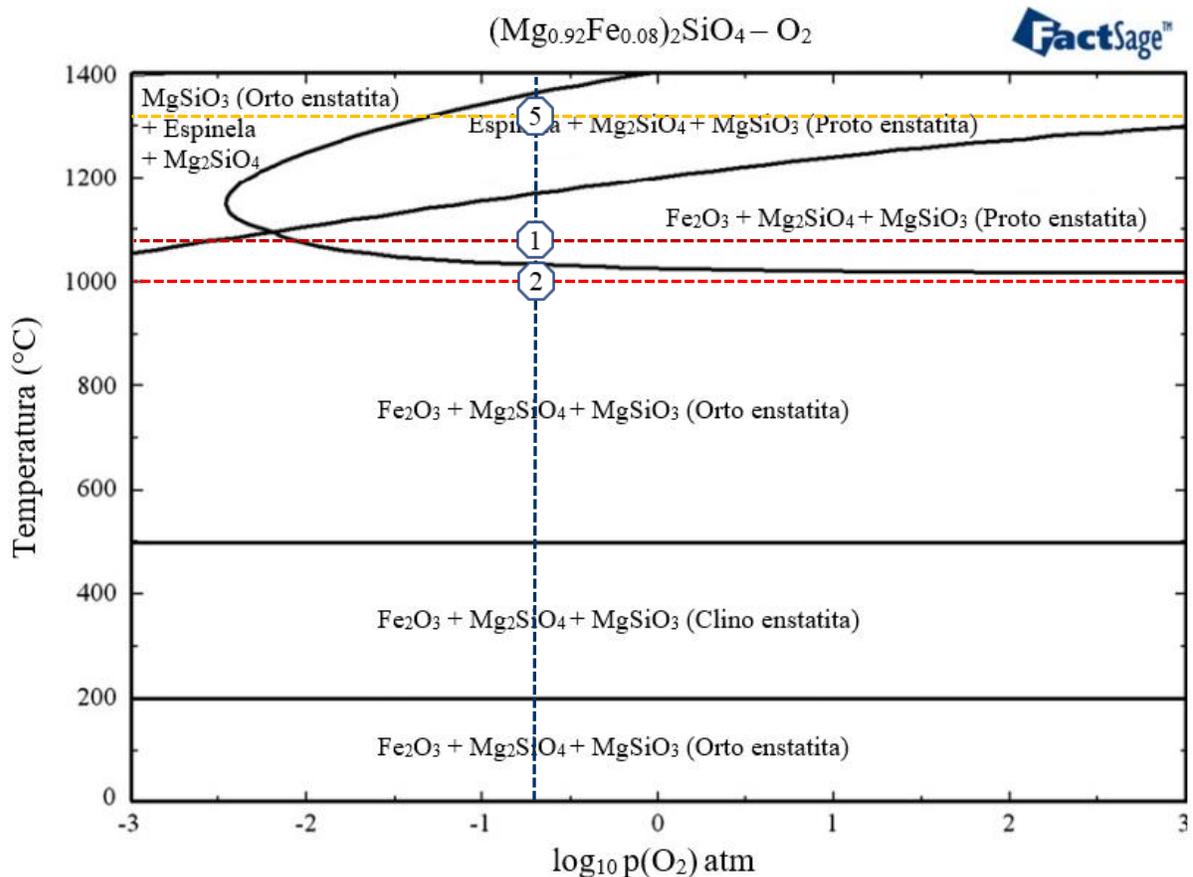
Para confirmar que los puntos de cristalización de los micrometeoritos son coherentes y que, a pesar de tener silicatos mezclados, éstos cristalizan según el orden y temperaturas establecidas en la serie de Bowen, se utiliza un diagrama de fases del olivino publicado por Michel *et al.* (2013) donde se aprecian diferentes zonas de estabilidad conjunta de ciertos minerales con base en la temperatura y la presión. Aquí se asume que todos los micrometeoritos experimentales fueron generados a presión atmosférica constante [ $\log_{10} p(\text{O}_2) = -0.70 \text{ atm}$ ] correspondiente a la Ciudad de México.

#### 5.4.1 Experimento 1

Los termogramas utilizados en este experimento toman en cuenta los micrometeoritos con la temperatura máxima más baja (3-3) y la temperatura máxima más alta (6-6) registrada por el pirómetro y posteriormente corregida. En el termograma del micrometeorito 3-3 se observa que aproximadamente hacia 1080 °C y 1000 °C se presentan leves variaciones en la trayectoria de enfriamiento de la partícula. Al extrapolar dichos valores con la presión a la cual se realizaron los experimentos se encuentra que el polígono 1 se ubica en la zona de estabilidad de la forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) + proto enstatita ( $\text{MgSiO}_3$  – variedad de enstatita estable únicamente a altas temperaturas) + hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), mientras que el polígono 2 se ubica en el área de estabilidad de la forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) + orto enstatita ( $\text{MgSiO}_3$ ) + hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), lo cual quiere decir que es probable que el polígono 1 indique la temperatura a la cual el olivino del micrometeorito empezó a cristalizar y el polígono 2 muestre la temperatura aproximada a la cual el piroxeno de la partícula se empieza a solidificar (Figura 32).

En el termograma del micrometeorito 6-6 se observa que el polígono 3 se encuentra a 1896 °C, el polígono 4 está a 1664 °C y el polígono 5 a 1320 °C. Las temperaturas de los polígonos 3 y 4 exceden el límite superior del diagrama de fases ya que son bastante altas,

sin embargo, el polígono 5 cae en la zona de estabilidad de la forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + proto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + espinela (específicamente magnetita –  $Fe_3O_4$ ). Esto puede indicar que es probable que núcleos cristalinos pequeños de olivino hayan empezado a formarse en los polígonos 3 y 4 aunque en cantidades muy pequeñas dadas las altas temperaturas, y que en el polígono 5 la cristalización del olivino se genere más evidentemente con un posible desarrollo de magnetita debido a las condiciones oxidantes del ambiente de cristalización (Figura 32).



**Figura 32.** Ubicación de los polígonos situados en los termogramas de los micrometeoritos experimentales 3-3 y 6-6 del experimento 1. La línea punteada vertical indica la presión a la cual se realizaron los experimentos mientras que las líneas punteadas horizontales muestran las temperaturas a las que posiblemente empezaron a cristalizar los silicatos. Tomado y modificado de Michel *et al.* (2013).

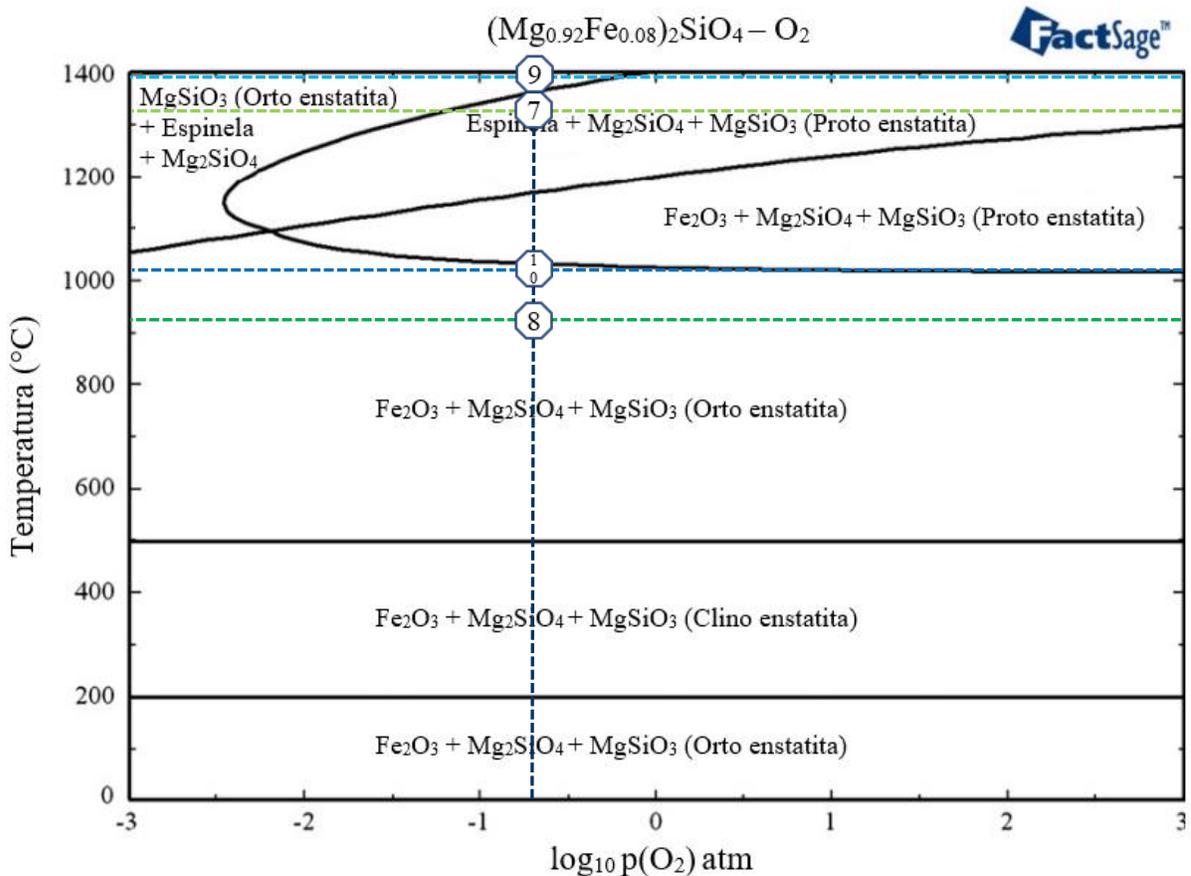
## 5.4.2 Experimento 2

Los termogramas utilizados en este experimento tienen en cuenta los micrometeoritos con la temperatura máxima más baja (4-2 para  $T(s)= 240$  y 4-5 para  $T(s)= 120$ ) y la

temperatura máxima más alta (3-3 para  $T(s)= 240$  y 3-5 para  $T(s)= 120$ ) registrada por el pirómetro y eventualmente corregida.

Empezando por los micrometeoritos experimentales realizados con un  $T$  de 240 s, se tiene que el termograma de la partícula 3-3 muestra dos posibles puntos en los cuales pudo generarse la cristalización de los silicatos (polígonos 6 y 7). Al extrapolar los polígonos en el diagrama de fases se obtiene que la temperatura del polígono 6 es demasiado alta (1459 °C) y excede el límite superior de la gráfica, por lo que solo es posible ubicar el polígono 7, el cual se encuentra a una temperatura aproximada de 1337 °C cayendo en la zona de estabilidad de la forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + proto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + espinela (específicamente magnetita –  $Fe_3O_4$ ). Para el caso del micrometeorito 4-2 se tiene la particularidad de que el material precursor fue solo piroxeno + aminoácido, por lo que se esperaría encontrar un solo punto de inicio de cristalización en su historia térmica; y evidentemente, solo se ubicó el polígono 8 sobre dicho termograma a una temperatura aproximada de 933 °C. Dicho polígono cae en la zona de estabilidad de la forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + orto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + hematita ( $Fe_2O_3$ ) (Figura 33).

En cuanto a los micrometeoritos experimentales realizados con un  $T$  de 120 s, se tienen los termogramas de las partículas 3-5 y 4-5. Cabe notar que para el micrometeorito 3-5 se agregó olivino + piroxeno + aminoácido, sin embargo, el polígono 9 muestra que al parecer en aproximadamente 1400 °C se empezó a cristalizar el olivino y a lo largo de la trayectoria de enfriamiento no hay un pico que indique la posible cristalización de piroxeno, lo cual sugiere que dicha partícula esté formada en su mayoría por olivino y acompañada por magnetita dada la zona de estabilidad en la que cae. Algo similar sucede con el micrometeorito 4-5, ya que este tiene la característica de tener solo piroxeno + aminoácido como material precursor, por lo que el polígono 10 muestra que evidentemente solo hay un punto en el que la partícula pudo haber empezado a cristalizar con una temperatura de 1030 °C. Dicho polígono se ubica justo por debajo del límite de la zona de la forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + orto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + hematita ( $Fe_2O_3$ ) con la fase de forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + proto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + hematita ( $Fe_2O_3$ ) (Figura 33).

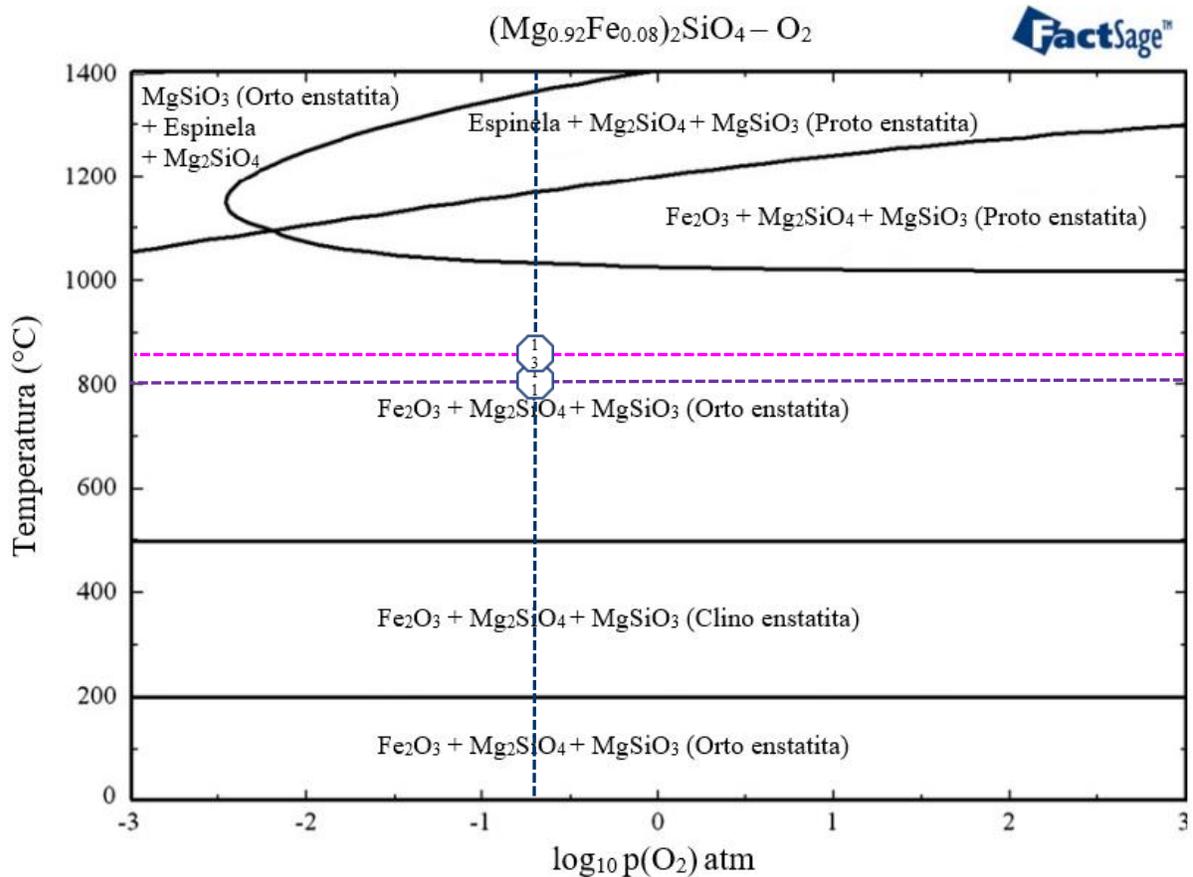


**Figura 33.** Ubicación de los polígonos situados en los termogramas de los micrometeoritos experimentales 3-3, 4-2, 3-5 y 4-5 del experimento 2. La línea punteada vertical indica la presión a la cual se realizaron los experimentos mientras que las líneas punteadas horizontales muestran las temperaturas a las que posiblemente empezaron a cristalizar los silicatos. Tomado y modificado de Michel *et al.* (2013).

### 5.4.3 Experimento 4

Los termogramas de este experimento toman en cuenta los micrometeoritos con la temperatura máxima más baja (5-4) y la temperatura máxima más alta (3-5) registrada por el pirómetro y posteriormente corregida. El termograma del micrometeorito 5-4 muestra que a 806 °C se presenta la temperatura máxima alcanzada por la partícula, siendo este el único punto de inflexión donde pudo haber empezado a cristalizar el micrometeorito, identificado con el polígono 11. A pesar de haber agregado olivino y piroxeno como materiales precursores, la historia térmica muestra que solo piroxeno pudo haber sido fundido, lo cual se confirma con la temperatura alcanzada, el micrometeorito generado y con la zona de

estabilidad forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + orto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + hematita ( $Fe_2O_3$ ) en la que cae el polígono 11 dentro del diagrama de fases (Figura 34).



**Figura 34.** Ubicación de los polígonos situados en los termogramas de los micrometeoritos experimentales 5-4 y 3-5 del experimento 4. La línea punteada vertical indica la presión a la cual se realizaron los experimentos mientras que las líneas punteadas horizontales muestran las temperaturas a las que posiblemente empezaron a cristalizar los silicatos. Tomado y modificado de Michel *et al.* (2013).

En el termograma del micrometeorito 3-5 se observa que los polígonos 12 y 13 se encuentran a 1757 °C y 857 °C respectivamente. Evidentemente la temperatura del polígono 12 es demasiado alta para poder ubicarla dentro del diagrama de fases, sin embargo, al haber utilizado olivino y piroxeno como materiales precursores se entiende que ambos silicatos fundieron y que el olivino es el primero en empezar a cristalizar. Por otro lado, al extrapolar los datos del polígono 13 se observa que este cae en la fase forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) + orto enstatita ( $MgSiO_3$ ) + hematita ( $Fe_2O_3$ ), por lo que se puede inferir que el piroxeno empezó a cristalizar a dicha temperatura (Figura 34).

## 5.5 COMPONENTE ORGÁNICO

Aunque cuantitativamente no se pueda obtener un valor exacto de la cantidad de alanina que se preservó en los micrometeoritos, al evaluar los espectros infrarrojo se puede establecer de forma cualitativa si se perdió mucho o poco aminoácido. Los espectros que se obtuvieron del análisis infrarrojo muestran que la cantidad de material orgánico que sobrevivió en los micrometeoritos experimentales usados para este análisis fue muy poco comparada con la cantidad de aminoácido que se agregó como material precursor a sus respectivos orificios del portamuestras, el cual se calcula entre el 15% y 91% del porcentaje en peso de la partícula (Tabla 10).

**Tabla 10.** Valor en porcentaje de cada elemento agregado como material precursor a los micrometeoritos utilizados para espectrometría infrarroja, previo al proceso de fusión. Nótese que el rango de DL – Alanina empleada se encuentra entre 15% – 91%.

	MM 3-2, <u>Exp. 1</u>	MM 6-2, Exp.1	MM 4-2, <u>Exp. 2</u>	MM 5-6, Exp.2	MM 1-4, <u>Exp. 4</u>	MM 5-5, <u>Exp. 4</u>
<b>Olivino</b>	42%	42%	-	33%	41%	9%
<b>Piroxeno</b>	35%	42%	33%	-	33%	< 1%
<b>Alanina</b>	23%	15%	67%	67%	26%	91%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>99%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>~ 100%</b>

Primero que nada, el único material con el que se puede comparar directamente el porcentaje en peso de silicatos y aminoácido/material orgánico en los micrometeoritos experimentales obtenidos es con los MMs ultracarbonáceos, ya que esta es la única clase de micrometeoritos que posee material orgánico como componente principal en su estructura. Dobrica *et al.* (2012) realizaron microscopía electrónica de transmisión analítica a tres fragmentos de MMs ultracarbonáceos de la colección de micrometeoritos “CONCORDIA” donde obtuvieron porcentajes cuantificables de silicatos/material orgánico en las partículas cuyos valores fueron de 43/57, 23/77 y 12/88, respectivamente. Esto nos indica que por lo menos tres de los MMs experimentales usados para espectrometría infrarroja tenían valores composicionales adecuados para una partícula con material orgánico en su estructura (33/67, 33/67 y 9/91); sin embargo, la Figura 23 muestra que existen más de dos sectores en el espectro donde algunas bandas de la alanina coinciden de cierta manera con las de los

micrometeoritos analizados, lo cual evidencia que las partículas del experimento 4 lograron preservar un mayor contenido de alanina que las de los experimentos 1 y 2 a pesar de la cantidad de aminoácido agregado previamente.

Lo anterior puede atribuirse a que los MMs del experimento 4 estuvieron expuestos bajo el láser de CO<sub>2</sub> un tiempo menor, lo cual facilita de alguna manera la conservación del aminoácido en las partículas pese a su baja temperatura de fusión (310.2 °C según los análisis de DSC). No obstante, queda claro que entre más contenido de materia orgánica haya en las partículas, más probabilidades hay de que ésta permanezca a mayores temperaturas y tiempos de exposición más altos, siempre y cuando el material orgánico presente sea mucho más complejo que solo un aminoácido fácilmente volatilizable.

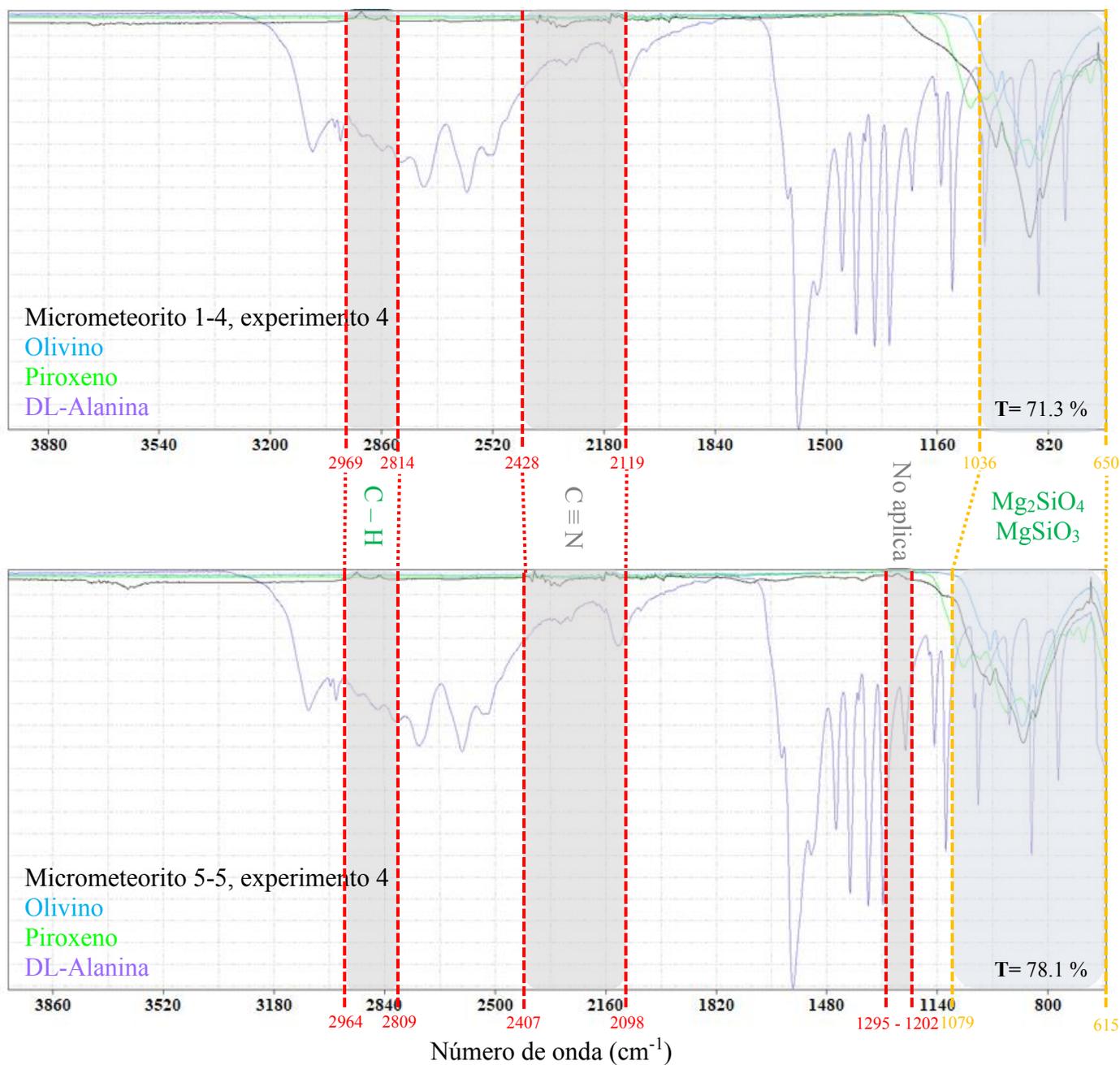
En segundo lugar, Dartois *et al.* (2018) caracterizaron ocho fragmentos de MMs ultracarbonáceos (UCAMMs) pertenecientes a la colección “CONCORDIA”, dando un enfoque a la materia orgánica presente con ayuda de espectrometría infrarroja y Raman. Los espectros infrarrojos que obtuvieron fueron descompuestos para mostrar de manera independiente los modos vibracionales de determinados enlaces haciendo alusión a ciertos grupos funcionales entre 4000 – 1500 cm<sup>-1</sup>. Haciendo una comparativa con los espectros infrarrojo aquí obtenidos (Figura 35), se observan bastantes similitudes a lo largo de los espectros, donde la más evidente es la concordancia entre las bandas principales de la forsterita y enstatita en la región de la huella dactilar (< 1500 cm<sup>-1</sup>); sin embargo, la profundidad óptica o transmitancia de dichas señales en los MMs ultracarbonáceos no es la misma ya que existen partículas cuyo contenido en silicatos puede ser alto, bajo o disimulado por la cantidad de material carbonoso, contrario a lo observado en los MMs experimentales.

En cuanto al material orgánico se refiere, los MMs experimentales y los MMs ultracarbonáceos comparten la presencia de ciertas bandas que no necesariamente corresponden al mismo aminoácido, pero sí a ciertos enlaces de grupos funcionales. Evidentemente el material orgánico presente en los MMs ultracarbonáceos es más complejo, se encuentra en mayor volumen y posee mayor cantidad de grupos funcionales, así como diferentes moléculas orgánicas; sin embargo, esto no quiere decir que por el hecho de encontrar enlaces cuyo rango en número de onda concuerden, éstos deban ser iguales al de los MMs experimentales. Lo anterior se fundamenta de nueva cuenta en la Figura 35, que

muestra al menos cuatro áreas donde los espectros de los MMs experimentales coinciden con ciertos enlaces reportados en Dartois *et al.* (2018).

En la Figura 35 se observa de derecha a izquierda que entre  $1079 - 615 \text{ cm}^{-1}$  el espectro de ambos MMs experimentales presentan una amplia concordancia con el espectro de los silicatos utilizados y con el de los MMs ultracarbonáceos reportados, lo cual asegura la presencia de forsterita y enstatita en este tipo de partículas. En el espectro del micrometeorito 5-5 se delimita una zona entre  $1295 - 1202 \text{ cm}^{-1}$  la cual corresponde a una concordancia entre el espectro del MM y de la DL – Alanina.

Luego está el área delimitada entre  $2428 - 2098 \text{ cm}^{-1}$  donde de nuevo los espectros de los MMs experimentales y la DL – Alanina coinciden, pero cuando se compara con los espectros reportados de los MMs ultracarbonáceos reales se observa que solo el enlace  $\text{C} \equiv \text{N}$  cae dentro de este rango. Lo anterior indica que, a pesar de haber similitud entre los espectros, el enlace reportado no coincide con alguno encontrado dentro de la DL – Alanina, ya que en la materia orgánica en los micrometeoritos ultracarbonáceos reales es una mezcla compleja de diferentes compuestos. Por último, se tiene el área delimitada entre  $2969 - 2809 \text{ cm}^{-1}$  donde los espectros de ambos MMs experimentales y la DL – Alanina concuerdan y coinciden con un enlace químico reportado en los espectros de los MMs ultracarbonáceos que para este caso corresponde al enlace  $\text{C} - \text{H}$ , el cual es típico de compuestos orgánicos y, de hecho, se encuentra en la estructura de la DL – Alanina. Esta zona es la más real y cercana al momento de comprobar que pudo conservarse cierta cantidad de aminoácido en los MMs experimentales junto con los silicatos.



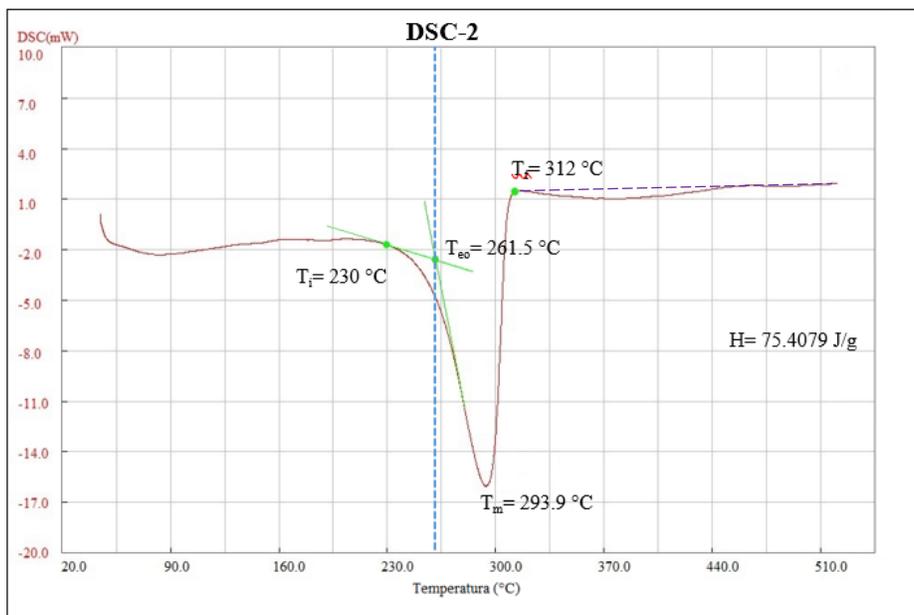
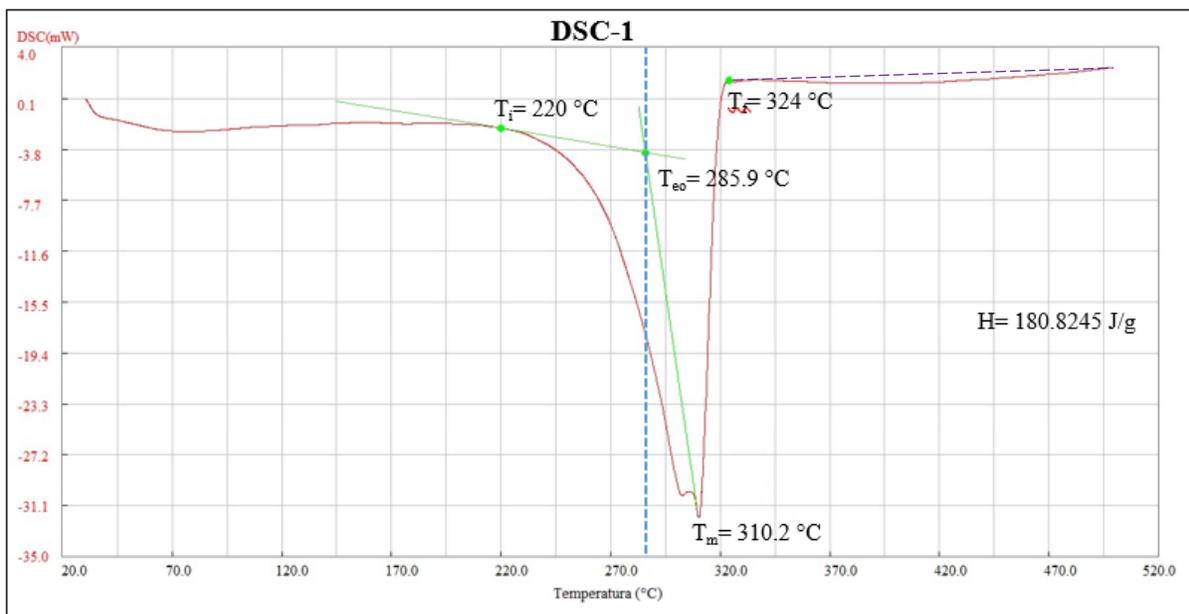
**Figura 35.** Comparación directa de los espectros infrarrojos de los micrometeoritos 1-4 (superior) y 5-5 (inferior) con los datos publicados en Dartois *et al.* (2018) con respecto a los UCAMMs. Los rectángulos azules con bordes anaranjados delimitan el área donde coinciden el espectro de los silicatos en los MMs experimentales con el de los UCAMMs. Los rectángulos grises con bordes rojos indican el área en el cual el espectro de la DL – Alanina y los MMs experimentales son similares y pueden tener en común algún enlace con los UCAMMs. Los enlaces en verde son similitudes que aplican entre los MMs experimentales y los UCAMMs mientras que los enlaces en rojo son similitudes que no aplican entre MMs.

Por otro lado, las curvas obtenidas con los análisis de DSC nos permite conocer tanto los puntos de fusión de la alanina en varias presentaciones y mezclas como la energía requerida para que dicha transformación suceda. En este caso, la alanina requiere un valor de entalpia de 180.8 J/g para que se volatilice en su totalidad cuando se encuentra sola pero dicho valor es menor cuando se mezcla con silicatos (75.4 J/g) y se reduce aún más cuando está mezclada con silicatos y en estado líquido (22.8 J/g); esto puede indicar que existe una mejor distribución de calor con los silicatos permitiendo que la energía que ingresa al sistema se distribuya mejor logrando una volatilización más rápida del aminoácido sin necesidad de que ingrese tanta energía al sistema. Sin embargo, cabe destacar que los experimentos en el DSC son muy lentos y ello genera la descomposición del material orgánico.

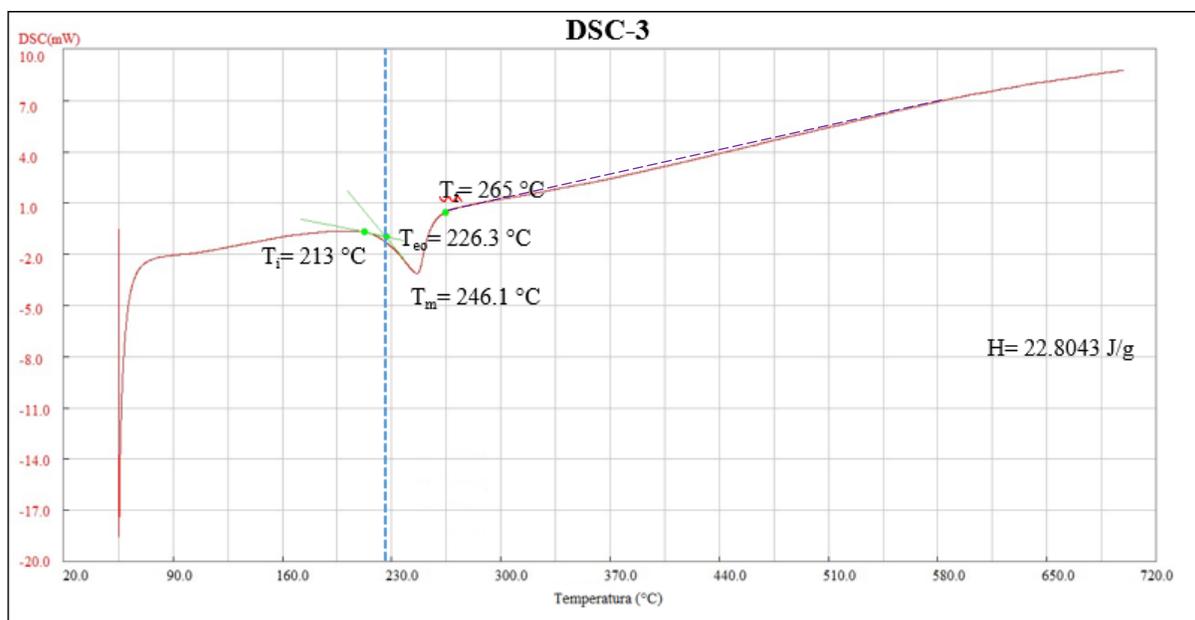
De igual forma, si se observa con detalle la Figura 24 se evidencia el desarrollo de dos pequeños picos endotérmicos separados por una transición en la curva DSC – 1 justo antes de que la alanina llegue a su punto de fusión, fenómeno que no se registra en las curvas DSC – 2 y DSC – 3 (Figuras 25 y 26, respectivamente). La hipótesis que se maneja en este caso es que la DL – Alanina cristaliza con diferentes hábitos y que después de ser sometida al láser de CO<sub>2</sub> favorece el desarrollo de diferentes morfologías que se asemejan texturalmente a talco compacto y algodón como se evidencia en el experimento 3 y en la Figura 16, por lo que la primera curva endotérmica (~ 300 °C) puede corresponder a una forma metaestable del aminoácido, la cual intenta fundir fracciones de segundos antes de la aparición de la segunda curva endotérmica relacionada con el punto de fusión (310.2 °C) que puede corresponder a la forma última y estable del aminoácido.

Asimismo, las gráficas DSC – 1, DSC – 2 y DSC – 3 muestran un abombamiento endotérmico en la trayectoria de sus respectivas curvas casi imperceptible a simple vista después del punto de temperatura final T<sub>f</sub>(Figura 36). Esto puede ser la confirmación de que la DL – Alanina alcanza su estado líquido en el punto T<sub>m</sub> y que aproximadamente entre 350 – 370 °C el aminoácido tiene un cambio de fase de líquido a gas o se descompone en su totalidad en CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O, pues cuando se abrió el crisol no había material remanente. Lo cual contrasta en los experimentos donde la DL – Alanina y el láser de CO<sub>2</sub> interactúan, las fases de fusión y evaporación por sí solas no se observan, ya que la energía es tan alta y el aumento

de temperatura de parte del láser es tan abrupto que ocurre la sublimación en cuestión de segundos, favoreciendo la volatilización del aminoácido casi en su totalidad.



**Figura 36.** Curvas calorimétricas DSC – 1, DSC – 2 y DSC – 3 donde se indica con una línea punteada de color morado la zona donde se presenta el abombamiento endotérmico leve desde el punto  $T_f$  hasta el final de las gráficas. El área que encierra la línea morada con la curva calorimétrica puede hacer referencia al cambio de fase de la DL – Alanina de líquido a gaseoso o a su descomposición total debido a las altas temperaturas de exposición.



**Figura 36** – Continuación.

Finalmente, la conservación de la DL – Alanina tanto en zonas externas de algunos MMs experimentales como en las paredes de los orificios del portamuestras puede deberse a que en el momento en que el láser de CO<sub>2</sub> irradia el aminoácido, este reacciona ante el calor rápidamente cambiando su estado de sólido a gas (sublimación), la evidencia indica que parte del gas de alanina se sublima en la superficie sólida más cercana y cristaliza rápidamente. No obstante, la preservación de la DL – Alanina dentro de los MMs experimentales se debe a que los poros intercristalinos de los silicatos sirvieron como sitios de trampa en donde la alanina se sublimó, generando cristales finos. Cabe mencionar que el tamaño de grano usado como material precursor puede influir bastante en la proporción de aminoácido conservado en el micrometeorito generado, ya que el sustrato remanente del material precursor en donde se usaron silicatos con tamaños menores a 250  $\mu\text{m}$  contiene alanina “intersticial” preservada durante el proceso de fusión, pese a que en estos experimentos los tiempos de exposición fueron altos, pero los silicatos eran de tamaño muy fino.

Esto constituye una parte importante de este trabajo, pues pone en evidencia la capacidad de este aminoácido para preservarse a altas temperaturas. Esta característica fue descrita por Glavin y Bada (1998) cuyo objetivo, en un contexto químico-experimental, era aislar aminoácidos (ácido aspártico, serina, glicina, ácido alfa-aminoisobutírico, valina y

alanina) de muestras naturales sin racemización o descomposición. En sus experimentos ellos utilizan vacío para acelerar la sublimación; a diferencia de ese trabajo, en esta tesis se utilizó la elevación súbita de temperatura, lo cual dio como resultado la sublimación de la alanina, formando diferentes hábitos o tal vez polimorfos, aunque esto último, no fue posible corroborarlo.

Cabe destacar que el proceso de sublimación de los aminoácidos no ha sido ampliamente explorado en el contexto de la meteorítica o de los procesos de impacto. Por ejemplo, Howard *et al.* (2013) reportan la presencia de biomasa preservada en los vidrios de 800,000 años de las tectitas (conocidas como vidrio de Darwin) asociadas al cráter Darwin, en Tasmania, Australia. Sin embargo, ellos solo mencionan que el líquido sobreenfriado generado durante el impacto a hipervelocidad pudo proteger la materia orgánica (celulosa, remanentes de proteínas, lignito y compuestos alifáticos) de la descomposición. En una publicación reciente de Osinski *et al.* (2020) hacen una revisión en donde exploran la posible relación entre los impactos y el origen de la vida, describen los diferentes escenarios en donde los impactos generaron fundidos que a su vez proporcionan una fuente de energía necesarias para catalizar reacciones en compuestos orgánicos abióticos y nuevamente resaltan la relación de la presión como efecto relevante para generar posibles reacciones entre los compuestos orgánicos. También mencionan que la fuente del material orgánico fueron los asteroides y/o cometas que impactaban. Sin embargo, no se menciona el papel que pudo haber tenido el paso de los objetos por la atmósfera y tampoco mencionan la capacidad que tienen algunos aminoácidos para sublimarse, sin descomponerse, pero si pudiéndose aislar debido a sus diferentes puntos de sublimación, lo cual abre un área de oportunidad para seguir investigándose.

## **5.6 CLASIFICACIÓN DE LOS MICROMETEORITOS EXPERIMENTALES**

Cabe recordar que de los 84 experimentos enfocados a la réplica de micrometeoritos, 60 generaron por lo menos una partícula experimental, lo cual se determina fácilmente observando la transformación parcial o total del material precursor empleado a objetos esféricos y/o subesféricos. A pesar de ser micrometeoritos generados en un laboratorio, las propiedades físicas (principalmente) y químicas que éstos desarrollaron son únicas para cada

ejemplar, no obstante, es posible permitirse clasificarlos en grupos cuando éstos tienen características similares.

Los factores tomados en cuenta para catalogar de manera adecuada dichas partículas son las texturas desarrolladas sobre su superficie, morfología, tamaño de los silicatos utilizados como material precursor y el análisis infrarrojo (de haber sido aplicado). Debido a que no se tiene un rango de temperaturas previamente establecido para los grupos en la clasificación de micrometeoritos y a que durante los experimentos ciertos valores no coinciden con el tipo de partícula obtenida, la temperatura máxima alcanzada por la partícula no se tomará como un elemento clave al momento de clasificar.

Teniendo en cuenta lo anterior, se usará el esquema de clasificación de micrometeoritos propuesta por Genge *et al.* (2008) donde la clasificación más específica a la que se llegará para este trabajo será la de clase.

#### **5.6.1 MMs parcialmente fundidos**

Este grupo de micrometeoritos solo tiene una clase, la cual corresponde a los MMs escoriáceos (ScMMs). Las partículas subesféricas con formas subredondeadas y subangulosas con “cascarones” ígneos y alta cantidad de vesículas son las que determinarán el número de partículas experimentales pertenecientes a esta clase. Mientras el tamaño de los cristales precursores puede variar, es posible encontrar partículas con rangos de temperaturas entre 1200 – 1500 °C.

En total se catalogaron 9 micrometeoritos experimentales como MMs parcialmente fundidos, de los cuales 7 se generaron en el experimento 1 mientras los 2 restantes hacen parte del experimento 2. Esto quiere decir que, de las 60 partículas experimentales, solo el 15% posee características que permiten catalogarlas dentro de este grupo; por lo tanto, todas corresponden a la clase de MMs escoriáceos.

#### **5.6.2 MMs sin fundir**

A diferencia de los grupos anteriores, en este grupo pueden encontrarse hasta cuatro clases de micrometeoritos que son los MMs finogranulares (FgMMs), MMs gruesogranulares (CgMMs), MMs refractarios y MMs ultracarbonáceos. Con base en lo anterior, se espera que para este grupo las partículas no sean tan esféricas, sean

subredondeadas a subangulosas en su mayoría, se encuentren texturas de olivino barrado y/o piroxeno radial y los cristales precursores tengan un tamaño menor a los 800  $\mu\text{m}$ . Los análisis infrarrojos pueden ser de utilidad para determinar si alguna partícula puede ser parte de la clase de MMs ultracarbonáceos; de igual forma no se espera que las temperaturas máximas en este grupo superen los 1300 – 1400 °C.

En total se clasificaron 51 micrometeoritos experimentales como MMs sin fundir, de los cuales 29 hacen parte del experimento 1, 11 fueron originados en el experimento 2 y 11 corresponden al experimento 4. Lo anterior indica que, de las 60 partículas experimentales, el 85% posee características físicas que permiten separarlas dentro de este grupo. A diferencia de los MMs fundidos y parcialmente fundidos, existen cuatro clases que se encuentran dentro de los MMs sin fundir, por lo que es posible ser más exactos con la clasificación.

En este caso, cabe aclarar que de los 51 micrometeoritos sin fundir, ninguno pertenece a la clase de MMs refractarios ya que mineralógicamente ninguno posee en su estructura minerales refractarios; de igual forma, ninguno hace parte de la clase de MMs ultracarbonáceos donde a pesar de haber utilizado DL – Alanina como material precursor, el porcentaje de aminoácido sobreviviente al proceso de fusión no sobrepasa el 5% y el valor de materia orgánica en la partícula debe ser mínimo del 50% para ser considerada en esta clase.

Lo anterior nos deja solo dos opciones de clases: MMs finogranulares y MMs gruesogranulares. Dado que no clasificaremos más allá de las clases (tipo y subtipo no incluidos), no es muy necesario conocer más allá de la composición mineralógica de la partícula, sin embargo, su tamaño es lo que va a marcar la diferencia en este caso. Teniendo en cuenta el tamaño del material precursor utilizado para los MMs experimentales donde el límite entre una clase y la otra se definirá en “mayor que 250  $\mu\text{m}$ ” y “menor que 250  $\mu\text{m}$ ”, se establece que 9 son finogranulares (FgMMs) mientras que los 42 restantes serían gruesogranulares (CgMMs).

### 5.6.3 Descripción de material precursor residual

Cuando nos referimos al material precursor residual, se hace referencia a los silicatos que se agregaron como material precursor pero que durante el proceso de fusión con el láser de CO<sub>2</sub> no fundieron y, por ende, no hicieron parte del micrometeorito experimental que se formó (de haberse formado uno). No obstante, la descripción general de este material es importante ya que nos permite evaluar sus características y comportamiento de los silicatos con el aminoácido agregado principalmente.

Es bastante probable que el tamaño de grano usado como material precursor influya en el contenido de aminoácido que se conserva en el micrometeorito generado, ya que el material precursor residual cuyo tamaño es menor a 250  $\mu\text{m}$  contiene aminoácido entre los espacios y límites entre cristales, lo cual lleva a pensar que la preservación de la materia orgánica puede llegar a favorecerse al estar asociado con silicatos de tamaño muy fino desarrollando el papel de escudo de manera más eficiente. No obstante, debajo de dichos cristales no se encuentra más sino el contorno de los cristales sin fundir en contraste con el tapiz de DL – Alanina compacta que queda en el fondo de los orificios del portamuestras como se describe en capítulos anteriores.

Cuando el material precursor residual es mayor a los 500  $\mu\text{m}$ , el aminoácido ya no se mezcla junto con los cristales que no fundieron, sino que este tiende a condensarse principalmente en las paredes y bordes de los orificios del portamuestras favoreciendo la formación de las dos texturas de DL – Alanina descritas previamente (compacta y algodonosa) debido a que tiene más espacio efectivo disponible para su cristalización; sin embargo, queda claro que los silicatos de mayor tamaño tienen, menos protegen al aminoácido de reaccionar ante el calor. Una característica que se comparte independiente del tamaño de los cristales es que el aminoácido no puede meterse debajo de estos mientras se encuentran en el portamuestras, ya que al momento de removerlos se conserva el contorno de los cristales con el material orgánico remanente.

## **CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES**

### **6. CONCLUSIONES**

A partir de los resultados obtenidos y discusión realizada en el presente trabajo, se pueden formular las siguientes conclusiones:

**A)** Los parámetros experimentales específicos (tamaño de los silicatos precursores, tiempo de duración de los experimentos y cantidad de aminoácido agregado) utilizados para la réplica de micrometeoritos influyen de manera directa en la morfología de la partícula, texturas generadas y cantidad de aminoácido conservado. Si el valor de dichos parámetros fuese cambiado, el micrometeorito resultante variará en sus características fisicoquímicas.

**B)** La forma de los micrometeoritos experimentales están directamente relacionados con el valor de la temperatura alcanzada y el posicionamiento del material precursor en el portamuestras ante el láser; donde a mayor temperatura, mejor esfericidad y redondez en la partícula.

**C)** En la mayoría de las situaciones, el tamaño de los micrometeoritos experimentales obtenidos es siempre mayor al tamaño del material precursor utilizado para su formación.

**D)** Las texturas de olivino barrado (OB) y piroxeno radial (PR) se generan única y exclusivamente bajo condiciones de fusión casi total de los núcleos cristalinos y posterior sobreenfriamiento de los cristales, con tasas de enfriamiento calculadas bastante altas. El desarrollo de la textura escoriácea se atribuye a la fusión parcial producida durante la interacción del aminoácido con los silicatos durante el proceso de fusión, generando vesicularidad y anillos ígneos.

**E)** A pesar de compartir parámetros experimentales específicos iguales, las historias térmicas de los micrometeoritos son únicas para cada partícula, permitiendo calcular tasas de enfriamiento aproximadas y evaluar posibles condiciones de entrada a la atmósfera (parámetros libres).

**F)** La interacción del láser de CO<sub>2</sub> con la DL – Alanina genera dos texturas diferentes a la textura primaria obtenida cuando el aminoácido cristaliza por sí solo: una donde se asemeja a “talco” compacto sin cristales visibles a simple vista, localizada principalmente en el fondo

y paredes de los orificios del portamuestras; y otra con forma “algodonosa” generada por cadenas de cristales aciculares muy pequeños y livianos, encontrada hacia los bordes externos de los orificios del portamuestras y hacia arriba.

**G)** Los espectros infrarrojos obtenidos permiten confirmar que entre más corto sea el tiempo de duración del experimento ( $t$ ) hay mayor posibilidad de que el material orgánico agregado se preserve en los micrometeoritos experimentales. De igual forma, se confirma que no todos los grupos funcionales de la DL – Alanina se conservan después del proceso de fusión, sin embargo, algunos enlaces químicos encontrados en su estructura (como el C – H) permanecen adheridos a los silicatos.

**H)** La interacción de silicatos cuyo tamaño es menor a los 250  $\mu\text{m}$  con la DL – Alanina muestran que es posible que el aminoácido se sublime y que cierta parte se conserve entre los intersticios que forman los cristales de silicatos.

**I)** Los análisis con calorimetría diferencial de barrido (DSC) permitieron encontrar que la temperatura de fusión de la DL – Alanina cuando se encuentra sola y en estado sólido es de 310.2  $^{\circ}\text{C}$ , al estar acompañada por silicatos es de 293.9  $^{\circ}\text{C}$  y cuando está en estado líquido con silicatos es de 246.1  $^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior sucede debido a que los silicatos sirven como distribuidores de energía y calor, lo cual reduce el valor de temperatura de fusión del aminoácido y la cantidad de energía necesaria para dicho proceso.

**J)** Las curvas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) muestran que la DL – Alanina pasa de estado sólido a estado líquido (fusión) desarrollando curvas endotérmicas más pronunciadas y notorias que cuando ésta pasa de estado líquido a estado gaseoso (evaporación). Esta técnica indica que los procesos lentos de calentamiento terminan descomponiendo la materia orgánica.

**K)** Debido a la alta energía producida por el láser de  $\text{CO}_2$ , la DL – Alanina cambia de estado sólido a estado gaseoso (sublimación) en fracción de segundos, sin embargo, partículas remanentes de dicha sublimación se adhieren a la superficie sólida más cercana posible favoreciendo la sublimación y posterior solidificación, lo que puede explicar la presencia del aminoácido en los orificios del portamuestras después de los experimentos.

**L)** La descripción del material precursor residual indica que es más probable que la DL – Alanina se conserve entre los poros de los cristales con tamaño de grano más finos (< 250  $\mu\text{m}$ ), lo cual se confirma con los micrometeoritos generados en el experimento 4. Esto confirma la hipótesis planteada al inicio de la tesis en donde se indica que los silicatos ayudan a preservar la materia orgánica, actuando como una red en donde se queda atrapada el material que se sublima.

**M)** De los micrometeoritos obtenidos experimentalmente, el 85% se clasifican como MMs sin fundir, el 15% como MMs parcialmente fundidos. Lo más parecido a los micrometeoritos ultracarbonáceos lo representa el material remanente de los sustratos en donde se sublimó el aminoácido entre el material silicatado.

**N)** La sublimación de los aminoácidos debido a procesos de calentamiento o presión súbitos, en el área de la meteorítica es un campo que debe de fortalecerse y, como se demostró en esta tesis, constituye uno de los procesos por medio del cual se preserva y a la vez se liberan los aminoácidos, lo cual pudo haber contribuido a las reacciones de química prebiótica involucrados en el origen de la vida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANITHA, P. y MURUGANANTHAM, N. (2014): Growth and Characterization of L-Alanine Crystals using FT-IR, UV Visible Spectra. *International Journal of Science and Research*, v. 3, p. 51 – 56.

BOWELL, E., CHAPMAN, C., GRADIE, J., MORRISON, D. y ZELLNER, B. (1978): Taxonomy of asteroids. *Icarus*, v. 35, p. 313 – 335.

CASTRO – DORADO, A. (2015): *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*, p. 55 – 94, Ediciones Paraninfo, España.

CERVANTES – DE LA CRUZ, K.E., ORTEGA – GUTIERREZ, F., SOLÉ – VIÑAS, J., SEGURA – PERALTA, A., REYES – SALAS, M.A., ÁNGELES – GARCÍA, B.S., MACÍAS – ROMO, M.C. y LINARES – LÓPEZ, C. (2015): Experimental chondrules by melting simples of olivine, clays and carbon with a CO<sub>2</sub> laser. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v.67, p. 401 – 412.

CROSS, A.D. y JONES, R.A. (1969): *An Introduction to Practical Infra-red Spectroscopy*. -102 p., Butterworths, Londres.

DARTOIS, E., ENGRAND, C., DUPRAT, J., GODARD, M., CHARON, E., DELAUCHE, L., SANDT, C. y BORONDICS, F. (2018): Dome C ultracarbonaceous Antarctic micrometeorites. *Astronomy & Astrophysics*, v. 609, A65, -11 p.

DÁVALOS – ELIZONDO, M.G., ARANDA – GÓMEZ, J.J., LEVRESSE, G. y CERVANTES – DE LA CRUZ, K. E. (2016): Mineral chemistry and geochemistry of mantle xenoliths from the Santo Domingo volcanic field, San Luis Potosí: Evidences of mantle metasomatic processes beneath portions of the Mesa Central, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 33, p. 81 – 104.

DOBRICA, E., ENGRAND, C., LEROUX, H., ROUZAUD, J.N. y DUPRAT, J. (2012): Transmission Electron Microscopy of CONCORDIA UltraCarbonaceous Antarctic Micrometeorites (UCAMMs): Mineralogical properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 76, p. 68 – 82.

- DONALDSON, C.H. (1976): An Experimental Investigation of Olivine Morphology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 57, p. 187 – 213.
- DUPRAT, J., ENGRAND, C., MAURETTE, M., KURAT, G., GOUNELLE, M. y HAMMER, C. (2007): Micrometeorites from Central Antarctic snow: The CONCORDIA collection. *Advances in Space Research*, v. 39, p. 605 – 611.
- DUPRAT, J., DOBRICA, E., ENGRAND, C., ALÉON, J., MARROCCHI, Y., MOSTEFAOUI, S., MEIBOM, A., LEROUX, H., ROUZAUD, J.N., GOUNELLE, M. y ROBERT, F. (2010): Extreme Deuterium Excesses in Ultracarbonaceous Micrometeorites from Central Antarctic Snow. *Science*, v. 328, p. 742 – 745.
- ERICKSON, J. (2003): Comets – Cosmic Ice Debris. *Asteroids, Comets and Meteorites: Cosmic Invaders of the Earth*, p. 121 – 128, The Living Earth, New York.
- FAURE, G. y MENSING, T.M. (2007): *Introduction to Planetary Science: The Geological Perspective*. -526 p., Springer-Verlag, Holanda.
- FLETT, C. (1963): *Characteristic frequencies of chemical groups in the Infra-red*. -98 p., Elsevier Publishing Company, Amsterdam, Londres, New York.
- FOLCO, L. y CORDIER, C. (2015): Micrometeorites. *EMU Notes in Mineralogy*, v. 15, p. 253 – 297.
- GABBOTT, P. (2008): *Principles and Applications of Thermal Analysis*, p. 1 – 50, Blackwell Publishing, Londres.
- GENGE, M.J., GRADY, M.M. y HUTCHISON, R. (1997): The textures and compositions of fine-grained Antarctic micrometeorites: Implications for comparisons with meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 5149 – 5162.
- GENGE, M.J. y GRADY, M.M. (2002): The distribution of asteroids: Evidence from Antarctic micrometeorites. 33rd Lunar and Planetary Science Conference, 11 – 15 Mar 2002, Houston, Texas, Estados Unidos.
- GENGE, M.J., GILESKI, A. y GRADY, M.M. (2005): Chondrules in Antarctic micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 40, p. 225 – 238.

GENGE, M.J. (2006): Igneous rims on micrometeorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70, p. 2603 – 2621.

GENGE, M.J., ENGRAND, C., GOUNELLE, M. y TAYLOR, S. (2008): The classification of micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 43, p. 497 – 515.

GLAVIN, D.P. y BADA, J.L. (1998): Isolation of Amino Acids from Natural Samples Using Sublimation. *Analytical Chemistry*. American Chemical Society, v. 70, p. 3119 – 3122.

GOODING, J. y KEIL, K. (1981): Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation. *Meteoritics*, v. 16, p. 17 – 43.

GOUNELLE, M., CHAUSSIDON, M., MORBIDELLI, A., BARRAT, J.A., ENGRAND, C., ZOLENSKY, M.E. y McKEEGAN, K.D. (2009): A unique basaltic micrometeorite expands the inventory of solar system planetary crusts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, p. 6904 – 6909.

GRADY, M.M. (2000): *Catalogue of Meteorites: With Special Reference to those Represented in the Collection of the Natural History Museum*, -689 p., Cambridge University Press, 5ta edición, Londres.

GRESHAKE, A., KLÖCK, W., ARNDT, P., MAETZ, M., FLYNN, G.J., BAJT, S. y BISCHOFF, A. (1998): Heating experiments simulating atmospheric entry heating of micrometeorites: Clues to their parent body sources. *Meteoritics and Planetary Science*, v. 33, p. 267 – 290.

GROSSMAN, J.N., RUBIN, A.E., NAGAHARA, H. y KING, E.A. (1988): Properties of chondrules. *Meteorites and the early solar system*, editado por Kerridge, J.F. y Matthews, M.S., p. 619 – 659, The University of Arizona Press, Tucson.

HERNÁNDEZ – RESÉNDIZ, P., CRUZ – RAMÍREZ, H., U’REN, A.B., CERVANTES – DE LA CRUZ, K.E. y SEGURA, A. (2020): Citlalmitl: A Laser-based Device for Meteoritical Sample Fabrication with Arbitrary Thermal Histories. *The Planetary Science Journal*, p. 1 – 34.

HOWARD, K.T., BAILEY, M.J., BERHANU, D., BLAND, P.A., CRESSEY, G., HOWARD, L.E., JEYNES, C., MATTHEWMAN, R., MARTINS, Z., SEPHTON, M.A., STOLOJAN, V. y VERCHOVSKY, S. (2013): Biomass preservation in impact melt ejecta. *Nature Geoscience*. Nature Publishing Group, v. 6, p. 1018 – 1022.

JOHNSON, T.V. y FANALE, F.P. (1973): Optical properties of carbonaceous chondrites and their relationship to asteroids. *Journal of Geophysical Research*, v. 78, p. 8507 – 8518.

KERROD, R. (1985): Asteroides, meteoros y cometas. -Botía, P., ed. en lengua castellana. *El Universo: Planetas, soles, galaxias*, p. 90 – 93, Círculo de Lectores, Bogotá.

KOSCHNY, D., SOJA, R.H., ENGRAND, C., FLYNN, G.J., LASUE, J., LEVASSEUR – REGOURD, A., MALASPINA, D., NAKAMURA, T., POPPE, A.R., STERKEN, V.J. y TRIGO – RODRÍGUEZ, J.M. (2019): Interplanetary Dust, Meteoroids, Meteors and Meteorites. *Space Science Reviews*, v. 215, artículo No. 34.

KRUMBEIN, W.C. (1941): Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 11, p. 64 – 72.

LAETSCH, T. y DOWNS, R. (2006): Software for Identification and Refinement of Cell Parameters from Powder Diffraction Data of Minerals Using the RRUFF Project and American Mineralogist Crystal Structure Databases. Abstracts from the 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, Kobe, Japón, 23 – 28 de Julio de 2006.

LANGLAND-SHULA, L.E. y SMITH, G.H. (2011): Comet classification with new methods for gas and dust spectroscopy. *Icarus*, v. 213, p. 280 – 322.

LEVISON, H.F. (1996): Comet Taxonomy. Completing the Inventory of the Solar System. *Astronomical Society of the Pacific Conference Proceedings*, v. 107, p. 173 – 191.

LEVRESSE, G., CERVANTES – DE LA CRUZ, K.E., ARANDA – GÓMEZ, J.J., DÁVALOS – ELIZONDO, M.G., JIMÉNEZ – SANDOVAL, S., RODRÍGUEZ – MELGAREJO, F. y ALBA – ALDAVE, L.A. (2016): CO<sub>2</sub> fluid inclusion barometry in mantle xenoliths from central Mexico: A detailed record of magma ascent. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 310, p. 72 – 88.

- LOFGREN, G. y RUSSELL, W.J. (1986): Dynamic crystallization of chondrule melts of porphyritic and radial pyroxene composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 50, p. 1715 – 1726.
- LOFGREN, G. y LANIER, A.B. (1990): Dynamic crystallization study of barred olivine chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54, p. 3537 – 3551.
- LOVE, S.G. y BROWNLEE, D.E. (1991): Heating and Thermal Transformation of Micrometeoroids Entering the Earth's Atmosphere. *Icarus*, v. 89, p. 26 – 43.
- LOVE, S.G. y BROWNLEE, D. E. (1993): A Direct Measurement of the Terrestrial Mass Accretion Rate of Cosmic Dust. *Science*, v. 262, p. 550 – 553.
- MAURETTE, M., IMMEL, G., PERREAU, M., POURCHET, M., VINCENT, C. y KURAT, G. (1992): The 1991 EUROMET Collection of Micrometeorites at Cap-Prudhomme, Antarctica: Discussion of Possible Collection Biases. *Lunar and Planetary Science*, v. 23, p. 859 – 860.
- MCCORD, T.B. y GAFFEY, M.J. (1974): Asteroids: Surface compositions from reflection spectroscopy. *Science*, v. 186, p. 352 – 355.
- MICHEL, R., RAMZI AMMAR, M., PORIER, J. y SIMON, P. (2013): Phase transformation characterization of olivine subjected to high temperature in air. *Ceramics International*, v. 39, p. 5287 – 5294.
- NAKAMURA, T., NOGUCHI, T., OZONO, Y., OSAWA, T. y NAGAO, K. (2005): Mineralogy of ultracarbonaceous large micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 40, resumen 5046.
- NOGUCHI, T. y NAKAMURA, T. (2000): Mineralogy of Antarctic micrometeorites recovered from the Dome Fuji Station. *Antarctic Meteorite Research*, v.13, p. 285 – 301.
- NORTON, O.R. y CHITWOOD, L. (2008): *Field Guide to Meteors and Meteorites*. -287 p., Springer-Verlag, Londres.

OSINSKI, G.R., COCKELL, C.S., PONTEFRAC, A. y SAPERS, H.M. (2020): The Role of Meteorite Impacts in the Origin of Life. *Astrobiology*, v. 20, p. 1121 – 1149.

OSTROUMOV, M. (2007): *Espectrometría infrarroja de reflexión en Mineralogía Avanzada, Gemología y Arqueometría*. -89 p., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, México.

PRASAD, M.S., RUDRASWAMI, N.G. y PANDA, D.K. (2013): Micrometeorite flux on Earth during the last ~50,000 years. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 118, p. 2381 – 2399.

RUBIN, A.E. y GROSSMAN, J.N. (2010): Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science*, v. 45, p. 114 – 122.

RUDRASWAMI, N.G., PRASAD, M.S., DEY, S., PLANE, J.M.C., FENG, W. y TAYLOR, S. (2015): Evaluating changes in the elemental composition of micrometeorites during entry into the Earth's atmosphere. *The Astrophysical Journal*, v. 814, -11 p.

RUDRASWAMI, N.G., PRASAD, M.S., DEY, S., PLANE, J.M.C., FENG, W., CARRILLO – SÁNCHEZ, J.D. y FERNANDES, D. (2016): Ablation and chemical alteration of cosmic dust particles during entry into the Earth's atmosphere. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 227, -15 p.

SANDFORD, S.A., ENGRAND, C. y ROTUNDI, A. (2016): Organic Matter in Cosmic Dust. *Elements*, v. 12, p. 185 – 189.

SEPHTON, M.A. (2002): Organic compounds in carbonaceous meteorites. *Natural Product Reports*, v. 19, p. 292 – 311.

SOCIEDAD AMERICANA DE METEORITOS – AMS: <https://www.amsmeteors.org>. Consultada en 2020.

TAYLOR, S., LEVER, J.H. y HARVEY, R.P. (2000): Numbers, types, and compositions of an unbiased collection of cosmic spherules. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 35, p. 651 – 666.

TOPPANI, A., LIBOUREL, G., ENGRAND, C. y MAURETTE, M. (2001): Experimental simulation of atmospheric entry of micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 36, p. 1377 – 1396.

TRIGO – RODRÍGUEZ, J.M. (2013): El fenómeno meteórico y las clases de meteoritos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, v. 21, p. 234 – 242.

UNIÓN ASTRONÓMICA INTERNACIONAL – UAI, 2017:

[https://www.iau.org/static/science/scientific\\_bodies/commissions/f1/meteordefinitions\\_approved.pdf](https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf)

ZELLNER, B. y GRADIE, J. (1976): Minor planets and related objects. XX - Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids. *The Astronomical Journal*, v. 81, p. 262 – 280.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Según Van Schmus y Wood (1967) y Weisberg *et al.* (2006) las condritas pueden clasificarse en siete tipos petrológicos con base en sus particularidades mineralógicas y texturales. En este caso, solo se expondrán las características generales de los tipos petrológicos 1, 2 y 3 que son aquellos afines a la división de los tipos de FgMMs según Genge y Grady (2002).

Tipos Petrológicos	
Tipo 1	Las condritas carbonáceas CI pertenecen a este tipo petrológico y se caracterizan principalmente por carecer de cóndrulos y por contener grandes cantidades de agua y volátiles (18-22 wt% y 3-5 wt% respectivamente). Principalmente el meteorito está formado de material muy fino y debido a la alta presencia de agua los olivinos y piroxenos en la matriz están alterados a fases hidratadas.
Tipo 2	A este grupo pertenecen las condritas carbonáceas CM y CR y se distinguen por tener cóndrulos y cristales primarios de olivino y piroxeno apenas reconocibles, ya que debido a la alta cantidad de agua todavía presente (2-16 wt%) se encuentran alterados a fases hidratadas. La matriz es de grano fino, es posible encontrar sulfuros con un leve contenido de Ni y la cantidad de volátiles varía entre 0.8-2.6 wt%.
Tipo 3	A este tipo petrológico pertenecen las condritas carbonáceas CO y CV, las condritas ordinarias H, L y LL, condritas R, K y de enstatita. Estas condritas muestran un amplio rango composicional (heterogeneidad), los cóndrulos están bien definidos y mineralógicamente tienen la misma composición que su cuerpo parental. Hay ausencia de Ni en los sulfuros y la cantidad de agua y volátiles es baja (0.3-3 wt% y 0.2-1 wt% respectivamente).

Anexo 2. Datos experimentales de los micrometeoritos obtenidos en el experimento 1.

EXPERIMENTO	MATERIALES PRECURSORES	FUNDIDO	POTENCIA				FREC.	EMISIV.	TIEMPO		TEMPERATURA				TASA DE ENFRIAMIENTO					
			MASA (mg)	D.C. (%)	D.C. en temperatura máxima (%)	D.C. en 120 segundos (%)			Promedio (W)	KHz	PERFIL	t m (s)	T (s)	MÁXIMA REAL (°C)	MÁXIMA (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA REAL (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA (°C)	Pendiente en D.C.	(°C/s)	
1																				
MUESTRA	COMPOSICIÓN	TAMAÑO (µm)	MASA Ol - Px (mg)	TAMAÑO (µm)	MASA (mg)	D.C. (%)	D.C. en temperatura máxima (%)	D.C. en 120 segundos (%)	Promedio (W)	KHz	EMISIV.	PERFIL	t m (s)	T (s)	MÁXIMA REAL (°C)	MÁXIMA (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA REAL (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA (°C)	Pendiente en D.C.	(°C/s)
1-1	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,6 - 1,4	1040	1,5	95	91,275	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1425,180723	1182,9	936,626506	777,4	-0,50291071	4,36209122
1-2	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,3 - 1,5	1320	1,5	95	92,758	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1348,072289	1118,9	846,746988	702,8	-0,62160215	5,39059464
1-3	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,8 - 1,6	1170	2,3	95	94,969	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1433,855422	1190,1	908,313253	753,9	-0,55574074	4,86613119
1-4	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,6 - 1,5	1350	2,4	95	94,874	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1347,228916	1118,2	880,963855	731,2	-0,56533019	4,39872698
1-5	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,5 - 1,5	1220	1,7	95	91,275	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1371,927711	1138,7	849,638554	705,2	-0,64006818	5,93510405
1-6	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,8 - 1,6	1530	2,2	95	66,279	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1544,216867	1281,7	970	805,1	-0,27008621	4,95014541
2-1	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,6 - 1,5	1220	1,8	95	94,992	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1272,53012	1056,2	871,204819	723,1	-0,55085321	3,6818835
2-2	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,7 - 1,7	1420	1,0	95	91,275	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1889,277108	1568,1	1142,53012	948,3	-0,50291071	6,66738382
2-3	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,8 - 1,6	1100	2,2	95	91,275	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1437,590361	1193,2	887,590361	736,7	-0,64006818	6,25
2-4	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,5 - 1,6	1200	1,6	95	94,055	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1243,373494	1032	818,313253	679,2	-0,53248649	3,82937154
2-5	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,6 - 1,4	1280	1,7	95	94,718	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1761,686747	1462,2	1103,85542	916,2	-0,57470192	6,3253012
2-6	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - varios granos	1,8 - 1,6	1800	2,7	95	91,275	34,949	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1312,168675	1089,1	844,457831	700,9	-0,50291071	4,17598967

3-1	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,6 - 1,4	1260	1,2	95	94.804	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1529.277108	1269.3	847.46988	703.4	-0.57004762	6.49540218
3-2	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,8 - 1,5	1110	2,3	95	93.011	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1285.662651	1067.1	873.73494	725.2	-0.61768085	4.38220969
3-3	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,4 - 1,3	1650	2,4	95	94.804	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1105.301205	917.4	777.831325	645.6	-0.57004762	3.11876076
3-4	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,7 - 1,7	1700	3,1	95	92.49	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1323.012048	1098.1	850.60241	706	-0.62544565	5.13488738
3-5	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,9 - 1,8	1550	1,7	95	94.055	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1814.939759	1506.4	1073.61446	891.1	-0.5970303	7.48815436
3-6	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,6 - 1,6	1100	2,3	95	92.49	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1341.204819	1113.2	923.614458	766.6	-0.62544565	4.53902567
4-1	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,9 - 1,7	2260	1,7	95	92.758	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1762.650602	1463	1092.04819	906.4	-0.62160215	7.2107786
4-2	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,5 - 1,3	1520	2,7	95	91.275	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1579.036145	1310.6	964.578313	800.6	-0.50291071	5.48625064
4-3	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,6 - 1,7	2140	3,4	95	94.616	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1506.746988	1250.6	1021.80723	848.1	-0.57929126	4.708153
4-4	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,4 - 1,2	1320	1,5	95	95	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1728.072289	1434.3	1111.20482	922.3	-0.54591818	5.60788609
4-5	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,4 - 1,3	1710	1,3	95	91.275	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1286.746988	1068	815.662651	677	-0.64006818	5.35323111
4-6	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,4 - 1,3	1440	3,1	95	94.366	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1465.783133	1216.6	1005.66265	834.7	-0.58828713	4.55564834
5-1	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,5 - 1,4	1730	2,4	95	80.954	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1211.566265	1005.6	826.26506	685.8	-0.40355263	3.37983513
5-2	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,7 - 1,7	2500	2,9	95	73.986	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1372.048193	1138.8	901.807229	748.5	-0.33945217	4.08905186
5-3	Olivino + Enstata + DL - Alamina	500 - varios granos	1,4 - 1,4	1400	2,0	95	93.474	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1551.807229	1288	954.819277	792.5	-0.60963542	6.2186245

5-4	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	500 - varios granos	1,6 - 1,6	1530	3,5	95	93.011	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1667.108434	1383.7	1075.42169	892.6	-0.61768085	6.29453986
5-5	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	500 - varios granos	1,4 - 1,5	1620	3,4	95	80.954	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1304.096386	1082.4	875.421687	726.6	-0.40355263	3.76030438
5-6	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	500 - varios granos	1,8 - 1,9	1420	2,0	95	94.929	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1657.108434	1375.4	1054.81928	875.5	-0.56056075	5.62887062
6-1	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	1000 - varios granos	2,3 - 2,3	1780	3,3	95	93.876	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1442.048193	1196.9	820.481928	681	-0.60129592	6.34251291
6-2	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	1000 - varios granos	2,8 - 2,8	1920	3,2	95	94.055	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1546.385542	1283.5	844.457831	700.9	-0.53248649	6.3267307
6-3	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	1000 - varios granos	3,0 - 3,0	1660	3,0	95	94.366	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1585.903614	1316.3	1003.49398	832.9	-0.58828713	5.76643206
6-4	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	1000 - varios granos	2,4 - 2,4	1920	4,9	95	95	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1794.216867	1489.2	1115.78313	926.1	-0.54591818	6.16757941
6-5	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	1000 - varios granos	1,6 - 1,5	1030	1,5	95	94.969	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1218.192771	1011.1	760.361446	631.1	-0.55574074	4.23917894
6-6	Olivino + Enstatia + DL - Alamina	1000 - varios granos	3,7 - 3,8	1620	5,7	95	93.25	34.949	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1897.46988	1574.9	1290.96386	1071.5	-0.61369474	6.38427394

Anexo 3. Datos experimentales de los micrometeoritos obtenidos en el experimento 2.

EXPERIMENTO	MATERIALES PRECURSORES	FUNDDIDO	POTENCIA			FREC.	EMISIV.	TIEMPO			TEMPERATURA				TASA DE ENRIAMIENTO					
			TAMANO (µm)	MASA (mg)	D.C. en T(s)			Promedio (W)	KHz	PERFIL	t <sub>m</sub> (s)	T (s)	MAXIMA REAL (°C)	MÁXIMA (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA REAL (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA (°C)	Pendiente en D.C.	(°C/s)		
2																				
MUESTRA	COMPOSICIÓN	TAMANO (µm)	MASA Ol - Px (mg)	TAMANO (µm)	MASA (mg)	D.C. (%)	D.C. en temperatura máxima (%)	D.C. en T(s)	Promedio (W)	KHz	EMISIV.	PERFIL	t <sub>m</sub> (s)	T (s)	MAXIMA REAL (°C)	MÁXIMA (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA REAL (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA (°C)	Pendiente en D.C.	(°C/s)
1-1	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - un grano	0.1 - 0.0	N/D	No fundió	95	92.49	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	30	360	731.204819	606.9	360.240964	299	-0.2688314	1.0783833
1-2	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - un grano	0.6 - 0.0	N/D	No fundió	95	89.241	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	831.084337	689.8	360.240964	299	-0.42336019	2.23148518
1-3	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - un grano	0.4 - 0.4	N/D	No fundió	95	93.397	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	928.313253	770.5	360.240964	299	-0.42447727	2.58214677
1-4	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - un grano	0.3 - 0.0	N/D	No fundió	95	86.823	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	1049.51807	871.1	360.240964	299	-0.37580519	2.98388359
1-5	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - un grano	0.2 - 0.2	N/D	No fundió	95	89.445	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1213.49398	1007.2	360.240964	299	-0.88547525	8.44804962
1-6	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	250 - un grano	0.0 - 0.0	N/D	No fundió	95	93.971	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	1055.42169	876	360.240964	299	-0.42323874	3.1314447
2-1	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	0.3 - 0.0	N/D	No fundió	95	93.876	0.012	51.74	20	100	Onda de choque	30	360	920.481928	764	360.240964	299	-0.29516981	1.76176404
2-2	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	1.3 - 1.0	N/D	No fundió	95	94.742	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	1586.0241	1316.4	360.240964	299	-0.41915929	5.42381917
2-3	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	2.2 - 2.1	2140	4.3	95	94.935	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	1455.06024	1207.7	360.240964	299	-0.41632895	4.80183893
2-4	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	0.8 - 0.9	1270	1.5	95	92.307	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	1062.28916	881.7	360.240964	299	-0.42532258	3.23524513
2-5	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	0.8 - 0.7	N/D	No fundió	95	93.876	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	120	1626.50602	1350	360.240964	299	-0.88550943	11.94589868
2-6	Olivino + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	0.5 - 0.5	N/D	No fundió	95	93.971	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	10	240	1136.38554	943.2	360.240964	299	-0.42323874	3.49614675

3-1	Olivino + Ensatita + DL - Alamina	<125 - varios granos	0,9 - 3,1	730 - 960	Infrarrojo - N/D	95	N/D	N/D	51,74	20	85	Onda de choque	30	360	1213,49398	1007,2	360,240964	299	N/D	N/D
3-2	Olivino + Ensatita + DL - Alamina	<125 - varios granos	2,5 - 2,3	600 - 1020	1,6 (x2)	95	N/D	N/D	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1381,44578	1146,6	360,240964	299	N/D	N/D
3-3	Olivino + Ensatita + DL - Alamina	<125 - varios granos	1,7 - 1,6	460 - 980	1,5 (x3)	95	94,855	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1476,0241	1225,1	360,240964	299	-0,41781057	4,9153442
3-4	Olivino + Ensatita + DL - Alamina	<125 - varios granos	1,1 - 1,4	550 - 960	1,4 (x2)	95	93,971	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1239,51807	1028,8	360,240964	299	-0,42323874	3,9607077
3-5	Olivino + Ensatita + DL - Alamina	<125 - varios granos	1,8 - 2,2	1520	1,4 (el más grande)	95	93,25	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	120	1439,15663	1194,5	360,240964	299	-0,88798095	10,2753873
3-6	Olivino + Ensatita + DL - Alamina	<125 - varios granos	1,3 - 1,5	N/D	No fundió	95	93,971	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1434,57831	1190,7	360,240964	299	-0,42323874	4,83935743
4-1	Ensatita + DL - Alamina	500 - un grano	1,6	N/D	No fundió	95	92,49	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	30	360	1073,01205	890,6	360,240964	299	-0,29640385	2,28452271
4-2	Ensatita + DL - Alamina	500 - un grano	0,5	1170	Infrarrojo - N/D	95	93,971	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	951,807229	790	360,240964	299	-0,42323874	2,66471291
4-3	Ensatita + DL - Alamina	500 - un grano	0,3	1140	0,1 (x2)	95	93,397	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1290,72289	1071,3	360,240964	299	-0,42447727	4,22946531
4-4	Ensatita + DL - Alamina	500 - un grano	0,7	N/D	No fundió	95	93,397	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1066,86747	885,5	360,240964	299	-0,42447727	3,21193866
4-5	Ensatita + DL - Alamina	500 - un grano	0,9	1480	0,8	95	93,876	0,012	51,74	20	100	Onda de choque	10	120	1032,40964	856,9	360,240964	299	-0,88550943	6,34121391
4-6	Ensatita + DL - Alamina	500 - un grano	0,9	1620	0,8 (x3)	95	94,42	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1270,24096	1054,3	360,240964	299	-0,42146429	4,0625
5-1	Olivino + DL - Alamina	500 - un grano	1,3	N/D	No fundió	95	92,758	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	30	360	1276,38554	1059,4	360,240964	299	-0,2963131	2,92697948
5-2	Olivino + DL - Alamina	500 - un grano	0,5	N/D	No fundió	95	92,307	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1040,36145	863,5	360,240964	299	-0,42532258	3,13419577
5-3	Olivino + DL - Alamina	500 - un grano	0,2	N/D	No fundió	95	66,279	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	673,373494	558,9	360,240964	299	-0,28563362	1,34970918
5-4	Olivino + DL - Alamina	500 - un grano	0,7	N/D	No fundió	95	86,823	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	815,060241	676,5	360,240964	299	-0,37580519	1,96891462
5-5	Olivino + DL - Alamina	500 - un grano	0,7	1410	0,4	95	94,366	0,012	51,74	20	100	Onda de choque	10	120	1040,72289	863,8	360,240964	299	-0,88181308	6,35064418
5-6	Olivino + DL - Alamina	500 - un grano	0,5	1170	Infrarrojo - N/D	95	93,397	0,012	51,74	20	85	Onda de choque	10	240	1078,6747	895,3	360,240964	299	-0,42447727	3,26560789
6-1	DL - Alamina	Solución 90% M	2,0	N/D	N/D	95	N/D	N/D	51,74	20	85	Onda de choque	30	360	361,445783	300	360,240964	299	N/D	N/D

6-2	DL - Alamina	Solucion 90% M	2.0	N/D	N/D	95	66.279	0.012	51.74	20	85	Orda de choque	10	240	426.987952	354.4	360.240964	299	-0.28563362	0.28770253
6-3	DL - Alamina	Solucion 90% M	2.0	N/D	N/D	95	N/D	N/D	51.74	20	85	Orda de choque	10	240	361.445783	300	360.240964	299	N/D	N/D
6-4	DL - Alamina	Solucion 90% M	2.0	N/D	N/D	95	N/D	N/D	51.74	20	85	Orda de choque	10	240	361.445783	300	360.240964	299	N/D	N/D
6-5	DL - Alamina	Solucion 90% M	2.0	N/D	N/D	95	N/D	N/D	51.74	20	85	Orda de choque	10	120	361.445783	300	360.240964	299	N/D	N/D
6-6	DL - Alamina	Solucion 90% M	2.0	N/D	N/D	95	N/D	N/D	51.74	20	85	Orda de choque	10	240	361.445783	300	360.240964	299	N/D	N/D

Anexo 4. Datos experimentales de los micrometeoritos obtenidos en el experimento 4.

EXPERIMENTO	MATERIALES PRECURSORES	FUNDIDO	POTENCIA				FREC.	EMISIV.	TIEMPO		TEMPERATURA				TASA DE ENRIAMIENTO					
			MASA (mg)	TAMANO (µm)	D.C. en temperatura máxima (%)	D.C. en 8 segundos (%)			Promedio (W)	MÁXIMA REAL (°C)	MÁXIMA (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA REAL (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA (°C)	Pendiente en D.C.	(°C/s)					
4																				
MUESTRA	COMPOSICION	TAMAÑO (µm)	MASA OI - Px (mg)	TAMAÑO (µm)	MASA (mg)	D.C. (%)	D.C. en temperatura máxima (%)	D.C. en 8 segundos (%)	Promedio (W)	KHz	EMISIV.	PERFIL	t <sub>m</sub> (s)	T (s)	MÁXIMA REAL (°C)	MÁXIMA (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA REAL (°C)	ÚLTIMA REGISTRADA (°C)	Pendiente en D.C.	TASA DE ENRIAMIENTO (°C/s)
1-1	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	125 - varios granos	1.0 - 1.0	1300	0.6	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	969.518072	804.7	360.240964	299	-47.494	304.638554
1-2	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	125 - varios granos	1.0 - 1.2	N/D	Se perdió	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1255.78313	1042.3	360.240964	299	-47.494	447.771084
1-3	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	125 - varios granos	1.4 - 1.2	880	0.9	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1255.06024	1041.7	360.240964	299	-47.494	447.409639
1-4	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	125 - varios granos	1.6 - 1.3	1150	0.8	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1706.50602	1416.4	360.240964	299	-47.494	673.13253
1-5	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	125 - varios granos	1.5 - 1.4	1630	1.2	95	73.986	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1618.07229	1343	360.240964	299	-24.658	419.277108
1-6	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	125 - varios granos	1.3 - 1.3	N/D	No fundió	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1164.09639	966.2	360.240964	299	-47.494	401.927711
3-1	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	500 - varios granos OI	2.2 - 2.3	1390	2.2	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1549.75904	1286.3	360.240964	299	-47.494	594.759036
3-2	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	500 - varios granos OI	1.5 - 1.5	N/D	No fundió	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	910.481928	755.7	360.240964	299	-47.494	275.120482
3-3	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	1.2 - 1.3	1750	2.1	95	73.986	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1066.62651	885.3	360.240964	299	-24.658	235.461847
3-4	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	0.8 - 0.8	N/D	No fundió	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1040.12048	863.3	360.240964	299	-47.494	339.939759
3-5	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	1.4 - 1.4	1000	1.3	95	95	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1756.38554	1457.8	360.240964	299	-47.494	698.072289
3-6	Olivo + Enstatita + DL - Alamina	500 - un grano	1.1 - 1.2	1170 - 1440	2.1 (2 pcs.)	95	73.986	0.012	51.74	20	85	Onda de choque	6	8	1172.53012	973.2	360.240964	299	-24.658	270.763052

