



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA  
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

**ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS CÓNDRULOS EN METEORITAS AFRICANAS  
Y SU RELACIÓN CON LA FORMACIÓN DEL SISTEMA SOLAR**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
JOSÉ LUIS LEAL HERRERA

TUTOR:  
MARÍA DOLORES MARAVILLA MEZA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

MÉXICO, D.F., ENERO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

# Agradecimientos

---

Le doy gracias a mi tutora la Dra. María Dolores Maravilla Meza por el apoyo, dedicación y entusiasmo que me brindó durante la elaboración de esta tesis, así como los valiosos comentarios y aportaciones de los sinodales: La Dra. Julieta Fierro, la Dra. Guadalupe Cordero, la Dra. Bárbara Pichardo y el Dr. Gustavo Tolson.

Agradezco a CONACyT por el apoyo otorgado para mis estudios de maestría a través de las Becas Nacionales, así como a la Universidad Nacional Autónoma de México por los apoyos económicos que me otorgó durante la elaboración de esta tesis a través del proyecto DGAPA: IN107612 “Estudio de la coagulación del polvo protoplanetario” y del programa de becas del Instituto de Geofísica-UNAM.

*Especialmente dedicada a mis dos grandes amores: Diana y Liber.*



---

# Resumen

---

Actualmente se sabe que el sistema solar se originó hace aproximadamente 4,500 millones de años y que su origen se derivó de un proceso de muerte estelar (Adams, 2010). Se piensa que los cuerpos que integran el sistema solar, entre los que se encuentran: los planetas, los asteroides, los cometas y otros cuerpos menores, fueron creados a partir de un proceso de agregación de partículas sólidas de micro y nanoescala que coexistieron con el gas circundante en una fase primitiva del disco protoplanetario (Chiang y Youdin, 2010).

Debido a que la Tierra es un cuerpo muy dinámico y se encuentra en constante cambio, el material que la compone no ha preservado el registro de las etapas tempranas de la formación planetaria (Connolly y Desch, 2004). Sin embargo, otros cuerpos en el sistema solar como son cierto tipo de meteoritas, conocidas como condritas, sí han conservado parte de su estructura y composición originales (Sears, 2004). El estudio de la condritas, y particularmente de las condritas carbonosas, ha permitido entender las condiciones y la dinámica de la región en la cual se originaron los planetas del sistema solar (Scott, 2007; Alexander et al., 2008). Es por ello que en este estudio se propuso analizar varias muestras de condritas carbonosas para estudiar las condiciones físicas que dieron origen al sistema solar y que propiciaron su posterior evolución.

A continuación se describen las tres secciones principales de este trabajo y finalmente se enuncian brevemente las aportaciones de nuestro estudio.

## **Antecedentes y motivación**

En el Capítulo 1 se describe el sistema solar y sus características principales, los planetas extrasolares (exoplanetas) y los discos protoplanetarios. Así como el proceso principal de la formación planetaria y su relación con el material de origen meteorítico.

Debido a que el material de estudio en este trabajo son las meteoritas, en el Capítulo 2 se revisan características, tales como su clasificación y propiedades físicas, químicas, petrográficas y minerográficas. Se destacan las características de las condritas, pues las muestras

---

meteoríticas estudiadas en este trabajo pertenecen a este grupo.

## **Metodología**

En el Capítulo 3 se explica la preparación de las muestras meteoríticas, las técnicas de microscopía; así como los métodos usados en el procesamiento digital de las muestras, incluyendo los algoritmos de cómputo utilizados. Adicionalmente, se describen los criterios geométricos y estadísticos usados para la construcción de las funciones de distribución de tamaños de los cóndrulos.

También se describe el modelo de Schwartz-Saltykov como el método estereológico utilizado para corregir los datos bidimensionales y proyectar el valor más próximo al diámetro tridimensional real de los cóndrulos. Ya que las muestras meteoríticas preparadas en el laboratorio son muestras petrológicas delgadas.

## **Resultados y discusión**

En el Capítulo 4 se reportan las distribuciones de tamaños obtenidas para las muestras petrológicas delgadas, y las distribuciones corregidas mediante el modelo estereológico de Schwartz-Saltykov. Además, se muestran los parámetros estadísticos relacionados con la distribución de los cóndrulos.

Varios estudios sobre el tamaño de los cóndrulos en meteoritas de diversos grupos han reportado que la distribución de tamaños se ajusta a diversas funciones teóricas, como son: la función lognormal y la función Weibull. Por esta razón, al final de este capítulo se ajustan las distribuciones de tamaños de los cóndrulos proyectados tridimensionalmente a estas funciones de densidad. Para evaluar la calidad del ajuste de las funciones teóricas con los datos empíricos se aplicó el procedimiento conocido como *prueba de hipótesis* utilizando las estadísticas de Kolmogórov-Smirnov, de Anderson–Darling y Chi-cuadrada de Pearson como pruebas de bondad de ajuste.

En el Capítulo 5 se discuten los resultados presentados en el capítulo anterior, y se comparan con los obtenidos por otros autores. Al final del capítulo se discute el modelo de coacreción de cóndrulos y polvo de Ormel et al. (2008), donde la turbulencia del gas nebular es el mecanismo principal que modula la formación de cuerpos mayores a partir de suponer que el disco protoplanetario estaba compuesto por cóndrulos, polvo y gas.

Los resultados obtenidos por Ormel y sus colaboradores, se procesaron digitalmente y se compararon estos resultados con los obtenidos por nosotros para las muestras meteoríticas estudiadas en este trabajo.

Por otro lado, en el Apéndice A se describen las distribuciones teóricas utilizadas en las pruebas de bondad de ajuste, así como los parámetros obtenidos para las muestras meteoríticas en estudio.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo así como las referencias bibliográficas.

### **Aportaciones**

De los resultados obtenidos en este trabajo, los más relevantes son:

Existe una similitud en los parámetros estadísticos y la forma de la distribución de las meteoritas NWA y Allende confirmándose que pertenecen al grupo Vigarano (CV3). Los cóndrulos de estas meteoritas tienen un diámetro promedio de 905 micras que coincide con el diámetro promedio ponderado reportado por Friedrich et al. (2014) para las condritas del grupo CV.

El ajuste de la distribución de tamaños empírica con las funciones lognormal y Weibull es pobre para las meteoritas NWA2086 y NWA6567 y muy pobre para las NWA7043, NWA4502 y NWA7678, lo que concuerda con los resultados de Teitler et al. (2010) y Ebel et al (2015) y con la recomendación de Friedrich et al. (2014).

El diámetro promedio de los cóndrulos y la forma de la distribución para una condrita artificial creada a partir del modelo de co-acreción de cóndrulos y polvo de Ormel et al. (2008) coinciden con los resultados obtenidos para las meteoritas NWA (2086, 7043, 6567, 4502 y 7678) y Allende. Estos resultados indican que las condiciones iniciales y las características físicas consideradas en el modelo de co-acreción probablemente fueron algunas de las características y condiciones que tuvo el disco protoplanetario cuando se agregaron y formaron los protoplanetas y tal vez esas condiciones y características pudieron ser las que dieron origen a la distribución de tamaños de cóndrulos observada actualmente en las condritas carbonosas.

---

# Índice general

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>V</b>
<b>Índice general</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. El sistema solar . . . . .	1
1.2. Otros sistemas planetarios . . . . .	3
1.3. Formación del sistema solar . . . . .	5
1.4. Las meteoritas . . . . .	6
<b>2. Meteoritas</b>	<b>9</b>
2.1. Clasificación de las meteoritas . . . . .	11
2.2. Las condritas y sus componentes . . . . .	13
2.2.1. Los cóndrulos . . . . .	15
2.2.2. Las inclusiones refractarias . . . . .	18
2.2.3. La matriz . . . . .	18
2.2.4. Las condritas carbonosas . . . . .	19
<b>3. Metodología</b>	<b>21</b>
3.1. Muestras meteoríticas . . . . .	21
3.1.1. Características y clasificación . . . . .	21
3.1.2. Preparación de las muestras . . . . .	22

3.1.3. Microscopio electrónico de barrido (SEM) . . . . .	23
3.2. Procesamiento digital de las imágenes . . . . .	24
3.2.1. Medición y conteo de cóndrulos . . . . .	27
3.2.2. Cóndrulos . . . . .	28
3.3. Corrección estereológica . . . . .	33
<b>4. Resultados</b>	<b>37</b>
4.1. Distribución de tamaños de los cóndrulos . . . . .	37
4.2. Distribución de tamaños (corrección estereológica) . . . . .	40
4.3. Ajuste de un modelo estadístico . . . . .	40
4.4. Prueba de hipótesis . . . . .	43
<b>5. Discusión</b>	<b>47</b>
5.1. Consideraciones en la distribución de tamaños . . . . .	47
5.2. Distribución de tamaños de las muestras meteoríticas NWA . . . . .	48
5.2.1. Análisis comparativo con Allende . . . . .	49
5.3. Tamaño característico de los cóndrulos . . . . .	52
5.4. Ajuste de un modelo estadístico . . . . .	53
5.5. Formación de cóndrulos . . . . .	55
5.5.1. Teorías y modelos . . . . .	55
5.6. Modelo de co-acreción de cóndrulos . . . . .	56
<b>Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>A. Pruebas de bondad de ajuste</b>	<b>61</b>
A.1. Estadísticas . . . . .	61
A.2. Prueba de hipótesis . . . . .	62
A.3. Valor-p . . . . .	63
A.4. Resultados . . . . .	63
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Estructura actual del sistema solar. . . . .	2
1.2. Planetas extrasolares. . . . .	4
2.1. Flujo anual de material extraterrestre que llega a la Tierra. . . . .	10
2.2. Clasificación de las meteoritas. . . . .	12
2.3. Abundancias de los elementos no-volátiles en las condritas carbonosas. . . .	14
2.4. Fotografía de un cóndrulo en la meteorita Allende. . . . .	15
3.1. Imagen de muestras meteoríticas preparadas en el laboratorio. . . . .	23
3.2. Fotomicrografías de meteoritas capturada con el microscopio óptico Carl Zeiss.	24
3.3. Fotografía individual de muestra meteorítica en el microscopio electrónico JSM-5600LV. . . . .	26
3.4. Barrido fotográfico de una muestra meteorítica en el microscopio electrónico JSM-5600LV. . . . .	27
3.5. Mapas fotográficos correspondientes a las muestras meteoríticas. . . . .	28
3.6. Mapas de las muestras meteoríticas en formato binario. . . . .	30
3.7. Gráficas de la circularidad de las partículas en las muestras meteoríticas. . . .	31
3.8. Diámetros equivalentes. . . . .	32
3.9. Corte transversal en muestra meteorítica. . . . .	33
3.10. Diagrama del modelo estereológico para una partícula con geometría circular	34
3.11. Diagrama del modelo estereológico para un conjunto de tres partículas . . . .	35
4.1. Histogramas de las muestras meteoríticas NWA y allende a partir de la regla de Freedman-Diaconis . . . . .	39
4.2. Histogramas de las muestras meteoríticas obtenidos a partir de la corrección estereológica . . . . .	41



4.3. Histogramas de las muestras meteoríticas obtenidos a partir de la corrección estereológica . . . . .	44
4.4. Gráficas P-P de los diámetros de los cóndrulos y las funciones de densidad lognormal y Weibull . . . . .	45
5.1. Estudios históricos de la distribución de tamaños de cóndrulos en la meteorita Allende . . . . .	50
5.2. Distribución de tamaños de cóndrulos de la meteorita Allende obtenida con cuatro reglas estadísticas . . . . .	51
5.3. Distribución de tamaños de los cóndrulos del modelo de co-acreción . . . . .	57

# Índice de tablas

---

2.1. Abundancias de los componentes condriticos . . . . .	17
3.1. Características de las muestras meteoríticas . . . . .	22
3.2. Mineragrafía de las muestras meteoríticas . . . . .	25
3.3. Algoritmo simplificado de ImageJ para la preparación de los mapas . . . . .	29
4.1. Resultados estadísticos de las muestras meteoríticas . . . . .	40
4.2. Parámetros de las funciones de distribución lognormal y Weibull . . . . .	42
4.3. Pruebas de bondad de ajuste para la funciones de distribución lognormal y Weibull . . . . .	46
5.1. Resumen de los diámetros promedio de varias condritas carbonosas reportados por varios autores . . . . .	53
5.2. Resultados estadísticos del modelo de co-acreción de cóndrulos . . . . .	58
A.1. Pruebas de bondad de ajuste para la función de distribución lognormal . . . . .	64
A.2. Pruebas de bondad de ajuste para la función de distribución Weibull . . . . .	65



---

# Capítulo 1

## Introducción

---

En este capítulo se describe el sistema solar y sus características principales, los planetas extrasolares y los discos protoplanetarios, así como el proceso principal de la formación planetaria. Al final del capítulo se relaciona el material de origen meteorítico con el sistema solar en sus etapas tempranas.

### 1.1. El sistema solar

Si quisieramos hacer un inventario de lo que hay en el sistema solar, encontraríamos que contiene una amplia gama de cuerpos por clasificar (Figura 1.1). Primero está el Sol, que se trata de una estrella tipo G2V de la secuencia principal y que posee el 99.86 % de la masa total del sistema. Después se encuentra la región conocida como *el sistema solar interior*, que comprende el espacio entre el Sol y 5 UA<sup>1</sup> y que está poblada por un conjunto de cuerpos rocosos compuestos principalmente de silicatos y metales. De estos cuerpos, destacan por su tamaño los planetas rocosos (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte), el planeta enano Ceres y el cinturón de asteroides.

Más allá del sistema solar interior, entre 5 y 30 UA, se encuentran los planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), los centauros<sup>2</sup> y algunos cometas de periodo corto. Entre 30 y 50 UA, encontramos el cinturón de Kuiper: estructura que asemeja una región anular, con geometría similar al cinturón de asteroides y poblada por cuerpos compuestos de hielo de agua, metano y amoníaco, también llamados (*KBO*) por sus siglas en inglés (Tegler, 2007).

---

<sup>1</sup>La unidad astronómica (UA) es una unidad de longitud que representa la distancia entre el centro del Sol y el centro de la Tierra. Está definida como 149 597 870 700 m (~150 millones de km) por la Unión Astronómica Internacional (resolución B2, XXVIII Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional, 31 de agosto de 2012).

<sup>2</sup>Los centauros son un tipo de cuerpos menores del sistema solar que se caracterizan por comportarse tanto como asteroides como cometas; de ahí su nombre de centauro, ser mitológico que era mitad caballo y mitad humano. Los centauros orbitan alrededor del Sol entre Júpiter y Neptuno, cruzando las órbitas de los gigantes gaseosos. El primer centauro descubierto fue (2060) Quirón en 1977, mientras que el más grande actualmente conocido es (10199) Chariklo descubierto en 1997 (Delsanti y Jewitt, 2006).

## 1.1. El sistema solar

Más allá de las 100,000 UA se localiza la nube de Oort, la cual es una estructura con geometría esférica formada por  $\sim 10^{12}$  cuerpos. La existencia de esta estructura fue sugerida teóricamente por J. M. Oort en 1950 como una fuente probable de los cometas de periodo largo (Feng y Bailer-Jones, 2015).

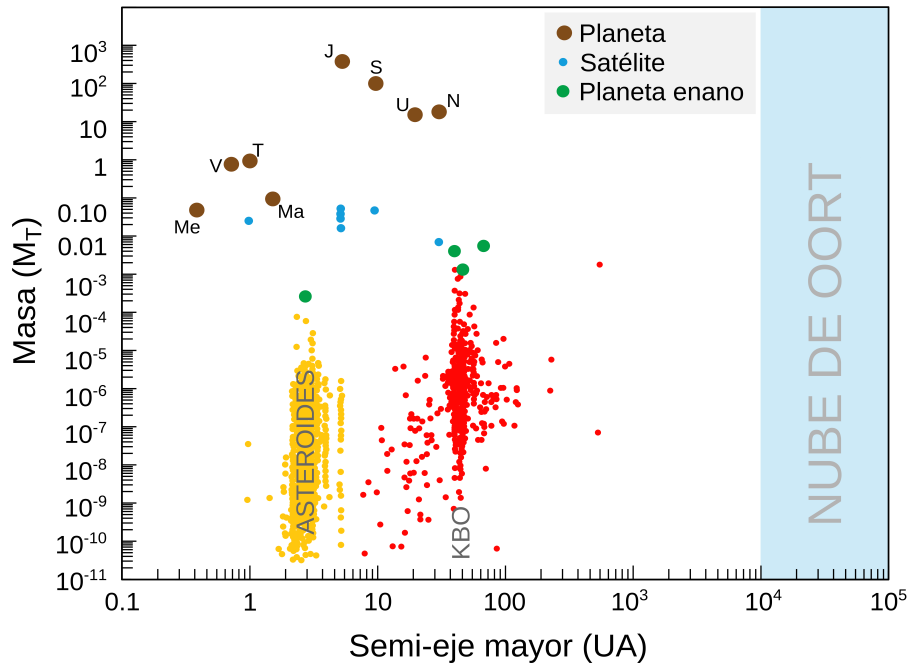


Figura 1.1. Estructura básica del sistema solar. La gráfica muestra la masa (en términos de la masa de la Tierra,  $M_T$ ) y la distancia al Sol (UA) de los planetas, cuerpos menores y estructuras principales del sistema solar. El tamaño de los símbolos no representa la escala real de los cuerpos, y como referencia, se etiquetan los planetas de la siguiente manera: Mercurio (Me), Venus (V), la Tierra (T), Marte (M), Júpiter (J), Saturno (S), Urano (U) y Neptuno (N). Con información de: NASA, Planetary Fact Sheet (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>), NASA, JPL Small-Body Database Browser (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>), y de Feng y Bailer-Jones (2015).

Algunas características relevantes del sistema solar son:

**La geometría.** Los planetas se localizan en el mismo plano (conocido como el *plano de la eclíptica*) y están distribuidos regularmente en el espacio. Orbitan alrededor del Sol en la misma dirección y su rotación (excepto Venus y Urano) está dada en la misma dirección que la rotación solar. Además, el periodo orbital de los planetas se incrementa con su distancia, de acuerdo con la tercera ley de Kepler. Los cuerpos de menor tamaño en el cinturón de asteroides y el cinturón de Kuiper exhiben órbitas más excéntricas y más inclinadas que las de los planetas.

**La estructura y composición química.** Los planetas rocosos y más pequeños se ubican en la región interna del sistema solar; mientras que los gaseosos y más grandes residen en la parte externa del sistema, es decir, la densidad planetaria es una función que decrece con la distancia heliocéntrica.

El cinturón de asteroides está formado por cuerpos rocosos que presentan un gradiente en su composición química; mientras que el cinturón de Kuiper está formado por cuerpos cuya densidad es  $< 1 \text{ g/cm}^3$  y temperatura de  $\sim 50 \text{ K}$ , valores que se relacionan con cuerpos compuestos por materiales volátiles y en forma de hielo (Jewitt and Luu, 2004; Tegler, 2007). Es por ello que se sabe también que la abundancia de los materiales refractarios es mayor en las regiones cercanas al Sol, y lo contrario ocurre para la abundancia de los elementos volátiles.

**La geología.** Los cuerpos más pequeños tienen forma irregular y por lo general son cuerpos no diferenciados. Mientras que la superficie de los cuerpos rocosos presenta cráteres de impacto, procesos tectónico y actividad volcánica, revelando con ello la historia de su actividad térmica y de un pasado altamente dinámico.

## 1.2. Otros sistemas planetarios

Si bien desde hace cientos de años se pensaba que podía existir otro planeta fuera del sistema solar (Woolfson, 2014), fue hasta hace poco tiempo que se pudo confirmar esta hipótesis (Wolszczan y Frail, 1992). En los últimos 25 años se han descubierto alrededor de 1900 planetas extrasolares, llamados también *exoplanetas*, utilizando diferentes técnicas de detección (Figura 1.2). La mayoría de ellos se han detectado usando la técnica de *velocidades radiales*, la cual es una medición indirecta del movimiento de la estrella huésped que es inducido por la presencia del planeta, donde las oscilaciones de la estrella se miden con la técnica conocida como *espectroscopía Doppler* (Wolszczan, 2006).

Otro método con el cual se ha detectado un gran número de exoplanetas es el método de *tránsito*; este consiste en observar fotométricamente la estrella y detectar cambios sutiles en la intensidad de su luz cuando un planeta orbita por delante de ella.

Recientemente, Cassan et al. (2012) reportaron la observación de una población de planetas que se encuentran alejados de sus estrellas huésped utilizando la técnica de microlentes gravitacionales. Como resultado de este estudio, Cassan y sus colaboradores infirieron que todas las estrellas de la Vía Láctea podrían tener, por lo menos, un planeta orbitándolas.

## 1.2. Otros sistemas planetarios

---

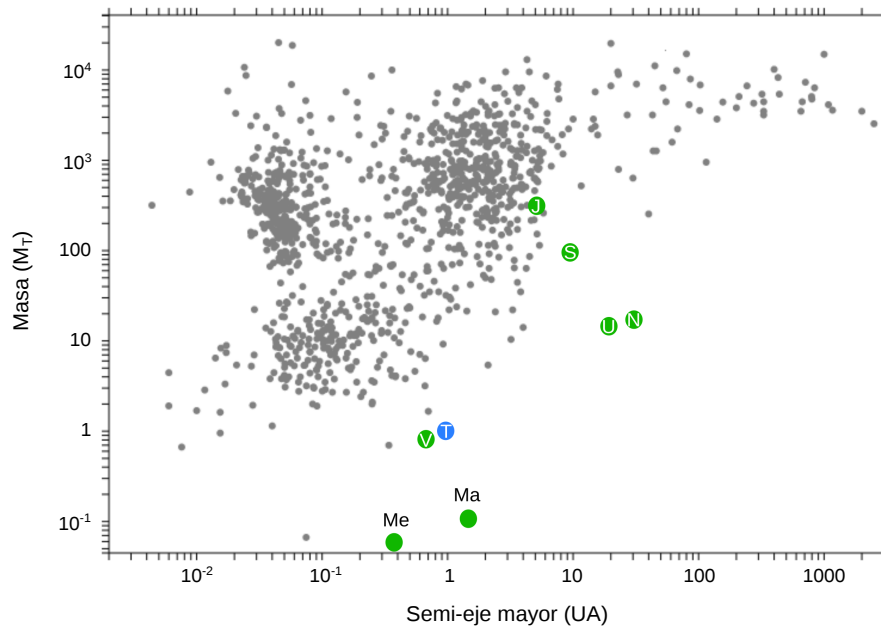


Figura 1.2. Planetas extrasolares reportados hasta el 22 de Noviembre de 2015. La gráfica muestra la masa planetaria ( $M_T$ ) *versus* el semieje mayor (UA) de los planetas extrasolares. Adaptada de <http://exoplanet.eu/>.

### Discos circunestelares

Al colapsar el núcleo de una nube molecular se forma un cuerpo central (estrella) y un disco circunestelar (también llamado disco protoplanetario), el cual está compuesto por  $\sim 98\%$  de gas y  $\sim 2\%$  de polvo orbitando a su alrededor. El gas y el polvo presentan una composición química similar a la de la estrella central y su cantidad está en función de la metalicidad de la estrella (Armitage, 2011). El polvo presente en los discos circunestelares es detectado frecuentemente como un exceso en la emisión infraroja de la estrella, permitiendo inferir la masa del propio disco.

Cuando se trata de estrellas jóvenes, las cuales todavía cuentan con un disco circunestelar a su alrededor, es posible detectar irregularidades (brechas) en el material del disco ocasionadas por la presencia de algún cuerpo de mayor tamaño, tal como podría ser un planeta en formación (Kalas, 1998; Okamoto et al., 2004).

### 1.3. Formación del sistema solar

El sistema solar es una estructura compleja, tanto en su geometría como en su dinámica y es uno de muchos sistemas planetarios presentes en la Vía Láctea (Cassan et al., 2012).

Para poder explicar el estado actual del sistema solar y de los sistemas planetarios en general, es necesario estudiar un escenario evolutivo. A pesar de que desde hace siglos se han propuesto diferentes modelos que intentan explicar el origen de los planetas y del sistema solar en su conjunto, este problema sigue aún sin resolverse por completo, pues explicar la formación de un sistema planetario es una de las tareas más complejas en la astrofísica moderna (Woolfson, 2014).

El descubrimiento de los planetas extrasolares ha incrementado la complejidad del problema ya que muchos de estos cuerpos presentan características físicas y orbitales diferentes a los planetas del sistema solar. Los modelos de formación y dinámica del sistema solar más aceptados actualmente son incapaces de explicar semejantes características (Behroozi y Peebles, 2015).

Hasta el momento, es aceptado que la formación planetaria comenzó en un disco de gas y polvo conocido como disco protoplanetario, donde las partículas de polvo se acretaron formando cuerpos cada vez de mayor tamaño. Esta idea fue derivada de la teoría nebular, la cual es una de las teorías científicas más antiguas que siguen estando vigentes.

La idea central de la teoría nebular es el colapso gravitacional de una nube molecular, proceso en el cual se forma una estrella central y por conservación de momento angular resulta la formación de un disco compuesto de gas y polvo. Posteriormente, comienza el proceso de formación de los planetas, que depende en gran medida de la masa y de las propiedades dinámicas de la nebulosa y que comprende las cuatro etapas (Blum y Wurm, 2008; Chiang y Youdin, 2010) que a continuación se describen:

1. *Acreción primaria.* Los granos de polvo, bajo la influencia de fuerzas intermoleculares, colisionan formando cuerpos de mayor tamaño (cm a dm). Las partículas de tamaños menores a 100 micras están sujetas al movimiento browniano y colisionan con velocidades cercanas a 1 mm/s. Por otro lado, los cuerpos de mayor tamaño se acoplan al gas de la nebulosa y su dinámica es modulada por la atracción gravitacional de la estrella y por fuerzas no-gravitacionales, como la presión de radiación y el arrastre del gas.
2. *Planetesimales.* Formación de planetesimales (cuerpos de tamaño del orden de 1 km) por acreción de cuerpos de menor tamaño (cm a dm). En esta etapa, la sedimentación



## 1.4. Las meteoritas

---

vertical, la deriva radial y la turbulencia provocan que los cuerpos adquieran mayores velocidades relativas entre sí y se incremente la velocidad de los impactos. Como resultado de este mecanismo, los cuerpos se encuentran en un proceso continuo de crecimiento y fragmentación (Adams, 2010).

3. *Embriones planetarios*. Acreción de planetesimales formando embriones planetarios (objetos del tamaño de la Luna y de Marte) en la región interna y de los núcleos de los planetas gaseosos en la región externa del sistema planetario (Morishima, 2015).
4. *Formación de planetas*. Formación de los planetas gigantes por acreción del gas restante en la nebulosa. Crecimiento por colisiones de los embriones planetarios hasta formar los planetas terrestres (Izidoro et al., 2015).

## 1.4. Las meteoritas

Además de las observaciones telescópicas del sistema solar y de los posibles sistemas extrasolares (discos protoplanetarios), para entender mejor el proceso de formación planetaria, es necesario obtener información relacionada con el estado cosmoquímico de los cuerpos que componen el sistema planetario.

Debido a que la Tierra es un cuerpo altamente dinámico, el material que la compone no ha preservado el registro de las etapas tempranas de la formación planetaria (Connolly y Desch, 2004). Sin embargo, otros cuerpos en el sistema solar como son cierto tipo de meteoritas, conocidas como condritas, sí han conservado parte de su estructura y composición original (Sears, 2004).

Gracias a los modernos equipos de laboratorio, el estudio de las condritas -particularmente de las condritas carbonosas- ha permitido entender las condiciones y la dinámica de la región en la cual se originaron los planetas del sistema solar (Scott, 2007; Alexander et al., 2008).

Ya que los estudios de laboratorio indican que las partículas que componen las condritas (llamadas componentes nebulares o componentes condriticos) son tan antiguas como lo es el Sol (Sears, 2004; Lauretta y McSween, 2006; Scott, 2007; Scott y Krot, 2014), las condritas podrían ser el material prístino presente en las primeras etapas de la acreción planetaria.

Uno de los componentes nebulares son los cóndrulos, los cuales son partículas con forma aproximadamente esférica y cuyo tamaño promedio es  $\sim 1$  mm (Hewins, 1997). A partir de diversos estudios de petrografía y minerografía de los cóndrulos, se han inferido algunas condiciones del sistema solar primitivo (Sears, 2004; Scott, 2007; Krot et al., 2009). Adicionalmente, se ha demostrado que el tamaño y la distribución de los cóndrulos en las

meteoritas podrían ser usados como discriminantes entre las teorías y los modelos de formación planetaria, ya que dichos parámetros se relacionan con la distribución de la materia en las primeras etapas de la formación del sistema solar (Jacquet, 2014).

Dada la relevancia de las meteoritas en el estudio de la formación del sistema solar, en el siguiente capítulo se describen con mayor detalle la clasificación y las características físicas de los diferentes grupos de meteoritas.

## 1.4. Las meteoritas

---

---

## Capítulo 2

# Meteoritas

---

En este capítulo se revisan algunas características de las meteoritas, tales como su clasificación y algunas propiedades físicas, químicas, petrográficas y minerográficas.

En su movimiento alrededor del Sol, la Tierra continuamente experimenta colisiones con objetos sólidos principalmente de origen asteroidal, cometario o escombros de origen planetario (la Luna y Marte). Estos objetos son de tamaños muy diversos, que van desde los que son capaces de colisionar con la superficie terrestre y formar cráteres de impacto, hasta las partículas de polvo de tamaño micrométrico. Algunos estudios estiman que el flujo de material extraterrestre en la Tierra es de  $\sim 40$  toneladas diarias para partículas con una masa entre 10 g y 1 kg, de las cuales solamente el 1 % es recuperado (Bland et al., 1996; Zolensky et al., 2006). Basándose en el trabajo de Hughes (1994), Zolensky et al. (2006) calcularon el flujo anual de material extraterrestre clasificado por tamaño y masa de las partículas, ver Figura 2.1. En dicha gráfica se indica en verde el material de origen cometario y en anaranjado el de origen asteroidal; además se divide el flujo en cuatro regiones: [A] polvo interplanetario, [B] meteoros, [C] bólidos (*fireballs*) y [D] meteoritas de impacto<sup>1</sup>.

De acuerdo con Rubin y Grossman (2010)<sup>2</sup>, una *meteorita* es un objeto de origen natural cuyo tamaño es mayor a  $10 \mu\text{m}$  y que fue transportado por medios naturales desde el cuerpo celeste en el cual se formó hasta alguna región fuera de la influencia gravitacional dominante del cuerpo progenitor, donde posteriormente colisionó con algún cuerpo natural o artificial más grande que sí mismo (incluso si se trata del mismo cuerpo del que fue lanzado).

---

<sup>1</sup>Meteoritas capaces de crear un cráter de impacto. Algunos autores les asignan diferentes nombres, siendo el más común: *CFB:crater-forming bodies* por sus siglas en inglés

<sup>2</sup>Estos mismos autores definen a los *meteoroides* como objetos de origen natural, que se desplazan en el medio interplanetario y que tienen un intervalo de tamaños que va de  $10 \mu\text{m}$  a 1 m. Mientras que los *micrometeoroides* son meteoroides con un rango de tamaños que va de  $10 \mu\text{m}$  a 2 mm. Los objetos menores a  $10 \mu\text{m}$  y mayores a 1 m, son considerados *partículas de polvo interplanetario (IDP)* por sus siglas en inglés) y *asteroides* respectivamente.

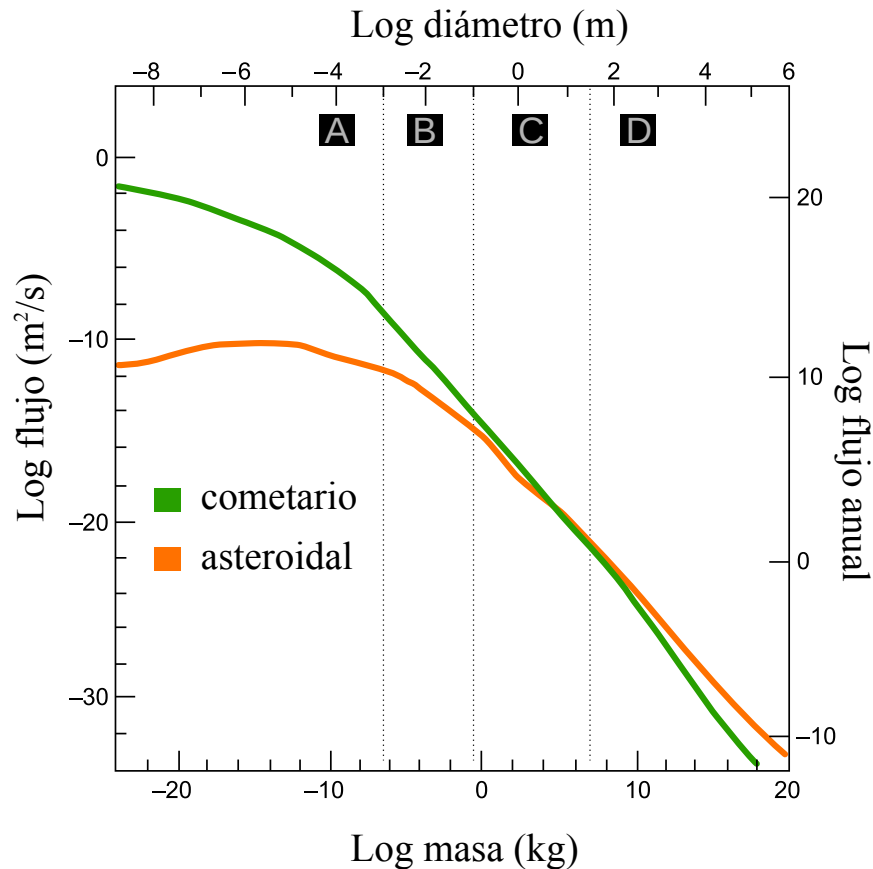


Figura 2.1. Flujo anual de material extraterrestre que llega a la Tierra. Se indica en verde el material de origen cometario y en anaranjado el de origen asteroidal. Las líneas punteadas indican los límites entre las distintas categorías de cuerpos clasificados por tamaños: [A] polvo interplanetario, [B] meteoros, [C] bólidos (*fireballs*) y [D] meteoritas de impacto. Adaptada de Zolensky et al. (2006).

Las meteoritas que se observan caer y posteriormente son recuperadas se denominan *caídas*, mientras que las que solamente son encontradas se conocen como *hallazgos*. Esta distinción es muy importante ya que los *hallazgos*, dependiendo del tiempo que pasaron sobre la superficie de la Tierra, son más propensos a presentar alteración química al interactuar con el ambiente terrestre. Naturalmente, el número de hallazgos es muy superior al de las meteoritas caídas, presentando una relación estadística de 40 a 1 (Hutchison, 2004).

Actualmente se han recuperado más de 40,000 meteoritas y este número está creciendo rápidamente gracias al descubrimiento de grandes concentraciones de meteoritas en los polos y en algunos desiertos, por ejemplo en la Antártida y en los desiertos del norte de África.

El nombre y la clasificación oficial de las meteoritas son competencia de la Sociedad

Meteorítica<sup>1</sup> y son publicados en el boletín de esta misma organización. De acuerdo con los lineamientos para la nomenclatura de las meteoritas, elaborados por la Sociedad Meteorítica, comúnmente el nombre asignado a la meteorita se relaciona con el nombre de la localidad o la ubicación geográfica donde aterrizó o fue encontrada.

### 2.1. Clasificación de las meteoritas

Además del lugar de impacto -del cual las meteoritas derivan su nombre- y si son caídas o son hallazgos, hasta hace poco tiempo las meteoritas exclusivamente se clasificaban por su composición dominante (abundancia de metales) como: *rocosas*, *metálicas* y *mixtas*.

Los términos rocoso, metálico y mixto tienen cierta utilidad en la caracterización de las meteoritas; sin embargo, resultan ser términos muy generales y sólo sirven como una descripción inicial de los cuerpos.

Un enfoque más significativo de la diversidad del material meteorítico se expone en la Figura 2.2. En esta figura se muestra una clasificación basada en la composición en roca total y en la textura<sup>2</sup> de las meteoritas. En esta clasificación las meteoritas se dividen en dos categorías principales: *condritas* y *no-condritas*; estas últimas a su vez, se dividen en *acondritas*, *metálicas* y *mixtas* o *litosideritas*. Además, las acondritas se vuelven a dividir en *primitivas* y *diferenciadas* dependiendo del grado de alteración experimentado en sus cuerpos parentales.

Por otro lado, las meteoritas también son clasificadas en *grupos* de acuerdo con un esquema de clasificación basado en la composición química, la mineralogía, la petrología y la cantidad de isótopos de oxígeno que contienen (Figura 2.2).

En lo que se refiere a las condritas, este esquema de clasificación las divide por el *tipo petrológico* y por el *metamorfismo de impacto*. El tipo petrológico se refiere al grado de alteración térmica y acuosa que presentan estos cuerpos, y se representa por un número del 1 al 6. De esta manera, una condrita con un tipo petrológico 3 no presenta alteración mientras

---

<sup>1</sup>La sociedad meteorítica (MS por sus siglas en inglés) es una organización sin ánimo de lucro fundada en 1933 para promover la investigación y la educación en ciencias planetarias con énfasis en el estudio de las meteoritas y otros materiales extraterrestres que nos permiten tener un mejor conocimiento del origen y la historia del sistema solar. La sociedad está compuesta por más de 900 científicos y entusiastas amateur de más de 33 países que están interesados en un amplio rango de temas sobre ciencias planetarias. Los intereses de los miembros incluyen meteoritas, polvo cósmico, asteroides y cometas, satélites naturales, planetas, impactos y los orígenes del sistema solar. Para tener mas información sobre la Sociedad Meteorítica se puede consultar la siguiente dirección electrónica: <http://www.meteoriticalsociety.org>.

<sup>2</sup>La textura es la relación existente entre los granos de los minerales que forman una roca, y depende de los siguientes factores: el tamaño y la forma del grano, el grado de cristalinidad y la relación entre los contactos de los granos.

## 2.1. Clasificación de las meteoritas

### Condritas

[1]	Carbonosas							Ordinarias			Enstatita			
[2]	CI	CM	CO	CR	CB-CH	CV	CK	H	L	LL	EH	EL	R	K
[3]	1	1-2	3-4	1-2	3	3	3-4	3-6	3-6			3-6		3-6-3
[4]				CB <sub>a</sub>	CB <sub>b</sub>	CV <sub>0xA</sub>	CV <sub>0xB</sub>	CV <sub>R</sub>						

### Acondritas y otras meteoritas ígneas

[1]	Acondritas		Mixtas		Metálicas	
[2]	Primitivas	Diferenciadas	Mesosideritas	IAB	IIIAB	
	Winonaitas	Angritas	Palasitas	IC	IIICD	
	Acapudranitas	Aubritas	MGP	IIAB	IIIE	
	Acapulcoitas	Ureilitas	PES	IIC	IIIF	
	Lodranitas	HED		IID	IVA	
	Brachinitas	Howarditas		IIIE	IVB	
		Eucritas		IIG		
		Diogenitas				

### Planetarias

[1]	Marcianas	Lunares
[2]	Shergottitas Nakhlitas Chassignitas Ortopiroxenitas	

Figura 2.2. Clasificación de las meteoritas de acuerdo con el esquema de clasificación basado en su composición química y su textura. En la figura se indican las categorías de clasificación de la siguiente manera: [1] Clase, [2] Grupo, [3] Tipo petrológico y [4] Subgrupo. Adaptada de Weisberg et al. (2006); Krot et al. (2014).

que los números más bajos de 3 indican alteración por la presencia de agua, y los más altos un aumento en el metamorfismo térmico.

Del mismo modo, el grado de metamorfismo de impacto registrado por una condrita está determinado por la diversidad en los parámetros mineralógicos y texturales, y se fundamenta en el impacto registrado en los minerales de olivino, ortopiroxeno y plagioclasa (Scott y Krot, 2014). A escala macroscópica, uno de los rasgos más característicos del metamorfismo de impacto es la presencia de brechas<sup>1</sup> originadas por el evento de impacto. Al igual que el tipo petrológico, el metamorfismo de impacto está graduado con números que van del 1 al 6, siendo S1 un estado sin deformación (no-chocado) y S6 un estado fuertemente chocado.

El objetivo de esta clasificación es proporcionar una descripción más precisa de las diferentes clases de meteoritas, además de identificar aquellas que provienen del mismo cuerpo parental -y de ser posible- revelar los vínculos genéticos entre ellas.

Las condritas son rocas sedimentarias cuya estructura interna está formada por cuatro componentes principales: los cóndrulos, las inclusiones refractarias (CAI's: inclusiones ricas en calcio y aluminio y AOA's: agregados ameboides de olivino), las inclusiones metálicas y la matriz. Se piensa que aunque la mayoría de las condritas pudieron haber experimentado alguna especie de proceso térmico, no fueron modificadas por procesos de fusión o diferenciación de los cuerpos parentales y debido a ello conservaron el registro de los procesos físicos y químicos de la nebulosa solar primitiva (Scott, 2007). Se estima que del total de meteoritas que caen en la Tierra, las condritas representan ~85 %.

Por otro lado, las meteoritas no-condríticas carecen de la misma textura que las condritas, y se piensa que fueron formadas por la fusión y la diferenciación de asteroides o de grandes cuerpos satelitales o planetarios, como la Luna o Marte. Algunos grupos de estas meteoritas, como son las acondritas primitivas, experimentaron un grado muy bajo de alteración y conservaron parcialmente la composición original de los cuerpos de los cuales proceden (Markowski et al., 2007).

### 2.2. Las condritas y sus componentes

Como se mencionó anteriormente, las condritas son cuerpos formados por la agregación de varios componentes (CAI's, cóndrulos, AOA's y matriz) que se originaron en diferentes

---

<sup>1</sup>Una brecha (*breccia*), es una roca clástica compuesta por elementos de diversos tamaños de forma angular, dispuestos irregularmente y cementados por una masa microcristalina o amorfa o una matriz detrítica fina.



## 2.2. Las condritas y sus componentes

lugares y a diferentes tiempos en el disco protoplanetario, incluyendo partículas minerales originadas en otras estrellas conocidas como granos presolares (Zinner, 2003; Laurretta y McSween, 2006; Krot et al., 2009). Algunos estudios realizados en estas meteoritas muestran que su composición química es aproximadamente la misma que la composición de la fotosfera solar para la mayoría de los elementos no-volátiles (Hutchison, 2004; Woolfson, 2014), lo que indica que se originaron del mismo material y al mismo tiempo que el Sol en las primeras etapas de la formación del disco protoplanetario (Figura 2.3).

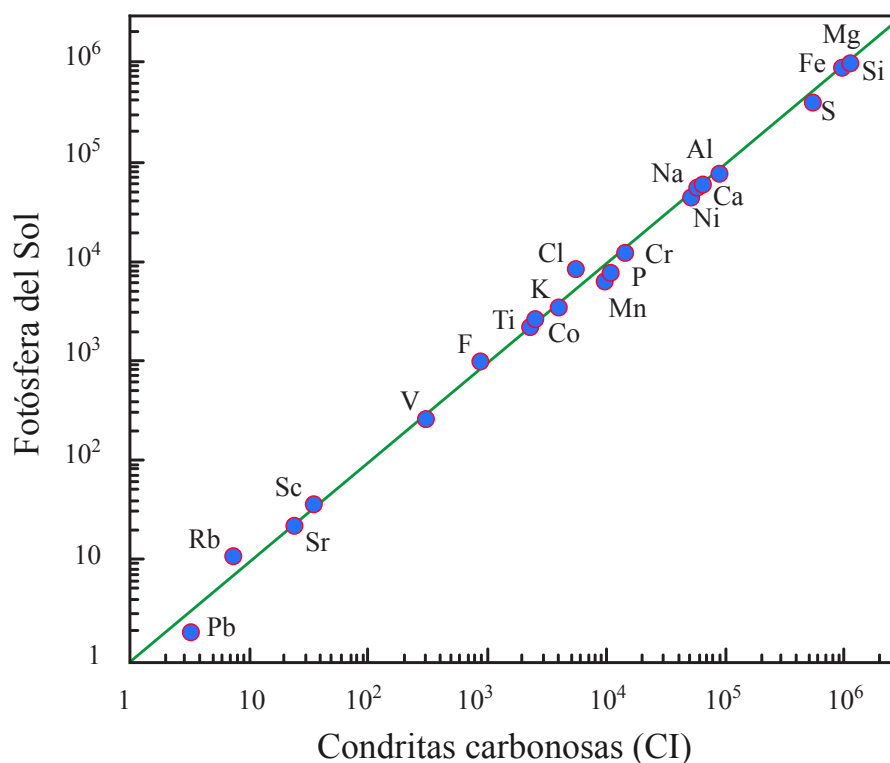


Figura 2.3. Abundancias de los elementos no-volátiles en la fotosfera solar y la obtenida en el laboratorio para las condritas CI, en relación a los cocientes relativos respecto a  $10^6$  átomos de Si. El ajuste lineal en las abundancias indica una gran similitud entre ambas composiciones. Adaptada de Hutchison (2004).

Las condritas son, en general, rocas ultramáficas compuestas principalmente por hierro, magnesio, silicio y oxígeno; y se clasifican según su composición química. De acuerdo con la clasificación mencionada en la sección anterior (Figura 2.2), las condritas se clasifican en 5 clases con 14 grupos, donde las clases se dividen en relación a la abundancia de ciertos elementos refractarios y la del silicio, mientras que los grupos, indican una clasificación que depende de su composición isotópica y química, su estado de oxidación y la abundancia de

sus componentes individuales.

### 2.2.1. Los cóndrulos

Los componentes más abundantes en las condritas son los *cóndrulos*, los cuales son partículas ígneas que cristalizaron rápidamente (en cuestión de minutos a horas) y cuya composición principal son los grupos minerales de olivino y piroxeno. La forma de los cóndrulos es por lo general esférica, sin embargo algunos de ellos presentan una forma irregular debido a que posiblemente se fragmentaron, se fundieron parcialmente o acrecionaron otras partículas (Hewins, 1997).

#### Tamaño

Por lo general, los cóndrulos presentan una gran diversidad de tamaños en los diferentes grupos de condritas (Tabla 2.1), con un intervalo que va de 10 a 10 000  $\mu\text{m}$  de diámetro (Scott y Krot, 2014). En la Figura 2.4 se muestra una fotografía de un cóndrulo parcialmente expuesto en una muestra de la meteorita Allende. El cóndrulo fotografiado tiene un diámetro aproximado de 7000  $\mu\text{m}$ , y en la imagen se puede observar que el cóndrulo tiene una forma casi esférica.



Figura 2.4. Fotografía de un cóndrulo parcialmente expuesto en una muestra de la meteorita Allende. El cóndrulo fotografiado tiene un diámetro aproximado de 7000  $\mu\text{m}$ . Tomada de Norton y Chitwood (2008).

## 2.2. Las condritas y sus componentes

---

*Micro y macro cóndrulos:* En Friedrich et al. (2014) se menciona que en algunos estudios de laboratorio se ha reportado que los cóndrulos, para diversos grupos de meteoritas, presentan un rango de tamaños promedio de  $\sim 200$  a  $2000 \mu\text{m}$ , y que  $\pm 2\%$  de los cóndrulos tienen tamaños fuera de esos límites. Frecuentemente, a los cóndrulos cuyo tamaño es menor a  $40 \mu\text{m}$  o mayor a  $3 \text{ mm}$  se les etiqueta como microcóndrulos y macrocóndrulos, respectivamente (Rubin et al., 1982; Krot et al., 1997; Weyrauch y Bischoff, 2012). En esos mismos estudios se reportó que la presencia de micro y macrocóndrulos es particularmente rara en las condritas carbonosas, de tal forma que los microcóndrulos representan estadísticamente el 0.006 de la fracción del volumen total de cóndrulos, mientras que los macrocóndrulos han sido reportados como extremadamente raros.

### Clasificación

En cada clase y grupo de condritas los cóndrulos varían en su textura y en su composición, por lo que existen diferentes esquemas de clasificación para ellos. Uno de estos esquemas es conocido como *el esquema de Scott-Taylor-Jones* (Hewins, 1997; Sears, 2004) en el cual los cóndrulos se clasifican por la abundancia que presentan de óxido de hierro (FeO), de olivino, de piroxeno y de su grado de oxidación.

De acuerdo con este esquema de clasificación, los cóndrulos se etiquetan en dos categorías: los cóndrulos reducidos y pobres en FeO (*Tipo I*) y los cóndrulos oxidados y ricos en FeO (*Tipo II*). En las condritas carbonosas del grupo Vigarano (CV), las abundancias para los cóndrulos tipo I y tipo II son 94 y 6 % respectivamente (Hewins, 1997).

### Origen

Debido a que los cóndrulos constituyen entre el 15 y el 80 % en volumen total de las condritas (Tabla 2.1) y estas meteoritas son las más abundantes ( $\sim 85\%$ ), se piensa que una fracción importante de los sólidos en el interior de la nebulosa protoplanetaria eran los materiales precursores de los cóndrulos, los cóndrulos o una combinación de ambos (Hewins, 1997; Scott, 2007; Adams, 2010).

El modelo más aceptado para el proceso de formación de los cóndrulos, supone que estos cuerpos se formaron en regiones donde el polvo se acumuló debido a procesos físicos y químicos (como ondas de choque o turbulencia) del gas nebular. Se piensa que posteriormente el material rocoso concentrado se fusionó debido a un evento térmico transitorio e instantáneo. Algunos mecanismos propuestos que pudieron provocar el evento térmico se mencionan y discuten en el Capítulo 5.

Tabla 2.1. Abundancias de los componentes condriticos y el diámetro promedio de los cóndrulos en los grupos de condritas. Por la importancia con nuestro trabajo, en la tabla se destaca con una sombra el renglón que corresponde con las condritas del grupo Vigarano (CV). Tomada de Scott y Krot (2014).

Grupo	cóndrulos D ( $\mu\text{m}$ ) <sup>a</sup>	cóndrulos (Vol. %) <sup>b</sup>	CAI (Vol. %)	Metales (Vol. %)	Matriz (Vol. %)
<b>Carbonosas</b>					
CI	–	<5	<0.01	<0.01	95
CM	300	20	1.2	0.1	70
CO	150	40	1.0	1-5	30
CV	1000	45	3.0	0-5	40
CR	700	50-60	0.12	5-8	30-50
CH	20-90	~70	0.1	20	5
CB <sub>a</sub>	~5000	40	<0.1	60	<5
CB <sub>b</sub>	~500	30	0.1	70	<5
CK	800	15	0.2	<0.01	75
<b>Ordinarias</b>					
H	300	60-80	0.01-0.2	8	10-15
L	500	60-80	<0.01	3	10-15
LL	600	60-80	<0.01	1.5	10-15
<b>Enstatita</b>					
EH	200	60-80	<0.1	8	<0.1-10
EL	600	60-80	<0.1	15	<0.1-10
<b>Otras</b>					
K	600	20-30	<0.1	6.9	70
R	400	>40	<0.1	<0.1	35

<sup>a</sup>D: diámetro promedio.

<sup>b</sup>Se incluyen los cóndrulos fragmentados.

Por otro lado, la textura de los cóndrulos indica que estos cuerpos fueron calentados y enfriados en un periodo de tiempo muy corto. En el laboratorio se ha observado que un gran número de ellos está total o parcialmente fundido, evidencia que implica una densidad numérica muy alta durante su formación.

Algunos experimentos de cristalización de cóndrulos artificiales indican que posiblemente los cóndrulos se fundieron a una temperatura de  $\sim 1500$  K por  $\sim 15$  minutos y luego enfriados a una tasa de  $\sim 500$  K/h (Connolly, 2005). Adicionalmente, las diferentes características de los cóndrulos en las distintas clases y grupos de condritas permiten inferir que estos cuerpos se formaron en diferentes regiones de la nebulosa planetaria y que muchos de ellos fueron

## 2.2. Las condritas y sus componentes

---

calentados en más de una ocasión (Scott y Krot, 2014).

### 2.2.2. Las inclusiones refractarias

Otro de los componentes principales en las condritas son las inclusiones refractarias, de las cuales las que presentan mayor abundancia son las *inclusiones ricas en calcio y aluminio* (CAI, por sus siglas en inglés) y los *agregados ameboides de olivino* (AOA). Las CAI's son los cuerpos con mayor antigüedad en las condritas después de algunas inclusiones metálicas (como son los granos presolares) ya que los estudios de datación isotópica revelan que tales inclusiones refractarias se formaron hace  $4567.30 \pm 0.16$  millones de años, durante la fase más energética del disco protoplanetario (Zinner, 2003; Lauretta y McSween, 2006; Krot et al., 2009).

Generalmente las CAI's tienen forma irregular, presentando una estructura concéntrica formada por capas de diferentes minerales óxidos ricos en aluminio (Al) y calcio (Ca), como son: el corindón, la hibonita, la grosita, la perovskita, la melilita, la espinela, la anortita y la fosterita, minerales que pudieron haberse condensado a partir del enfriamiento del gas nebular desde temperaturas  $>1300$  K y bajo una presión  $\sim 10^5$  bar (MacPherson, 2014).

Igualmente, los AOA's son objetos de forma irregular, cuyos tamaños corresponden con el grano fino ( $5-20 \mu\text{m}$ ). En las condritas con menor alteración, los AOA's aparecen como agregados porosos y la minerografía de estos cuerpos corresponde con los sólidos que condensaron a altas temperaturas (Scott, 2007; Krot et al., 2009).

A diferencia de los cóndrulos y los CAI's, los AOA's no parecen mostrar diferencias isotópicas y mineralógicas entre las diferentes clases y grupos de condritas, lo que permite emplear estos cuerpos como referencia al estudiar la alteración de las meteoritas y sus componentes.

### 2.2.3. La matriz

En las condritas, la matriz representa una mezcla de minerales ópticamente opacos, con forma dendrítica y de tamaños entre  $10$  nm y  $5 \mu\text{m}$  (Scott y Krot, 2014) que llena y rodea el espacio entre el resto de los componentes condriticos, además de distinguirse de los demás componentes por su tamaño, forma y textura. Los minerales con mayor abundancia encontrados en las matrices de las condritas son los silicatos (en estado amorfo y cristalino), los óxidos, los sulfuros y los metálicos (hierro y níquel), especialmente, en las condritas con tipo petrológico 2 se encuentran filosilicatos y carbonatos. La abundancia típica de la matriz en las condritas es de entre 5 y 50 Vol. % (Tabla 2.1).

Actualmente se piensa que los minerales de la matriz en la mayoría de las condritas, son la unión de materiales presolares y condensados nebulares, que se combinaron a su vez con pequeños fragmentos de cóndrulos y que posteriormente experimentaron metamorfismo hidrotermal (Scott y Krot, 2014).

### 2.2.4. Las condritas carbonosas

Las condritas carbonosas (C), como su nombre lo indica, son meteoritas en las cuales se pensaba que el carbono estaba presente de manera abundante (King y King, 1978). Sin embargo, los estudios recientes de laboratorio revelan que solo los grupos CI, CM y CR presentan abundancias de carbono considerables (1.5 - 6 %), mientras que para el resto de los grupos esto no sucede (Scott y Krot, 2014). El carbono está presente en estas meteoritas en forma de compuestos orgánicos tales como los alcanos, los bencenos y algunos aminoácidos.

Actualmente las carbonosas se identifican de las otras clases de condritas por su alta abundancia de elementos refractarios (Figura 2.3) y por contener una composición de isótopos de oxígeno por debajo de la correspondiente a la composición de los materiales encontrados en la Tierra.

Esta clase de condritas se clasifican internamente en nueve grupos en función de su composición en roca total, de los cuales cada uno recibe el nombre de un espécimen característico (excepto el grupo CH), tales como: CI (Ivuna), CM (Mighei), CO (Ornans), CV (Vigarano), CR (Renazzo), CK (Karoonda), CH (High iron) y CB (Bencubbin).

Se estima que las condritas carbonosas constituyen el ~5 % del total de condritas *caídas*. Adicionalmente, son consideradas las condritas más antiguas de las tres clases principales, ya que la abundancia de los elementos no-volátiles es la que más se asemeja con la abundancia de estos elementos en la fotosfera solar (Figura 2.3).

## 2.2. Las condritas y sus componentes

---

---

## Capítulo 3

# Metodología

---

En este capítulo se explican tanto la preparación de las muestras meteoríticas así como los métodos usados en el procesamiento de las mismas, incluyendo los algoritmos de cómputo utilizados.

### 3.1. Muestras meteoríticas

#### 3.1.1. Características y clasificación

Para contar con una muestra representativa de la categoría de las meteoritas del tipo condritas carbonosas se analizaron 5 fragmentos de condritas del norte de Africa (NWA), las cuales cuentan con certificados de autenticidad ante la Sociedad Meteorítica. Es importante destacar que las muestras meteoríticas empleadas en este trabajo han sido muy poco estudiadas, por lo cual se estimó pertinente analizar a la meteorita Allende como objeto de comparación, ya que esta meteorita es una típica condrita carbonosa del grupo CV3 (Krinov et al., 1970; Sears, 2004; Hutchison, 2004; Laurretta y McSween, 2006; Scott, 2007; Krot et al., 2014; Scott y Krot, 2014).

Las muestras meteoríticas analizadas están clasificadas como condritas carbonosas del grupo Vigarano y tipo petrológico 3 (CV3) con cierto grado de oxidación. Se componen de un  $\sim 48\%$  de cóndrulos bien definidos y fragmentos de cóndrulos, un  $\sim 14\%$  de inclusiones refractarias (CAI's y AOA's) y un  $\sim 38\%$  de matriz (Sapah et al., 2013; Amelin et al., 2013; Kereszturi et al., 2014, 2015). En su conjunto estas meteoritas presentan meteorización ligera (W1) y un metamorfismo de choque de muy débil a débil (S1/S2). La matriz consiste de partículas de grano fino ( $1-3\ \mu\text{m}$ ) y está compuesta principalmente por minerales de olivino, piroxeno y silicatos ricos en hierro (Fe) y níquel (Ni). La matriz se observa de un color oscuro y muy compacta, lo que posiblemente, fue ocasionado por metamorfismo de impacto. Por otro lado, la mayoría de los cóndrulos presentan texturas porfídicas y son ricos en compuestos de



### 3.1. Muestras meteoríticas

magnesio (Mg), por lo que han sido clasificados como cóndrulos Tipo I de acuerdo con el esquema de Scott-Taylor-Jones (Hewins, 1997; Sears, 2004; Russell et al., 2005; Ruzicka et al., 2014, 2015a,b). En la Tabla 3.1 se muestran algunas características de las meteoritas estudiadas en este trabajo.

Tabla 3.1. Características de las muestras meteoríticas (de acuerdo con Krinov et al., 1970; Russell et al., 2005; Ruzicka et al., 2014, 2015a,b).

Características	Meteoritas					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
Grupo	CV	CV	CV	CV	CV	CV
Tipo petrológico	3	3	3	3	3	3
Grado de choque (S)	1	SD <sup>a</sup>	2	2	2	1
Grado de meteorización (W)	1	1	1	1–2	1	0–1
Hallazgo (H) / Caída (C)	H	H	H	H	H	C
Año de recuperación	2003	2011	2005	2010	2012	1969
Boletín MS <sup>b</sup> (N°)	89	100	101	102	102	45

<sup>a</sup>Sin dato del grado de choque para la meteorita NWA7043.

<sup>b</sup>Boletín de La Sociedad Meteorítica (Meteoritical Bulletin).

#### 3.1.2. Preparación de las muestras

Los fragmentos meteoríticos fueron preparados en el laboratorio de petrología *Petroanálisis Ingeniería S.A. de C.V.*<sup>1</sup>. El método consistió en la preparación de láminas delgadas pulidas a diamante (superficies espesas) que permiten la identificación de las fases translúcidas y opacas en una sola preparación. Para ello las muestras de material pétreo fueron cortadas y luego desbastadas hasta alcanzar espesores promedio de 30  $\mu\text{m}$ . En el primer procedimiento se utilizó una cortadora de disco diamantado en húmedo equipada con discos de rin continuo a un espesor aproximado de 1 cm. A continuación cada muestra se desbastó en una de sus caras y fue adherida a un vidrio petrográfico mediante adhesivo óptico de curado ultravioleta (material que soporta un rango de temperatura de -100 a 125 °C y tiene un índice de refracción de 1.56). Posteriormente se realizó un desbastado grueso de la cara expuesta de las muestras mediante un disco desbastador de polvo de diamante para llegar a un espesor de 0.3 cm, y concluir con un desbastado fino hasta alcanzar un espesor de  $\sim 30 \mu\text{m}$ .

<sup>1</sup><http://www.petroanalisis.com>

La cara expuesta de las muestras fue pulida con pasta de diamante para generar un pulido tipo espejo, y finalmente (con excepción de Allende), fueron colocadas en una base de resina epóxica y se limpiaron con una solución de alcohol etílico en un baño ultrasónico (Figura 3.1).

Al finalizar la preparación de las muestras se capturaron algunas fotomicrográficas de campos representativos y se identificó el porcentaje de los minerales que constituyen a la roca en muestra total (Figura 3.2 y Tabla 3.2), con el fin de estudiar la morfología de la superficie de las muestras y obtener algunas relaciones texturales (Maravilla y Leal-Herrera, 2015).

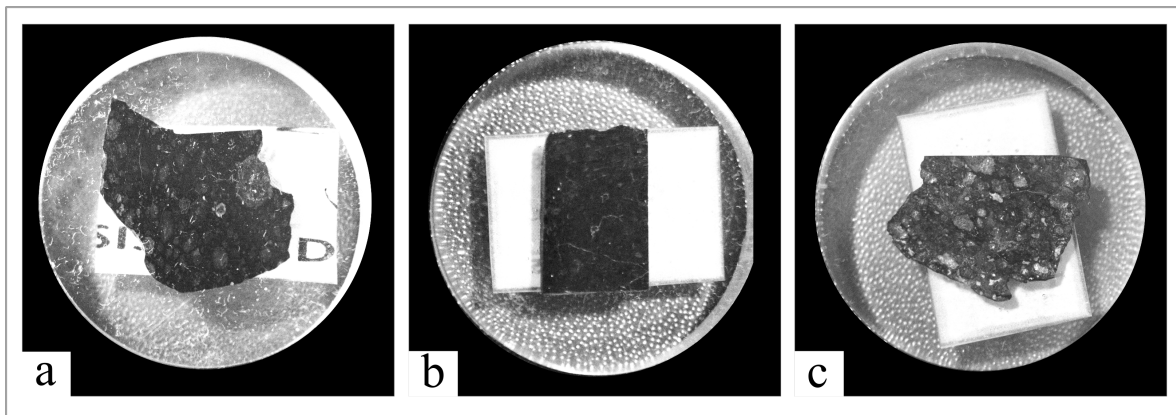


Figura 3.1. Imagen de las muestras correspondiente a las meteoritas NWA4502(a), NWA6567(b) y NWA7678(c).

#### 3.1.3. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Para poder estudiar con mayor detalle las diferencias y similitudes entre las muestras, las meteoritas fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío JEOL modelo JSM-5600LV. Este equipo se encuentra en el Laboratorio Central de Microscopía (LACMIF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y cuenta con un detector de energía dispersiva que permite recolectar los rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativos y de distribución de elementos en la superficie (EDS y WDS) (<http://www.fisica.unam.mx/lcmeinfo.php>).

Las condiciones de trabajo que se utilizaron con el microscopio SEM para el análisis de todas las muestras fueron de bajo vacío, con la señal en composición, a una distancia de trabajo de 20 mm, con una resolución de 35X y un potencial de 20 kV. Bajo estas condiciones se realizó un barrido fotográfico de la superficie de las meteoritas obteniéndose imágenes de

### 3.2. Procesamiento digital de las imágenes

---

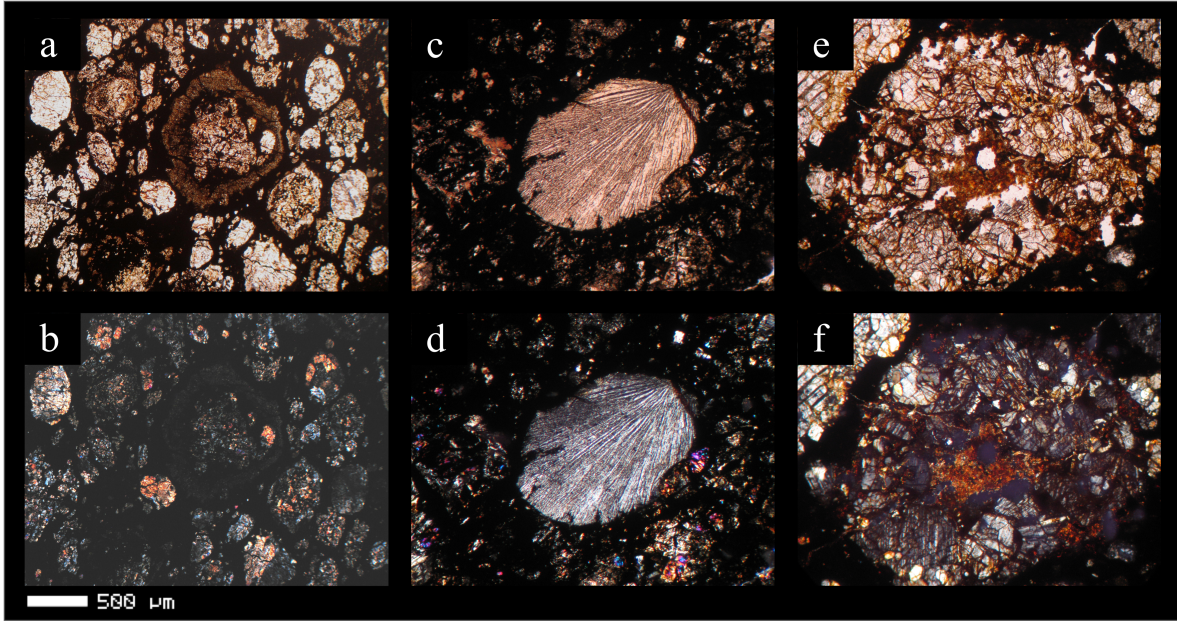


Figura 3.2. Fotomicrografía de cóndrulos en muestras correspondientes a las meteoritas NWA4502 (a,b), NWA6567 (c,d) y NWA7678 (e,f) capturadas en luz paralela (a,c,e) y nicoles cruzados (b,d,f).

alta resolución, en formato TIFF, de cada región de las muestras hasta cubrir su área total (Figuras 3.3 y 3.4).

### 3.2. Procesamiento digital de las imágenes

Una vez realizado el barrido fotográfico de la superficie completa de las muestras, las imágenes individuales recibieron un tratamiento de filtrado y homologación de parámetros tales como el tono, la saturación, el brillo y el contraste debido a que el microscopio electrónico JSM-5600LV no mantiene las mismas condiciones de trabajo (pierde enfoque y modifica la iluminación de la superficie de la muestra) y como consecuencia de ello las imágenes capturadas resultaron con diferentes tonos de grises y niveles de saturación. El tratamiento de filtrado se realizó mediante un algoritmo de procesamiento de imágenes digitales escrito en python y utilizando las bibliotecas libres de computación visual OpenCV (3.0.0) y Scikit-image (0.11.3) (Bradski, 2000; van der Walt et al., 2014; Chityala y Pudipeddi, 2014). Posteriormente las imágenes fueron examinadas con el software de edición GIMP (GNU Image Manipulation Program) (2.2.8) para verificar la estandarización de los parámetros y los filtros aplicados.

Tabla 3.2. Minerografía de las muestras meteoríticas (porcentaje de los minerales que constituyen a la roca en muestra total).

Minerales (%)	Meteoritas					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
Matriz <sup>a</sup>	44	15	15	18	19	19
Olivino	13	15	13	12	25	18
Hedenbergita	11	12	11	11	19	9
Plagioclasa (Anortita)	7	15	11	9	15	15
Magnetita–Ilmenita	1	5	15	7	1	7
Pirrotita	2	7	11	9	5	2
Enstatita	–	10	–	–	–	5
Hematita	–	9	–	10	9	–
Espinela	–	7	5	–	–	–
Melilita	–	–	4	3	4	3
Awaruita	–	–	3	–	–	1
Augita	5	–	–	9	–	11

<sup>a</sup>La matriz está constituida por material carbonoso con abundantes microcristales y criptocristales de minerales opacos (magnetita).

Con la finalidad de formar imágenes completas de la superficie de las muestras (mapas), las imágenes individuales capturadas con el microscopio electrónico SEM fueron ensambladas digitalmente utilizando una rutina automatizada de cómputo (*Grid/Collection Stitching plugin*) del *software libre* ImageJ<sup>1</sup> (1.47v) (Collins, 2007; Preibisch et al., 2009; Russ, 2011; Schneider et al., 2012). ImageJ es un programa de dominio público y con una arquitectura abierta dedicado al procesamiento de imágenes digitales desarrollado en los Institutos Nacionales de Salud (NIH por sus siglas en inglés) que permite leer varios formatos de imagen (TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS), así como formatos crudos RAW y donde es posible mostrar, editar, analizar, procesar, guardar, e imprimir imágenes de 8, 16 y 32 bits.

Con este software es posible hacer transformaciones geométricas, calcular el área y las estadísticas de valor de píxel de selecciones definidas por el usuario y la intensidad de objetos umbral (*thresholded objects*), además de poder medir distancias y ángulos y crear histogramas de densidad y gráficos de línea de perfil.

ImageJ es compatible con las funciones estándar de procesamiento de imágenes tales como operaciones lógicas y aritméticas entre imágenes, manipulación de contraste, convolución, análisis de Fourier, nitidez, suavizado, detección de bordes y filtrado. Soporta lotes de imágenes que comparten una sola ventana y es multiproceso, de forma que las opera-

<sup>1</sup>Disponible gratuitamente en la siguiente dirección: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.

### 3.2. Procesamiento digital de las imágenes

---

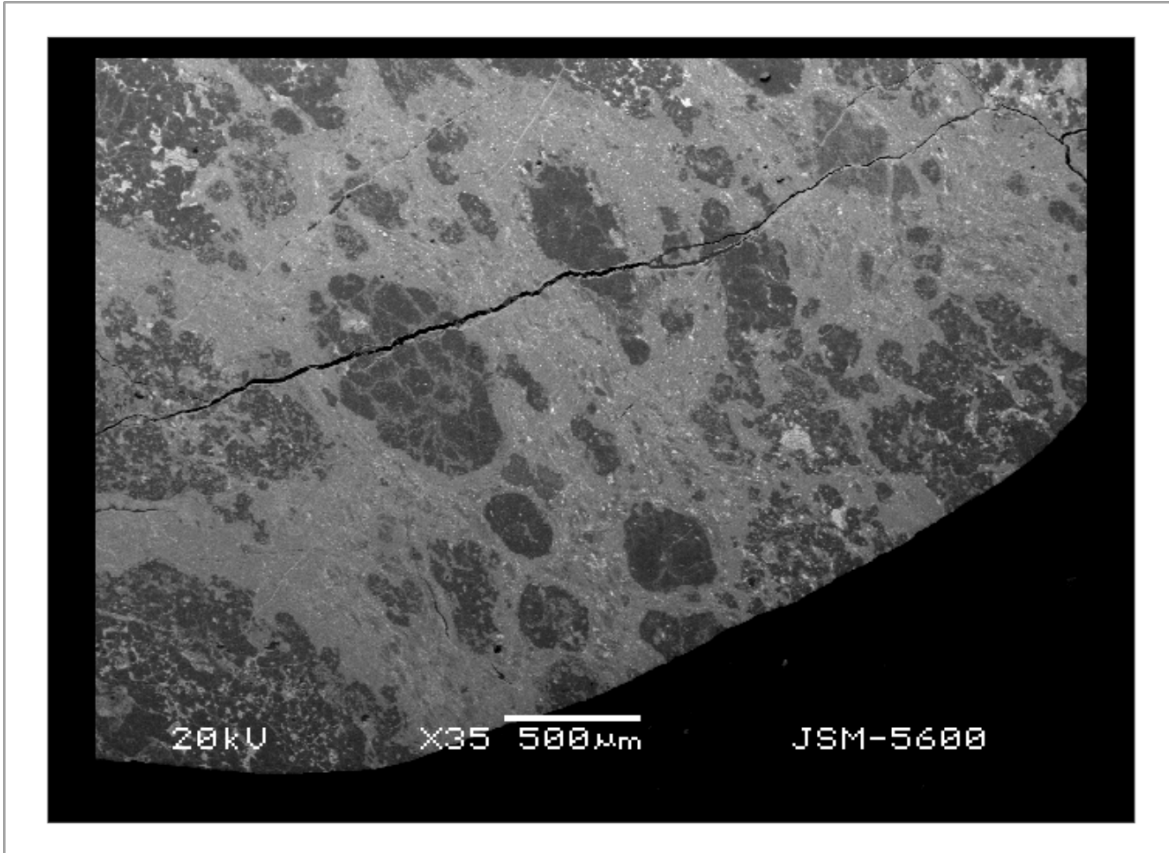


Figura 3.3. Fotografía individual de gran formato (1080×1024 píxeles) de una sección de la muestra meteorítica NWA4502 obtenida con el microscopio electrónico JSM-5600LV a una distancia de trabajo de 20 mm y con una resolución de 35X. En esta fotografía se observa una sección de la muestra meteorítica donde la matriz corresponde a las regiones cuyos tonos de gris son más claros y los cóndrulos con las regiones cuyos tonos de gris son oscuros

ciones que requieren mucho tiempo de cómputo se pueden realizar en paralelo en hardware multi-CPU.

Los mapas resultantes fueron procesados digitalmente otra vez para identificar con mayor precisión la estructura interna de las muestras (cóndrulos) con lo que se obtuvieron imágenes de gran formato (5120×4096 píxeles) con una resolución de 1080 píxeles por pulgada (pix/in) de las 5 meteoritas NWA y de Allende (Figura 3.5).

Es importante destacar que todas las imágenes individuales capturadas en el microscopio JSM-5600LV de las meteoritas NWA2086 y NWA7043 (Figura 3.5 a y b) contenían las etiquetas con algunos parámetros de las condiciones de trabajo (como ejemplo ver Figura 3.3 donde se aprecia escrito en color blanco el modelo del microscopio, la escala, el voltaje y la resolución), y como consecuencia las rutinas de procesamiento de imágenes utilizadas no

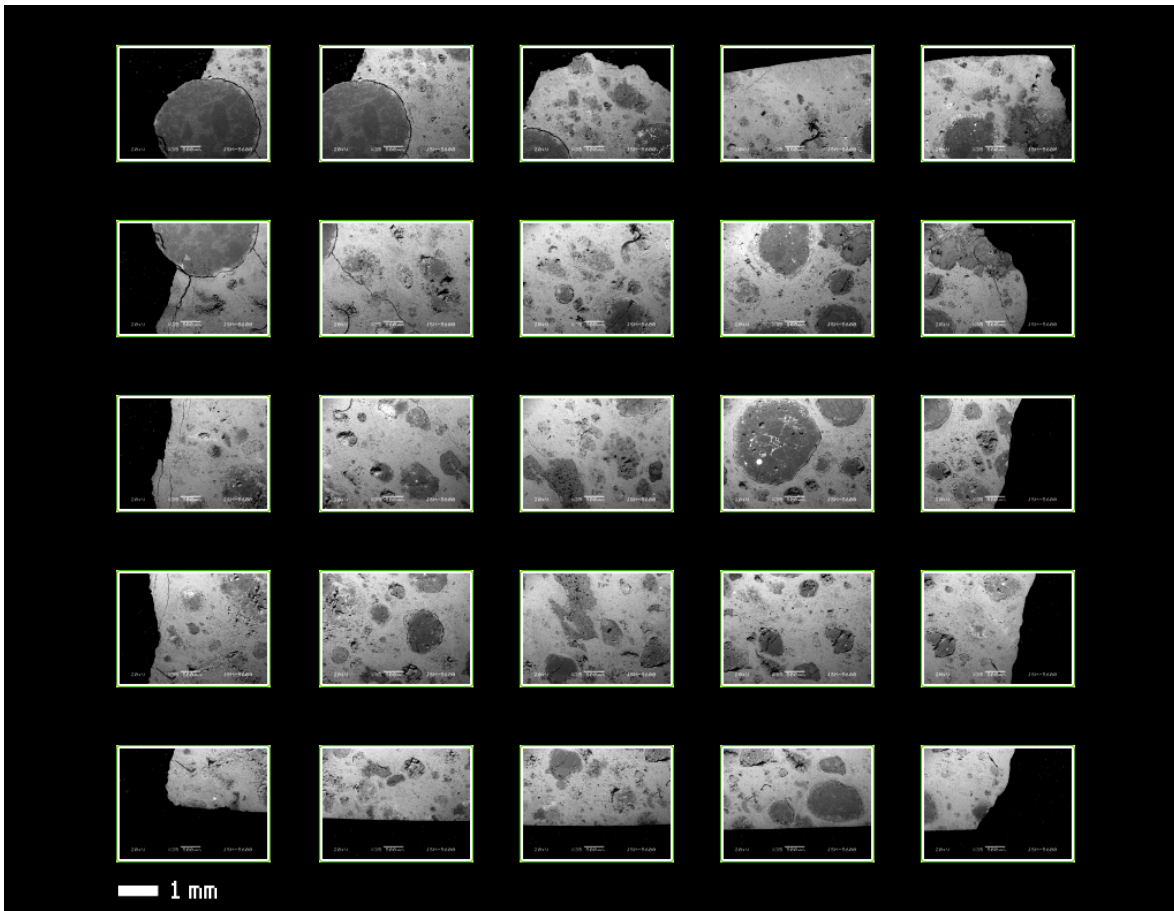


Figura 3.4. Barrido fotográfico de la muestra meteorítica NWA2086 obtenida con el microscopio electrónico JSM-5600LV a una distancia de trabajo de 20 mm y con una resolución de 35X.

fueron igual de efectivas para estandarizar los parámetros de imagen como en el resto de las muestras (Figura 3.5 c, d, e y f). Sin embargo, como se verá mas adelante, esto no fue un impedimento para identificar los componentes condriticos en las muestras meteoríticas.

### 3.2.1. Medición y conteo de cóndrulos

El paso siguiente a la construcción de los mapas fue analizar las imágenes mostradas en la Figura 3.5 con el software ImageJ con el fin de contar y medir los cóndrulos en las muestras meteoríticas. Para ello, se recurrió a un algoritmo de procesamiento de imágenes de tal forma que las regiones en los mapas correspondientes a la matriz se les asignó pixeles de valor 0 y aquellas regiones que representan partículas de mayor tamaño, como los cóndrulos, se les asignó pixeles con valor 255. En la Tabla 3.3 se muestra de forma simplificada el algoritmo

### 3.2. Procesamiento digital de las imágenes

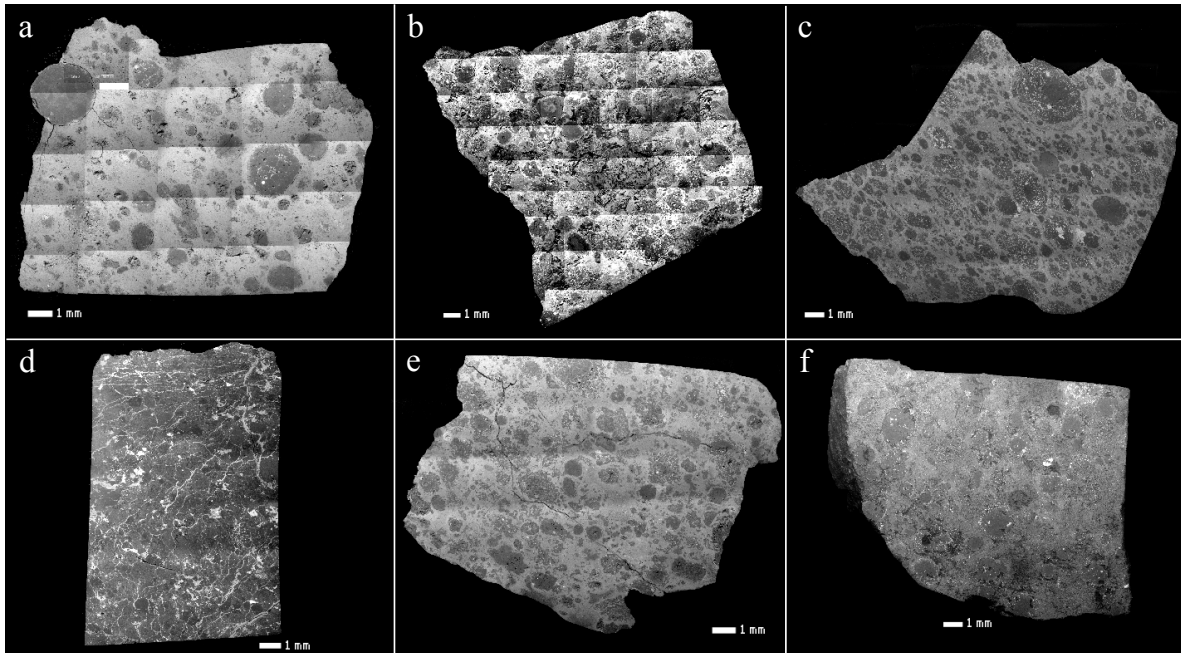


Figura 3.5. Mapas fotográficos correspondientes a las muestras meteoríticas (a) NWA2086, (b) NWA7043, (c) NWA4502, (d) NWA6567, (e) NWA7678 y (f) Allende. Las imágenes no se encuentran a la misma escala.

mediante el cual se generaron los mapas binarios (Figura 3.6).

Las escalas registradas en las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico ( $500 \mu\text{m}$ ) (Figura 3.5) fueron transformadas digitalmente a segmentos con valor umbral. Para cada muestra meteorítica las nuevas escalas quedaron con las siguientes resoluciones: 10.24, 4.16, 6.49, 3.48, 5.15 y  $7.24 \mu\text{m}/\text{pixel}$  para las meteoritas NWA2086, NWA7043, NWA4502, NWA6567, NWA7678 y Allende respectivamente.

Simultáneamente a la creación de los mapas binarios, ImageJ genera una base de datos con algunos parámetros estadísticos y geométricos (elegidos por el usuario) a través de la herramienta de medición y conteo de partículas conocida como *Analyze Particles* (Ferreira y Rasband, 2012). Para este trabajo, los parámetros elegidos en las bases de datos generadas para cada mapa binario fueron el número, el área y el perímetro de cada segmento con valor umbral.

#### 3.2.2. Cóndrulos

Los mapas binarios (Figura 3.6) nos permitieron diferenciar entre el fondo (matriz) y los cuerpos de mayor tamaño (cóndrulos, CAI's y AOA's) en las muestras meteoríticas. Un



Tabla 3.3. Simplificación del algoritmo utilizado para la preparación de imágenes con las muestras meteoríticas.

<b>Función</b>	<b>Resultado en pantalla</b>
1 File=Open	Abre el archivo con la imagen del mapa.
2 Image=Adjust=Brightness/Contrast	Modifica el contraste y el brillo de la imagen.
3 Image=Type=8-bit	Transforma la imagen en un formato de 8 bits (256 colores).
4 Image=Adjust=Threshold	Segmenta la imagen en los colores binarios 0 para el fondo y 255 para el valor umbral.
5 Process=Noise=Despeckle	Limpia la imagen rasterizada de los pixeles que no pertenecen a los segmentos con valor umbral.
6 Process=Binary=Fill Holes	Rellena con pixeles de valor 255 los huecos en los segmentos con valor umbral.
7 Analyze=Set Scale	Establece la escala en pixeles por unidad de medida (cm, mm, $\mu\text{m}$ , etc).
8 Select=Rectangular	Selecciona el area de la imagen para eliminar el segmento de la escala.
9 Image=Duplicate	Crea un duplicado de la imagen con los segmentos con valor umbral sin el segmento de la escala.

criterio común reportado en la literatura para diferenciar los cóndrulos de las inclusiones refractarias (CAI's y AOA's) es la identificación de las características físicas y químicas, como puede ser la presencia de magnesio, calcio y aluminio, usando mapas elementales de rayos X (Christoffersen et al., 2012; Tait et al., 2014). Otra forma de discriminar las inclusiones refractarias de los cóndrulos es considerar que estos últimos presentan una forma geométrica cuasi-esférica, mientras que por lo general tanto las CAI's como los AOA's son de forma irregular (Sears, 2004; Connolly, 2005; Krot et al., 2009; Fisher et al., 2014; Scott y Krot, 2014). Es importante destacar que el porcentaje por volumen de los cóndrulos relativo a las inclusiones refractarias en las condritas carbonosas es aproximadamente 15 veces mayor (Tabla 2.1), lo que incrementa la probabilidad de identificarlos.

### Circularidad

Si bien en este trabajo se consideró que el criterio de la geometría de las partículas es suficientemente sólido para discriminar a los cóndrulos de las inclusiones refractarias, es importante reconocer que este mecanismo de selección no distingue entre las inclusiones refractarias y los cóndrulos rotos o los fragmentos de cóndrulos en el conjunto de datos. Sin embargo, dadas las condiciones materiales con las que se contó para desarrollar este trabajo



### 3.2. Procesamiento digital de las imágenes

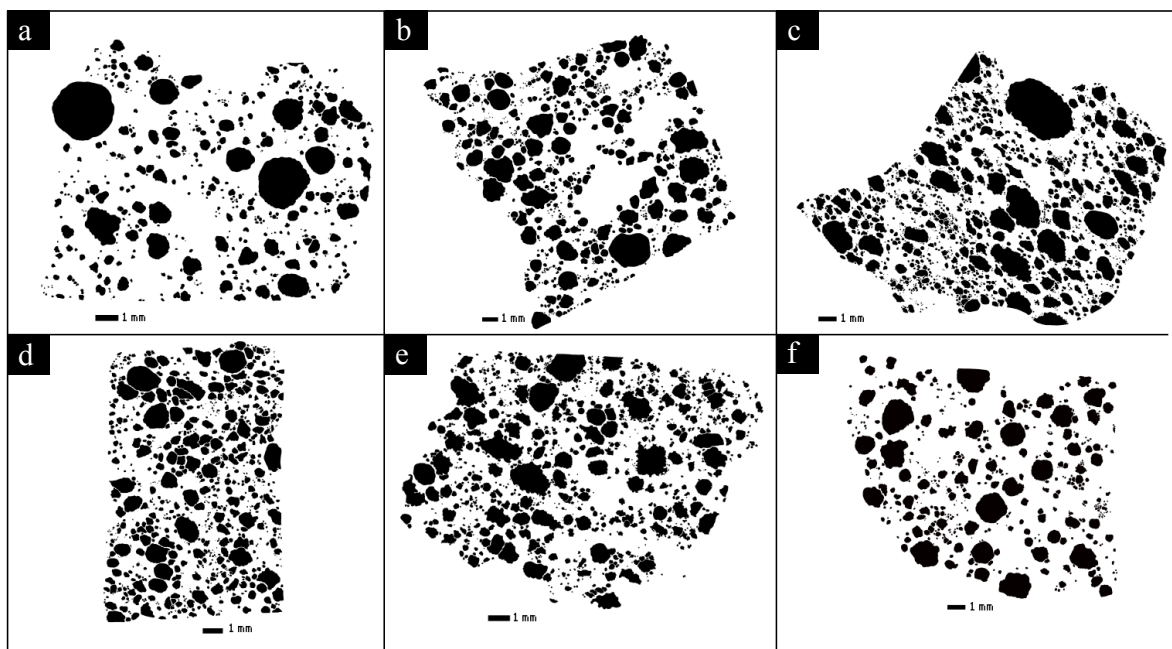


Figura 3.6. Mapas en formato binario correspondientes a las meteoritas: (a) NWA2086, (b) NWA7043, (c) NWA4502, (d) NWA6567, (e) NWA7678 y (f) Allende.

no fue posible identificar adecuadamente los tamaños de los fragmentos de cóndrulos, de modo que esta exclusión fue necesaria.

Para determinar la circularidad  $C$  de las partículas en los mapas binarios se utilizó la relación  $C = 4\pi A/p^2$ , donde  $A$  es el área y  $p$  el perímetro de las partículas<sup>1</sup>. En la Figura 3.7 se muestran las gráficas de la circularidad de los segmentos con valor umbral (partículas) de los mapas binarios.

Para identificar a los cóndrulos de las inclusiones refractarias se descartó a los segmentos con valor umbral cuya circularidad fuera inferior a 0.55 (línea horizontal en color rojo mostrada en la Figura 3.7).

#### Tamaño

Para obtener el tamaño de los cóndrulos en las muestras meteoríticas, representados por los segmentos con valor mayor al umbral en los mapas binarios (objetos en negro en la Figura 3.6), es necesario elegir el parámetro adecuado que describa el tamaño bidimensional de las partículas. En los estudios cuyo objetivo es el análisis de granos y/o cristales en rocas, aerosoles en la atmósfera o granos coloidales, es frecuente encontrar que el tamaño de las

<sup>1</sup> $C = 1$  indica un círculo perfecto, cuando  $C \rightarrow 0$  las partículas representan una forma poligonal cada vez más elongada.

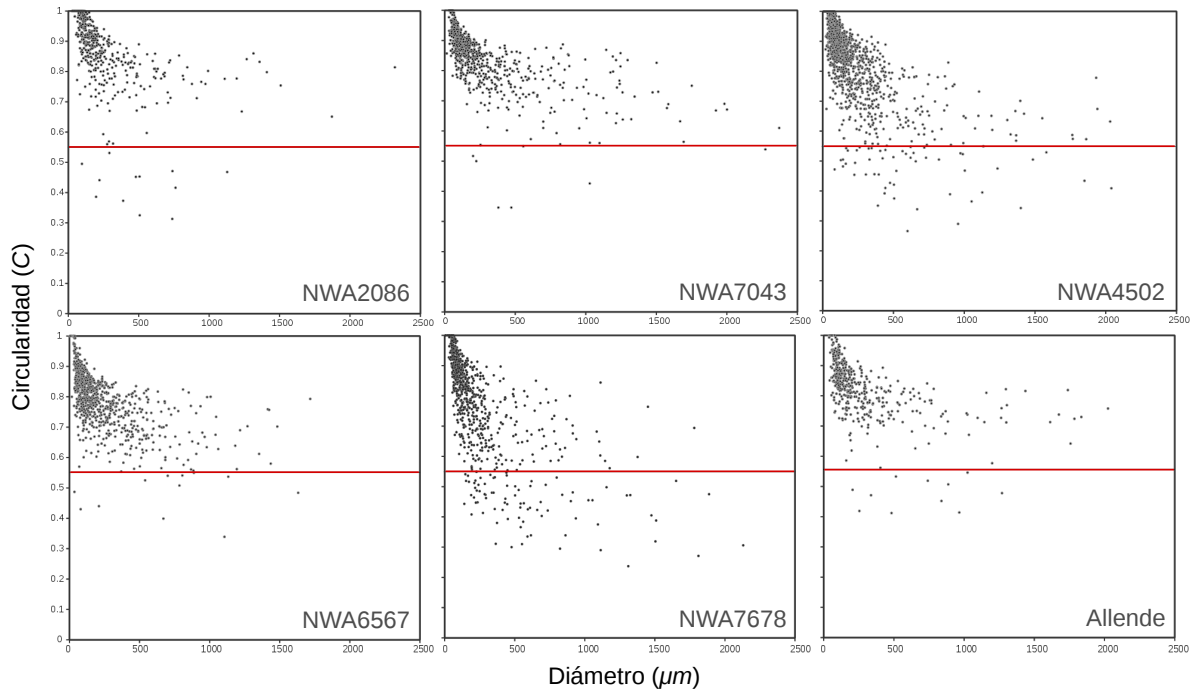


Figura 3.7. Gráficas de la circularidad ( $C$ ) vs diámetro de los segmentos con valor umbral correspondientes a las meteoritas. En estas gráficas se muestra el total de segmentos identificados por el *software* y la línea horizontal localizada en  $C = 0.55$  indica el criterio utilizado para diferenciar a los cóndrulos de las CAI's y los AOA's.

partículas está caracterizado por parámetros como: el diámetro de Feret ( $d_F$ ), el diámetro de Martin ( $d_M$ ), el semieje mayor o menor (cuando se quiere aproximar con elipses) y el diámetro equivalente circular ( $d_A$ ), entre otros (Syvitski, 2007; Merkus, 2009; Heilbronner y Barrett, 2014).

El diámetro de Feret ( $d_F$ ) se define como la distancia entre las dos tangentes paralelas al perímetro del área proyectada de la partícula (Figura 3.8). Dado que para una sola partícula se puede determinar idealmente un número infinito de valores para este cálculo, regularmente se estima el valor medio. Este valor medio se obtiene mediante la medición de un cierto número  $n$  de valores para  $d_F$  y el cálculo de la media aritmética. Los valores obtenidos para el diámetro  $d_F$  son por lo tanto siempre los valores promedio de una serie de mediciones (Walton, 1948).

El diámetro de Martin ( $d_M$ ) se define como el segmento delimitado por los puntos del perímetro (cuerda) de tal manera que bisecta la superficie proyectada por la partícula en dos superficies equivalentes, es decir, en superficies con la misma área (Figura 3.8). Al igual que el diámetro de Feret, para obtener un sólo valor de  $d_M$  es necesario medir múltiples valores

### 3.2. Procesamiento digital de las imágenes

---

para obtener la media aritmética.

Es importante tener en cuenta que los diámetros  $d_F$  y  $d_M$  presentan valores muy diferentes si la geometría del objeto que se está midiendo está relacionada con una forma muy irregular (Walton, 1948; Syvitski, 2007). Sumado a lo anterior, algunos experimentos han mostrado que las relaciones entre los parámetros que se utilizan para aproximar el diámetro de las partículas, no mantienen una relación constante entre sí para un determinado material, no obstante, algunos estudios han reportado que  $d_M < d_A < d_F$  (Allen, 1990).

ImageJ permite obtener los diámetros de Martin y Feret de manera semi automática, sin embargo estos parámetros no resultan adecuados para caracterizar el tamaño de los cóndrulos debido a que dependen de la orientación de las partículas. Su eficiencia se reduce cuando se trata de objetos planos no convexos y para obtener un resultado estadísticamente significativo se requiere de un número muy grande de elementos (Allen, 1990; Russ, 2011; Heilbronner y Barrett, 2014).

Como se sugiere en Heilbronner y Barrett, 2014, para este trabajo se utiliza el diámetro equivalente circular de los cóndrulos ( $d_A$ ) como la mejor representación del tamaño del área de la sección transversal observada en las muestras meteoríticas (Figura 3.8). Como lo indica su nombre, el diámetro equivalente es el diámetro del círculo cuya área es equivalente al área del objeto plano y se define como:  $d_A = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ .

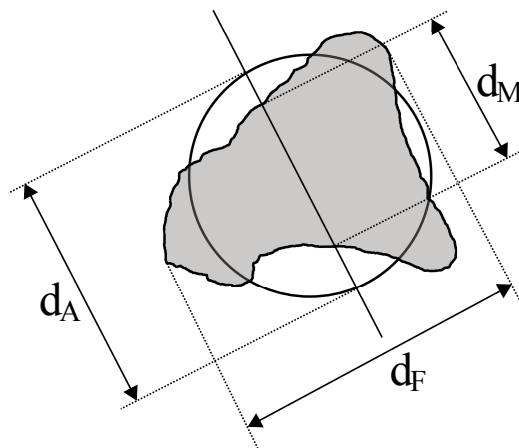


Figura 3.8. Ilustración de los diámetros de Feret ( $d_F$ ), Martin ( $d_M$ ) y el diámetro equivalente circular ( $d_A$ ) para una figura con forma irregular en el plano (Adaptada de Allen, 1990).

### 3.3. Corrección estereológica

Cuando se estudia la textura de muestras rocosas en el laboratorio se ha observado que en general, la distribución de partículas (por ejemplo clastos, blastos, granos cristalinos, entre otros) por naturaleza no es isotrópica ni uniforme. Esto se debe a que la distribución de las partículas que componen las rocas obedece a procesos físicos y químicos que modularon su origen y evolución, y por lo mismo, la deposición de sus componentes es realizada de manera aleatoria o estocástica (Guéguen y Palciauskas, 1994; Jerram et al., 1996; Vernon, 2004; Mavko et al., 2009). En el caso de las condritas, la distribución espacial de sus componentes (cóndrulos, CAI's, AOA's y matriz) pareciera seguir el mismo principio (Hutchison, 2004; Sears, 2004; Krot et al., 2009; Sapah et al., 2013; Scott y Krot, 2014).

Por otro lado y como se mencionó anteriormente, la preparación de las muestras meteoríticas estudiadas en este trabajo implicó realizar un corte transversal en el fragmento de roca para aplanar una de sus caras, de tal forma que los componentes nebulares (los cóndrulos en particular) posiblemente fueron seccionados en una posición geométrica diferente a su diámetro real (Figura 3.9), por lo que el diámetro de los segmentos con valor umbral que representan a los cóndrulos es un diámetro aparente.

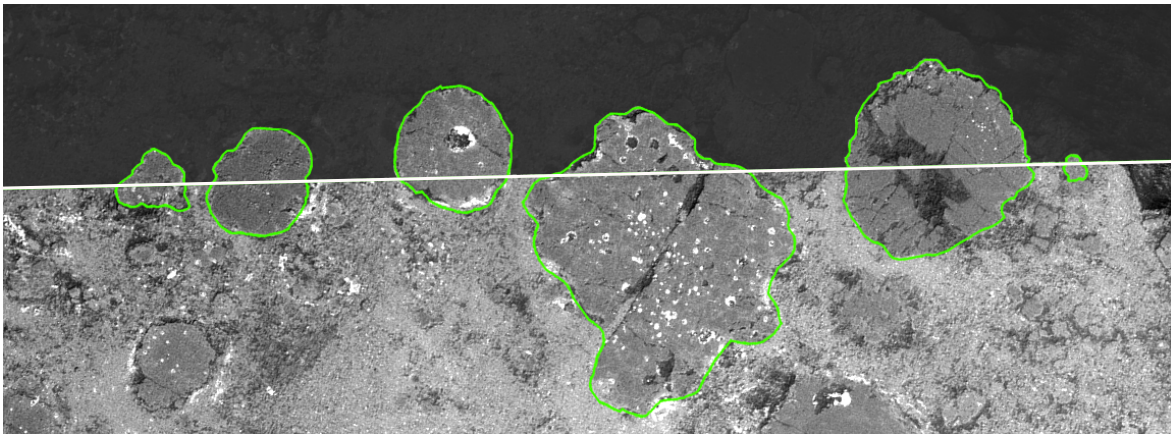


Figura 3.9. Imagen que representa un posible corte transversal en una muestra meteorítica. La línea horizontal en color blanco ilustra la posición de la cara pulida y se ha dibujado el contorno de los cóndrulos en color verde para su identificación.

En la mayoría de los estudios relacionados con el conteo y medición de los componentes condriticos en diversos grupos de meteoritas, se han analizado muestras petrológicas delgadas que, al igual que las muestras estudiadas en este trabajo, son secciones bidimensionales. En algunos de estos estudios, se han utilizado correcciones a los datos bidimensionales para

### 3.3. Corrección estereológica

eliminar el sesgo del diámetro aparente y proyectar el valor más próximo al diámetro tridimensional real de los cóndrulos (Hughes, 1978a; Eisenhour, 1996; Kuebler et al., 1999; Christoffersen et al., 2012). Es así que en nuestro trabajo se incluyó esta corrección de acuerdo a lo que a continuación se describe.

Los métodos utilizados para la proyección de una imagen bidimensional en una tridimensional son conocidos como modelos estereológicos y consisten en estimar la probabilidad de que las partículas agrupadas en la distribución de tamaños bidimensional sea generada a partir de una población determinada de partículas tridimensionales (Mouton, 2011; Heilbronner y Barrett, 2014). El modelo de corrección estereológica que fue utilizado en este trabajo se conoce como el modelo de Schwartz-Saltykov, el cual resulta ideal para la corrección de partículas con geometría esférica (Saltykov, 1967; Schwartz, 1934; Higgins, 2006; Russ and Dehoff, 2012).

Este modelo parte de una idea muy simple: el teorema de Pitágoras, el cual estima que la probabilidad ( $P$ ) de que una partícula, cuyo centro se localiza a una distancia  $h$  del plano de corte, posea un diámetro entre su diámetro real ( $D$ ) y su diámetro aparente ( $d$ ), está dada como:  $P = (D^2 - d^2)^{1/2}/D$  (Figura 3.10).

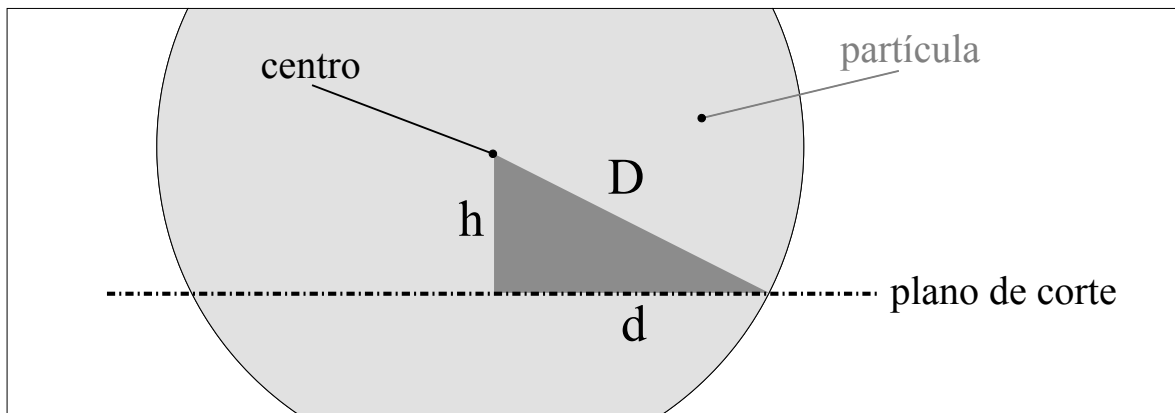


Figura 3.10. Diagrama del modelo estereológico para una partícula circular de diámetro ( $D$ ) seccionada por un plano de corte a una distancia  $h$  de su centro, y donde se indica el diámetro aparente ( $d$ ) (Adaptada de Eisenhour, 1996; Kuebler et al., 1999; Mouton, 2011; Heilbronner y Barrett, 2014).

Aplicando el mismo razonamiento y considerando la contribución de un conjunto  $n$  de partículas (Figura 3.11), la probabilidad ( $P_i$ ) de que las partículas se encuentren agrupadas entre los diámetros  $d_i$  y  $d_{i+1}$ , donde  $d_i < d_{i+1} < D$ , se expresa de la siguiente manera:

$$P_i = \frac{1}{D} \left( \sum_{i=1}^n \sqrt{D^2 - d_i^2} - \sqrt{D^2 - d_j^2} \right) \quad (3.1)$$

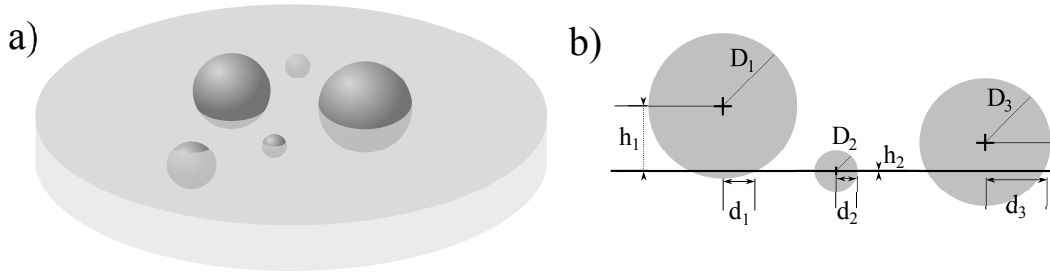


Figura 3.11. (a) Bosquejo de una posible distribución de partículas semejante a la distribución de cóndrulos en las muestras meteoríticas analizadas en este trabajo. En (b) se representa el modelo estereológico para tres partículas con diferentes tamaños ( $D_1 > D_3 > D_2$ ) (Adaptada de Eisenhour, 1996; Kuebler et al., 1999; Heilbronner y Barrett, 2014).

De acuerdo con el modelo de Schwartz-Saltykov, el número de partículas ( $N_c$ ) que presentan geometría esférica con diámetros aparentes corregidos y representados gráficamente en una distribución discreta de tamaños (histograma), se expresa en la ecuación iterativa siguiente:

$$N_c = \frac{d_u}{\sqrt{d_u^2 - d_l^2}} \left[ N_0 - \sum_{i=1}^n N_i \left( \frac{\sqrt{D_i^2 - d_l^2} - \sqrt{D_i^2 - d_u^2}}{D_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

donde  $N_0$  y  $N_c$  son el número de partículas con diámetro sin corregir y corregido respectivamente,  $D_i$  y  $N_i$  son el diámetro medio y la abundancia de las columnas previas en el histograma, y  $d_u$  y  $d_l$  son los límites inferior (u) y superior (l) de la columna del histograma que corresponde a las partículas sin corrección ( $N_0$ ).

En el caso de un sistema de partículas polidispersas<sup>1</sup> el histograma es una representación gráfica, discreta, no-paramétrica y es una estimación de la función de probabilidad de una variable aleatoria continua.

<sup>1</sup>La dispersidad es una medida de la heterogeneidad de tamaños en un conjunto de moléculas o partículas. Una colección de cuerpos es llamado uniforme o monodisperso si los cuerpos tienen el mismo tamaño, forma o masa. Por otro lado, si el conjunto de cuerpos tiene una distribución en el tamaño, forma o masa, es llamado no-uniforme o polidisperso.

### **3.3. Corrección estereológica**

---

A los resultados obtenidos en esta tesis se les aplicó la corrección estereológica (Ecuación 3.2) generando histogramas como una representación gráfica de la distribución de tamaños de cóndrulos en las muestras meteoríticas estudiadas.

---

## Capítulo 4

# Resultados

---

En este capítulo se reportan las distribuciones de tamaños obtenidas para las muestras petrológicas delgadas, así como las distribuciones corregidas mediante el modelo estereológico de Schwartz-Saltykov. Al final del capítulo se ajustan las distribuciones de tamaños de los cóndrulos proyectados tridimensionalmente a los modelos estadísticos más utilizados en la literatura.

### 4.1. Distribución de tamaños de los cóndrulos

Como se mencionó en el capítulo anterior, el histograma es una representación gráfica que permite estimar la función de probabilidad de una variable aleatoria y se define como una función  $f$  que calcula el número de observaciones para cada una de las categorías (columnas) en la distribución, de tal forma que si  $n$  es el número de observaciones y  $k$  el número de columnas, el histograma debe de cumplir la siguiente condición:  $n = \sum_{i=1}^k f_i$ .

Elegir el número adecuado de columnas  $k$  o equivalentemente el ancho de ellas  $\Delta d$  en el histograma es muy importante ya que la estimación de la densidad de la distribución, y por lo tanto, la interpretación de la distribución de tamaños de los cóndrulos dependen de este parámetro (Scott, 2015).

Existen diversos estudios teóricos que definen el número “óptimo” de columnas en los histogramas basándose en diferentes criterios, siendo los más significativos: la regla de Sturges, (Sturges, 1926), la regla de referencia normal de Scott (Scott, 1979) y la regla de Freedman-Diaconis (Freedman y Diaconis, 1981a,b).

En la regla de Sturges se define el número de columnas a partir de la relación  $k = \log_2(n) + 1$ , mientras que la regla de Scott -generalmente utilizada para distribuciones normales basadas en el estimador del error estándar a partir del cálculo del ancho de la columna- se expresa mediante la relación  $\Delta d = (3.5\sigma)/n^{1/3}$ , donde  $\sigma$  representa la desviación estándar de la muestra.



#### 4.1. Distribución de tamaños de los cóndrulos

---

Por otro lado, en la regla de Freedman-Diaconis, expresada como  $\Delta d = 2(\text{IQR})/n^{1/3}$ , se reemplaza el término  $3.5\sigma$  definido en la regla de Scott por el doble del rango intercuartil IQR.

En este trabajo elegimos utilizar la regla de Freedman-Diaconis debido a que es una fórmula óptima para muestras aleatorias de datos, debido a que minimiza el error cuadrático medio en la estimación de la densidad de probabilidad en la distribución (Birgé y Rozenholc, 2006; Heilbronner y Barrett, 2014; Scott, 2015).

Aún cuando los histogramas son “no paramétricos”<sup>1</sup>, son funciones constantes a trozos -es decir- discontinuas. Es razonable suponer que la función de densidad de la variable que se está estimando (el diámetro de los cóndrulos) es continua, y que por lo tanto, los histogramas podrían ser representaciones inapropiadas en el momento de estimar algunos parámetros estadísticos de la distribución como pueden ser la moda, la mediana y la media.

Una herramienta auxiliar para tratar la naturaleza discontinua de los histogramas es el estimador *kernel* de la densidad KDE (*Kernel Density Estimator* por sus siglas en inglés). El KDE es, al igual que el histograma, un estimador de densidad no paramétrico suave, continuo e independiente de los puntos iniciales y finales en la distribución (Scott, 2015).

Los histogramas son la estimación de la densidad más recurrente en la mayoría de los estudios relacionados con la distribución de tamaños de los cóndrulos en las meteoritas (Friedrich et al., 2014), por lo que aquí se consideró que -para efecto de comparación- es conveniente describir la distribución de tamaños de los cóndrulos en forma de histogramas.

En la Figura 4.1 se muestran las frecuencias tabuladas de los diámetros de los segmentos con valor umbral en los mapas binarios (Figura 3.6) como una representación de las distribuciones de tamaños de los cóndrulos para las muestras meteoríticas NWA y de Allende. La frecuencia de la distribución es presentada en forma de histograma, el estimador *Kernel* de la densidad se indica con una línea punteada y las frecuencias acumuladas de la distribución con una línea continua.

Los parámetros estadísticos relacionados con la distribución de los cóndrulos, así como la identificación del porcentaje de microcóndrulos en las muestras se reportan en la Tabla 4.1.

---

<sup>1</sup>No paramétrico en el sentido de que no se requiere ninguna suposición del tipo de que la distribución de la variable bajo estudio, está confinada a las familias paramétricas de distribuciones, tales como la normal, la lognormal, la Weibull, la gamma, por mencionar algunas.

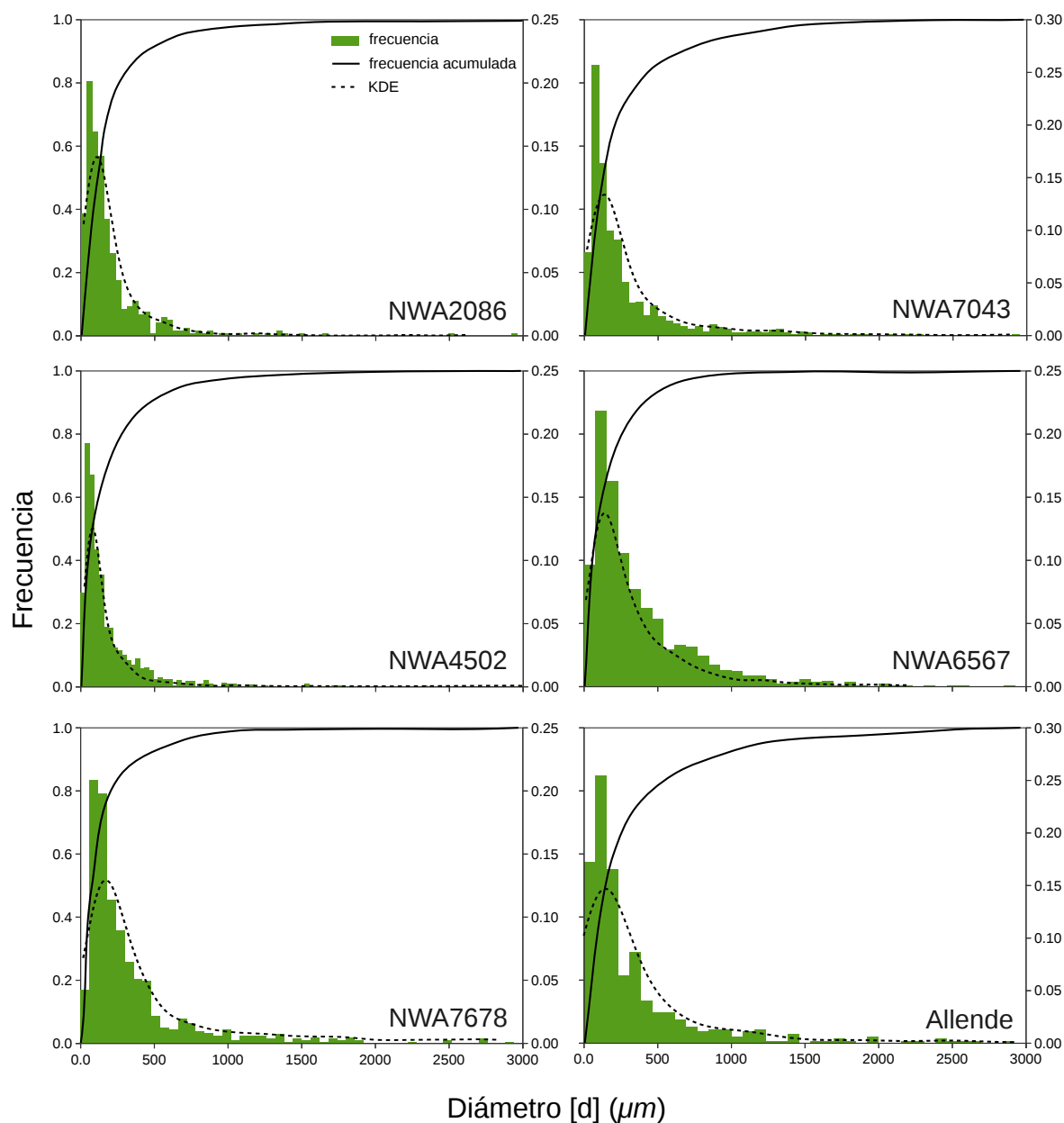


Figura 4.1. Distribución del tamaño de los cóndrulos de las muestras meteoríticas representadas por histogramas. El ancho de las columnas se definió a partir de la regla de Freedman-Diaconis. En las gráficas se muestra adicionalmente la frecuencia acumulada de la distribución (línea continua) y el estimador *Kernel* de la densidad KDE (línea punteada).

## 4.2. Distribución de tamaños (corrección estereológica)

Tabla 4.1. Resultados estadísticos obtenidos del análisis de las muestras meteoríticas.

Parámetro	Muestra meteorítica					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
Número de cóndrulos (n)	478	771	1573	815	824	447
Abundancia de Cóndrulos (área %)	28	38	44	41	37	28
Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )	204.79	233.15	142.17	237.62	180.46	237.62
Desviación estándar ( $\mu\text{m}$ )	244.34	277.41	183.72	269.76	202.97	269.76
Mediana ( $\mu\text{m}$ )	130.71	129.43	79.08	135.72	107.01	135.72
Error estándar ( $\mu\text{m}$ )	11.18	9.99	4.63	12.76	7.07	12.76
Asimetría	4.64	2.91	3.99	2.79	2.90	2.79
Diámetro promedio [área <sup>a</sup> ] ( $\mu\text{m}$ )	1107.74	1045.44	1026.77	616.43	709.15	927.01
KDE <sup>b</sup>						
Pico ( $\mu\text{m}$ )	112.42	104.07	62.40	85.18	84.95	113.34
Ancho de banda <sup>c</sup> ( $\mu\text{m}$ )	75.35	80.44	48.29	53.92	56.13	84.31
Ancho de columna FD <sup>d</sup> ( $\mu\text{m}$ )	34.30	40.20	20.30	38.20	30.20	45.90
Ancho de columna 3D <sup>e</sup> ( $\mu\text{m}$ )	172.99	155.66	210.24	94.88	97.94	116.70
Circularidad (promedio)	0.87	0.85	0.87	0.79	0.79	0.83
Circularidad <0.55 (%)	2.51	0.91	3.43	1.35	10.07	2.46
Microcóndrulos						
< 40 $\mu\text{m}$ (%)	3.97	3.89	18.80	8.70	6.06	2.24
Rango ( $\mu\text{m}$ )	23.11–38.32	9.39–39.56	7.27–39.87	3.93–39.66	5.82–39.02	28.29 – 38.32

<sup>a</sup>Obtenido a partir de las distribuciones de la Figura 4.1 por área ponderada.

<sup>b</sup>KDE: Estimador kernel de la densidad (Kernel density estimation).

<sup>c</sup>Ancho de banda de suavizado del kernel estimado mediante la regla de Silverman (Silverman, 1986).

<sup>d</sup>De acuerdo con la regla de Freedman-Diaconis (Freedman y Diaconis, 1981a,b).

<sup>e</sup>Estimado a partir de la corrección estereológica calculada a partir de la ecuación 3.1 y la Figura 4.2.

## 4.2. Distribución de tamaños (corrección estereológica)

Los diámetros que se muestran en la distribución de tamaños de los cóndrulos de la Figura 4.1 son los diámetros aparentes  $d$ . Sin embargo, como se mencionó en el capítulo anterior, es necesario realizar una corrección a la distribución de tamaños para proyectar tridimensionalmente a los cóndrulos y obtener las distribuciones de los diámetros reales  $D$ .

Usando la Ecuación 3.2 se calculó la corrección estereológica de la distribución de tamaños de los cóndrulos de las muestras meteoríticas a partir de una matriz de corrección. Las distribuciones corregidas se muestran en la Figura 4.2.

## 4.3. Ajuste de un modelo estadístico

Múltiples estudios sobre el tamaño de los cóndrulos en meteoritas de diversos grupos han reportado que la distribución de tamaños se ajusta a diversas funciones continuas teóricas, como son: la función lognormal (Martin y Mills, 1976; Dodd, 1976; King y King, 1979; Nelson y Rubin, 2002), la función Weibull (Hughes, 1978a,b; King y King, 1978; Eisenhour, 1996; Kuebler et al., 1999), la función exponencial (Fisher et al., 2014) o una ley de potencias (Uesugi et al., 2013).

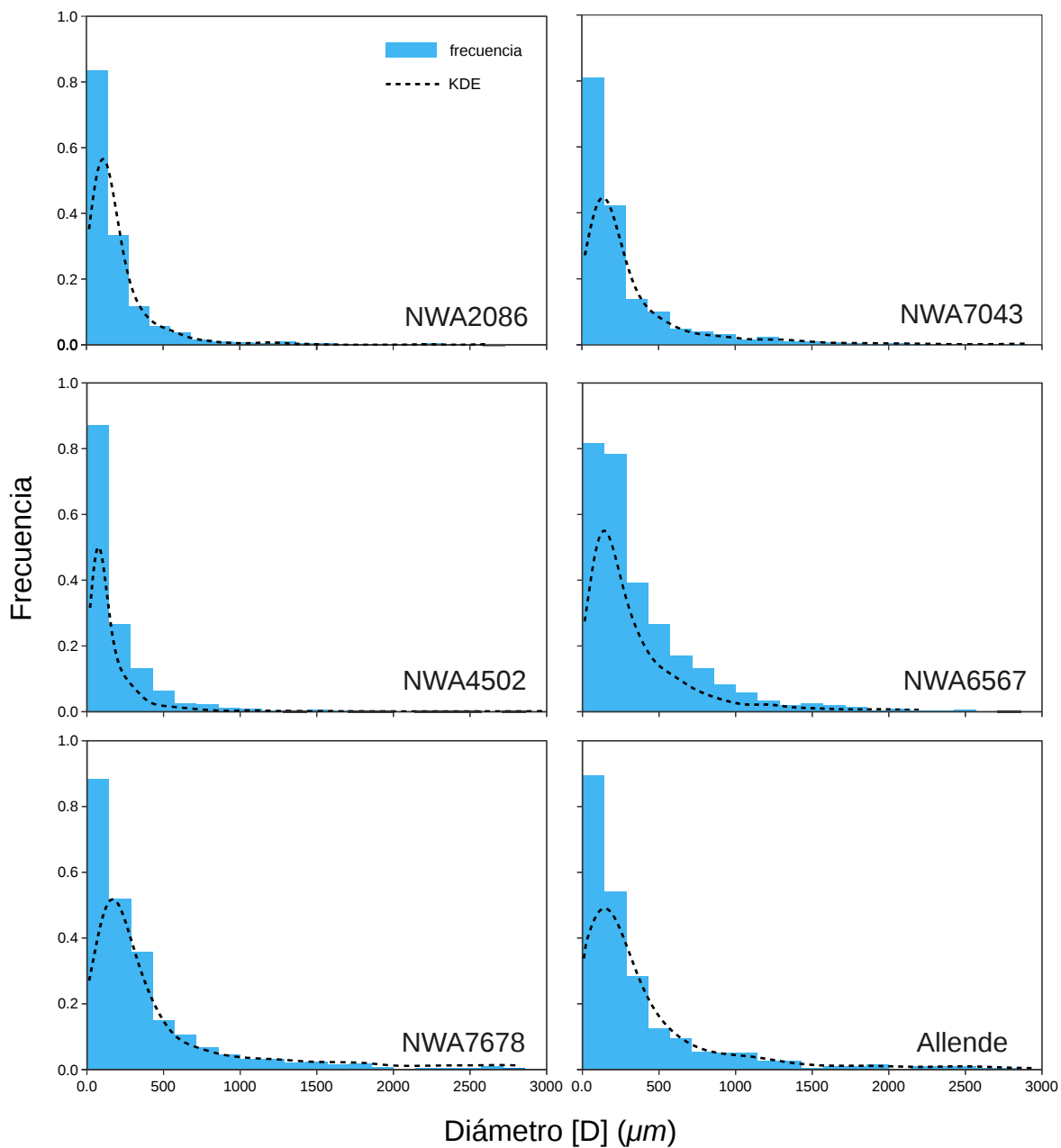


Figura 4.2. Distribución de los diámetros corregidos (D) de los cóndrulos de las muestras meteoríticas representadas por histogramas construidos a partir de la corrección estereológica. En las gráficas se muestra el estimador kernel de la densidad KDE (línea punteada).

### 4.3. Ajuste de un modelo estadístico

Considerando que actualmente no existe un consenso respecto a cuál de dichas funciones representa fielmente la distribución de tamaños de los cóndrulos, en este trabajo se utilizan las distribuciones lognormal y Weibull (las cuales son las más utilizadas en la literatura) para aproximar las distribuciones de las muestras meteoríticas (Martin y Mills, 1976; Dodd, 1976; Hughes, 1978a,b; King y King, 1978, 1979; Eisenhour, 1996; Kuebler et al., 1999; Nelson y Rubin, 2002). Las dos distribuciones teóricas elegidas son funciones de densidad biparamétricas expresadas como:

$$\text{Lognormal : } f(D) = \frac{1}{\sigma D \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.1)$$

$$\text{Weibull : } g(D) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{D}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{D}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (4.2)$$

donde  $\mu$  y  $\sigma$  son la media y la desviación estándar del logaritmo de la variable (diámetro de los cóndrulos  $D$ ); mientras que  $\beta$  y  $\eta$  son los parámetros de forma y de escala respectivamente. Los valores que toman dichos parámetros se reportan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros de las funciones de distribución lognormal y Weibull mostradas en las Figuras 4.3 y 4.4.

Función de distribución	Muestra meteorítica					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
Lognormal <sup>a</sup>						
$\sigma$	0.7924	0.8941	0.9123	0.8933	0.8566	0.8473
$\mu$	4.9586	5.0032	4.4905	4.881	4.7919	5.0638
Weibull <sup>b</sup>						
$\beta$	1.5135	1.3198	1.3121	1.3706	1.3944	1.3835
$\eta$	206.56	229.15	137.98	199.71	181.37	237.90

<sup>a</sup>  $\mu$  y  $\sigma$  son la media y la desviación estándar del logaritmo de la variable (diámetro de los cóndrulos  $D$ ).

<sup>b</sup>  $\beta$  y  $\eta$  son los parámetros de forma y de escala respectivamente.

La comparación entre las distribuciones empíricas y las teóricas se presenta en la Figura 4.3, donde se muestran las gráficas de las distribuciones de tamaños de los cóndrulos como histogramas (amarillo) y las funciones de densidad teóricas lognormal (rojo) y Weibull (verde) como líneas continuas. Adicionalmente, en esta misma figura se muestra la gráfica del estimador Kernel de la densidad KDE para efecto de comparación.

Una forma de evaluar la calidad del ajuste de las funciones teóricas con los datos es a través de las gráficas P-P (Probabilidad-Probabilidad) (Scott, 2015), las cuales representan la cercanía entre la función de distribución acumulada de los valores empíricos (observados) y las funciones de densidad acumuladas de los valores teóricos (esperados). En la Figura 4.4 se muestran las gráficas P-P para las distribuciones lognormal (rojo) y Weibull (verde), donde la calidad del ajuste con los valores empíricos se refleja con la cercanía de las curvas (roja y verde) a la recta identidad, i.e., entre más cercanos son los valores graficados con la recta identidad, mejor será el ajuste.

### 4.4. Prueba de hipótesis

Para medir la discrepancia entre los valores observados en las muestras meteoríticas y los valores esperados de los modelos asociados a las funciones teóricas, se aplicó el procedimiento conocido como prueba de hipótesis utilizando las estadísticas de Kolmogórov-Smirnov (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948), de Anderson–Darling (Anderson y Darling, 1952) y Chi-cuadrada de Pearson (Pearson, 1900; Greenwood y Nikulin, 1996) como pruebas de bondad de ajuste.

Este procedimiento se aplicó bajo el planteamiento estadístico de la hipótesis nula  $H_0$  (Lehmann, 1993; Lehmann y Romano, 2008), donde la hipótesis a contrastar es el ajuste entre los valores estadísticos muestrales y las funciones de distribución teóricas lognormal y Weibull. Los valores observados de las muestras meteoríticas presentan un buen ajuste con la función de distribución teórica (la hipótesis nula es aceptada) cuando el valor estadístico es menor al valor crítico para cierto nivel de significancia  $\alpha$  fijo. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos con las pruebas de bondad de ajuste para las distribuciones lognormal y Weibull calculadas a partir de un nivel de significancia fijo de  $\alpha = 0.01$ . La descripción de las pruebas de bondad de ajuste, los resultados para otros niveles de significancia ( $\alpha = 0.2, 0.1, 0.5, 0.02, 0.01$ ) y los parámetros relacionados con estas pruebas se muestran en el Apéndice A.

#### 4.4. Prueba de hipótesis

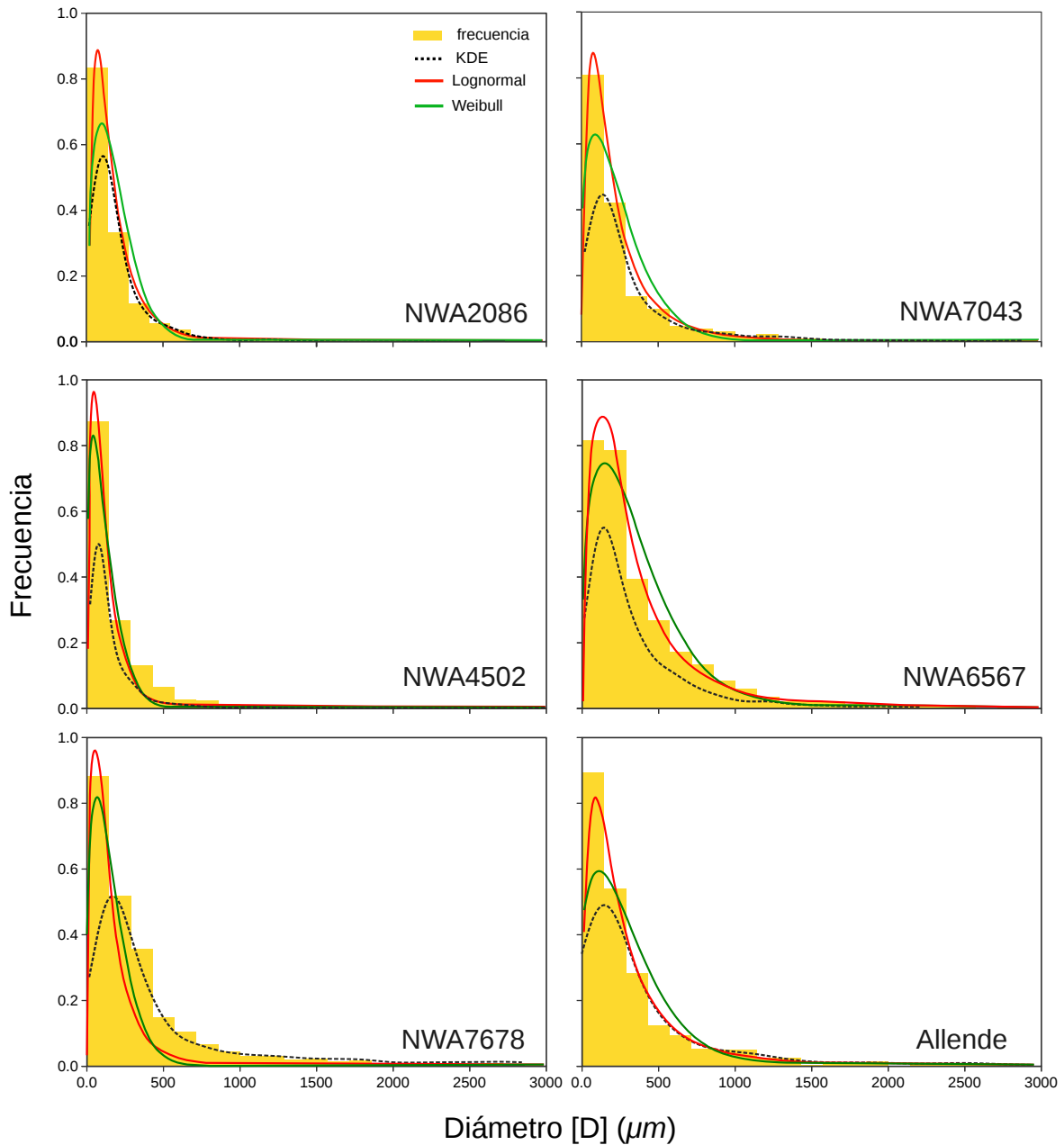


Figura 4.3. Distribución de los diámetros corregidos ( $D$ ) de los cóndrulos de las muestras meteoríticas representadas por histogramas construidos a partir de la corrección estereológica. En las gráficas se muestra el estimador *Kernel* de la densidad KDE (línea punteada) y para efecto de comparación se muestran los ajustes a las funciones lognormal (rojo) y Weibull (verde).

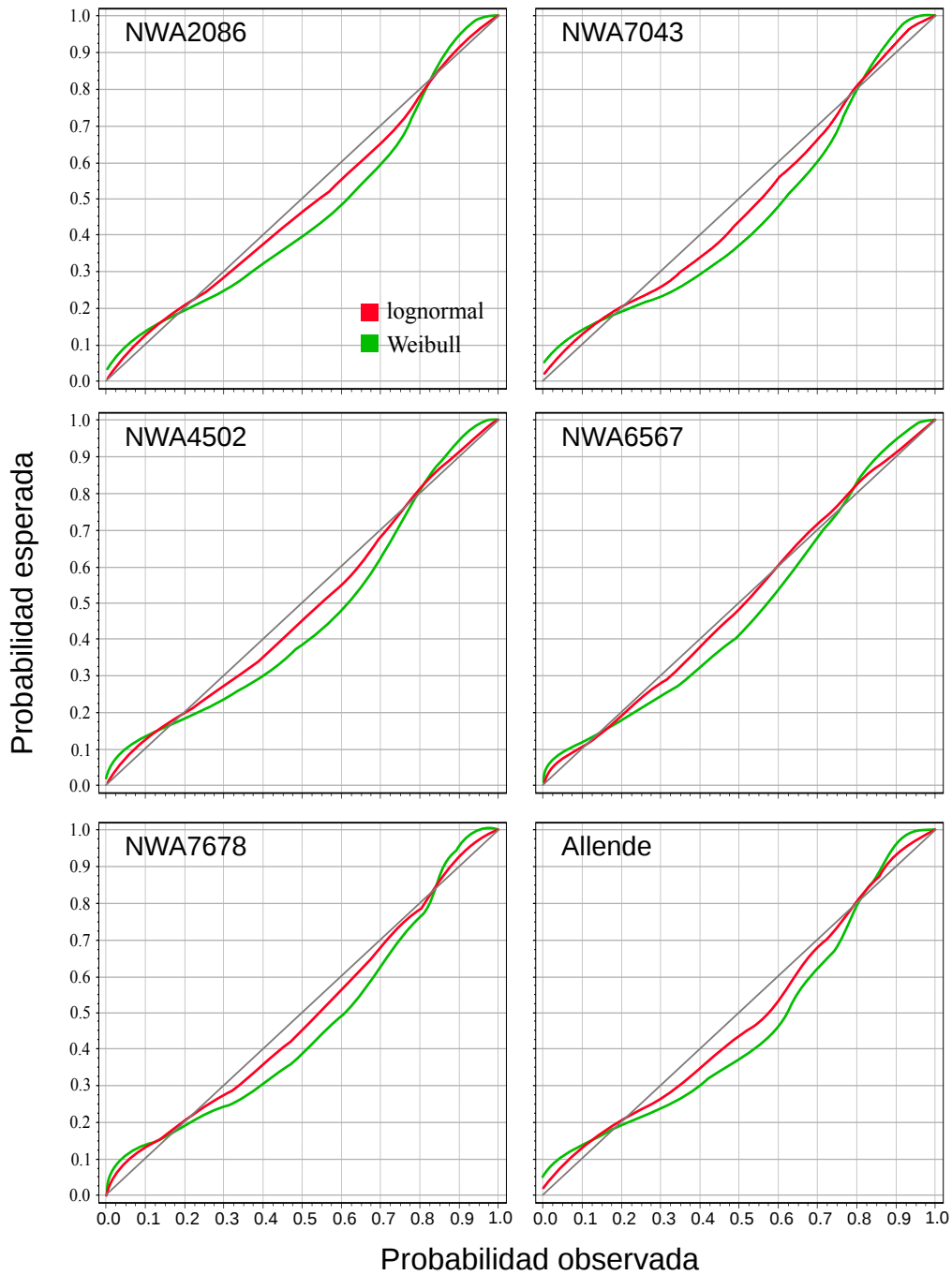


Figura 4.4. Gráficas P-P para las funciones de densidad acumuladas lognormal (rojo) y Weibull (verde). En estas gráficas, la calidad del ajuste de las funciones teóricas, se ve reflejada en la cercanía de las curvas (roja y verde) con la recta identidad.



#### 4.4. Prueba de hipótesis

Tabla 4.3. Pruebas de bondad de ajuste para las funciones de distribución lognormal y Weibull mostradas en la Figura 4.3. Los valores críticos mostrados se calcularon a partir de un nivel de significancia de  $\alpha = 0.01$ .

Bondad de ajuste	Muestra meteorítica					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
<b>Kolmogórov-Smirnov<sup>a</sup></b>						
Valor estadístico						
lognormal	0.05484	0.07001	0.05589	0.03511	0.05721	0.0855
Weibull	0.1207	0.13369	0.12348	0.09891	0.12021	0.15181
Valor crítico	0.07451	0.05867	0.04107	0.05706	0.05675	0.07705
<b>Anderson-Darling<sup>b</sup></b>						
Valor estadístico						
lognormal	2.4292	7.0829	8.6286	1.5398	5.3327	4.0659
Weibull	18.706	32.725	53.751	16.519	30.913	18.734
Valor crítico	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074
<b>Chi-cuadrada<sup>c</sup></b>						
Valor estadístico						
lognormal	19.038	54.192	82.384	13.419	59.009	27.064
Weibull	72.675	178.91	323.40	90.14	185.99	93.985
Valor crítico	20.09	21.67	23.209	21.666	21.666	20.09

<sup>a</sup> Basado en Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948.

<sup>b</sup> Basado en Anderson y Darling, 1952.

<sup>c</sup> Basado en Pearson, 1900; Greenwood y Nikulin, 1996.

---

## Capítulo 5

# Discusión

---

En este capítulo se discuten los resultados presentados en el capítulo anterior, y se comparan con los resultados obtenidos por otros autores. También se discuten algunas teorías y modelos de formación de cóndrulos y su relación con nuestros resultados.

### 5.1. Consideraciones en la distribución de tamaños

La distribución de tamaños de los componentes nebulares, al igual que su tamaño promedio, son características importantes para comprender, no solo los procesos relacionados con el origen, con la dinámica y con la evolución del sistema solar primitivo (Sears, 2004; Scott, 2007; Chiang y Youdin, 2010), sino también para entender la cosmogénesis del material rocoso que compone las diferentes estructuras en el universo (Ebel, 2006).

La distribución de tamaños de los cóndrulos observada actualmente en las meteoritas puede ser el resultado de varios mecanismos físicos relacionados con: la génesis, la separación y la clasificación granulométrica en la nebulosa solar (proceso comúnmente llamado *nebular sorting*), la alteración de los cuerpos parentales (térmica, química y física), o con una superposición de algunos de los eventos anteriores (Shu et al., 1996; Cuzzi et al., 2001; Chiang y Youdin, 2010; Friedrich et al., 2014). Es por ello que la evaluación de cada uno de estos mecanismos, que posiblemente operaron en el sistema solar primitivo, amerita obtener datos muy precisos de las características físicas (el tamaño, la masa y la densidad) de los componentes condriticos.

## 5.2. Distribución de tamaños de las muestras meteoríticas NWA

Las meteoritas NWA estudiadas en este trabajo son de hallazgo reciente, y como consecuencia de ello, han sido muy poco estudiadas. Los trabajos relacionados con estas meteoritas se concentran en el estudio de sus historias térmicas y sus características cosmoquímicas (Sapah et al., 2013; Amelin et al., 2013; Kereszturi et al., 2014, 2015; Maravilla y Leal-Herrera, 2015) y, hasta el momento en que se escribió esta tesis, no se localizó ningún reporte relacionado con las características estadísticas de sus componentes nebulares.

Los resultados obtenidos en este trabajo nos indican que, si bien la distribución de tamaños en las muestras meteoríticas no es exactamente la misma, en general, las distribuciones son semejantes (Figuras 4.1 y 4.3).

La diferencia observada en la forma de la curva de la densidad de tamaños podría deberse a que el número de cóndrulos, así como el tamaño de la superficie de las muestras, es diferente para cada meteorita estudiada.

La concordancia entre las meteoritas NWA y Allende se ve reflejada cualitativamente en la similitud de las características de los cóndrulos, donde dichas características se revelan a través de los parámetros estadísticos reportados en la tabla 4.1. De acuerdo con estos resultados, el diámetro promedio de los cóndrulos es 239 y 286  $\mu\text{m}$ , la moda (obtenida con el pico del estimador *Kernel* de la densidad) es 114 y 135  $\mu\text{m}$  y la abundancia de cóndrulos es 38 y 28 (%Area) en las meteoritas NWA y Allende respectivamente.

De los estudios realizados desde la década de los setentas a la actualidad, se sabe que los cóndrulos tienen un tamaño variable entre los diferentes grupos de condritas. De hecho en el mismo grupo, su distribución podría no ser exactamente la misma (Dodd, 1976; Hughes, 1978b; Teitler et al., 2010; Jacquet, 2014; Friedrich et al., 2014). Los boletines de la Sociedad Meteorítica y los estudios que los fundamentan, indican que las meteoritas estudiadas en este trabajo pertenecen al mismo grupo y tipo petrológico, mostrando una correspondencia entre ellas (Krinov et al. (1970); Russell et al. (2005); Ruzicka et al. (2014, 2015a,b); Boletines de la sociedad meteorítica).

La similitud entre los parámetros estadísticos, la forma de la distribución y el hecho de que pertenezcan al mismo grupo químico y tipo petrológico (CV3), nos permite inferir que aún cuando no existen estudios previos, los resultados reportados en la tabla 4.1 y las Figuras 4.1 y 4.3 son resultados estadísticamente representativos y presentan un nivel de confianza aceptable.

### **5.2.1. Análisis comparativo con Allende**

Allende es probablemente la condrita carbonosa más grande que ha caído en la Tierra (~ 5 toneladas) y es conocida como la roca “mejor estudiada en la historia”. Una de las ventajas de esta circunstancia es la gran diversidad de trabajos relacionados con dicha meteorita, donde algunos de ellos reportan resultados relacionados con la distribución de los componentes condriticos obtenidos mediante el uso de diferentes técnicas de análisis (Friedrich et al., 2014).

Los estudios de Allende que se han llevado a cabo desde la década de los setentas, han generado algunos resultados relacionados con la distribución de los cóndrulos. Desafortunadamente estos resultados no se presentan en un formato estándar y a la fecha, es muy complicado hacer una comparación entre ellos (Friedrich et al., 2014). Por otro lado, en algunos estudios solo se reportan los resultados de forma gráfica y la distribución de tamaños que se presenta fue construida utilizando la escala de Udent-Wentworth (Udden, 1914; Wentworth, 1922; Krumbein y Aberdeen, 1937), donde el tamaño de las partículas se representa por el parámetro  $\phi$  (donde  $\phi = -\log_2 \text{diámetro [mm]}$ ), en lugar de hacerlo linealmente, tal y como se obtuvieron las gráficas de las distribuciones reportadas en el presente trabajo (Figuras 4.1, 4.2, 4.3).

Para efecto de comparación con nuestros resultados, en la Figura 5.1 se presentan los trabajos de Paque y Cuzzi (1997); Christoffersen et al. (2012); Fisher et al. (2014); Tait et al. (2014) y Ebel et al (2015), en los cuales se reporta la distribución de tamaños de los cóndrulos de la meteorita Allende.

Recientemente, Christoffersen et al. (2012)<sup>1</sup> y Fisher et al. (2014) analizaron secciones petrográficas delgadas (diámetros aparentes), mientras que Ebel et al (2015) reportaron la distribución de los cóndrulos después de aplicar una corrección estereológica. Por su parte, en el trabajo de Paque y Cuzzi (1997) se separaron los cóndrulos de la muestra (desagregación) y la distribución de tamaños se obtuvo midiendo las partículas directamente.

Tomando en cuenta los trabajos de Paque y Cuzzi (1997), de Christoffersen et al. (2012) y de Fisher et al. (2014) en los cuales se reporta la distribución de tamaños de los cóndrulos de la meteorita Allende, se llevó a cabo una comparación con nuestros resultados (Figura 5.1) tomando en cuenta que las distribuciones por ellos reportados no se pudieron reconstruir con las mismas técnicas utilizadas por nosotros, ya que los autores no reportaron los resultados

---

<sup>1</sup>Christoffersen y colaboradores mencionan haber desarrollado un algoritmo de corrección estereológica propio; sin embargo, los resultados de dicha corrección los exponen cualitativamente por lo que no fue posible compararlos con los resultados obtenidos en este trabajo.

## 5.2. Distribución de tamaños de las muestras meteoríticas NWA

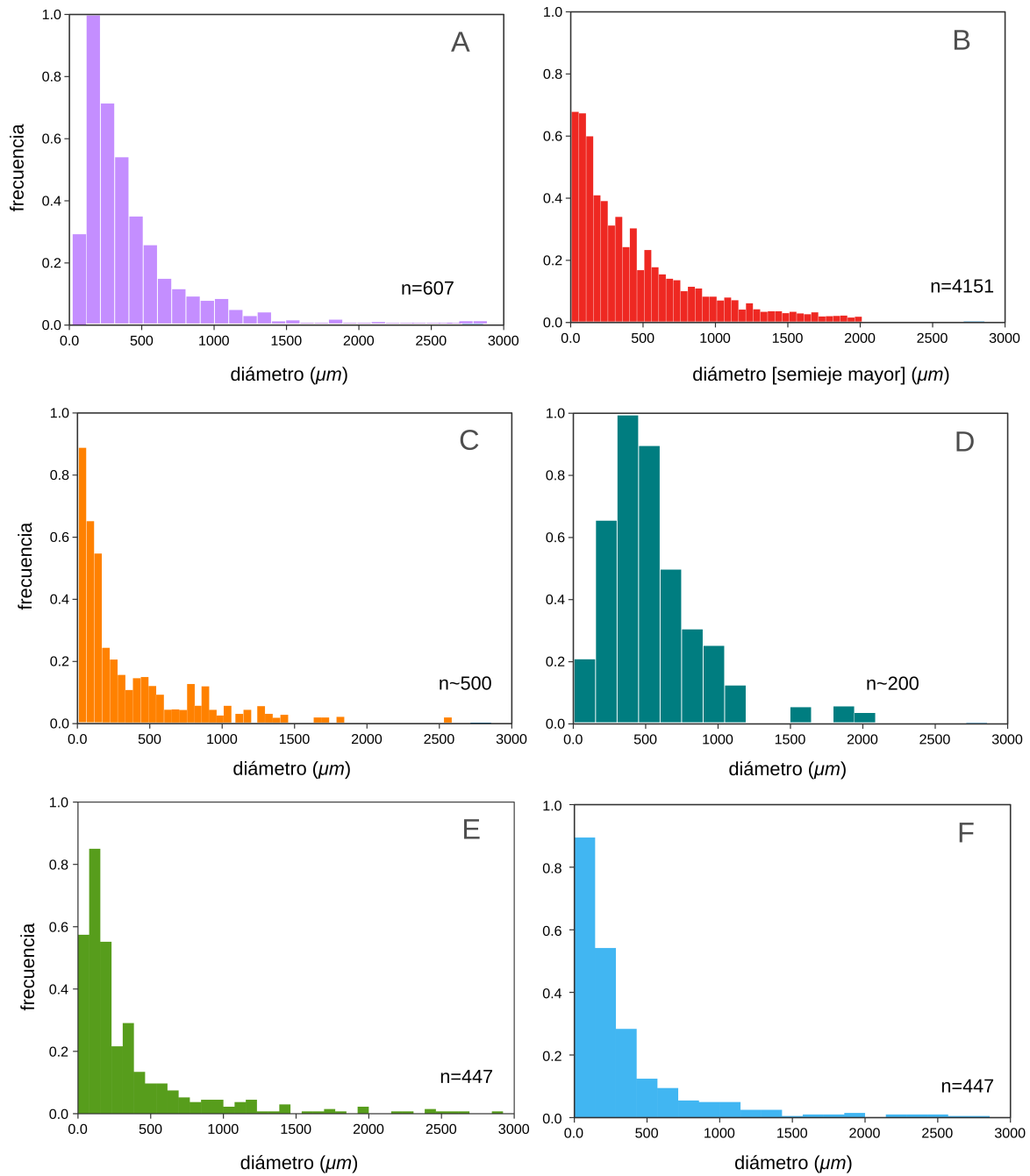


Figura 5.1. Estudios históricos de la distribución de tamaños de cóndrulos en la meteorita Allende que corresponden con los resultados de Ebel et al (2015)(A), Fisher et al. (2014)(B), Christoffersen et al. (2012)(C), Paque y Cuzzi (1997)(D) y los resultados obtenidos en este trabajo (E y F). En cada una de las gráficas se indica el número de cóndrulos estudiados (n).

numéricos de sus distribuciones, ni los datos crudos de sus mediciones.

Como se mencionó en el Capítulo 3, la cantidad de elementos y el número o ancho de intervalos en los histogramas refleja la cercanía de la geometría del histograma con la función de la densidad empírica real, y por ello es posible que los resultados mostrados en la Figura 5.1 no parezcan provenir de la misma meteorita.

Para fortalecer este argumento, en la Figura 5.2 se muestra la distribución de tamaños de los cóndrulos de la meteorita Allende (de la muestra estudiada en este trabajo) representada como histogramas, donde el número de columnas ( $k$ ) fue calculado utilizando cuatro reglas estadísticas diferentes.

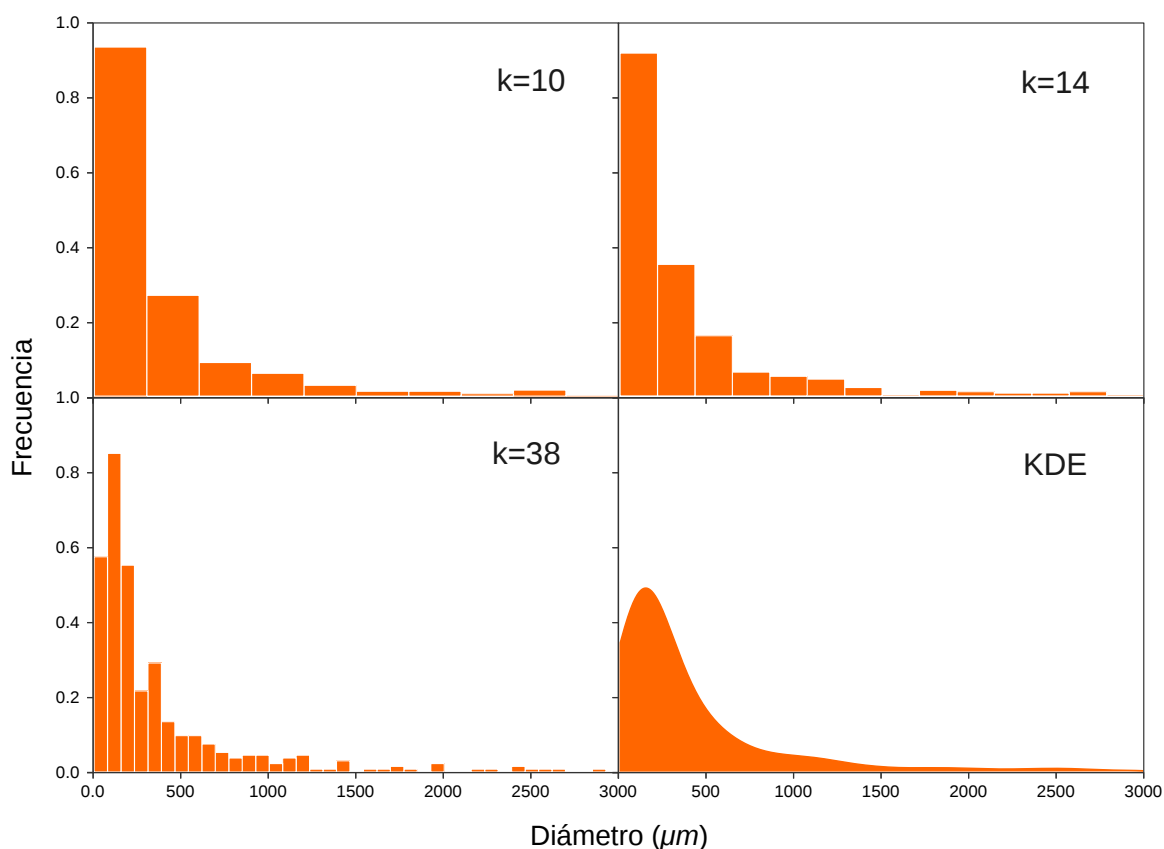


Figura 5.2. Distribución de tamaños de los cóndrulos de la meteorita Allende construida a partir de cuatro reglas estadísticas diferentes. (A) Sturges, (B) Scott, (C) Freedman-Diaconis y (D) el estimador *Kernel* de la densidad KDE.

En esta Figura (5.2) se muestra que el criterio estadístico elegido para calcular el número o el ancho de las columnas en los histogramas es altamente subjetivo, ya que se podría inferir erróneamente (si se desconoce el origen) que la distribución de las partículas es diferente en

### 5.3. Tamaño característico de los cóndrulos

---

cada gráfica, o incluso, que se trata de cuatro muestras completamente diferentes.

Es por esto que, para lograr una comparación objetiva de las distribuciones es necesario representar la función de densidad de los cóndrulos con una herramienta no paramétrica y continua, como podría ser, el estimador *Kernel* de la densidad KDE, que de hecho es el estimador considerado en este trabajo.

### 5.3. Tamaño característico de los cóndrulos

Al parecer, al igual que la distribución de tamaños, para cada grupo de condritas los cóndrulos presentan un rango de tamaños y un diámetro promedio distintivo. El rango de tamaños para los cóndrulos en las condritas carbonosas (CV) está entre 200 y 2000  $\mu\text{m}$  de diámetro (Scott y Krot, 2014; Friedrich et al., 2014) y el tamaño promedio (tamaño estándar) es aproximadamente de 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro (Tabla 2.1).

Este tamaño estándar se ha interpretado como un indicador de un posible mecanismo de separación y clasificación nebular, como lo sería el arrastre aerodinámico debido a efectos turbulentos (Dodd, 1976; Shu et al., 1996; Cuzzi et al., 2001; Ormel et al., 2008), o como una característica universal, que opera como discriminante entre las diferentes teorías y modelos de formación de los cóndrulos (Jacquet, 2014).

Es poco frecuente que, en los estudios relativos a la distribución de tamaños, el promedio aritmético sea el parámetro más representativo del diámetro promedio de los cóndrulos. En su lugar se reporta usualmente el tamaño promedio ponderado en proporción al volumen total (%Vol) de los componentes nebulares (Martin y Mills, 1976; King y King, 1979; Eisenhour, 1996; Cuzzi et al., 2001; Nelson y Rubin, 2002; Teitler et al., 2010; Ebel et al, 2015).

Debido a la naturaleza bidimensional de nuestro estudio, no fue posible determinar el diámetro promedio ponderado por volumen en las muestras meteoríticas. Sin embargo, se reconstruyeron las distribuciones de tamaños de los cóndrulos (Figura 4.1) para representar la fracción del área de los cóndrulos agrupados en cada columna, de tal forma que se obtuvo el diámetro promedio ponderado por el área (%Area).

Para comparar con los resultados aquí obtenidos, en la Tabla 5.1 se presentan los resultados del tamaño promedio de los cóndrulos para diferentes condritas del grupo CV reportados por Paque y Cuzzi (1997); May et al. (1999) y Teitler et al. (2010).

El tamaño promedio obtenido para las muestras meteoríticas estudiadas por nosotros (905  $\mu\text{m}$ ) está en el mismo orden de magnitud que el reportado por los otros autores y además coincide con el diámetro promedio ponderado de 900  $\mu\text{m}$  recomendado por Friedrich et al.

(2014) para las condritas del grupo CV.

Tabla 5.1. Diámetro promedio de los cóndrulos para varias condritas carbonosas reportados por diferentes autores.

Meteoritas	Características de los cóndrulos		
	número(n)	promedio ( $\mu\text{m}$ )	rango ( $\mu\text{m}$ )
<b>Otros trabajos</b>			
ALH84028 <sup>a</sup>	–	970	–
Allende <sup>a</sup>	~200	850	–
Vigarano <sup>b</sup>	–	680	–
Efremovka <sup>b</sup>	–	655	–
Mokoia <sup>b</sup>	–	683	–
Leoville <sup>b</sup>	–	823	–
ALH84028 <sup>c</sup>	194	932	286-3660
Allende <sup>c</sup>	287	912	266-9100
Allende <sup>c</sup>	126	918	274-3960
<b>Este trabajo</b>			
NWA2086	478	1108	29-2703
NWA7043	771	1045	15-2603
NWA4502	1573	1027	9-4115
NWA6567	815	616	5-1717
NWA7678	824	709	8-2130
<b>NWA (total)</b>	4461	901	–
Allende	447	927	39-2025
<b>Muestras (total)</b>	4909	905	–

Información tomada de: <sup>a</sup>Paque y Cuzzi, 1997, <sup>b</sup>May et al., 1999, <sup>c</sup>Teitler et al., 2010.

## 5.4. Ajuste de un modelo estadístico

Es común encontrar que la función de densidad que representa los tamaños y las masas de las poblaciones de partículas, asociadas a fenómenos terrestres y meteoríticos, exhibe una asimetría positiva<sup>1</sup>. Algunos estudios sugieren que este tipo de distribuciones se encuentran

<sup>1</sup>Una distribución es simétrica, si existe el mismo número de valores a la derecha que a la izquierda de la media. Se dice que la distribución presenta asimetría positiva (derecha) si la cola a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, es decir, si hay valores más separados de la media a la derecha; de lo contrario, se dice que la distribución presenta asimetría negativa (izquierda).



#### 5.4. Ajuste de un modelo estadístico

---

relacionadas con fenómenos de origen antropogénico o natural, como pueden ser, los aerosoles atmosféricos, la brisa marina, las proyecciones volcánicas, el polvo levantado por el viento, entre otros. Por esto mismo, se ha sugerido que la distribución de las partículas derivadas de alguno -o de varios- de estos fenómenos, está representada por una función de densidad del tipo de la función lognormal o de la función Weibull, ya que éstas son funciones de densidad con asimetría positiva (Seinfeld, 1975; Dodd, 1976; King y King, 1979; Nelson y Rubin, 2002).

Los resultados estadísticos obtenidos para la distribución de las muestras meteoríticas estudiadas en este trabajo, indican que todas las distribuciones presentan asimetría positiva (Tabla 4.1).

Adicionalmente, en algunos estudios se sugiere que la distribución de tamaños de los componentes nebulares podría ajustarse con alguna función de densidad derivada de la ley de Rosin, como podría ser la función Weibull. La ley de Rosin, de la cual se deriva la distribución de Rosin-Rammler (Rosin y Rammler, 1933), es conocida por describir apropiadamente la distribución de partículas derivadas de procesos relacionados con la acreción-fragmentación de la materia rocosa, como son: la trituración artificial de polvos industriales (Allen, 1997) o las muestras recolectadas de las regolitas lunares (King y Butler, 1977). Es por ello que históricamente las funciones lognormal y Weibull son las funciones de densidad teóricas que más se han utilizado para describir la distribución de tamaños de los cóndrulos en los diversos grupos de condritas.

En nuestro trabajo encontramos que el ajuste de la distribución de tamaños empírica de las muestras meteoríticas con las funciones lognormal y Weibull es:

- (a) **Aceptable** para las muestra NWA2086 y NWA6567, donde no se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  bajo niveles de significancia  $\leq 10\%$  [ $\leq \alpha=0.1$ ] para el ajuste con la función lognormal.
- (b) **Pobre** para las mismas muestras con la función Weibull (no se rechaza  $H_0$ , pero lo hace bajo el nivel de significancia más bajo [1 %,  $\alpha=0.01$ ]).
- (c) **Muy pobre** para las otras muestras, donde se rechaza  $H_0$ .

Los resultados completos de este análisis se reportan en las tablas A.1 y A.2 del apéndice A.

Del mismo modo, en las seis gráficas P-P mostradas en la Figura 4.4 (pag. 45), se observa que: a) la función lognormal se ajusta mejor que la función Weibull, y b) las muestras que presentan un mejor ajuste son las meteoritas NWA2086 y NWA6567.

En los trabajos de Teitler et al. (2010) y Ebel et al (2015), los autores demuestran que para el caso de las condritas carbonosas (entre las que se encuentra Allende), las funciones lognormal y Weibull no describen adecuadamente la función de distribución de tamaños de los cóndrulos, resultados que coinciden con los reportados por nosotros en este trabajo.

Por otro lado, el estudio recopilatorio de Friedrich et al. (2014) sugieren que debido a que no existe actualmente un consenso sobre cuál función de densidad teórica describe apropiadamente la distribución de las partículas nebulares, es conveniente declarar que -por el momento- *la función de densidad es desconocida* .

## 5.5. Formación de cóndrulos

### 5.5.1. Teorías y modelos

Existen diferentes teorías que explican la formación de las condritas en el sistema solar. En los últimos años, los estudios se han concentrado en las teorías que parten de un sistema solar primitivo de origen nebular, donde las partículas nebulares presentes (inclusiones refractarias, granos metálicos y cóndrulos) se formaron cuando los precursores de dichas partículas (granos de polvo de tamaños nanométricos) experimentaron procesos de calentamiento y enfriamiento en periodos de tiempo muy corto (del orden de minutos a horas) (Hewins, 1997; Scott, 2007; Adams, 2010; Johansen et al., 2015).

Adicionalmente, se han propuesto ciertos mecanismos responsables de separar y clasificar granulométricamente a las partículas (*nebular sorting*), como un tratamiento previo al proceso de acreción-calentamiento-fragmentación de la materia rocosa en la nebulosa solar primitiva.

Algunos mecanismos propuestos son: la selección por la masa de las partículas (Teitler et al., 2010; Cuzzi et al., 2001), la concentración por efectos turbulentos (Dullemond y Dominik, 2005; Cuzzi y Weidenschilling, 2006; Johansen et al., 2007; Cuzzi y Hartlep, 2015), la inestabilidad gravitacional (Youdin, 2005; Durisen et al., 2007), la inestabilidad térmica (D'Alessio et al., 2005), la inestabilidad magnética (Simon et al., 2015) y el viento estelar X (Shu et al., 1996; Hu, 2010a,b), por citar algunos trabajos.

La relevancia que tienen estos mecanismos para nuestro trabajo es que alguno de ellos, o una combinación de ellos, pudieron haber sido los responsables de la distribución de la materia, tal como se observa actualmente en los cuerpos formados por partículas condriticas.

### 5.6. Modelo de co-acreción de cóndrulos

Uno de los mecanismos de separación nebular que ha tomado relevancia en los últimos años es el mecanismo relacionado con efectos turbulentos, debido a que algunos estudios recientes sugieren que la turbulencia del gas en la nebulosa protoplanetaria fue la responsable de concentrar a las partículas creando minicuerpos de varios tamaños y de diferente forma, y desencadenar la formación de planetesimales rápidamente (Johansen et al., 2007; Blum y Wurm, 2008; Chiang y Youdin, 2010).

En el estudio de Ormel et al. (2008), se modeló la acreción de cóndrulos y granos de polvo en presencia de un disco protoplanetario con un cierto nivel de turbulencia  $\alpha$  (modelo de co-acreción). Para ello, los autores desarrollaron un modelo colisional donde se estudiaron los procesos simultáneos de acreción y fragmentación de los cóndrulos con los granos de polvo nebulares en interacción con el gas de la nebulosa protoplanetaria. Posteriormente, en un estudio estadístico se cuantificó el crecimiento de los cóndrulos bajo una amplia gama de condiciones nebulares, tales como diferentes valores para los parámetros del gas y el polvo. Los autores fundamentaron su modelo de co-acreción en las propiedades físicas y químicas de los cóndrulos estudiados en el laboratorio, en observaciones astronómicas, así como, en modelos teóricos previos.

Para construir el modelo de co-acreción, los autores se basaron en el modelo de la nebulosa solar de masa mínima (*MSN* por sus siglas en inglés). En el cual se estima la masa del gas nebular como  $2.5 \times 10^{-2} M_{\odot}$  a 10 UA, mientras que a los cóndrulos y a los granos de polvo se les asignó un diámetro promedio inicial de 300 y de 1  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Como resultado final de la simulación de co-acreción de partículas, los autores construyeron una “condrita” artificial, similar en su forma a una muestra meteorítica.

Utilizando la condrita artificial de Ormel et al. (2008), nosotros analizamos la figura resultante con las mismas técnicas digitales que las empleadas en el análisis de las muestras meteoríticas estudiadas en nuestro trabajo. Para ello, se procesó digitalmente la “condrita” y posteriormente se generó la distribución de tamaños y se obtuvieron los parámetros estadísticos relacionados con la distribución. Los resultados obtenidos se reportan en la Figura 5.3 y la Tabla 5.2.

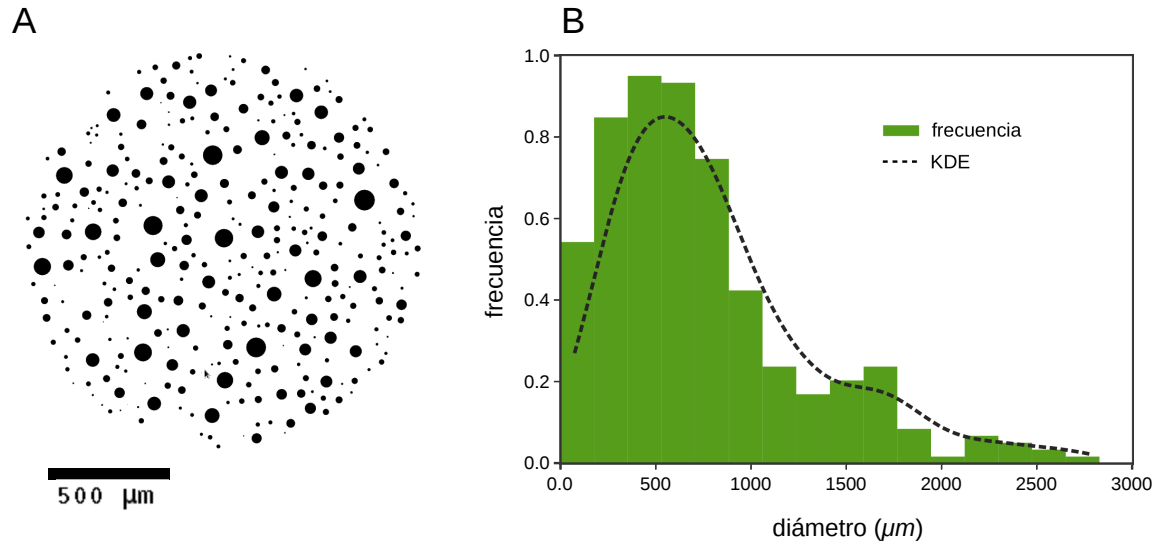


Figura 5.3. Resultados obtenidos al procesar digitalmente la condrita artificial construida con el modelo de co-acreción. (A) El proceso de digitalización de la muestra artificial fue el mismo proceso que el empleado con las muestras meteoríticas. (B) Distribución de tamaños de los cóndrulos del modelo de co-acreción construido con la regla de Freedman-Diaconis, adicionalmente se muestra el estimador *Kernel* de la densidad KDE (línea punteada). Información adaptada de Ormel et al. (2008).

Como el modelo de co-acreción de cóndrulos desarrollado por Ormel y colaboradores permite estimar las condiciones iniciales, la dinámica y la evolución de la nebulosa solar primitiva, es posible, junto con nuestros resultados, inferir las condiciones que dieron origen a la distribución de tamaños de los cóndrulos observada actualmente en las meteoritas. Destacando que el diámetro promedio (%Area) es muy similar para las meteoritas NWA, Allende y el modelo de co-acreción (Tabla 5.3).

## 5.6. Modelo de co-acreción de cóndrulos

---

Tabla 5.2. Resultados estadísticos obtenidos del análisis del modelo de co-acreción<sup>a</sup> de cóndrulos, en comparación con los resultados de las muestras meteoríticas NWA (promedio) y Allende.

Parámetro	Resultados		
	NWA	Allende	modelo <sup>a</sup>
Número de cóndrulos (n)	893	447	315
Abundancia de Cóndrulos (área %)	38	28	10 <sup>d</sup>
Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )	238.96	237.62	495.54
Mediana ( $\mu\text{m}$ )	113.95	135.72	417.87
Error estándar ( $\mu\text{m}$ )	14.75	12.76	17.75
Asimetría	–	2.79	1.30
Diámetro promedio [área <sup>b</sup> ] ( $\mu\text{m}$ )	901.11	927.01	909.83
KDE <sup>c</sup> Pico ( $\mu\text{m}$ )	112.42	89.80	332.31

<sup>a</sup>Modelo desarrollado por Ormel et al., 2008.

<sup>b</sup>Obtenido a partir de las distribuciones de las figuras 4.1 y 5.3 por área ponderada.

<sup>c</sup>KDE: Estimador kernel de la densidad (Kernel density estimation).

<sup>d</sup>Es una estimación aproximada debido a que la posición de los cóndrulos no está contemplada en el modelo y fueron colocados aleatoriamente.

# Conclusiones

---

Con base en los resultados obtenidos en el análisis de las cinco muestras de meteoritas del norte de África (NWA2086, NWA7043, NWA4502, NWA6567 y NWA7678) y una muestra de la meteorita Allende, concluimos que:

1. Se encontró similitud en los parámetros estadísticos y la forma de la distribución para las meteoritas del norte de África (NWA) y la meteorita Allende, lo que confirma que pertenecen al mismo grupo (CV) y al mismo tipo petrológico (3).
2. La distribución de tamaños de los cóndrulos de la meteorita Allende encontrada en este trabajo, presenta características similares a reportadas en otros estudios (Paque y Cuzzi, 1997; Christoffersen et al., 2012; Fisher et al., 2014; Ebel et al, 2015) para la misma meteorita.
3. Se encontró que el tamaño promedio obtenido para las muestras meteoríticas estudiadas por nosotros ( $905 \mu\text{m}$ ) está en el mismo orden de magnitud que el reportado por los otros autores, y coincide con el diámetro promedio ponderado de  $900 \mu\text{m}$  recomendado por Friedrich et al. (2014) para las condritas del grupo CV.
4. Se encontró que el ajuste de la distribución de tamaños empírica de las muestras meteoríticas con las funciones teóricas lognormal y Weibull es: a) *pobre* para las muestras NWA2086 y NWA6567 y b) *muy pobre* para las meteoritas NWA7043, NWA4502 y NWA7678. Este resultado coincide con lo reportado por otros autores (Teitler et al., 2010; Ebel et al, 2015) y con la recomendación de Friedrich et al. (2014).
5. A partir del análisis digital de la condrita artificial obtenida con el modelo de co-creción de cóndrulos y polvo de Ormel et al. (2008), se encontró que los parámetros estadísticos (en los que se destaca el diámetro promedio de los cóndrulos) y la forma de la distribución de tamaños son similares con los resultados obtenidos por nosotros para las muestras meteoríticas NWA y Allende. Este resultado indica que las condiciones

## **5.6. Modelo de co-acreción de cóndrulos**

---

iniciales y las características físicas consideradas en el modelo de co-acreción, posiblemente fueron algunas de las características y condiciones que tenía el disco protoplanetario cuando se formaron y agregaron los planetesimales. De esta misma manera, dichas condiciones y características pudieron ser las que dieron origen a la distribución de tamaños de cóndrulos observada en las condritas carbonosas.

---

## Apéndice A

# Pruebas de bondad de ajuste

---

### A.1. Estadísticas

#### Kolmogórov-Smirnov

La estadística de Kolmogórov-Smirnov cuantifica la distancia entre la función de distribución empírica acumulada  $F_n(x)$  de una muestra de datos y la función de distribución acumulada de una función de distribución teórica de referencia  $F(x)$ . La distribución empírica  $F_n(x)$  para una muestra aleatoria de  $n$  observaciones  $(x_1 \dots x_n)$  es descrita por la siguiente ecuación:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{[-\infty, x]}(X_i) \quad (\text{A.1})$$

donde  $I_{[-\infty, x]}$  es la función característica, la cual es igual a 1 si  $X_i \leq x$  e igual a 0 en los demás casos.

La estadística de Kolmogórov-Smirnov para una determinada función de distribución teórica de referencia  $F(x)$  se define como:

$$D_n = \sup_x | F_n(x) - F(x) | \quad (\text{A.2})$$

donde  $\sup_x$  es el supremo del conjunto de distancias.

#### Anderson-Darling

En su forma básica, la prueba de Anderson-Darling permite suponer que no existen parámetros a estimar en la distribución que se está probando, de tal forma que la prueba estadística y su conjunto de valores críticos  $\alpha$  siguen una distribución libre.



## A.2. Prueba de hipótesis

---

La estadística de Anderson-Darling para un conjunto ordenado de observaciones ( $x_1 < \dots < x_n$ ) que provienen de una función de distribución acumulada  $F$  se define como:

$$A^2 = -n - S \quad (\text{A.3})$$

donde:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n+1-i}))] \quad (\text{A.4})$$

### Chi-cuadrada de Pearson

Esta prueba se aplica a un conjunto de observaciones agrupadas en intervalos, tales como los histogramas, de tal forma que depende del método de elección del número o el ancho de los intervalos (sección 4.1).

La estadística de Chi-cuadrada de Pearson se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (\text{A.5})$$

donde  $O_i$  es la frecuencia empírica observada para el intervalo  $i$ -ésimo y  $E_i$  es la frecuencia esperada para el mismo intervalo y definida como:

$$E_i = F(x_u) - F(x_l) \quad (\text{A.6})$$

donde  $F$  es la función de distribución empírica acumulada, y  $x_u$ ,  $x_l$  son los límites inferior ( $u$ ) y superior ( $l$ ) del intervalo  $i$ -ésimo.

## A.2. Prueba de hipótesis

Para las tres pruebas, la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) a contrastar son:

$H_0$ : los datos se ajustan a la distribución teórica específica

$H_a$ : los datos no se ajustan a la distribución teórica específica

La hipótesis a contrastar es rechazada cuando el valor estadístico de la distribución ( $D$ ,  $A^2$  o  $\chi^2$ ) es mayor que el valor crítico obtenido dado un nivel de significancia  $\alpha$  fijo.

Los valores distintos de  $\alpha$  (0.2, 0.1, 0.5, 0.02, 0.01) son generalmente utilizados para evaluar la hipótesis nula  $H_0$  a varios niveles de significancia. Los números calculados para

nuestros datos se muestran en las tablas A.1 y A.2.

Convencionalmente los valores de significancia más utilizados corresponden al 1 (0.01) y 5 % (0.05) (Lehmann y Romano, 2008).

### A.3. Valor-p

En el caso de las pruebas de Kolmogórov-Smirnov y Chi-cuadrada de Pearson se rechaza la hipótesis nula si el valor-p asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significancia establecido. Es decir, el valor-p muestra la probabilidad de haber obtenido el resultado esperado si se supone que la hipótesis nula es correcta (Schervish, 1996).

### A.4. Resultados

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste para las funciones de distribución lognormal y Weibull mostradas en las Figuras 4.3 y 4.4, pags. 44 y 45 se reportan en las siguientes tablas.

## A.4. Resultados

Tabla A.1. Pruebas de bondad de ajuste para la función de distribución lognormal bajo diferentes niveles de significancia.

Función de distribución Lognormal	Muestra meteorítica					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
<b>Kolmogórov-Smirnov<sup>a</sup></b>						
Estadística (D)	0.05484	0.07001	0.05589	0.03511	0.05721	0.0855
Valor-p	0.10871	$9.90 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	0.26136	0.00873	0.00272
Rango	18	19	17	7	17	21
Valor crítico						
0.2	0.04908	0.03864	0.02705	0.03759	0.03738	0.05075
0.1	0.05594	0.04405	0.03084	0.04284	0.04261	0.05785
0.05	0.06211	0.04891	0.03424	0.04757	0.04731	0.06423
0.02	0.06943	0.05467	0.03827	0.05317	0.05288	0.0718
0.01	0.07451	0.05867	0.04107	0.05706	0.05675	0.07705
<b>Anderson-Darling<sup>b</sup></b>						
Estadística ( $A^2$ )	2.4292	7.0829	8.6286	1.5398	5.3327	4.0659
Rango	18	17	16	5	15	19
Valor crítico						
0.2	1.3749	1.3749	1.3749	1.3749	1.3749	1.3749
0.1	1.9286	1.9286	1.9286	1.9286	1.9286	1.9286
0.05	2.5018	2.5018	2.5018	2.5018	2.5018	2.5018
0.02	3.2892	3.2892	3.2892	3.2892	3.2892	3.2892
0.01	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074
<b>Chi-cuadrada<sup>c</sup></b>						
Grados de libertad	8	9	10	9	9	8
Estadística ( $\chi^2$ )	19.038	54.192	82.384	13.419	59.009	27.064
Valor-p	0.01466	$1.74 \times 10^{-8}$	$1.71 \times 10^{-13}$	0.14453	$2.08 \times 10^{-9}$	$6.89 \times 10^{-4}$
Rango	18	17	17	9	16	18
Valor crítico						
0.2	11.03	12.242	13.442	12.242	12.242	11.03
0.1	13.362	14.684	15.987	14.684	14.684	13.362
0.05	15.507	16.919	18.307	16.919	16.919	15.507
0.02	18.168	19.679	21.161	19.679	19.679	18.168
0.01	20.09	21.666	23.209	21.666	21.666	20.090

<sup>a</sup> Basado en Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948.

<sup>b</sup> Basado en Anderson y Darling, 1952.

<sup>c</sup> Basado en Pearson, 1900; Greenwood y Nikulin, 1996.

Tabla A.2. Pruebas de bondad de ajuste para la función de distribución Weibull bajo diferentes niveles de significancia.

Función de distribución Weibull	Muestra meteorítica					
	NWA2086	NWA7043	NWA4502	NWA6567	NWA7678	Allende
<b>Kolmogórov-Smirnov<sup>a</sup></b>						
Estadística (D)	0.1207	0.13369	0.12348	0.09891	0.12021	0.15181
Valor-p	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.78 \times 10^{-12}$	0	$2.14 \times 10^{-7}$	$7.76 \times 10^{-11}$	$1.85 \times 10^{-9}$
Rango	25	29	29	28	27	28
Valor crítico						
0.2	0.04908	0.03864	0.02705	0.03759	0.03738	0.05075
0.1	0.05594	0.04405	0.03084	0.04284	0.04261	0.05785
0.05	0.06211	0.04891	0.03424	0.04757	0.04731	0.06423
0.02	0.06943	0.05467	0.03827	0.05317	0.05288	0.07180
0.01	0.07451	0.05867	0.04107	0.05706	0.05675	0.07705
<b>Anderson-Darling<sup>b</sup></b>						
Estadística (A <sup>2</sup> )	18.706	32.725	53.751	16.519	30.913	18.734
Rango	25	28	28	31	27	27
Valor crítico						
0.2	1.3749	1.3749	1.3749	1.3749	1.3749	1.3749
0.1	1.9286	1.9286	1.9286	1.9286	1.9286	1.9286
0.05	2.5018	2.5018	2.5018	2.5018	2.5018	2.5018
0.02	3.2892	3.2892	3.2892	3.2892	3.2892	3.2892
0.01	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074	3.9074
<b>Chi-cuadrada<sup>c</sup></b>						
Grados de libertad	8	9	10	9	9	8
Estadística ( $\chi^2$ )	72.675	178.91	323.40	90.14	185.99	93.985
Valor-p	$1.44 \times 10^{-12}$	0	0	$1.56 \times 10^{-15}$	0	$1.11 \times 10^{-16}$
Rango	25	22	24	23	24	24
Valor crítico						
0.2	11.03	12.242	13.442	12.242	12.242	11.030
0.1	13.362	14.684	15.987	14.684	14.684	13.362
0.05	15.507	16.919	18.307	16.919	16.919	15.507
0.02	18.168	19.679	21.161	19.679	19.679	18.168
0.01	20.09	21.666	23.209	21.666	21.666	20.090

<sup>a</sup> Basado en Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948.

<sup>b</sup> Basado en Anderson y Darling, 1952.

<sup>c</sup> Basado en Pearson, 1900; Greenwood y Nikulin, 1996.



# Bibliografía

---

- Adams, F. C. 2010. The Birth Environment of the Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 48, 47-85. v, 6, 16, 55
- Alexander, C. M. O., Grossman, J. N., Ebel, D. S., Ciesla, F. J. 2008. The Formation Conditions of Chondrules and Chondrites. *Science* 320, 1617. v, 6
- Allen Terrence. 1990 Particle size measurement: Powder technology series. Chapman and Hall, ISBN 041235070X. 32
- Allen, T. 1997. Particle size measurement: powder sampling and particle size measurement, Rosin Rammler, Benet-Sperling Formula, fifth ed. Chapman and Hall. London, ISBN: 0-412-72950-4. 54
- Amelin, Y., Saphir, M. S., Cooke, I., Stirling, C. H., Kaltenbach, A. 2013. U-Th-Pb Systematics of CAIs from CV Chondrite Northwest Africa 4502. *Lunar and Planetary Science Conference* 44, 2690. 21, 48
- Anderson, T. W. and Darling, D. A. 1952. Asymptotic theory of certain goodness-of-fit criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics* 23: 193–212. 43, 46, 64, 65
- Armitage, P. J. 2011. Dynamics of Protoplanetary Disks. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 49, 195-236. 4
- Behroozi, P., Peebles, M. S. 2015. On the history and future of cosmic planet formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454, 1811-1817. 5
- Birgé, L. and Rozenholc, Y. 2006. How many bins should be put in a regular histogram. *ESAIM: Probability and Statistics* 10: 24–45. 38
- Bland, P. A., Smith, T. B., Jull, A. J. T., Berry, F. J., Bevan, A. W. R., Cloudt, S., Pillinger, C. T. 1996. The flux of meteorites to the Earth over the last 50,000 years. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 283, 551. 9
- Blum, J., Wurm, G. 2008. The Growth Mechanisms of Macroscopic Bodies in Protoplanetary Disks. *Annual Review of As-*

- tronomy and Astrophysics 46, 21-56. 5, 56
- Bradski, G. 2000. The OpenCV library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 25(11):120-126. 24
- Cassan, A., y 41 colegas. 2012. One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations. Nature 481, 167-169. 3, 5
- Chiang, E., Youdin, A. N. 2010. Forming Planetesimals in Solar and Extrasolar Nebulae. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 38, 493-522. v, 5, 47, 56
- Chityala, R. y Pudipeddi, S. 2014. Image Processing and Acquisition using Python. CRC Press, Chapman & Hall/CRC Mathematical and Computational Imaging Sciences Series. ISBN 14-665-83754. 24
- Christoffersen, P. A., Simon, J. I., Ross, D. K., Friedrich, J. M., Cuzzi, J. N. 2012. Particle Size Distributions Obtained Through Unfolding 2D Sections: Towards Accurate Distributions of Nebular Solids in the Allende Meteorite. Lunar and Planetary Science Conference 43, 2058. 29, 34, 49, 50, 59
- Ciesla, F. J., Cuzzi, J. N. 2007. Radial Transport of High Temperature Materials in the Solar Nebula: Applications to Stardust. Lunar and Planetary Science Conference 38, 1386.
- Collins, T.J., 2007. ImageJ for microscopy. BioTechniques, 43: 25–30. 25
- Connolly, H. C., Jr., Desch, S. J. 2004. On the origin of the "kleine Kugelchen" called Chondrules. Chemie der Erde / Geochemistry 64, 95-125. v, 6
- Connolly, H. C., Jr. 2005. Refractory Inclusions and Chondrules: Insights into a Protoplanetary Disk and Planet Formation. Chondrites and the Protoplanetary Disk 341, 215. 17, 29
- Cuzzi, J. N., Hartlep, T. 2015. Turbulent Concentration of Millimeter-Size Particles in the Protoplanetary Nebula: Scale-Dependent Cascades. Lunar and Planetary Science Conference 46, 1691. 55
- Cuzzi, J. N., Hogan, R. C., Paque, J. M., Dobrovolskis, A. R. 2001. Size-selective Concentration of Chondrules and Other Small Particles in Protoplanetary Nebula Turbulence. The Astrophysical Journal 546, 496-508. 47, 52, 55
- Cuzzi, J. N., Weidenschilling, S. J. 2006. Particle-Gas Dynamics and Primary Accretion. Meteorites and the Early Solar System II 353-381. 55
- D'Alessio, P., Calvet, N., Woolum, D. S. 2005. Thermal Structure of Protoplanetary Disks. Chondrites and the Protoplanetary Disk 341, 353. 55
- Delsanti, A., Jewitt, D. 2006. The Solar System Beyond The Planets. In: Solar System

- Update, pag. 267, Springer-Verlag, ISBN 3540260560. 1
- Dodd, R. T. 1976. Accretion of the ordinary chondrites. *Earth and Planetary Science Letters* 30, 281-291. 40, 42, 48, 52, 54
- Dullemond, C. P., Dominik, C. 2005. Dust coagulation in protoplanetary disks: A rapid depletion of small grains. *Astronomy and Astrophysics* 434, 971-986. 55
- Durisen, R. H., Boss, A. P., Mayer, L., Nelson, A. F., Quinn, T., Rice, W. K. M. 2007. Gravitational Instabilities in Gaseous Protoplanetary Disks and Implications for Giant Planet Formation. *Protostars and Planets V*, 607-622. 55
- Ebel, D. S., Brunner, C., Konrad, K., Leftwich, K., Erb, I., Lu, M., Rodriguez, H., Crapster-Pregont E. J., Friedrich, J. M., Weisberg, M. K. 2015. Abundance, major element composition and size of components and matrix in CV, CO and Acfer 094 chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 172, 322-356. VII, 49, 50, 52, 55, 59
- Ebel, D. S. 2006. Condensation of Rocky Material in Astrophysical Environments. *Meteorites and the Early Solar System II* 253-277. 47
- Eisenhour, D. D. 1996. Determining chondrule size distributions from thin-section measurements. *Meteoritics and Planetary Science* 31, 243-248. 34, 35, 40, 42, 52
- Feng, F., Bailer-Jones, C. A. L. 2015. Finding the imprints of stellar encounters in long-period comets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454, 3267-3276. 2
- Ferreira, T. and Rasband, W.S. 2012. ImageJ User Guide IJ 1.46. [imagej.nih.gov](http://imagej.nih.gov), 2010-2012. 28
- Fisher, K. R., Tait, A. W., Simon, J. I., Cuzzi, J. N. 2014. Contrasting Size Distributions of Chondrules and Inclusions in Allende CV3. *Lunar and Planetary Science Conference* 45, 2711. 29, 40, 49, 50, 59
- Freedman, D. and Diaconis, P. 1981a. On the maximum deviation between the histogram and the underlying density. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie*, Vol. 58, pp. 139-167. 37, 40
- Freedman, D. and Diaconis, P. 1981b. On the histogram as a density estimator: L2 theory. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie*, Vol. 57, pp. 453-476. 37, 40
- Friedrich, J. M., Weisberg, M. K., Ebel, D. S., Biltz, A. E., Corbett, B. M., Iotzov, I. V., Khan, W. S., Wolman, M. D. 2014. Chondrule size and related physical properties: a compilation and evaluation of current data across all meteorite groups. *Chemie der Erde-Geochemistry*, in press:arXiv:1408.6581. VII, VII, 16, 38, 47, 48, 49, 52, 55, 59



- Greenwood, P.E. and Nikulin, M.S. 1996. A guide to chi-squared testing. New York: Wiley. ISBN 0-471-55779-X. 43, 46, 64, 65
- Guéguen, Y. and Palciauskas, V. 1994. Introduction to the Physics of Rocks. Princeton University Press, ISBN 0691034524. 33
- Heilbronner, R., Barrett, S. 2014. Image Analysis in Earth Sciences: Microstructures and Textures of Earth Materials. Springer Science & Business Media, ISBN 364210343X. 31, 32, 34, 35, 38
- Hewins, R. H. 1997. Chondrules. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 25, 61. 6, 15, 16, 22, 55
- Higgins, M.D. 2006. Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 207. 34
- Hu, R. 2010. Transport of the First Rocks of the Solar System by X-winds. The Astrophysical Journal 725, 1421-1428. 55
- Hu, R. 2010. X-wind Transport Of Chondrules And CAIs Of The Solar System. Bulletin of the American Astronomical Society 42, 957. 55
- Hughes, D. W. 1978. A disaggregation and thin section analysis of the size and mass distribution of the chondrules in the Bjurbole and Chainpur meteorites. Earth and Planetary Science Letters 38, 391-400. 34, 40, 42
- Hughes, D. W. 1978. Chondrule mass distribution and the Rosin and Weibull statistical functions. Earth and Planetary Science Letters 39, 371-376. 40, 42, 48
- Hughes, D. W. 1994. Comets and asteroids. Contemporary Physics 35, 75. 9
- Hutchison, R. 2004. Meteorites. Meteorites, by Robert Hutchison, pp. 520. Cambridge, UK: Cambridge University Press, October 2004. ISBN 0521470102. 10, 14, 21, 33
- Izidoro, A., Raymond, S. N., Morbidelli, A., Winter, O. C. 2015. Terrestrial planet formation constrained by Mars and the structure of the asteroid belt. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 453, 3619-3634. 6
- Jacquet, E. 2014. The quasi-universality of chondrule size as a constraint for chondrule formation models. Icarus 232, 176-186. 7, 48, 52
- Jerram, D. A. and Cheadle, Michael J. and Hunter, Robert H. and Elliott, Michael T. 1996. The spatial distribution of grains and crystals in rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology, Springer-Verlag, Vol. 125 num. 1, pp. 60-74. 33
- Jewitt, D. C., Luu, J. 2004. Crystalline water ice on the Kuiper belt object (50000) Quaoar. Nature 432, 731-733. 3

- Johansen, A., Mac Low, M.-M., Lacerda, P., Bizzarro, M. 2015. Growth of Asteroids by Chondrule Accretion. IAU General Assembly 22, 29132. 55
- Johansen, A., Oishi, J. S., Mac Low, M.-M., Klahr, H., Henning, T., Youdin, A. 2007. Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. *Nature* 448, 1022-1025. 55, 56
- Kalas, P. 1998. Links Between Dust Disks and Exoplanets. *Earth Moon and Planets* 81, 27-34. 4
- Kereszturi, A., Blumberger, Z., Józsa, S., May, Z., Müller, A., Szabó, M., Tóth, M. 2014. Alteration processes in the CV chondrite parent body based on analysis of NWA 2086 meteorite. *Meteoritics and Planetary Science* 49, 1350-1364. 21, 48
- Kereszturi, A., Gyollai, I., Szabó, M. 2015. Case study of chondrule alteration with IR spectroscopy in NWA 2086 CV3 meteorite. *Planetary and Space Science* 106, 122-131. 21, 48
- King, E. A., Butler, J. C. 1977. Rosin's law and the lunar regolith. *Moon* 17, 177. 54
- King, T. V. V., King, E. A. 1978. Grain size and petrography of C2 and C3 carbonaceous chondrites. *Meteoritics* 13, 47-72. 19, 40, 42
- King, T. V. V., King, E. A. 1979. Size frequency distributions of fluid drop chondrules in ordinary chondrites. *Meteoritics* 14, 91-96. 40, 42, 52, 54
- Kolmogorov, A. 1933. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *G. Ist. Ital. Attuari* 4: 83-91. 43, 46, 64, 65
- Krikov E. L. 1970. *Meteoritical Bulletin*, No. 36-48. *Meteoritics* 5, 85-109. 21, 22, 48
- Krot, A. N., and 15 colleagues 2009. Origin and chronology of chondritic components: A review. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4963-4997. 6, 14, 18, 29, 33
- Krot, A. N., and 15 colleagues. 2009. Origin and chronology of chondritic components: A review. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4963-4997. 6, 14, 18, 29, 33
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D., Goodrich, C. A., Weisberg, M. K. 2014. Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. *Meteorites and Cosmochemical Processes*, Volume 1 of *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier, 2014. Edited by Andrew M. Davis, p.1-63. 12, 21
- Krot, A. N., Rubin, A. E., Keil, K., Wasso, J. T. 1997. Microchondrules in ordinary chondrites: Implications for chondrule formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 463-473. 16
- Krumbein, W. C. y Aberdeen, E. 1937. The Sediments of Barataria Bay. *Journal of Sedimentary Petrology*, 7. 49

- Kuebler, K. E., McSween, H. Y., Carlson, W. D., Hirsch, D. 1999. Sizes and Masses of Chondrules and Metal-Troilite Grains in Ordinary Chondrites: Possible Implications for Nebular Sorting. *Icarus* 141, 96-106. 34, 35, 40, 42
- Lauretta, D. S., McSween, H. Y. 2006. *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press, 2006. ISBN 0816525625. 6, 14, 18, 21
- Lehmann, E. L. and Romano, J. P. 2008. *Testing Statistical Hypotheses* 3E ed. New York: Springer. ISBN 0-387-988645. 43, 63
- Lehmann, E. L. 1993. The Fisher, Neyman-Pearson Theories of Testing Hypotheses: One Theory or Two?. *Journal of the American Statistical Association* 88 (424): 1242-1249. 43
- MacPherson, G. J. 2014. Calcium-Aluminum-Rich Inclusions in Chondritic Meteorites. *Microphysics of Cosmic Plasmas* 139-179. 18
- Maravilla, D., Leal-Herrera, J.L. 2015. A microscopy study of the NWA2086 and NWA7043 meteorites. *European Planetary Science Congress, Vol. 10, EPSC2015-785*. 23, 48
- Markowski, A., Quitté, G., Kleine, T., Halliday, A. N., Bizzarro, M., Irving, A. J. 2007. Hafnium tungsten chronometry of angrites and the earliest evolution of planetary objects. *Earth and Planetary Science Letters* 262, 214-229. 13
- Martin, P. M., Mills, A. A. 1976. Size and shape of chondrules in the Bjurböle and Chainpur meteorites. *Earth and Planetary Science Letters* 33, 239-248. 40, 42, 52
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J. 2009. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. Cambridge University Press, ISBN 113947832X. 33
- May, C., Russell, S. S., Grady, M. M. 1999. Analysis of Chondrule and CAI Size and Abundance in CO3 and CV3 Chondrites: A Preliminary Study. *Lunar and Planetary Science Conference* 30, 1688. 52, 53
- McCain, K. A., Simon, J. I., Cuzzi, J. N. 2015. Early Size Distributions of Chondrule Subgroups Overprinted by the Final Accumulation Process of Particle Components in Allende. *Lunar and Planetary Science Conference* 46, 2896.
- Merkus, H.G. 2009. *Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality*, Volume 17 of Particle Technology Series. Springer Science & Business Media, ISBN 1402090161. 31
- Morishima, R. 2015. Formation of giant planets cores by classical planetesimal accretion. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts* 47, 309.06. 6

- Mouton, P.R. 2011. *Unbiased Stereology: A Concise Guide*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD. ISBN 9780801899843. 34
- Nelson, V. E., Rubin, A. E. 2002. Size-frequency distributions of chondrules and chondrule fragments in LL3 chondrites: Implications for parent-body fragmentation of chondrules. *Meteoritics and Planetary Science* 37, 1361-1376. 40, 42, 52, 54
- Norton, O. R., Chitwood, L. A. 2008. *Field Guide to Meteors and Meteorites*. Field Guide to Meteors and Meteorites: Patrick Moore's Practical Astronomy Series. Springer-Verlag London, ISBN 9781848001565. 15
- Okamoto, Y. K., Kataza, H., Honda, M., Yamashita, T., Onaka, T., Watanabe, J.-i., Miyata, T., Sako, S., Fujiyoshi, T., Sakon, I. 2004. An early extrasolar planetary system revealed by planetesimal belts in  $\beta$  Pictoris. *Nature* 431, 660-663. 4
- Ormel, C. W., Cuzzi, J. N., Tielens, A. G. G. M. 2008. Co-Accretion of Chondrules and Dust in the Solar Nebula. *The Astrophysical Journal* 679, 1588-1610. VI, VII, 52, 56, 57, 58, 59
- Paque, J. M., Cuzzi, J. N. 1997. Physical characteristics of chondrules and rims, and aerodynamic sorting in the solar nebula. *Lunar and Planetary Science Conference* 28, 1071. 49, 50, 52, 53, 59
- Pearson, K. 1900. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine Series 5* 50 (302): 157-175. 43, 46, 64, 65
- Preibisch, S., Saalfeld, S., Tomancak, P. 2009. Globally optimal stitching of tiled 3D microscopic image acquisitions. *Bioinformatics*, 25(11):1463-1465. 25
- Rosin, P., Rammler, E. 1933. The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of the Institute of Fuel* 7, 29-36. 54
- Rubin, A. E., Grossman, J. N. 2010. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science* 45, 114-122. 9
- Rubin, A. E., Scott, E. R. D., Keil, K. 1982. Microchondrule-bearing clast in the Piancaldoli LL3 meteorite -A new kind of type 3 chondrite and its relevance to the history of chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46, 1763-1776. 16
- Rubin, A. E. 1989. Size-frequency distributions of chondrules in CO3 chondrites. *Meteoritics* 24, 179-189.

- Russ, J. C. 2011. *The Image Processing Handbook (Sixth Edition)*. CRC Press, 2011. ISBN 9781439840450. 25, 32
- Russ, J. C., Dehoff, R. T. 2012. *Practical Stereology*. Springer Science Business Media, second ed., ISBN 1461512336. 34
- Russell, S. S., Zolensky, M., Righter, K., Folco, L., Jones, R., Connolly, H. C., Jr., Grady, M. M., Grossman, J. N. 2005. *The Meteoritical Bulletin*, No. 89, 2005 September. *Meteoritics and Planetary Science* 40, 201. 22, 48
- Ruzicka, A., Grossman, J., Bouvier, A., Herd, C. D. K., Agee, C. B. 2015. *The Meteoritical Bulletin*, No. 101. *Meteoritics and Planetary Science* 50, 1661-1661. 22, 48
- Ruzicka, A., Grossman, J., Bouvier, A., Herd, C. D. K., Agee, C. B. 2015. *The Meteoritical Bulletin*, No. 102. *Meteoritics and Planetary Science* 50, 1662-1662. 22, 48
- Ruzicka, A., Grossman, J. N., Garvie, L. 2014. *The Meteoritical Bulletin*, No. 100, 2014 June. *Meteoritics and Planetary Science* 49, 1-E101. 22, 48
- Saltykov, S.A. 1967. *Stereometric Metallography*. Moscow:Metallurgy. 34
- Sapah, M. S., Krot, A. N., Amelin, Y. 2013. *Mineralogy and Petrography of Refractory Inclusions in North West Africa 4502, Oxidized CV3 Chondrite*. *Lunar and Planetary Science Conference* 44, 1036. 21, 33, 48
- Schervish, M.J. 1996. P Values: What They Are and What They Are Not. *The American Statistician* 50 (3): 203–206. 63
- Schneider, C.A., Rasband, W.S. and Elceiri, K.W. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, pp. 671, 2012. doi: doi:10.1038/nmeth.2089. 25
- Schwartz, H.A. 1934. *Met. Alloys*, vol. 5, pp. 139-41. 34
- Scott, D. W. 1979. On optimal and data-based histograms. *Biometrika* 66 (3): 605–610. 37
- Scott, D. W. 2015. *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*. John Wiley & Sons, pp. 384, ISBN 1118575539. 37, 38, 43
- Scott, E. R. D., Krot, A. N. 2014. *Chondrites and Their Components. Meteorites and Cosmochemical Processes, Volume 1 of Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier, 2014. Edited by Andrew M. Davis, p.65-137. 6, 13, 15, 17, 18, 19, 21, 29, 33, 52
- Scott, E. R. D. 2007. *Chondrites and the Protoplanetary Disk*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35, 577-620. v, 6, 13, 16, 18, 21, 47, 55

- Sears, D. W. G. 2004. The origin of chondrules and chondrites. Cambridge planetary science series. Cambridge University Press, 2004. v, 6, 16, 21, 22, 29, 33, 47
- Seinfeld, J. H. 1975. Air pollution: physical and chemical fundamentals. McGraw-Hill, 523 pgs., ISBN 0070560420. 54
- Shu, F. H., Shang, H., Lee, T. 1996. Toward an Astrophysical Theory of Chondrites. *Science* 271, 1545-1552. 47, 52, 55
- Silverman, B. W. 1986. Density estimation for statistics and data analysis. Monographs on Statistics and Applied Probability, Chapman and Hall, London. 40
- Simon, J. B., Lesur, G., Kunz, M. W., Armitage, P. J. 2015. Magnetically driven accretion in protoplanetary discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454, 1117-1131. 55
- Smirnov, N. 1948. Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *Annals of Mathematical Statistics* 19: 279-281. 43, 46, 64, 65
- Sturges, H. A. 1926. The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*: 65-66. 37
- Syvitski, J. P. M. 2007. Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis. Cambridge University Press, ISBN 0521044618. 31, 32
- Tait, A. W., Fisher, K. R., Simon, J. I. 2014. Strain Measurements of Chondrules and Refractory Inclusions in Allende. *Lunar and Planetary Science Conference* 45, 1309. 29, 49
- Tegler, S. 2007. Physical Properties of Kuiper Belt Objects. *APS Four Corners Section Meeting Abstracts* 3001. 1, 3
- Teitler, S. A., Paque, J. M., Cuzzi, J. N., Hogan, R. C. 2010. Statistical tests of chondrule sorting. *Meteoritics and Planetary Science* 45, 1124-1135. VII, 48, 52, 53, 55, 59
- Udden, J.A. 1894. Mechanical composition of clastic sediments. *Bull. Geol. Soc. Am.* 25, 655-744. 49
- Uesugi, M., Uesugi, K., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Hoshino, M., Tsuchiyama, A. 2013. Three-dimensional observation of carbonaceous chondrites by synchrotron radiation X-ray CT - Quantitative analysis and developments for the future sample return missions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 116, 17-32. 40
- van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Bouslogne, F., Warner, J. D., Yager, N., Gouillart, E. Yu, T. 2014. Scikit-image: image processing in python. *PeerJ* 2, e453. 24
- Vernon, R. H. 2004. A Practical Guide to Rock Microstructure. Cambridge University Press, ISBN 0521891337. 33

- Walton, W. H. 1948. Feret's Statistical Diameter as a Measure of Particle Size. *Nature*, vol. 162, London, Nature Publishing Group. 31, 32
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J., Krot, A. N. 2006. Systematics and Evaluation of Meteorite Classification. *Meteorites and the Early Solar System II* 19-52. 12
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geology* V. 30, 377-392. 49
- Weyrauch, M., Bischoff, A. 2012. Macrochondrules in chondrites/Formation by melting of mega-sized dust aggregates and/or by rapid collisions at high temperatures?. *Meteoritics and Planetary Science* 47, 2237-2250. 16
- Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature* 355, 145-147. 3
- Wolszczan, A. 2006. Doppler spectroscopy and astrometry – Theory and practice of planetary orbit measurements. *ASTRO 497: Astronomy of Extrasolar Planets*, lectures notes. Penn State University. 3
- Woolfson, M. 2014. *The Formation of the Solar System: Theories Old and New (Second Edition)*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014. ISBN 9781783265237. 3, 5, 14
- Youdin, A. N. 2005. Formation of Planetesimals by Dissipative Gravitational Instabilities. *Bulletin of the American Astronomical Society* 37, 166.01. 55
- Zinner, E. K. 2003. Presolar Grains. *Treatise on Geochemistry* 1, 17-39. 14, 18
- Zolensky, M., Bland, P., Brown, P., Halliday, I. 2006. Flux of Extraterrestrial Materials. *Meteorites and the Early Solar System II* 869-888. 9, 10