



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
FACULTAD DE CIENCIAS
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

El intemperismo en meteoritas: revisión y sistemática

T E S I S

que para optar por el grado de

Maestra en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Karina López García

Directora de tesis

Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz
Facultad de Ciencias, UNAM

Comité tutor

Dr. José Luis Ruvalcaba Sil
Instituto de Física, UNAM

Dra. Adela Margarita Reyes Salas
Instituto de Geología, UNAM

Comité sinodal

Dr. Fernando Ortega Gutiérrez
Instituto de Geología, UNAM

Dr. Eugenio Octavio Reyes Salas
Facultad de Química, UNAM

Dra. María del Sol Hernández Bernal
ENES - Unidad Morelia, UNAM

Dr. Jorge Antonio González Sánchez
Centro de Investigaciones en Corrosión, UAC

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, marzo, 2022



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

Agradecimientos académicos

A la Dra. Karina Elizabeth Cervantes de la Cruz, por la oportunidad de volver a trabajar y aprender juntas, por tu comprensión, tiempo y esfuerzo invertidos para realizar, adaptar y concluir este proyecto, por proporcionarme el apoyo y las herramientas necesarias en cada cambio que hubo y por brindarme oportunidades y opciones para mi desarrollo académico y laboral. Gracias por continuar confiando en mí y seguir guiándome en el camino de la ciencia.

Al Dr. Jorge Antonio González Sánchez, por la confianza, apoyo y calidez que me brindó al abrirme las puertas de su laboratorio y por la orientación, retroalimentación y todo el tiempo dedicado con lo cual pude complementar y concluir exitosamente este estudio. Le agradezco que me ayudara a recuperar la confianza y pasión por mi trabajo de investigación.

Al Dr. José Luis Ruvalcaba Sil y la Dra. Adela Margarita Reyes Salas, por formar parte de mi comité tutor y brindarme en cada evaluación semestral su apoyo, observaciones y opciones para que mi proyecto pudiera adaptarse y concluirse de manera satisfactoria.

A la Dra. María del Sol Hernández Bernal, al Dr. Fernando Ortega Gutiérrez y al Dr. Eugenio Octavio Reyes Salas, por formar parte de mi comité sinodal y por sus correcciones, recomendaciones y tiempo otorgado para mejorar y completar este trabajo.

Al Dr. Luis Román Dzib Pérez, del Centro de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche (UAC), por su ayuda con el desarrollo experimental y la ejecución de los análisis electroquímicos.

Al Dr. Ildefonso Esteban Pech Pech, del Centro de Investigaciones en Corrosión de la UAC, por su apoyo con el microscopio electrónico de barrido.

A la Ing. Yuriko Lizeth Martínez Galván, estudiante de posgrado del Centro de Investigaciones en Corrosión de la UAC, por su asistencia para llevar a cabo los análisis electroquímicos.

Agradecimientos institucionales

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me brindó a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad con el cual pude realizar mis estudios de posgrado a tiempo completo.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y a la Universidad Nacional Autónoma de México

(UNAM) por contar con los recursos humanos y las herramientas académicas necesarias que me permitieron continuar con mi formación científica.

Al Centro de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, por permitirme realizar una estancia y emplear sus instalaciones y equipos para preparar, caracterizar y analizar la muestra de este estudio.

Al Taller de Mineralogía y Petrología de la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde se llevó a cabo parte de la descripción e inspección del ejemplar de estudio.

Al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto de Física de la UNAM a través de los proyectos **CONACYT LN 314846** *Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural LANCIC - Consolidación* y **CONACYT LN 315853** *Fortalecimiento del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural LANCIC*, así como al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM a través del proyecto **IN117619**, los cuales permitieron realizar los análisis de este proyecto de investigación.

Agradecimientos personales

A mi hermana Sabrina, por acompañarme en los buenos y malos momentos siendo mi confidente y sostén, porque, aun a la distancia, encontrabas la manera ayudarme y animarme cuando estaba atravesando situaciones complicadas, por todo el cariño que me das y por siempre confiar y apostar por mí. Las adversidades fueron menos difíciles de superar sabiendo que contaba contigo en todo momento.

A mi madre Rebeca, por apoyar mis decisiones y ayudarme a hacerlas realidad, por siempre ofrecerme tu hombro y apapacharme en los momentos difíciles, por echarme la mano siempre que me veías con muchos pendientes, por animarme y consentirme de diferentes formas y, sobre todo, por transmitirme tu amor incondicional cada día.

A mi padre Víctor, por el cariño, apoyo y las facilidades que has continuado ofreciéndome para que pueda seguir con mi formación académica y profesional.

A mi tío Silvestre y mi tía Sara G., por todo el apoyo y cariño que me brindan y por siempre estar al pendiente de mí.

A Hugo Hernández, por reiterarme lo que es tener un hermano del alma con quien puedo compartir y contar siempre, por darme tu opinión y consejo sobre cualquier situación, por esas pláticas donde pude tanto desahogarme y sentir que no estaba sola, como olvidarme de las complicaciones por las que pasaba gracias a las risas, por todos los detalles y cariño que me das y por ayudarme a pasar la materia de SIG.

A Diego Espejo, por siempre hacerte un tiempo para escucharme, consolarme y aconsejarme sobre mis problemas y preocupaciones, por confiar en mí y mi trabajo cuando más lo necesité, por no dejarme caer y ser mi soporte cuando ya no podía más y por ser un excelente amigo. No habría logrado atravesar esta etapa sin tu ayuda y cariño.

A Paola Olvera, por tu apoyo y amor incondicional, por dejarme recurrir a ti cuando necesité consuelo, ánimo o consejos, por impulsarme y alentarme a nunca rendirme, por cada detalle que tuviste conmigo para ayudarme a salir adelante y por siempre estar al pendiente de mí. Gracias por acompañarme en cada aventura durante todos estos años.

A Maricruz Arizaga, por brindarme comprensión, paz y alivio cuando sentía que el mundo se me venía encima, por darme fuerza y un enfoque diferente para superar las situaciones difíciles, porque sé que puedo contar con tu apoyo y cariño en cualquier momento y por darle diversión y luz a mi vida.

A Guillermo Ortiz, por ayudarme y compartirme tu experiencia desde que me estaba preparando para el examen de admisión hasta que logré finalizar mi tesis. Agradezco haber tenido tu compañía en estos años.

A Luis Amayo, por ser mi compañero de penas y frustraciones, así como alguien en quien pude encontrar una gran amistad, comprensión y apoyo en esta odisea que fue la maestría. Lo veíamos lejano, pero lo logramos. ¡Ya somos maestros!

A Alejandro Arriaga, por ofrecerme tu apoyo y ánimo cuando me sentía derrotada, por aconsejarme e idear opciones para sacar adelante mi proyecto y por estar presente en los momentos cruciales de esta fase.

A Edwin López, por el cariño, apoyo, aliento y buenos momentos que compartimos a lo largo de estos años de maestría. Mi paso por el posgrado no habría sido lo mismo sin tu amistad.

A Fernanda Riva Palacio, por ayudarme y proporcionarme las herramientas necesarias para darle un sentido y significado a esta etapa y a mi vida.

A Miguel Montoya, por tus consejos y recomendaciones durante la elaboración y conclusión de mi tesis y por darme la confianza y oportunidad de impartir juntos una materia.

A Abel Gallardo, Isaac Muñoz, Marlen Arizaga y Aldo Campos, por alentarme, preocuparse por mí y mantenerse al tanto de mi avance.

Al Ing. Carlos Linares, por tomarme en cuenta e incluirme en actividades que me permitieron continuar con mi desarrollo en la microscopia electrónica de barrido a pesar de la pandemia.

A mis michis Pitch y Pumuki, por alivianar mis días y noches de trabajo al hacerme compañía.

私へ

最後まで諦めずに一生懸命取り組んだから、

自分を誇りに思っよ。


転んでもなお這い上がり歩き出す

ゴールはまだ見えないけれど

Buono! - ゴール 

いまの自分が思うような自分じゃなくても

扉はきつときつとあの夢に繋がっているから

NEWS - エンドレス・サマー 

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	
CAPÍTULO I: Intemperismo en meteoritas	1
1. Introducción	1
1.1. Intemperismo químico	1
1.2. Intemperismo mecánico	3
1.3. Meteoritas	4
1.3.1. Intemperismo en meteoritas	6
1.3.2. Oxidación en meteoritas	6
1.3.2.1. Corrosión en metales	7
1.3.2.2. Mecanismo de oxidación de Buchwald y Clarke	8
1.3.2.3. Degradación de sulfuros y silicatos	10
1.3.3. Depósitos de evaporitas en meteoritas	12
1.3.4. Alteración debida a actividad microbiana	12
1.3.5. Productos de intemperismo en meteoritas	13
1.3.5.1. Productos debidos a la alteración acuosa preterrestre	13
1.4. Zonas de acumulación de meteoritas	15
1.4.1. Antártida	15
1.4.2. Desiertos calientes	16
1.4.3. Diferencias entre la Antártida y los desiertos calientes	17
1.5. Estudio del intemperismo en meteoritas	20
1.5.1. Escalas e índices de intemperismo para meteoritas	21
CAPÍTULO II: Planteamiento del problema y objetivos	28
2. Planteamiento y justificación	28
2.1. Hipótesis y objetivos	29
CAPÍTULO III: Metodología	30
3. Metodología	30
3.1. Base de datos	30
3.2. Elaboración de mapas	30
3.3. Análisis electroquímicos	32
3.3.1. Preparación de la muestra	32
3.3.2. Caracterización metalográfica	34
3.3.3. Pruebas electroquímicas	34
3.3.4. Velocidad de corrosión	37
CAPÍTULO IV: Meteoritas reportadas en la República Mexicana	39
4. Meteorítica en México	39
4.1. Meteoritas mexicanas	39

CAPÍTULO V: Clima de México	50
5. Clima	50
5.1. Clasificación de Köppen	50
5.2. Clasificación de Köppen adaptada a México	53
5.3. Régimen de precipitación en México	59
CAPÍTULO VI: Distribución de las meteoritas halladas en la República Mexicana	61
6. Abundancia de los hallazgos en México	61
6.1. Distribución de masas	61
6.2. Distribución espacial	62
6.2.1. Distribución en los climas áridos	63
CAPÍTULO VII: Comportamiento electroquímico de una meteorita metálica	66
7. Microestructura	66
7.1. Polarización potenciodinámica	72
7.2. Cálculo de la velocidad de corrosión	75
CAPÍTULO VIII: Discusión	76
8. Discusión de resultados	76
8.1. Abundancia de los hallazgos mexicanos en el territorio mexicano	76
8.2. Masa de los hallazgos mexicanos y su distribución espacial	78
8.3. Distribución espacial de los hallazgos mexicanos en climas áridos	79
8.4. Comportamiento electroquímico	82
CAPÍTULO IX: Conclusiones	87
9. Conclusiones	87
Referencias	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
Figura 1.1	Serie de estabilidad de los minerales ante el intemperismo químico	2
Figura 1.2	Clasificación de meteoritas	5
Figura 1.3	Representación esquemática de los posibles caminos que sigue la oxidación de las aleaciones de Fe-Ni de las meteoritas	10
Figura 1.4	Distribución de los tipos de desiertos calientes	16
Figura 1.5	Histogramas de intensidad integrada (cm^{-1}) de la banda $3 \mu\text{m}$ para meteoritas de la Antártida y que no son de la Antártida	22
Figura 1.6	Espectro Mössbauer de ^{57}Fe de la meteorita Acfer 074 donde se muestran las bandas más prominentes de las fases minerales magnéticas	26
Figura 3.1	Fragmento de Catorce b donde se aprecia la fractura que la recorre.	33
Figura 3.2	Representación gráfica de la probeta usada en este estudio	33
Figura 3.3	Representación gráfica de los elementos que conforman la celda electroquímica empleada en este estudio	35
Figura 3.4	Representación gráfica de la superficie de la muestra donde se indican las dos zonas de análisis	36
Figura 3.5	Diagrama de potencial contra el logaritmo de la densidad de corriente donde se representa la extrapolación de Tafel en las curvas de polarización	37
Figura 4.1	Carta de los meteoritos de México o regiones de la República en que han caído fierros y piedras meteóricas elaborada por del Castillo et al. (1893)	40
Figura 4.2	Distribución de las meteoritas mexicanas reportadas (caídas y hallazgos) en la República Mexicana	42
Figura 5.1	Mapa de climas 1:1 000 000 de la República Mexicana de acuerdo con las modificaciones realizadas por García (2004) a la clasificación de Köppen	57
Figura 5.2	Mapa del tipo de climas presentes en la República Mexicana	58
Figura 5.3	Mapa de isoyetas de la precipitación media anual en la República Mexicana	60
Figura 6.1	Distribución de frecuencia de masas de los hallazgos mexicanos	62
Figura 6.2	Mapa de la distribución espacial de los hallazgos mexicanos en función de la masa y del tipo de meteorita	64
Figura 6.3	Mapa de la distribución de los hallazgos mexicanos en función del tipo de meteorita en los climas áridos	65

Figura 7.1	Fotomicrografías que muestran la microestructura de la superficie pulida de la meteorita Catorce b en condiciones de llegada	67
Figura 7.2	Fotomicrografías que muestran la microestructura de la superficie de la meteorita Catorce b después de haber sido atacada químicamente	68
Figura 7.3	Fotomicrografías que muestran la microestructura de la zona 1 de la meteorita Catorce b después de las pruebas electroquímicas	69
Figura 7.4	Fotomicrografías que muestran la microestructura de la zona 2 de la meteorita Catorce b después de las pruebas electroquímicas	70
Figura 7.5	Imágenes de electrones retrodispersados obtenidos con microscopio electrónico de barrido de la superficie de la meteorita Catorce b después de las pruebas electroquímicas	71
Figura 7.6	Curvas de la polarización en una solución de 1 wt. % de NaCl a temperatura ambiente (24° C) en la zona 1 de la meteorita Catorce b	73
Figura 7.7	Curvas de la polarización en una solución de 1 wt. % de NaCl a temperatura ambiente (24° C) en la zona 2 de la meteorita Catorce b	74
Figura 8.1	Mapa de la distribución espacial de los hallazgos mexicanos en función de la masa, el tipo de meteorita y el clima	80
Figura 8.2	Mapa de la distribución espacial del pH de los suelos de México.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
Tabla 1.1	Fases mineralógicas que se han reportado como productos de intemperismo en las meteoritas	14
Tabla 1.2	Principales productos de intemperismo reportados en las meteoritas de las zonas de acumulación	18
Tabla 1.3	Categorías de intemperismo para meteoritas de la Antártida	22
Tabla 1.4	Clasificaciones de intemperismo propuestas para condritas ordinarias	23
Tabla 1.5	Escala de intemperismo para condritas ordinarias	24
Tabla 1.6	Escala de intemperismo refinada para condritas ordinarias	25
Tabla 1.7	Índice de intemperismo para condritas CK y R	27
Tabla 4.1	Cantidad de meteoritas reportadas en México	41
Tabla 4.2	Base de datos de las meteoritas que se han encontrado en México	43
Tabla 5.1	Descripción y criterios de las divisiones y subdivisiones de la clasificación climática de Köppen	52
Tabla 5.2	Resumen de las modificaciones y adaptaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para climas húmedos, referentes a la temperatura, para México	56
Tabla 5.3	Resumen de las modificaciones y adaptaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para climas áridos, referentes a la temperatura, para México	56
Tabla 5.4	Resumen de las modificaciones y adaptaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, referentes a la precipitación, para México	59
Tabla 6.1	Comparación entre la abundancia de hallazgos mexicanos con la abundancia a nivel mundial de hallazgos y caídas	61
Tabla 6.2	Cantidad de hallazgos mexicanos en función del tipo de meteorita y clima del lugar donde fue encontrado el ejemplar	63
Tabla 7.1	Parámetros electroquímicos y velocidad de corrosión promedio de las dos zonas de análisis obtenidos a partir de la polarización potenciodinámica	75
Tabla 8.1	Comparación de la abundancia de hallazgos entre diferentes áreas de recolección densa de meteoritas y a nivel mundial	77

RESUMEN

Las meteoritas, desde que entran en la atmósfera e interactúan con los ambientes terrestres, pueden sufrir desintegración mecánica y estar sujetas a diversos procesos químicos que modifican sus propiedades originales. Las alteraciones que experimentan dependen de dos aspectos: por una parte, sus características intrínsecas (composición química, mineralogía, grado de porosidad, etc.) que influyen en su susceptibilidad al intemperismo; por otra, las condiciones ambientales del sitio de caída (disponibilidad de agua, temperatura, pH, etc.) que controlan la tasa de intemperismo del ambiente, habiendo regiones persistentemente áridas donde el intemperismo puede llegar a ser lo suficientemente lento como para que las meteoritas se acumulen a lo largo del tiempo, conocidas como áreas de recolección densa o zonas de acumulación.

Debido a que las meteoritas son una fuente de información fundamental para comprender la formación y evolución del sistema solar, el estudio del intemperismo en estos materiales contribuye en: 1) la interpretación y distinción adecuada entre las características y fases minerales originales y aquellas debidas a la alteración; 2) la identificación de los principales procesos y factores que intervienen en su degradación; y 3) el reconocimiento de regiones donde potencialmente se conservan y acumulan estos ejemplares.

En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión detallada de la literatura sobre intemperismo en meteoritas. Así mismo, se analizó la abundancia y distribución de la colección de hallazgos mexicanos a partir de la elaboración de una base de datos y de mapas de distribución espacial en función del tipo de meteorita, la masa y el clima. Finalmente, como el estudio del intemperismo en meteoritas metálicas es escaso, se propuso un experimento para evaluar el comportamiento electroquímico y determinar la velocidad de corrosión, a través de análisis de polarización potenciodinámica, de la meteorita Catorce b en una solución de 1 wt. % de NaCl a pH casi neutro y temperatura ambiente (24° C).

La colección mexicana de hallazgos, conformada por 92 meteoritas (57 metálicas, 32 pétreas y 3 metálico-pétreas), parece ejemplificar la influencia de las condiciones climáticas en su abundancia, masa y distribución. En regiones tropicales y templadas se tienen o pocos registros (en su mayoría de meteoritas metálicas con masas mayores a 1 kg) o no se ha reportado el hallazgo de material meteorítico; mientras que en ambientes áridos se ha descubierto una mayor cantidad de ejemplares (77.2%) de todo tipo y con un amplio intervalo de masas. No obstante, comparada con otras, la colección mexicana es pequeña, presenta una baja abundancia de ejemplares pétreos y la mayor parte de los hallazgos fueron encontrados de manera fortuita, lo que podría estar reflejando un muestreo incompleto causado por la falta de campañas de búsqueda y recolección de meteoritas en el país. Por lo tanto, se identificaron las principales condiciones favorables (superficies llanas con clima árido, litología superficial clara y vegetación de matorral xerófilo) que podrían ayudar a realizar una primera delimitación de áreas de interés en donde se puedan implementar expediciones de búsqueda y recolección en México.

Con respecto al comportamiento electroquímico de la meteorita Catorce b, a partir de las curvas de polarización se observó una cinética anódica poco activa, reflejando una baja disolución del material, aunada a una cinética catódica lenta, indicando que la reducción del O_2 del electrolito es una etapa lenta. Por lo tanto, en condiciones de inmersión continua en una solución de 1 wt. % de NaCl a pH casi neutro y temperatura ambiente ($24^\circ C$), la meteorita Catorce b es un material poco reactivo que exhibe resistencia a la corrosión y experimenta una velocidad de corrosión promedio entre 8.3 a 13.0 $\mu m/año$.

CAPÍTULO I

Intemperismo en meteoritas

1. Intemperismo

El intemperismo es un proceso que causa desintegración y descomposición en las rocas y los minerales que se encuentran en o cerca de la superficie terrestre. Estas alteraciones son el resultado del ajuste que experimentan para llegar al equilibrio en un nuevo ambiente donde las condiciones de temperatura y presión son diferentes a las de su formación, y donde se ven expuestos a diferentes agentes inorgánicos y orgánicos que contribuyen a la modificación de sus propiedades y composiciones originales (Carroll, 1970; Frings y Buss, 2019).

La susceptibilidad a la alteración que presenta una roca o un mineral depende de factores propios, como composición química, estructura cristalina y textura (porosidad y permeabilidad); así como de las características del ambiente donde se encuentran, como las condiciones climáticas, el pH del suelo, la composición del agua, la topografía y la actividad biológica presente (Carroll, 1970; April y Newton, 1992; Price, 1995).

Los procesos que dan lugar al intemperismo pueden dividirse en físicos, aquellos que ocasionan desintegración mecánica y cambios en las propiedades mecánicas, y químicos, que involucran cambios en la composición química y mineralógica. El tipo de proceso que domina en un ambiente depende de sus condiciones climáticas, que varían de lugar en lugar y en el tiempo (Carroll, 1970; Price, 1995). En climas muy secos, como en las regiones áridas y polares, la desintegración mecánica es el proceso dominante. Por lo contrario, en regiones húmedas con climas templados o tropicales, la alteración química es la encargada de causar intemperismo (Carroll, 1970). Sin embargo, aunque uno de los dos tipos de procesos pueda ser más activo y se pueden estudiar por separado, los procesos físicos y químicos suelen actuar conjuntamente en el proceso general del intemperismo (The Geological Society, 1995; Melosh, 2011; Frings y Buss, 2019).

1.1. Intemperismo químico

El intemperismo químico se enfoca en la descomposición de los componentes principales de las rocas causada por reacciones químicas que ocurren al interactuar con el agua y la atmósfera (Carroll, 1970; Melosh, 2011). Se puede dar en dos etapas: la descomposición de las rocas, donde hay cambios geoquímicos *in situ* debidos principalmente a la alteración inorgánica, y la producción de suelos, como resultado de la alteración orgánica por la actividad biológica (Carroll, 1970).

La serie de estabilidad de los minerales ante el intemperismo químico, o serie de Goldich, es inversa a la serie de reacciones de Bowen (Figura 1.1). Los minerales máficos, formados a temperaturas y presiones más altas, tienen una menor estabilidad y son más susceptibles a la alteración; mientras que los minerales félsicos, formados a temperaturas y presiones menores, son más estables y resistentes al intemperismo (Carroll, 1970; Price, 1995).

Lo anterior se ve reflejado tanto en su composición química como en su estructura cristalina. Durante el intemperismo, los elementos que componen a los minerales presentan una diferente movilidad o susceptibilidad a ser removidos del sistema dependiendo tanto de las características del material como del medio con el que interactúan (Price, 1995). A su vez, los enlaces químicos que se forman entre los elementos de los minerales influyen en la progresión del intemperismo, el cual comienza a atacar por los enlaces más débiles. Aquellos minerales que están formados por unidades aisladas de tetraedros de sílice, como los olivinos, son más reactivos que los que están formados por cadenas de tetraedros, como los piroxenos y anfíboles, y son aún más reactivos comparados con los que están formados por capas o armazones tridimensionales de tetraedros, como las micas y el cuarzo. Esto se debe a que es más fácil romper los enlaces que unen a tetraedros aislados, que romper aquellos que unen a las cadenas, las capas o los armazones tridimensionales (Carroll, 1970; April y Newton, 1992).

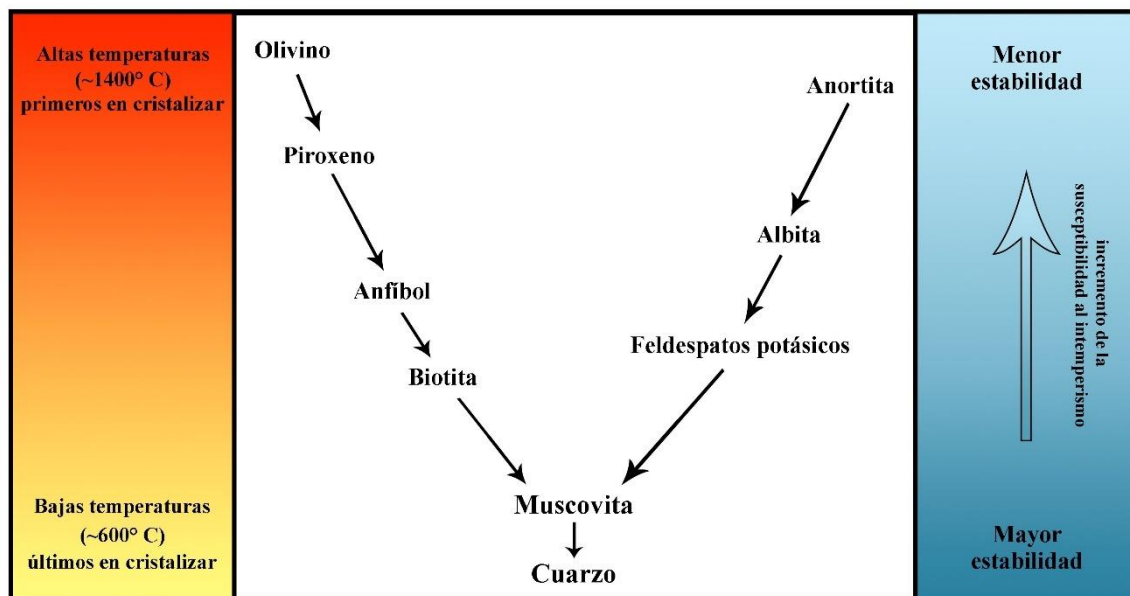


Figura 1.1 Serie de estabilidad de los minerales ante el intemperismo químico. Modificado de Carroll (1970).

Los procesos básicos del intemperismo químico (disolución, precipitación, hidratación, hidrólisis, oxidación y carbonatación) dependen en su mayoría del agua (Melosh, 2011; Frings y Buss, 2019). El agua subterránea, el agua del suelo y la lluvia son las principales fuentes del agua que interactúan con las rocas y los minerales. La cantidad de alteración que el agua ejerce sobre estos materiales está en función de **1**) su composición química, que varía por las condiciones del ambiente y el material con el que va interactuando, reflejándose en el pH; **2**) la cantidad de agua disponible para remover y transportar los elementos químicos a

través de: **a)** la gravedad que percola y drena el agua con los iones diluidos, **b)** la capilaridad que actúa en los poros y espacios pequeños en las rocas y **c)** la higroscopía reflejada en las capas delgadas de agua retenidas en los granos (Carroll, 1970):

- Disolución → los elementos de los minerales son solubilizados y removidos del sistema, permaneciendo en solución en forma de iones (Melosh, 2011; Frings y Buss, 2019).
- Precipitación → va de la mano con la disolución, ya que los iones que permanecen en solución pueden formar minerales secundarios, generalmente arcillas. La precipitación de estos minerales puede darse entre los espacios o las fracturas (Price, 1995; Frings y Buss, 2019).
- Hidratación/deshidratación → incorporación de moléculas de agua a la estructura cristalina del mineral causando un pequeño cambio en el volumen que propicia la desintegración de las rocas. El caso inverso, conocido como deshidratación, sucede cuando hay remoción de moléculas de agua de la estructura (The Geological Society, 1995; Melosh, 2011; Frings y Buss, 2019).
- Hidrólisis → combinación entre la disolución y precipitación donde la molécula del agua se disocia y forma enlaces OH con las especies reactivas de los minerales. Esto causa la descomposición de los minerales y da lugar a la formación de otros minerales más estables en las condiciones superficiales (Carroll, 1970; Melosh, 2011; Frings y Buss, 2019).
- Oxidación → el interior de la Tierra parece ser un ambiente químicamente reducido, por lo que los minerales que provienen de su interior suelen sufrir cambios en el estado de oxidación de algunos de sus elementos químicos por la transferencia de electrones con el oxígeno atmosférico (Melosh, 2011).
- Carbonatación → el agua absorbe el CO₂ producido en la atmósfera a través de la lluvia y el que liberan las plantas y microorganismos por medio del agua subterránea. El CO₂ vuelve al agua una solución ácida que reacciona con mayor facilidad con los minerales, en comparación con el agua pura, sin cambiar su estado de oxidación (Carroll, 1970; Melosh, 2011).

Los productos del intemperismo químico pueden rellenar los poros y fracturas, impidiendo el paso del agua o el aire, causando que la roca sea menos permeable y friable con el tiempo (Carroll, 1970; The Geological Society, 1995).

1.2. Intemperismo mecánico

El intemperismo mecánico es causado por la formación de fracturas, en rocas y minerales, debido a esfuerzos internos o tectónicos que conllevan a la desintegración del material (Carroll, 1970; Melosh, 2011).

La desintegración mecánica comienza con la formación de diaclasas, fracturas sin desplazamiento, debido a la descompresión que sufren las rocas del interior de la Tierra al ser expuestas cerca de la superficie por erosión o movimientos tectónicos. Esta liberación de

esfuerzos verticales permite que el material se expanda hacia arriba y hacia afuera provocando lamamiento y exfoliación (Carroll, 1970; Price, 1995; Melosh, 2011). Ya en la superficie, las rocas y los minerales se ven expuestos a otros procesos, como la expansión térmica o la gelifracción, que promueven la formación o propagación de fracturas y su desintegración (The Geological Society, 1995; Anderson, 2019):

- Esfuerzos térmicos → formación de fracturas debidas a esfuerzos internos que se generan por la expansión o contracción de las rocas y los minerales como respuesta a las diferencias térmicas diurnas y estacionales (The Geological Society, 1995; Melosh, 2011; Anderson, 2019).
- Gelifracción → fragmentación de rocas y minerales debido a la presión ejercida en los granos adyacentes cuando se cristalizan lentes de hielo de agua en fracturas y/o poros por donde penetra y se moviliza el agua líquida (Price, 1995; Melosh, 2011; Anderson, 2019).
- Cristalización de sales → fragmentación de rocas debido a la cristalización de minerales, principalmente sales, a partir de una solución sobresaturada, causando esfuerzos internos entre los minerales como en la gelifracción (Melosh, 2011).
- Expansión volumétrica de minerales → cambio en el volumen de un mineral, debido a la hidratación, que provoca esfuerzos de tracción entre los granos y causa fracturas y disgregación de los granos (Carroll, 1970; Melosh, 2011; Anderson, 2019).

La propagación de las fracturas suele necesitar asistencia de la alteración química. Una microfractura sólo puede crecer si los esfuerzos aplicados en sus extremos exceden la resistencia del material. No obstante, la presencia de fluidos moviéndose entre las fracturas contribuyen con la debilitación de los enlaces químicos de los minerales causando así la propagación de las fracturas y la disgregación. A su vez, el intemperismo químico se ve promovido tanto por la formación de discontinuidades mecánicas, que permiten la percolación de los agentes de intemperismo en el interior de las rocas, como por la disgregación, que aumenta la porosidad y la superficie disponible a reaccionar químicamente (Carroll, 1970; Price, 1995; Melosh, 2011; Anderson, 2019).

1.3. Meteoritas

Las meteoritas son fragmentos de composición pétreo y/o metálica de origen extraterrestre, principalmente provenientes de asteroides y cuerpos planetarios, que penetran la atmósfera y logran alcanzar la superficie planetaria (Norton y Chitwood, 2008; Grady et al., 2014). Cuando la meteorita se recupera poco tiempo después de haber sido vista entrar en la atmósfera terrestre, se le llama caída. En el caso contrario, cuando es encontrada sin conocer la fecha en que cayó, se le conoce como hallazgo (Krot et al., 2005; Lipschutz y Schultz, 2014).

De acuerdo con los procesos de formación que experimentaron los cuerpos de donde provienen, las meteoritas se pueden dividir en dos grupos principales (Figura 1.2): no diferenciadas y diferenciadas (Krot et al., 2005; Weisberg et al., 2006; Grady et al., 2014).

1.3.1. Intemperismo en meteoritas

Las meteoritas son materiales fundamentales para la comprensión de la formación y evolución química del sistema solar. Sin embargo, desde el momento en que entran en la atmósfera terrestre están sujetas a cambios físicos y químicos causados por el intemperismo (Gooding, 1986; Bland et al., 2006). El intemperismo en meteoritas se considera como la transformación de las fases mineralógicas originales, debido a la interacción con los ambientes terrestres, en fases que son más estables en la superficie de la Tierra. La alteración que sufren depende de los mismos factores ambientales que controlan el intemperismo en las rocas terrestres (química de las disoluciones, pH, temperatura, humedad), así como de sus características propias (composición química y mineralógica, estructura cristalina, grado de porosidad, fracturamiento; Buchwald y Clarke, 1989; Al-Kathiri et al., 2005; Bland et al., 2006).

Al igual que las rocas terrestres, las meteoritas sufren de desintegración mecánica por la propagación de fracturas debido al incremento en volumen, las fluctuaciones en la temperatura o al ser desgastadas por los agentes de intemperismo, como el agua o el viento; y se ven sujetas a procesos químicos de oxidación, hidrólisis, hidratación, disolución y carbonatación que transforman sus minerales en productos de alteración y redistribuyen los elementos químicos que las componen (Gooding, 1986; Velbel et al., 1991; Al-Kathiri et al., 2005; Bland et al., 2006).

Así mismo, se ha reportado que, en ambientes como la Antártida o los desiertos calientes, los minerales que conforman a las meteoritas presentan diferente susceptibilidad al intemperismo (Buddhue, 1957; Gooding, 1986). Las primeras fases mineralógicas en verse afectadas son las aleaciones de Fe-Ni (kamacita y taenita). A menor contenido de Ni, más rápida es la alteración, teniendo que la kamacita (Ni 4-10%) presenta una tasa de alteración 10 veces más rápida que la taenita (Ni 25-40%; Gooding, 1986; Buchwald y Clarke, 1989; Ikeda y Kojima, 1991). Los sulfuros, como la troilita, a pesar de ser menos susceptibles que la kamacita y taenita, presentan una tasa de intemperismo que puede variar dependiendo el ambiente donde se encuentre la meteorita. En ambientes como la Antártida, es casi nula su alteración; por lo contrario, en ambientes como los desiertos calientes, su alteración es un poco más lenta que la de las aleaciones de Fe-Ni (Gooding, 1986; Lee y Bland, 2004). Finalmente, los minerales menos susceptibles son los fosfuros, como la schreibersita, lo cual se atribuye a su mayor contenido de Ni (~20% y entre 27 y 50% cuando se encuentra como rhabditas; Reed, 1965; Buchwald y Clarke, 1989; Pirim et al., 2014); seguidos de los silicatos, como olivinos y piroxenos (Gooding, 1986; Bland et al., 2006).

1.3.2. Oxidación en meteoritas

El principal proceso de intemperismo químico que sufren las meteoritas es la oxidación (Velbel, 1988; Golden et al., 1995; Bland et al., 2006; Munayco et al., 2013). La oxidación que sufren las meteoritas parece constar de dos periodos: uno acelerado, que se da en los primeros cientos de años después de que caen a la Tierra, y uno estable, que puede deberse a

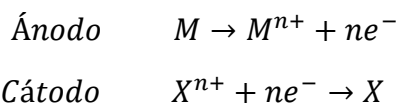
un mecanismo de pasivación. En el periodo inicial, gracias a las grietas y/o la porosidad, una meteorita puede ser oxidada relativamente rápido y los iones disueltos suelen ser removidos del sistema por la acción del agua, especialmente en ambientes o periodos húmedos donde el agua es provista constantemente. Con el tiempo, los productos de intemperismo que se forman pasivan el efecto del intemperismo al rellenar los poros y fracturas, por lo que el agua ya no puede penetrar al interior de la meteorita. Por consiguiente, la oxidación va disminuyendo hasta que alcanza una tasa estable, permitiendo que la meteorita se conserve por mayor tiempo y/o, si cayó en un periodo seco, pueda resistir a un periodo de humedad subsecuente (Bland et al., 1996, 1998a; Al-Kathari et al., 2005).

1.3.2.1. Corrosión en metales

Como se mencionó anteriormente, las primeras fases mineralógicas en verse afectadas por el intemperismo son las aleaciones metálicas de Fe-Ni (Gooding, 1986; Buchwald y Clarke, 1989; Bland et al., 2006). La kamacita y taenita, al ser materiales altamente reducidos, no son estables en la superficie de la Tierra. Por lo tanto, cuando interactúan con los ambientes terrestres, al igual que los metales y aleaciones manufacturados por el ser humano (González-Sánchez y Dzib-Pérez, 2015; Salazar-Jiménez, 2015), experimentan modificaciones y degradación debido a la corrosión (Buchwald y Clarke, 1989; Golden et al., 1995).

La corrosión en metales/aleaciones es un proceso químico o electroquímico que involucra transformación química y transferencia de carga (Revie y Uhlig, 2008; González-Sánchez y Dzib-Pérez, 2015; Tait, 2018). Para que ocurra, en el sistema debe formarse un circuito eléctrico, conocido como celda electroquímica, donde se tiene un ánodo unido a un cátodo por una conexión eléctrica a través de la cual fluyen los electrones, de un electrodo a otro, gracias a un medio conductor o electrolito que está en contacto con la superficie del material y cierra el circuito (Muñoz-Castro, 2008; McCafferty, 2010; Salazar-Jiménez, 2015).

El proceso de corrosión electroquímica se conforma de dos semirreacciones: una de oxidación en el ánodo, donde el metal (M) se disuelve y pierde electrones de valencia (n), quedando en su forma iónica; y una de reducción en el cátodo, en la que una especie química del electrolito (X) recibe los electrones de liberados por el metal (McCafferty, 2010; Buchanan y Stansbury, 2013; Tait, 2018):



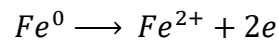
Ambas reacciones pueden ocurrir en la superficie del metal, ya que el mismo metal actúa como conductor entre el sitio anódico, donde se liberan los electrones, y el sitio catódico, donde se emplean para reducir una especie del electrolito (McCafferty, 2010; González-Sánchez y Dzib-Pérez, 2015; Tait, 2018).

Los efectos de la corrosión se pueden clasificar de acuerdo con la apariencia externa del material en (Revie y Uhlig, 2008; Landolfo et al., 2010):

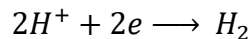
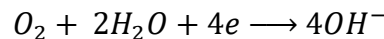
- Uniforme o generalizada → el ataque es relativamente homogéneo sobre toda la superficie del material (Revie y Uhlig, 2008; Landolfo et al., 2010; McCafferty, 2010).
- Localizada → existe un ataque intenso en zonas específicas de la superficie del material debido a la naturaleza y/o geometría del material, o a las condiciones del medio donde se encuentra. Entre los tipos de corrosión localizada más comunes se encuentran: por picadura, galvánica, cavitación, intergranular y por hendiduras (Revie y Uhlig, 2008; McCafferty, 2010; Salazar-Jiménez, 2015).
- Favorecida por un fenómeno físico → es un tipo de corrosión localizada en el que un esfuerzo mecánico, como la tensión o fricción, da inicio al proceso de corrosión (Revie y Uhlig, 2008; Salazar-Jiménez, 2015).

1.3.2.2. Mecanismo de corrosión de Buchwald y Clarke

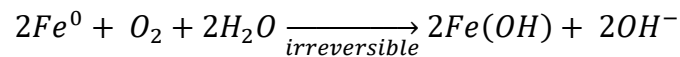
Buchwald y Clarke (1989) postularon un mecanismo de corrosión del metal meteorítico a través de una reacción electroquímica donde el Fe^0 de las aleaciones metálicas entra en solución al ser oxidado:



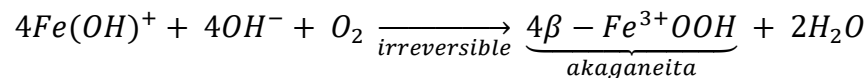
Mientras que el oxígeno (O_2), u ocasionalmente un protón (H^+), es reducido:



Combinando las primeras dos ecuaciones se tiene:



En condiciones oxidantes, esta reacción da lugar a la precipitación de akaganeita:

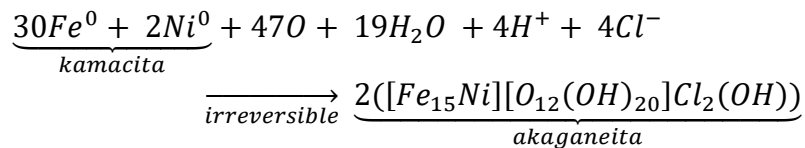


La akaganeita es el producto inicial del intemperismo y su formación es un punto clave en la degradación de las aleaciones de Fe-Ni. Cuando en el medio hay cloruros, proporcionados por los ambientes terrestres, se favorece la oxidación del Fe metálico y los iones Cl^- que se encuentran en la frontera de reacción pueden incorporarse a la estructura de la akaganeita para darle estabilidad (Buchwald y Clarke, 1989; Lee y Bland, 2004; Bland et al., 2006). En ambientes fríos y secos, como la Antártida, el Cl^- es proporcionado a partir de las capas de nieve y hielo, donde se incorpora cuando es llevado como aerosol o gas por el spray del mar o por exhalaciones volcánicas de cloruro de hidrógeno (Buchwald y Clarke, 1989). En el caso de zonas áridas y semiáridas, las sales terrestres pueden ser las que proveen el Cl^- (Gooding, 1982; Golden et al., 1995). Y en ambientes templados, donde las meteoritas pueden estar embebidas en el suelo, el Cl^- es introducido por el agua subterránea. En estos

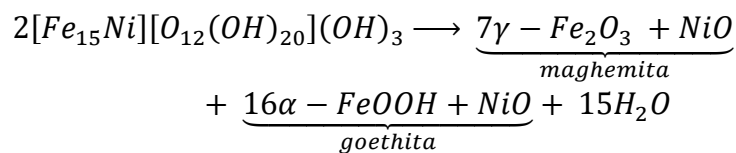
ambientes puede también ocurrir la formación de hibbingita [γ -(Fe,Mg)₂(OH)₃Cl] (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990; Buchwald y Koch, 1995).

Cabe destacar que la akaganeita, cuando se forma de los metales meteoríticos, puede incorporar Ni y la concentración de este elemento refleja la composición de la aleación de Fe-Ni de la cual se formó. Se propone que, si la proporción Fe/Ni en este producto tiene valores cercanos a 16, su formación pudo haber sido a partir de la kamacita; mientras que, si tiene valores alrededor de 4, pudo haberse formado a partir de la taenita (Buchwald y Clarke, 1989).

Por lo tanto, considerando la incorporación del ion Cl⁻ y empleando la fórmula química de la akaganeita propuesta por Keller (1970), la reacción que lleva a su formación a partir de la kamacita, de acuerdo con el mecanismo anteriormente explicado, puede ser la siguiente (Buchwald y Clarke, 1989):



Posteriormente, el Cl⁻ de la akaganeita intercambia sitio con iones OH⁻ del ambiente, liberándose de nuevo en la solución para seguir movilizándose a la frontera de corrosión y continuar con el ataque al metal o para ser lixiviado del sistema. La akaganeita que queda, con composición aproximada de [Fe₁₅Ni][O₁₂(OH)₂₀](OH)₃, pierde cierta estabilidad por la remoción del Cl⁻ y se descompone principalmente en goethita y maghemita, pero también puede dar lugar a lepidocrocita (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990; Bland et al., 2006):



En ambientes secos y fríos, la akaganeita es relativamente estable y se conserva por mayor tiempo en la capa de corrosión que se va formando. Cuando la temperatura y humedad aumentan, la descomposición es rápida por la remoción constante del Cl⁻. Por lo tanto, la akaganeita se va a encontrar principalmente en el frente de corrosión activo, mientras que la goethita y la maghemita en las partes más externas, como la superficie de la meteorita (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990).

La mayoría de los óxidos e hidróxidos de Fe que se forman en las meteoritas (akaganeita, goethita, lepidocrocita y maghemita) se pueden explicar por el mecanismo propuesto por Buchwald y Clarke (1989). Sin embargo, la presencia de magnetita en meteoritas de ambientes húmedos en climas tropicales y templados no puede explicarse por este medio, sugiriendo que existe otro mecanismo involucrado en la oxidación de estas fases mineralógicas. En este escenario alternativo, la magnetita se forma directamente de la disolución de las aleaciones de Fe-Ni. La estabilidad de este óxido puede ser posible en una

situación donde hay disolución rápida del metal donde la solución que está a su alrededor se satura en iones de Fe^{2+} que pueden, u oxidarse a Fe^{3+} , o permanecer en solución, permitiendo la precipitación de magnetita como producto inicial del intemperismo (Golden et al., 1995; Bland et al., 1997, 1998a, 2006). Ambos mecanismos de oxidación se ejemplifican en la Figura 1.3, como propusieron Golden et al. (1995). Los principales productos de intemperismo que se encuentran en diferentes ambientes se tocarán con mayor detalle en la sección 1.4 Zonas de acumulación de meteoritas.

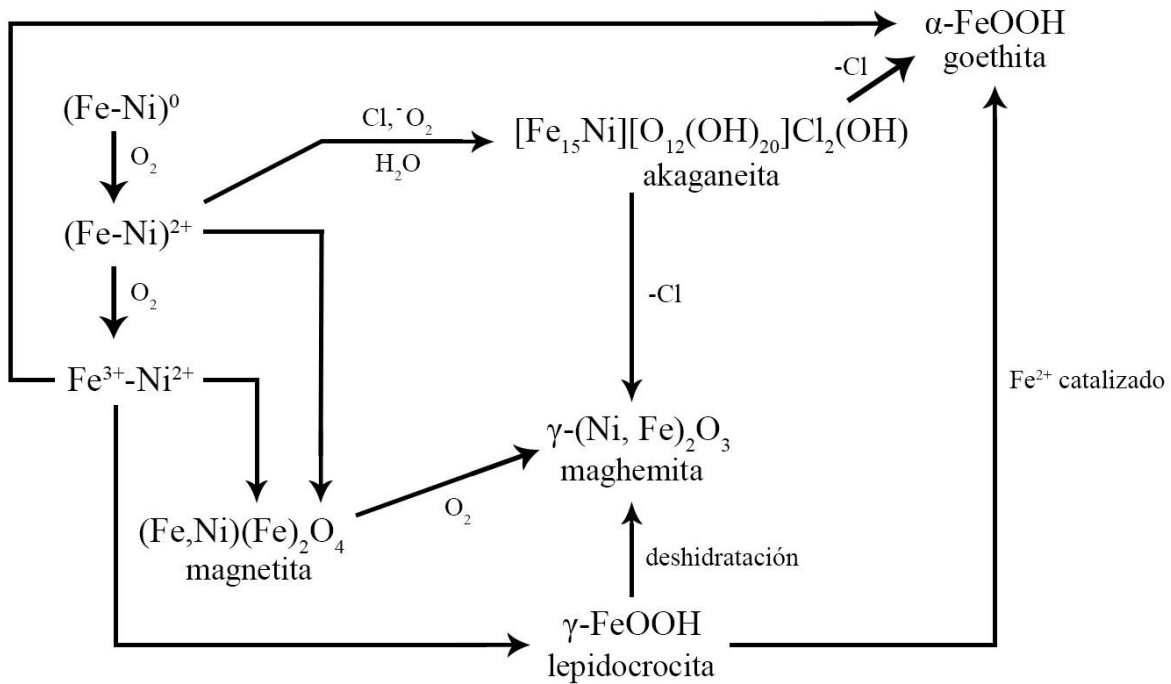
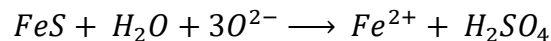


Figura 1.3 Representación esquemática de los posibles caminos que sigue la oxidación de las aleaciones de Fe-Ni de las meteoritas. Modificado de Golden et al. (1995).

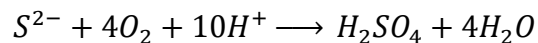
1.3.2.3. Degradación de sulfuros y silicatos

Pese a que el mecanismo propuesto por Buchwald y Clarke (1989) describe la corrosión de las aleaciones de Fe-Ni, Bland et al. (2006) mostraron que otras fases mineralógicas de las meteoritas que contienen Fe sufren reacciones similares, combinando los procesos de oxidación e hidrólisis:

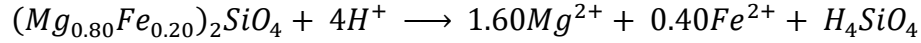
- Para la troilita (FeS) proponen:



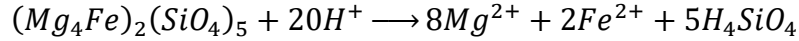
Que corresponde a:



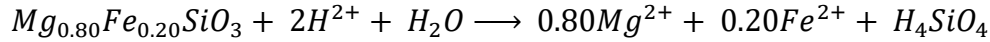
- Para un olivino con una composición (Fo_{0.80}Fa_{0.20}) proponen:



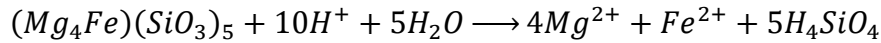
Que corresponde a:



- Para un piroxeno con una composición (En_{0.80}Fs_{0.20}) proponen:

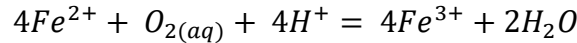


Que corresponde a:

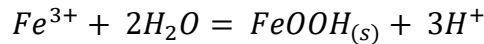


Una vez que los iones de Fe²⁺ son liberados en solución, se lleva a cabo la oxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺ y la hidrólisis de los iones de Fe³⁺ (Bland et al., 2006):

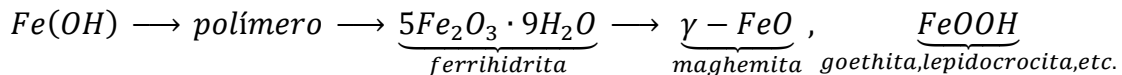
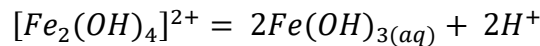
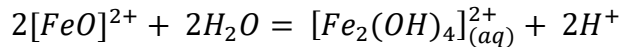
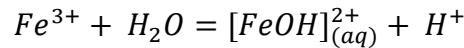
- Oxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺



- Hidrólisis del Fe³⁺



La reacción total de la hidrólisis involucra pasos intermedios que dan lugar a la formación de productos de intemperismo (Bland et al., 2006):



En estos casos, diferentes cationes de los minerales originales (como Mg, Ca, Si) pueden ser incorporados a carbonatos, arcillas, óxidos e hidróxidos de Fe, como elementos traza, o ser removidos del sistema (Lee y Bland, 2004; Bland et al., 2006).

Así como el producto inicial del intemperismo de las aleaciones de Fe-Ni es la akaganeita, para otras fases minerales, como sulfuros y silicatos, el producto inicial debido a la hidrólisis y la precipitación de Fe disuelto es la ferrihidrita, un óxido de hierro hidratado poco cristalino a amorfo con una composición química cercana a 5Fe₂O₃·9H₂O. Posteriormente, este mineral puede descomponerse en goethita, lepidocrocita o maghemita (Bland et al., 2006).

De los productos que se generan por la oxidación se pueden reconocer dos tipos de óxido: el óxido metálico, que proviene de la alteración de las aleaciones de Fe-Ni y la troilita, compuesto por Fe y Ni oxidados, agua y otros elementos como S y Cl; y el óxido silicatado, que se produce por la alteración de los silicatos máficos y está compuesto de material hidratado rico en Fe con Si, Al y otros elementos litófilos (Gooding, 1986; Bland et al., 2006).

1.3.3. Depósitos de evaporitas

A pesar de que los principales minerales del intemperismo en meteoritas son debido a la oxidación, las meteoritas se ven afectadas por otros procesos que producen productos de alteración que no forman parte del óxido (Velbel, 1988; Velbel et al., 1991; Bland et al., 2006).

La segunda alteración terrestre más reconocible es la presencia de polvos blancos o eflorescencias conformados por depósitos de evaporitas de carbonatos y sulfatos, predominantemente de Mg y Ca (Velbel, 1988; Grady et al., 1990; Velbel y Gooding, 1990; Bland et al., 2006; Losiak y Velbel, 2011). La formación de depósitos superficiales de evaporitas en meteoritas involucra hidrólisis, hidratación, disolución e incorporación de CO₂ atmosférico por carbonatación de silicatos (Velbel et al., 1991; Bland et al., 2006). Estos minerales no son sólo contaminantes terrestres, ya que se ha observado, principalmente en ejemplares pétreos, que contienen tanto componentes terrestres (C, O, H), como elementos provenientes de las meteoritas (Na, Mg, K, Ca, Rb). Lo anterior sugiere que no solo el ambiente aporta los cationes que constituyen a las evaporitas, sino que hay una movilización de elementos donde las meteoritas participan activamente en la formación de estos productos de alteración (Velbel et al., 1991; Bland et al., 2006; Losiak y Velbel, 2011).

Además, se ha observado que la ocurrencia de los depósitos de evaporitas también está influenciada por algunas características ambientales, como ubicación, temperatura, composición y disponibilidad de agua; así como por la composición de la meteorita, teniendo que algunos tipos de meteorita, como las condritas carbonosas, son más propensas a presentar estos minerales que otras (Velbel, 1988, 2014; Velbel et al., 1991; Losiak y Velbel, 2011).

1.3.4. Alteración debida a actividad microbiana

Los microorganismos pueden encontrarse en cualquier ambiente terrestre, incluso en aquellos extremos como la Antártida o los desiertos calientes (Berthelin, 1988; Viles, 2012; Samuels et al., 2020), por lo que las meteoritas pueden contaminarse y ser colonizadas por ellos desde el momento en que caen a la superficie de la Tierra (Steele et al., 2000; Benzerara et al., 2006; Gronstal et al., 2009).

Algunos estudios han abordado la intervención de los microorganismos en la alteración de la mineralogía y composición química de las meteoritas a través de participar en reacciones químicas como la disolución de piroxenos y precipitación de carbonatos (Benzerara et al.

2003, 2005, 2006) o la oxidación del Fe de aleaciones metálicas y silicatos (González-Toril et al., 2005; Gronstal et al., 2009). Sin embargo, aunque en las rocas terrestres se ha estudiado ampliamente el papel de la actividad microbiana en su intemperismo (Berthelin, 1988; Viles, 2012; Samuels et al., 2020), poca atención se ha prestado a los efectos y el impacto a largo plazo que tiene ésta en la degradación del material meteorítico (Benzerara et al., 2006; Gronstal et al., 2009; Lee et al., 2017).

1.3.5. Productos de intemperismo en las meteoritas

Como resultado de la interacción con fluidos y el sustrato y de los diferentes procesos químicos a los que se ven sujetas las meteoritas, se han encontrado una variedad de productos de intemperismo como óxidos e hidróxidos (magnetita, maghemita, akaganeita, goethita), evaporitas de carbonatos y sulfatos (calcita, siderita, barita, jarosita), fosfatos (apatita, vivianita), silicatos (pecoraita, cuarzo), entre otros (Al-Kathiri et al., 2005; Bland et al., 2006; Velbel, 2014).

De acuerdo con Gooding (1982), Rubin (1997), Tilley y Bevan (2010) y Velbel (2014) los productos de intemperismo que se han reportado en los diferentes tipos de meteoritas se presentan en la Tabla 1.1.

1.3.5.1. Productos debidos a la alteración acuosa preterrestre

Durante la formación del sistema solar, uno de los procesos que experimentaron los cuerpos parentales de las meteoritas, particularmente de las condritas carbonosas, fue la alteración acuosa (Brearley, 2006; King et al., 2017). La alteración acuosa preterrestre se considera como la reacción entre agua y silicatos, que sucede a temperaturas menores a 200° C (generalmente menores a 100° C), promovida por el decaimiento radiactivo, el cual permitió que los hielos de agua acrecentados en los cuerpos parentales pudieran fundirse (Brearley, 2006; McAdam et al., 2015; King et al., 2017). Este proceso dio lugar a la formación de productos de alteración como filosilicatos, carbonatos, sulfatos, óxidos, sulfuros, fosfatos e hidróxidos (Bischoff, 1998; Brearley, 2006).

Entre los minerales que resultan de la alteración acuosa preterrestre, existen algunos que también pueden formarse a causa del intemperismo terrestre, como son la calcita, la magnetita, la maghemita, la pentlandita o el yeso (Rubin, 1997; Brearley, 2006). Para distinguir el origen de las fases mineralógicas que pueden encontrarse en una condrita carbonosa, se pueden llevar a cabo descripciones petrográficas, donde, por ejemplo, las discontinuidades y/o degradación progresiva en venas de óxido y productos de alteración cerca de la corteza de fusión sugieren un origen preterrestre (Gooding et al., 1991; Treiman et al., 1993; Velbel, 2012); análisis químicos, donde la abundancia de elementos traza (como las tierras raras) o la pérdida de ciertos elementos volátiles (como S, Cl o P) al acercarse a la corteza de fusión pueden ayudar a establecer su origen (Treiman et al., 1993; Gillet et al.,

2002); y análisis de isótopos de oxígeno e hidrogeno, que pueden indicar el fluido del cual se formaron (Bland et al., 2000b; Gillet et al., 2002; Brearley, 2006).

Debido a que las meteoritas guardan información sobre el origen y la evolución del sistema solar (Bischoff, 1998; Bland, 2006), es importante determinar el carácter preterrestre o terrestre de los productos de alteración que pueden encontrarse en las muestras para realizar interpretaciones adecuadas al momento de estudiarlas (Treiman et al., 1993; Sephton et al., 2004).

Tabla 1.1 Fases mineralógicas que se han reportado como productos de intemperismo en las meteoritas. Modificado de Rubín (1997).

Mineral	Fórmula química	Mineral	Fórmula química
<i>Elementos nativos</i>		<i>Hidróxidos (continuación)</i>	
Azufre	S	Lepidocrocita	γ -FeO(OH)
Cobre	Cu	Portlandita	Ca(OH) ₂
Grafito	C	Zaratita	Ni ₃ CO ₃ (OH) ₄ ·4H ₂ O
Kamacita	α -(Fe,Ni)	<i>Carbonatos</i>	
Níquel	Ni	Calcita	CaCO ₃
<i>Sulfuros</i>		Hidromagnesita	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·4H ₂ O
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Nesquehonita	Mg(HCO ₃)(OH)·2H ₂ O
Cobaltita	CoAsS	Reevesita	Ni ₆ Fe ₂ (CO ₃)(OH) ₁₆ ·4H ₂ O
Calcopirita	CuFeS ₂	Siderita	FeCO ₃
Esfalerita	(Zn,Fe)S	Vaterita	CaCO ₃
Galena	PbS	<i>Fosfatos</i>	
Heazlewoodita	Ni ₃ S ₂	Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)
Isocubanita	CuFe ₂ S ₃	Arupita	(Ni,Fe) ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O
Pentlandita	(Fe,Ni) ₉ S ₈	Carbonato-fluorapatita	Ca ₅ (PO ₄ ,CO ₃) ₃ F
Pirita	FeS ₂	Cassidyita	Ca ₂ (Ni,Mg)(PO ₄) ₂ ·2H ₂ O
Schöllhornita	Na _{0.3} (CrS ₂)·H ₂ O	Collinsita	Ca ₂ (Mg,Fe,Ni)(PO ₄) ₂ ·2H ₂ O
<i>Arseniuros</i>		Lipscombita	(Fe,Mn)Fe ₂ (PO ₄) ₂ (OH) ₂
Maucherita	Ni ₁₁ As ₈	Vivianita	Fe ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O
Niquelina	NiAs	<i>Sulfatos</i>	
Orcelita	Ni _{5-x} As ₂	Barita	BaSO ₄
Rammelsbergita	NiAs ₂	Bassanita	2CaSO ₄ ·H ₂ O
Safflorita	(Co,Fe)As ₂	Copiapita	Fe ⁺² Fe ⁺³ ₄ (SO ₄) ₆ (OH) ₂ ·20H ₂ O
<i>Óxidos</i>		Epsomita	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Bunsenita	NiO	Honessita	Ni ₆ Fe ₂ SO ₄ (OH) ₁₆ ·4H ₂ O
Eskolaíta	Cr ₂ O ₃	Jarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Hematita	α -(Fe ₂ O ₃)	Melanterita	FeSO ₄ ·7H ₂ O
Maghemita	γ -(Fe ₂ O ₃)	Starkeyita	MgSO ₄ ·4H ₂ O
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Pseudobrookita	Fe ₂ TiO ₅	<i>Silicatos</i>	
Trevorita	NiFe ₂ O ₄	Cuarzo	SiO ₂
Wüstita	FeO	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,H ₂ O]
<i>Hidróxidos</i>		Ópalo*	SiO ₂ ·nH ₂ O
Akaganeita	β -FeO(OH,Cl)	Cronstedtita	Fe ²⁺ ₂ Fe ³⁺ ₂ SiO ₅ (OH) ₄
Ferrihidrita	5Fe ₂ O ₃ ·9H ₂ O	Pecoraita	Ni ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Goethita	α -FeO(OH)		
Hibbingita	γ -(Fe,Mg) ₂ (OH) ₃ Cl		

*El ópalo es un mineraloide.

1.4. Zonas de acumulación de meteoritas

La Tierra recibe un flujo aproximadamente constante de material meteorítico sobre toda su superficie, por lo que se pueden encontrar meteoritas en una gran variedad de ambientes (Bland et al., 1998a; Bland, 2006; Ouknine et al., 2019).

La tasa de intemperismo del ambiente donde haya caído una meteorita va a depender principalmente de sus condiciones climáticas (Bland et al., 1996, 1998a, 2000a), las cuales se ven reflejadas en la disponibilidad de agua líquida que controla los procesos de disolución, transporte y precipitación del intemperismo químico (Gooding, 1986). En regiones templadas y tropicales, el intemperismo es relativamente rápido por la constante precipitación de lluvia y alta humedad que promueven la corrosión/oxidación y la remoción de iones del sistema (Bland et al., 1998a, 2006; Al-Kathiri et al., 2005; Ouknine et al., 2019). Por otro lado, en zonas con climas persistentemente áridos, el intemperismo es menos vigoroso y puede llegar a ser lo suficientemente lento como para que haya acumulación de un mayor número de meteoritas a lo largo del tiempo. Estas regiones son conocidas como áreas de recolección densa o zonas de acumulación y son de dos tipos, el desierto frío de la Antártida o los desiertos calientes (Bland et al., 1996, 1998a, 2000a, 2006; Muñoz et al., 2007; Munayco et al., 2013).

1.4.1. Antártida

La Antártida es un continente cubierto de nieve y hielo con condiciones atmosféricas extremadamente frías y secas que son resultado de su ubicación en uno de los polos terrestres, su topografía y las características de su superficie que influyen en los patrones de temperatura y viento (Owens y Zawar-Reza, 2015).

Desde 1969, después de que la Expedición Japonesa de Investigación de la Antártida encontrara 9 meteoritas en el área de las montañas Yamato durante una de sus expediciones glaciológicas, se reconoció la posibilidad de encontrar una gran cantidad de meteoritas en esta región. Estos ejemplares, así como muchos otros encontrados en ésta y otras áreas montañosas en expediciones posteriores, se encontraban muy cerca uno del otro a pesar de no provenir de una misma caída, por lo que se sugirió que había algún mecanismo de acumulación de meteoritas en este tipo de áreas (Graham y Annestad, 1989; Harvey, 2003). De acuerdo con Cassidy et al. (1977) y Nagata (1978), el mecanismo de concentración de meteoritas cerca de las regiones montañosas en la Antártida puede explicarse de la siguiente forma: **1)** las meteoritas que caen sobre el casquete glaciar durante un largo periodo, incorporándose en las capas de nieve y hielo, son transportadas por el flujo glaciar que se mueve desde el interior hacia la costa; **2)** debido a la topografía del continente, este flujo glaciar converge horizontalmente formando áreas relativamente estancadas que tienen un movimiento ascendente, a causa de las cadenas montañosas, que acelera la surgencia de las meteoritas a la superficie del flujo; **3)** en estas zonas hay un efecto de ablación bastante vigoroso que va quitando las capas de nieve y hielo, dejando a las meteoritas sobre la superficie del hielo azul.

Gracias a este mecanismo y a sus condiciones ambientales, la Antártida se ha vuelto una región de búsqueda de meteoritas muy activa en donde se han encontrado más de 40 000 meteoritas hasta la fecha (Graham y Annexstad, 1989; Schutt et al., 1993; Harvey, 2003; Meteoritical Bulletin Database, 2020).

1.4.2. Desiertos calientes

Los desiertos calientes son ambientes con déficit de humedad que suelen definirse en términos de aridez (Parsons y Abrahams, 2009). De acuerdo con el Atlas Mundial de Desertificación (Middelton y Thomas, 1997), la clasificación de los desiertos calientes se puede hacer a partir de un índice de aridez que se deriva de la precipitación (P) y de la evapotranspiración potencial (PET), dando 4 tipos de regiones (Figura 1.4): Hiperáridas ($P/PET < 0.05$), Áridas ($0.05 < P/PET < 0.2$), Semiáridas ($0.2 < P/PET < 0.5$) y Subhúmedas ($0.5 < P/PET < 0.65$).

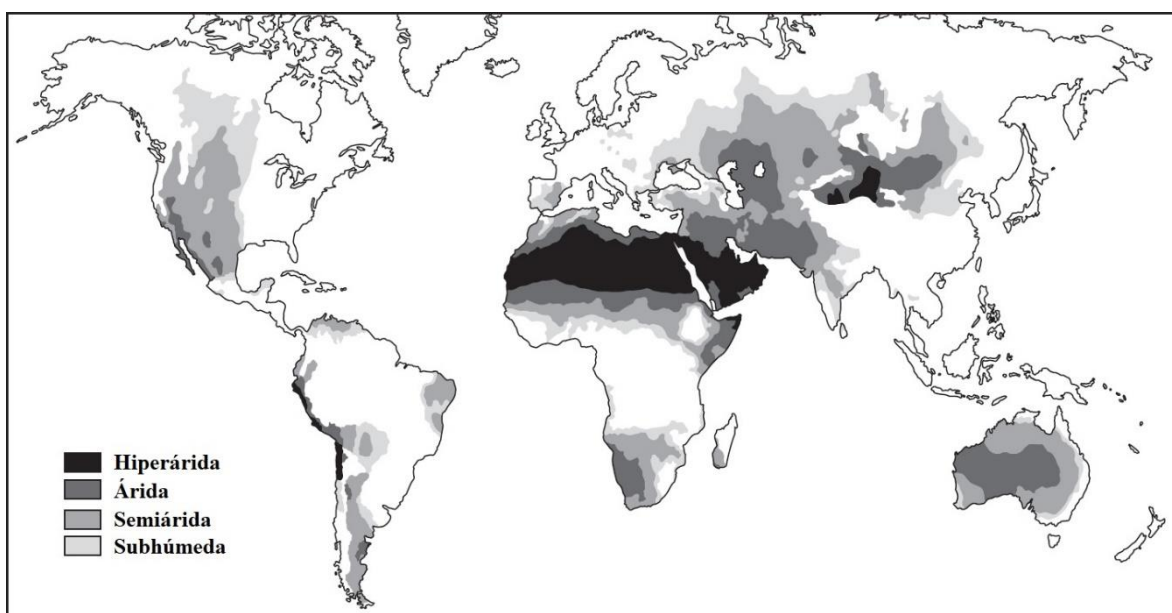


Figura 1.4 Distribución de los tipos de desiertos calientes. Tomado de Parsons y Abrahams (2009).

Aunque se habían reportado algunos hallazgos y caídas de meteoritas en distintos desiertos calientes antes del siglo XX, fue hasta inicios de 1960 que se comenzaron a organizar búsquedas de meteoritas en la Región Nullarbor, Australia (Bevan 1992, 2006) y se empezaron a recuperar un gran número de ejemplares en el Condado de Roosevelt, Estados Unidos (Bevan, 2006). Posteriormente, se comenzaron a llevar a cabo estas búsquedas en otros desiertos calientes del mundo, teniendo un auge en los años 90 (Schlüter et al., 2002; Bevan, 2006).

Los desiertos calientes presentan condiciones climatológicas y características topográficas y geológicas específicas que los diferencian entre sí. Sin embargo, estas zonas tienen en común tres factores que permiten la preservación y el reconocimiento de meteoritas: **1)** condiciones de aridez, que promueven un intemperismo menos vigoroso debido a una menor

disponibilidad de agua (Bevan, 1992; Bland et al., 2000a; Schlüter et al., 2002; Muñoz et al., 2007; Hutzler et al., 2016); **2**) escasez o carencia de vegetación, que facilita el reconocimiento y hallazgo de meteoritas en una superficie (Bevan, 2006; Muñoz et al., 2007; Hutzler et al., 2016); y **3**) características geomorfológicas favorables, como extensas superficies llanas (planicies, depresiones de deflación, lagos secos, etc.) con litologías claras (calizas, dolomías, margas, yeso, etc.) que no se vean afectadas por el barniz desértico o la presencia de materiales máficos, las cuales facilitan la acumulación, detección y recolección del material meteorítico (Bevan, 1992; Scherer y Delisle, 1992; Schlüter et al., 2002; Bevan, 2006; Muñoz et al., 2007; Hutzler et al., 2016; Oukine et al., 2019). Por lo anterior, los desiertos calientes son la segunda mayor fuente de meteoritas, habiéndose reportado en conjunto alrededor de 20 000 meteoritas hasta la fecha (Gattacceca et al., 2011; Meteoritical Bulletin Database, 2020). Entre los desiertos calientes más destacables se encuentran *el Sáhara (Argelia, Libia, Marruecos, Níger y Noroeste de África*; p. ej. Bischoff y Geiger, 1995; Schultz et al., 1998; Schlüter et al., 2002; Russel et al., 2004; Aboulahris et al., 2019), *la Región Nullarbor en Australia* (p. ej. Bevan, 1996; Bevan et al., 1998), *la península arábiga (Arabia Saudita y Omán*; p. ej. Hofmann et al., 2001; Al-Kathari et al., 2005), *las planicies desérticas de Estados Unidos de América (Arizona, California, Kansas, Nevada, Nuevo México*; p. ej. Zolensky et al., 1990; Jull et al., 1991; Merriam y Harbaugh, 2007; Hutson et al., 2013), *el desierto de Atacama en Chile* (p. ej. Muñoz et al., 2007; Gattacceca et al., 2011), *el desierto Lut en Irán* (p. ej. Pourkhorsandi et al., 2016) y *la provincia Sinkiang en China* (p. ej. Li et al., 2017; Zeng et al., 2018).

1.4.3. Diferencias entre la Antártida y los desiertos calientes

Así como las regiones consideradas como zonas de acumulación de meteoritas comparten la característica de tener un intemperismo menos vigoroso que permiten la preservación de las meteoritas (Bland et al., 1996, 1998b, 2006), existen ciertas diferencias entre el intemperismo que actúa en la Antártida y el que actúa en los desiertos calientes:

- 1) Tasa de intemperismo:** como se mencionó anteriormente, la tasa de intemperismo del ambiente depende de la disponibilidad de agua líquida. En la Antártida, las formas predominantes del agua son el hielo y el vapor (Gooding, 1986). Las meteoritas encontradas en este ambiente se encuentran menos intemperizadas debido a las temperaturas bajo cero, al clima extremadamente seco y a que permanecen enterradas en las capas de nieve y hielo por periodos prolongados, lo que permite una mejor conservación (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990; Koeberl y Cassidy, 1991; Ouknine et al., 2019). No obstante, aun en temperaturas bajo cero, el agua líquida puede encontrarse en la superficie del casquete glaciar, así como en forma de agua capilar o como delgadas capas no congeladas sobre los minerales de las meteoritas. Cuando las meteoritas se encuentran expuestas en la superficie de las capas de hielo, ya sea al caer o cuando resurgen por la ablación cerca de las montañas, experimentan calentamiento por insolación. Este calentamiento puede elevar la temperatura algunos grados sobre el punto de congelación del agua tanto de los alrededores inmediatos,

como del interior de la meteorita permitiendo la presencia de agua líquida que actúa como agente de intemperismo (Gooding, 1986; Velbel y Gooding, 1990).

En el caso de los desiertos calientes, la principal fuente de agua líquida en estos ambientes son los aumentos periódicos en la precipitación de lluvia (Bland et al., 1998a; Ouknine et al., 2019). A pesar de que los desiertos calientes presentan climas principalmente semi-áridos o áridos, aquellos desiertos cerca de la zona tropical tienen mayor precipitación de lluvia y humedad (Ouknine et al., 2019). También, se han registrado varios periodos húmedos en los últimos 40 mil años en algunos de estos ambientes, como el Sahara, el Condado de Roosevelt o la Región Nullarbor (Muñoz et al., 2007; Ouknine et al., 2019). Por lo tanto, aunque las meteoritas hayan caído en un periodo seco o se encuentren cubiertas por suelo, protegiéndolas de los subsecuentes periodos húmedos (Schülter et al., 2002; Ouknine et al., 2019), la tasa de intemperismo en los desiertos calientes es más rápida que en la Antártida (Al-Kathiri et al., 2005; Ouknine et al., 2019).

- 2) *Productos de intemperismo*: gracias a las condiciones favorables de la Antártida, las meteoritas de esta región conservan el inicio de la alteración por intemperismo (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990). Por lo que, entre los productos de intemperismo que se encuentran en las muestras de este ambiente (Tabla 1.2), la fase dominante es la akaganeita que permanece estable gracias a que mantiene el Cl⁻ en su estructura (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990; Bland et al., 1997). Además de akaganeita, se observan otros óxidos e hidróxidos de Fe como goethita, en menor cantidad maghemita y lepidocrocita (Buchwald y Clarke, 1989; Buchwald, 1990) e inusualmente magnetita (Bland et al., 1997, 2006); así como evaporitas hidratadas de carbonatos y sulfatos de Mg y Ca (Velbel, 1988; Grady et al., 1990; Velbel, 2014).

Tabla 1.2 Principales productos de intemperismo reportados en las meteoritas de las zonas de acumulación. Los óxidos e hidróxidos de Fe más abundantes en las muestras de cada tipo de zona de acumulación se muestran en la parte superior de la lista.

Antártida	Desiertos cálidos
akaganeita	maghemita
goethita	magnetita
maghemita	goethita
lepidocrocita	lepidocrocita
magnetita	hematita
carbonatos de Mg y Ca	akaganeita
sulfatos de Mg y Ca	carbonatos de Ca
	sulfatos pobres en Fe
	silicatos

Las meteoritas de los desiertos calientes muestran una variedad de productos de intemperismo, siendo en su mayoría ricos en Fe (Tabla 1.2; Lee y Bland, 2004; Al-Kathiri et al., 2005; Bland et al., 2006). Las fases de alteración dominantes en las meteoritas de estos ambientes son los óxidos de Fe, principalmente la maghemita y la magnetita (Bland et al., 1997; 1998a; Pourkhorsandi et al., 2019), pero también pueden encontrarse otros óxidos e hidróxidos de Fe como goethita y, en menor

abundancia, lepidocrocita (Golden et al., 1995; Bland et al., 2006), hematita (en muestras expuestas a mayor intemperismo donde la goethita se ha descompuesto en esta fase; Al-Kathiri et al., 2005; Valenzuela et al., 2008; Pourkhorsandi et al., 2019) y akaganeita (solamente en la zona activa de corrosión, Bland et al., 1997, 1998a; Lee y Bland, 2004). Así mismo, se han observado evaporitas de carbonatos de Ca y sulfatos pobres en Fe (Velbel, 1988; Lee y Bland, 2004; Al-Kathiri et al., 2005; Bland et al., 2006) y algunos silicatos provenientes del ambiente (Lee y Bland, 2004; Al-Kathiri et al., 2005; Bland et al., 2006; Tilley y Bevan, 2010).

- 3) *Distribución de masas*: la distribución de masas de las meteoritas encontradas en las zonas de acumulación se ve afectada por las características de la superficie del ambiente, la forma de recolección y el intemperismo (Schülter et al., 2002; Ouknine et al., 2019). En la Antártida, la mayoría de las meteoritas recolectadas tienen masas entre 1 y 100 g (Huss, 1991; Bischoff y Geiger, 1995; Meteoritical Bulletin Database, 2020). La búsqueda de meteoritas en el casquete glaciar es relativamente más fácil, ya que los colores oscuros de los ejemplares resaltan sobre el hielo azul y no suele haber rocas terrestres con las que puedan ser confundidas (Huss, 1991; Zolensky et al., 2006). Las expediciones se realizan a pie, permitiendo detectar ejemplares que pueden tener tamaños menores a los 2 cm de diámetro (masas < 10 g; Huss, 1991; Zolensky et al., 2006), los cuales pueden conservarse por mayor tiempo al permanecer enterradas en el hielo pese a su tamaño (Koeberl y Cassidy, 1991).

En el caso de los desiertos calientes, la distribución de masas va a variar dependiendo la región (p. ej. Bischoff y Geiger, 1995; Bevan et al., 1998, Schülter et al., 2002; Ouknine et al., 2019). No obstante, la mayor parte de las meteoritas recuperadas en estas zonas tienen masas entre 10 y 1000 g (Bischoff y Geiger, 1995; Ouknine et al., 2019; Meteoritical Bulletin Database, 2020). A diferencia de la Antártida, la recolección de meteoritas en estos ambientes puede dificultarse ya sea porque el basamento es oscuro, porque hay presencia de rocas terrestres oscuras o, incluso, porque la superficie está cubierta por barniz desértico oscuro, complicando el reconocimiento de las meteoritas entre los materiales terrestres (Schülter et al., 2002; Lee y Bland, 2004; Bevan, 2006). Además, la detección de ejemplares menores a 10 g se ve afectada por el intemperismo, que va desintegrando y removiendo con el tiempo a los ejemplares pequeños (Zolensky et al., 2006; Ouknine et al., 2019); y por la forma de recolección, la cual puede ser a pie, permitiendo el reconocimiento de ejemplares más pequeños (como en la Región de Nullarbor), o en automóvil, sesgada a ejemplares de mayor tamaño (como en el Sahara; Bischoff y Geiger, 1995; Bevan et al., 1998; Schülter et al., 2002; Ouknine et al., 2019).

- 4) *Fracturamiento de las meteoritas*: las meteoritas de los desiertos calientes suelen presentar una mayor cantidad de fracturas en comparación con las muestras de la Antártida debido a los cambios de volumen. A diferencia de la Antártida, los cambios de volumen en los desiertos calientes, causados por las fluctuaciones de temperatura (entre el día y la noche y entre las estaciones) y por la alteración de las fases minerales originales, principalmente en periodos húmedos, pueden ser más rápidos y

destructivos promoviendo el fracturamiento de las meteoritas (Lee y Bland, 2004; Al-Kathiri et al., 2005).

- 5) *Grado de intemperismo en lluvias de meteoritas*: en la Antártida se ha observado que los fragmentos de una misma lluvia de meteoritas pueden presentar diferentes historias de intemperismo. Debido al movimiento de las capas de hielo, algunos fragmentos pueden permanecer en la superficie, mientras que otros quedan embebidos en la nieve y hielo, viéndose afectados de forma diferente por el intemperismo (Bland et al., 1996). Por el contrario, las meteoritas que caen en una misma lluvia en desiertos calientes suelen permanecer en la superficie, quedando expuestas aproximadamente al mismo grado de intemperismo (Bland et al., 1996, 1998a).

1.5. Estudio del intemperismo en meteoritas

Las meteoritas son la principal fuente de información sobre los procesos que ocurrieron en el sistema solar temprano (Buchwald y Clarke, 1989; Graham y Annexstad, 1989; Koeberl y Cassidy, 1991). Sin embargo, al entrar en la atmósfera terrestre se ven sujetas a alteraciones y contaminación por la interacción con los ambientes terrestres, modificando sus propiedades originales (Bevan, 1996; Bland, 2006). Por lo tanto, el estudio del intemperismo en las meteoritas permite **1)** diferenciar las características y fases mineralógicas originales de aquellas producidas por la alteración terrestre, evitando interpretaciones erróneas (Velbel, 1988; Golden et al., 1995); **2)** identificar los principales procesos y factores de alteración debidos al intemperismo terrestre (Bland, 2006; Velbel, 2014); y **3)** desarrollar mejores estrategias para prevenir y minimizar la alteración que sufren las ejemplares aún en ambientes controlados como laboratorios o museos (Buchwald y Clarke, 1989; Velbel, 2014).

El estudio del intemperismo se ha realizado a través de varias técnicas de análisis como *difracción de rayos X* para la caracterización mineralógica (p. ej. Gooding, 1982; Buchwald y Clarke, 1989; Velbel et al., 1991; Golden et al., 1995; Bland et al., 1998a; Al-Kathiri et al., 2005; Tiley y Bevan, 2010); *espectroscopía infrarroja de reflectancia* para la identificación de productos de alteración y la estimación del grado de intemperismo a partir de la presencia de fases hidratadas (p. ej. Salisbury y Hunt, 1974; Gooding, 1982; Miyamoto, 1988, 1991; Miyamoto et al., 1989); *microscopía óptica* y *microscopía electrónica de barrido* para la descripción de texturas y propiedades físicas de los componentes de las meteoritas (p. ej. Gooding, 1982; Buchwald y Clarke, 1989; Ikeda y Kojima, 1991; Golden et al., 1995; Lee y Bland, 2004; Tiley y Bevan, 2010; Hutson et al., 2013); *microsonda electrónica de barrido* y *espectroscopía de energía dispersiva de rayos X* para determinar la composición química general y de las fases mineralógicas, así como la distribución de los principales elementos químicos (p. ej. Buchwald 1990; Golden et al., 1995; Lee y Bland, 2004; Al-Kathiri et al., 2005; Gattaceca et al., 2011; Pourkhorsandi et al., 2019); *espectroscopía Mössbauer de ⁵⁷Fe* para la identificación de las fases de intemperismo, así como estimar el porcentaje de oxidación de las muestras (p. ej. Bland et al., 1995, 1996, 1997, 1998a, 1998b; Valenzuela et al., 2008; Munayco et al., 2013); *espectroscopía Raman* y *micro-Raman* para la identificación

de minerales de intemperismo (p. ej. Rull et al., 2004; Pirim et al., 2014; Torres-Fernández et al., 2017); entre otras.

1.5.1. Escalas e índices de intemperismo

A lo largo del estudio sobre el intemperismo en meteoritas se han propuesto escalas e índices para medir y asignar el grado de alteración que han experimentado las muestras (Bland et al., 2006). Estos medidores de intemperismo se basan principalmente en los efectos que causa el proceso de oxidación en las aleaciones metálicas y/o en los silicatos máficos (p. ej. Antarctic Meteorite Working Group, 1978; Wlotzka, 1993; Rubin y Huber, 2005).

Ninguna de estas medidas de intemperismo, desarrolladas en su mayoría para condritas ordinarias, puede ser aplicada a todos los tipos de meteoritas, debido a las diferentes abundancias y susceptibilidades de los minerales que las conforman. Así mismo, no pueden describir todos los procesos de intemperismo a los que se ven sujetas, ya que pueden no estar correlacionados entre sí (Gooding, 1986; Velbel y Gooding, 1990; Velbel, 2014). A pesar de esto, ha habido un progreso en identificar otros procesos de intemperismo químico, como la hidratación (p. ej. Miyamoto, 1988) o la formación de evaporitas (p. ej. Velbel, 1988), que afectan a las meteoritas y deben ser considerados en las escalas o los índices de intemperismo (Velbel y Gooding, 1990; Velbel, 2014).

Categorías de intemperismo para las meteoritas de la Antártida

Con el fin de reportar el grado de intemperismo general en los ejemplares encontrados en la Antártida, el Grupo de trabajo sobre meteoritas de la Antártida (1978) estableció una clasificación cualitativa de intemperismo. Esta escala se basó en el grado de oxidación de las aleaciones de Fe-Ni que se observen en fracturas y superficies cortadas en las muestras de mano o, en el caso de que no presenten o sean escasas, en el grado de oxidación general de los sulfuros y silicatos máficos (Tabla 1.3; Antarctic Meteorite Working Group, 1978; Miyamoto, 1991).

Posteriormente, Velbel (1988) señaló la importancia de la formación de evaporitas como indicador de la alteración terrestres en las meteoritas. Por consiguiente, propuso agregar una “e” minúscula (Tabla 1.3) junto con la categoría de intemperismo cuando hubiera presencia de evaporitas, ya que estos depósitos coexisten con todos los grados de oxidación en todos los tipos de meteoritas (Velbel, 1988).

Cabe destacar que, aunque no fue incluido en la clasificación de intemperismo para las meteoritas de la Antártida, Ikeda y Kojima (1991) midieron cuantitativamente el grado de oxidación en las aleaciones metálicas en condritas ordinarias de la Antártida y lo relacionaron con las categorías de intemperismo teniendo que la categoría A corresponde a menos del 5% de alteración, la B entre 10 y 20% de alteración y la C a más del 50% de alteración.

Tabla 1.3 Categorías de intemperismo para meteoritas de la Antártida. Tomado del Antarctic Meteorite Newsletter (1978).

Categoría de intemperismo		Descripción
A	Oxidación leve	algunos halos de oxidación en las aleaciones metálicas y algunas manchas de oxidación a lo largo de las fracturas
B	Oxidación moderada	grandes halos de oxidación en las aleaciones metálicas y manchas de oxidación dentro de las fracturas
C	Oxidación severa	la mayor parte de las aleaciones metálicas han sido oxidadas
e		se pueden observar a simple vista minerales evaporíticos

Escala de intemperismo a partir de la intensidad integrada de las bandas de absorción cercanas a las 3 μm

Salisbury y Hunt (1974) mostraron que la presencia de productos de intemperismo hidratados en condritas (como óxidos e hidróxidos de Fe, arcillas, carbonatos hidratados o sulfatos) se ve reflejada en ciertas bandas de absorción, debidas a las vibraciones de estiramiento de los enlaces OH, en los espectros de reflectancia en infrarrojo. A partir de este hecho, Miyamoto (1988) y Miyamoto et al. (1989) propusieron una escala cuantitativa para expresar el grado de intemperismo en meteoritas pétreas empleando las bandas de absorción cercanas a las 3 μm , que son sensibles a la presencia de hidratos y iones hidroxilo.

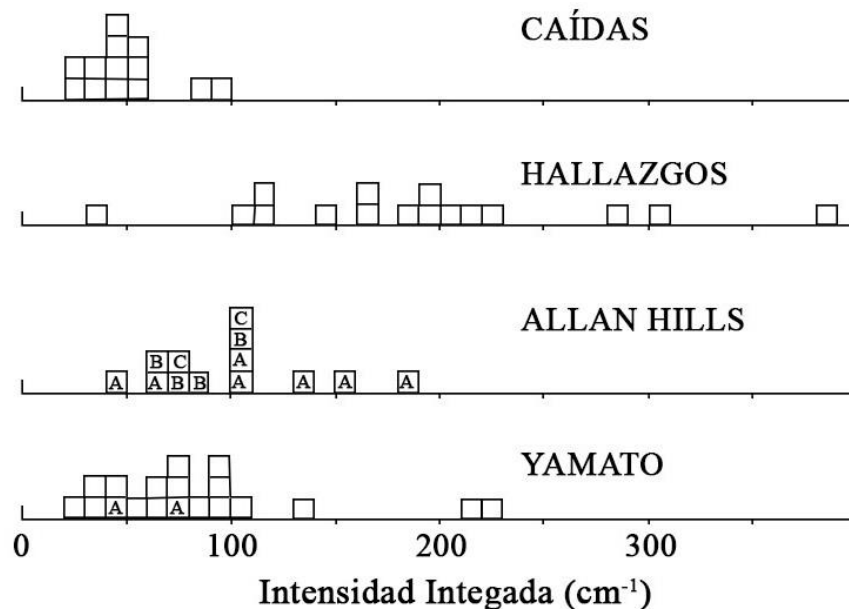


Figura 1.5 Histogramas de intensidad integrada (cm⁻¹) de la banda 3 μm para meteoritas de la Antártida (Yamato y Allan Hills) y que no son de la Antártida (caídas y hallazgos). Las letras A, B y C denotan los grados de intemperismo en la escala de intemperismo para las meteoritas de la Antártida. Tomado de Miyamoto (1991).

Su método se basa en calcular la intensidad integrada de las bandas de absorción cercanas a las 3 μm , a través de integrar numéricamente el espectro entre los 3800 y 3000 cm^{-1} , debido a que las bandas en esta región suelen ser anchas y poco profundas. Esta intensidad integrada es proporcional a la cantidad de agua en la muestra y sirve como una medida del grado de intemperismo, donde un valor alto de la intensidad indica un intemperismo severo y un valor bajo indica poco intemperismo (Figura 1.5; Miyamoto, 1988, 1991; Miyamoto et al., 1989).

Escalas de intemperismo para condritas ordinarias de desiertos calientes

Cuando se comenzó a recuperar un gran número de meteoritas en los desiertos calientes, se plantearon algunas clasificaciones de intemperismo para condritas ordinarias (Tabla 1.4). Estas clasificaciones se basaban en los efectos de la oxidación en los metales y la troilita y en la alteración de los silicatos que se observaran en lámina delgada (Jull et al., 1990, 1991; Zurfluh et al., 2016).

Tabla 1.4 Clasificaciones de intemperismo propuestas para condritas ordinarias. Tomado de Jull et al. (1990^a, 1991^b, 1993^c).

Categoría de intemperismo^a	Descripción
A	leve; halos de óxido alrededor de las aleaciones metálicas, algunas venas de óxido
B	moderado; algunos granos de metal oxidados, pero se preserva la mayor parte de las aleaciones metálicas y la troilita, muchas venas de óxido
C	severo; oxidación casi completa de las aleaciones metálicas y la troilita, venas de óxido abundantes

Grado de intemperismo^b	Descripción
A	oxidación leve de las aleaciones metálicas y la troilita
B	oxidación moderada de las aleaciones metálicas y la troilita
C	oxidación severa de las aleaciones metálicas y la troilita
D	formación local de filosilicatos en olivinos
E	formación masiva de filosilicatos en silicatos máficos

Grado de intemperismo^c	Descripción
A	oxidación leve de las aleaciones metálicas y la troilita
B	oxidación moderada de las aleaciones metálicas y la troilita
C	oxidación severa de las aleaciones metálicas y la troilita
D	se observa alteración de silicatos

Partiendo de la distinción de los efectos del intemperismo a través de observaciones en lámina delgada, y con el fin de evitar confusión con las categorías empleadas en las meteoritas de la Antártida, Wlotzka (1993) propuso una nueva escala de intemperismo para condritas ordinarias en función de la alteración progresiva de los minerales dependiendo su susceptibilidad al intemperismo (Tabla 1.5).

Tabla 1.5 Escala de intemperismo para condritas ordinarias. Tomado de Wlotzka (1993).

Grado de intemperismo	Descripción
W0	No hay oxidación visible en aleaciones metálicas o sulfuros; se empieza a notar con luz transmitida la presencia de limonita
W1	Pocos bordes de oxidación alrededor de las aleaciones metálicas y la troilita; pocas venas de oxidación
W2	Oxidación moderada en las aleaciones metálicas, entre el 20-60% ha sido afectado
W3	Intensa oxidación en las aleaciones metálicas y la troilita, 60-95% han sido reemplazados
W4	Oxidación completa (> 95%) de las aleaciones metálicas y la troilita, pero no hay alteración en silicatos
W5	Comienza la alteración en silicatos máficos, principalmente a lo largo de fracturas
W6	Reemplazamiento masivo de silicatos por minerales arcillosos y óxidos

No obstante, aunque esta escala es ampliamente usada, ya que hace una mejor distinción entre los grados de intemperismo, presenta varias ambigüedades y limitaciones debido a que la publicación original es un resumen (Zurfluh, 2016). Por lo anterior, Zurfluh et al. (2016) realizaron un refinamiento a la escala introduciendo divisiones en los grados intemperismo W3 y W4 (Tabla 1.6), los cuales comprenden la mayor parte de la historia de alteración de las condritas ordinarias. Las divisiones propuestas para estos grados de intemperismo consideran tanto el porcentaje de oxidación de las aleaciones metálicas como el de la troilita, dado que la susceptibilidad al intemperismo de estos minerales es diferente, y cuentan con una descripción más detallada de las fases alteradas (Zurfluh, 2016).

Índice de oxidación empleando espectroscopía Mössbauer de ^{57}Fe para condritas ordinarias

El Fe que forma parte en las principales fases mineralógicas que componen a las meteoritas se puede encontrar como Fe^0 en las aleaciones metálicas, Fe^{2+} en la troilita y los silicatos ferromagnesianos o Fe^{3+} en los productos de intemperismo (Bland et al., 1996, 1998a, 1998b; Valenzuela et al., 2008; Munayco et al., 2013). Estos cambios de valencia pueden ser detectados con espectroscopía Mössbauer de ^{57}Fe , permitiendo así la determinación de la abundancia relativa de los minerales que contienen Fe, así como calcular el grado de intemperismo general de las condritas ordinarias (Bland et al., 1996, 1998a, 2000a; Bland, 2006; Munayco et al., 2013).

Para estimar el grado de intemperismo en una meteorita, se parte de la suposición de que todo el Fe de una condrita ordinaria sin alteración y en equilibrio químico se encuentra principalmente como Fe^0 y Fe^{2+} . Si se encuentra Fe^{3+} en ella, se puede interpretar como producto de la alteración terrestre (Bland et al., 1996, 1998a, 2000a; Bland, 2006). Dado que con la espectroscopía Mössbauer se pueden identificar las fases mineralógicas que contienen Fe, en los espectros Mössbauer se pueden distinguir las bandas de absorción de los minerales primarios (aleaciones metálicas, troilita y silicatos ferromagnesianos), así como de los productos del intemperismo (óxidos e hidróxidos de Fe). Además de identificar los minerales presentes, se puede calcular el porcentaje de contribución de cada uno al espectro total y, por consiguiente, la contribución de aquellos que contienen Fe^{3+} , la cual se puede expresar como el porcentaje de oxidación de la muestra (Figura 1.6; Bland et al., 1996, 1997, 1998b; Munayco et al., 2013).

Tabla 1.6 Escala de intemperismo refinada para condritas ordinarias. Tomado de Zurfluh et al. (2016).

Grado de intemperismo	Oxidación en metales (%)	Oxidación en troilita (%)	Descripción
W0.0	0	0	Muestra fresca, posible presencia de algunos hidróxidos de hierro
W1.0	<20	≥ 0	Pocos bordes de oxidación alrededor de las aleaciones metálicas y la troilita; pequeñas venas de óxidos e hidróxidos de hierro pueden estar presentes
W2.0	20-60	<20	Inicio de la formación de venas de óxidos e hidróxidos de hierro
W3.0	>60	<20	Oxidación severa de las aleaciones metálicas, troilita muestra sólo alteración leve
W3.3	>60	20-60	Oxidación severa de las aleaciones metálicas, alteración moderada de troilita. Usualmente poca troilita está completamente oxidada
W3.6	>60	>60	Oxidación severa de las aleaciones metálicas y la troilita. La mayor parte de la troilita está oxidada o muestra una reflectividad reducida
W4	>95	>95	Oxidación casi completa de las aleaciones metálicas y la troilita, usualmente hay remanentes visibles de troilita
W4.5	100	100	Todas las aleaciones metálicas y la troilita están oxidadas, sólo hay remanentes de ellas como inclusiones en silicatos; posible alteración en algunos silicatos (principalmente en olivino)
W5.0	100	100	Las aleaciones metálicas y la troilita están oxidadas al 100%, alteración severa de silicatos, principalmente en olivino
W6.0	100	100	Reemplazamiento masivo de silicatos por arcillas y óxidos

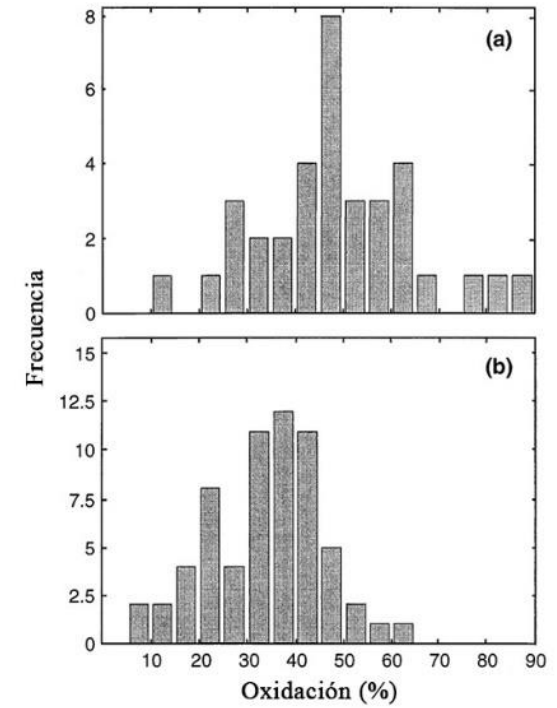
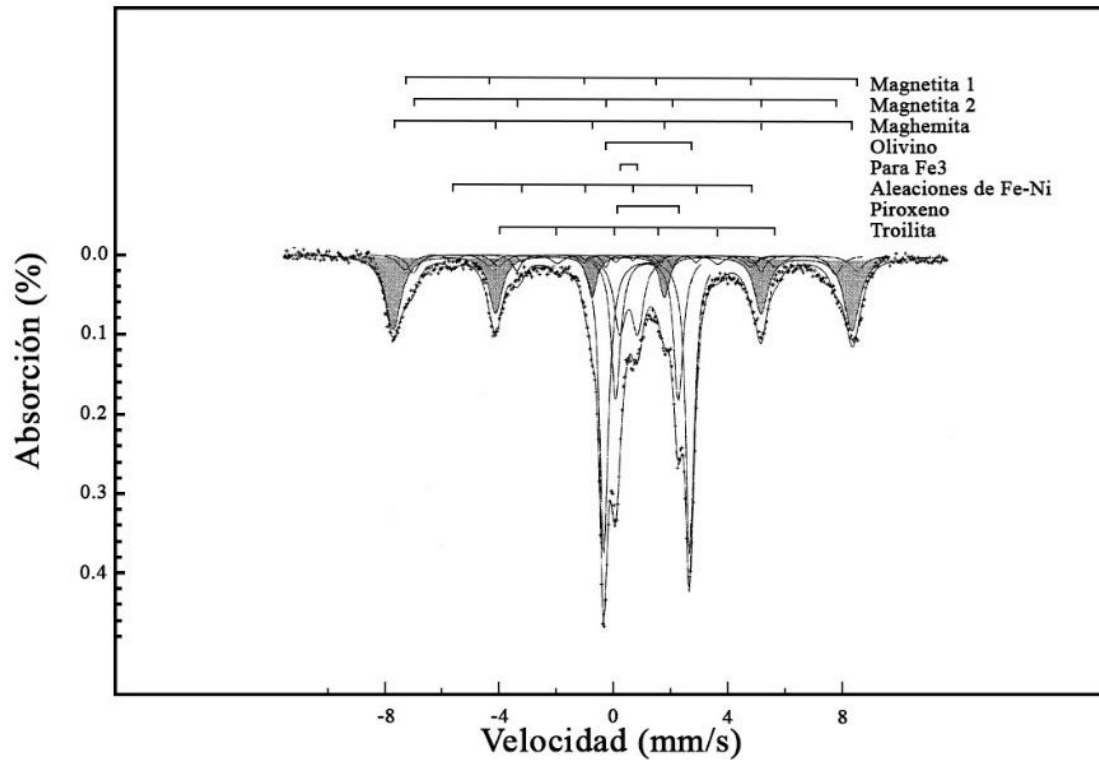


Figura 1.6 Espectro Mössbauer de ^{57}Fe (lado izquierdo) de la meteorita Acfer 074 donde se muestran las bandas más prominentes de las fases minerales magnéticas. Histograma de frecuencias (lado derecho) donde se muestra el porcentaje de oxidación en condritas ordinarias de desiertos calientes del Sahara (a) y no del Sahara (b). Tomado de Bland et al. (1998a).

Índice de intemperismo para condritas CK y R

Debido a que los primeros grados de intemperismo en la escala planteada por Wlotzka (1993) están en función de la oxidación que sufren las aleaciones de Fe-Ni, Rubin y Huber (2005) propusieron un índice de intemperismo para las condritas tipo CK y R que no presentan o tienen pocas aleaciones metálicas. Este índice de intemperismo está basado en la alteración progresiva de los silicatos, la cual se determina con observaciones de lámina delgada en un microscopio con luz transmitida (Tabla 1.7; Rubin y Huber, 2005).

Tabla 1.7 Índice de intemperismo para condritas CK y R. Tomado de Rubin y Huber (2005).

Índice de intemperismo		Descripción
wi-0	No intemperizada	< 5 vol% de los silicatos están teñidos a café
wi-1	Ligeramente intemperizada	5-25 vol% de los silicatos están teñidos a café
wi-2	Moderadamente intemperizada	25-50 vol% de los silicatos están teñidos a café
wi-3	Significativamente intemperizada	50-75 vol% de los silicatos están teñidos a café
wi-4	Altamente intemperizada	75-95 vol% de los silicatos están teñidos a café
wi-5	Severamente intemperizada	> 95 vol% de los silicatos están teñidos a café
wi-6	Extremadamente intemperizada	la tinción en silicatos es casi completa. Hay reemplazamiento significativo de silicatos máficos por filosilicatos

CAPÍTULO II

Planteamiento del problema y objetivos

2. Planteamiento y justificación

Como se abordó anteriormente, existen ambientes terrestres donde la conservación y acumulación de material meteorítico es posible gracias a las condiciones áridas que promueven un intemperismo menos agresivo (Bland et al., 1998a, 2006; Muñoz et al., 2007; Munayco et al., 2013). Cuando estas zonas además presentan escasa vegetación y características geomorfológicas favorables, como extensas planicies claras (Bland et al., 2000a; Schlüter et al., 2002; Muñoz et al., 2007; Ouknine et al., 2019), la implementación de campañas de búsqueda y recolección de meteoritas resulta en la recuperación de un gran número de ejemplares nuevos (p. ej. Zolensky et al., 1990; Bischoff y Geiger, 1995; Bevan, 1996; Gattacceca et al., 2011).

Antes de que se reconociera la existencia de las zonas de acumulación y recolección, el reporte de material meteorítico no era abundante y se conformaba casi por partes iguales de hallazgos y caídas (Meteoritical Bulletin Database, 2020). Posteriormente, con el auge de las campañas de búsqueda y recolección desde finales del siglo XX (Schutt et al., 1993; Schlüter et al., 2002; Harvey, 2003; Bevan, 2006), la cantidad de hallazgos de diversas colecciones, como a nivel mundial, ha tenido un aumento considerable, especialmente en ejemplares pétreos como condritas ordinarias (Bevan, 2006; Hutzler et al., 2016; Ouknine et al., 2019; Meteoritical Bulletin Database, 2020).

En México, las regiones áridas y semi-áridas constituyen aproximadamente el 51% del territorio nacional, extendiéndose principalmente en la mitad septentrional donde se encuentran los desiertos de Chihuahua y Sonora (García, 2004; Cervantes-Ramírez, 2002; González-Medrano, 2012). Sin embargo, pese a la extensa cobertura de los climas áridos en el país, no se han realizado proyectos para determinar zonas potencialmente favorables para la conservación y acumulación de meteoritas. Debido a esto, las campañas de búsqueda y recolección tampoco han sido implementadas, lo que podría estar generando un muestreo incompleto que se ve reflejado en una colección de meteoritas pequeña comparada con las colecciones de otros países, como Chile o Australia (Meteoritical Bulletin Database, 2020), donde se han identificado áreas de recolección densa (p. ej. Bevan et al., 1998; Muñoz et al., 2007).

A pesar de que las alteraciones que sufren las meteoritas en la superficie terrestre pueden ser un problema en el estudio de los procesos y condiciones presentes durante la formación del sistema solar; el estudio del intemperismo en meteoritas contribuye en: **1)** interpretar adecuadamente las fases mineralógicas y características originales de aquellas debidas a la alteración; **2)** identificar los principales procesos y factores que intervienen en la degradación del material meteorítico; y **3)** reconocer regiones cuyas condiciones son favorables para la conservación, acumulación y posible implementación de campañas de búsqueda y recolección de meteoritas.

2.1. Hipótesis y objetivos

En la región norte de la República Mexicana se ha reportado un mayor número de hallazgos de meteoritas a comparación con en el resto del país. Si la tasa de intemperismo que afecta a las meteoritas depende en parte de las condiciones climáticas del ambiente, entonces esta mayor frecuencia de hallazgos observada podría estar indicando la existencia de zonas con condiciones climáticas favorables para la conservación de este tipo de ejemplares.

Con el fin de probar esta hipótesis, el objetivo principal del presente trabajo es analizar la abundancia y distribución espacial de la colección de meteoritas mexicanas para identificar las principales zonas climáticas donde se ha reportado el hallazgo de material meteorítico. Para realizar esto, los objetivos específicos son:

- Realizar una revisión detallada de la literatura sobre intemperismo en meteoritas.
- Elaborar una base de datos de todas las meteoritas mexicanas reportadas hasta la fecha en la que se incluya el tipo de meteorita y las coordenadas de hallazgo.
- Elaborar mapas de distribución espacial en función del tipo de meteorita, la masa y el clima.
- Determinar las características que presentan en común las áreas de recolección densa en desiertos calientes y los ambientes áridos en México para plantear una primera delimitación de posibles zonas de acumulación en el país.
- Considerando el escaso estudio del intemperismo en ejemplares metálicos, entre los objetivos específicos se encuentra proponer un experimento para evaluar el comportamiento electroquímico que permita determinar la velocidad de corrosión en una meteorita metálica a través de técnicas de análisis electroquímico.

CAPÍTULO III

Metodología

3. Metodología

En este capítulo se detalla la metodología llevada a cabo para elaborar la base de datos y los mapas empleados para analizar la abundancia y distribución espacial de la colección de meteoritas mexicanas. Así mismo, se describen las técnicas analíticas utilizadas para evaluar el comportamiento electroquímico y determinar la velocidad de corrosión de la meteorita metálica Catorce b.

3.1. Base de datos

Para la elaboración de la base de datos de las meteoritas mexicanas reportadas se consideraron tanto las caídas como los hallazgos.

La información que se incluyó para cada meteorita fue: nombre, si fue una caída (C) o un hallazgo (H), Estado y coordenadas del lugar donde cayó/fue hallada, año en que cayó/fue hallada, tipo de meteorita (pétreo, metálico-pétreo o metálica), clasificación de acuerdo con los procesos de formación del cuerpo parental (ver Figura 1.2) y masa (en kg). Todos estos datos fueron tomados del Meteoritical Bulletin Database (2020).

Posteriormente, a partir de esta base de datos, se obtuvo la abundancia por tipo de meteorita, tanto de las caídas como de los hallazgos, la abundancia de los hallazgos por Estado y la distribución de frecuencias de las masas de los hallazgos.

3.2. Elaboración de mapas

La visualización de la distribución espacial de los hallazgos en el territorio nacional, así como de las condiciones climáticas presentes a lo largo del país, requirió de los siguientes insumos:

- Base de datos de las meteoritas mexicanas elaborada para este estudio.
- Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos, edición junio 2017, proyección: Cónica Conforme de Lambert (CCL), datum: ITRF08 época 2010.0, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017).
- Precipitación media anual de los Estados Unidos Mexicanos, edición 2006, proyección: CCL, datum: ITRF92, conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000, de INEGI (2006).

- Unidades climáticas de los Estados Unidos Mexicanos, edición 2008, proyección: CCL, datum: ITRF92, conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000 de INEGI (2008).
- Perfiles de suelos de los Estados Unidos Mexicanos, edición 2013, proyección: CCL, datum: ITRF92, conjunto de datos vectoriales escala 1:250 000, de INEGI (2013).

A partir de estos recursos, se elaboraron los mapas de distribución espacial con el programa ArcMap Desktop 10.6. Toda la información espacial anteriormente descrita se homologó a la proyección cónica conforme de Lambert y el datum ITRF2008 para México.

La metodología seguida para la elaboración de cada uno de los mapas fue la siguiente:

- Distribución espacial de las meteoritas mexicanas → se desplegaron las áreas geoestadísticas estatales, del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos, y las coordenadas de todas las meteoritas mexicanas reportadas. Posteriormente, se definieron unidades de análisis, tanto para las caídas como para los hallazgos, las cuales a su vez se clasificaron por tipo de meteorita.
- Distribución espacial de los climas en México → se proyectaron los polígonos de las unidades climáticas de México y se clasificaron por tipo de clima, ordenándolas principalmente en función de la precipitación, desde muy seco hasta subhúmedo.
- Distribución de la precipitación media anual en México → se proyectaron las áreas geoestadísticas estatales y las isoyetas de la precipitación media anual de México. Estas últimas fueron divididas en los siguientes intervalos a partir de los datos disponibles: 100 a 500 mm, 600 a 1000 mm, 1100 a 1500 mm, 2000 a 2500 mm y 3000 a 4500 mm.
- Distribución espacial de los hallazgos en función de la masa → se desplegaron el marco geoestadístico estatal de México y las coordenadas de los hallazgos, los cuales se clasificaron por tipo de meteorita. Para visualizar la masa de cada uno de los ejemplares de cada tipo de meteorita, se mostró la variable “masa” (en kg) con símbolos graduados en una escala logarítmica.
- Distribución de los hallazgos en los climas áridos → se representaron las áreas geoestadísticas estatales de México, los polígonos correspondientes a los climas muy secos (BW), secos (BS₀) y semisecos (BS₁) y las coordenadas de los hallazgos. Se separaron los hallazgos que se encontraran dentro de los climas de interés de los que no y se dividieron por tipo de meteorita para contar su abundancia en cada clima. Adicionalmente, se calculó el área (en m²) que ocupa en el territorio nacional cada uno de los tres tipos de clima árido (BW, BS₀ y BS₁) con la herramienta *calculate geometry*, a partir de los polígonos de dichos climas, y se presentó en porcentaje.
- Distribución espacial de los hallazgos en función de la masa y de los climas → se desplegaron el marco geoestadístico estatal de México, las coordenadas de los hallazgos (clasificadas por tipo de meteorita) y los polígonos de las unidades climáticas de México (clasificadas por tipo de clima). Para visualizar la masa de cada uno de los ejemplares de cada tipo de meteorita, se mostró la variable “masa” (en kg) con símbolos graduados en una escala logarítmica.

- Distribución espacial del pH de los suelos → se desplegaron las áreas geoestadísticas estatales de México y los perfiles de suelo, los cuales se dividieron a partir de los datos disponibles en: pH ácido (< 7), pH neutro (7) y pH básico (≥ 8).

3.3. Análisis electroquímicos

Para estudiar la cinética del proceso, así como el mecanismo y velocidad de corrosión en metales y aleaciones se han desarrollado varios modelos y técnicas experimentales (Revie y Uhlig, 2008; McCafferty, 2010; Tait, 2018).

En este trabajo la técnica electroquímica empleada fue la polarización potenciodinámica, la cual consiste en perturbar el estado estacionario del sistema metal-electrolito al aplicar una rampa de potencial, es decir, una señal de voltaje a una velocidad de barrido constante. Si la perturbación es muy grande, se favorecerá la oxidación o la reducción en la superficie del metal dependiendo del sentido de la polarización. Como respuesta del sistema se tiene una corriente neta de los procesos anódico y catódico. La señal de voltaje y la corriente se grafican en curvas de polarización en un diagrama de potencial contra el logaritmo de la densidad de corriente (McCafferty, 2010; Poursae, 2014; Telegdi et al., 2018).

3.3.1. Preparación de la muestra

La muestra estudiada en este trabajo fue un fragmento de la meteorita metálica Catorce b. De acuerdo con López-García (2018), Catorce b está clasificada como una octaedrita gruesa (ancho de banda promedio de 2.34 ± 0.1 mm) del grupo químico IC. Esta meteorita tiene una composición química de 7.04 wt. % Ni, 0.52 wt. % Co, 0.15 wt. % P, 20.1 ppm Ga y 130 ppm Ge y entre sus características se encuentra la presencia de schreibersitas entre cristales de kamacita, rhabditas y plessita tipo peine y degenerada en la matriz metálica. El fragmento empleado en este estudio tiene dimensiones de $11.08 \times 9.12 \times 5.33 \pm 0.1$ mm, una masa de 2 ± 1 g, presenta una fractura que recorre verticalmente casi un tercio de la muestra y contaba con una superficie pulida con terminado espejo (Figura 3.1; López-García, 2018).

Para la caracterización metalográfica, la superficie pulida fue atacada químicamente con una solución de nital al 10% (ácido nítrico al 64.8% [1.54 ml] en metanol [8.46 ml]). Previo al ataque, la superficie pulida fue limpiada con acetona. Posteriormente, se aplicó la solución con un gotero, gota a gota (4), y se dejó reposar un par de minutos. Finalmente, para quitar cualquier residuo de la solución, la muestra se sometió a baño ultrasónico en acetona por 5 minutos.

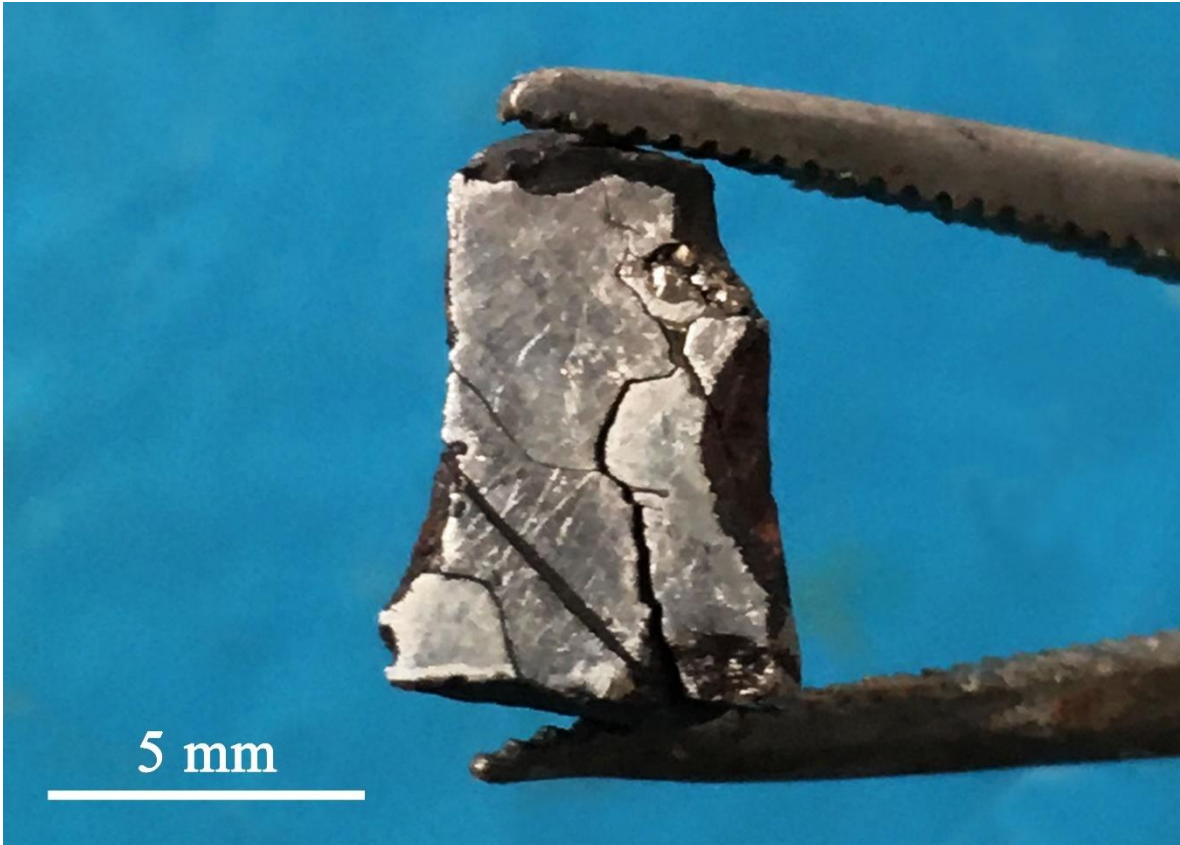


Figura 3.1 Fragmento de Catorce b donde se muestra la superficie pulida y la fractura que la recorre.

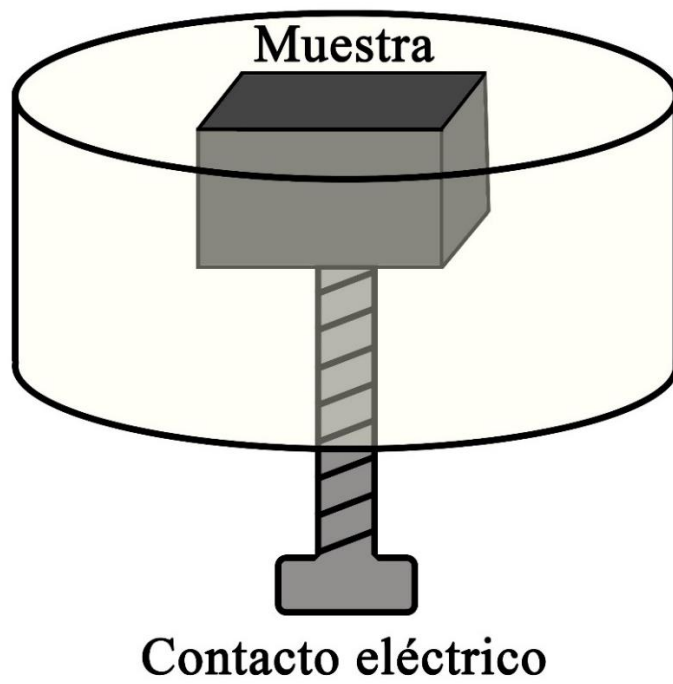


Figura 3.2 Representación gráfica de la probeta usada en este estudio.

Para las pruebas electroquímicas, debido a que la forma irregular y el tamaño de la muestra dificultaban el ensamble de la celda electroquímica, la meteorita fue envuelta en cinta de teflón (con el fin de recuperarla intacta al final de la experimentación) y encapsulada en resina para la preparación de la probeta. En la parte inferior de la probeta se hizo una perforación con taladro para poder introducir un tornillo con el cual hacer el contacto eléctrico con la muestra (Figura 3.2).

Al concluir las pruebas electroquímicas, la muestra fue desmontada de la resina y sometida a baño ultrasónico en acetona por 10 minutos para limpiar cualquier resto de la solución que pudieran continuar corroyéndola.

3.3.2. Caracterización metalográfica

La descripción de la microestructura, así como identificación de las fases mineralógicas en la meteorita, fueron realizadas con un microscopio invertido de luz reflejada OLYMPUS PMG3 y con un microscopio electrónico de barrido Hitachi FlexSEM 1000, ubicados en el laboratorio de metalografía y el laboratorio de análisis instrumental, respectivamente, del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche.

La muestra fue examinada con microscopio de luz reflejada, a diferentes aumentos ópticos, en condiciones de llegada, después del ataque químico y después de llevar a cabo las pruebas electroquímicas. Adicionalmente, se obtuvieron imágenes digitales a través de la cámara acoplada al microscopio.

Para corroborar la presencia de ciertas fases minerales observadas con el microscopio de luz reflejada, se llevaron a cabo análisis semicuantitativos con espectroscopia de energía dispersada (EDS) en condiciones de alto vacío, un voltaje de 20 kV y una distancia de trabajo aproximadamente de 10 mm. Se realizaron análisis puntuales (tiempo de adquisición de 90 s), mapeos elementales (tiempo de adquisición de 5 min) y un perfil lineal (tiempo de adquisición 2 min). Bajo las mismas condiciones de voltaje, vacío y con aumentos de x100 y x150, se obtuvieron imágenes por electrones retrodispersados de diferentes fases minerales, así como de la microtextura.

3.3.3. Pruebas electroquímicas

La prueba de polarización potenciodinámica fue realizada en el laboratorio de electroquímica del Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche.

Los análisis se llevaron a cabo a temperatura ambiente (24° C) con una estación electroquímica de trabajo Solartron 1280C utilizando una celda electroquímica convencional de tres electrodos conformada por (Figura 3.3):

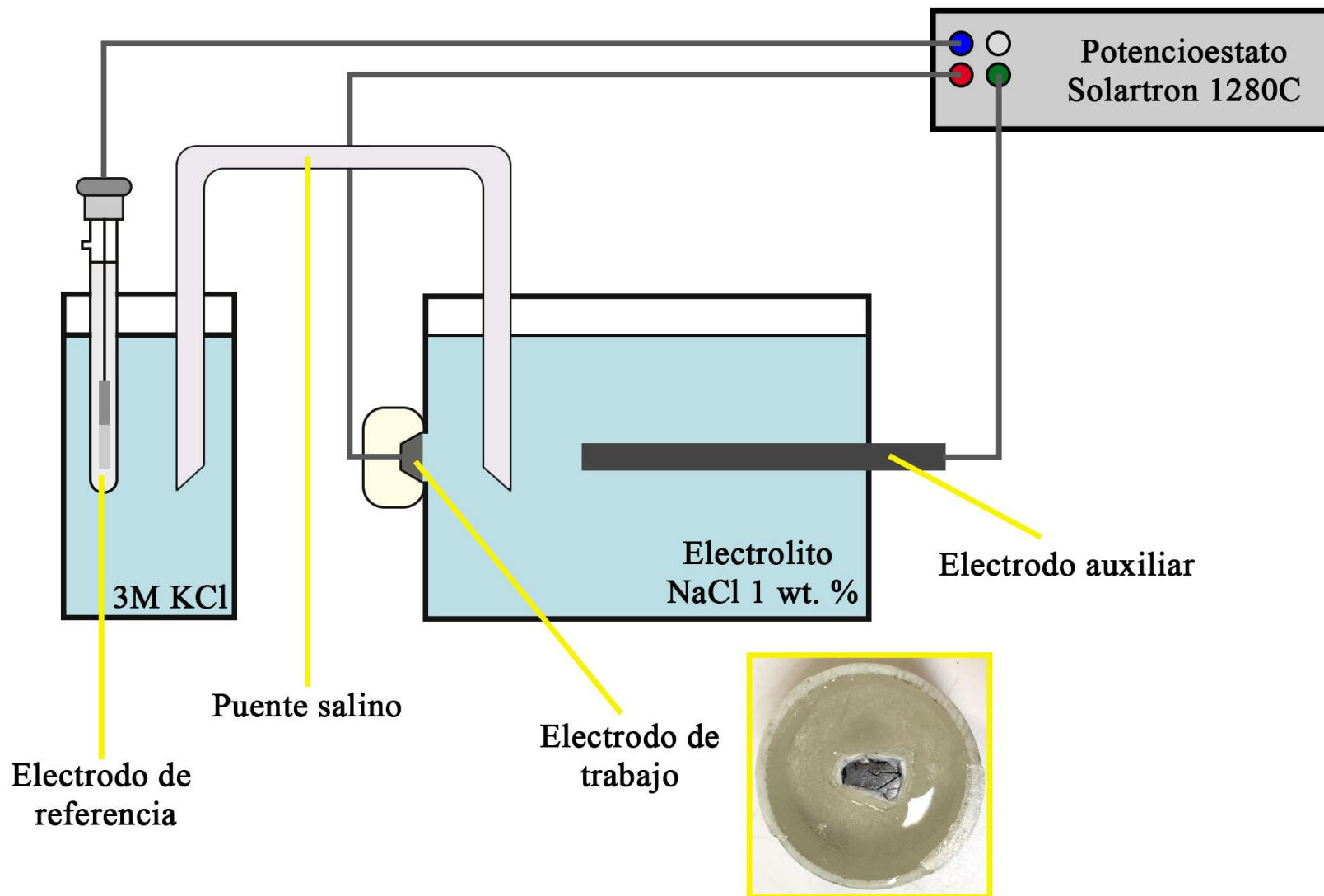


Figura 3.3 Representación gráfica del diseño experimental y los elementos que conforman la celda electroquímica empleada en este estudio.

- Electrodo de trabajo → meteorita Catorce b.
- Electrodo auxiliar → barra de grafito.
- Electrodo de referencia → electrodo de calomel saturado de Ag/AgCl en una solución de KCl 3M conectado a través de un puente salino.
- Electrolito → solución de baja agresividad de NaCl 1 wt. % y pH casi neutro para cuidar la integridad de la muestra.

El análisis electroquímico se realizó en una rutina de dos pasos: primero se llevó a cabo la polarización potenciodinámica aplicando un sobrepotencial catódico de -300 mV a uno anódico de 300 mV, respecto al circuito abierto, a una velocidad de barrido de 20 mV/min. Posteriormente, se realizó una polarización potencioestática aplicando un sobrepotencial catódico de -500 mV por 5 minutos para limpiar la superficie con el fin de evitar pulir la muestra entre cada rutina.

La rutina se realizó por duplicado sobre un área de trabajo de 4.91 mm² en dos zonas de la probeta (Figura 3.4), debido a la fractura que divide la superficie pulida.

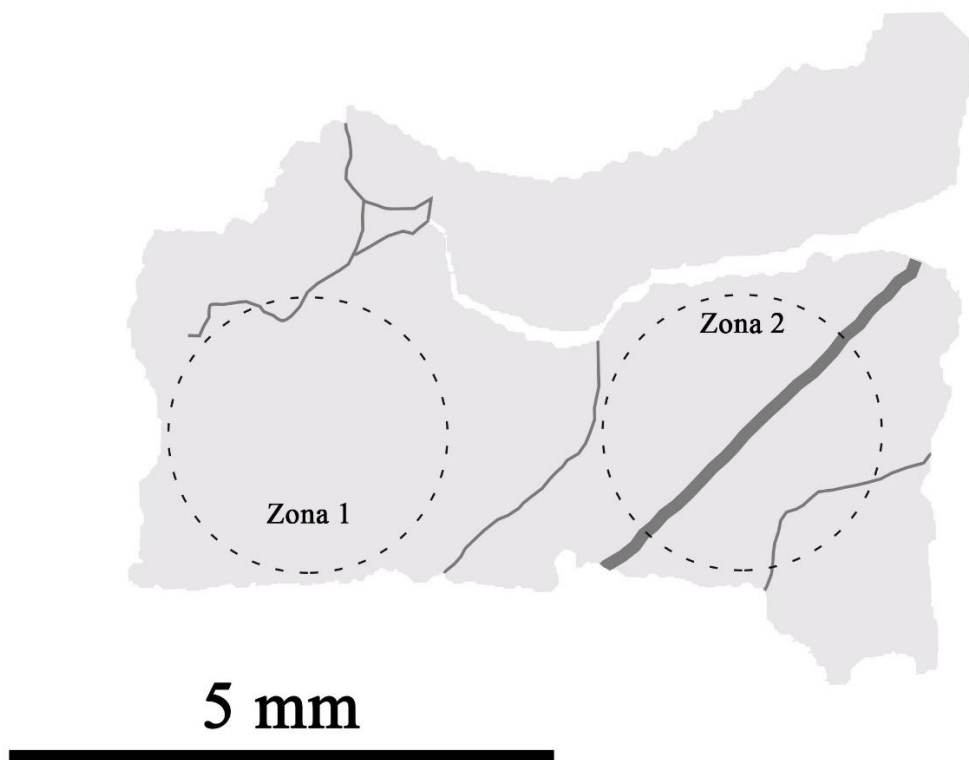


Figura 3.4 Representación gráfica de la superficie de la muestra donde se indican las dos zonas de análisis y la orientación en que se colocó la muestra en la celda electroquímica.

3.3.4. Velocidad de corrosión

Si al aplicar una polarización bastante alta la cinética de la corrosión está controlada por activación (la transferencia de carga es el proceso más lento) y la corrosión en el material es uniforme, la velocidad de corrosión del electrodo de trabajo se puede determinar mediante el método de extrapolación de Tafel en las curvas de polarización (McCafferty, 2010; Taiti, 2018).

La señal de voltaje aplicado, así como la respuesta en corriente del sistema se representan a través de las curvas de polarización las cuales pueden graficarse como potencial (volts) contra el logaritmo de la densidad de corriente (A/cm^2). Estas curvas de polarización se conforman de dos ramas: una anódica, que representa la oxidación, y una catódica, que corresponde a la reducción (Figura 3.5; Revie y Uhlig, 2008; McCafferty, 2010). El punto de inflexión entre las dos ramas se le conoce como potencial estacionario, de circuito abierto o de corrosión (E_{corr}) y es donde ambas semirreacciones de corrosión ocurren a la misma velocidad, encontrándose el sistema en un estado estacionario (Muñoz-Castro, 2008; McCafferty, 2010).

Si en la rama catódica y/o en la anódica existe una región lineal bien definida, a más de 120 mV respecto al potencial de corrosión, esta zona puede extrapolarse hasta que intercepte con el potencial de corrosión. Con ese punto de cruce se puede obtener el valor de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), como se muestra en la Figura 3.5 (Revie y Uhlig, 2008; McCafferty, 2010).

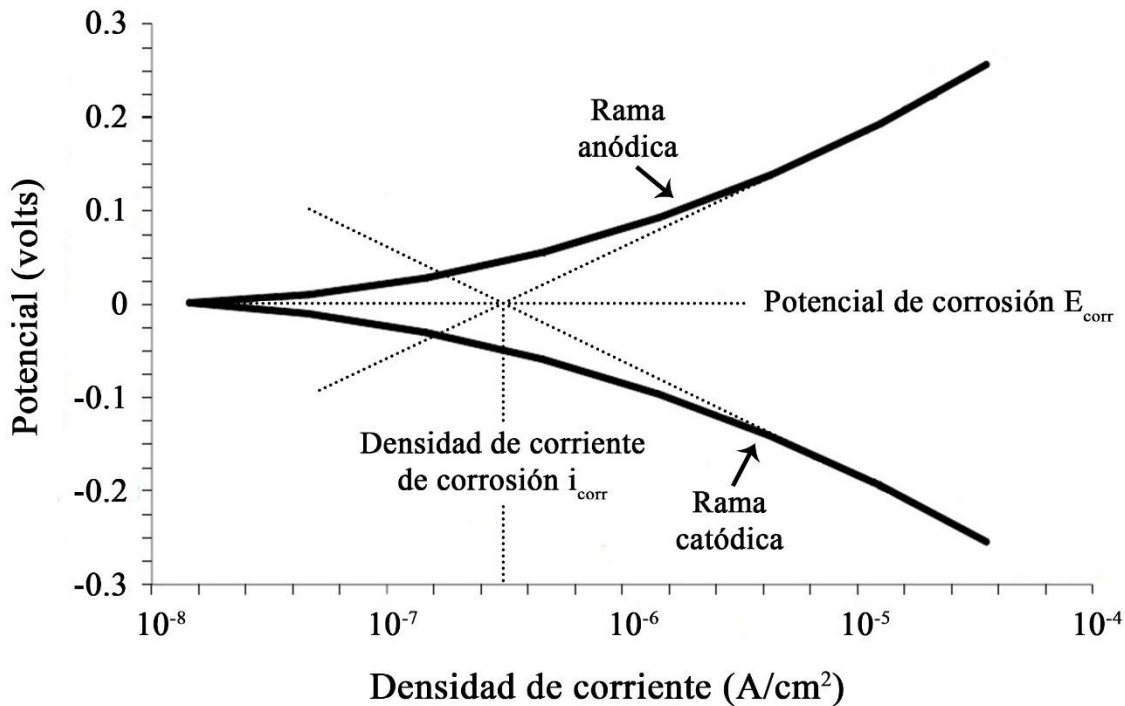


Figura 3.5 Diagrama de potencial contra el logaritmo de la densidad de corriente donde se representa el método de extrapolación de Tafel en las curvas de polarización. Modificado de Muñoz-Castro (2008).

Una vez que se determina la densidad de corriente con la extrapolación de Tafel, se puede calcular la velocidad de corrosión del electrodo de trabajo mediante las leyes de Faraday que establecen una relación entre la transferencia de carga y la transferencia de masa (McCafferty, 2010; Buchanan y Stansbury, 2013):

$$W = \frac{I t M}{n F} \quad [1]$$

donde W es la masa del metal reaccionando en gramos, I es la corriente en amperes, t el tiempo en segundos, M es la masa atómica del metal en gramos por mol, n el número de electrones o equivalentes que participan en la reacción por mol de metal y F es la constante de Faraday (96500 C/equivalentes; Revie y Uhlig, 2008; McCafferty, 2010).

Si la ecuación [1] se divide entre el tiempo y el área del electrodo de trabajo A, se obtiene la velocidad de corrosión (Muñoz-Castro, 2008; Buchanan y Stansbury, 2013):

$$velocidad\ de\ corrosión\ \left(\frac{g}{s\ cm^2}\right) = \frac{W}{t A} = \frac{i_{corr} M}{n F} \quad [2]$$

donde i_{corr} es la densidad de corriente (A/cm^2).

De esta forma, la velocidad de corrosión queda expresada en términos de pérdida de masa por unidad de tiempo por unidad de área. Si se quiere expresar como velocidad de penetración, espesor por unidad de tiempo, la ecuación [2] debe dividirse por la densidad del metal o de la aleación en gramos por cm^3 (Muñoz-Castro, 2008; Buchanan y Stansbury, 2013):

$$velocidad\ de\ corrosión\ \left(\frac{cm}{s}\right) = \frac{i_{corr} M}{n F \rho} \quad [3]$$

CAPÍTULO IV

Meteoritas reportadas en la República Mexicana

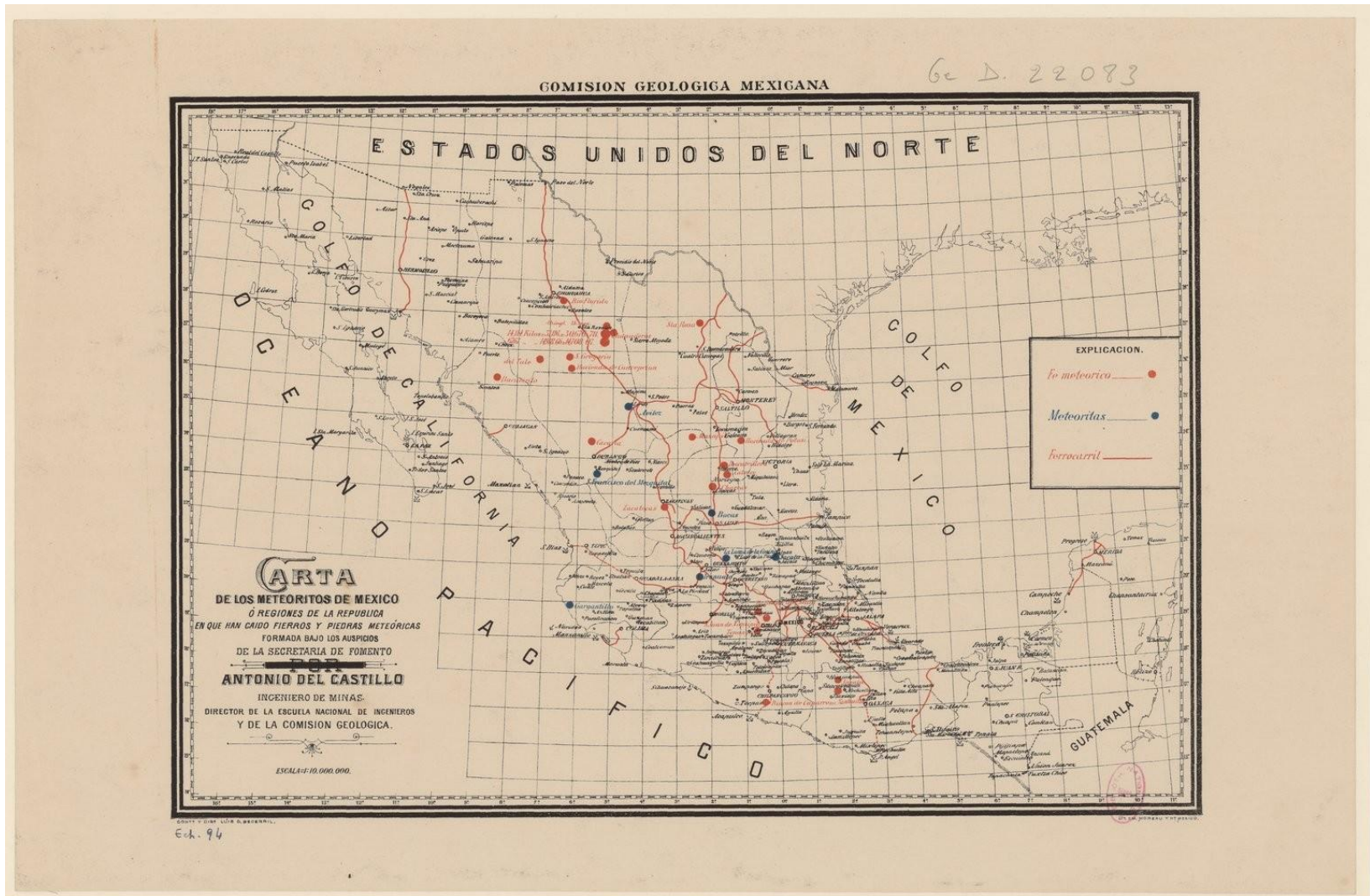
4. Meteorítica en México

Se considera que el estudio de las meteoritas en México inició hacia finales del siglo XIX con los trabajos de Antonio del Castillo (Morales-Rodríguez, 2012), entre los cuales destaca la *Carta de los meteoritos de México o regiones de la República en que han caído fierros y piedras meteóricas* que indicaba la ubicación de las meteoritas encontradas hasta ese momento en el territorio nacional (Fig. 4.1, del Castillo et al., 1893). No obstante, antes de que el estudio de las meteoritas en el país se realizara de manera sistemática, hubo testimonios y reportes tanto de meteoritas que se vieron caer, como de ejemplares que fueron encontrados. Algunas de ellas son: la meteorita metálica Morito, que fue excavada por un herrero alrededor de 1600, cerca de Rancho El Morito, Chihuahua, para extraer algunos fragmentos de ella; la meteorita metálica Toluca, de la cual se han recuperado un gran número de fragmentos desde hace siglos (siendo el primer reporte de este ejemplar en 1776) en el pueblito de Jiquipilco, Estado de México; o la condrita ordinaria Bocas, la primera caída que se reportó en México en 1804, en San Luis Potosí (Buchwald, 1975; Meteoritical Bulletin Database, 2020).

La meteorítica en México ha tenido un mayor auge en la época reciente, dando lugar a diversos trabajos como catálogos (p. ej. Sánchez-Rubio et al., 2001), revisiones sistemáticas (p. ej. Dávalos-Elizondo, 2006), caracterizaciones físicas, petrográficas, mineralógicas y/o geoquímicas (p. ej. Reyes-Salas et al., 2010; Montoya-Pérez, 2016; Terán-Bobadilla et al., 2017; López-García, 2018), trabajos experimentales (p. ej. Cervantes-de la Cruz et al., 2015), entre otros.

4.1. Meteoritas mexicanas

Actualmente, se han reportado 112 meteoritas dentro de la República Mexicana, de las cuales 92 son hallazgos y 20 son caídas. La mayoría de las caídas han sido de meteoritas pétreas (16 condritas ordinarias, 2 condritas carbonosas y 1 acondrita primitiva), solo una meteorita metálica y ninguna meteorita metálico-pétreo. En el caso de los hallazgos, se han encontrado 57 meteoritas metálicas, 32 meteoritas pétreas (29 condritas ordinarias y 3 acondritas HED) y solamente tres meteoritas metálico-pétreas (Tabla 4.1; Meteoritical Bulletin Database, 2020).



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figura 4.1 Carta de los meteoritos de México o regiones de la República en que han caído fierros y piedras meteóricas elaborada por del Castillo et al. (1893). Tomado de la Biblioteca nacional de Francia: http://www.europeana.eu/portal/es/record/9200365/BibliographicResource_3000059511146.html

De las 112 meteoritas reportadas se tiene que: el 51.8% son meteoritas metálicas, el 45.5% son meteoritas pétreas y el 2.7% restante corresponde a meteoritas metálico-pétreas. Como se observa en la Tabla 4.1, de los 92 hallazgos 62% de ellos han sido meteoritas metálicas, 34.8% meteoritas pétreas y 3.2% meteoritas metálico-pétreas. En el caso de las caídas, el 95% han sido de meteoritas pétreas y el 5% restante representa la única caída de una meteorita metálica en el país.

En la Figura 4.2, parecida a la *Carta de los meteoritos* levantada por del Castillo (1893), se muestra un mapa con la distribución y ubicación de las meteoritas reportados en el territorio nacional en función del tipo de meteorita.

La información de las 112 meteoritas mexicanas reportadas hasta la fecha, nombre, si es una caída o hallazgo, Estado de la República y coordenadas del lugar de caída o hallazgo, año en el que fueron vistas caer o halladas, clasificación y masa, se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1 Cantidad de meteoritas reportadas en México. Datos extraídos del Meteoritical Bulletin Database (2020).

Meteoritas encontradas en México				
Tipo de meteorita	Número de hallazgos	Abundancia (%)	Número de caídas	Abundancia (%)
Pétreas	32	34.8	19	95.0
Condritas				
Carbonosas	-		2	
Ordinarias	29		16	
Acondritas				
Primitivas	-		1	
HED	3		-	
Metálico-pétreas	3	3.2	-	-
Pallasitas	3			
Metálicas	57	62	1	5.0
Total	92	100.0	20	100.0

Distribución de las meteoritas reportadas en la República Mexicana

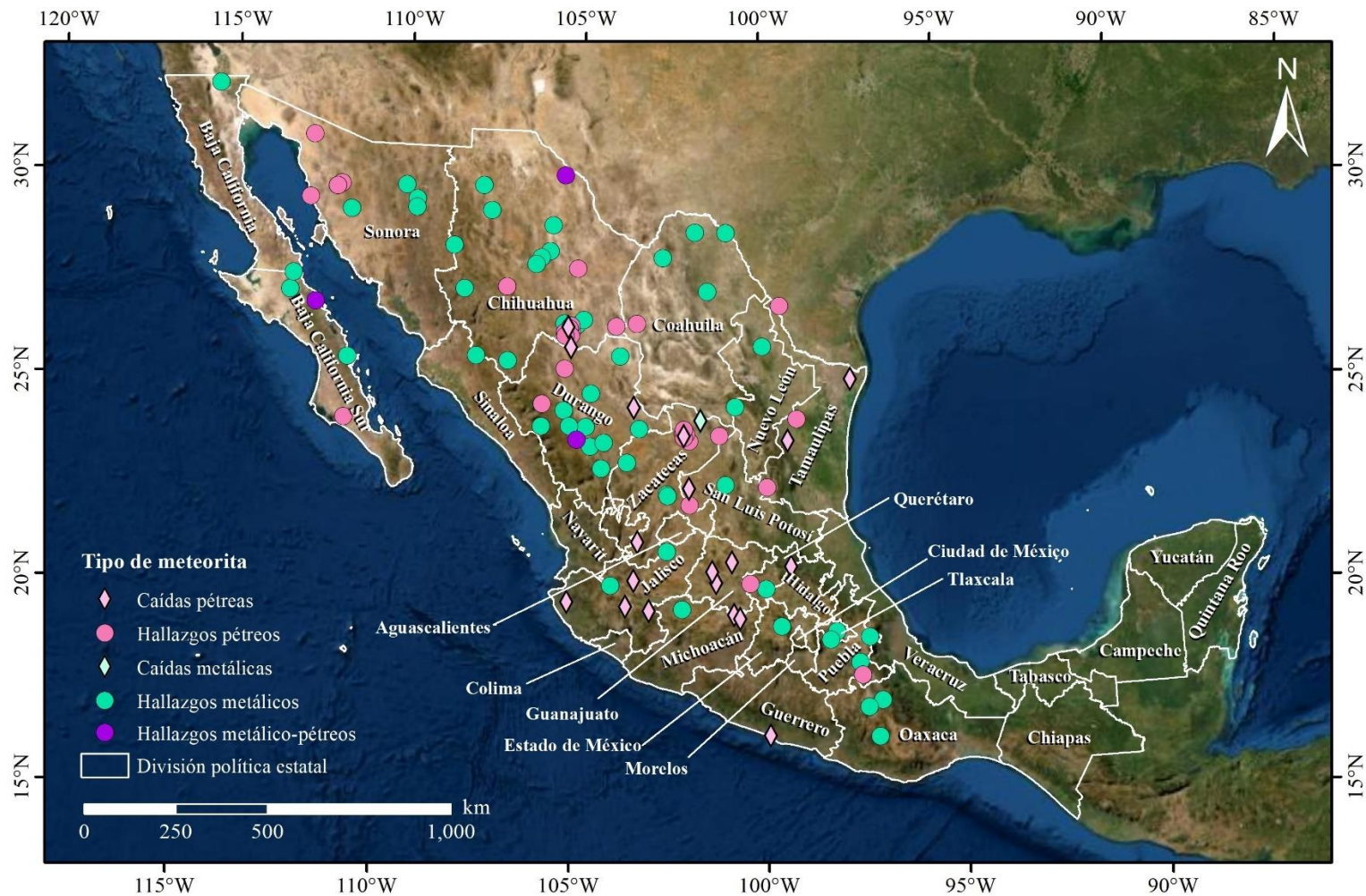


Figura 4.2 Distribución de las meteoritas mexicanas reportadas (caídas y hallazgos) en la República Mexicana. Elaboración propia con información del Meteoritical Bulletin (2020) y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2017).

Tabla 4.2 Base de datos de las meteoritas que se han encontrado en México. Datos extraídos del Meteoritical Bulletin Database.

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
Isla del Espíritu Santo	H	Baja California Sur	24° 31'N, 111° 22'W	1999	Pétreo	L6	0.869
Loreto	H	Baja California Sur	26° 1'N, 111° 22'W	1896	Metálica	IIIAB	94.8
Mesa La Caguama	H	Baja California Sur	27° 35'N, 113° 4'W	1971	Metálica	IAB	6.9
Santa Rosalía	H	Baja California Sur	27° 20'N, 112° 20'W	1950	Metálico-pétreo	Pallasita	1.631
Baja California	H	Baja California Sur	28°N, 113°W	-	Metálica	IIIAB	10
Nova 057	H	Baja California	-	1984	Metálica	IIAB	26.5
Signal Mountain	H	Baja California	32° 30'N, 115° 30'W	1919	Metálica	IVA	63.5
Abajo	H	Chihuahua	26° 48'N, 105° 25'W	1982	Pétreo	H5	0.331
Ahumada	H	Chihuahua	30° 42'N, 105° 30'W	1909	Metálico-pétreo	Pallasita	52.6
Aldama (a)	H	Chihuahua	28° 50'N, 105° 52'W	1985	Metálica	IIIAB	11
Allende	C	Chihuahua	26° 58'N, 105° 19'W	1969	Pétreo	CV3	2000
Buenaventura	H	Chihuahua	29° 48'N, 107° 33'W	1969	Metálica	IIIAB	113.6
Carichic	H	Chihuahua	27° 56'N, 107° 3'W	1983	Pétreo	H5	17
Casas Grandes	H	Chihuahua	30° 24'N, 107° 48'W	1867	Metálica	IIIAB	1550
Chihuahua City	H	Chihuahua	28° 40'N, 106° 7'W	1929	Metálica	IC	54
Chupaderos	H	Chihuahua	27° 0'N, 105° 6'W	1852	Metálica	IIIAB	24300

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
El Carmen	H	Chihuahua	26° 52'N, 105° 14'W	1987	Pétreo	H6	0.629
El Pozo	H	Chihuahua	25° 56'N, 105° 24'W	1998	Pétreo	L5	0.46
Escalón	H	Chihuahua	27°N, 104°W	1979	Pétreo	H4	0.0543
Guadalupe y Calvo	H	Chihuahua	26° 6'N, 106° 58'W	1971	Metálica	IIAB	58.63
Huizopa	H	Chihuahua	28° 54'N, 108° 34'W	1907	Metálica	IVA	140
Juanita de Ángeles	H	Chihuahua	28° 25'N, 105° 5'W	1992	Pétreo	H5	85
Morito	H	Chihuahua	27° 3'N, 105° 26'W	1600	Metálica	IIIAB	10100
Salaices	H	Chihuahua	27° 0'N, 105° 15'W	1971	Pétreo	H4	24.5
San Juan de Allende	H	Chihuahua	26° 56' 24"N, 105° 18' 0"W	1995	Pétreo	L3	0.2
Sierra Blanca	H	Chihuahua	27° 9'N, 104° 54'W	1784	Metálica	IAB	0.405
Tarahumara	H	Chihuahua	28° 30'N, 106° 15'W	1994	Metálica	IIE	2.5
Torreón de Mata	H	Chihuahua	26° 50'N, 105° 25'W	1983	Pétreo	L6	0.61
Tres Castillos	H	Chihuahua	29° 28'N, 105° 48'W	1992	Metálica	No agrupada	150
Uruachic	H	Chihuahua	27° 51'N, 108° 14'W	1989	Metálica	IIIAB	13
Villa Coronado	H	Chihuahua	26° 45'N, 105° 15'W	1983	Pétreo	H5	2.9
Villa Matamoros	H	Chihuahua	26° 45'N, 105° 24'W	1987	Pétreo	L3.7	0.156
Acuña	H	Coahuila	29° 19'N, 100° 58'W	1981	Metálica	IIIAB	217.7

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
Coahuila	H	Coahuila	28° 42'N, 102° 44'W	1837	Metálica	IIAB	2100
El Burro	H	Coahuila	29° 20'N, 101° 50'W)	1939	Metálica	IIAB	35.9
La Esmeralda	H	Coahuila	27° 4'N, 103° 26'W	1999	Pétreo	L6	0.483
Puente del Zacate	H	Coahuila	27° 52'N, 101° 30'W	1904	Metálica	IIIAB	30.79
Aldama (b)	H	Durango	25° 3'N, 106° 0'W	1996	Pétreo	H5	66.5
Avilez	C	Durango	25° 0'N, 103° 30'W	1855	Pétreo	H	0.146
Bella Roca	H	Durango	24° 54'N, 105° 24'W	1888	Metálica	IIIAB	33
Cacaria	H	Durango	24° 30'N, 104° 48'W	1867	Metálica	IIIAB	41.4
Ceniceros	C	Durango	26° 28'N, 105° 14'W	1988	Pétreo	L3.7	1.025
Colonia Obrera	H	Durango	24° 1'N, 104° 40'W	1973	Metálica	IIIE	12.2
Jaralito	H	Durango	26° 15' 57"N, 103° 53' 6"W	1977	Metálica	IAB	11.14
Otinapa	H	Durango	24° 11'N, 105° 2'W	1986	Metálico- pétreo	Pallasita	8.4
Rancho Gomelia	H	Durango	24° 31'N, 105° 15'W	1975	Metálica	IIIAB	15.65
Rancho de la Pila (1882)	H	Durango	24° 7'N, 104° 18'W	1882	Metálica	IIIAB	46.5
Rodeo	H	Durango	25° 20'N, 104° 40'W	1852	Metálica	IID	44
San Francisco del Mezquital	H	Durango	23° 29'N, 104° 22'W	1868	Metálica	IIAB	7.5

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
Santa Clara	H	Durango	24° 28'N, 103° 21'W	1976	Metálica	IVB	63
Santiago de Papasquiario	H	Durango	24° 30'N, 106° 0'W	1958	Metálica	No agrupada	119.5
Cosina	C	Guanajuato	21° 10'N, 100° 52'W	1844	Pétreo	H5	1.2
La Charca	C	Guanajuato	20° 40'N, 101° 17'W	1878	Pétreo	Ordinaria	0.399
Silao	C	Guanajuato	20° 56'N, 101° 23'W	1995	Pétreo	H5	1.71
Acapulco	C	Guerrero	16° 53'N, 99° 54'W	1976	Pétreo	Acapulcoita	1.914
Pacula	C	Hidalgo	21° 3'N, 99° 18'W	1881	Pétreo	L6	3.4
Ameca-Ameca	H	Jalisco	20° 35'N, 104° 4'W	1889	Metálica	Metálica	0.0012
Atemajac	C	Jalisco	20° 4'N, 103° 40'W	1896	Pétreo	L6	0.0942
San Juan de Ocotán	C	Jalisco	20° 42' 42"N, 103° 27' 22"W	2007	Pétreo	L5	1.365
Teocaltiche	H	Jalisco	21° 26'N, 102° 34'W	1903	Metálica	Metálica	10
Tomatlán	C	Jalisco	20° 10'N, 105° 13'W	1879	Pétreo	H6	0.9
Toluca	H	México	19° 34'N, 99° 34'W	1776	Metálica	IAB	3000
El Tigre	C	Michoacán	19° 58' 2"N, 103° 3' 6"W	1993	Pétreo	L6	5
Espíritu Santo	H	Michoacán	20° 0'N, 102° 11'W		Metálica	IIIAB	0.089
Rancho de la Presa	C	Michoacán	19° 52'N, 100° 49'W	1899	Pétreo	H5	0.3
San Pedro Jácuaró	C	Michoacán	19° 46'N, 100° 39'W	1968	Pétreo	LL6	0.46

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
Cruz del Aire	H	Nuevo León	26° 30'N, 100° 0'W	1911	Metálica	No agrupada	23
Zapalinamé	H	Nuevo León	25° 0' 34"N, 100° 45' 0"W	1998	Metálica	IAB	85
Apoala	H	Oaxaca	17° 42'N, 97° 0'W	1889	Metálica	IIIAB	85
Misteca	H	Oaxaca	16° 48'N, 97° 6'W	1804	Metálica	No agrupada	10
Yanhuitlán	H	Oaxaca	17° 32'N, 97° 21'W	1825	Metálica	IVA	421
Los Reyes	H	Puebla	19° 16'N, 97° 17'W	1897	Metálica	IIIAB	19.5
Tlacotepec	H	Puebla	18° 39'N, 97° 33'W	1903	Metálica	IVB	71
Zapotitlán Salinas	H	Puebla	18° 20'N, 97° 30'W	1984	Pétreo	L4	0.0277
Tequisquiapan	H	Querétaro	20° 30'N, 99° 58'W	2012	Metálica	IAB	2.32
Querétaro	H	Querétaro	20° 38'N, 100° 23'W	1971	Pétreo	H4	5
Bocas	C	San Luis Potosí	23°N, 102°W	1804	Pétreo	L6	0.056
Charcas	H	San Luis Potosí	23° 5'N, 101° 1'W	1804	Metálica	IIIAB	1400
Bacubirito	H	Sinaloa	26° 12'N, 107° 50'W	1863	Metálica	No agrupada	22000
Arispe	H	Sonora	30° 20'N, 109° 59'W	1896	Metálica	IC	683
Carbó	H	Sonora	29° 40'N, 111° 30'W	1923	Metálica	IID	454
Cumpas	H	Sonora	30° 0'N, 109° 40'W	1903	Metálica	IIIAB	28.6
El Tiro	H	Sonora	30° 16' 45"N, 111° 49' 2"W	2013	Pétreo	L3	2.44

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
La Ciénega	H	Sonora	30° 12' 7"N, 111° 56' 9"W	2007	Pétreo	H6	7.63
La Ciénega (b)	H	Sonora	30° 12' 3"N, 111° 56' 25"W	2014	Pétreo	L6	6.14
Moctezuma	H	Sonora	29° 48'N, 109° 40'W	1889	Metálica	IAB	1.7
Puerto Libertad	H	Sonora	29° 54'N, 112° 41'W	1973	Pétreo	L	0.066
Quitovac	H	Sonora	31° 25' 34"N, 112° 41' 46"W	2017	Pétreo	L5	9.11
El Boludo	H	Tamaulipas	23° 1' 11"N, 99° 54' 33"W	2015	Pétreo	H5	19.62
El Paso de Águila	C	Tamaulipas	25° 39' 54"N, 97° 36' 12"W	1977	Pétreo	H5	17.23
Nuevo Laredo	H	Tamaulipas	27° 30'N, 99° 30'W	1950	Pétreo	Eucrita	0.5
San José	H	Tamaulipas	24° 42'N, 99° 5'W	1944	Pétreo	H5	0.532
Santa Cruz	C	Tamaulipas	24° 10'N, 99° 20'W	1939	Pétreo	CM2	0.06
Apizaco	H	Tlaxcala	19° 25' 12"N, 98° 7' 48"W	1961	Metálica	IIIAB	38
Santa Apolonia	H	Tlaxcala	19° 13'N, 98° 18'W	1872	Metálica	IIAB	1320
Cerro de los Calvos	H	Zacatecas	24° 20'N, 102° 8'W	1986	Pétreo	H4	0.068
Gruñidora	H	Zacatecas	24° 10'N, 102° 0'W	1998	Pétreo	H4	0.13
La Bandería	H	Zacatecas	24° 21'N, 102° 10'W	1986	Pétreo	LL5	0.0543
La Escondida	H	Zacatecas	24° 20' 30"N, 102° 4' 30"W	1979	Pétreo	H5	0.0082

Nombre	Caída (C)/ Hallazgo (H)	Estado donde cayó/fue hallada	Coordenadas del lugar de caída/hallazgo	Año	Tipo	Clasificación	Masa (kg)
Las Colonas	H	Zacatecas	22° 35'N, 101° 59'W	1994	Pétreo	Howardita	0.148
Mazapil	C	Zacatecas	24° 41'N, 101° 41'W	1885	Metálica	IAB	4
Nuevo Mercurio	C	Zacatecas	24° 18'N, 102° 8'W	1978	Pétreo	H5	50
Nuevo Mercurio (c)	H	Zacatecas	24° 15' 36"N, 102° 8' 27"W	-	Pétreo	L6	0.00168
Nuevo Mercurio (d)	H	Zacatecas	24° 27'N, 102° 8'W	1982	Pétreo	H5-6	0.1386
Rancho Blanco	H	Zacatecas	24° 18'N, 101° 11'W	1987	Pétreo	Eucrita	0.155
Sauceda de la Borda	H	Zacatecas	22° 49' 16"N, 102° 31' 29"W	2016	Metálica	IAB	41
Sombrerete	H	Zacatecas	23° 38'N, 103° 40'W	1958	Metálica	IAB	10
Tuxtuc	C	Zacatecas	21° 40'N, 103° 22'W	1975	Pétreo	LL5	30
Zacatecas (1792)	H	Zacatecas	22° 49'N, 102° 34'W	1792	Metálica	No agrupada	1000
Durango	H	-	-	1804	Metálica	IIIAB	164
Xiquipilco no. 2	H	-	-	1949	Metálica	Metálica	1.124
Zacatecas (1969)	H	-	-	1969	Metálica	IIIAB	6.66

CAPÍTULO V

Clima de México

5. Clima

El clima es el promedio de las condiciones atmosféricas en un lugar determinado a lo largo de una escala de tiempo de decenas a miles de años. Se puede definir a partir de las mismas propiedades atmosféricas que se emplean para describir al estado de la atmósfera, como temperatura, precipitación, humedad, presión del aire, dirección y velocidad del viento y cobertura de nubes (Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Hartmann, 2016; Rohli y Vega, 2017).

La distribución del clima alrededor de la Tierra está controlada por la insolación, la latitud, la topografía, la cercanía a los cuerpos de agua, la altitud, las corrientes oceánicas y la dirección prevalente del viento, factores físicos que varían de región en región (Khan y Arsalan, 2007; Hartmann, 2016; Rohli y Vega, 2017). Debido a la variedad de climas posibles, se han propuesto distintos sistemas de clasificación que integren varias características climáticas que agrupen las similitudes y destaquen las diferencias que definen un clima en una región (Khan y Arsalan, 2007; Belda et al., 2014; Rohli y Vega, 2017). Estas clasificaciones pueden ser de dos tipos:

- Genéticas → sistemas cualitativos que categorizan a los climas solamente considerando los factores o mecanismos físicos que los causan, como la radiación solar, las masas de aire, la circulación atmosférica, los efectos topográficos, entre otros (Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).
- Empíricas → sistemas cuantitativos que se basan en mediciones directas de las propiedades atmosféricas, como la temperatura o la precipitación, o en índices que combinen estas mediciones, como la aridez o la evaporación, para establecer límites entre los climas (Khan y Arsalan, 2007; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).

5.1. Clasificación de Köppen

Una de las clasificaciones de clima más empleadas es la clasificación empírica de Köppen, desarrollada en 1900 por Wladimir Köppen y posteriormente modificada por el propio autor y los climatólogos Geiger, Trewartha y Horn (Belda et al., 2014; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017). Este sistema define las zonas climáticas en sentido latitudinal, a partir de mediciones mensuales y anuales de temperatura y precipitación, dando

lugar a 6 principales grupos de clima: A (tropical), B (árido), C (templado), D (frío), E (polar) y H (de montaña); los cuales a su vez se dividen en subdivisiones de segundo y tercer orden (Lohmann et al., 1993; García, 2004; Peel et al., 2007; Khan y Arsalan, 2007; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017):

- Climas tropicales (A) → grupo más caluroso donde la temperatura media del mes más frío es mayor o igual a los 18° C. Se dividen en tres tipos con base en la distribución de la precipitación anual: (f) con precipitaciones durante todos los meses del año, (m) con estación seca corta y (w) con estación seca en invierno (Khan y Arsalan, 2007; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014).
- Climas áridos (B) → grupo donde la evaporación supera a la precipitación durante la mayor parte del año. Estos climas se dividen de dos formas: a partir de la aridez en (W) desierto y (S) estepa; y en función de la temperatura media anual en (h) cálido y (k) frío (Kottek et al., 2006; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).
- Climas templados (C) → grupo de climas donde la temperatura media del mes más frío es mayor a los 0° C, pero menor a los 18° C; mientras que la temperatura media del mes más cálido es mayor a los 10° C. Se dividen de dos maneras: de acuerdo con la estacionalidad de las precipitaciones en (s) verano seco, (w) invierno seco y (f) sin estación seca; y a partir de la temperatura media mensual en (a) verano cálido, (b) verano templado y (c) verano frío (Khan y Arsalan, 2007; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).
- Climas fríos (D) → grupo de climas parecido al grupo C, pero la temperatura media del mes más frío es menor a los 0° C. Al igual que los climas templados, se dividen de dos maneras: de acuerdo con la estacionalidad de las precipitaciones en (s) verano seco, (w) invierno seco y (f) sin estación seca; y a partir de la temperatura media mensual en (a) verano cálido, (b) verano templado, (c) verano frío y (d) invierno muy frío (Khan y Arsalan, 2007; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).
- Climas polares (E) → grupo de climas más fríos donde la temperatura media del mes más cálido es menor a los 10° C. Dado que en las regiones polares hay muy poca humedad en el aire, estos climas se dividen sólo en función de la temperatura en (T) tundra y (F) hielo perpetuo o helado (Khan y Arsalan, 2007; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).
- Climas de montaña (H) → grupo que refleja la variación compleja del clima en las montañas debido a la orientación con respecto al sol (si son ladera de solana o umbría), la altitud (la temperatura disminuye con la altitud a una tasa de 1° C cada 100 m) y la precipitación debida a los vientos húmedos (si son vertientes sotavento o barlovento; Zúñiga-López y Crespo-del Arco, 2014; Rohli y Vega, 2017).

En la Tabla 5.1 se muestra de manera resumida los grupos climáticos de la clasificación climática de Köppen, así como sus subdivisiones y los criterios que se toman para definir cada división.

Tabla 5.1 Descripción y criterios de las divisiones y subdivisiones de la clasificación climática de Köppen. Tomado de Kottek et al. (2006), Peel et al. (2007) y Zúñiga-López y Crespo-del Arco (2014).

Grupo principal	Subdivisión de segundo orden	Subdivisión de tercer orden	Descripción	Criterio*
A			Tropical	$T_{\min} \geq 18^{\circ} \text{C}$
	f		húmedo	$P_{\min} \geq 60 \text{ mm}$
	m		monzónico	$P_{\text{anual}} \geq 25(100 \text{ mm} - P_{\min})$
	w		de sabana	$P_{\min} < 60 \text{ mm}$
B			Árido	$P_{\text{anual}} < 10 P_{\text{umbral}}$
	W		desértico	$P_{\text{anual}} \leq 5 P_{\text{umbral}}$
	S		estepa	$P_{\text{anual}} > 5 P_{\text{umbral}}$
		h	cálido	$T_{\text{anual}} \geq 18^{\circ} \text{C}$
		k	frío	$T_{\text{anual}} < 18^{\circ} \text{C}$
C			Templado	$0^{\circ} \text{C} < T_{\min} < 18^{\circ} \text{C}$ $T_{\max} > 10^{\circ} \text{C}$
	s		verano seco	$P_{\text{vmin}} < 40 \text{ mm}$ $P_{\text{imax}} > 3 P_{\text{vmin}}$
	w		invierno seco	$P_{\text{imin}} < P_{\text{vmin}}$ $P_{\text{vmax}} > 10 P_{\text{imin}}$
	f		sin estación seca	otros casos
		a	verano cálido	$T_{\max} \geq 22^{\circ} \text{C}$
		b	verano templado	$T_{\max} < 22^{\circ} \text{C}$ por lo menos 4 meses con $T_{\text{men}} \geq 10^{\circ} \text{C}$
		c	verano frío	de 1 a 3 meses con $T_{\text{men}} \geq 10^{\circ} \text{C}$
D			Frío	$T_{\min} \leq 0^{\circ} \text{C}$ $T_{\max} > 10^{\circ} \text{C}$
	s		verano seco	$P_{\text{vmin}} < 40 \text{ mm}$ $P_{\text{imax}} > 3 P_{\text{vmin}}$
	f		invierno seco	$P_{\text{imin}} < P_{\text{vmin}}$ $P_{\text{vmax}} > 10 P_{\text{imin}}$
	w		sin temporada seca	otros casos
		a	verano cálido	$T_{\max} \geq 22^{\circ} \text{C}$
		b	verano templado	$T_{\max} < 22^{\circ} \text{C}$ por lo menos 4 meses con $T_{\text{men}} \geq 10^{\circ} \text{C}$
		c	verano frío	de 1 a 3 meses con $T_{\text{men}} \geq 10^{\circ} \text{C}$
	d	invierno muy frío	parecido a la subdivisión c, pero $T_{\min} < -38^{\circ} \text{C}$	

Grupo principal	Subdivisión de segundo orden	Subdivisión de tercer orden	Descripción	Criterio*
E			Polar	$T_{\max} < 10^{\circ} \text{C}$
	T		tundra	$0^{\circ} \text{C} \leq T_{\max} < 10^{\circ} \text{C}$
	F		helado	$T_{\max} < 0^{\circ} \text{C}$
H			De montaña	

* T_{anual} = temperatura media anual, T_{min} = temperatura del mes más frío, T_{max} = temperatura del mes más cálido, T_{men} = temperatura media mensual, P_{anual} = precipitación media anual en mm, P_{min} = precipitación del mes más seco en mm, P_{vmin} = precipitación del mes más seco en verano en mm, P_{imin} = precipitación del mes más seco en invierno en mm, P_{vmax} = temperatura del mes más húmedo en verano en mm, P_{imax} = temperatura del mes más húmedo en invierno en mm, P_{umbral} = valor umbral de la precipitación (para los climas B, medida en mm) que se obtiene al calcular el índice de aridez a partir de T_{anual} y P_{anual} :

$$P_{\text{umbral}} = \begin{cases} 2T_{\text{anual}} & \text{si } 2/3 \text{ de } P_{\text{anual}} \text{ ocurre en invierno} \\ 2T_{\text{anual}} + 28 & \text{si } 2/3 \text{ de } P_{\text{anual}} \text{ ocurre en verano} \\ 2T_{\text{anual}} + 14 & \text{otros casos} \end{cases}$$

El verano o invierno se definen como el periodo de seis meses más cálidos o fríos, respectivamente, del año.

5.2. Clasificación de Köppen adaptada a México

De acuerdo con García (2004), dado que el sistema de Köppen define las zonas climáticas de manera latitudinal, no refleja exactamente las condiciones climáticas que se presentan en un país como México donde los cambios de clima son debidos principalmente a las grandes variaciones de altitud, aunque se encuentre ubicado dentro de una zona tropical. Por esta razón, García (2004) propuso una serie de modificaciones y adaptaciones a esta clasificación (agregando nuevas descripciones y subdividiendo algunos tipos climáticos, a partir de las mediciones de temperatura y precipitación registradas en las estaciones meteorológicas del país) para representar la diversidad climática de la República Mexicana.

Dado que la explicación de cada una de las modificaciones anteriormente mencionadas sale del enfoque del presente estudio, se dirige al lector al trabajo original, *Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen* (García, 2004). No obstante, se presenta una breve descripción y la distribución de los climas presentes en México, así como tablas que resumen las aportaciones más importantes de la adaptación para México de la clasificación climática de Köppen hechas por García (2004; Tablas 5.2, 5.3 y 5.4).

Climas tropicales

Los climas A o tropicales se distribuyen a lo largo de las vertientes mexicanas del Pacífico, desde Sinaloa hasta Chiapas, abarcando desde el nivel del mar hasta una altitud de 1000 m; y las vertientes del Golfo de México, desde el paralelo 25° hacia el sur a lo largo de la llanura costera, la base de la Sierra Madre Oriental y de las montañas de Chiapas, así como en gran parte de la península de Yucatán (García, 2004; Rzedowski, 2006; SEMARNAT, 2010).

Los climas de este grupo pueden ser de dos tipos:

- Climas A o cálidos → representan el 24.1% del territorio nacional, extendiéndose en todo Tabasco; gran parte de Chiapas, Colima, Guerrero, Morelos, Nayarit y Veracruz; al sur de Tamaulipas; al sur y oriente de Sinaloa; una parte del oriente de San Luis Potosí; la región costera de Jalisco; la región costera y centro de Michoacán; la región costera y el noreste de Oaxaca; una parte del suroeste del Estado de México y Puebla; y en casi toda la península de Yucatán (INEGI, 1991; SEMARNAT, 2010).
- Climas A(C) o semicálidos → cubren 4.4% del país, encontrándose en la región costera y centro de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, el centro de Veracruz, en algunas partes del sur y centro de Morelos, al suroeste y noreste de Puebla, al noreste de Tamaulipas y en la parte centro oriental de Nuevo León (INEGI, 1991; SEMARNAT, 2010).

Estos climas pueden dividirse a su vez en función de la precipitación media anual en: húmedos, aquellos con lluvias todo el año y un régimen de precipitación anual entre los 1000 y 4000 mm; y subhúmedos, con lluvias más abundantes en verano, teniendo precipitaciones anuales entre 600 y 2000 mm (INEGI, 1991; García, 2004; SEMARNAT, 2010).

Climas áridos

Los climas B o áridos se encuentran en mayor o menor medida en 25 de los 32 Estados que integran a la República Mexicana: Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Coahuila y Sonora se encuentran casi completamente cubiertos; mientras que Colima, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Ciudad de México, Estado de México, Michoacán, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas, Tlaxcala, Yucatán y Zacatecas están parcialmente cubiertos (Cervantes-Ramírez, 2002; Abd El-Ghani et al., 2017).

Se reconocen tres modalidades de climas áridos en función del grado de humedad (García, 2004):

- Climas BW o muy secos → caracterizados por tener 12 meses secos y un régimen de precipitación media anual menor a 300 mm. Ocupan un 20.8% del territorio nacional distribuyéndose en gran parte de la península de Baja California, el occidente de Sonora, al norte y este de Chihuahua, el occidente de Coahuila, noreste de Durango, algunas partes al norte de Zacatecas y en una parte del noroeste de Sinaloa (INEGI, 1991; Hernández y García, 1997; Cervantes-Ramírez, 2002; García, 2004).
- Climas BS₀ o secos → presentan 10 a 11 meses secos y una precipitación media anual entre 300 y 600 mm. Cubren el 13.5% de la superficie del país, extendiéndose al este de Chihuahua, al noreste de Coahuila, noreste de Durango, al norte de Zacatecas y de San Luis Potosí, en la base de la Sierra Madre Occidental (en Sonora y Sinaloa), algunas partes del norte y sur de Tamaulipas y Nuevo León y al noroeste y sur de la Península de Baja California. También se distribuyen en algunas zonas de la región

austral del país en Hidalgo, Querétaro, Michoacán, Puebla, Oaxaca y una franja angosta de la península de Yucatán (INEGI, 1991; Hernández y García, 1997; Cervantes-Ramírez, 2002; García, 2004).

- Climas BS₁ o semisecos → registran de 8 a 10 meses secos y un régimen de lluvias anual entre 600 y 1000 mm. Representan el 16.7% del territorio nacional cubriendo las laderas bajas de la Sierra Madre Occidental (oriente de Sonora y centro de Sinaloa), el centro de Chihuahua y Durango, gran parte de Zacatecas, algunas zonas de Nuevo León, Coahuila y San Luis Potosí, la planicie costera de Tamaulipas, las partes bajas de la Mesa Central (Guanajuato, Querétaro e Hidalgo); y pequeñas regiones del centro y sur del país en Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Estado de México, Ciudad de México, Puebla, Veracruz, Oaxaca y el noroeste de la península de Yucatán (INEGI, 1991; Hernández y García, 1997; Cervantes-Ramírez, 2002; García, 2004).

Climas templados

Los climas C o templados son característicos de las regiones montañosas de México, extendiéndose en gran parte de todas las cadenas montañosas del país, como la Sierra Madre Occidental y Oriental, el Sistema Volcánico Transversal, la Sierra Madre Sur y las Sierras de Chiapas y Oaxaca; así como en las mesetas (García, 2004; Rzedowski, 2006; SEMARNAT, 2010).

Los climas montañosos que se identifican son;

- Climas C o templados → cubren el 17.9% de la superficie del país y registran un régimen de precipitación media anual entre 600 y 4000 mm. Se distribuyen en algunas zonas montañosas de Baja California; el oriente de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Oaxaca; el occidente de Chihuahua y Durango; el sureste de Coahuila; centro y suroeste de Tamaulipas; centro y oriente de Nuevo León; el sur de Zacatecas; centro y sur de Guanajuato; norte de Morelos y Michoacán; centro de Guerrero; centro y norte de Hidalgo; casi todo el Estado de México, Jalisco y Puebla; en gran parte de la Ciudad de México y en toda Tlaxcala; algunas partes de San Luis Potosí, Querétaro y Veracruz; y en las sierras de Chiapas (INEGI, 1991; García, 2004).
- Climas C(E) o semifrío → presentan una precipitación media anual de 600 a 1000 mm. Se encuentran en el 2.6% del territorio nacional, cubriendo el occidente de Chihuahua y Durango, así como algunas partes de Baja California Norte, Nuevo León, Hidalgo, la Ciudad de México, el Estado de México, Oaxaca, Puebla y Veracruz (INEGI, 1991; García, 2004).

Climas fríos

Los climas E o fríos cubren áreas reducidas correspondientes a las mayores elevaciones del país, como el Nevado de Toluca o el Popocatepetl, donde la nieve se conserva todo el año. Representan sólo el 0.05% del territorio nacional (García, 2004; SEMARNAT, 2010).

En la Figura 5.1 se muestra un mapa con la distribución de climas en la República Mexicana a partir de las modificaciones y adaptaciones realizadas por García (2004); mientras que en la Figura 5.2 se presenta una forma más resumida de la distribución de climas de acuerdo con la designación asignada en las modificaciones anteriormente mencionadas.

Tabla 5.2 Resumen de las modificaciones y adaptaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para climas húmedos, referentes a la temperatura, para México. Tomado de García (2004).

(CLIMAS HÚMEDOS)				
Designaciones para describir las condiciones de temperatura	Símbolo	TEMPERATURA MEDIA (° C)		
		Anual	del mes más frío	del mes más cálido
(Muy cálido)	A	sobre 26°	sobre 18°	
(Cálido)	A	(entre 22° y 26°)	sobre 18°	
(Semicálido del grupo A)	A(C)	(entre 18° y 22°)	sobre 18°	
(Semicálido del grupo C)	(A)C	mayor a 18°	entre 0° y 18°	(sobre 6.5°)
Templado con verano cálido	Ca	(entre 12° y 18°)	entre 0° y 18°	sobre 22°
Templado con verano templado	Cb	(entre 12° y 18°)	entre 0° y 18°	(entre 6.5° y 22°)
(Semifrío con verano templado)	C(b')	(entre 5° y 12°)	entre 0° y 18°	(entre 6.5° y 22°)
(Semifrío con verano cálido)	Cc	(entre 5° y 12°)	entre 0° y 18°	menos de 4 meses con temperatura mayor de 10°
(Frío)	E(T)C E(T)	(entre -2° y 5°)	sobre 0°	(entre 0° y 6.5°)
(Muy frío)	EF	(menor de -2°)		menor de 0°

Las descripciones, símbolos y criterios en paréntesis destacan las modificaciones hechas por García (2004). Aquellas descripciones, símbolos y criterios que no se encuentran en paréntesis, se emplean como están descritas en el sistema de clasificación de Köppen.

Tabla 5.3 Resumen de las modificaciones y adaptaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para climas áridos, referentes a la temperatura, para México. Tomado de García (2004).

(CLIMAS ÁRIDOS) (grupo B)				
Designaciones para describir las condiciones de temperatura	Símbolo	TEMPERATURA MEDIA (° C)		
		Anual	del mes más frío	del mes más cálido
(Muy cálido)	(h')	(sobre 22°)	(sobre 18°)	
(Cálido)	(h')h	(sobre 22°)	(bajo 18°)	
(Semicálido)	h'(h)	(entre 18° y 22°)	(sobre 18°)	
(Semicálido)	h	(entre 18° y 22°)	(bajo 18°)	
(Templado con verano cálido)	k	(entre 12° y 18°)	(entre 0° y 18°)	sobre 18°
(Templado con verano templado)	k'	(entre 12° y 18°)	(entre 0° y 18°)	bajo 18°
(Semifrío)	(k'')	(entre 5° y 12°)	(entre 0° y 18°)	(bajo 18°)

Las descripciones, símbolos y criterios en paréntesis destacan las modificaciones hechas por García (2004). Aquellas descripciones, símbolos y criterios que no se encuentran en paréntesis, se emplean como están descritas en el sistema de clasificación de Köppen.

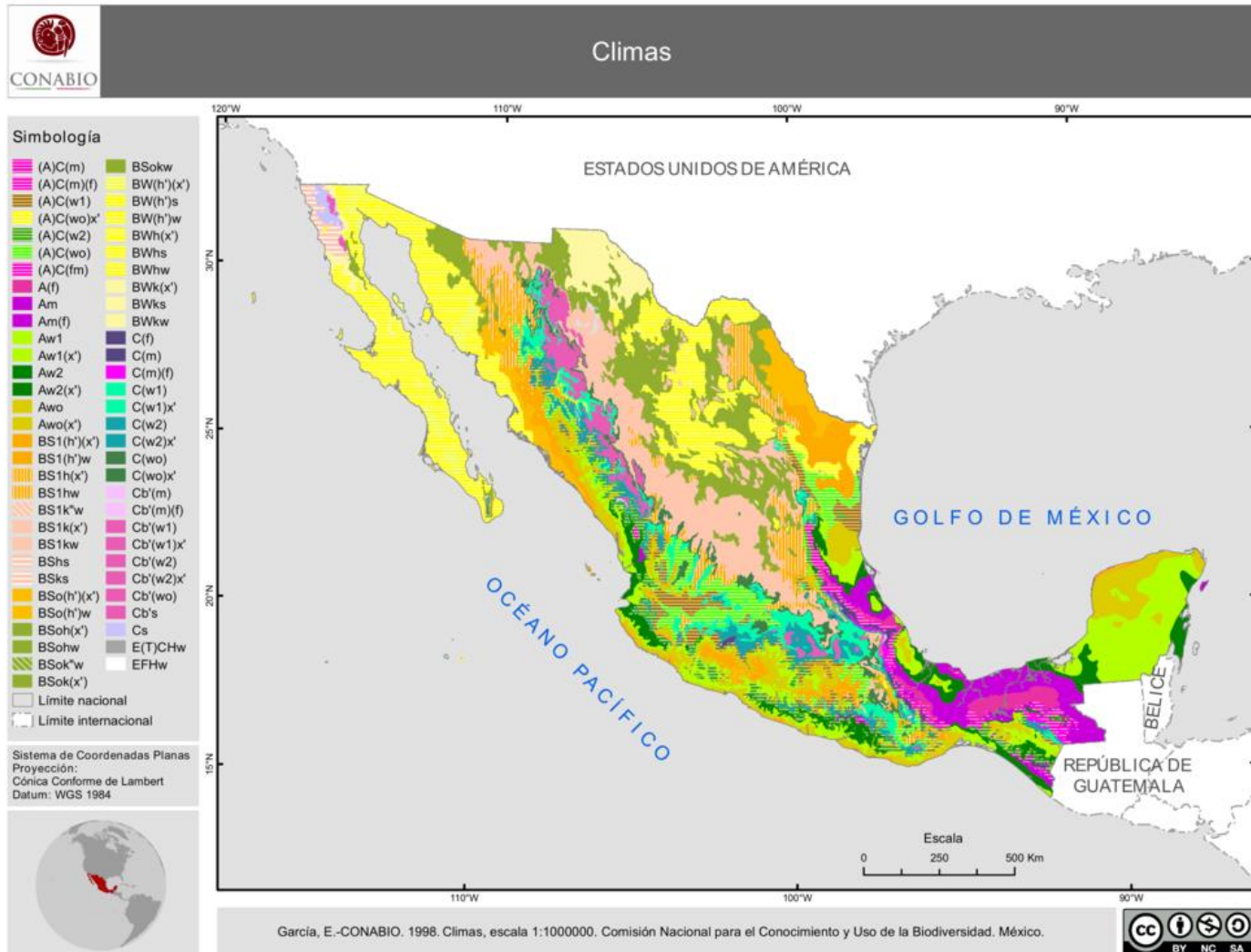


Figura 5.1 Mapa de climas 1:1 000 000 de la República Mexicana de acuerdo con las modificaciones realizadas por García (2004) a la clasificación de Köppen. Tomado de CONABIO (1998).

Distribución de los tipos de clima en la República Mexicana

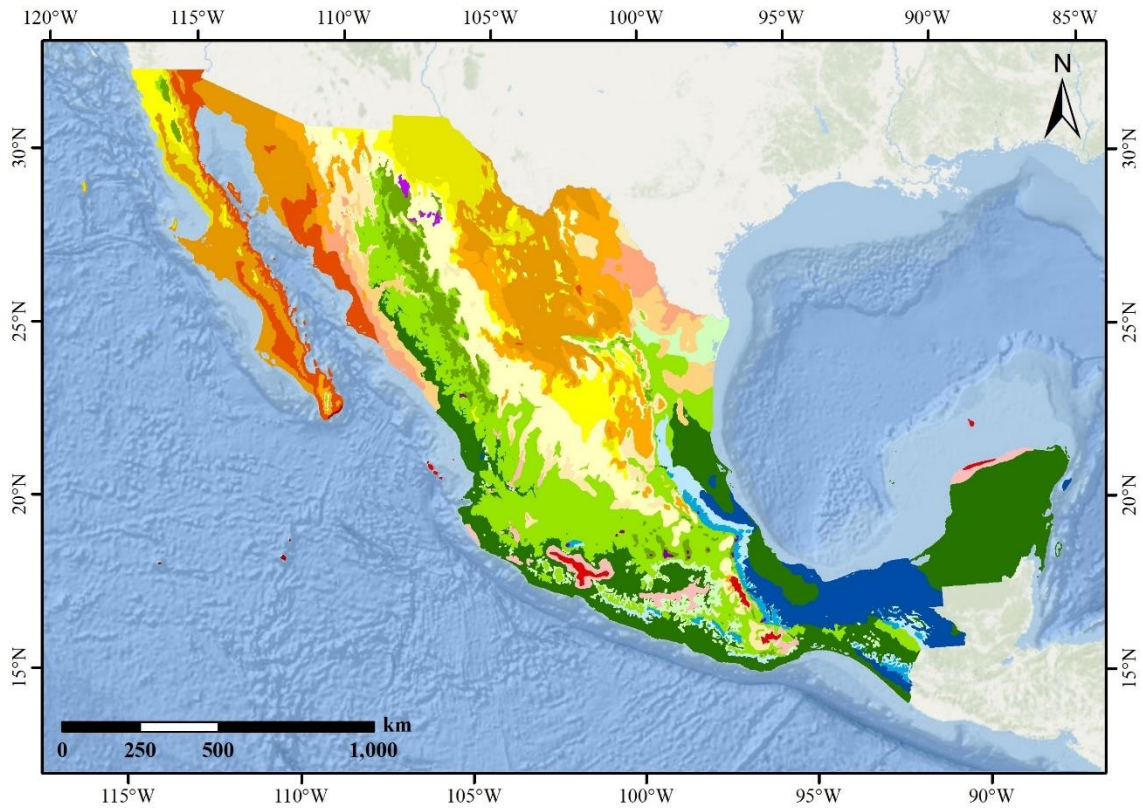


Figura 5.2 Mapa del tipo de climas presentes en la República Mexicana. Elaboración propia con información de las Unidades climáticas y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2008, 2017).

Tabla 5.4 Resumen de las modificaciones y adaptaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, referentes a la precipitación, para México. Tomado de García (2004).

Régimen de lluvias	Símbolo	FÓRMULAS PARA SEPARAR		% de lluvia invernal*
		BW/BS	BS/húmedo	
De verano: por lo menos 10 veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad cálida del año que en el mes más seco	w(w); m(w)	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}} + 14$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}} + 28$	(menor de 5)
	w; m	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}} + 14$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}} + 28$	(entre 5 y 10.2)
	w(x'); m(f)	$(P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}} + 10.5)$	$(P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}} + 21)$	(mayor de 10.2)
Repartidas a través del año (intermedio entre de verano y de invierno)	x'(w); f(m)	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}} + 7$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}} + 14$	(menor de 18)
	x'; f	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}} + 7$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}} + 14$	(mayor de 18)
	x'(s)	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}} + 7$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}} + 14$	
De invierno: por lo menos 3 veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad fría del año que en el mes más seco	s(x')	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}}$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}}$	(menor de 36)
	s	$P_{\text{umbral}} = T_{\text{anual}}$	$P_{\text{umbral}} = 2T_{\text{anual}}$	(mayor de 36)

Las descripciones, símbolos y criterios en paréntesis destacan las modificaciones hechas por García (2004). Aquellas descripciones, símbolos y criterios que no se encuentran en paréntesis, se emplean como están descritas en el sistema de clasificación de Köppen.

La precipitación se mide en mm y la temperatura en °C.

*Porcentaje de lluvia con respecto al total anual.

5.3. Régimen de precipitación en México

La precipitación media anual en la República Mexicana varía desde menos de 50 mm hasta más de 4000 mm, mostrando una tendencia de aumento del norte al sur del país (Maderey-Rascón y Carrillo-Rivera, 2005). En la mayor parte del territorio nacional, el 80% del régimen de lluvias ocurre en verano y otoño y el resto durante el invierno, a excepción del noroeste del país donde las lluvias se concentran principalmente en los meses del invierno (Maderey-Rascón y Carrillo-Rivera, 2005; SEMARNAT, 2010).

De manera general, se considera que dos terceras partes del territorio mexicano son áridas o semiáridas con una precipitación anual menor a 500 mm; mientras que la parte suroriental

del país es húmeda, ya que aquí se concentra la mayor parte de la precipitación, registrando valores anuales que superan los 2000 mm (Maderey-Rascón y Carrillo-Rivera, 2005; CONAGUA, 2010).

En la figura 5.3 se muestra el mapa de precipitación media anual realizado a partir de las bases de datos disponibles en el portal de Climatología del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

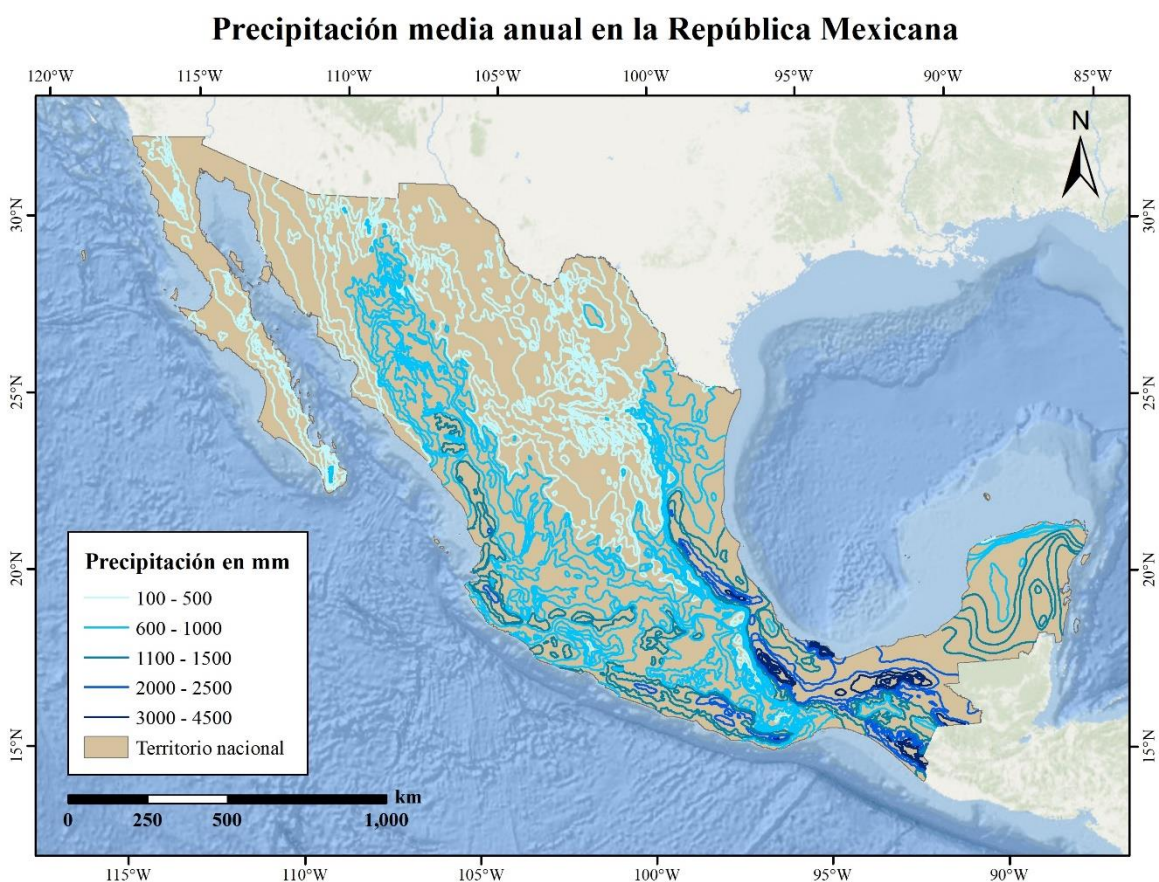


Figura 5.3 Mapa de isoyetas de la precipitación media anual en la República Mexicana. Elaboración propia con información de la Precipitación media anual y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2006, 2017).

CAPÍTULO VI

Distribución de las meteoritas halladas en la República Mexicana

6. Abundancia de los hallazgos en México

Como se mencionó en la sección 4.1. *Meteoritas mexicanas*, se han reportado 92 hallazgos en la República Mexicana de los cuales el 62% son meteoritas metálicas, el 34.8% meteoritas pétreas y el 3.2% restante meteoritas metálico-pétreas (Tabla 6.1).

La cantidad de hallazgos mexicanos en función del tipo de meteorita difiere de la abundancia de hallazgos, e incluso de caídas, a nivel mundial, como se muestra en la Tabla 6.1. Hasta noviembre del 2020, se reportaron en el mundo 63593 hallazgos, de los cuales el 97.5% son meteoritas pétreas, 1.9% meteoritas metálicas y 0.6% meteoritas metálico-pétreas; y 1218 caídas, de las cuales 95.1% son meteoritas pétreas, 4% meteoritas metálicas y 0.9% meteoritas metálico-pétreas (Meteoritical Bulletin Database, 2020). A partir de estos valores, se observa que en México hay una gran abundancia de hallazgos metálicos (62%), mientras que a nivel mundial las meteoritas predominantes, tanto en hallazgos como caídas, son de tipo pétreo, las cuales en México representan sólo el 34.8%.

Tabla 6.1 Comparación entre la abundancia de hallazgos mexicanos con la abundancia a nivel mundial de hallazgos (63593 ejemplares) y caídas (1226 ejemplares). Datos extraídos del Meteoritical Bulletin Database (2020).

Tipo de meteorita	Número de hallazgos en México	Abundancia (%)		
		México (hallazgos)	Mundial (hallazgos)	Mundial (caídas)
Pétreas	32	34.8	97.5	95.1
Metálico-pétreas	3	3.2	0.6	0.9
Metálicas	57	62.0	1.9	4.0
Total	92	100.0	100.0	100.0

6.1. Distribución de masas

Las masas de las meteoritas que han sido halladas en México van desde los 1.2 g, de la meteorita Ameca-Ameca, a las 24.3 toneladas, de la meteorita Chupaderos. En la Figura 6.1 se muestra la distribución de masas, en escala logarítmica, de los hallazgos reportados. El 33.7% de las meteoritas tienen masas entre 10 y 100 kg y el 20.6% tienen masas entre 1 y 10 kg, siendo que poco más de la mitad de los ejemplares presentan una masa entre 1 y 100 kg. Las meteoritas más masivas (> 1000 kg), que son todas de tipo metálico, como las menos

masivas (< 100 g), que son en su mayoría de tipo pétreo, no son muy abundantes habiendo 8 y 9 ejemplares, respectivamente. Además, se observa que las meteoritas metálicas conforman el 99.5% de la masa total de los hallazgos mexicanos, donde 43 de los 49 hallazgos con una masa ≥ 10 kg son metálicas (Figura 6.1), mientras que las meteoritas pétreas y metálico-pétreas representan sólo el 0.4% y 0.1% de la masa total, respectivamente.

Si se observa la disposición espacial de los hallazgos en función de la masa (Figura 6.2), la mayor parte de las meteoritas con masas menores a 1 kg se han hallado en la parte norte del país, mientras que las meteoritas con masas mayores a 1 kg se han encontrado en todo el territorio. No obstante, el 94.9% de la masa de los hallazgos está concentrada en la parte septentrional del país (Figura 6.2).

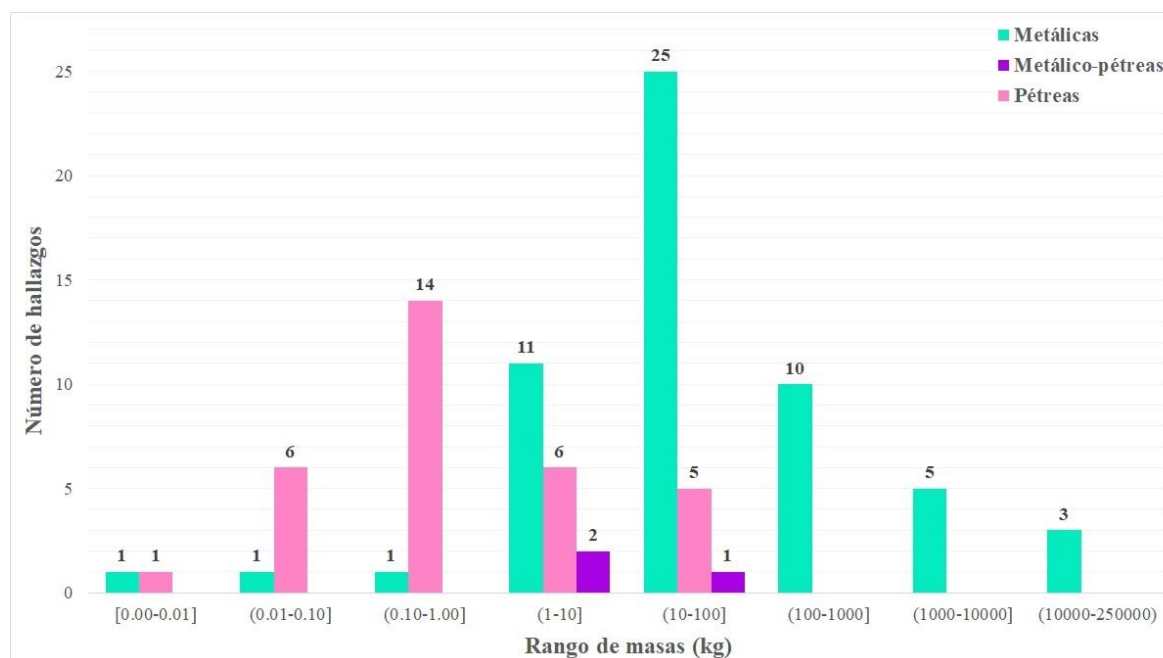


Figura 6.1 Distribución de frecuencia de masas de los hallazgos mexicanos.

6.2. Distribución espacial

En las Figuras 4.2 y 6.1 se observa que, en general, una mayor parte de las meteoritas halladas en la República Mexicana, sin importar su masa, se encuentran en la parte norte del país (el 83.7% correspondiente a 77 ejemplares), principalmente en los Estados de Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas, concentrando el 61% de ellas en conjunto (56 hallazgos). Por otro lado, en la región centro y sur del país el número de hallazgos es mucho menor en comparación, teniendo incluso que en los Estados del sureste de la república (Chiapas, Campeche, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán) no se ha reportado ningún hallazgo.

Además, al relacionar la disposición espacial de los hallazgos en función de la distribución de los climas en México, se observa que se han encontrado una mayor cantidad de meteoritas en las regiones que presentan climas áridos (71 hallazgos), a comparación de las zonas con

climas tropicales (1 hallazgo), templados (20 hallazgos) o fríos (ninguno), como se muestra en la Tabla 6.2.

6.2.1. Distribución en los climas áridos

De acuerdo con la clasificación de Köppen, así como las adaptaciones hechas por García (2004) para México, existen tres modalidades de climas áridos en el país según su grado de humedad: climas BW o muy secos, climas BS₀ o secos y climas BS₁ o semisecos.

De las 71 meteoritas halladas en regiones que presentan un clima árido (Figura 6.3), el 55% son metálicas (39 ejemplares), el 42.2% son pétreas (30 ejemplares) y el 2.8% son metálico-pétreas (2 ejemplares). Por otro lado, de estos 71 hallazgos, se tiene que en regiones con clima BW o muy seco se han encontrado 26, en zonas cuyo clima es BS₀ o seco 16 y en regiones con clima tipo BS₁ o semiseco los 29 restantes, como se ilustra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Cantidad de hallazgos mexicanos en función del tipo de meteorita y clima del lugar donde fue encontrado el ejemplar.

Tipo de clima		Número de hallazgos			Total	Abundancia (%)
		Pétreas	Metálicas	Metálico-pétreas		
Climas tropicales	A (cálido)	-	-	-	-	-
	A(C) (semicálido)	-	1	-	1	1.1
Climas áridos	BW (muy seco)	13	11	2	26	28.3
	BS ₀ (seco)	5	11	-	16	17.4
	BS ₁ (semiseco)	12	17	-	29	31.5
Climas templados	C (templado)	1	14	1	16	17.4
	C(E) (semifrío)	1	3	-	4	4.3
Climas fríos	E(T) (frío)	-	-	-	-	-
Total		32	57	3	92	100.0

Distribución espacial de las masas de los hallazgos mexicanos

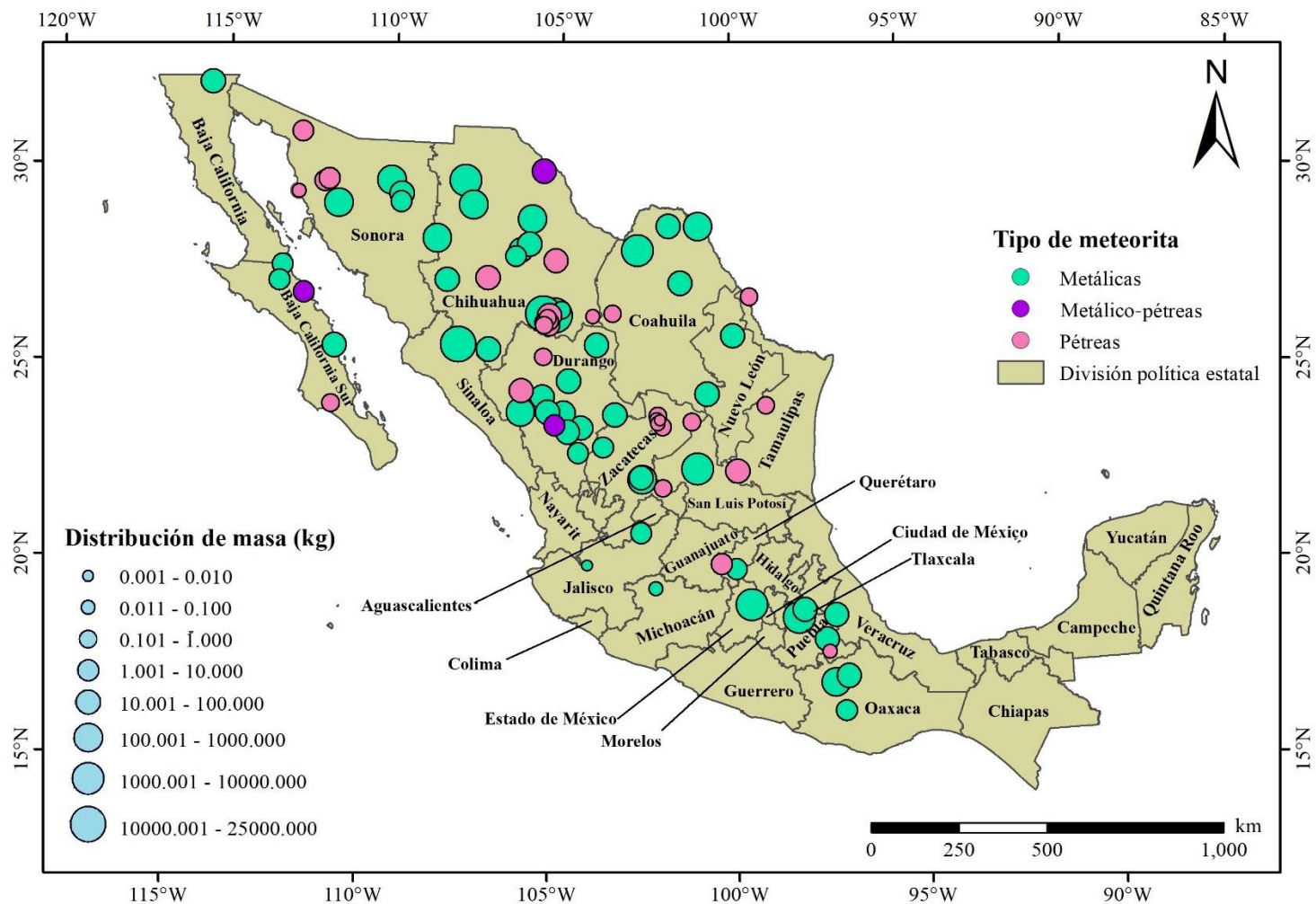


Figura 6.2 Mapa de la distribución espacial de los hallazgos mexicanos en función de la masa y del tipo de meteorita. Elaboración propia con información del Meteoritical Bulletin (2020) y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2017).

Distribución de los hallazgos mexicanos en los climas áridos

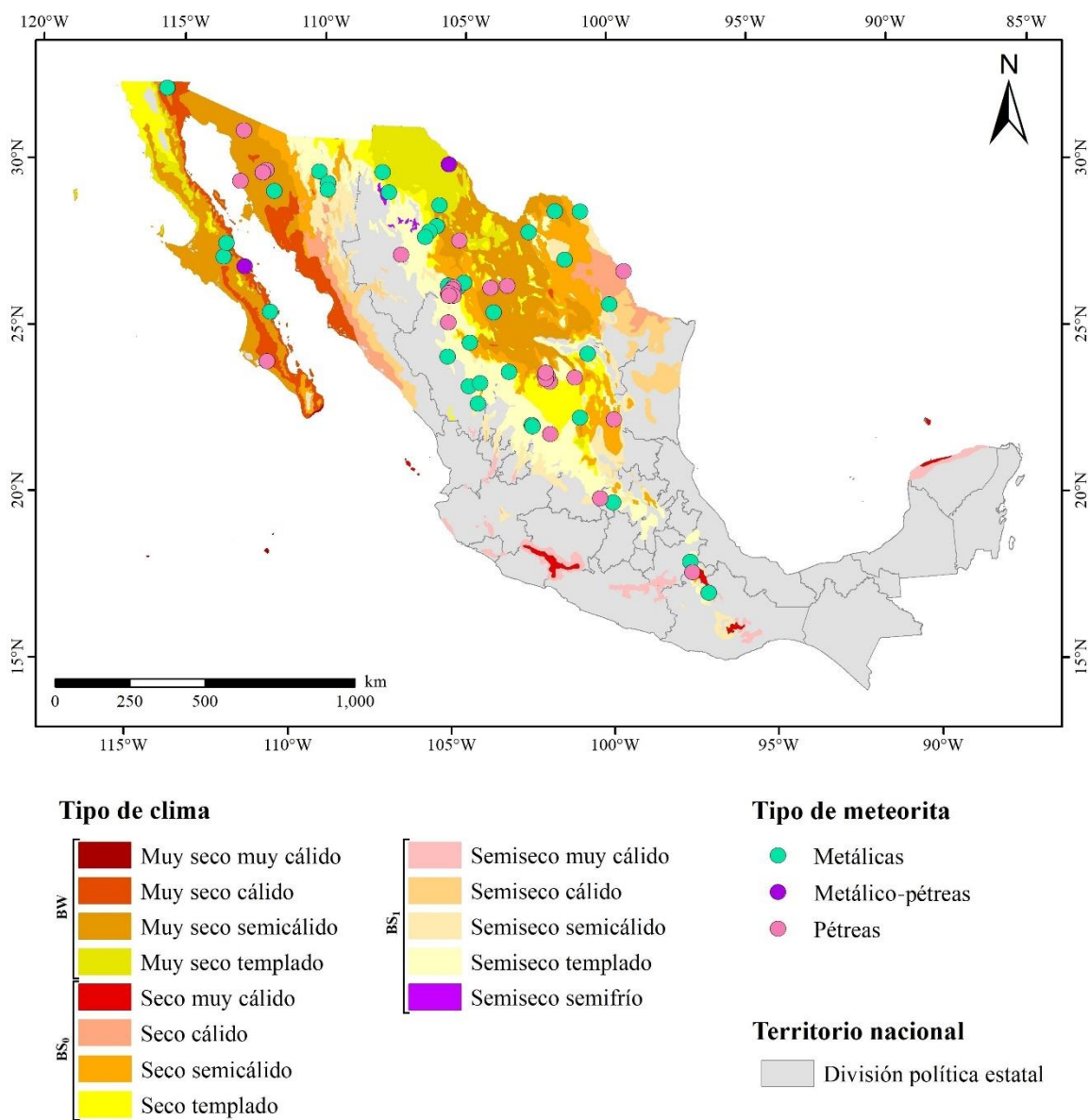


Figura 6.3 Mapa de la distribución de los hallazgos mexicanos en función del tipo de meteorita en los climas áridos. Elaboración propia con información del Meteoritical Bulletin (2020), de las Unidades climáticas y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2008, 2017).

CAPÍTULO VII

Comportamiento electroquímico de una meteorita metálica

7. Metalografía

Al inspeccionar la meteorita Catorce b con microscopía de luz reflejada (Figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4) y microscopía electrónica de barrido (Figuras 7.5), se observó una superficie no continua que presenta fases minerales primarias, productos de intemperismo, fracturas y características texturales que separan a la muestra en varias fracciones.

Previo al ataque químico y las pruebas electroquímicas, se observó una matriz compuesta de kamacita en la que se identificaron algunos fosfuros como cristales muy fracturados de schreibersita con tamaños de 350 a 530 μm (Figura 7.1a, b) y como rhabditas (Figura 7.1c); una fase no metálica con textura de veta en capas que parece rellenar los límites de grano (Figuras 7.1d y 7.5a) la cual, de acuerdo con análisis puntuales de EDS, tiene una composición de Fe de 29 a 41 wt. % y de O de 54 a 63 wt. % que podría indicar una mezcla de óxidos e hidróxidos de Fe; algunas bandas de Neumann (Figura 7.1e); y la formación de productos de corrosión en diferentes zonas de la superficie (Figura 7.1f, g), cerca de las bandas de Neumann (Figura 7.1e) y como halos en algunas rhabditas (Figura 7.1c).

El ataque químico a la superficie pulida de la muestra, aunque no logró revelar el patrón de Widmanstätten, permitió observar características como fracturas en la matriz de kamacita (Figura 7.2a); bandas discontinuas de taenita de 60 a 700 μm de largo (Figuras 7.2a y 7.5b); abundantes rhabditas dispersas en toda la matriz (Figuras 7.2c, g y 7.5a, d), algunas fracturadas (Figura 7.2d), con tamaños de 10 a 130 μm ; más cristales de schreibersita (Figura 7.2e) con tamaños de 90 a 200 μm ; varias familias de bandas de Neumann formando ángulos de 90° entre sí (Figuras 7.2c, g y 7.5a, b); y una diferencia de relieve entre la matriz, schreibersitas (Figura 7.2e, f), rhabditas (Figura 7.2c, g) y taenitas (Figuras 7.2g y 7.5b).

Al finalizar las pruebas electroquímicas, en la superficie de ambas áreas de análisis se observó una corrosión uniforme (Figuras 7.3, 7.4 y 7.5a, c, d), así como diferencias en la susceptibilidad a la corrosión de las fases minerales presentes. Las schreibersitas (Figura 7.3d, e), rhabditas (Figuras 7.3c, f, 7.4c, d y 7.5a, d), taenitas (Figuras 7.3g y 7.4e) y vetas de productos de corrosión (Figura 7.4f, g y 7.5c) presentan un mayor relieve en contraste con la matriz de kamacita, la cual exhibe una mayor disolución alrededor de los bordes de las fases intermetálicas, especialmente de las rhabditas (Figuras 7.3c, f, 7.4d y 7.5a, d). También se observó la formación de productos de corrosión los cuales, de acuerdo con las propiedades ópticas observadas (color, dureza y reflectividad) y el mecanismo de corrosión propuesto por Buchwald y Clarke (1989), probablemente están conformados por las primeras fases en las que se descompone la kamacita: akaganeita, goethita y maghemita.

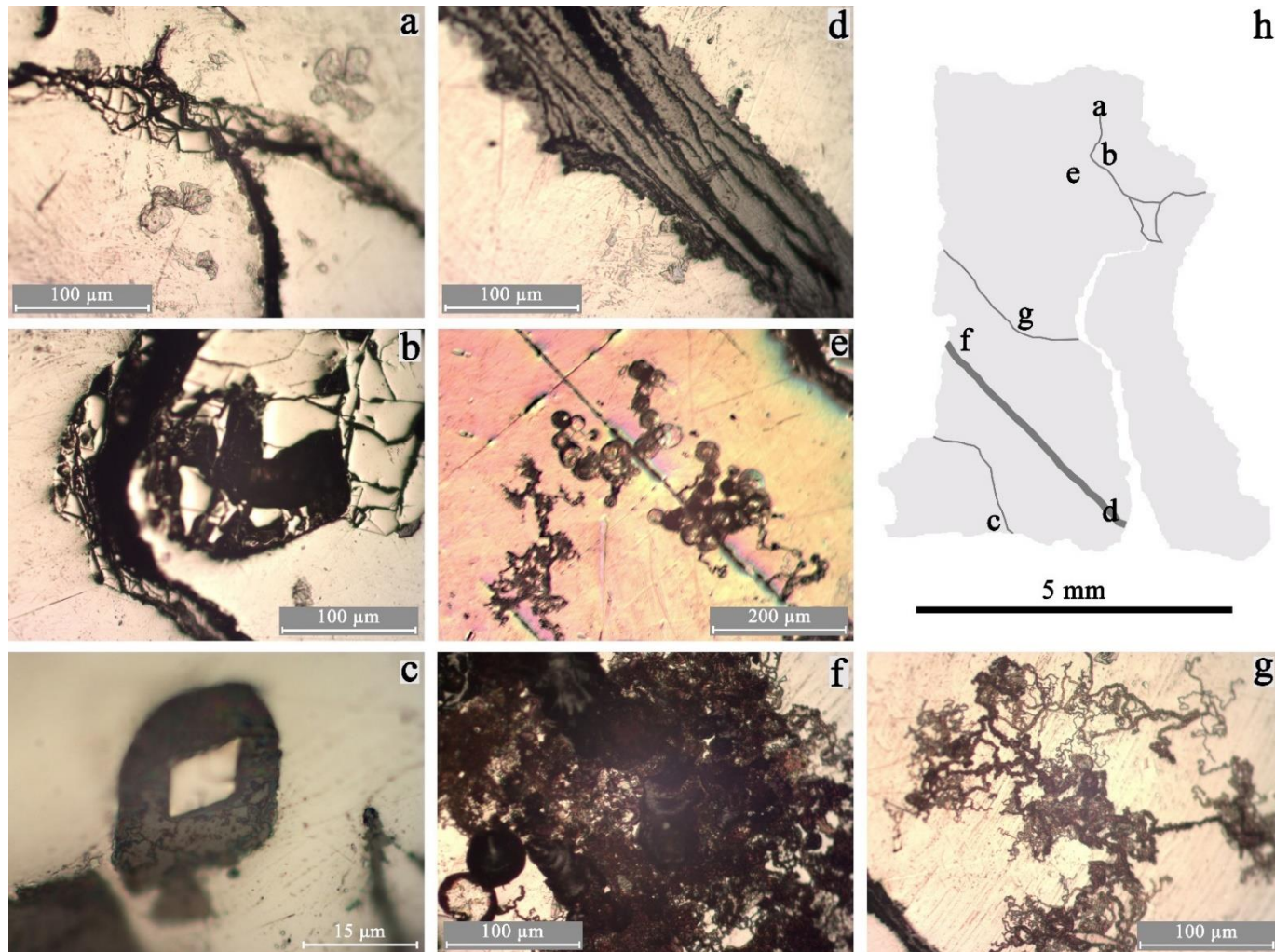


Figura 7.1 Fotomicrografías que muestran la microestructura de la superficie pulida de la meteorita Catorce b en condiciones de llegada: a) y b) cristales fracturados de schreibersita; c) rhabdita rodeada de un halo de corrosión; d) fase no metálica dividiendo la matriz de kamacita; e) productos de corrosión cerca de un par de bandas de Neumann; f) y g) productos de corrosión en la superficie de la muestra; h) mapa de la superficie de la muestra donde se señala la ubicación de cada fotomicrografía.

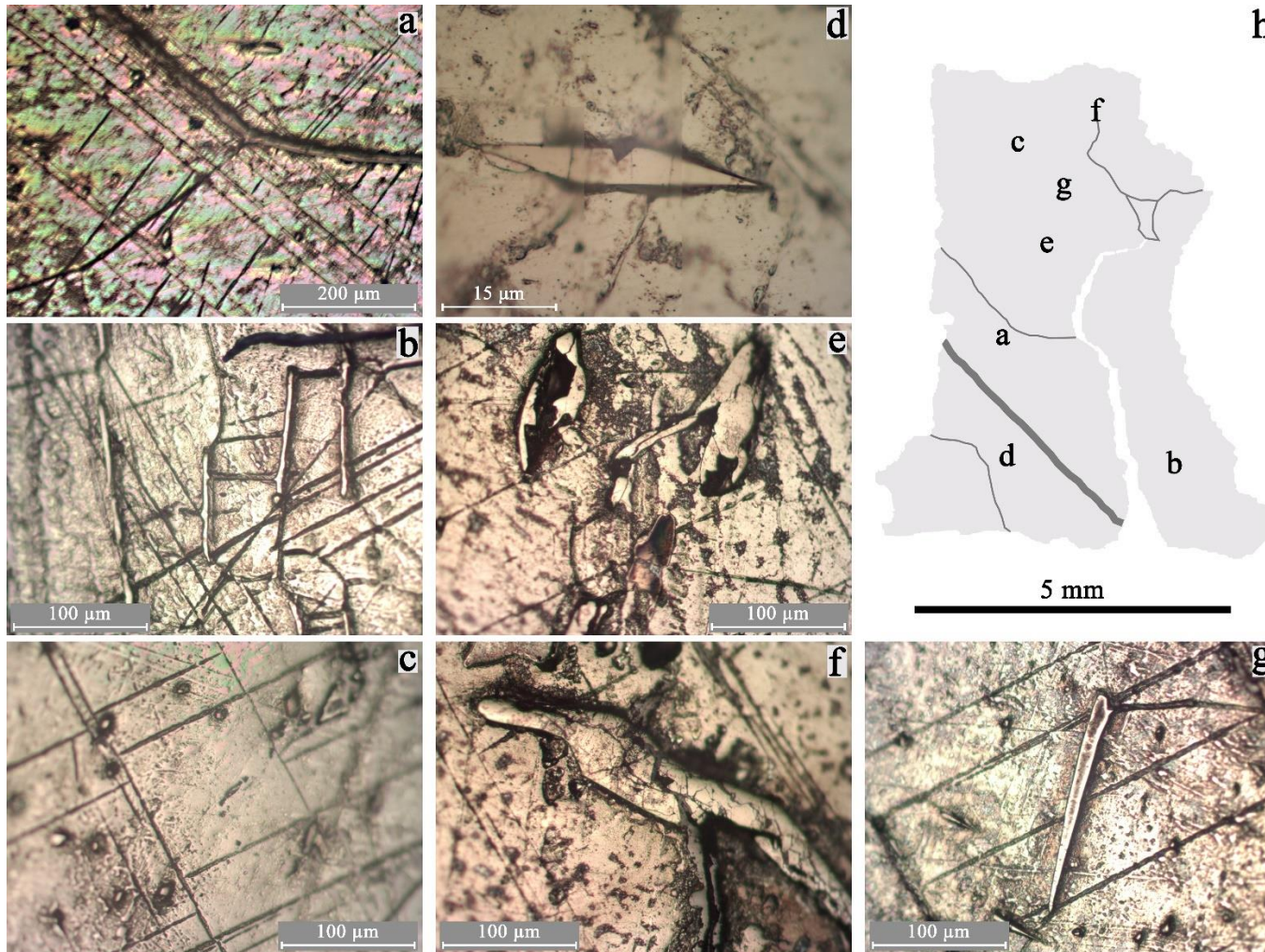


Figura 7.2 Fotomicrografías que muestran la microestructura de la superficie de la meteorita Catorce b después de haber sido atacada químicamente: a) ejemplo de una fractura en la matriz de kamacita; b) bandas discontinuas de taenita; c) varias familias de bandas de Neumann, así como abundantes rhabditas en la matriz; d) ejemplo de un cristal de rhabdita fracturado; e) cristales de schreibersita rebelados con el ataque químico; f) diferencia de relieve entre un cristal de schreibersita y la matriz de kamacita; g) cristal de taenita (al centro), sets de bandas de Neumann y varias rhabditas en la matriz; h) mapa de la superficie de la muestra donde se señala la ubicación de cada microfotografía.

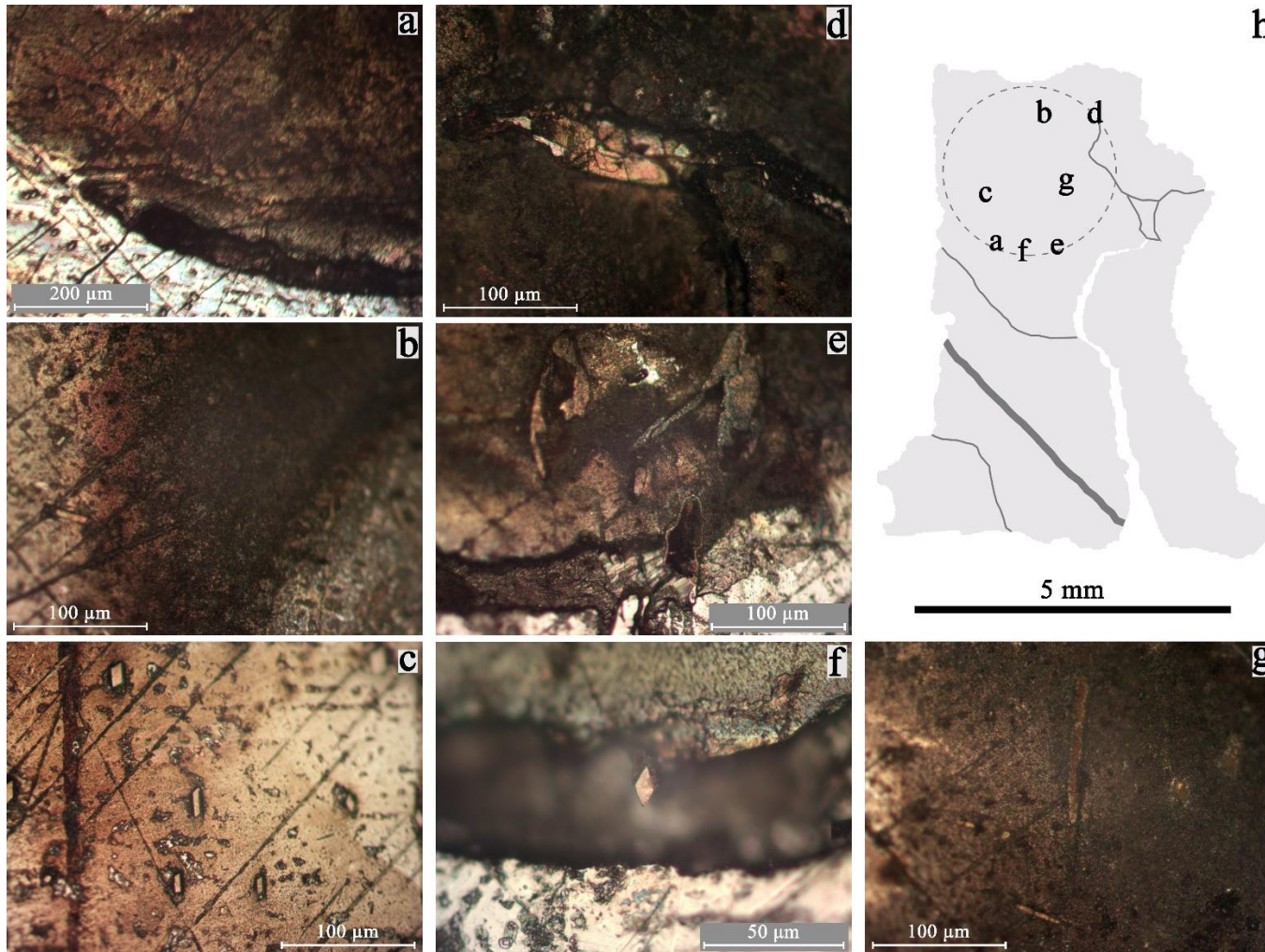


Figura 7.3 Fotomicrografías que muestran la microestructura de la zona 1 de la meteorita Catorce b después de las pruebas electroquímicas: a) límite entre la zona en la que se llevaron a cabo las pruebas electroquímicas, donde se observa la formación de productos de corrosión, y la matriz no expuesta; b) formación de productos de corrosión de tonalidades oscuras; c) ejemplo de una mayor disolución de la matriz de kamacita alrededor de las rhabditas; d) y e) ejemplos de la diferente resistencia a la corrosión entre schreibersitas y la matriz; f) ejemplo de una mayor resistencia a la corrosión entre rhabditas y la matriz; g) ejemplos de la diferente susceptibilidad a la corrosión entre rhabditas, taenita y la matriz; h) mapa de la superficie de la muestra donde se señala la ubicación de cada fotomicrografía.

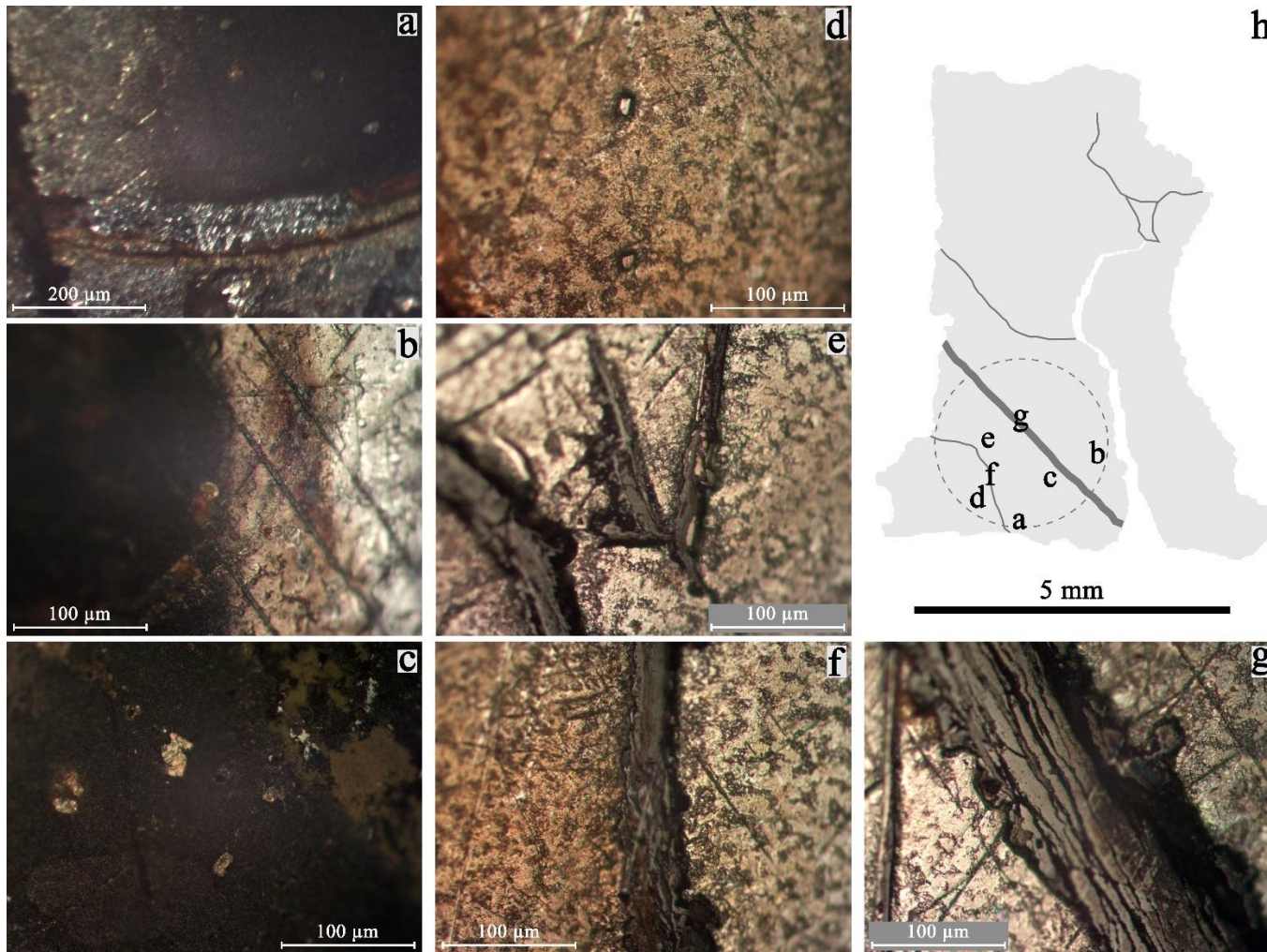


Figura 7.4 Fotomicrografías que muestran la microestructura de la zona 2 de la meteorita Catorce b después de las pruebas electroquímicas: a) y b) límite entre la zona en la que se llevaron a cabo las pruebas electroquímicas, donde se observa la formación de productos de corrosión (de tonalidades oscuras), y la matriz no expuesta; c) ejemplo de la diferente susceptibilidad a la corrosión entre rhabditas y la matriz; d) ejemplo de una mayor disolución de la matriz de kamacita alrededor de las rhabditas; e) ejemplo de la diferente resistencia a la corrosión entre taenita, la fase no metálica y la matriz ; f) corrosión uniforme en la matriz de kamacita; g) diferencia de relieve entre la fase no metálica y la matriz de kamacita; h) mapa de la superficie de la muestra donde se señala la ubicación de cada fotomicrografía.

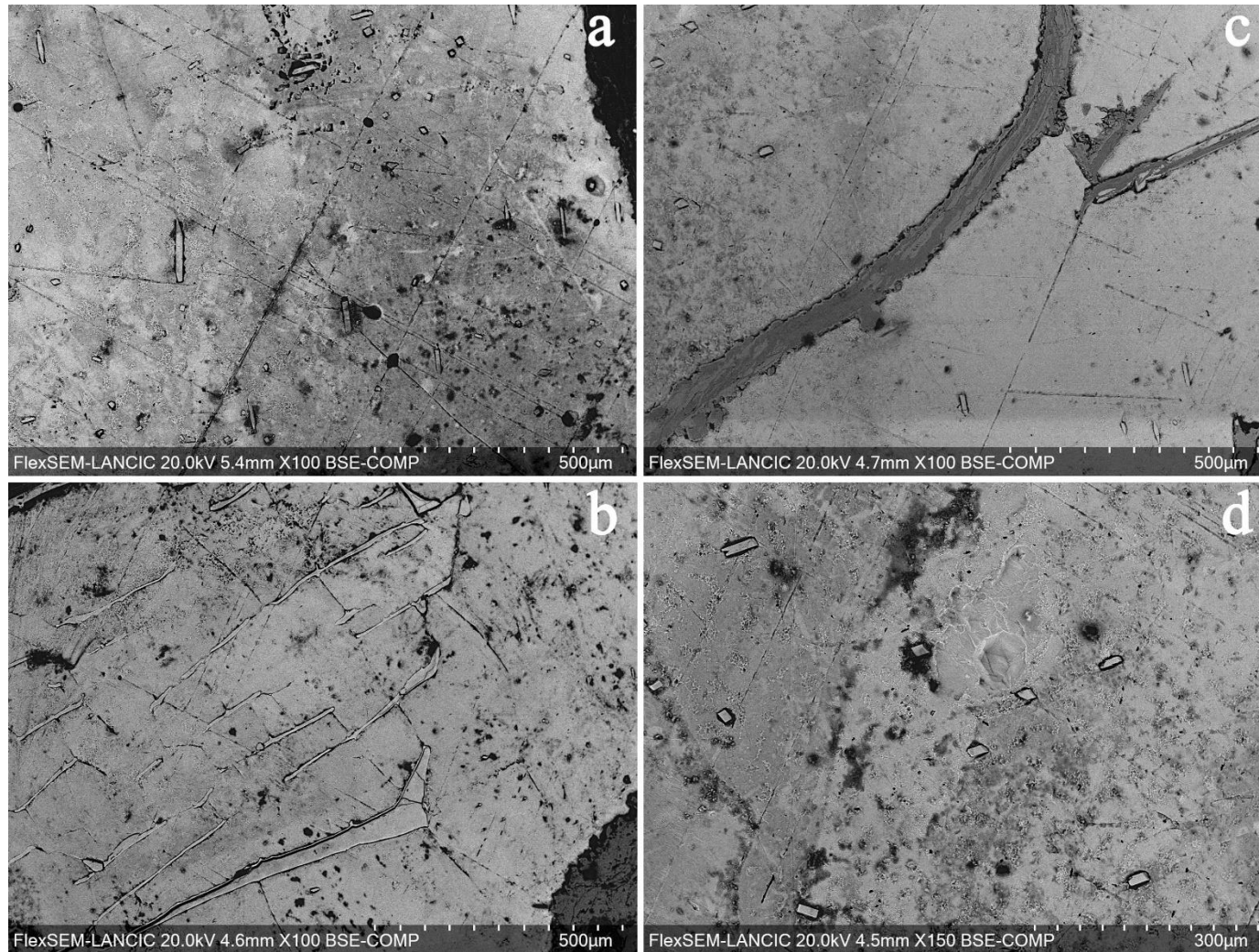


Figura 7.5 Imágenes de electrones retrodispersados obtenidos con microscopio electrónico de barrido de la superficie de la meteorita Catorce b después de las pruebas electroquímicas donde se observa corrosión uniforme en la matriz de kamacita en la zona 1 (a) y 2 (c y d) de análisis; presencia de bandas de Neumann (a y c); mayor disolución de la matriz alrededor de los cristales de rhabditas (a y d); y bandas discontinuas de taenita (entre 60 y 700 µm) en la matriz (b) reveladas por el ataque químico.

7.1. Polarización potenciodinámica

Las Figuras 7.6 y 7.7 muestran las curvas de polarización obtenidas a partir de la polarización potenciodinámica realizada en dos zonas de la superficie de la meteorita Catorce b en una solución 1 wt. % de NaCl a pH casi neutro y temperatura ambiente (24° C).

Ambas zonas de análisis exhiben un comportamiento cinético similar y se observa que las reacciones anódica (oxidación del Fe) y catódica (reducción del O₂) en todas las curvas de polarización están controladas por el proceso de transferencia de carga, es decir, por activación.

Los resultados de la polarización potenciodinámica en la zona 1 de análisis (Figura 7.6) muestran una dispersión en el potencial de corrosión (E_{corr}) de aproximadamente 20 mV. Así mismo, presentan diferencias en la cinética de la reacción anódica, donde la curva de polarización 1 tiene una menor pendiente que la curva 2, a pesar de que se utilizaron las mismas condiciones experimentales. El comportamiento anódico obedece a los procesos de disolución que suceden en la superficie de la muestra, por lo que las distintas pendientes que se observan en las curvas de polarización reflejan una velocidad de disolución diferente, siendo más rápida a medida que la pendiente es menor. En cuanto a la rama catódica, se observa una cinética menos rápida que la anódica. Las dos curvas de polarización muestran una tendencia muy parecida donde se distingue una región casi lineal de pendiente muy pronunciada (comenzando aproximadamente a 120 mV del E_{corr}), que representa cambios pequeños en la densidad de corriente al aumentar el potencial; seguida de una variación en la pendiente a potenciales muy negativos (aproximadamente a 300-325 mV del E_{corr}), asociado a un mecanismo diferente de la cinética de la reducción.

La polarización potenciodinámica realizada en la zona 2 de análisis (Figura 7.7) presenta una dispersión en el potencial de corrosión (E_{corr}) de aproximadamente 30 mV entre las curvas de polarización. En esta zona se observa que la rama anódica en ambas curvas muestra una pendiente pronunciada que refleja una disolución poco activa y un comportamiento con cierta tendencia a la pasivación, ya que se observa una baja corriente anódica en la ventana de potencial aplicado en la polarización (~300 mV). A potenciales más positivos (aproximadamente a 200 mV del E_{corr}), hay un cambio de pendiente que indica una mayor velocidad de disolución. Por otro lado, el comportamiento catódico de esta zona se asemeja al de la zona 1, debido a que en ambas curvas de polarización también se observa una región, aproximadamente a 120 mV de E_{corr} , de pendiente muy pronunciada (cinética más lenta), seguida de un cambio en la pendiente a potenciales muy negativos (aproximadamente a 300 mV de E_{corr}) que se asocia a un cambio en el mecanismo de la cinética de la reducción.

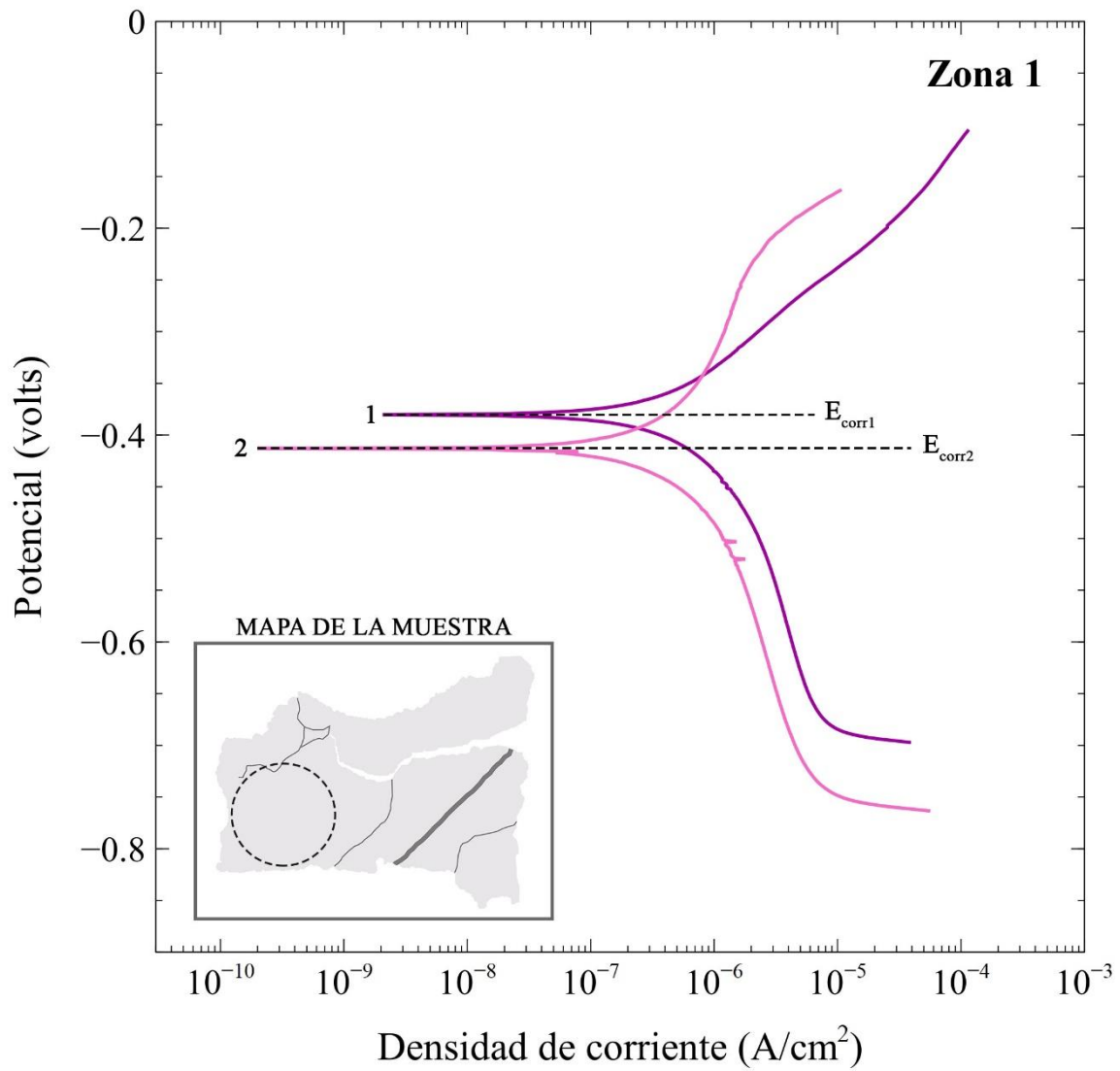


Figura 7.6 Curvas de la polarización en una solución de 1 wt. % de NaCl a temperatura ambiente (24° C) en la zona de análisis 1 de la meteorita Catorce b. Cada curva representa una repetición en la misma zona.

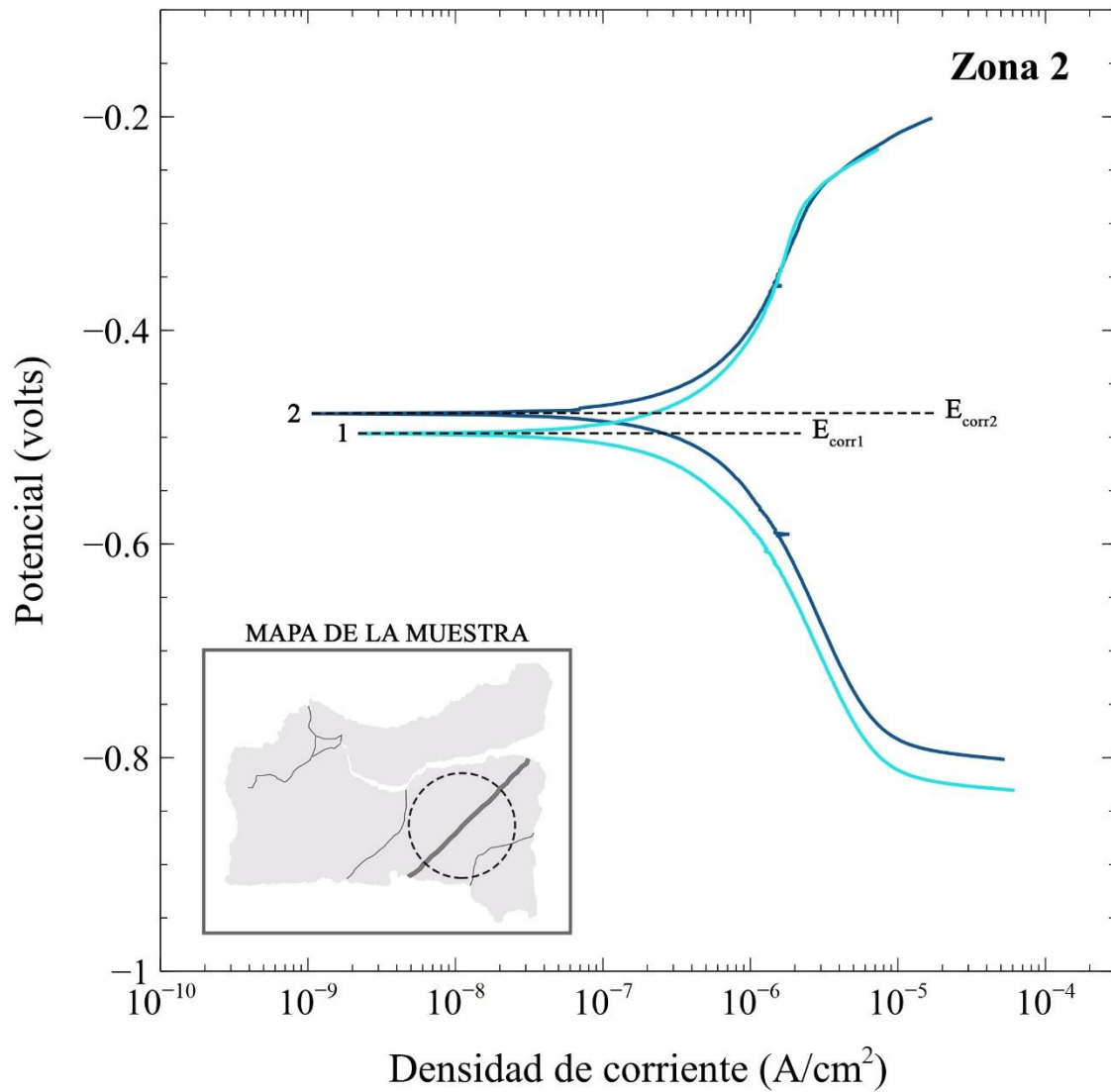


Figura 7.7 Curvas de la polarización en una solución de 1 wt. % de NaCl a temperatura ambiente (24° C) en la zona de análisis 2 de la meteorita Catorce b. Cada curva representa una repetición en la misma zona.

7.2. Cálculo de la velocidad de corrosión

En la superficie de las dos zonas de análisis de la meteorita Catorce b se observó una corrosión uniforme en la solución de 1 wt. % de NaCl, así como un control por transferencia de carga para las reacciones anódica y catódica. Por lo tanto, la velocidad de corrosión se calculó mediante el método de extrapolación de Tafel y las leyes de Faraday.

La extrapolación de Tafel se realizó en la rama catódica de cada curva de polarización de las dos zonas de análisis para determinar la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}). Conociendo i_{corr} de cada curva de polarización (Tabla 7.1), y sabiendo que en la corrosión del metal meteorítico el Fe de las aleaciones metálicas es oxidado a Fe^{2+} (Buchwald y Clarke, 1989), la velocidad de corrosión se puede calcular por medio de la ecuación [3] (McCafferty, 2010; Buchanan y Stansbury, 2013) descrita en la sección 3.3.4. *Velocidad de corrosión*:

$$velocidad\ de\ corrosi3n\ \left(\frac{cm}{s}\right) = \frac{i_{corr}\ M}{n\ F\ \rho}$$

donde M es la masa at3mica del Fe (55.845 g/mol), n el n3mero de electrones que participan en la reacci3n (2 equivalentes/mol), F es la constante de Faraday (96500 C/equivalentes; McCafferty, 2010) y ρ la densidad promedio de las meteoritas metálicas (7.5 g/cm³; Ostrowski y Bryson, 2019).

En la Tabla 7.1 se presentan los parámetros electroquímicos de la extrapolaci3n de Tafel (E_{corr} e i_{corr}), así como la velocidad de corrosi3n, expresada en $\mu\text{m/año}$, para la meteorita Catorce b en una soluci3n de 1 wt. % de NaCl, siendo la velocidad de corrosi3n promedio de cada zona de análisis de $13.0 \pm 0.9\ \mu\text{m/año}$ y $8.3 \pm 0.2\ \mu\text{m/año}$, respectivamente.

Tabla 7.1. Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de la polarizaci3n potenciodinámica y velocidad de corrosi3n por electr3lisis para cada curva de polarizaci3n de las dos zonas de análisis en la superficie de la meteorita Catorce b.

		Potencial de corrosi3n (mV)	Densidad de corriente de corrosi3n (A/cm ²)	Velocidad de corrosi3n ($\mu\text{m/año}$)
Zona de análisis 1	curva 1	-380.4 \pm 17.2	1.29 x 10 ⁻⁶ \pm 1.41 x 10 ⁻⁷	15.7 \pm 1.7
	curva 2	-412.9 \pm 6.4	8.48 x 10 ⁻⁷ \pm 0.07 x 10 ⁻⁷	10.3 \pm 0.1
	Promedio	-396.7 \pm 11.8	1.07 x 10⁻⁶ \pm 7.37 x 10⁻⁸	13.0 \pm 0.9
Zona de análisis 2	curva 1	-496.6 \pm 7.1	6.51 x 10 ⁻⁷ \pm 0.72 x 10 ⁻⁷	7.9 \pm 0.3
	curva 2	-477.9 \pm 13.4	7.16 x 10 ⁻⁷ \pm 0.51 x 10 ⁻⁷	8.7 \pm 0.1
	Promedio	-487.3 \pm 10.3	6.83 x 10⁻⁷ \pm 6.17 x 10⁻⁸	8.3 \pm 0.2

CAPÍTULO VIII

Discusión

8. Discusión de resultados

8.1. Abundancia de los hallazgos mexicanos en el territorio mexicano

La colección de meteoritas encontradas en México cuenta con un mayor número de ejemplares metálicos (57) que pétreos o metálico-pétreos (32 y 3, respectivamente). Al compararse con la abundancia mundial de hallazgos (Tabla 6.1), donde las meteoritas más abundantes son las pétreas (> 95%), mientras que las metálicas y metálico-pétreas que se encuentran en una proporción mucho menor, se observa que hay un sesgo de muestreo hacia los ejemplares metálicos. Sin embargo, este sesgo no es una condición particular de México.

Previo al auge de las campañas de búsqueda de meteoritas en desiertos calientes, en lugares como el desierto de Atacama (Gattacceca et al., 2011), Australia (Bevan, 1992) o el continente africano (Ouknine et al., 2019), había una mayor cantidad de reportes de hallazgos metálicos en comparación con los de hallazgos pétreos o metálico-pétreos. Por su textura, composición (> 90% de aleaciones de Fe-Ni; Heide y Wlotzka, 1995), densidad ($\sim 7.5 \text{ g/cm}^3$; Ostrowski y Bryson, 2019) y masa ($\sim 70\%$ tienen masas mayores a 1 kg; Meteoritical Bulletin Database, 2020), las meteoritas metálicas se pueden reconocer con mayor facilidad como material meteorítico entre las rocas terrestres (Huss, 1991; Bevan, 2006; Elkins-Tanton, 2010; Ouknine et al., 2019). Además, gracias a su baja porosidad y al mecanismo de pasivación (Consolmagno y Britt, 1998; Gattacceca et al., 2011; Ouknine et al., 2019), son más resistentes al intemperismo, permaneciendo más tiempo en los ambientes terrestres (Bevan, 1992, 2006; Ouknine et al., 2019).

Contrariamente, las meteoritas pétreas tienen composiciones y aspectos similares a las rocas terrestres máficas y ultramáficas (McCall, 2005; Norton y Chitwood, 2008), suelen presentar masas menores a 1 kg ($\sim 75\%$ de los ejemplares reportados tienen masas menores a los 100 g; Meteoritical Bulletin Database, 2020) y permanecen menos tiempo en la superficie terrestre, ya que se ven más afectadas por el intemperismo (Zolensky et al., 2006; Consolmagno et al., 2008). Debido a esto, su reconocimiento entre los materiales geológicos terrestres, sin el conocimiento necesario, es más complicado (p. ej. Scherer y Delisle, 1992; Schülter et al., 2002; Hutzler et al., 2016). Por lo tanto, los hallazgos de meteoritas estaban inclinados a los ejemplares metálicos desde tiempos prehistóricos (Bjorkman, 1973; Buchwald, 1975; Bevan, 1992; Comelli et al., 2016) y gran parte de ellos fueron descubiertos durante la época de mayor actividad minera a lo largo del mundo, durante el siglo XIX e inicios del siglo XX (Gattacceca et al., 2011; Hutzler et al., 2016; Ouknine et al., 2019).

Con el aumento de las campañas de búsqueda de meteoritas desde la década de los 90, se han recuperado una gran cantidad de meteoritas, principalmente de las regiones conocidas como áreas de recolección densa (Bevan, 2006; Hutzler et al., 2016; Ouknine et al., 2019). En estas zonas, varios grupos de trabajo con experiencia y conocimiento del tema realizan la identificación y recolección de material meteorítico, evitando en gran medida el sesgo humano (Bevan, 1992; Bevan et al, 1998). La búsqueda se realiza a través de metodologías sistemáticas ya sea a pie siguiendo una cuadrícula de líneas paralelas separadas ~10 m entre sí, con la cual la detección de ejemplares con masas menores a los 40 g es más eficiente (Bevan et al, 1998; Gattacceca et al., 2011; Hutzler et al., 2016; Aboulahris et al., 2019); o recorriendo el área de interés en automóvil, donde la detección de masas mayores a 100 g se ve favorecida (Bischoff y Geiger, 1995; Schülter et al., 2002; Bevan, 2006; Aboulahris et al., 2019). Gracias a estas campañas de búsqueda, las colecciones de diferentes zonas de acumulación, como las del desierto de Atacama, Australia o el Sahara, han aumentado considerablemente el número de sus ejemplares, particularmente de tipo pétreo (Bevan, 1992, 2006; Ouknine et al., 2019; Meteoritical Bulletin Database, 2020), mostrando así una distribución en función del tipo de meteorita muy parecida a la mundial, como se puede observar en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Comparación de la abundancia de hallazgos entre diferentes áreas de recolección densa de meteoritas y a nivel mundial. Datos extraídos del Meteoritical Bulletin Database (2020).

Tipo de meteorita	Abundancia (%)				
	Mundial (n = 63593)	Antártida (n = 40742)	Atacama (n = 1992)	Nullarbor (n = 694)	Sahara (n = 13471)
Pétreas	97.5	99.4	97.3	87.2	97.6
Metálico-pétreas	0.6	0.2	0.4	1.3	1.1
Metálicas	1.9	0.4	2.3	11.5	1.3
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

En México, poco más de la mitad de las masas metálicas también fueron encontradas durante el siglo XIX y mediados del siglo XX. En su mayoría, fueron hallazgos fortuitos cerca de minas, en alguna montaña, rancho o campo de cultivo, a lo largo del camino o, incluso, dentro de ruinas (Buchlwad, 1975; Meteoritical Bulletin Database, 2020). Además, antes de 1950 no hubo ningún hallazgo pétreo reportado, por lo que la colección de meteoritas mexicanas, sin contar las caídas, estaba conformada casi en su totalidad por ejemplares metálicos (Meteoritical Bulletin Database, 2020).

Actualmente, los hallazgos de material meteorítico en México siguen siendo en su mayoría fortuitos (p. ej. Grossman, 2000; Weisberg et al., 2010; Gattacceca et al., 2019) y la baja abundancia de los ejemplares pétreos puede deberse a la falta de campañas de búsqueda y recolección, como sucedía en otras regiones del mundo. Por lo tanto, existe la posibilidad de que, si se implementan expediciones de búsqueda en regiones que presenten las condiciones favorables para la acumulación y recolección de meteoritas, el muestreo sea más completo y la colección de hallazgos mexicanos tendería a mostrar una abundancia más cercana a la mundial.

8.2. Masa de los hallazgos mexicanos y su distribución espacial

Las meteoritas metálicas representan el 99.5% de la masa total de los hallazgos mexicanos. Los ejemplares con masas mayores a los 100 kg son todos de tipo metálico (Figura 6.1) y sólo estos 18 hallazgos conforman el 98% de la masa total. Además, entre ellos se encuentran 3 de las 15 meteoritas más masivas del mundo, Chupaderos (24.3 t), Bacubirito (22 t) y Morito (10.1 t; Meteoritical Bulletin Database, 2020).

Las grandes masas metálicas no sólo se observan en la colección de meteoritas mexicanas. En países como Australia, Estado Unidos de América, Francia, Namibia, entre otros, los hallazgos más masivos dentro de sus colecciones son en su mayoría metálicos. A nivel mundial, 172 de los 283 hallazgos con masas mayores a los 100 kg son metálicos y, en términos de masa, este tipo de meteoritas (1208 ejemplares) conforma alrededor del 85% de la masa total de todos los hallazgos (Meteoritical Bulletin Database, 2020). El que haya tantas masas grandes entre las meteoritas metálicas puede deberse a que, a diferencia de las pétreas, son materiales que experimentan menos fragmentación durante su paso por la atmósfera (Buddhue, 1957; Lee et al., 2017).

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, las meteoritas metálicas son menos susceptibles a la alteración terrestre que las pétreas (Bevan, 1992, 2006; Ouknine et al., 2019). El intemperismo en meteoritas, entre sus varios efectos, disminuye su masa, las desintegra y remueve los ejemplares más friables y pequeños de la población (Zolensky et al., 2006; Ouknine et al., 2019). En zonas con climas tropicales o templados, estos efectos se ven acelerados por la constante precipitación pluvial y humedad (Bland et al., 1998a, 2006; Al-Kathiri et al., 2005), afectando en mayor medida a las meteoritas pétreas debido a su mayor porosidad y menor masa (Zolensky et al., 2006; Consolmagno et al., 2008; Ouknine et al., 2019; Meteoritical Bulletin Database, 2020). En el caso contrario, en regiones con climas áridos, el intemperismo es menos vigoroso, existiendo la posibilidad de permitir una gran acumulación de meteoritas (Bland et al., 1996, 1998a, 2000, 2006; Munayco et al., 2013; ver la sección 1.4. *Zonas de acumulación de meteoritas*). Tomando en cuenta lo anterior, se esperaría que el material meteorítico que se encontrara en zonas con climas tropicales o templados esté dominado por meteoritas metálicas, por ser más resistentes a las condiciones climáticas, y que hubiese una escasez en los ejemplares de tipo pétreo y pequeños, a causa de un intemperismo más vigoroso. Este escenario se ha observado en la colección de meteoritas africanas (Ouknine et al., 2019) y, a partir del análisis de la base de datos y los mapas de distribución elaborados en este estudio, pareciera que también se puede percibir en la colección mexicana, como se explica a continuación.

La Figura 8.1 muestra la disposición espacial de los hallazgos en función tanto de la masa, como de la distribución de los climas presentes en la República Mexicana. Previamente, a partir de la Figura 6.2, se había denotado que la mayor parte de las meteoritas pequeñas (masa menor a 1 kg) fueron halladas en la parte norte del país; a diferencia de aquellas con una masa mayor a 1 kg que han sido descubiertas por todo el territorio. Al relacionar esta distribución con el clima (Figura 8.1), se observa que 21 de los 24 hallazgos con una masa menor a 1 kg (1 metálico y 20 pétreos) fueron encontrados en regiones con clima árido.

También, en estas zonas áridas se ha reportado el hallazgo de 13 ejemplares con masas entre 1 y 10 kg (7 metálicos, 1 metálico-pétreo y 6 pétreos) y 37 cuya masa es mayor a 10 kg (31 metálicos, 1 metálico-pétreo y 4 pétreos).

En regiones con climas tropicales o templados se han recuperado 21 meteoritas (18 metálicas, 1 metálico-pétreo y 2 pétreas; Tabla 6.2) de las cuales: 3 tienen una masa menor a 1 kg (2 metálicas y 1 pétreo); 5 presentan una masa entre 1 y 10 kg (4 metálica y 1 metálico-pétreo); y 13 son ejemplares con una masa mayor a 10 kg (12 metálicas y 1 pétreo). Finalmente, en las zonas con clima cálido húmedo, cálido subhúmedo, semicálido húmedo y templado húmedo, donde se registra una precipitación media anual mayor a los 1000 mm, no se ha reportado el hallazgo de material meteorítico (Figura 8.1).

A partir de lo anterior, se observa que la colección mexicana de meteoritas, aunque es pequeña comparada con otras, parece ejemplificar la influencia de las condiciones climáticas en la abundancia, masa y distribución de las meteoritas. En las regiones del país cubiertas por climas tropicales y templados se tienen o pocos registros de meteoritas, donde la mayoría son metálicas con una masa mayor a 1 kg, o no se ha reportado el hallazgo de material meteorítico, lo cual puede deberse a un intemperismo vigoroso promovido por una mayor disponibilidad de agua. En el caso contrario, en el territorio que presenta climas áridos se ha descubierto una mayor cantidad de meteoritas, tanto metálicas como pétreas, que muestran un amplio intervalo de masas (de gramos a toneladas), lo que podría reflejar condiciones climáticas más favorables para su conservación.

8.3. Distribución espacial de los hallazgos mexicanos en climas áridos

Al relacionar la disposición espacial de las meteoritas mexicanas con la distribución del clima, se tiene que el 77.2% de los hallazgos han sido encontrados en lugares cuyo clima es árido, como se destaca en la Figura 6.3. Además, entre estos ejemplares hay un mayor número de meteoritas pétreas con masas menores a 1 kg, a diferencia del resto del país donde el hallazgo de este tipo de ejemplares es muy escaso (Figura 8.1). Por lo tanto, se esperaría que en las regiones cubiertas por climas áridos se recupere una mayor cantidad y variedad de material meteorítico a través de campañas de búsqueda. No obstante, antes de proponer un proyecto de búsqueda, reconocimiento y recolección de meteoritas, primero se debe identificar algún área potencialmente favorable para la acumulación y recolección de meteoritas.

En México, los climas áridos cubren extensas regiones, como lo son los desiertos de Sonora y Chihuahua; así como pequeñas áreas repartidas por todo el país, como algunos valles en Oaxaca o Puebla, representando aproximadamente el 51% del territorio (Cervantes-Ramírez, 2002; García, 2004; González-Medrano, 2012). La formación y extensión de estas zonas son producto de la combinación de varios factores como: la ubicación del país entre los paralelos 14° y 32° latitud norte donde se ve afectado por el cinturón de altas presiones del hemisferio boreal; la estabilización de la atmósfera debida a corrientes marinas y surgencias de aguas frías; el efecto de sombra orográfica ocasionado por cadenas montañosas como la Sierra

Distribución de la masa de los hallazgos mexicanos en los diferentes climas de México

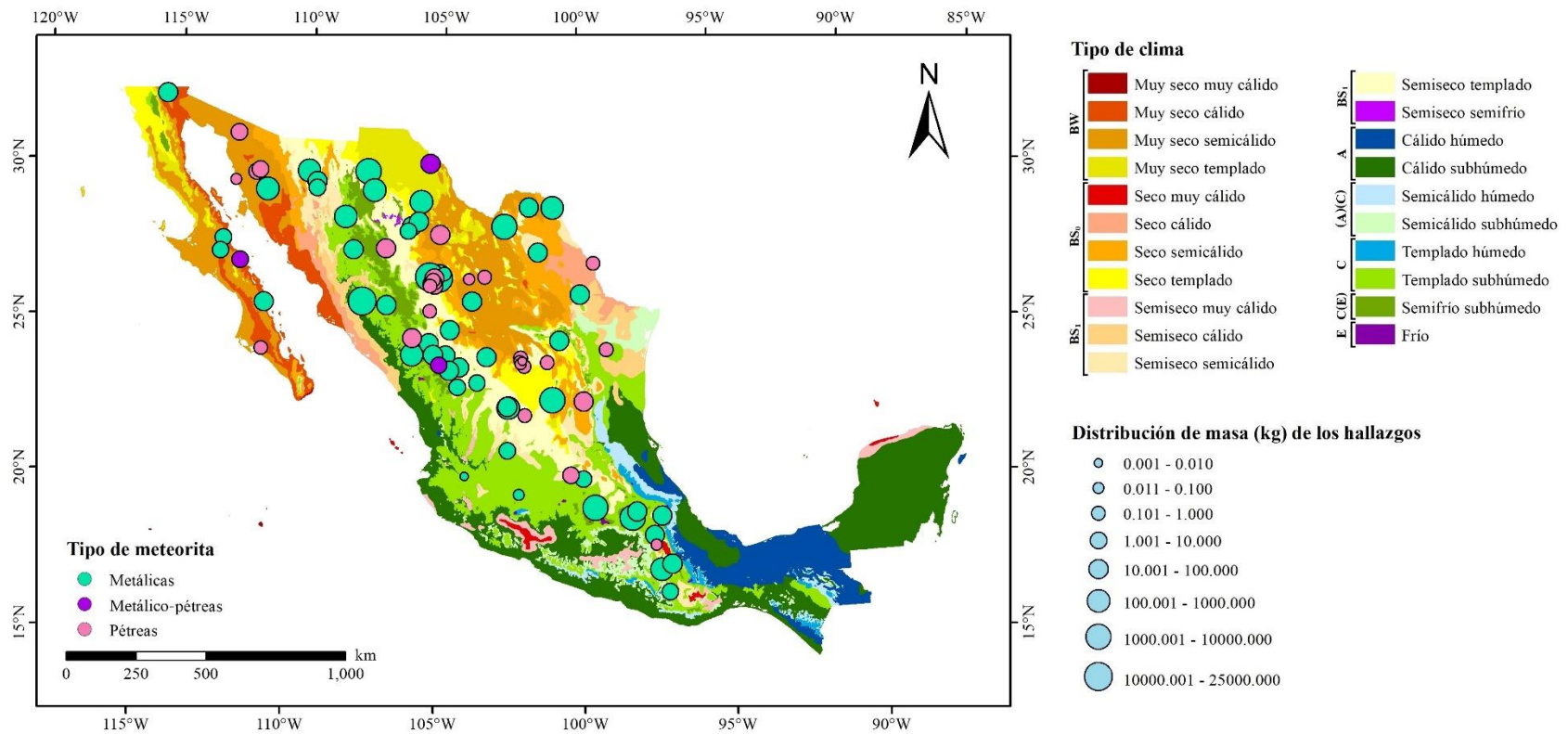


Figura 8.1 Mapa de la distribución espacial de los hallazgos mexicanos en función de la masa, el tipo de meteorita y el clima. Elaboración propia con información del Meteoritical Bulletin (2020), las Unidades climáticas y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2008, 2017).

Madre Occidental y Oriental; y el efecto de continentalidad causado por el ensanchamiento del territorio hacia el norte (Hernández y García, 1997; Cervantes-Ramírez, 2002; González-Medrano, 2012).

A partir de conocer las características generales de las regiones áridas en México es posible comenzar a identificar zonas que presenten condiciones favorables para la acumulación y búsqueda de meteoritas. Para realizar esta primera determinación, se pueden tomar como referencia las tres características que comparten las áreas de recolección densa en desiertos calientes (ver la sección 1.4.2. *Desiertos calientes*):

- Condiciones de aridez: alrededor de la mitad del territorio mexicano está cubierto por climas de tipo árido (muy seco, seco o semiseco), concentrados principalmente en la parte septentrional del país (Cervantes-Ramírez, 2002; García, 2004; González-Medrano, 2012), donde la precipitación media anual es menor a 500 mm (Figura 4.4; Madrey-Rascón y Carillo-Rivera, 2005; CONAGUA, 2010).
- Características geomorfológicas favorables: entre las características geológicas que presentan las zonas de acumulación en desiertos calientes, la litología superficial es un factor importante en la detección del material meteorítico (p. ej. Scherer y Delisle, 1992; Schlüter et al., 2002; Muñoz et al., 2007). La mayoría de las meteoritas son rocas de tonalidades grisáceas a oscuras, por lo que destacan sobre superficies claras; sin embargo, por esta misma propiedad, pueden confundirse a simple vista con las rocas terrestres máficas (Scherer y Delisle, 1992; Bevan y Bindon, 1996; Schlüter et al., 2002; Hutzler et al., 2016). De manera general, en México se pueden encontrar abundantes afloramientos volcánicos de composición félsica a intermedia a lo largo de la Sierra Madre Occidental, al noroeste, oeste y sur del Altiplano, en gran parte de Baja California Sur y en algunas zonas de la Sierra Madre del Sur, Baja California y Oaxaca; mientras que en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano se tienen rocas de composición intermedia a máfica y algunas zonas con rocas félsicas (INEGI, 1991; Cervantes-Ramírez, 2002; Rzedowski, 2006). Debido a esto, el reconocimiento del material meteorítico podría dificultarse en zonas que cumplan con otras condiciones favorables (p. ej. Scherer y Delisle, 1992; Schlüter et al., 2002; Bevan, 2006). Por lo tanto, las zonas de interés serían aquellas superficies llanas (depresiones de deflación, zonas lacustres secas, campos de dunas, entre otras) con litología superficial clara (como sedimentos marinos calcáreos) que presenten poca o nula presencia de materiales volcánicos máficos y que no se vean afectadas por el barniz del desierto.
- Poca vegetación: en las regiones áridas de México se puede encontrar vegetación de tipo matorral xerófilo, pastizal natural, selva caducifolia y chaparrales, habiendo una gran diversidad y cantidad de especies vegetales (Cervantes-Ramírez, 2002; SEMARNAT, 2010; González-Medrano, 2012). Sin embargo, entre estos tipos de vegetación, el matorral xerófilo es el que presenta condiciones más favorables para la detección de meteoritas, ya que su cobertura suele ser menor al 50% y el suelo entre los arbustos se encuentra desnudo la mayor parte del año (Rzedowski, 2006), lo que facilita el reconocimiento y hallazgo de ejemplares.

De tal forma que, una región llana con clima árido que presente una litología superficial clara, alejada de fuentes volcánicas, y cuya vegetación sea de matorral xerófilo podría valorarse como una posible área de interés. Los lugares que se propongan a partir de estos factores deberán ser visitados con el fin de confirmar si cumplen o no con las condiciones para ser considerados como zonas de acumulación y recolección de meteoritas.

A pesar de que en México aún no se han identificado zonas de acumulación ni se han realizado campañas sistemáticas de búsqueda y recolección, existe el potencial para hallar meteoritas, especialmente pétreas, cuando se tiene el objetivo de encontrar este tipo de materiales. Se ha reportado que las meteoritas Abajo, Cerro los Calvos, El Carmen, Gruñidora, La Escondida, Nuevo Mercurio (d), Rancho Blanco y Villa Matamoros, todas de tipo pétreo (Tabla 3.2), fueron descubiertas durante la búsqueda de ejemplares de las caídas de Allende (Chihuahua; Clarke et al., 1971) y Nuevo Mercurio (Zacatecas; Graham, 1980) dentro de sus elipses de dispersión (Meteoritical Bulletin Database, 2020). Los alrededores y sitios de caída de Allende y Nuevo Mercurio presentan aquellas características contempladas anteriormente para un primer acercamiento en la delimitación de posibles áreas de interés: clima árido (semiseco y muy seco, respectivamente), litología superficial relativamente clara alejada de fuentes máficas (Servicio Geológico Mexicano, 2021) y vegetación tipo matorral xerófilo (CONABIO, 2021). Por lo tanto, el hallazgo de distintos ejemplares en estas dos zonas marca un antecedente en la determinación de lugares potencialmente favorables para la implementación de campañas de búsqueda y recolección de meteoritas en México.

8.4. Comportamiento electroquímico

Los trabajos enfocados en describir y caracterizar los efectos que experimentan las meteoritas metálicas a causa del intemperismo, a diferencia de aquellos dedicados a las condritas (ver la sección 1.5.1. *Escalas e índices de intemperismo*), son escasos y en su mayoría antiguos. Debido a lo anterior, en el presente trabajo se evaluó el comportamiento electroquímico de una meteorita metálica en una solución de 1 wt. % de NaCl a pH casi neutro y temperatura ambiente (24° C).

Como se aprecia en las curvas de polarización de las Figuras 7.6 y 7.7, la corriente anódica muestra pequeños cambios a medida que aumenta el potencial, por lo que las pendientes pronunciadas en la rama anódica indican una disolución poco activa y cierta tendencia a un efecto de pasivación. Esta cinética refleja los procesos de disolución que se llevan a cabo en la superficie no continua de la meteorita donde se observan abundantes fosfuros, bandas de taenita y vetas de productos de corrosión que rellenan límites de grano y fracturas (Figuras 7.1 y 7.2).

Las meteoritas metálicas, a diferencia de los metales industriales (p. ej. ASM International, 1987; Shreir et al., 2000), son materiales bastante heterogéneos constituidos por aleaciones metálicas de Fe-Ni (kamacita y taenita) y una variedad de minerales accesorio (fosfuros,

sulfuros, carburos, etc.; Buchwald, 1975; Rubin, 1997) que tienen diferente susceptibilidad a la corrosión (Buddhue, 1957; Gooding, 1986). En un intento por obtener una serie electromotriz para las principales fases mineralógicas de las meteoritas metálicas, Buddhue (1957) midió el potencial de corrosión de varios de estos minerales en un electrolito de 0.1 M de KCl de pH casi neutro y a temperatura ambiente (25° C). A partir de los resultados que obtuvo, presentó de manera general el orden de reactividad de estas fases minerales, de un comportamiento noble a uno activo, como se muestra a continuación (Buddhue, 1957):

Schreibersita/rhabdita	↑ Noble
Taenita	
Troilita	
Kamacita	
Grafito	↓ Activo

Hay que considerar que el potencial de corrosión de los minerales depende del electrolito que se emplee y puede variar entre diferentes ejemplares (Buddhue, 1957). Pese a esto, en trabajos posteriores, Tackett et al. (1966, 1970) y Bryant et al. (2009) reportaron un orden de susceptibilidad similar (para la kamacita, taenita y schreibersita) al emplear otras meteoritas y otros medios, como 0.5 M CdI₂, 0.5 M H₂SO₄, 1 M KCl y 1M KI (Tackett et al., 1966, 1970) o 3.5% w/w NaCl (Bryant et al., 2009).

En los trabajos anteriormente mencionados, se observó que la kamacita experimenta una disolución preferencial, mientras que la taenita o schreibersita presentan mayor resistencia a la corrosión. Como se deduce del orden de reactividad, la taenita y la schreibersita, al tener un comportamiento noble, actuarían como cátodo y promoverían la disolución de la kamacita que, al ser más activa, se comportaría como ánodo (Buddhue, 1957; Tackett et al., 1966, 1970; Bryant et al., 2009). De acuerdo con Tackett (1966, 1970), esta susceptibilidad a la disolución está en función del contenido de Ni, siendo en la kamacita de 4.8 a 10 wt. %, en la taenita de 25 a 40 wt. % (Buchwald y Clarke, 1989; Ikeda y Kojima, 1991) y en la schreibersita de 20 a 50 wt. % (Reed, 1965); por lo que, a menor cantidad de Ni, el mineral es más propenso a la disolución.

En el estudio de aceros industriales, se ha reportado que la adición de Ni otorga al material mayor resistencia a la corrosión (p. ej. Nishimura et al., 2000; Choi et al., 2005; Díaz et al., 2018). En el caso de las meteoritas metálicas, se observa un efecto similar, ya que la tasa de disolución es inversamente proporcional a su concentración de Ni tal que, a medida que el contenido de este elemento aumenta, el ejemplar presenta una menor propensión a ser corroído (Tackett et al., 1966, 1970). También, los aceros industriales que contienen Ni, muestran la capacidad de formar capas pasivas estables, ya que se redistribuye en los productos de corrosión (Jinlong et al., 2016; Alharthi et al., 2017; Díaz et al., 2018). En meteoritas metálicas, la degradación de la kamacita da lugar a la formación de óxidos e hidróxidos de Fe que pueden llegar a incorporar Ni en su estructura (< 20 wt. %; p. ej. Buchwald y Clarke, 1989; Duczmal-Czernikiewicz y Michalska, 2018), por lo que se

esperaría observar cierta protección debida a los productos de corrosión, así como se reporta en los aceros industriales.

Tras la polarización potenciodinámica, en la superficie de las zonas de análisis de la meteorita Catorce b se distinguió la disolución preferencial de la kamacita a través de las diferencias en relieve entre la matriz y las schreibersitas, rhabditas y taenitas (Figuras 7.3, 7.4 y 7.5), las cuales mostraron una mayor resistencia a la corrosión como se ha descrito en los trabajos anteriormente mencionados. También, se observó la formación de productos de corrosión estables que no se disuelven y permanecen en la superficie de la meteorita. Aunque esta capa de productos no se consideraría completamente pasiva, las pendientes pronunciadas de la rama anódica de las curvas de polarización (Figuras 7.6 y 7.7) indican que sí exhibe un efecto de protección, como se esperaría de una aleación con cierta cantidad de Ni.

Por otro lado, aunado al comportamiento anódico poco activo, se observó que el sistema muestra una baja corriente al polarizar catódicamente, como se aprecia en las pendientes muy pronunciadas de la rama catódica (Figuras 7.6 y 7.7) que reflejan una cinética menos rápida que la anódica. Este comportamiento indica que la reacción de reducción se está llevando a cabo lentamente. De acuerdo con uno de los supuestos de la Teoría del Potencial Mixto, no puede haber acumulación de carga eléctrica en el sistema, cumpliéndose el principio de conservación de carga, por lo que la tasa de producción de electrones en la oxidación es igual a la tasa a la que se consumen en la reducción (Lock y Tank, 1988; Ahmad, 2006; Frankel, 2016). Por lo tanto, si la reacción catódica es una etapa lenta y los electrones que se generan en la oxidación de la kamacita se consumen lentamente en la reducción del O₂ del electrolito, la velocidad de corrosión del material se verá influenciada por esto. Los valores de la densidad de corriente obtenidos a partir de la extrapolación de Tafel para ambas zonas de análisis, que se encuentran aproximadamente dentro del mismo orden de magnitud (Tabla 7.1), dan lugar a una ventana de velocidad de corrosión promedio de 8.3 a 13.0 $\mu\text{m}/\text{año}$.

Se debe tomar en cuenta que en los resultados de la polarización potenciodinámica se observó dispersión entre el potencial de corrosión de las curvas y diferencias en la cinética de la reacción anódica. Lo anterior pudo deberse a: **1)** la heterogeneidad de la muestra. Como se mencionó anteriormente, las meteoritas son materiales heterogéneos por la diversidad de minerales que presentan. El ejemplar estudiado no es una excepción, ya que se observó una superficie no continua con abundantes precipitados, inclusiones no metálicas y varias características texturales que influyen en su comportamiento electroquímico y pueden generar variaciones en la respuesta a la polarización; **2)** el diseño experimental. Debido a la fractura en la superficie de interés de la meteorita, el área de trabajo se redujo a dos zonas de menos de 5 mm², limitando así la interfase electrolito-metal. Además, por el tamaño y forma irregular de la muestra, la probeta se dispuso horizontalmente (Figura 3.3) lo que ocasionaría un contacto no uniforme entre el electrolito y el metal. Esto último pudo haber ocurrido, ya que se observó una mayor formación de productos de corrosión en una región de ambas zonas de análisis (Figuras 7.3a, b y 7.4a, b); **3)** la presencia de productos de corrosión. Partiendo del punto anterior, debido a un contacto irregular entre el electrolito y el metal, la formación de productos de corrosión en las superficie de análisis no sería homogénea. A causa de esto,

aunque se realizó una limpieza con polarización potencioestática, podrían quedar productos de corrosión distribuidos irregularmente, los cuales modificarían el comportamiento electroquímico entre cada análisis debido a que estarían protegiendo la superficie mostrando un efecto de pasivación.

A pesar de que uno o varios de estos factores causaran cierta variación en la respuesta del sistema entre los análisis, la cinética observada en las curvas de polarización obtenidas sugiere un mismo resultado. Además, tanto la disolución como la resistencia que muestra la meteorita Catorce b concuerda con el comportamiento electroquímico general que exhibe una meteorita metálica ante el proceso de corrosión, como se ha descrito en trabajos previos (p. ej. Buddhue, 1957; Tackett et al., 1966, 1970; Bryant et al., 2009).

Con base en los resultados presentados, se puede plantear que una meteorita metálica similar a Catorce b sufrirá poca disolución en condiciones de inmersión continua en una solución de 1 wt. % de NaCl a pH casi neutro. No obstante, dado que el material meteorítico puede encontrarse en una gran variedad de ambientes (Bland et al., 1998a; Bland, 2006; Ouknine et al., 2019), las condiciones de trabajo y el electrolito empleados en este estudio no representan todos los mecanismos de corrosión ni tasas de disolución que pueden experimentar las meteoritas metálicas. Esta misma problemática la abordó Buddhue (1957) al momento de recrear la serie electromotriz. El autor proponía emplear un electrolito estándar; sin embargo, notó que tal solución no existía, ya que el agua extraída de los suelos de diferentes ubicaciones presentaba una composición y concentración de sales distinta (Buddhue, 1957). En México, gracias a una compleja topografía, un amplio gradiente altitudinal y una diversidad climática, litológica y paisajística, existe una gran variedad de suelos, encontrando 26 de los 32 grupos de suelos reconocidos por la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (SEMARNAT, 2010, 2013). La distribución de suelos en función del pH (Figura 8.2) muestra de manera general que los suelos ácidos se extienden principalmente en la mitad austral de México y a lo largo de la Sierra Madre Occidental (Figura 8.2a), coincidiendo con las zonas de climas tropicales y templados; los suelos neutros se distribuyen por todo el país (Figura 8.2b); y los suelos alcalinos se encuentran mayoritariamente en la parte septentrional del país (Figura 8.2c; INEGI, 2008, 2013) coincidiendo con las zonas con climas áridos. Por lo tanto, para determinar la tasa de disolución que experimentaría una meteorita metálica dependiendo la región de la República Mexicana en la que haya caído, se recomienda que en trabajo futuros se consideren diferentes electrolitos que simulen la composición y pH de los suelos de diferentes regiones del país.

Distribución espacial del pH de los suelos de México

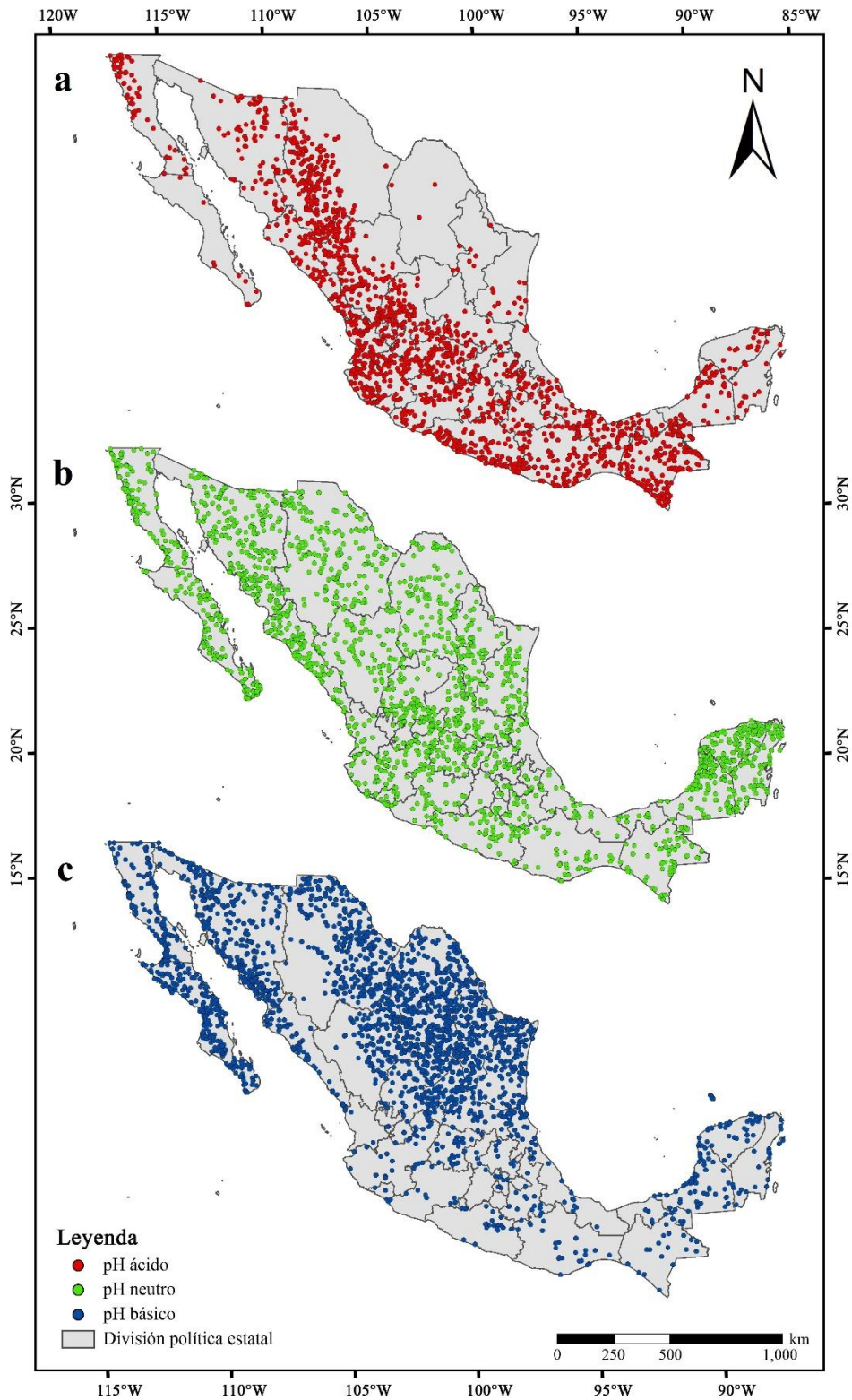


Figura 8.2 Mapa de la distribución espacial del pH de los suelos de México. Elaboración propia con información de los Perfiles de suelos y del Marco Geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos de INEGI (2008, 2013).

CAPÍTULO IX

Conclusiones

9. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos y su posterior discusión se pueden formular las siguientes conclusiones.

Con respecto al análisis de la abundancia y distribución espacial de la colección de meteoritas de México se concluye que:

- Los hallazgos mexicanos se conforman por un mayor número de meteoritas metálicas (57 ejemplares) que pétreas (32 ejemplares) o metálico-pétreas (3 ejemplares).
- Al comparar con la abundancia mundial de hallazgos, la colección mexicana exhibe un sesgo de muestreo hacia los ejemplares metálicos.
- En la República Mexicana, el 83.7% de los hallazgos (77 ejemplares) han sido encontrados en la parte norte del país, principalmente en los Estados de Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas que concentran 56 ejemplares.
- El descubrimiento de material meteorítico en México es principalmente fortuito, por lo que la baja abundancia de ejemplares pétreos en el país puede deberse a la falta de proyectos de búsqueda y recolección de meteoritas.
- Las meteoritas metálicas representan el 99.5% de la masa total de todos los hallazgos mexicanos.
- La colección mexicana de hallazgos parece ejemplificar la influencia de las condiciones climáticas en la abundancia, masa y distribución de las meteoritas:
 - En regiones tropicales y templadas, la escases de reportes de hallazgos de meteoritas puede deberse a un intemperismo vigoroso promovido por una mayor disponibilidad de agua.
 - El hallazgo de un mayor número y variedad de meteoritas en zonas con climas áridos parece reflejar condiciones climáticas más favorables para su conservación.
- Veintiuno de los 24 hallazgos con una masa menor a 1 kg han sido descubiertos en regiones con climas áridos (1 metálico y 20 pétreos).
- De los 21 hallazgos encontrados en zonas con climas tropicales y templados, 18 presentan una masa mayor a 1 kg (16 metálicos, 1 pétreo y 1 metálico-pétreo).
- El 77.2% de los hallazgos mexicanos (39 metálicos, 30 pétreos y 2 metálico-pétreos) han sido encontrados en regiones con climas áridos.

- Tomando como referencia las características en común entre las áreas de recolección densas en desiertos calientes, una primera delimitación de posibles zonas de acumulación y recolección de meteoritas en México puede valorar como lugares de interés a regiones llanas (como depresiones de deflación, zonas lacustres secas) con clima árido, litología superficial clara (como sedimentos marinos calcáreos) y vegetación de tipo matorral xerófilo.
- Si se identifican zonas potencialmente favorables para la acumulación y recolección de meteoritas en México, la implementación de campañas de búsqueda permitirá recuperar una mayor cantidad y variedad de material meteorítico con lo cual la colección mexicana puede llegar a mostrar una abundancia más cercana a la mundial gracias a un muestreo más completo.

Con base en los análisis electroquímicos realizados en la meteorita metálica Catorce b se puede decir que:

- Las meteoritas metálicas, a diferencia de las aleaciones y metales industriales, son materiales heterogéneos que presentan una variedad de minerales y características texturales que pueden influir en su comportamiento electroquímico.
- Bajo las condiciones de trabajo empleadas, la cinética de la rama anódica de las curvas de polarización refleja una disolución poco activa y cierta tendencia a un efecto de pasivación.
- Se observó una disolución preferencial de la kamacita, especialmente alrededor de los bordes de otros minerales, y mayor resistencia a la corrosión en fases como la taenita y los fosfuros.
- Los productos de corrosión formados bajos las condiciones experimentales usadas son estables, no se disuelven y permanecen en la superficie de la meteorita mostrando un efecto de protección.
- Bajo las condiciones de trabajo empleadas, la cinética de la rama catódica de las curvas de polarización indica que la reducción es una etapa lenta e influye en la velocidad de corrosión de la meteorita.
- A partir del método de extrapolación de Tafel y las leyes de Faraday, la velocidad de corrosión promedio de Catorce b en una solución de 1 wt. % de NaCl está en un intervalo de 8.3 a 13.0 $\mu\text{m}/\text{año}$.
- Las condiciones experimentales y el electrolito empleados no representan todos los mecanismos de corrosión ni tasas de disolución que pueden experimentar las meteoritas metálicas.
- A pesar de que factores como la heterogeneidad de la muestra, el diseño experimental o la presencia de productos de corrosión causaran variación en la respuesta del sistema entre los análisis, el comportamiento electroquímico observado en la meteorita Catorce b concuerda con los reportado para otros ejemplares en trabajos anteriores.

- En condiciones de inmersión continua en una solución de 1 wt. % de NaCl a pH casi neutro y temperatura ambiente (24° C), la meteorita Catorce b es un material con un comportamiento electroquímicamente poco reactivo que muestra resistencia a la corrosión.

A partir de las consideraciones realizadas en la discusión de los resultados electroquímicos, para trabajos futuros se recomienda: 1) emplear una mayor área de trabajo, mínimo de 25 mm²; 2) realizar los análisis en diferentes tipos de meteoritas metálicas o, en su defecto, en aleaciones sintéticas que tengan una composición química lo más cercana a la de una meteorita metálica; 3) considerar varios electrolitos que simulen la composición y pH de los suelos de México para determinar la tasa de disolución en diferentes regiones del país; y 4) llevar a cabo pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica para evaluar la resistencia a la polarización y describir el comportamiento de la capa de productos de corrosión.

REFERENCIAS

Abd El-Ghani M. M., Huerta-Martínez F. M., Hongyan L. y Qureshi R. 2017. Plant responses to hyperarid desert environments. Springer International Publishing.

Aboulahris M., Chennaoui Aoudjehane H., Rochette P., Gattacceca J., Jull A. T., Laridhi Ouazaa N., Folco L. y Buhl S. 2019. Characteristics of the Sahara as a meteorite recovery surface. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(12), 2908-2928.

Ahmad Z. 2006. Corrosion Kinetics. En *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier, pp.57-119.

Alharthi N., Sherif E. S. M., Abdo H. S. y Zein El Abedin S. 2017. Effect of nickel content on the corrosion resistance of iron-nickel alloys in concentrated hydrochloric acid pickling solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.

Al-Kathiri A., Hofmann B. A., Jull A. T. y Gnos E. 2005. Weathering of meteorites from Oman: Correlation of chemical and mineralogical weathering proxies with ¹⁴C terrestrial ages and the influence of soil chemistry. *Meteoritics & Planetary Science*, 40(8), 1215-1239.

Anderson S. P. 2019. Breaking it down: mechanical processes in the weathering engine. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 15(4), 247-252.

Antarctic Meteorite Working Group. 1978. Sample Requests. *Antarctic Meteorite Newsletter*, 1(3), 1-38.

April R. y Newton R. 1992. Mineralogy and mineral weathering. En Johnson et al. (Ed.), *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling*. Springer-Verlag, pp. 378-425.

ASM International. 1987. *ASM Handbook Corrosion*. Vol. 13. ASM International.

Belda M., Holtanová E., Halenka T. y Kalvová J. 2014. Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Climate research*, 59(1), 1-13.

Benzerara K., Menguy N., Guyot F., Dominici C. y Gillet, P. 2003. Nanobacteria-like calcite single crystals at the surface of the Tataouine meteorite. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(13), 7438-7442.

Benzerara K., Yoon T. H., Menguy N., Tyliczszak T. y Brown G. E. 2005. Nanoscale environments associated with bioweathering of a Mg-Fe-pyroxene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(4), 979-982.

- Benzerara K., Chapon V., Moreira D., López-García P., Guyot F. y Heulin T. 2006. Microbial diversity on the Tatahouine meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, 41(8), 1249-1265.
- Bevan A. W. R. 1992. Australian meteorites. *Records of the Australian Museum Supplement*, 15(1), 27.
- Bevan A. W. R. 1996. Meteorites recovered from Australia. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 79, 33.
- Bevan A. W. R. 2006. Desert meteorites: a history. Geological Society, London, Special Publications, 256(1), 325-343.
- Bevan A. W. R. y Bindon P. 1996. Australian Aborigines and meteorites. *Records-Western Australian Museum*, 18, 93-102.
- Bevan A. W. R., Bland P. A. y Jull A. T. 1998. Meteorite flux on the Nullarbor region, Australia. Geological Society, London, Special Publications, 140(1), 59-73.
- Berthelin J. 1988. Microbial weathering processes in natural environments. En Lerman A. y Maybeck M. (Ed.) *Physical and chemical weathering in geochemical cycles*. Springer, Dordrecht, pp. 33-59.
- Bischoff A. 1998. Aqueous alteration of carbonaceous chondrites: Evidence for preaccretionary alteration-A review. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(5), 1113-1122.
- Bischoff A. y Geiger T. 1995. Meteorites from the Sahara: Find locations, shock classification, degree of weathering and pairing. *Meteoritics*, 30(1), 113-122.
- Bjorkman J. K. 1973. Meteors and meteorites in the ancient Near East. *Meteoritics*, 8.
- Bland P. A. 2006. Terrestrial weathering rates defined by extraterrestrial materials. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), 257-261.
- Bland P. A., Berry F. J., Smith T. B., Skinner S. J. y Pillinger C. T. 1996. The flux of meteorites to the Earth and weathering in hot desert ordinary chondrite finds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11), 2053-2059.
- Bland P. A., Kelley S. P., Berry F. J., Cadogan J. M. y Pillinger, C. T. 1997. Artificial weathering of the ordinary chondrite Allegan: Implications for the presence of Cl—as a structural component in akaganeite. *American Mineralogist*, 82(11-12), 1187-1197.
- Bland P. A., Sexton A. S., Jull A. J. T., Bevan A. W. R., Berry F. J., Thornley D. M. y Pillinger C. T. 1998a. Climate and rock weathering: A study of terrestrial age dated ordinary chondritic meteorites from hot desert regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(18), 3169-3184.

- Bland P. A., Berry F. J. y Pillinger C. T. 1998b. Rapid weathering in Holbrook: An iron-57 Mössbauer spectroscopy study. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(1), 127-129.
- Bland P. A., Bevan A. W. y Jull A. W. 2000a. Ancient meteorite finds and the Earth's surface environment. *Quaternary Research*, 53(2), 131-142.
- Bland P. A., Lee M. R., Sexton A. S., Franchi I. A., Fallick A. E. T., Miller M. F., Cadogan J. M., Berry F. J. y Pillinger C. T. 2000b. Aqueous alteration without a pronounced oxygen-isotopic shift: Implications for the asteroidal processing of chondritic materials. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(6), 1387-1395.
- Bland P. A., Zolensky M. E., Benedix G. K. y Sephton M. A. 2006. Weathering of chondritic meteorites. *Meteorites and the early solar system II*, 1, 853-867.
- Brearley A. J. 2006. The action of water. En Laurretta D. S. y McSween H. Y. (Ed.) *Meteorites and the early solar system II*. University of Arizona Press, pp. 587-624.
- Bryant D. E., Greenfield D., Walshaw R. D., Evans S. M., Nimmo A. E., Smith C. L., Wang L., Pasek M. A. y Kee T. P. 2009. Electrochemical studies of iron meteorites: phosphorus redox chemistry on the early Earth. *International Journal of Astrobiology*, 8(1), 27-36.
- Buchanan R. A. y Stansbury E. E. 2013. Electrochemical corrosion. En Kutz M. (Ed.) *Handbook of environmental degradation of materials*. Elsevier. pp. 87-125.
- Buchwald V. F. 1975. *Handbook of iron meteorites: Their history, distribution, composition, and structure*. Volumes 1, 2 & 3. Berkeley: University of California Press.
- Buchwald V. F. 1990. On the difference between weathering products on Antarctic and non-Antarctic meteorites. En *Workshop on Differences between Antarctic and non-Antarctic meteorites*. LPI Technical Report, (90-01), 24-26.
- Buchwald V. F. y Clarke R. S. 1989. Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganéite (β -FeOOH): The Antarctic meteorite case. *American Mineralogist*, 74(5-6), 656-667.
- Buchwald V. F. y Koch C. B. 1995. Hibbingite (β -Fe₂(OH)₃Cl), a chlorine-rich corrosion product in meteorites and ancient iron objects. *Meteoritics*, 30.
- Buddhue J. D. 1957. *The oxidation and weathering of meteorites* (No. 3). University of New Mexico Press.
- Carroll D. 2012. *Rock weathering*. Nueva York: Plenum Press.
- Cassidy W. A., Olsen E. y Yanai K. 1977. Antarctica: a deep-freeze storehouse for meteorites. *Science*, 198(4318), 727-731.

Cervantes-de la Cruz K. E., Ortega-Gutiérrez F., Solé-Viñas J., Segura-Peralta A., Reyes-Salas M. A., Ángeles-García B. S., Macías-Romo M. D. C. y Linares-López C. 2015. Experimental chondrules by melting samples of olivine, clays, and carbon with a CO² laser. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(3), 401-412.

Cervantes-Ramírez M.C. 2002. Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. México: Instituto de Geografía, UNAM.

Choi Y. S., Shim J. J. y Kim J. G. 2005. Effects of Cr, Cu, Ni and Ca on the corrosion behavior of low carbon steel in synthetic tap water. *Journal of alloys and compounds*, 391(1-2), 162-169.

Clarke Jr. R. S., Jarosewich E., Mason B., Nelen J., Gomez M. y Hyde J. R. 1971. Allende, Mexico, Meteorite Shower. *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*.

Comelli D., D'orazio M., Folco L., El-Halwagy M., Frizzi T., Alberti R., Capogrosso V., Elnaggar A., Hassan H., Nevin A., Porcelli F., RASHED M. G. y Valentini G. 2016. The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(7), 1301-1309.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. 2021. Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Consultado en abril del 2021: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 1998. Climas. Consultado en octubre del 2020: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no

Consolmagno G. J. y Britt D. T. 1998. The density and porosity of meteorites from the Vatican collection. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(6), 1231-1241.

Consolmagno G. J., Britt D. T. y Macke R. J. 2008. The significance of meteorite density and porosity. *Geochemistry*, 68(1), 1-29.

Dávalos-Elizondo M. G. 2006. Una revisión sobre la naturaleza y el origen de las meteoritas metálicas y estudio preliminar de una meteorita metálica mexicana. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, Nuevo León, México.

del Castillo A., Becerril L. G. y Moreau E. 1893. Carte de los meteoritos de México o regiones de la Republica en que han caído fierros y piedras meteóricas. Biblioteca nacional de Francia, departamento de mapas y planes, GE D-22083 [recurso en línea]:

http://www.europeana.eu/portal/es/record/9200365/BibliographicResource_3000059511146.html

Díaz I., Cano H., Lopesino P., De la Fuente D., Chico B., Jiménez J. A., Medina S. F. y Morcillo M. 2018. Five-year atmospheric corrosion of Cu, Cr and Ni weathering steels in a wide range of environments. *Corrosion Science*, 141, 146-157.

Duczmal-Czernikiewicz A. y Michalska D. 2018. Mineralogy and microstructure of the Morasko meteorite crust. *Planetary and Space Science*, 164, 44-53.

Elkins-Tanton L. T. 2010). *Asteroids, meteorites, and comets*. Infobase Publishing.

ESRI. 2011. *ArcGIS Desktop: Release 10*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Fernández-Solis C. D., Vimalanandan A., Altin A., Mondragón-Ochoa J. S., Kreth K., Keil P. y Erbe A. 2016. Fundamentals of electrochemistry, Corrosion and Corrosion Protection. En Lang P. y Liu Y. (Ed.) *Soft Matter at Aqueous Interfaces*. Springer, Cham. pp. 29-70.

Flint G. N., Oldfield J. W., Dautovich D. P. y Mahi, F. T. 2017. Corrosion of Iron–Nickel Alloys and Maraging Steel. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier.

Frankel G. S. 2016. Fundamentals of Corrosion Kinetics. En Hughes A. E., Mol J. M. C., Zheludkevich M. L. y Buchheit R. G. (Ed.) *Active protective coatings: New-Generation Coatings for Metals*. Springer Science, pp. 16-32.

Frings P. J. y Buss H. L. 2019. The central role of weathering in the geosciences. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 15(4), 229-234.

García E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Quinta edición. México: Instituto de Geografía, UNAM.

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

Gattacceca J., Bouvier A., Grossman J., Metzler K. y Uehara M. 2019. The meteoritical bulletin, No. 106. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(2), 469-471.

Gillet P., Barrat J. A., Deloule E., Wadhwa M., Jambon A., Sautter V., Devouard B., Neuville D. Benzerara K. y Lesourd M. 2002. Aqueous alteration in the Northwest Africa 817 (NWA 817) Martian meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1), 431-444.

Golden D. C., Ming D. W. y Zolensky M. E. 1995. Chemistry and mineralogy of oxidation products on the surface of the Hoba nickel-iron meteorite. *Meteoritics*, 30(4), 418-422.

González-Medrano F. 2012. Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

González-Sánchez J. A. y Dzib-Pérez L. R. 2015. Introducción a la electroquímica. En Vargas J. C. y Guerrero G. P. (Ed.) Problemática y Diagnóstico de Sistemas Constructivos con Metales. pp. 116-137.

González-Toril E., Martínez-Frías J., Gómez Gómez J. M., Rull F. y Amils R. 2005. Iron meteorites can support the growth of acidophilic chemolithoautotrophic microorganisms. *Astrobiology*, 5(3), 406-414.

Gooding J. L. 1982. Mineralogical aspects of terrestrial weathering effects in chondrites from Allan Hills, Antarctica. En *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, (12), 1105-1122.

Gooding, J. L. 1986. Weathering of stony meteorites in Antarctica. En *International workshop on Antarctic meteorites*, pp. 48-54.

Gooding J. L., Wentworth S. J. y Zolensky M. E. 1991. Aqueous alteration of the Nakhla meteorite. *Meteoritics*, 26(2), 135-143.

Grady M. M., Wright I. P. y Pillinger C. T. 1990. Comparisons between Antarctic and non-Antarctic meteorites based on carbon stable isotope geochemistry. En *Workshop on Differences between Antarctic and non-Antarctic meteorites*. LPI Technical Report, (90-01), 38-42.

Grady M. M., Pratesi G. y Moggi-Cecchi V. 2014. *Atlas of Meteorites*. España: Cambridge University Press.

Graham A. L. 1980. The meteoritical bulletin, no. 57, 1980 March. *Meteoritics*, 15, 93-104.

Graham A. L. y Annexstad J. O. 1989. Antarctic meteorites. *Antarctic science*, 1(1), 3-14.

Gronstal A., Pearson V., Kappler A., Dooris C., Anand M., Poitrasson F., Kee T. P. y Cockell C. S. 2009. Laboratory experiments on the weathering of iron meteorites and carbonaceous chondrites by iron-oxidizing bacteria. *Meteoritics & Planetary Science*, 44(2), 233-247.

Grossman J. N. 2000. The meteoritical bulletin, no. 84, 2000 August. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(S5), A199-A225.

Hartmann D. L. 2015. *Global physical climatology*. Segunda edición. Elsevier Science.

Harvey R. 2003. The origin and significance of Antarctic meteorites. *Geochemistry*, 63(2), 93-147.

Heide F. y Wlotzka F. 1995. Meteorites, traducido por Clarke Jr R. S. y Wlotzka F. Nueva York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hernández C. M. E. y García E. 1997. Condiciones climáticas de las zonas áridas de México. *Geografía y Desarrollo*, 15, 5-16.

Hofmann B. A., Gnos E., Hauser M., Moser L., Kathiri A. A. y Franchi I. A. 2001. The 2001 Omani-Swiss meteorite search campaign and recovery of shergottite Sayh al Uhaymir 094. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 36, A82.

Huss G. R. 1991. Meteorite mass distributions and differences between Antarctic and non-Antarctic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1), 105-111.

Hutson M., Ruzicka A., Timothy Jull A. J., Smaller J. E. y Brown R. 2013. Stones from Mohave County, Arizona: Multiple falls in the "Franconia strewn field". *Meteoritics & Planetary Science*, 48(3), 365-389.

Hutzler A., Gattacceca J., Rochette P., Braucher R., Carro B., Christensen E. J., Cournede C., Gounelle M., Laridhi Ouazaa N., Martinez R., Valenzuela M., Warner M. y Bourles D. 2016. Description of a very dense meteorite collection area in western Atacama: Insight into the long-term composition of the meteorite flux to Earth. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(3), 468-482.

Ikeda Y. y Kojima H. 1991. Terrestrial alteration of Fe-Ni metals in Antarctic ordinary chondrites and the relationship to their terrestrial ages. *Antarctic Meteorite Research*, 4, 307.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1991. Datos Básicos de la Geografía de México, pp. 77-102.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2006. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Precipitación media anual. Consultado en línea el a través del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2007. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Temperatura media anual. Consultado en línea el a través del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267551>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Consultado en línea el a través del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013. Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional). Consultado en línea el a través del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. Marco Geoestadístico, junio 2017. Consultado en línea el a través del sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463142683>

Jinlong L., Tongxiang L. y Chen, W. 2016. Comparison of corrosion behavior between coarse grained and nanocrystalline NiFe alloys in chloride solutions and proton exchange membrane fuel cell environment by EIS, XPS and Raman spectra techniques. *Energy*, 112, 67-74.

Jull A. T., Wlotzka F., Palme H. y Donahue D. J. 1990. Distribution of terrestrial age and petrologic type of meteorites from western Libya. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10), 2895-2898.

Jull A. J. T., Wlotzka F. y Donahue D. J. 1991. Terrestrial ages and petrologic description of Roosevelt County meteorites. En *Lunar and Planetary Science Conference (22)*, 667-668.

Jull A. J. T., Donahue D. J., Cielaszyk E. y Wlotzka F. 1993. Carbon-14 terrestrial ages and weathering of 27 meteorites from the southern high plains and adjacent areas (USA). *Meteoritics*, 28(2), 188-195.

Keller P. 1970. Eigenschaften von $(\text{Cl},\text{F},\text{OH})_2\text{Fe}_2(\text{O},\text{OH})_{16}$ und Akaganéite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 113, 29-49.

Khan J. A. y Arsalan M. H. 2007. *General Climatology*. Pakistán: Department of Geography, University of Karachi.

King A. J., Schofield P. F. y Russell S. S. 2017. Type 1 aqueous alteration in CM carbonaceous chondrites: Implications for the evolution of water - rich asteroids. *Meteoritics & Planetary Science*, 52(6), 1197-1215.

Koeberl C. y Cassidy W. A. 1991. Differences between Antarctic and non-Antarctic meteorites: An assessment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1), 3-18.

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf, B. y Rubel, F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263

Krot A. N., Keil K., Goodrich C. A., Scott E. R. D. y Weisberg M. K. 2005. Classification of Meteorites. En Davis, A. M. (Ed.), *Meteorites, Comets, and Planets: Treatise on Geochemistry*. Elsevier, pp. 83-128.

Landolfo R., Cascini L. y Portioli F. 2010. Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*, 2(7), 2163-2175.

- Lee M. R. y Bland P. A. 2004. Mechanisms of weathering of meteorites recovered from hot and cold deserts and the formation of phyllosilicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4), 893-916.
- Lee N. N., Fritz J., Fries M. D., Gil J. F., Beck A., Pellinen-Wannberg A., Schmitz B., Steele A. y Hofmann B. A. 2017. The extreme biology of meteorites: their role in understanding the origin and distribution of life on Earth and in the Universe. En Stan-Lotter H. y Fendrihan S. (Ed.) *Adaption of Microbial Life to Environmental Extremes*. Springer, Cham, pp. 283-325.
- Li S., Wang S., Leya I., Smith T., Tang J., Wang P., Zeng X. I. y Li Y. 2017. A chondrite strewn field was found in east of Lop Nor, Xinjiang. *Chinese science bulletin*, 62(21), 2407-2415.
- Lipschutz M. E. y Schultz L. 2014. Meteorites. En Spohn T., Breuer D. y Johnson T. V. (Ed.) *Encyclopedia of the solar system*. Elsevier, pp. 625-655.
- Lock A. U. y Tang I. D. 1988. Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión. *Revista de Química*, 2(1), 23-31.
- Lohmann U., Sausen R., Bengtsson L., Cubasch U., Perlwitz J. y Roeckner E. 1993. The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 177-193.
- López-García K. 2018. Caracterización de una meteorita metálica de la localidad de Real de Catorce, S.L.P., México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.
- Losiak A. y Velbel M. A. 2011. Evaporite formation during weathering of Antarctic meteorites - A weathering census analysis based on the ANSMET database. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(3), 443-458.
- Maderey-Rascón L. E. y Carrillo-Rivera J. J. 2005. El recurso agua en México: un análisis geográfico. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- McAdam M. M., Sunshine J. M., Howard K. T. y McCoy T. M. 2015. Aqueous alteration on asteroids: Linking the mineralogy and spectroscopy of CM and CI chondrites. *Icarus*, 245, 320-332.
- McCafferty E. 2010. *Introduction to corrosion science*. Springer Science & Business Media.
- McCall G. J. H. 2005. EARTH | Mantle. En Selley R. C., Cocks L. R. M. y Plimer I. R. (Ed.), *Encyclopedia of Geology*. Elsevier, Academic Press, pp. 397-403.
- Melosh H. J. 2011. *Planetary surface processes*. Nueva York: Cambridge University Press.

Merriam D. F. y Harbaugh J. W. 2007. Meteorites and possible meteorite impact features in Kansas. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 110(1), 61-68.

Meteoritical Bulletin Database. 2020. The Meteoritical Society. Consultado en línea en noviembre del 2020: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>

Middelton N. y Thomas D. 1997. *World atlas of desertification*. Segunda edición. Gran Bretaña: Arnold, Hodder Headline.

Miyamoto M. 1988. Hydration bands near 3 μm and weathering of some Antarctic meteorites. *Earth and planetary science letters*, 89(3-4), 398-402.

Miyamoto M. 1991. Differences in the degree of weathering between Antarctic and non-Antarctic meteorites inferred from infrared diffuse reflectance spectra. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1), 89-98.

Miyamoto M., Kojima H. y Yanai, K. 1989. Weathering of some Antarctic meteorites: Infrared spectroscopy. *Proceedings of the National Institute of Polar Research Symposium Antarctic Meteorite*, (2), 296-302.

Montoya-Pérez M. A. 2016. Caracterización morfológica y mineralógica de condros barrados de olivino presentes en la condrita Allende. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Morales-Rodríguez L. 2012. *La geología mexicana en el siglo XIX. Una revisión histórica de la obra de Antonio del Castillo, Santiago Ramírez y Mariano Bárcena*. México: Secretaría de Cultura de Michoacán/Plaza y Valdés.

Munayco P., Munayco J., de Aviliez R. R., Valenzuela M., Rochette P., Gattacceca J. y Scorzelli R. B. 2013. Weathering of ordinary chondrites from the Atacama Desert, Chile, by Mössbauer spectroscopy and synchrotron radiation X-ray diffraction. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(3), 457-473.

Muñoz C., Guerra N., Martínez-Frías J., Lunar, R. y Cerda J. 2007. The Atacama Desert: A preferential arid region for the recovery of meteorites - Find location features and strewnfield distribution patterns. *Journal of arid environments*, 71(2), 188-200.

Muñoz-Castro A. E. 2008. Implantación iónica por plasma en titanio y aceros inoxidable usados en prótesis e instrumental médico. Tesis de Maestría, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México.

Nagata T. 1978. A possible mechanism of concentration of meteorites within the meteorite ice field in Antarctica. En *Proceedings of the second symposium on Yamato meteorites*, *Memoirs of the National Institute of Polar Research*, Special Issue (8), 70-92.

- Nishimura T., Katayama H., Noda K. y Kodama, T. 2000. Effect of Co and Ni on the corrosion behavior of low alloy steels in wet/dry environments. *Corrosion Science*, 42(9), 1611-1621.
- Norton O. R. y Chitwood L. 2008. *Field guide to meteors and meteorites*. Londres: Springer-Verlag.
- Ostrowski D. y Bryson K. 2019. The physical properties of meteorites. *Planetary and Space Science*, 165, 148-178.
- Ouknine L., Khiri F., Ibhi A., Heikal M. T. S., Saint-Gerant T. y Medjkane M. 2019. Insight into African meteorite finds: Typology, mass distribution and weathering process. *Journal of African Earth Sciences*, 158, 103551.
- Owens I. y Zawar-Reza P. 2015. *Weather and Climate. Antarctica's Role in the Global Atmospheric System*. En Ligett et al. (Ed.), *Exploring the Last Continent. An Introduction to Antarctica*. Springer International Publishing Switzerland, pp. 91-114.
- Parsons A. J. y Abrahams A. D. 2009. *Geomorphology of desert environments*. En Parsons A. J. y Abrahams A. D. (Ed.), *Geomorphology of desert environments*. Springer Science Business Media B.V, pp. 3-7.
- Peel M. C., Finlayson B. L. y McMahon T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Pirim C., Pasek M. A. Sokolov D. A., Sidorov, A. N., Gann R. D. y Orlando T. M. 2014. Investigation of schreibersite and intrinsic oxidation products from Sikhote-Alin, Seymchan, and Odessa meteorites and Fe₃P and Fe₂NiP synthetic surrogates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140, 259-274.
- Price D. G. 1995. Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28(3), 243-252.
- Pourkhorsandi H., Gattacceca J., Rochette P., d'Orazio M., Kamali H., de Avillez R. y Jull A. T. 2019. Meteorites from the Lut Desert (Iran). *Meteoritics & Planetary Science*, 54(8), 1737-1763.
- Poursaee A. 2014. *Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment*. En Wang M. L., Lynch J. P. y Sohn H. (Ed.) *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. Woodhead Publishing. pp. 357-382.
- Reed S. J. B. 1965. Electron-probe microanalysis of schreibersite and rhabdite in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29(5), 513-534.
- Reve R. W. y Uhlig H. H. 2008. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons, Inc.

Reyes-Salas A. M., Sánchez-Rubio G., Altuzar-Coello P., Ortega-Gutiérrez F., Flores-Gutiérrez D., Cervantes-de la Cruz K., Reyes E. y Linares-López, C. 2010. Petrography and mineral chemistry of Escalón meteorite, an H4 chondrite, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(1).

Rohli R. V. y Vega A. J. 2017. *Climatology*. Cuarta edición. Estados Unidos Americanos: Jones & Bartlett Learning.

Rubin A. E. 1997. Mineralogy of meteorite groups: An update. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(5), 733-734.

Rubin A. E. y Huber H. 2005. A weathering index for CK and R chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 40(8), 1123-1130.

Rull F., Martínez-Frias J., Sansano A., Medina J. y Edwards, H. G. M. 2004. Comparative micro-Raman study of the Nakhla and Vaca Muerta meteorites. *Journal of Raman Spectroscopy*, 35(6), 497-503.

Russell S. S., Folco L., Grady M. M., Zolensky M. E., Jones R., Righter K., Zpifel J. y Grossman J. N. 2004. The Meteoritical Bulletin, No. 88, 2004 July. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(S8), A215-A272.

Rzedowski J. 2006. *Vegetación de México*. 1ª Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Salazar-Jiménez J. A. 2015. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136.

Salisbury, J. W. y Hunt G. R. 1974. Meteorite spectra and weathering. *Journal of Geophysical Research*, 79(29), 4439-4441.

Samuels T., Bryce C., Landenmark H., Marie-Loudon C., Nicholson N., Stevens A. H. y Cockell, C. 2020. Microbial weathering of minerals and rocks in natural environments. *Biogeochemical cycles: Ecological drivers and environmental impact*, 59-79.

Sánchez-Rubio G., Rubinovich-Kogan R., Lozano-Santa Cruz R., Medina-Malagón S. y Flores-Gutiérrez D. 2001. *Las Meteoritas de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Scherer P. y Delisle G. 1992. Are there high meteorite concentrations in the Atacama Desert/Chile? *Meteoritics*, 27.

Schlüter J., Schultz L., Thiedig F., Al-Mahdi B. O. y Aghreb A. A. 2002. The Dar al Gani meteorite field (Libyan Sahara): Geological setting, pairing of meteorites, and recovery density. *Meteoritics & Planetary Science*, 37(8), 1079-1093.

Schultz L., Scherer P., Spettel B., Wlotzka F., et al. 1998. Ten new meteorites from the Ténéré desert (Niger): classification, noble gases, cosmogenic radionuclides, and terrestrial ages. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 33, A138.

Schutt J., Fessler B. y Cassidy W. A. 1993. Antarctic Meteorite Location and Mapping Project, 2nd edition. LPI Tech. Rpt. 93-07. Lunar and Planetary Institute, Houston.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Edición 2010. Dirección General de Estadística e Información Ambiental.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2013. Suelos. En Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México.

Sephton M. A., Bland P. A., Pillinger C. T. y Gilmour I. 2004. The preservation state of organic matter in meteorites from Antarctica. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(5), 747-754.

Servicio Geológico Mexicano. 2021. GEOINFOMEX-SGC. Consultado en línea en abril del 2021: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

Shreir L. L., Jarman R. A. y Burstein G. T. 2000. Corrosion: Metal/Environment Reactions. Vol. 1. Butterworth-Heinemann.

Steele A., Goddard D. T., Stapleton D., Toporski J. K., Peters V., Bassinger V., Sharples G., Wynn-Williams D. D. y McKay D. S. 2000. Investigations into an unknown organism on the martian meteorite Allan Hills 84001. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(2), 237-241.

Tackett S. L., Meyer W. M., Pany F. G. y Moore C. B. 1966. Electrolytic dissolution of iron meteorites. *Science*, 153(3738), 877-880.

Tackett S. L., Tucker R. A. y Duncan, F. R. 1970. Electrolytic corrosion of iron meteorites. *Meteoritics*, 5(1), 43-55.

Tait W. S. 2018. Electrochemical Corrosion Basics. En Kutz M. (Ed.) *Handbook of environmental degradation of materials*. William Andrew. pp. 97-115.

Telegdi J., Shaban A. y Vastag G. 2018. Biocorrosion-Steel. En Wandelt K. (Ed.) *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*. Elsevier. pp. 28-42.

Terán-Bobadilla E., Abundis-Patiño J. H., Añorve C., Moraila C. R., Ortega-Gutiérrez F. y Aragón-Calvo M. A. 2017. On a novel geometric analysis of the Bacubirito meteorite. *Earth, Moon, and Planets*, 120(2), 101-111.

The Geological Society. 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological society engineering group working party report. Quarterly Journal of engineering Geology, 28, 207-242.

Tilley D. B. y Bevan A. W. 2010. The Prolonged Weathering of Iron and Stony-Iron Meteorites and their Anomalous Contribution to the Australian Regolith, 77-88.

Torres-Fernández I., Aramendia J., Gomez-Nubla L., Castro K. y Madariaga J. M. 2017. Geochemical study of the Northwest Africa 6148 Martian meteorite and its terrestrial weathering processes. Journal of Raman Spectroscopy, 48(11), 1536-1543.

Treiman A. H., Barrett R. A. y Gooding, J. L. 1993. Preterrestrial aqueous alteration of the Lafayette (SNC) meteorite. Meteoritics, 28(1), 86-97.

Valenzuela M., Abdu Y., Scorzelli R. B., Duttine M., Morata, D. y Munayco, P. 2008. Room temperature 57 Fe Mössbauer spectroscopy of ordinary chondrites from the Atacama Desert (Chile): constraining the weathering processes on desert meteorites. En Proceedings of the 10th Latin American Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (LACAME 2006). Springer Science Business Media B.V, pp. 9-14.

Velbel M. A. 1988. The distribution and significance of evaporitic weathering products on Antarctic meteorites. Meteoritics, 23(2), 151-159.

Velbel M. A. y Gooding J. L. 1990. Terrestrial weathering of Antarctic stony meteorites-developments 1985-1989. En Workshop on Differences between Antarctic and non-Antarctic meteorites. LPI Technical Report, (90-01), 94-98.

Velbel M. A., Long D. T. y Gooding J. L. 1991. Terrestrial weathering of Antarctic stone meteorites: Formation of Mg-carbonates on ordinary chondrites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(1), 67-76.

Velbel M. A. 2012. Aqueous alteration in Martian meteorites: Comparing mineral relations in igneous-rock weathering of Martian meteorites and in the sedimentary cycle of Mars.

Velbel M. A. 2014. Terrestrial weathering of ordinary chondrites in nature and continuing during laboratory storage and processing: Review and implications for Hayabusa sample integrity. Meteoritics & Planetary Science, 49(2), 154-171.

Viles H. A. 2012. Microbial geomorphology: a neglected link between life and landscape. Geomorphology, 157, 6-16.

Weisberg M. K., McCoy T. J. y Krot A. N. 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. Meteorites and the early solar system II, 19, 19-52.

Weisberg M. K., Smith C., Herd C., Haack H., Yamaguchi A., Chennaoui Aoudjehane H., Welzenbach L. y Grossman J. N. 2010. The Meteoritical Bulletin, No. 98, September 2010. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(9), 1530-1551.

Wlotzka F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28, 460.

Zeng X., Li S., Leya, I., Wang S., Smith T., Li Y. y Wang P. 2018. The kumtag 016 L5 strewn field, xinjiang Province, China. *Meteoritics & planetary science*, 53(6), 1113-1130.

Zolensky M. E., Wells G. L. y Rendell H. M. 1990. The accumulation rate of meteorite falls at the Earth's surface: The view from Roosevelt County, New Mexico. *Meteoritics*, 25(1), 11-17.

Zolensky M., Bland P., Brown P. y Halliday I. 2006. Flux of extraterrestrial materials. *Meteorites and the early solar system II*, 869-888.

Zuñiga-López I. y Crespo-del Arco E. 2014. *Meteorología y climatología*. Segunda edición. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Zurfluh F. J., Hofmann B. A., Gnos E., Eggenberger U. y Jull A. T. 2016. Weathering of ordinary chondrites from Oman: Correlation of weathering parameters with ¹⁴C terrestrial ages and a refined weathering scale. *Meteoritics & planetary science*, 51(9), 1685-1700.