

REAL ACADEMIA DE DOCTORES DE ESPAÑA

**CRECIENDO HACIA
EL ESPACIO PRÓXIMO
A LA TIERRA**

**De la mineralogía y recursos terrestres
a la exploración planetaria**

DISCURSO

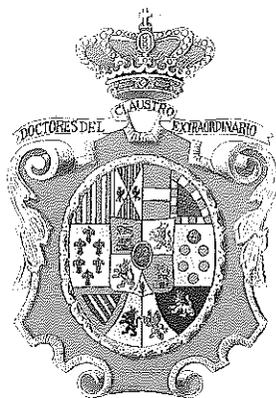
**PRONUNCIADO EN EL ACTO DE SU TOMA DE
POSESIÓN COMO ACADÉMICA DE NÚMERO POR LA**

**EXCMA. SRA. DOCTORA D.^a ROSARIO LUNAR
HERNÁNDEZ**

Y CONTESTACIÓN DEL

**EXCMO. SR. DOCTOR D. AMANDO
GARRIDO PERTIERRA**

EL DÍA 19 DE ABRIL DE 2006



**MADRID
MMVI**

Depósito legal: M. 15.236-2006
Imprime: REALIGRAF, S. A.
C/ Pedro Tezano, 26
28039 Madrid

A Fernando.

A mis hijos Fernando, Elena y Maya.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Discurso de la Excma. Sra. Dra. Dña. Rosario Lunar Hernández | 9 |
| 1. ¿Por qué crecer hacia el espacio? | 12 |
| 2. Minerales y yacimientos minerales | 17 |
| 3. El papel de los minerales en el desarrollo de nuestra sociedad | 24 |
| 3.1. La antesala del aprovechamiento moderno de los minerales | 27 |
| 3.2. Una revolución que cambió el mundo | 31 |
| 3.3. La primera gran frontera: Minerales y recursos de los mares y océanos | 35 |
| 3.4. De la Tierra al espacio | 37 |
| 4. La última gran frontera: los recursos del espacio cercano a la Tierra | 43 |
| 4.1. La Luna: un área potencial de exploración y explotación de recursos naturales | 44 |
| 4.1.1. Rocas y minerales lunares | 45 |
| 4.1.2. Hacia una base semi-permanente lunar . | 54 |
| 4.1.3. Minería lunar | 58 |
| | 5 |

| | |
|---|-----|
| 4.2. Marte: la cuestión del origen de la vida y la explotación futura de sus recursos | 61 |
| 4.2.1. En busca de recursos geológicos | 63 |
| 4.2.2. Análogos terrestres para la exploración de Marte | 66 |
| 4.2.2.1. Chimeneas submarinas | 73 |
| 4.2.3. De la hematites a la jarosita | 80 |
| 4.2.3.1. Jarosita: de su importancia histórica a la exploración de Marte | 82 |
| 4.2.3.2. Jarosita en Marte | 85 |
| 4.2.3.3. Sistema hidrotermal del Jaroso | 87 |
| Referencias bibliográficas | 93 |
| Discurso de contestación del Excmo. Sr. Dr. D. Amando Garrido Pertierra | 103 |

**DISCURSO
DE LA
EXCMA. SRA. DOCTORA D.^a ROSARIO LUNAR
HERNÁNDEZ**

Excmo. Señor Presidente,

Excmas. Señoras y Señores Académicos,

Señoras y Señores:

Cuando me comunicaron que, en la votación llevada a efecto, había sido aceptada mi candidatura para formar parte de esta Real Academia de Doctores de España, me embargó una intensa alegría, pero a la vez una profunda inquietud por la responsabilidad que ello implicaba, dado el prestigio de los Académicos y Académicas con los que compartiré trabajos y proyectos. A ellos quiero expresar, en primer lugar, mi agradecimiento por haberme otorgado su confianza para ingresar en esta Institución y por el honor que me hacen con su elección.

Es para mí una gran satisfacción pertenecer a una Academia que tiene precisamente entre sus fines contribuir al desarrollo y difusión rigurosa de las «Ciencias, las Letras y las Artes», con un planteamiento integrador y holístico. Espero poder contribuir a esos objetivos en la medida de mis posibilidades, y siempre con el estímulo de las relevantes personalidades representativas de diversos ámbitos científico-tecnológicos y de las humanidades, que forman parte de esta Real Academia de Doctores.

Mi incorporación a esta Institución constituye un hito muy importante en mi carrera profesional, académica y científica. Es por ello que me resulte obligado volver la mirada al pasado y dedicar un recuerdo agradecido a aquellas personas que directa e indirectamente marcaron mi trayectoria profesional. El Excmo. Señor Doctor Don José Sierra López, que me introdujo en el apasionante campo de la investigación de los yacimientos minerales, despertando en mí el interés por esta materia. El profesor Sierra me proporcionó formación básica

en esta disciplina y fue director de mi Tesis doctoral sobre los «Yacimientos de hierro oolítico del noroeste de la Península». A él le debo la oportunidad de trabajar con la Empresa Nacional de Investigaciones Mineras ADARO, donde realicé mis primeros trabajos como geóloga en las abruptas tierras de El Bierzo y el Este de Galicia.

El Excmo. Señor Don José Sierra me ha precedido unos meses en la toma de posesión como Académico de Número, y es para mí un honor volver a trabajar con él como compañeros de Academia, aunque yo siempre le seguiré considerando mi maestro.

Sería una muestra injustificable de ingratitud no recordar aquí a todos mis compañeros de ADARO, geólogos, ingenieros y licenciados, con los que trabajé en el campo y en el laboratorio. De ellos aprendí mucho en esta primera etapa de mi carrera profesional y siempre fueron benevolentes con esta aprendizaje de geóloga.

Al Profesor José Luis Amorós, Catedrático de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad Complutense, uno de los cristalógrafos más importantes de nuestro país. Desde 1974, año de mi incorporación a la Universidad Complutense de Madrid, le debo el que me inculcase una visión universalista de la ciencia y la disciplina científica y académica. Tras su jubilación en 1988 ocupé su cátedra, la primera que se había creado de esta disciplina en la Universidad Complutense y que habían ocupado con anterioridad profesores de la talla de Salvador Calderón (1895), autor del famoso libro «Los minerales de España», o Juan Luis Martín Vivaldi, que tanta gloria dieron a la ciencia española.

De igual manera fueron también muy importantes en mi carrera profesional las colaboraciones científicas con expertos de otras universidades e instituciones de Estados Unidos y Europa. Entre ellos, es obligado citar aquí al profesor John Gilbert (Universidad de Arizona), con quien me inicié en las técnicas avanzadas de investigación metalogenética, así como los profesores Dieter Wolf (Director del Instituto de Mineralogía de la Universidad de Freiberg), y Joseph Jaros y Milos Kuzvart (Universidad Karlova de Praga). También quiero tener una mención especial a mis queridos colegas de Chile, Mé-

xico, Argentina y Portugal, con los que mantengo desde hace muchos años una estrecha colaboración a través de proyectos de investigación.

A lo largo de mis más de treinta años dedicados a la docencia y la investigación no he dejado de aprender de mis alumnos y colaboradores: estudiantes de tercer ciclo y doctores que han trabajado conmigo y que han contribuido al trabajo científico que ha hecho posible que los miembros de esta Academia se hayan fijado en mí para ser propuesta como nuevo miembro. Tengo el orgullo de que muchos de ellos son Investigadores del CSIC, Profesores Titulares de Universidad, investigadores contratados del Programa Ramón y Cajal o desarrollen su actividad profesional en la industria. De sus éxitos profesionales me siento orgullosa y quizá, injustificadamente, también los he sentido míos.

También he aprendido mucho de mis compañeros y colegas del Departamento. La relación nominal de todos ellos sería demasiado larga de exponer aquí. A todos mi más sincera gratitud.

Pero mi vida profesional no se habría podido desenvolver por estos cauces sin el soporte de mi vida familiar: mis padres, que me enseñaron el valor de la responsabilidad, el esfuerzo y la dedicación con su ejemplo y cariño. A mis numerosos hermanos, con los que he compartido y comparto alegrías y problemas. Y no por dejarles para el final son menos importantes: Fernando, mi marido, la persona con la que comparto mi vida desde hace treinta y dos años, y mis hijos Fernando y Elena, que desde muy chiquitines entendieron el tipo de vida que he llevado y llevo, tan dedicada al trabajo.

Esta larga trayectoria me ha traído hasta esta Real Academia de Doctores de España por invitación de los Excmos. Señores Doctores Académicos Don Amando Garrido Pertierra, Doña Mónica de la Fuente del Rey y Don Antonio Bascones Martínez, que confiaron en mí y con gran entusiasmo y afecto presentaron y defendieron mi candidatura en esta estupenda aventura de la Academia. A mi reconocimiento previo a su trayectoria científica y humana, añado ahora gratitud por su generosidad, ellos me han facilitado el que me encuentre hoy entre ustedes.

A toda la Academia, gracias por darme vuestra confianza, os aseguro que asumo mi compromiso con la firme decisión de no defraudaros. Pondré todo mi empeño en ello.

Les voy a hablar hoy aquí de un tema de gran actualidad, que nos muestra cómo una rama clásica de la Geología, la Mineralogía, que ha resuelto desde siempre problemas científicos y prácticos, contribuyendo al bienestar y el progreso de la Humanidad, ha conectado con las fronteras más avanzadas de las ciencias, las que sirven de base a la exploración espacial, abriendo un nuevo panorama para el crecimiento económico en el futuro a partir de los recursos en el espacio exterior.

1. ¿POR QUÉ CRECER HACIA EL ESPACIO?

El paradigma económico de la humanidad es el crecimiento, producir más de todo para satisfacer las necesidades crecientes, y para ello son necesarios los recursos minerales. Pero ¿este crecimiento es ilimitado o por el contrario tiene límites? Los límites vienen determinados por el crecimiento demográfico, la disponibilidad de recursos naturales y los cambios ambientales. A finales de los años sesenta, del pasado siglo, amplios sectores sociales empezaron a preocuparse por la evolución de estos tres factores, quizá por un sentimiento milenarista, ante la proximidad del final del siglo xx. No se trataba de hacer predicciones de futuro, sino de establecer previsiones, que dieron como resultado numerosos informes, algunos contradictorios. Entre los que más impacto causaron fueron las conclusiones del informe «The limits to growth», del denominado Club de Roma, formado por personalidades del mundo de la economía y hombres de negocios y las conclusiones de la Conferencia Mundial convocada por la ONU, celebrada en Estocolmo, ambos en el año 1972, con conclusiones coincidentes. Pero quizá el informe que más influencia tuvo fue el encargado por el Presidente Carter en 1977 a un grupo de expertos, y publicado en 1981 como «The Global 2000», cuyos resultados eran coincidentes con los anteriores y que recientemente se han incorporado a la Declaración del Milenio como «Objetivos de Desarrollo (hasta el 2015)».

Analizadas las previsiones de los referidos informes con la perspectiva del tiempo, observamos que la realidad las ha confirmado largamente. Según «The Global 2000»:

- La población aumentaría de 4.000 millones en 1975 a 6.350 millones en el año 2000, incremento superior al 50 por 100. La tasa de crecimiento por los planes de control de natalidad sólo se ha frenado un 1,8 por 100 al año. En cifras absolutas, la población está aumentando más rápidamente en la actualidad.

La previsión de crecimiento económico establecía que los países menos desarrollados crecieran conforme a tasas más rápidas que las naciones industrializadas, pero que el producto nacional bruto per cápita seguiría siendo bajo, ensanchándose la enorme brecha entre países ricos y pobres.

- La producción mundial de alimentos y de recursos naturales se ha incrementado notablemente, en algunos casos hasta un 90 por 100. Pero esto se ha traducido en un aumento mundial per cápita menor del 15 por 100 y el grueso de ese aumento corresponde a países que ya tenían un consumo per cápita relativamente alto.

Las previsiones sobre energía y agua también se han aproximado mucho a la realidad actual. En particular las previsiones respecto a los recursos minerales no combustibles establecían que *«parecen suficientes para satisfacer la demanda prevista hasta el año 2000, pero será necesario hacer nuevos descubrimientos e inversiones para mantener reservas. Además, la producción será más costosa conforme aumenten los precios de la energía y es posible que algunos recursos minerales no combustibles resulten antieconómicos. La cuarta parte de la población mundial, que habita los países industriales, seguirá absorbiendo tres cuartas partes de la producción minera del mundo»*.

- Las previsiones establecidas en «The Global 2000», se han cumplido también en gran medida en lo referente a pérdida de superficie forestal y superficie agrícola, incremento de concentración de dióxido de carbono y sustancias químicas contaminantes en la atmósfera, así como a la extinción de especies animales y vegetales.

De mantenerse estas tendencias es lógico pensar que nuestra sociedad en la Tierra como sistema cerrado alcanzará su límite. Según la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos («El Mundo en el año 2000», 1982), de continuar las tasas de crecimiento actual, la población mundial alcanzará los 10.000 millones de habitantes para el año 2030 y para fines del siglo XXI se aproximará a los 30.000 millones. Estos niveles corresponden en forma muy aproximada a las estimaciones de la máxima capacidad de sustentación de todo el planeta. Las poblaciones del Sahara y del Himalaya han excedido ya esta capacidad de sustentación, desatando su deterioro en la capacidad de la tierra para sostener la vida, como fue constatado en la Conferencia de Río sobre Medioambiente y Desarrollo en 1992.

Al margen del acierto de las previsiones del Informe «The Global 2000», es difícil establecer previsiones a plazos tan largos en los que las transformaciones sociales son aceleradas. Es difícil evaluar el efecto global de la incorporación de países como China o la India a la sociedad industrializada. Pero en todo caso se intuye que acortarán el tiempo para llegar al límite de la sostenibilidad del planeta.

Los sistemas cerrados, tanto si son naturales como económicos, no pueden crecer indefinidamente de este modo. O bien deben llegar del exterior nuevas ayudas —nueva energía, nuevos recursos alimentarios, nuevos productos— o bien deben tomarse medidas para una estabilización gradual; de lo contrario, el sistema puede colapsarse con un repentino descenso de la población o de la producción industrial.

La estrategia de la «estabilización gradual» fue formulada mediante el paradigma del «Desarrollo sostenible» expuesto en 1987 en el informe «Nuestro Futuro Común» de la Conferencia Mundial sobre Medioambiente de Naciones Unidas. El gran número de factores y la complejidad de las acciones necesarias para conseguir este objetivo de estabilización hace pensar que su único efecto será ralentizar el deterioro y dar tiempo para alcanzar la solución final, que sólo puede alcanzarse abriendo nuestro sistema al espacio.

Como argumentan con gran visión Hartmann et al. (1987), la propuesta más razonable es detener el crecimiento de la

población y de la industria en la Tierra, pero dejarlas crecer en el espacio.

Aun ignorando las anteriores argumentaciones, aunque la exploración del espacio fuera considerada una «simple aventura», creemos que tiene una importancia vital. El reto que plantea a la ingeniería, las ciencias y las humanidades, estimula su desarrollo.

Las ciencias y la tecnología permiten el progreso en la investigación planetaria, al tiempo que se retroalimentan de ella. Así, las Ciencias Geológicas se fundamentan en media docena de principios enunciados durante el siglo XVIII, el fundamental es el «principio del actualismo» o «uniformitarismo» enunciado por James Hutton (1726-1797) y ampliamente difundido por Charles Lyell, en 1847 (C. Virgili, 2003). Este principio establece que los acontecimientos y procesos del pasado de la Tierra son similares a los actuales, esto es, el comportamiento geológico de un río o volcán hace 350 millones de años es igual al de los ríos o volcanes actuales. La exploración planetaria ha potenciado un nuevo principio en geología, el de los «análogos terrestres». Ante la dificultad de estudiar *in situ* la geología de los planetas, su estudio se apoya en análogos de la Tierra.

Varias disciplinas científicas fueron capaces, hace tiempo, de extrapolar sus ámbitos de actuación al espacio exterior. La (astro)física, la (cosmo)química o la misma ingeniería aeroespacial fueron la consecuencia conceptual de una necesidad científica y tecnológica, el simple resultado del avance del conocimiento, como un intento más de entender cómo se enmarcan nuestros modelos terrestres en un contexto más amplio. Por eso, lo que ayer parecía algo extraño y novedoso —incluso controvertido entre los científicos de la época—, actualmente no sólo está aceptado con total normalidad, sino que constituye el pilar consolidado de numerosos descubrimientos recientes sobre el universo.

Muchas otras ciencias se están abriendo también hacia el espacio como una rama más de su especialización. En nuestro caso, hoy podemos afirmar que la mineralogía espacial es a la geología planetaria lo que la mineralogía clásica es a la geología. En nuestro país este proceso aún se encuentra en un es-

tadio incipiente de su desarrollo, pero no podemos obviar hechos tales como que sondas espaciales nos están proporcionando ya la composición superficial de asteroides, o que equipos robotizados están analizando rocas y minerales en Marte y que, casi inmediatamente, podemos visualizar y analizar los espectros obtenidos vía Internet. Por ello, iniciativas recientes en nuestro país, como la organización de un seminario de astromineralogía y mineralogía espacial, impulsado por la Sociedad Española de Mineralogía, son muy importantes y abren nuevas vías, fomentando los aspectos formativos sobre estos temas.

La información que nos permite profundizar en el conocimiento de estos aspectos es básicamente de cuatro tipos:

- a)* la que nos llega a la Tierra directamente desde el espacio (aunque sin control por nuestra parte), en forma de partículas de polvo interplanetario y meteoritos;
- b)* la que se genera en las propias rocas terrestres, como consecuencia de impactos de grandes meteoritos, implantando una firma impactogénica que refleja algunas de las características de los impactores;
- c)* la adquirida de manera directa y controlada, gracias a las misiones espaciales a asteroides, cometas, planetas y sus lunas;
- d)* la que obtenemos en determinadas zonas de la Tierra que por sus características pueden considerarse «análogos» de los mecanismos, procesos o rocas y minerales del espacio.

Este tema ha sido una de mis líneas de investigación en la última década, línea que he desarrollado fundamentalmente en colaboración con el Doctor Jesús Martínez Frías, Investigador Científico del CSIC y Jefe del Laboratorio de Geología Planetaria del Centro de Astrobiología y con el Doctor Fernando Rull, Catedrático de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Valladolid y Jefe de la Unidad Asociada de Espectroscopia IR y Raman en Cosmogeología y Astrobiología.

Antes de entrar en el desarrollo de los recursos del espacio cercano a la Tierra, voy a exponer brevemente algunos conceptos básicos, a la luz de las publicaciones más recientes.

2. MINERALES Y YACIMIENTOS MINERALES

El término yacimiento mineral está definido en el Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua como «lugar donde se hallan naturalmente los minerales en la corteza terrestre y que por su naturaleza puede ofrecer interés económico». Es una disciplina que se integra en las Ciencias Geológicas y que está íntimamente relacionada con la Mineralogía.

Las rocas que forman la Tierra, la Luna y los Planetas y que son accesibles al hombre (corteza terrestre, superficie lunar, meteoritos), están compuestas de sustancias sólidas cristalinas que denominamos minerales. Del estudio de los minerales se ocupa la Mineralogía. El concepto de mineral ha sufrido a lo largo de la historia una serie de cambios y adaptaciones a los conocimientos de la época, especialmente durante el siglo xx. El conocimiento de la naturaleza cristalina de los minerales y de aspectos cristaloquímicos, físicoquímicos y genéticos han influido en las definiciones que a lo largo del tiempo se han establecido. Sin embargo, como sucede con muchas otras definiciones formales en Ciencia, aún hoy es bastante difícil de formular una definición exacta.

La necesidad actual de materias primas para la industria ha llevado a los yacimientos minerales y a la Mineralogía a un primer plano, siendo una de las ramas de la Geología con mayores perspectivas futuras por la incidencia económica que representa.

Una de las definiciones más aceptada de mineral es la propuesta en 1923 por la Sociedad Americana de Mineralogía. Dice así: «Una especie mineral es una sustancia natural, homogénea, de origen inorgánico, con composición química definida o variando entre ciertos límites, y que posee propiedades físicas características y normalmente una estructura cristalina».

De las distintas definiciones que se han establecido existe acuerdo al menos en que el mineral debe ser un compuesto natural, homogéneo, cristalino y con composición química definida, pero no fija. Recientemente la Comisión de Nomenclatura Mineral y Nuevos Minerales (CNMMN) de la IMA (International Mineralogical Association), a petición de la comunidad mineralógica, ha dado una nueva definición de mineral, compatible con los recientes avances tecnológicos: «Un mineral es un elemento o compuesto químico que normalmente es cristalino y que se ha originado como resultado de procesos geológicos» (Nickel, 1995).

Se entiende por *sustancia natural* aquella que se ha formado en un proceso geológico, sin la interacción directa del hombre u otros seres vivos. Los cristales sintetizados en laboratorios, aunque tengan su réplica natural en composición y estructura, no pueden ser considerados como minerales, y a lo sumo se les puede denominar *análogos sintéticos*. Por otra parte, compuestos como el azufre, la sílice, el carbonato cálcico, entre otros, con estructuras idénticas a las de minerales conocidos, pero formados directamente por organismos vivos, bien como esqueleto o como producto de metabolismo (biominerales) no deben ser estrictamente considerados como minerales, aunque los recientes resultados sobre participación de microorganismos en la génesis mineral está revolucionando este y otros conceptos.

Los minerales se encuentran en estado de *sólido cristalino*, con ciertas excepciones y limitaciones. Así, el mercurio no es sólido a la temperatura ambiente de la superficie terrestre, pero a -39° C, cristaliza en el sistema trigonal.

Un mineral es un *sólido homogéneo*. Esto significa que debe ser considerado como una fase sólida físicamente homogénea y mecánicamente separable en un sistema físico-químico. La condición de homogeneidad física es básica para diferenciar al mineral de la roca. Las rocas están constituidas por diferentes minerales (roca poliminerálica), o por diferentes cristales de un mismo mineral (roca monominerálica), asociados durante un proceso geológico determinado. Los constituyentes de una roca pueden ser mecánicamente separables y no presentan homogeneidad en sus propiedades físicas ni en su composición química, o al menos en todas sus propiedades físicas, en el caso de las rocas monominerálicas.

La *composición química definida* pero no fija implica que el mineral pueda ser formulado con una expresión que permita incluir posibles variaciones estequiométricas y sustituciones atómicas. Los cambios en la composición deben ser limitados y estar prefijados para la definición de una determinada especie, de acuerdo con la estructura, composición química y condiciones de cristalización. Cuando las sustituciones isomórficas dan lugar a una serie continua entre dos compuestos límites, por ejemplo, $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8\text{Ca}$ (anortita) - $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$ (albita), Ag_3SbS_3 (pirargirita) - Ag_3AsS_3 (proustita), SiO_4Mg_2 (forsterita) - SiO_4Fe_2 (fayalita), cualquier composición intermedia puede cristalizar como una fase homogénea, o sea, como un mineral distinto.

El número de minerales conocidos no es excesivamente grande y ha crecido muy lentamente hasta el siglo xx. Así, al comienzo del siglo xix sólo había 317 minerales definidos que pasan a cerca de 700 cuando se publicó la primera edición del libro «A System of Mineralogy» de J. D. Dana (1837). El crecimiento espectacular se produce a partir de 1917 con el desarrollo de la difracción de los rayos X, y en las décadas siguientes esta técnica se ve complementada esencialmente por la microsonda electrónica. Al comienzo de los años ochenta, el número de minerales era alrededor de 2.500, y en la actualidad se han descrito cerca de 3.500 especies (Clark, 1993), número que sigue aumentando.

La *limitación del número de minerales* es importante porque está relacionada con las condiciones de formación y con la estabilidad de las fases formadas. En función de las condiciones físico-químicas de formación se observa un número creciente de minerales, cuando se pasa de los ambientes de alta a baja temperatura. Entre $1.600\text{-}1.200^\circ\text{C}$ cristalizan sólo unos 40 minerales. Entre $1.200\text{-}800^\circ\text{C}$ hay unos 120 minerales; en condiciones pegmatíticas e hidrotermales el número de minerales aumenta considerablemente (cerca de 1.000) y en condiciones supergénicas son más de mil los minerales conocidos.

El número de minerales aumenta con la disminución de la energía de formación de las correspondientes estructuras. Los compuestos formados a altas temperaturas son de mayor simetría y más simples en estructura, y cuando se forman a

bajas temperaturas dan compuestos de menor energía libre y mayor complejidad estructural.

Desde el punto de vista geoquímico, no todos los elementos tienen la misma «oportunidad» para formar minerales, debido a su escasa abundancia o a su grado de dispersión. Además muchos elementos pueden aparecer en la naturaleza sólo en ciertos estados de valencia. Por ejemplo, el nitrógeno sólo aparece como N^{+5} , mientras que en el laboratorio se puede presentar como N^+ , N^{+2} , N^{+3} y N^{+4} . Igual puede decirse del fósforo, azufre, cloro, vanadio, níquel y otros.

Para exponer lo que hoy día se entiende por yacimiento mineral es necesario definir el concepto de mena, mineral industrial y de otros términos relacionados, como son los de ganga y protomena. El término mena lleva implícito un contenido económico y se empleaba clásicamente para aquellos minerales que podían ser utilizados para la extracción de metales. Sin embargo, el uso moderno de este término es mucho más amplio incluyendo minerales metálicos, energéticos e industriales. En líneas generales, las menas metálicas (sulfuros masivos, óxidos metálicos, etc.) y energéticas (carbones, hidrocarburos, etc.) requieren procesos importantes de tratamiento mineral (concentración, refinado, metalurgia, etc.), mientras que los minerales industriales (sales, fosfatos, arenas y arcillas especiales, etc.) se usan en bruto, o después de un ligero tratamiento (molienda, tamizado, lavado). Así por ejemplo, la galena es una mena de plomo y la casiterita es una mena de estaño; en cambio el talco, la sepiolita o el yeso son minerales industriales, y el caolín, formado fundamentalmente por el mineral caolinita, o el mármol, formado por calcita o dolomita, son rocas industriales.

La mayor parte de las menas se asocian con materiales sin valor económico, que se denominan gangas. También es frecuente que lateralmente, o en profundidad, las menas pasen a lo que se denominan protomenas, que se definen como «sustancias con contenidos demasiado bajos, por lo que no presentan interés económico en ese momento». La diferencia entre mena y protomena estriba en consideraciones económicas de mercado y en las derivadas del concepto de «ley mínima». Esta última define el umbral a partir del cual ese mineral se puede considerar una sustancia explotable (ley de corte o cut-

off). Prescindiendo del carácter económico, los materiales que constituyen la mena, protomena y ganga suelen aparecer espacial y genéticamente asociados, puesto que son fruto del mismo proceso generador.

Llegados a este punto, ya podemos determinar el concepto de yacimiento mineral de una forma mucho más amplia que cuando lo definimos al principio de este apartado. Entendemos por yacimiento mineral toda concentración de sustancias minerales de origen natural que se encuentra en la corteza terrestre, y que es susceptible de explotación económica o puede serlo si varían favorablemente las condiciones tecnológicas o de mercado. De esta definición se desprende una doble condición, de gran trascendencia en todo lo referente a su estudio; por su forma de presentarse, se trata de un cuerpo geológico y, en consecuencia, hay que recurrir ineludiblemente a las ramas de las Ciencias Geológicas para definirlo y por ser susceptible de explotación es un objeto valorable, capaz de ser expresado en unos parámetros económicos.

Esta dualidad, entre cuerpo geológico y objeto valorable, se va a manifestar continuamente. Así, el contenido de un yacimiento mineral en un determinado elemento tiene significado desde el punto de vista geológico, en particular geoquímico, cuando se le compara con el «clarke» de concentración (proporción media de este elemento en la corteza terrestre). Por el contrario, desde el punto de vista económico, su contenido debe ser tal que supere la ley mínima explotable. La explotabilidad de un yacimiento no depende solamente de factores naturales intrínsecos a él, como tonelaje, ley, mineralogía o textura de la mena, sino que su explotabilidad está sujeta a otros factores que fluctúan con el tiempo, de orden técnico (como los que se refieren a los métodos de explotación, concentración y metalurgia), industriales (uso de ciertas sustancias) y económicos (en relación con el mercado de los metales y los precios).

Así, una determinada mena considerada subeconómica puede llegar a ser rentable en determinadas condiciones, como ocurre con el wolframio en períodos de guerra, o bien porque se produzca una gran demanda de mercado. Un ejemplo de esto sería el *coltan* término de reciente acuñación que se refiere a la serie isomorfa columbita $(\text{Fe,Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$ - tantalita

(Fe,Mn)Ta₂O₆. Son minerales escasos en la naturaleza y un claro ejemplo de cómo el avance tecnológico contribuye a que minerales considerados como una simple curiosidad sean cruciales debido a su carácter estratégico por sus nuevas aplicaciones. En el pasado su principal utilización era para la fabricación de filamentos de bombillas hasta que fue sustituido por el wolframio, mucho más barato. En la actualidad el coltan es fundamental para el desarrollo de nuevas tecnologías: telefonía móvil, fabricación de ordenadores, videojuegos, armas inteligentes, industria aeroespacial, levitación magnética, etc. Esto es debido a sus singulares propiedades, tales como superconductividad, carácter ultrarrefractario, ser un capacitor, alta resistencia a la corrosión y la alteración en general, que le hacen privilegiado como futuro material de uso extraterrestre en la Estación Espacial Internacional y en plataformas y bases espaciales (tierra.rediris.es/coltan).

De igual forma, los avances tecnológicos que se producen en un determinado momento de la historia permiten que un elemento pueda ser extraído por un procedimiento fácil y a bajo coste. Este fue el caso, a principios del siglo xx, de los yacimientos de *tipo pórfido*, yacimientos hidrotermales, asociados a intrusiones ígneas porfídicas, de baja ley y gran tonelaje (millones a miles de millones de toneladas). En Bingham (Utah) se iba a producir uno de los cambios más trascendentales que han ocurrido en la minería del cobre, esto es, el compensar una baja ley del mineral con la extracción de grandes volúmenes, a partir de un tipo de yacimiento que albergaba cientos de millones de toneladas de mineral: un pórfido cuprífero. La llegada de la minería del cobre a gran escala permitió la extracción de este metal desde estos gigantes, considerados los dinosaurios de la minería, incrementando varias veces las reservas mundiales de cobre en un momento en que mercados de alto consumo como el eléctrico y el de las comunicaciones comenzaban a desarrollarse.

Por todo ello, actualmente se está produciendo un importante cambio conceptual, pues de la consideración clásica de yacimiento como concentración anómala de una sustancia en un determinado espacio, se va evolucionando hacia un concepto más estadístico y económico, que parte del axioma de que toda la corteza terrestre, y por extensión los cuerpos planetarios terrestres (formados mayoritariamente por silicatos y

metales), constituye un gran yacimiento al servicio de la humanidad. Un yacimiento mineral será rentable cuando una sustancia mineral sea demandada por la sociedad a través de un mercado y un precio rentable. Será básicamente el precio del mercado, reflejo de la demanda social que puede ser creciente, cíclica u oscilante, lo que transformará una sustancia en mineral explotable. Además, los mercados imponen condiciones de pureza que muy raramente presenta la naturaleza, por lo que habrá que tratar el mineral para convertirlo en un producto realmente comercial. El beneficio ha sustituido en el mundo actual al concepto de utilidad que primaba en siglos pasados.

En gran parte la evolución histórica de la actividad humana ha estado marcada por el descubrimiento de nuevos minerales y su utilización. El nivel de vida que hoy se tiene en los países desarrollados depende en gran parte del uso de los recursos minerales. Es difícil encontrar una actividad humana que no esté basada más o menos directamente en el aprovechamiento de los recursos minerales. La cantidad de minerales producidos y consumidos en un país es un buen indicador de su grado de desarrollo. Así, por ejemplo, Estados Unidos es uno de los mayores productores y consumidores de minerales; Chile o México producen grandes cantidades de algunos de ellos, como cobre o plata, pero su consumo es todavía modesto, y otros como Senegal o Nigeria tienen una producción y un consumo muy escaso.

En general la demanda de recursos minerales es creciente porque aumenta la población y, fundamentalmente, porque la sociedad demanda una mayor calidad de vida, lo cual se traduce en un mayor consumo de minerales. Actualmente países como China o India, que están incorporándose de forma muy rápida a la sociedad industrializada, demandan grandes cantidades de metales como cobre, hierro y níquel, y ello está provocando una subida espectacular de los precios.

Pero los yacimientos minerales son recursos naturales no renovables, o sea, que no pueden ser regenerados después de haber sido extraídos de la tierra, al menos en un período de tiempo comprensible para el hombre, o sea, a la escala humana. Por eso la única respuesta a este problema es el descubrimiento de nuevos yacimientos. Algunos minerales, y

ciertos elementos tales como plomo, zinc y estaño, pueden ser recuperados a partir del reciclado de residuos industriales y urbanos, pero la mayoría sólo se pueden utilizar una vez.

Ante esta situación se plantea el problema de localizar y explotar nuevos yacimientos minerales. Pero, ¿dónde buscarlos?

3. EL PAPEL DE LOS MINERALES EN EL DESARROLLO DE NUESTRA SOCIEDAD

El conocimiento sobre los yacimientos minerales es el resultado de un largo proceso que comienza en la Prehistoria y presenta una aceleración notable durante el siglo xx. Si nos centramos en los yacimientos marinos, este avance se situaría sobre todo en la segunda mitad del siglo pasado, y si nos referimos a los recursos del espacio cercano a la Tierra, el progreso es mucho más espectacular, pudiéndose apreciar casi a escala diaria.

Los datos históricos son una de las herramientas que permiten obtener y descifrar los conocimientos que nuestros antepasados han ido adquiriendo sobre el estudio, explotación, beneficio y uso de los recursos minerales y que por ello nos permiten trazar las directrices que han propiciado el desarrollo de las actividades del hombre en esta materia.

Es casi imposible precisar cuándo nació esta ciencia, sin embargo, puede estimarse que la primera actividad minera, en su sentido más amplio, es tan antigua como la propia existencia del ser humano. Numerosos yacimientos arqueológicos contienen restos que indican la utilización intencionada de instrumentos pétreos y la elaboración de materiales con fines prácticos, comerciales, de ornamentación, etc. El sílex, por ejemplo, se beneficiaba de yacimientos sedimentarios y rocas con nódulos silíceos en canteras y galerías. Posteriormente, con el uso del fuego, comienza una primitiva metalurgia en el Neolítico (10.000 años a.C.), utilizando minerales de cobre, plomo y plata. El cobre fue el primero en ser trabajado, pues su metalurgia es la más simple y, además, los hermosos colores azules y verdes de sus minerales de alteración debieron sorprender al hombre primitivo (Edad del Cobre, en Oriente

4.000 años a.C. y en Europa 2.200 a.C.). Con posterioridad se descubre el bronce, al emplear conjuntamente minerales con cobre y estaño, como calcopirita y casiterita, que suelen aparecer en los mismos yacimientos (Edad del Bronce, en Oriente 2.800 años a.C. y en Occidente 1.900 años a.C.). Por último, el hierro era conocido desde la Edad del Bronce, pero su escasez, unida a su difícil metalurgia, explican que su uso no fuese importante hasta el 800 a.C., desarrollándose por ejemplo por los celtas (Edad del Hierro). La utilización del hierro daba supremacía a los pueblos que lo poseían, facilitando sus victorias militares.

Las exploraciones de minerales más antiguas datan de la cultura egipcia. Los egipcios apreciaban en gran medida las gemas, tanto durante la vida como después de la muerte. Así, por ejemplo, enviaron expediciones en varias épocas a la Península del Sinaí y a Sudán para hallar turquesas. Respecto a las rocas ornamentales como material de construcción, es precisamente durante esta época cuando la industria extractiva mediante canteras adquirió un gran auge para la construcción de las pirámides y otros edificios públicos. Routhier (1963) indica que la primera tipología conocida sobre yacimientos de oro data del 1.200 a.C.

Es de suponer que los materiales eran extraídos, en su mayor parte, mediante labores de exterior (canteras), pero el aumento progresivo de la demanda favoreció el desarrollo de las primeras explotaciones de interior mediante pozos y galerías. Éste es el caso de las labores que, a 250 metros de profundidad, se realizaron en las minas de esmeraldas del Mar Rojo, en el antiguo Egipto o en algunas de las minas de oro y plata pre-romanas de la Península Ibérica, donde llegaron a alcanzar los 200 metros en labores de reconocimiento.

Las culturas americanas presentan una evolución diferente e independiente. Cuando los conquistadores españoles llegaron al continente en el siglo xv, los indios americanos ya trabajaban el oro, la plata y el cobre, pero no conocían ni el bronce ni el hierro.

Por lo que respecta a la cultura helenística, Teofrasto (372-287 a.C.), discípulo de Aristóteles, escribe una obra específica «Sobre piedras», en la que describe diversos minerales y rocas. Ya en esta época se conocían tres tipos de yacimientos auríferos

ros: placeres fluviales, yacimientos secundarios consolidados (en aluviones) y yacimientos primarios en roca.

La cultura romana retoma los conocimientos griegos y de las otras culturas anteriores. En esta época sobresale Plinio el Viejo (23-79 d.C.) y su monumental obra de treinta y siete libros sobre «Historia Natural», que dedicó al emperador Tito. En el lapidario que corresponde con los dos últimos libros de la mencionada obra (n.º 36 y 37) estudia las rocas ornamentales, las gemas y otras piedras preciosas utilizadas en el Imperio Romano. Este autor, al mencionar las minas de oro hispanas, seguirá la clasificación de los yacimientos de oro definida por los griegos. Sobre la actividad minera en España por parte de los romanos, resulta significativo el siguiente párrafo de Luis de la Cuadra de su libro *Tratado de Laboreo de Minas*: «Explotaron oro en Andalucía, León, Galicia y Asturias; cobre en Río Tinto, con 30 millones de toneladas extraídas; en la mina Casiano de Prado los romanos llegaron a 200 metros de profundidad, con desagües de 50 metros cúbicos por día. El mercurio se explotó con intensidad en Almadén y se comercializó desde Sisapo; en Mazarrón se profundizó hasta 300 metros y en la zona de Cartagena trabajaban hasta 40.000 esclavos en tiempos de Polibio. Pero el más impresionante vestigio de la época es la labor minera de las Médulas (León), donde el río Cabrera fue desviado para explotar el aluvión aurífero, removiendo unos 300 millones de toneladas».

Durante la República romana se industrializaron las pequeñas y diseminadas explotaciones situadas en diferentes territorios conquistados y se impulsó la actividad minera, descubriéndose nuevos yacimientos. La metodología de exploración y explotación de yacimientos posiblemente era transmitida gremialmente y por vía oral. Al igual que en la actualidad, los romanos realizaban el laboreo de sus yacimientos en tres fases, una vez localizada la zona de interés mediante una prospección aluvionar, o simplemente guiados por los autóctonos conocedores de la situación de los yacimientos. Las tres fases de laboreo minero consistían en: 1) prospección y evaluación mediante catas y pozos; 2) extracción del mineral y, por último, c) beneficio de las menas para la obtención del metal buscado.

3.1. La antesala del aprovechamiento moderno de los minerales

La caída del Imperio Romano supone un estancamiento del progreso científico. Se produce un profundo desinterés por la minería, cerrándose la mayor parte de las minas y explotándose sólo las de sal y oro. En este período de desorganización, la Iglesia se transforma en la depositaria del saber, imponiendo sus dogmas y censurando las otras culturas. Entre los intelectuales que hacen referencias a las sustancias minerales destaca San Isidoro de Sevilla (560-636 d.C.) quien en el libro decimosexto de sus «Etimologías», trata de las piedras, metales, arcillas, piedras preciosas y mármoles.

Con la llegada del Renacimiento y después durante la Edad Moderna, esta mentalidad oscurantista va a perder importancia, pues se transmiten en gran medida los conocimientos por medio de las enseñanzas impartidas por las universidades. También tendrán gran influencia social los grandes descubrimientos geográficos (América) y técnicos (impresión). Se cambian las ideas medievales, místicas y curativas de los minerales, por otras más racionales basadas en la observación y la experiencia. Esto supone un nuevo interés por la metalurgia, debido al importante desarrollo minero de centroeuropa (Schemnitz, antigua Hungría; Goslar en el Harz; Freiberg, Schneeberg y Annaberg en Sajonia, y Joachimsthal en Bohemia). Todo ello creó una cultura minera sobre la búsqueda y descripciones de minerales, extracción, metalurgia, etc., y un tipo de ciudad particular con una población realista que produjo una cierta burguesía trabajadora, innovadora.

Entre los autores que aportan nuevas ideas a los yacimientos minerales destaca Georg Bauer (1494-1556), más conocido como Georgius Agrícola, y al que puede considerarse uno de los precursores de las Ciencias de la Tierra, con sus obras *Bermannus*, *De Re Metallica* y *De Natura Fossilium*, que resumen todo lo que se conocía hasta el momento en relación con la geología, hidrología, ingeniería, mineralogía, metalurgia y minería. Agrícola adquirió sus conocimientos en el famoso distrito minero de plata y otros metales de Erzgebirge, en Sajonia y Bohemia, centro económico de la época por la minería y la acuñación de monedas. En su obra «*De Re Metallica*» (1556), este autor trató de clasificar los yacimientos

sobre una base de tipo genérico (aluviales o primarios) y los diferenció morfológicamente, separando filones, masas, disseminaciones, etc. Tardó veinte años en escribir esta obra que se utilizó para la enseñanza minera y metalúrgica durante dos siglos. Entre sus muchas aportaciones mineras figuran, entre otras: 1) los aspectos a considerar antes de la explotación de una mina (situación, agua, caminos, clima, legislación, población, etc.); 2) las metodologías de prospección con criterios geológicos (morfologías), geoquímicos (alteraciones, sabor del agua), geobotánicos (características de las gramíneas o de las hojas de los árboles en diferentes épocas del año); 3) la utilización de galerías de drenaje en las explotaciones; 4) lo que se refiere a la reexplotación de antiguas escombreras y escoria.

En su libro I hace una descripción de los conocimientos que tiene que tener un minero. Dice: *«porque el minero debe poseer la mayor habilidad en su trabajo, para que conozca, primero que nada, qué montaña o colina, qué valle o llanura pueden ser explotados con mayor beneficio y cuáles hay que dejar de lado, aún más, debe comprender las vetas y otros fenómenos en las rocas. También debe conocer profundamente las muchas y variadas especies de tierra, efluvios, gemas, piedras, mármoles, rocas, metales y compuestos. Debe dominar el conocimiento de todos los trabajos subterráneos. Por último debe conocer los diferentes sistemas de análisis de sustancias y las formas de prepararlas para su fundición, porque hay muchos y diferentes métodos»*. Además, explica que un minero debe conocer muchas otras artes, como la Filosofía, Medicina, Astronomía, Geomensura, Ciencias Aritméticas, Arquitectura y Leyes.

Agrícola fue contemporáneo de Leonardo da Vinci, Copérnico, Lutero, Erasmo y Paracelso. Estudió en Leipzig, Bolonia y Pádua. Era filólogo de lenguas clásicas, pero luego estudió medicina en Ferrara y ejerció como médico. Fue también impresor en Venecia, médico en las ciudades de Joachimsthal y Chemnitz (Alemania) y en esta última llegó a ser Alcalde. Agrícola poseía una amplia formación humanística y un conocimiento directo de la minería y la industria, lo que le permitió fusionar su capacidad de observación, desarrollada en el ejercicio como médico, con los comentarios de los mineros, lo que le llevó a concebir su obra *«De Natura Fossilium»*, sin duda el primer libro de texto sobre Mineralogía. En él clasifica

los minerales en: tierras, piedras, sales, metales y otros minerales y compuestos.

Con el descubrimiento de América, la zona minera y económica de Europa Central decae, cerrando una parte importante de las minas de Alemania y de la República Checa. Por lo que se refiere a la llegada de los españoles a América, ésta supuso un desarrollo minero espectacular, introduciéndose nuevas metodologías para la explotación del oro y la plata, lo que permitió el control monopolístico de los precios de estos metales en Europa durante casi dos siglos. Destacan en esta época autores como Bartolomé de Medina y Álvaro Alonso Barba. Este último publicó el famoso libro «El arte de los metales», donde se señala una nueva tecnología química, el método del cazo, para la recuperación de la plata a partir del mercurio por amalgamación. Por ello, el papel de la mina de Almadén (Ciudad Real), el mayor productor de mercurio a escala mundial, resultó fundamental para su tiempo. Desde Almadén, este metal se transportaba hasta América para la recuperación de la plata, que volvía a España en lingotes o en monedas, sorteando los peligros de la piratería.

Con relación a la minería americana, Carlos Prieto (1968) en su libro «La minería en el Nuevo Mundo» presenta los siguientes hechos, que denotan la rápida expansión experimentada por esta actividad:

- En 1524 se trabajan en Tasco (Méjico) minas de estaño y cobre con labores de fundición.
- En 1525 se inician las labores de plata en Morcillo (Jalisco) y Villa del Espíritu Santo (Nayarit).
- En 1534 se trabaja por primera vez en las minas de plata de Tasco, siendo Hernán Cortés el encargado de planificarlas.
- En 1542 se explotan los yacimientos de oro en Carabaya, La Paz, Oruro y otros en el Alto Perú (Bolivia) a 4.700 metros de altitud.
- En 1545 se descubre la primera mina de plata en el cerro Potosí (Bolivia).

- En 1584, Felipe II promulga las «Ordenanzas del Nuevo Cuaderno», recopilación de leyes y reglas para la minería en América.
- En 1590, Álvaro Alonso Barba inventa el procedimiento de «Cazo y cocimiento» para los minerales argentíferos en Tarabuco (Bolivia).
- En 1760, Antonio Obregón explota la mina La Valenciana, abriendo un pozo de sección octogonal de 514 metros de profundidad.
- En 1783, Carlos III aprueba unas nuevas «Ordenanzas de Minería» para el Virreinato de la Nueva España, en las que se ordena la creación de un Colegio de Minería en Méjico.

En el tránsito de la Edad Moderna a la Contemporánea algunos intelectuales volvieron a formularse preguntas relacionadas con la metalogenia. En esta época se inician las enseñanzas sobre la explotación de recursos minerales en ciertas Escuelas. Destaca la Escuela de Freiberg, creada en 1765, que influirá en toda Europa y América, la de Schemnitz en 1770 y la de París en 1778. Charpentier (1778), profesor de Freiberg, publica dos libros en los que se pronuncia por la teoría de la formación de los yacimientos filonianos de plata, considerándolos el producto de la interacción entre la roca de caja y el agua que circula a través de las fisuras.

Por lo que se refiere a España, en 1777 se funda la Academia de Minas de Almadén. Su origen hay que buscarlo en el conjunto de prestigiosos especialistas, nacionales y extranjeros, que acudieron a Almadén en 1755 para poner nuevamente en explotación la mina de mercurio, destruida después de un incendio que duró dos años y medio, y originó la inundación general de las labores. Estos especialistas simultanearon sus actividades profesionales con las didácticas, pero como consecuencia de la situación socio-política de la época, la Academia se terminó cerrando en 1785. No será hasta el año 1836 cuando comiencen de nuevo los estudios de minas, pero esta vez será en Madrid, dejando la institución de Almadén tan sólo como escuela práctica.

Carlos III tampoco descuidó la enseñanza en América, donde se crea la Academia y escuela teórico-práctica de meta-

lurgia de Potosí en Bolivia y el Real Seminario de Minería en México, que fue el germen para el desarrollo de la minería en ese continente. Y éste es el origen de las Escuelas de Minas españolas y americanas.

3.2. Una revolución que cambió el mundo

A finales del siglo XVIII se inicia la Revolución Industrial, que inducirá un clima de rápida innovación e intensa especulación científica. Por lo que se refiere a los conocimientos científico-geológicos aparecen las grandes controversias entre los Neptunistas alemanes liderados por A. Werner (1749-1817) y los Plutonistas escoceses con J. Hutton (1726-1797) a la cabeza. Estas escuelas explicaban la formación de las rocas de diferente manera. Así, los Neptunistas opinaban que todas ellas se formaban en las grandes cuencas oceánicas, mientras que los Plutonistas aceptaban una energía interna del planeta, y pensaban que parte de los materiales se formaban por consolidación magmática, y parte por procesos geológicos externos. En 1791, Werner escribió un resumen sobre las «Nuevas teorías de la formación de los filones», señalando que estas formaciones derivaban de las roturas del fondo oceánico que, posteriormente, se rellenaban por precipitación química. Por su parte, Hutton publicó en 1795 sus ideas plutonistas en el libro titulado *Theory of the Earth*.

Un hecho muy importante, relacionado con el tratamiento de minerales, se produce en 1735, cuando A. Darby y J. Thomas utilizan la hulla para reducir óxidos de hierro, surgiendo así el método de «alto horno». En 1776 comienza la mecanización de la minería con la aparición de la máquina de vapor. Se crean máquinas-herramientas movidas por este elemento, lo que mejoró los sistemas de transporte o carga (ferrocarriles, barcos) y el arranque de materiales (servicios de ventilación y bombas de achique), permitiendo alcanzar profundidades de explotación inimaginables hasta entonces. La revolución industrial produjo un efecto multiplicador sobre la demanda de sustancias minerales como carbón, hierro y otros metales a nivel mundial. Este hecho generó la apertura de nuevas minas en Europa, en las colonias americanas ya independizadas y en las nuevas colonias de África, Asia y Oceanía, donde los países más desarrollados intentaron suministrarse las materias pri-

mas necesarias para su consumo. Así, durante este período, las zonas mineras del antiguo imperio español en América se liberaron y pasaron a depender, en sus mercados y en su financiación, del nuevo imperio anglo-americano.

El siglo XIX es una época de gran desarrollo para las Ciencias de la Tierra, destacando:

1. El avance en los conocimientos en casi todas sus especialidades y la aparición de nuevas controversias (uniformitaristas-catastrofistas, evolucionistas-glacialistas, etc.) entre diferentes escuelas.
2. La planificación de expediciones científicas continentales y marinas que aportan interesantes resultados.
3. La fundación de numerosas Sociedades Geológicas como la Geological Society of London (1807), American Geological Society (Vale, 1819), Société Géologique de France (París, 1830), Deutsche Geologische Gesellschaft (Berlín, 1848).
4. La fundación de los Servicios Geológicos Nacionales que centrarán la investigación geológico-minera de cada país. Un hecho importante para el avance de los estudios geológico-mineros es la fundación del Instituto Geológico y Minero de España en 1848 con sede en Madrid.
5. La celebración en París, a finales de siglo XIX, del I Congreso Geológico Internacional, donde se define la primera Escala Estratigráfica Internacional.

En cuanto al estudio de los yacimientos minerales, durante este siglo se empiezan a formular las bases sólidas de muchas teorías metalogenéticas, distinguiéndose entre yacimientos de origen ígneo y exógeno. Aparecen los primeros enunciados que relacionan diferentes tipos de rocas con yacimientos minerales como, por ejemplo, depósitos de níquel con peridotitas, de cobre con monzonitas, de estaño con granitos y pegmatitas, etc. Igualmente, se interpretan las distribuciones zonales de metales alrededor de las intrusiones magmáticas y a diferentes profundidades, definiéndose, al mismo tiempo, los conceptos de provincia y época metalogenética. Otra interpretación acertada

es la de relacionar las fumarolas volcánicas como modelo de transporte y creación de ciertos depósitos minerales.

A finales del siglo XIX, y con relación a la explotación de minas, hay que destacar el empleo de nuevas técnicas, tales como la perforación mecánica por barrenos, la energía química de los explosivos desarrollados por Nobel y la aparición de nuevas máquinas-herramientas movidas por electricidad para trabajar en labores de interior y de exterior. Todo esto supuso enormes ventajas para la explotación de los recursos minerales de rocas resistentes y localizadas a grandes profundidades.

La máquina de vapor que revolucionó la minería en Europa, no llegará a España hasta 1814. Otro hecho destacable referente a la legislación minera es que en 1822 se promulgó una ley de minas que reconocía la libre explotación, eximiendo el pago de todo derecho a los particulares que las beneficiaban, salvo el impuesto de patentes establecido para las industrias.

El desarrollo más importante de las Ciencias Geológicas, entre las que se incluye el estudio de los yacimientos minerales, ha tenido lugar sin duda durante el siglo XX. El número de investigadores, las nuevas técnicas y metodologías empleadas, los proyectos internacionales de investigación, la difusión de los conocimientos entre países, han dado lugar a unos avances espectaculares. A todo ello se suma la definición, durante la segunda mitad de este siglo, de la «Teoría de la Tectónica de Placas», que ha representado la «revolución geológica» por excelencia. La abundancia de datos, así como la claridad de algunas interpretaciones metalogenéticas de esta época, han representado una de las bases de la ciencia moderna de los yacimientos minerales.

En este período continúan los estudios metalogenéticos con el objeto de definir las hipótesis del transporte y deposición de metales en diversos ambientes físico-químicos. Destacan autores como Von Lotta y Sandberger en Alemania; Launyen en Francia; Posepny en Checoslovaquia; Ernrnos, Vogt y Lindgren en USA y otros más como Van Hoff, Beck, Sales, Kemp, etc. En el Congreso de Chicago de 1893 se edita la obra de Lindgren «Mineral Deposits», de gran trascendencia y de la que se realizan reediciones hasta 1933. Este autor clasifica los yacimientos minerales con criterios que tienen en cuenta la

temperatura de formación, la profundidad y la distinción entre procesos metalogénéticos químicos y mecánicos. Destacan, también, las clasificaciones de Niggli (1929), cuyos criterios se basan fundamentalmente en el origen plutónico o volcánico de los yacimientos, y la de Schneiderhohn (1941), que se fundamenta en las distintas asociaciones de minerales.

A medida que avanza el siglo xx, las grandes compañías mineras, sobre todo las angloamericanas, empiezan la exploración de minerales en Australia, América del Sur y África. Las empresas mineras comienzan a emplear los métodos de prospección geofísicos y geoquímicos para la búsqueda de nuevos yacimientos minerales. La contribución de la prospección geofísica a la minería se remonta varios siglos atrás, con la aplicación del método magnético. Pero no es hasta esta época cuando este método cobra naturaleza propia gracias a los avances experimentados por el desarrollo instrumental de las diferentes técnicas que comporta (sísmica, gravimétrica, magnética, eléctrica, etc.). En cuanto a la prospección geoquímica, ésta fue aplicada por primera vez en Europa en la década de los años treinta, y ha ido alcanzado aceptación mundial a medida que se han desarrollado métodos analíticos más rápidos, sensibles y precisos.

La II Guerra Mundial trajo consigo la demanda de nuevos metales como el wolframio, el cromo, el níquel y el estaño, usados para la construcción de material bélico, y el aluminio como nuevo producto de consumo. Igualmente, este acontecimiento introdujo nuevos tipos de transporte mecanizado (papas, tractores, etc.), sensores aerotransportados y nuevos explosivos, que van a utilizarse ampliamente en los trabajos de exploración y explotación de minas que se desarrollarán en los años siguientes.

En este período también se generalizan nuevas técnicas de tratamiento mineral, como la flotación de menas sulfuradas, para la obtención de metales como hierro, cobre, plomo y cinc, y la preparación de ácido sulfúrico. Asimismo, destaca la utilización de un nuevo reactivo, el cianuro, para la separación de oro y plata, lo que relega a un segundo plano el anterior procedimiento de amalgamación por mercurio. Otras tecnologías son los procesos electrolíticos, destilación, osmosis, etc., utilizados en plantas industriales para la extracción de magnesio, estroncio y azufre, entre otros, a partir del agua de mar.

La primera planta de producción de magnesio metal se construyó en 1940 en Freeport, Texas (USA).

Con respecto a la explotación de yacimientos, los avances tecnológicos enumerados anteriormente ocasionan una gran actividad minera, y favorecen el crecimiento en la producción de metales y carbones para producir acero y vapor, respectivamente. Este desarrollo minero originó la aparición de nuevos productos que serían la base de la minería de la segunda mitad del siglo xx, como son el petróleo, aluminio y los minerales base para la industria química, por ejemplo, pirita, potasa, nitratos y sales. Al mismo tiempo, la aparición del cemento provocó la demanda de materiales de construcción, bien en forma de arcillas para la producción de ladrillos, o de áridos para la fabricación de hormigones y mezclas preparadas. España, en estos comienzos del siglo xx, sobresale como uno de los países más activos desde el punto de vista de explotación de yacimientos minerales (cobre, plomo, zinc, hierro, mercurio, plata, potasa y carbones), sobre todo en zonas de Andalucía (Huelva, Linares), Castilla y León (Villablino), Asturias, Cataluña (Barcelona) y País Vasco (Bilbao). La crisis mundial de 1929 afectará al sector minero español, prolongándose sus efectos hasta después de la Guerra Civil. La década de los cuarenta se caracterizará por un fuerte proteccionismo del Estado, lo que supone una gran restricción de las importaciones y, con ello, el resurgimiento de la minería del carbón y de otros minerales.

Aquí se llega a una primera frontera, sólo accesible cuando el avance tecnológico lo hace posible. Y es curioso que coincide con el momento álgido de la exploración espacial.

3.3. La primera gran frontera: Minerales y recursos de los mares y océanos

Desde la II Guerra mundial, los mismos avances tecnológicos permitieron salir más allá de los límites de los continentes y adentrarse en la frontera de los fondos oceánicos, hasta entonces prácticamente inaccesibles. Se vivió a partir de los años sesenta un período de espectacular avance en la exploración oceanográfica que, no por casualidad, coincidió con el desarrollo de exploración de otra frontera, ésta exterior al planeta, el espacio exterior.

Así en los últimos cincuenta años, los acontecimientos relacionados con los yacimientos minerales marinos son muy numerosos y variados. Entre los años cincuenta y ochenta se desarrollaron numerosas expediciones oceanográficas de exploración mineral, nacionales e internacionales, descubriéndose nuevos depósitos de fosforitas y los nódulos de hierro-manganeso (cobalto-níquel) en los fondos oceánicos. También en estas décadas continuó la minería litoral y en mar abierto, de yacimientos de tipo placer metálicos y no metálicos, así como de áridos (arenas y gravas) para la construcción y la industria.

Los primeros artículos generales publicados sobre yacimientos minerales marinos y, especialmente, sobre la distribución y posible explotación de los nódulos de manganeso, son los realizados por Mero (1965) y Bischoff y Pippert (1973). Por otra parte, entre 1973 y 1982 comienzan los grandes debates sobre la Ley del Mar en la sede de la Conferencia de las Naciones Unidas (UNCLOS III). Los minerales marinos fueron la razón principal de las disputas entre países participantes, aunque hasta el momento se desconocía casi todo sobre los depósitos de plataforma y grandes fondos marinos. Así, por ejemplo, los sulfuros y las costras polimetálicas tan importantes actualmente, no fueron objeto de discusión, pues se desconocía su existencia. Fue en 1977 cuando, utilizando diferentes tipos de sumergibles, se descubrieron las chimeneas calientes (chimeneas blancas) en la dorsal de Galápagos, y en 1979 las chimeneas con sulfuros (chimeneas negras) en la parte central de la Dorsal Pacífica Oriental (East Pacific Rise). El «East Pacific Rise» es una zona activa de expansión del fondo oceánico, de dirección N-S, que separa la placa Pacífica de las placas Antártica, Nazca, Cocos, Juan de Fuca y Norteamericana.

Desde entonces las campañas oceanográficas se orientan prioritariamente hacia las dorsales oceánicas. Así, entre los años 1981 y 1982, el buque oceanográfico ruso Vityas descubrió las salmueras calientes del Mar Rojo, siendo investigadas profundamente por los buques Albatros (Suecia) y Atlantic I y II (USA). Una de las zonas estudiadas, situada en la latitud de la ciudad de Jeddah (Arabia Saudí), presenta un yacimiento de lodos polimetálicos con 3,5 millones de toneladas de zinc, 0,5 millones de toneladas de cobre y 9.000 toneladas de plata. En 1982 se describieron por primera vez las costras de óxidos de manganeso ricos en cobalto y níquel que aparecían en te-

rrazas submarinas del Archipiélago de Hawaii, a profundidades variables entre 5 y 1.200 metros.

Sin duda alguna el descubrimiento de la actividad hidrotermal (y metanógena) submarina ha dado lugar a una auténtica revolución en el conocimiento de la química y dinámica de los océanos. Hoy se conocen ya más de un centenar de lugares hidrotermales sumergidos y existen programas internacionales específicos para su investigación multidisciplinar. Esta actividad submarina incluye mineralizaciones de sulfuros, barita, talco, silicatos de hierro, óxidos de hierro y manganeso e hidratos de metano y constituyen magníficos modelos metalogénéticos actuales que sirven de referencia para el estudio de otros depósitos terrestres antiguos, ya inactivos, de similares características y, más actualmente, para la exploración de Marte.

La circulación hidrotermal submarina es particularmente activa a lo largo de los bordes de placa, ligados a procesos de acreción, aunque se ha detectado también en otras zonas donde el calor interno simplemente facilita la emisión y/o transporte de fluidos. El emplazamiento y deposición de los elementos en solución da lugar a la formación de distintas mineralizaciones, dependiendo de la profundidad a que tienen lugar los movimientos, de los tipos de rocas que encuentran durante su circulación, de la temperatura, etc. Más adelante nos referiremos a estos procesos al tratar de los análogos terrestres para la exploración de Marte.

En estos últimos años, como resultado de la Ley del Mar y de la adopción por parte de los EEUU del concepto de Zonas Económicas Exclusivas, las investigaciones marinas nacionales se han centrado más hacia estas zonas, aunque se siguen realizando campañas internacionales fuera de ellas. En general, los países desarrollados, tanto los firmantes como los que no lo han hecho, se han dedicado, últimamente, a cartografiar fondos marinos y evaluar los probables yacimientos minerales.

3.4. De la Tierra al espacio

Al comienzo de la segunda mitad del siglo xx se produce la independencia de numerosos países subdesarrollados, que eran

antiguas colonias de países europeos. Estos países en vías de desarrollo poseían importantes reservas de minerales, lo que trajo consigo una nueva caída de los precios en el mercado internacional de la minería. Los nuevos gobiernos, a menudo con graves problemas económicos, sociales y políticos, aumentan su producción minera y generan grandes excedentes en la oferta de sustancias minerales, lo que contribuyó a una bajada generalizada de los precios en el mercado mundial. Esta coyuntura es aprovechada por los antiguos colonizadores para adquirir un stock de materias primas estratégicas. Por su parte, resulta curioso que mientras el Club de Roma, en el libro «The limits to growth» (1972), pronosticaba a corto plazo la desaparición de los recursos minerales a escala global, en esos mismos momentos los mercados se encontraban saturados de sustancias minerales. Por todo ello, hacia 1977 se produce un colapso dramático en las cotizaciones mundiales de las materias primas alcanzándose, por ejemplo, precios de plomo y cobre similares a los que existían en el año 1932. Las políticas mineras de los países subdesarrollados, el control del mercado minero por los desarrollados, los cambios frecuentes de las monedas internacionales, y las nuevas ideas conservacionistas hacen que los precios de ciertos minerales fluctúen continuamente, haciéndose necesario un análisis anual de la política internacional y de los mercados mundiales para poder predecir los precios.

En los últimos años los estudios en todos los campos relacionados con los yacimientos minerales han experimentado un gran avance. Ello se debe, por una parte, al gran número de científicos dedicados a estos temas, tanto en las instituciones públicas como en las privadas y, por otra parte, al perfeccionamiento de las técnicas analíticas aplicadas a la investigación de los materiales terrestres, su explotación y tratamiento. Así, el desarrollo de estas técnicas instrumentales ha permitido el avance de los conocimientos en diferentes ámbitos como son: la estructura cristalina; la composición de los minerales y rocas, a nivel de elementos mayores y menores y los isótopos estables y radiogénicos; la caracterización termobarogeoquímica de los procesos metalogénicos; las dataciones radiométricas de las menas y gangas; las características paleomagnéticas de ciertas sustancias, etc. La informatización de los instrumentos, así como el tratamiento computerizado de los resultados obtenidos por estas técnicas, han permitido un

mejor manejo de los aparatos y una optimización en la comprensión de los datos. Esta misma tendencia de desarrollo de los conocimientos y metodologías se ha observado igualmente en los métodos de prospección geofísica y geoquímica.

Uno de los progresos más significativos de los últimos años, ha sido la «modelización de los yacimientos». Se ha convertido en una herramienta eficaz para la investigación minera. Muchos modelos bien definidos han contribuido poderosamente al descubrimiento de numerosos yacimientos, en circunstancias desconocidas hasta entonces. Las líneas de investigación actuales se centran en ciertas tipologías de yacimientos, determinadas por las sustancias de mayor interés económico, como es el caso de los metales preciosos, sulfuros masivos, metales raros y minerales industriales.

En cuanto a la explotación de minerales, se constata un notable aumento de la productividad, como consecuencia de la introducción de nueva maquinaria en las labores de explotación, tanto de cielo abierto como de interior, junto con la aplicación de nuevas metodologías y tecnologías como la electrificación a gran escala, los nuevos explosivos y procesos de tratamiento mineral, la geoestadística e informática. Estos avances han hecho que los trabajos mineros se conviertan en buenas inversiones del capital privado o público. El sistema productivo a escala internacional ha reaccionado incrementando la búsqueda de recursos menos costosos, y dedicando las inversiones al desarrollo de grandes explotaciones para producir minerales de bajo costo en países en vías de desarrollo.

La exploración planetaria no ha sido ajena a todo este desarrollo socioeconómico. Las misiones espaciales han sido cruciales para el desarrollo de la sociedad, aunque en muchas ocasiones el camino no haya sido fácil y haya requerido el envío de numerosas sondas. La exploración espacial permitirá conocer hasta qué punto podremos utilizar los recursos del espacio cercano a la Tierra en un futuro. En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los datos sobre las misiones a la Luna y Marte, que son actualmente los objetivos planetarios más importantes en la exploración de minerales y recursos fuera de la Tierra.

Tabla 3.1. Misiones lunares

| Nombre | País | Fecha | Misión | Resultado | Notas |
|-------------------------|------|--------------------|------------------------|-----------|--|
| <i>Luna I</i> | URSS | Enero de 1959 | Impacto no tripulada | Fracaso | Desvío de 6,000 km. de la Luna |
| <i>Luna II</i> | URSS | Septiembre de 1959 | Impacto no tripulada | Éxito | Primera misión lunar con éxito |
| <i>Luna III</i> | URSS | Octubre de 1959 | Orbital no tripulada | Éxito | Primeras fotografías de la cara oculta |
| <i>Ranger I</i> | EEUU | Agosto de 1961 | Impacto no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Ranger II</i> | EEUU | Noviembre de 1961 | Impacto no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Ranger III</i> | EEUU | Enero de 1962 | Impacto no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Ranger IV</i> | EEUU | Abril de 1962 | Impacto no tripulada | Parcial | Éxito parcial - No envía ningún dato |
| <i>Ranger V</i> | EEUU | Octubre de 1962 | Impacto no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Luna IV</i> | URSS | Abril de 1963 | Impacto no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Ranger VI</i> | EEUU | Enero de 1964 | Impacto no tripulada | Parcial | Éxito parcial - No envía ningún dato |
| <i>Ranger VII</i> | EEUU | Julio de 1964 | Impacto no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna V</i> | URSS | Mayo de 1965 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | Se estrelló contra la Luna |
| <i>Luna IX</i> | URSS | Febrero de 1966 | Alunizaje no tripulada | Éxito | Primer alunizaje suave |
| <i>Ranger VIII</i> | EEUU | Febrero de 1965 | Impacto no tripulada | Éxito | — |
| <i>Ranger IX</i> | EEUU | Marzo de 1965 | Impacto no tripulada | Éxito | — |
| <i>Zond III</i> | URSS | Julio de 1965 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna VI</i> | URSS | Junio de 1965 | Impacto no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Luna VII</i> | URSS | Octubre de 1965 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | Se estrelló contra la Luna |
| <i>Luna VIII</i> | URSS | Diciembre de 1965 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | Se estrelló contra la Luna |
| <i>Luna IX</i> | URSS | Enero de 1966 | Alunizaje no tripulada | Éxito | Primer alunizaje no tripulado |
| <i>Luna X</i> | URSS | Marzo de 1966 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor I</i> | EEUU | Mayo de 1966 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Lunar Orbiter I</i> | EEUU | Agosto de 1966 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XI</i> | URSS | Agosto de 1966 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor II</i> | EEUU | Septiembre de 1966 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Luna XII</i> | URSS | Octubre de 1966 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Lunar Orbiter II</i> | EEUU | Noviembre de 1966 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XIII</i> | URSS | Diciembre de 1966 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |

Tabla 3.1. Misiones lunares (continuación)

| Nombre | País | Fecha | Misión | Resultado | Notas |
|--------------------------|------|--------------------|------------------------|-----------|--|
| <i>Lunar Orbiter III</i> | EEUU | Febrero de 1967 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor III</i> | EEUU | Abril de 1967 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Lunar Orbiter IV</i> | EEUU | Mayo de 1967 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor IV</i> | EEUU | Julio de 1967 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | — |
| <i>Lunar Orbiter V</i> | EEUU | Agosto de 1967 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor V</i> | EEUU | Septiembre de 1967 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor VI</i> | EEUU | Noviembre de 1967 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Surveyor VII</i> | EEUU | Enero de 1968 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XIV</i> | URSS | Abril de 1968 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Zond V</i> | URSS | Septiembre de 1968 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Zond VI</i> | URSS | Septiembre de 1968 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Apollo VIII</i> | EEUU | Noviembre de 1968 | Orbital no tripulada | Éxito | Primera misión orbital tripulada |
| <i>Apollo X</i> | EEUU | Diciembre de 1968 | Orbital tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XV</i> | URSS | Mayo de 1969 | Orbital tripulada | Éxito | — |
| <i>Apollo XI</i> | EEUU | Julio de 1969 | Orbital no tripulada | Éxito | Primer alunizaje tripulado |
| <i>Zond VII</i> | URSS | Julio de 1969 | Alunizaje Tripulada | Éxito | — |
| <i>Apollo XII</i> | EEUU | Agosto de 1969 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Apollo XIII</i> | EEUU | Noviembre de 1969 | Alunizaje Tripulada | Éxito | — |
| | | Abril de 1970 | Alunizaje Tripulada | Fracaso | Explosión en el módulo de servicio - Órbita y regreso |
| <i>Luna XVI</i> | URSS | Septiembre de 1970 | Alunizaje no tripulada | Éxito | Primera sonda no tripulada que regresa a la Tierra |
| <i>Zond VIII</i> | URSS | Octubre de 1970 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XVII</i> | URSS | Noviembre de 1970 | Alunizaje no tripulada | Éxito | Primer Alunizaje de un rover lunar |
| <i>Apollo XIV</i> | EEUU | Enero de 1971 | Alunizaje tripulada | Éxito | — |
| <i>Apollo XV</i> | EEUU | Julio de 1971 | Alunizaje tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XVIII</i> | URSS | Septiembre de 1971 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | Se estrelló contra la Luna |
| <i>Luna XIV</i> | URSS | Septiembre de 1971 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XX</i> | URSS | Febrero de 1972 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |

Tabla 3.1. Misiones lunares (continuación)

| Nombre | País | Fecha | Misión | Resultado | Notas |
|-------------------------|------------|--------------------|------------------------|---------------|----------------------------|
| <i>Apollo XVI</i> | EEUU | Abril de 1972 | Alunizaje tripulada | Éxito | — |
| <i>Apollo XVII</i> | EEUU | Diciembre de 1972 | Alunizaje tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XXI</i> | URSS | Enero de 1973 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XXII</i> | URSS | Mayo de 1974 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Luna XXIII</i> | URSS | Octubre de 1974 | Alunizaje no tripulada | Fracaso | Se estrelló contra la Luna |
| <i>Luna XXIV</i> | URSS | Agosto de 1976 | Alunizaje no tripulada | Éxito | — |
| <i>Hiten</i> | Japón | Enero de 1990 | Orbital no tripulada | Parcial | — |
| <i>Clementine</i> | EEUU | Enero de 1994 | Orbital no tripulada | Parcial | — |
| <i>Lunar Prospector</i> | EEUU | Enero de 1998 | Orbital no tripulada | Éxito | — |
| <i>Smart-1</i> | U. Europea | Septiembre de 2003 | Orbital no tripulada | En desarrollo | — |

4. LA ÚLTIMA GRAN FRONTERA: LOS RECURSOS DEL ESPACIO CERCANO A LA TIERRA

El nivel tecnológico y científico alcanzado, junto con el empuje moral, político, económico y ético, surgido de la II Guerra mundial, además de —¿por qué no decirlo?— la dura competencia entre los bloques de la Guerra fría, movió a la Humanidad a tomar la decisión de conquistar la última gran frontera, la del espacio exterior (o cercano a la Tierra). El papel jugado por la Mineralogía en esta gran aventura ha sido doble, en primer lugar, abordando la utilización práctica de los recursos naturales disponibles y, en segundo lugar contribuyendo, de manera decisiva, a abordar la respuesta a alguna de las grandes cuestiones que la Ciencia se ha planteado a esta altura de los tiempos, cuestiones como el origen de la vida y la posibilidad de que, además de en la Tierra, la vida haya emergido en otros planetas del sistema solar y que sea una consecuencia más de la evolución del Universo.

Considerando el nivel actual de conocimientos, y de acuerdo con Lewis et al. (1993), se consideran recursos cercanos a la Tierra a los procedentes del cinturón de asteroides, la Luna y Marte.

Tabla 3.2. Etapas de la exploración de Marte

| | |
|------------------|--|
| Sobrevuelo | El objetivo de las primeras misiones de la exploración del Sistema Solar consistía en obtener el mayor número de fotografías posibles de la superficie de Marte. Misiones: Mariner 3-4; Mariner 6-7 |
| Orbitadores | Con el avance del conocimiento y las mejoras tecnológicas, se pusieron en órbita varias sondas alrededor de Marte para realizar un estudio global del planeta durante un mayor período de tiempo. Misiones: Mariner 8-9; Viking 1-2; Mars Observer; Mars Climate Orbiter; Mars Global Surveyor; 2001 Mars Odyssey; Mars Express; Mars Reconnaissance Orbiter |
| Landers y Rovers | Con el desarrollo tecnológico, se enviaron sondas a la superficie de Marte para operar sobre el terreno. En la actualidad, no sólo somos capaces de aterrizar en Marte, sino también de desplazarnos a lo largo de su superficie. Misiones: Viking 1-2; Pathfinder; Polar Lander/Deep Space 2; Mars Exploration Rovers |

Muchos de los aspectos que se abordan aquí corresponden a estimaciones rigurosas sobre proyectos que se pretenden realizar a medio plazo, ya discutidas en numerosas publicaciones y congresos científicos internacionales. De los tres objetivos antes mencionados, los asteroides son los que —a pesar de ser bien conocidos gracias a los meteoritos— plantean mayores dificultades en cuanto a explotación y aprovechamiento de sus recursos.

Por mucho que avancen la exploración robótica y los métodos automatizados de extracción mineral, cuando existe participación humana directa en las misiones, se produce un efecto multiplicador sobre cualquier previsión de resultados. Por esto, aunque en un futuro los asteroides podrían constituir una importante fuente de combustibles, metales (incluso preciosos) y refractarios, y se conoce con bastante precisión su composición y distribución en el cinturón existente entre Marte y Júpiter, su explotación es realmente difícil, en el momento actual, tanto por la distancia a la que se encuentran, como por las dificultades inherentes a cualquier trabajo humano sobre su superficie.

Tabla 3.3. Etapas futuras de la exploración de Marte

| | |
|-------------------------------|--|
| Aeronaves y globos | Envío de misiones de vuelo sin motor sobre el cielo de Marte |
| Exploradores subsuperficiales | Estudio del terreno marciano para investigar la geología del planeta, la presencia de agua y evidencias de la existencia de vida |
| Retorno de muestras | Muestreo de rocas, regolito y atmósfera marciana para su análisis en la Tierra |

4.1. La Luna: un área potencial de exploración y explotación de recursos naturales

Si las misiones espaciales han sido muy importantes para adquirir nuevos conocimientos, no son menos los estudios realizados *in situ* en nuestro satélite. El 20 de julio de 1969, Armstrong, comandante del Apollo 11, fue el primer hombre que pisó la Luna; un hecho que supuso la consecución de un desafío científico y tecnológico para toda la Humanidad. La rivali-

dad entre los EEUU y la antigua URSS, dos auténticos titanes, fue el motor fundamental de esta hazaña. Tras más de tres años de visitas intensivas a nuestro satélite (del 20-7-1969 al 13-12-1972), criterios fundamentalmente económicos hicieron que se interrumpieran las misiones tripuladas, precisamente cuando un científico, el geólogo Harrison Schmitt, conseguía datos de primera mano y realizaba relevantes descubrimientos en nuestro satélite, como es el hallazgo de los famosos suelos anaranjados del cráter Shorty, ricos en titanio, hierro y zinc. Entre el Apollo 11 y la última misión tripulada del Apollo 17 (1972), el tiempo de actividad extravehicular y la cantidad de muestras lunares recogidas fueron aumentando de forma paralela y progresiva, desde unas dos horas y media a más de 22 horas, y desde 21 kilos de rocas a más de 110, respectivamente.

El paisaje lunar no es como el terrestre. No tiene océanos, lagos, ríos ni arroyos. Cuando se observa su superficie desde nuestro planeta, pueden diferenciarse dos tipos de terrenos lunares: los más brillantes denominados «térrea o tierras» (zonas elevadas) y los más oscuros «mares o maria» (zonas deprimidas).

4.1.1. *Rocas y minerales lunares*

Los principales tipos de rocas lunares son:

1. Rocas gabroides de la serie Anortosita-Norita-Troctolita (tipo ANT) y basaltos ricos en alúmina de las zonas elevadas. Edad: 4,6-4,0 Ga.
2. Rocas basálticas ricas en potasio, elementos de las tierras raras y fósforo (tipo KREEP). Edad: 4,0 y 3,8 Ga.
3. Rocas basálticas ricas en hierro y titanio (tipo FETI) que extruyeron como coladas entre los 3,8 y 3,2 Ga.
4. Numerosas variedades de brechas de impacto y depósitos piroclásticos dispersos en el regolito lunar.

La mineralogía lunar es relativamente simple aunque limitada por el conocimiento parcial de nuestro satélite. Las fases mayoritarias principales son silicatos y óxidos.

Silicatos

Dentro de los silicatos aparecen como componentes mayoritarios de las rocas lunares una serie de minerales también muy abundantes en la Tierra: plagioclasa, piroxeno y olivino. En la Tabla 4.1 se muestra la abundancia de plagioclasa en las rocas lunares.

Tabla 4.1. Abundancia de plagioclasa en las rocas lunares

| <i>Rocas lunares</i> | <i>Abundancia (% en peso)</i> | <i>Comentarios</i> |
|------------------------|-----------------------------------|--|
| Basaltos de los maria | 15 - 35 | Aproximadamente igual para basaltos de alto y de bajo contenido en titanio |
| Anortositas | 40 - 98 | Normalmente superior al 70 por 100 |
| Brechas cristalinas | 50 - 75 | Sólo en «tierras» lunares |
| Brechas vítreas | 15 - 50 | De grano muy fino |
| Brechas poco mezcladas | 70 - 90 | Más abundantes en la zona del «Apollo 16» |
| Regolito lunar | 10 - 60 | Variable en función de la región lunar |

Fuente: NASA.

La mayor parte de la plagioclasa lunar tiene composiciones superiores al 80 por 100 de anortita (es decir, es muy rica en calcio). Los piroxenos lunares son tanto orto (ferromagnesianos) como clinopiroxenos (calcosódicos) y el olivino aparece con frecuencia en los basaltos de los maria con composiciones variables entre un 20 y un 70 por 100 de fayalita (es decir, con proporciones muy variables de hierro y magnesio). Los feldespatos alcalinos son minoritarios y se localizan en los basaltos tipo «KREEP». Se han encontrado brechas de tierras raras con gran contenido en sílice que tienen hasta un 50 por 100 de feldespato potásico. Los feldespatos potásicos pueden llegar a tener un cierto porcentaje de bario (variable entre un 0,9 y un 2,9 por 100 molar). Con respecto a la sílice, sus tres polimorfos más comunes (cuarzo, cristobalita y tridimita) se encuentran en la Luna. Suelen aparecer concentrados junto a los elementos de tipo «KREEP». El cuarzo es muy escaso debido a que la ausencia de agua y elementos hidratados en la Luna no ha posibilitado su formación. La cristobalita aparece en

ciertos basaltos de los maria lunares, llegando a constituir hasta el 5 por 100 en volumen de los mismos (a veces se encuentra junto a la tridimita o al cuarzo en basaltos de grano muy fino).

El circón tiende a concentrar elementos de las tierras raras en su estructura cristalina (normalmente hafnio, torio y uranio). Su presencia ha sido muy importante para datar algunas de las muestras lunares, especialmente en comparación con los materiales lunares más antiguos (tierras).

Nuevos silicatos lunares

Además de los minerales ya conocidos en la Tierra, la exploración lunar ha dado lugar al descubrimiento de nuevos silicatos:

La *piroxferroita*: es el mineral lunar rico en hierro análogo de la piroxmagita, cuya fórmula química es $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{SiO}_3$. Se encuentra en los basaltos de los maria y en los basaltos ricos en hierro. Aunque este mineral se puede producir artificialmente en el laboratorio, hasta el momento no ha sido encontrado en la Tierra. Ha aparecido en ciertas muestras obtenidas en la Luna, en el «Mar de la Tranquilidad», y también en algunos meteoritos lunares encontrados en el desierto en Dhofar (Omán).

La *tranquillityita*: debe su nombre al lugar de alunizaje de la misión «Apollo 11», el mar de la Tranquilidad (Mare Tranquillitatis). Su fórmula química es $\text{Fe}_8(\text{Y}, \text{Zr})_2\text{Ti}_3\text{S}_{13}\text{O}_{24}$. Se encontró en los basaltos de los maria, en los que forma pequeñas agujas de menos de 100 μm de longitud. A menudo, este mineral está asociado con otros como apatito y piroxferroita. Su elevado contenido en titanio le da un color rojo oscuro, aunque mediante luz reflejada, su color es gris.

Óxidos

Tal como ocurre con los silicatos, hay una serie de óxidos lunares ampliamente representados en la Tierra. Este es el caso, por ejemplo de:

Ilmenita: FeTiO_3 ; es el óxido más abundante en la corteza lunar (en algunos casos, llega a constituir entre el 15 y el 20 por 100). Se suele encontrar en los basaltos de los maria en forma de cristales planos de pocos milímetros de longitud y, a menudo, asociado con piroxenos. Se forma a bajas temperaturas, junto al hierro nativo y a la troilita aunque, en las muestras de la misión «Apollo 17» aparece asociado a un nuevo mineral lunar, la armalcolita, ligada etimológicamente a la historia de la exploración, que se explicará más en detalle en el siguiente epígrafe.

Espinelas: la mayoría de las espinelas lunares están representadas por la serie cromita (FeCrO_4), ulvoespinela (Fe_2TiO_4) y hercinita (FeAl_2O_4). Prácticamente aparecen en todos los basaltos de los maria de la Luna. También se encuentran minerales de esta serie en las rocas de las «tierras» (como en las anortositas y los gabros), siendo la cromita la fase más común en las rocas anortosíticas.

Rutilo: TiO_2 . Suele encontrarse asociado a la ilmenita. Su formación se debe a la reducción de la ilmenita y la armalcolita y, a menudo, contiene ciertos elementos como cromo, tántalo y lantánidos.

Badeleyita: ZrO . Se cree que su origen es debido a la contaminación producida por los impactos meteoríticos que hicieron que se incorporara a las rocas fundidas originarias de la corteza lunar.

Existen otros óxidos que se han encontrado como trazas en las muestras del regolito lunar, tales como la circonolita ($\text{CuZrTi}_2\text{O}_7$), corindón (Al_2O_3), hematites (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) y goethita [$\text{FeO}(\text{OH})$].

Nuevos óxidos lunares

Además, en la Luna se han descubierto nuevos óxidos, tales como:

La *armalcolita* se descubrió en el «Mar de la Tranquilidad» y recibe su nombre en honor de los tres primeros astronautas: Neil ARMstrong, Buzz Aldrin y Michael Collins. Fue aprobado

para su catalogación como un nuevo mineral por la International Mineralogical Association en 1970, un año después del primer alunizaje. Es un mineral del sistema ortorómbico y forma parte del grupo de la pseudobrookita, con fórmula general X_2YO_5 , siendo X e Y: Fe (2^+ y 3^+), Mg, Al, y Ti. En este grupo se incluyen, además de la armalcolita ($MgFeTi_2O_5$), la pseudobrookita (Fe_2TiO_5) y la ferropseudobrookita ($FeTi_2O_5$). Este mineral se forma a altas presiones y temperaturas, tales como las que se alcanzan cuando un meteorito impacta contra la superficie de un cuerpo planetario.

Probablemente el primer descubrimiento de armalcolita en la Tierra se produjo en 1976, en el famoso y bien conocido cráter Ries (Alemania), un cráter terrestre de impacto de 24 kilómetros de diámetro y una edad de alrededor de 15 millones de años. Términos especialmente ricos en calcio de la armalcolita se han encontrado también en meteoritos muy primitivos, concretamente en condritas carbonáceas (condrita Ningqiang). Pero lo más curioso es que, paradójicamente, gracias a su descubrimiento en la Luna se ha comprobado que este mineral también existe en la Tierra, aunque en contextos geológicos muy singulares, tales como diques lamproíticos, en Smoky Butte, Garfield County, Montana (EEUU), como inclusiones dentro de hierro nativo en Groenlandia, o en kimberlitas en Sudáfrica.

Ytrobetafita: su fórmula es $(Ca,Y)_2(Ti,Nb)_2O_7$. Fue descubierto en una muestra lunar, pero no pudo ser identificado estructuralmente de forma adecuada debido a los daños que sufrió por la radiación provocada por el uranio y el torio.

Además de los silicatos y óxidos, otras fases minoritarias lunares son los sulfuros, fosfatos y metales nativos.

Sulfuros

Están muy dispersos en el regolito lunar. La *troilita* es, con diferencia, el más abundante de los sulfuros lunares (máximo 1 por 100 en volumen). En parte este mineral se encuentra asociado al hierro nativo, que es de los pocos metales puros que se encuentran sobre la corteza de la Luna. Otros sulfuros que aparecen en trazas son: *calcopirita*: $CuFeS_2$; *cubanita*:

CuFe_2S_3 ; *pentlandita*: $(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$, se ha encontrado en una brecha de una muestra del «Apollo 14»; *mackinawita* $(\text{Fe}_{(1+x)}\text{S})$, normalmente Fe_9S_8 aparece en pequeños granos (menores de 5 μm de diámetro) en unas muestras de basaltos del «Apollo 12»; *esfalerita* $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$, aparece en brechas obtenidas en la misión «Apollo 16», con un tamaño de grano que no supera los 20 μm .

Fosfatos

El óxido de fósforo (P_2O_5) aparece con un 0,5 por 100 en peso en las rocas lunares y en el regolito. Se encuentra en forma de dos minerales: el apatito y la whitlockita. Sólo aparecen trazas de estos minerales en las muestras obtenidas de la corteza lunar, y tienen sustituciones complejas de elementos de las tierras raras (con concentraciones superiores que las que se encuentran en los mismos minerales de la Tierra).

Apatito: comprende al clorapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}]$, el carbonatoapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3, \text{OH})_3(\text{F}, \text{OH})]$, el hidroxilapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$, y el fluorapatito $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$.

Whitlockita: es el más abundante de los minerales lunares de esta clase. En general, su contenido en elementos de las tierras raras es mayor que en el apatito (especialmente, para los más ligeros como el lantano, el cerio y el neodimio).

Metales nativos

Hierro: su origen es incierto, aunque se cree que la gran mayoría del hierro nativo que se encuentra en la Luna procede de los impactos de meteoritos ricos en este elemento. Se suele encontrar junto a pequeñas cantidades de níquel y cobalto.

Aluminio: constituye entre el 10 y el 13 por 100 del regolito de las «tierras» lunares (es el tercer elemento más abundante). Sin embargo, en las cuencas de los maria, tan sólo llega al 4 ó 5 por 100. Muestra una correlación negativa con el hierro y positiva con el calcio.

Cobre: aunque se han encontrado trazas en algunas muestras lunares, no se sabe con certeza si se trata de cobre nativo o si sólo es un producto debido a contaminación.

Otros minerales reconocidos gracias a los meteoritos lunares

Los cinco minerales que se han descubierto gracias a los meteoritos lunares son:

Schreibersita: es un mineral altamente magnético, de gran dureza y densidad. Su fórmula química es $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$, aunque puede contener pequeñas cantidades de cobalto. Se ha encontrado en inclusiones de ciertos meteoritos féreos (sideritos).

Cohenita: se encuentra como mineral accesorio de los sideritos. A temperatura y presión atmosférica, se descompone en kamacita (hierro metálico con más del 7,5 por 100 de níquel en solución sólida) y grafito. Es muy duro (más de 7 en la escala de Möhs), incluso más que la schreibersita. Su fórmula química es $(\text{Fe,Ni,Co})_3\text{C}$.

Ninningerita: es un sulfuro de fórmula química $(\text{Mg,Fe,Mn})\text{S}$ y dureza relativamente baja (entre 3,5 y 4 en la escala de Möhs).

Lawrencita: es un mineral que ha sido encontrado en meteoritos de hierro-níquel, cuya fórmula química es $(\text{Fe,Ni})\text{Cl}_2$.

Hapkeita: es el último mineral lunar que se ha encontrado hasta la fecha (en el año 2004), aunque todavía no se tiene la certeza de que sea realmente de la Luna, pese a que todos los indicios apuntan a ello. La razón es que, pese a haberse encontrado pequeñas partículas de hapkeita en un meteorito lunar, pertenece a una brecha. Su fórmula química es sencilla, Fe_2Si . Debe su nombre al científico Bruce Hapke de la Universidad de Pittsburg, quien hace 30 años predijo el proceso que forma el material.

Los minerales y rocas lunares como fuente de oxígeno

Es evidente que para futuras misiones, el recurso natural más importante en un satélite como la Luna es el oxígeno. Si exceptuamos la aún no verificada existencia de hielo en algunos cráteres lunares, la fuente principal de este elemento en la superficie son los basaltos que contienen entre el 40 y el 50 por 100 de oxígeno en forma de óxidos. Los minerales más importantes presentes en estas rocas son ilmenita (FeTiO_3), anortita ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$) y olivino ($\text{MgFe}_2\text{SiO}_4$). Pues bien, se han descrito más de 20 procedimientos, algunos de ellos bastante prometedores para la obtención de oxígeno a partir de estos materiales ígneos; especialmente teniendo en cuenta que la etapa de preparación del mineral, que incluye trituración y/o molienda, estaría bastante avanzada debido al bombardeo meteorítico. Los procedimientos más importantes de liberación de oxígeno son la electrólisis de fundidos silicatados, la descomposición de estos fundidos mediante la utilización de flúor, y la reducción de ilmenita con hidrógeno, con monóxido de carbono o con metano.

Combustibles

Los posibles combustibles derivados de materiales lunares, que parecen más apropiados por sus características de abundancia, accesibilidad y de almacenaje, implican la utilización de: oxígeno (que de acuerdo con el conocimiento actual es el que proporciona mayor energía), hidrógeno (combinado con el oxígeno líquido lunar), los silanos (compuestos de hidrógeno y silicio, SiH_4 , con propiedades físicas similares a las del metano), y los sólidos metálicos (especialmente magnesio y aluminio combinados con oxígeno líquido).

Rocas y materiales industriales

El desarrollo de infraestructuras para una base lunar habitada de carácter permanente requiere la construcción de pistas de despegue y aterrizaje, cimientos, almacenes, módulos de protección antitérmica, carreteras, etc. Para ello, se han estudiado las propiedades y los métodos de procesamiento del

regolito basáltico lunar, en cierto modo muy similares a las de los materiales cerámicos terrestres. Se han definido tres etapas de procesamiento: una primera de compactación, a fin de reducir mecánicamente la porosidad y eliminar las partículas de tamaño grueso (se ha demostrado que el regolito lunar puede tener una alta capacidad de cohesión); una segunda etapa de sinterización, que no es más que el tratamiento a temperatura elevada de un material poroso, en el que las partículas forman enlaces fuertes con una reducción concurrente en el volumen del espacio de poro, y, finalmente, una tercera y última etapa de enfriamiento gradual muy controlado que tenga en cuenta la anisotropía del material.

Volátiles como fuente de energía

Los principales recursos de volátiles lunares afectan a las distribuciones de gases nobles. De los gases nobles destaca la posible utilización del helio (He^3). Se ha estimado que el viento solar ha depositado más de un millón de toneladas de He^3 sobre el regolito lunar, por lo que dada la relación He-Ti, los sensores remotos pueden utilizarse perfectamente para la localización de las zonas ricas en ambos compuestos. Los cálculos realizados indican, por ejemplo, que el 50 por 100 del Mare Tranquillitatis podría ser explotable, y capaz de producir unas 7.000 toneladas de He^3 . La fusión de sólo 100 kilos de He^3 con deuterio en plantas termonucleares de fusión puede producir más de 1.000 MW de energía eléctrica. Los recursos lunares serían de hecho suficientes para el abastecimiento de energía eléctrica a la Tierra durante más de 1.000 años.

Otros elementos, o compuestos, volátiles tales como hidrógeno, carbono, nitrógeno, azufre, flúor y cloro, aparecen en la Luna como trazas. Con respecto al hidrógeno, su contenido medio en los basaltos lunares es generalmente muy bajo, con valores máximos de $12 \mu\text{g g}^{-1}$. Algo superiores son los valores obtenidos en las brechas ($28 \mu\text{g g}^{-1}$) y aún mayores los correspondientes a los suelos ($45 \mu\text{g g}^{-1}$). Se ha observado que —al igual que existe una alta correlación del He^3 con el Ti—, el hidrógeno presenta una alta correlación con el FeO.

Por lo que se refiere al carbono, los contenidos promedios son de $124 \mu\text{g g}^{-1}$ en el regolito lunar, de $93 \mu\text{g g}^{-1}$ en las

brechas, y de tan sólo 26 $\mu\text{g g}^{-1}$ en los basaltos. Con el nitrógeno, el flúor y el cloro se observa la misma tendencia que en los dos anteriores, el contenido medio de las brechas es ligeramente inferior al de los suelos y el de los basaltos es todavía marcadamente más bajo. Por último, la distribución del azufre es, sin embargo, ligeramente distinta. Los valores más elevados (1.513 $\mu\text{g g}^{-1}$) corresponden a los basaltos, los intermedios (818 $\mu\text{g g}^{-1}$) a las brechas, y los más bajos (715 $\mu\text{g g}^{-1}$) a los suelos.

Finalmente, y aunque no se trata de conocimientos adquiridos directamente en nuestro satélite, también es importante la información que nos llega de la Luna a través de los meteoritos de tipo lunático o «lunaitas». Los estudios anteriores de las misiones Apolo, basados en el análisis de más de 380 kilos de materiales lunares fueron fundamentales para su identificación.

4.1.2. *Hacia una base semi-permanente lunar*

Como se ha expuesto en el epígrafe anterior, el conocimiento sobre la geología de nuestro satélite, sus materiales y recursos minerales y energéticos es ya considerablemente importante y, por ello, uno de los principales objetivos de nuestro regreso a la Luna será el establecimiento de una base semi-permanente.

En 1999 se celebró en Houston, Texas, el primer simposio comercial sobre el desarrollo de una base lunar (Comercial Lunar Base Development Symposium). Dicho simposio abordaba, entre otros, los tres temas definidos como claves de la colonización lunar:

- a) la base permanente en nuestro satélite servirá de prueba piloto para conocer cómo se desenvuelve el ser humano ante un ambiente hostil, y para adquirir experiencia en otras futuras colonias extraterrestres;
- b) permitirá la localización, exploración, estudio y aprovechamiento de materias primas y de otros recursos, tanto para autoabastecimiento como para su posible uso en nuestro planeta;

- c) será una plataforma excepcional hacia otros cuerpos planetarios de nuestro sistema solar;
- d) contribuirá a la preservación de nuestra cultura y al desarrollo de nuestra sociedad, así como a la percepción de la Tierra como cuna del ser humano.

Los programas para la base permanente en la Luna plantean el inicio de los trabajos para su establecimiento entre el año 2010 y el 2020, siendo las regiones polares las más probables. De acuerdo con los planes de la NASA, la futura base lunar se diseñará en dos etapas. Primero se enviará una misión robótica cuya labor será sondear y determinar las características más adecuadas de la superficie lunar elegida. En segundo término, se enviará una tripulación de astronautas que se encargarán de la construcción y ensamblaje de la base, comenzando los primeros experimentos y observaciones astronómicas. Se ha estimado que para terminar la construcción serían necesarios al menos 30 viajes a nuestro satélite. Los módulos deberán ser de materiales ligeros, pero resistentes, de unos cinco metros de ancho por 15 de largo y en su mayor parte estarían bajo la superficie lunar; esto asegurará su fijación al terreno y protegerá a la población de los rayos cósmicos.

Un elemento clave en todo este proceso será el conocer con precisión los materiales y recursos existentes en nuestro satélite, especialmente teniendo en cuenta que el envío de material a la Luna es extremadamente caro y que, como ocurría en el pasado con los antiguos colonos, el poder aprovechar los elementos de la zona de destino siempre supone una gran ventaja. Por ello, las materias primas lunares pueden considerarse herramientas de colonización.

Cualquier trabajo que se vaya a desarrollar en la Luna tendrá que enfrentarse a las condiciones medioambientales específicas de nuestro satélite: *gravedad* (seis veces inferior a la terrestre), *radiación* (protones de las emisiones solares e iones pesados procedentes de la radiación cósmica galáctica), *vacío* (con una atmósfera extremadamente tenue, tan solo 10^{-12} torr durante la noche), ciclo sinódico (29,53 días, aproximadamente 15 de luz y otros 15 de oscuridad), temperatura (entre -160 y 110° C) y polvo (diminutas partículas regolíticas ($< 70 \mu\text{m}$) que en el ambiente lunar son extremadamente abrasivas y

electrostáticamente muy «pegajosas»). Los recursos naturales de la Luna son básicamente recursos geológicos. La forma en que se palíen las necesidades básicas de la base lunar será un ejemplo perfecto de utilización de dichos recursos bajo condiciones extremas, y una manera de aprender para la futura colonización de otros planetas.

Dentro de esta iniciativa, en España se ha presentado en 2005 en la Universidad Politécnica de Madrid (Fernández Abellán) el primer trabajo de investigación sobre las posibilidades que existen para establecer una base en el satélite terrestre con el fin de obtener beneficios científicos, tecnológicos y económicos que ayuden a mejorar el conocimiento humano de la Luna y de su propia adaptación a un medio hostil para la vida, teniendo en cuenta sus recursos naturales. En dicho trabajo se estableció que, aunque los criterios que determinan el emplazamiento de la base lunar son esencialmente idénticos para cualquier tipo de base, es posible distinguir tres tipos fundamentales de bases lunares en función de la finalidad para la que serían construidas:

- *Explotación de los recursos naturales de la Luna:* con esta base lunar se intentará tener la capacidad adecuada para utilizar los recursos y materiales de la Luna con fines beneficiosos para el ser humano, no sólo para su empleo en la Tierra sino también para fomentar el crecimiento de la colonización de la Luna a medio y largo plazo. De la Luna se pueden extraer metales valiosos como hierro y, sobre todo, titanio, así como otros elementos (oxígeno, hidrógeno) mediante diferentes procesos.
- *Investigación científica:* esta base lunar creará nuevas oportunidades para investigar en la Luna y su entorno y para su uso como plataforma de investigaciones científicas. Constará de laboratorios con capacidad logística y de soporte para estudiar la geología lunar, geofísica, ciencia ambiental y recursos potenciales para muchos campos de investigación, muestreo, instrumentación y otros. Además, se podría instalar un observatorio astronómico basado en la interferometría que, gracias a la ausencia de atmósfera, permitiría realizar observaciones del espacio profundo con una calidad inalcanzable para los observatorios terrestres.

- *Autoabastecimiento*: una base lunar autosuficiente es un posible objetivo y desafío a largo plazo que requiere una perspectiva diferente para planear y estudiar sistemas que puedan utilizar los recursos naturales de la Luna sin necesidad de ayuda externa, así como el uso de fuentes de energía propias.

Las primeras bases lunares semi-permanentes serán destinadas a la exploración científica (especialmente estudios geológicos y topográficos) y a la explotación de los recursos naturales de la Luna. Sin embargo, para conseguir una base lunar autosuficiente aún habrá que esperar más tiempo, tener mayores conocimientos sobre la Luna, y haber establecido previamente un sistema de bases que estén interrelacionadas entre sí.

Es importante, por tanto, que el emplazamiento de la base lunar se sitúe en un escenario con una gran concentración de recursos que extraer y poder tratar posteriormente. En los maria de la cara visible, la riqueza en minerales de titanio como la ilmenita es elevada lo que hace que sea una zona muy favorable para establecer una base (se considera que este mineral es el más favorable para la producción *in situ* de hierro, titanio y oxígeno). La posible presencia de agua helada y otros elementos volátiles concentrados en los polos, hacen de éstos otro lugar interesante para su explotación, si bien allí la presencia de ilmenita no está confirmada aunque es bastante probable que exista en cantidades explotables.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la propuesta final del estudio español indica que la zona de los polos es el mejor emplazamiento de entre los posibles para el establecimiento de la primera base lunar. Entre el polo norte y el polo sur lunares no existen grandes diferencias, ambos tienen una topografía similar, las características mineralógicas apenas difieren, la iluminación solar es la misma, y se cree que la cantidad de hielo atrapado en cráteres que se podría encontrar sería similar. La zona propuesta se encuentra en el polo sur, puesto que es el mejor estudiado y del que existe mayor información, concretamente en el entorno de unos 15 kilómetros desde el polo, en una zona que está perfectamente cartografiada por la NASA (cuya latitud y longitud, respectivas, son 78° S y 4° E), justo en el borde de un cráter y con unas condiciones de iluminación solar relativamente continuas.

4.1.3. Minería lunar

Al principio, en las primeras fases del establecimiento de seres humanos en la Luna, la minería tiene que ser de superficie, explotando los importantes recursos que ofrece el regolito lunar. A medio y largo plazo, cuando la presencia humana en la Luna esté en un grado más avanzado de desarrollo, se podría intentar llegar más lejos mediante la minería de interior, aplicando para ello las tecnologías más novedosas y modernas.

Como se explicó anteriormente, la Luna tiene todos los elementos básicos que se encuentran en la Tierra, si bien la abundancia de los mismos es diferente (Tabla 4.2). El mayor

Tabla 4.2. Abundancia de los elementos que forman el regolito lunar

| <i>Elemento</i> | <i>Abundancia (% en peso)</i> | |
|-----------------|-------------------------------|-----------|
| Oxígeno | 43,5 | |
| Silicio | 21,0 | |
| Hierro | 10,0 | |
| Aluminio | 9,0 | |
| Calcio | 8,0 | |
| Magnesio | 5,0 | |
| Titanio | 2,0 | |
| Níquel | 0,6 | |
| Sodio | 0,3 | |
| Cromo | 0,2 | |
| Manganeso | 0,1 | |
| Azufre | 0,1 | |
| Potasio | 0,1 | |
| Fósforo | 0,05 | (500 ppm) |
| Carbono | 0,01 | (100 ppm) |
| Flúor | 0,01 | (100 ppm) |
| Nitrógeno | 0,01 | (100 ppm) |
| Hidrógeno | 0,005 | (50 ppm) |
| Cloro | 0,002 | (20 ppm) |
| Helio | 0,002 | (20 ppm) |
| Boro | 0,0001 | (1 ppm) |
| Gases inertes | 0,001 | (10 ppm) |
| Resto | 0,0099 | (99 ppm) |
| TOTAL | 100 | |

Fuente: NASA.

porcentaje del regolito lunar es oxígeno (casi llega a la mitad); ello es debido a que prácticamente todos los compuestos metálicos del mismo aparecen en forma de óxidos (en la Luna apenas hay depósitos de metales puros como existen en la Tierra, tan sólo un pequeño porcentaje de hierro y níquel y trazas de algunos otros como el cobre).

Es evidente que las técnicas mineras que funcionan en la Tierra deben modificarse para extraer los materiales de la Luna. Por ejemplo, la baja gravedad lunar haría que la maquinaria pesada ejerciera mucha menor fuerza penetradora y, en consecuencia, profundizaría mucho menos. En consecuencia, al no ser posible llevar maquinas tan pesadas como serían necesarias en la Luna, se debe intentar que las excavaciones que se realicen sean poco profundas inicialmente y elegir adecuadamente la maquinaria a emplear en las mismas. Los requisitos que deben cumplirse son los siguientes:

- *Producción:* se debe aceptar y producir el volumen especificado. Se estima que para la primera mina lunar se deberían extraer del orden de 40.000 toneladas/año (unas 10 toneladas/hora para 4.000 horas de operación anuales) para obtener beneficios. Esta cantidad de material extraído es perfectamente asumible con la tecnología minera actual, de hecho, no es una gran cantidad comparado con la minería terrestre. Ello permite una mayor flexibilidad a la hora de elegir el sistema minero prototipo a utilizar.
- *Robustez de los equipos:* los equipos para la minería lunar deben ser robustos para aguantar los rigores de las operaciones mineras habituales (como la excavación y transporte de polvo abrasivo, cantos y piedras), trabajar en un entorno polvoriento, y operar de forma continuada.
- *Simplicidad de diseño:* los bajos requisitos de producción favorecen que el diseño de los equipos sea sencillo, mejorando la fiabilidad. También debe simplificarse la forma de operar de estos equipos mineros, y deben ser fáciles de reparar.
- *Versatilidad:* los equipos mineros deben ser versátiles para poder afrontar todas las dificultades del trabajo que puedan surgir en un entorno tan desconocido.

- *Automatización:* el sistema minero debe diseñarse para permitir una automatización a largo plazo, pudiéndose incluso robotizar las operaciones más rutinarias.
- *Trabajo humano:* la participación humana en los trabajos mineros más duros daría lugar a que los costes se incrementaran rápidamente y disminuyera el margen de beneficio. Los trabajadores sólo deben ocuparse de las operaciones de reparación, mantenimiento y recolocación de los equipos, mientras que el resto de tareas mineras rutinarias no van a requerir operadores humanos.
- *Minimizar peso y costes:* debido a que los requisitos de extracción de materiales no son nada exigentes, el equipo transportado a la Luna no tiene que ser excesivamente pesado o costoso. Sin embargo, otras razones hacen que sea conveniente que ciertos equipos sean pesados (por razones de tracción, estabilidad y aplicación de fuerzas para penetrar en el regolito lunar a tan baja gravedad). Una posibilidad es diseñar los equipos de manera que puedan ser lastrados en la Luna (con regolito o rocas lunares, por ejemplo), de forma que el coste de transporte sería menor.
- *Pruebas terrestres:* los equipos deben ser probados previamente en la Tierra, pese a que las condiciones de trabajo son distintas, debido principalmente a las diferencias gravitatorias y atmosféricas.

En resumen, los requisitos de la minería lunar no parecen excesivos desde el punto de vista de la demanda de volumen de material a procesar. Parece claro que el trabajo minero intensivo que caracteriza a las explotaciones mineras terrestres no bastará en las condiciones de baja gravedad, fuerte vacío atmosférico e inaccesibilidad de algunos lugares de la Luna. Por ello, se deben hacer esfuerzos en cuatro áreas principales:

- Desarrollar sistemas de prospección de alta velocidad y con gran resolución óptica que permitan una caracterización más eficiente de los posibles emplazamientos mineros en la Luna.
- Investigar el efecto de las condiciones de la Luna en los equipos de exploración y minería terrestres, para poder

desarrollar unos prototipos lunares más adecuados y optimizados.

- Desarrollar sistemas robotizados y automatizados para trabajar en la Luna y otros planetas del sistema solar interior.
- Considerar los aspectos medio ambientales.

4.2. Marte: la cuestión del origen de la vida y la explotación futura de sus recursos

Marte constituye el próximo desafío de la humanidad en la exploración del sistema solar. Un reto que por sus propias características implica además de un salto cualitativo científico y tecnológico, la consecución de un nuevo objetivo que enraíza con el origen de las rocas (y tal vez de la vida) en la Tierra y se proyecta hacia su investigación en otros cuerpos planetarios.

A finales del siglo XIX, el astrónomo milanés G.V. Schiaparelli, dibujó mapas muy detallados de la superficie de Marte en los que identificó una red de estructuras, que él denominó canali, lo que significa ranuras, estrías. Este término se interpretó, de forma errónea, como canales, surgiendo así la leyenda de los canales de Marte, con un significado distinto al de la idea original de Schiaparelli. El astrónomo Percival Lowell dedicó parte de su vida (escribió tres libros sobre ello) a demostrar que los canales eran algo así como gigantescas obras de ingeniería hidráulica, construidas por una supuesta civilización marciana.

Curiosamente, los estudios más recientes sobre erupciones lávicas en la tierra primitiva y en otros cuerpos planetarios (Luna, Io, Venus y por supuesto Marte) indican que más que canales generados por el agua, muchas de estas estructuras de aparente escorrentía superficial se podrían haber formado, en parte, a partir de un tipo especial de volcanismo: el volcanismo komatiítico. Estas erupciones se produjeron sobre todo en el Arcaico y Proterozoico y una de sus características principales radica en su alto contenido en magnesio y baja viscosidad dinámica. Gracias a ello, sus características reológicas las

hacen similares a las de un fluido acuoso, de ahí la formación de canales.

Aunque en la actualidad Marte es relativamente bien conocido, las ideas sobre el planeta han evolucionado rápidamente en los últimos años desde concepciones quasi-pseudocientíficas. Hace menos de un siglo aún se encontraban plenamente vigentes las teorías sobre la existencia de vida inteligente en Marte. Por poner un ejemplo, el famoso matemático, Carl Friedrich Gauss, propuso el envío de señales a Marte mediante un sistema consistente en la preparación, en la tundra siberiana, de tres grandes cuadrados rodeados de pinos, y sembrar sus superficies con trigo o con una hierba adecuada, de modo que de ellos se pudiera deducir el teorema de Pitágoras. En su opinión, los marcianos, una vez que hubieran comprendido el mensaje, podrían enviarnos su respuesta reflejando la luz solar hacia nosotros. En 1901 se llegó a ofrecer un premio en París, el premio Guzmán, para la primera persona que lograra contactar con seres extraterrestres *¡y Marte quedó fuera del concurso por ser demasiado fácil!*

Paradójicamente, y con toda probabilidad, los primeros extraterrestres inteligentes que pisen Marte seremos los habitantes de la Tierra. Y esto sí que no es ciencia ficción. Existen planes específicos de la NASA, la Agencia Espacial Europea (ESA) y otras Agencias espaciales, que hacen que esta empresa tan extraordinaria sea cada vez más factible. Pero, primeramente, deberemos conocer en detalle qué es lo que nos espera allí. Y la geología planetaria, y el estudio de los minerales y rocas nos ayuda a encontrar respuestas sobre ello, pero también a plantear nuevas preguntas participando, junto con otros especialistas, en el establecimiento de los objetivos de exploración de las misiones espaciales y en la definición de los requerimientos científicos de las sondas.

Desde el punto de vista geológico es importante distinguir, a la hora de establecer modelos interpretativos, si nos referimos a lo que pensamos que existió en el pasado del planeta o a la situación actual. La exploración de Marte está directamente ligada a la existencia de agua, pasada y presente. El agua es la matriz universal por la cual la vida intercambia material y energía. No se tiene constancia de otro modelo de sistema que sea capaz de llevar a cabo el intercambio metabólico y utilice otro

tipo de matriz reactiva, sea gaseosa, líquida o sólida. Esta es la principal razón por la que la exploración de Marte y la búsqueda de vida o productos de su actividad en otros cuerpos planetarios diferentes de la Tierra pasa bien por la localización de reservorios actuales de agua, o bien por la detección de depósitos minerales formados bajo masas de agua antiguas. Todos los modelos geológicos sobre este planeta suponen que tuvo un desarrollo inicial muy similar al de la Tierra.

4.2.1. *En busca de recursos geológicos*

Hasta la misión del Mariner 9, en 1971-1972, no se supo que el pasado de Marte fue muy distinto a lo que observamos en la actualidad. Los datos recogidos por las sondas espaciales (principalmente las Viking, Mars Pathfinder, Mars Global Surveyor, Mars Exploration Rover) han supuesto un avance excepcional en el conocimiento de la composición y procesos desarrollados a lo largo de su compleja historia geológica. Si hoy algunos autores sostienen que el planeta rojo muestra aún cierta actividad geológica, en épocas remotas ésta fue mucho más importante, como así lo atestiguan las grandes estructuras tectónicas (ejemplo, Vallis Marineris) y los volcanes, algunos de ellos enormes, que se observan en su superficie. De hecho, existen muchas evidencias geomorfológicas, mineralógicas y espectroscópicas que indican que, aunque el agua líquida es inestable actualmente sobre su superficie, sí pueden aún existir grandes masas de agua por debajo de la superficie. Se ha propuesto que el agua podría estar en forma de algo similar al permafrost terrestre (agua del subsuelo helada) típico de las zonas frías, como Siberia o la Antártida. Incluso se ha sugerido que debido a la intensa actividad volcánica de Marte, el hielo subsuperficial podría, de manera episódica generar sistemas hidrotermales convectivos similares a los terrestres, en relación con la energía geotérmica marciana residual ligada a dicha actividad ígnea. Algunos autores incluso plantean que además del volcanismo pudo existir en el pasado un «ciclo del agua» con lagos, valles y canales fluviales, mares, océanos que afectó fundamentalmente al hemisferio norte del planeta.

Marte posee actualmente hielo en sus dos casquetes polares, y se ha demostrado que en algunas zonas, como el polo

sur, se trata de hielo de agua, al menos en sus niveles más superficiales. También hay abundante agua en la atmósfera, en forma de vapor (se han descubierto recientemente nubes estratosféricas de vapor de agua similares a los cirros terrestres). El propio regolito marciano contiene agua adsorbida y enlazada químicamente en proporciones de hasta un 30 por 100 en peso. Los principales componentes del suelo marciano son minerales silicatados (79-84 por 100), óxidos (3 por 100), sulfatos (12 por 100), cloruros (1 por 100), carbonatos (0-4 por 100) y nitratos (0-1 por 100), con una proporción total de agua que podría alcanzar el 1 por 100. De todos ellos, llama especialmente la atención la existencia ya demostrada de hematites, jarosita y otras posibles sales hidratadas, como kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e hidrohálita ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que se suponen formadas por procesos de evaporación, similares a las terrestres (ejemplo, cuencas marcianas Argyre y Hellas).

Todo esto hay que unirlo a la importantísima actividad volcánica del planeta en el pasado. Marte, siendo aproximadamente la mitad que la Tierra, tiene varios volcanes que sobrepasan los mayores terrestres. La mayor parte de estos se encuentran en las zonas elevadas o domos de las regiones de Tharsis y Elysium. La región de Tharsis tiene una extensión de unos 4.000 kilómetros y alcanza una altitud de casi 10 kilómetros. Tiene tres volcanes en escudo alineados: Ascraeus Mons, Pavonis Mons y Arsia Mons y destaca, sin ninguna duda, el Olympus Mons, el volcán más grandioso de Marte y, muy probablemente, el más alto e importante del Sistema Solar. Emerge unos 25 kilómetros sobre el nivel del suelo, con una caldera de más de 40 kilómetros de radio, y una base de 550 kilómetros de diámetro que está rodeado por un escarpe de 6 kilómetros de alto. Otra zona volcánica emblemática es por ejemplo la de Elysium Planitia, la segunda mayor de Marte que se encuentra centrada en una amplio domo de 1.700×2.400 kilómetros e incluye Hecates Tholus, Elysium Mons y Albor Tholus.

Para el conocimiento de Marte también ha sido determinante el análisis mineralógico, petrológico y cosmoquímico directo de los meteoritos que han caído a nuestro planeta y a los que se ha asignado un origen marciano. Hasta el momento de los aproximadamente 24.000 meteoritos que han sido descubiertos en la Tierra, sólo 34 han sido identificados como de

origen marciano. Entre ellos destaca, sin ninguna duda, por sus peculiaridades paragenéticas e interés astrobiológico el denominado ALH84001: un meteorito encontrado en la zona de Allan Hills (Antártida) en diciembre de 1984 dentro del programa ANSMET (ANtarctic Search for METeorites). En él se han descubierto unas pequeñísimas estructuras, con forma de gusano, similares a ciertas nanobacterias terrestres, que algunos autores han identificado como posibles trazas de actividad biológica pasada en dicho planeta (Mckay et al., 1996).

De hecho, no fueron sólo estas estructuras las que despertaron el interés de la comunidad científica internacional. Las evidencias relacionadas con la vida fueron mucho más importantes que unas simples estructuras vermiformes: la paragénesis de la zona del meteorito que las albergaba estaba constituida por una asociación de óxidos, sulfuros y carbonatos (algo realmente inusual en meteoritos marcianos cuando se produjo el descubrimiento). Además, se detectaron estructuras semejantes a los «biofilms» terrestres donde aparecieron hidrocarburos policíclicos aromáticos, y el estudio de los cristales de magnetita indicaba la presencia de minúsculas cadenas que podían ser interpretadas como residuos de las cadenas de magnetita que aparecen en bacterias magnetotácticas terrestres. El estudio detallado de los cristales de magnetita indicó que tenían unas características morfológicas especiales. No eran realmente cúbicos, sino que parecían tener una dirección preferente de alargamiento, como ocurre en ciertos cristales de magnetita bacterianos, como consecuencia de la limitación de su crecimiento por las propias paredes internas de la bacteria.

Todos estos resultados siguen siendo muy controvertidos y en la actualidad existen muchos detractores de la hipótesis biogénica, aunque el debate aún continúa activo. Lo que no se puede negar es que el trabajo de Mckay abrió una puerta a multitud de estudios sobre microestructuras relacionando la mineralogía y la microbiología, que de alguna manera sentaron las bases de todos los trabajos actuales sobre estos temas.

Pero si las misiones espaciales y los meteoritos de Marte han sido cruciales como fuentes directas de información sobre su geología, campo magnético, datos espectrales, condiciones atmosféricas y geomorfológicas, mineralogía, etc., para dar el siguiente paso, más interpretativo, se requiere también dispo-

ner de modelos geológicos adecuados. Y para ello, la Tierra es fundamental, ya que es el cuerpo planetario del sistema solar que constituye *la base de nuestro conocimiento, al que tenemos mejor acceso y sobre el que podemos aplicar nuevas técnicas y metodologías*, antes de trasladarlas a la investigación de Marte, Venus, Europa, Io y cualquier otro cuerpo planetario.

4.2.2. *Análogos terrestres para la exploración de Marte*

Las evidencias geológicas indican que la conexión volcanismo-agua es crucial para cualquier estudio que se vaya a realizar en Marte y los océanos terrestres constituyen gigantescos laboratorios naturales que pueden ser utilizados como análogos para la exploración espacial. Esto es particularmente importante si además consideramos que en la Tierra se han descubierto muy recientemente ecosistemas extremófilos, asociados a las zonas de chimeneas submarinas hipertermófilas y metanógenas, en los que habitan multitud de organismos interdependientes, que basan su estrategia de vida en la energía procedente de reacciones quimiosintéticas.

El descubrimiento de hidrotermalismo y actividad metanógena submarina ha dado lugar a una auténtica revolución en el conocimiento de la química y de la dinámica de los océanos, con claras implicaciones en la exploración de Marte. Esta actividad submarina, cuya representación geológica más relevante son los campos de fumarolas y chimeneas, incluye mineralizaciones muy variadas, desde sulfuros y sulfatos hasta óxidos de hierro y manganeso, asociadas normalmente a centros de expansión del fondo marino donde la astenosfera se encuentra a muy poca profundidad. Estas mineralizaciones pueden considerarse modelos para el estudio de los procesos de formación de minerales, así como para comprender los balances térmicos y geoquímicos. Más adelante se expondrán ejemplos terrestres de este tipo que se han propuesto como posibles modelos análogos para la exploración de Marte.

Los procesos hidrotermales submarinos se generan como consecuencia de la circulación de fluidos, mayoritariamente de origen marino, cargados de elementos lixiviados de las rocas que atraviesan. Esta circulación y lixiviado en forma de sistemas convectivos, se debe a la alta temperatura alcanzada por

los fluidos como consecuencia de la presencia de un foco magmático. Generalmente estos procesos ocurren en los límites de acreción, situados en las dorsales centro-oceánicas. Debido a la delgadez de la corteza oceánica ésta se fractura con más facilidad, lo que favorece la circulación de fluidos hidrotermales. La profundidad de penetración del agua depende de la permeabilidad y del gradiente térmico de la corteza, desde cientos de metros a kilómetros. Los fluidos ascienden con rapidez y se mezclan turbulentamente con el agua marina. La precipitación de las distintas mineralizaciones se produce como una consecuencia de una serie de procesos como son: a) rápido enfriamiento, b) variaciones del pH, c) aporte de sulfatos en el agua marina, etc.

Es decir, que el fluido hidrotermal es esencialmente agua de mar calentada (normalmente a 350° C, aunque en algunos casos la temperatura es incluso mayor), y químicamente modificada por su interacción con las rocas que atraviesa y la descarga de estos fluidos se produce a través de las zonas de escape, casi siempre a lo largo de los planos de falla.

De acuerdo con las teorías propuestas por Rosenbauer & Bischoff (1983), el ciclo hidrotermal que da lugar a los yacimientos hidrotermales submarinos puede resumirse en tres procesos principales: 1) aporte y/o lixiviación de los metales, a partir de rocas basálticas, por el agua del mar calentada a la temperatura máxima del ciclo; 2) transporte en la solución, desde la zona de lixiviado hasta los fondos marinos, y 3) precipitación de los metales y otros elementos asociados en zonas favorables.

La observación de los procesos de circulación y descarga de las soluciones, en áreas tales como la Dorsal del Pacífico Oriental «East Pacific Rise (EPR)», a 21° N, indica que los fluidos poseen, generalmente, características ácidas, que están empobrecidos en magnesio y sulfatos y enriquecidos en calcio, potasio y sílice, con respecto a la composición media del agua de mar. Asimismo, las concentraciones de bario, boro, litio y potasio en el agua de las zonas de emisión, sugieren que ésta derivó de la interacción entre el basalto y el agua del mar, con una relación agua/roca menor de 3. La secuencia hidroquímica mejor estudiada corresponde a la de las fuentes termales y fumarolas de tipo «black smoker» del EPR a 21° N (Von Damm

et al., 1983). Tal y como se ha apuntado anteriormente, las soluciones en sus fases finales se caracterizan por su extrema acidez ($\text{pH} = 4$) y por estar empobrecidas en magnesio y sulfatos. El agua es especialmente rica en sulfuros, con relaciones $\text{H}_2\text{S}:\text{Fe} = 3,5$ y $\text{Fe}:\text{Mn} = 1,8$. Concretamente, en las zonas de emisión existe un enriquecimiento importante en zinc en relación con el cobre ($\text{Zn}:\text{Cu} \sim 7$), su contenido en estroncio es ligeramente superior al promedio de agua del mar y, por el contrario, su composición isotópica se acerca a los basaltos.

Teniendo en cuenta estas características químicas, es posible establecer una clasificación general (Bonatti, 1983), en la que se encuentren presentes las relaciones entre las secuencias de precipitación, y el lugar y momento en que ésta se produce. Para construir esta clasificación, este autor se basa en las distintas formulaciones sobre circulación hidrotermal submarina, y plantea un modelo tipológico para explicar la metalogenia hidrotermal en las cuencas oceánicas. De esta forma, las mineralizaciones se clasifican como: 1) depósitos formados dentro del ámbito propiamente ígneo, con anterioridad a la descarga de las soluciones, «depósitos hidrotermales pre-descarga»; 2) depósitos formados, justamente, en el lugar donde se produce la descarga, «depósitos hidrotermales sin-descarga», y 3) depósitos formados por la precipitación, sobre el fondo marino, de elementos derivados del hidrotermalismo, después de un determinado tiempo de residencia en solución «depósitos hidrotermales post-descarga». Además de estos tres tipos Bonatti distingue una cuarta categoría, en la que incluye, 4) las concentraciones metálicas de origen hidrotermal que se acumulan dentro de los sedimentos, «depósitos intrasedimentarios».

Mineralizaciones hidrotermales pre-descarga: La formación de estos depósitos se ha explicado mediante cuatro procesos genéticos distintos:

1. En el caso de una emisión rápida de fluidos —como sucede en el East Pacific Rise a 21°N — donde además parece existir una cámara magmática a poca profundidad (~ 2 kilómetros), las soluciones calientes ($> 400^\circ \text{C}$) ascienden por un proceso adiabático y, en su retorno, fluyen hacia el fondo marino, después de haber extraído ácido sulfhídrico, sílice, hierro y metales base de las

rocas cercanas al techo de la cámara. La expansión adiabática del fluido, durante su ascenso, provoca una fuerte sobresaturación, que condiciona la precipitación de los sulfuros a varios cientos de metros por encima de la zona de flujo.

2. También se ha planteado que los fluidos hidrotermales, después de haber alcanzado en profundidad una temperatura de aproximadamente 400° C, podrían ascender de forma no adiabática, con una importante pérdida de calor. Esto tendría lugar bajo condiciones de escape suficientemente tortuosas, y cuando su retorno fuera relativamente lento. De esta forma, el descenso de la temperatura, durante el ascenso de la solución rica en metales, conllevaría la precipitación de los sulfuros.
3. Si el sistema hidrotermal descarga los metales a presiones inferiores a la presión crítica del agua del mar, puede existir ebullición, con separación de las fases vapor y líquida. Este sistema implica la existencia de una separación de las sales y metales base dentro del líquido y puede, por tanto, causar la deposición con anterioridad a la descarga de las soluciones en los fondos marinos.
4. Por último, podría darse que, en los niveles más someros, existiera una mezcla entre los fluidos hidrotermales portadores de metales y el agua del mar (fría y descendente). Esta mezcla sería la causante del brusco descenso térmico, produciéndose la precipitación de los metales (posiblemente en forma de óxidos y sulfuros), junto con otros compuestos tales como la sílice.

Mineralizaciones hidrotermales sin-descarga: En este segundo tipo de mineralizaciones, la existencia de fuentes termales a 350° C (como en el EPR), el rápido enfriamiento de los fluidos y el cambio brusco del pH, tienden a favorecer la precipitación de los sulfuros, por la expansión adiabática de la solución durante su ascenso. Además, también son frecuentes las reacciones de oxidación, que determinan la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso. En España tenemos un buen ejemplo en el Sistema Hidrotermal del Jaro-so (Almería), del que hablaremos más tarde.

Mineralizaciones hidrotermales post-descarga: Los elementos que no se depositaron dentro de los dos tipos anteriores, especialmente los que son muy solubles en el agua del mar (por ejemplo, el calcio), tienden a permanecer en solución durante la mezcla y dilución de las soluciones hidrotermales mineralizadoras con el agua marina. Otros elementos insolubles, como el hierro y manganeso, precipitan después de un corto período en solución. Este tiempo de permanencia depende de la solubilidad y concentración de cada elemento, de la temperatura de los fluidos y de las pautas de mezcla y dilución del fluido hidrotermal con el agua.

Mineralizaciones hidrotermales intrasedimentarias: Generalmente las zonas axiales de las áreas de emisión no poseen sedimentos. Esto condiciona que los fluidos hidrotermales, después de su circulación submarina, salgan directamente de la cámara magmática al agua del mar. Sin embargo, en determinadas zonas donde las pautas de sedimentación terrígena son muy altas (por ejemplo, en el Golfo de California), las soluciones pueden descargar sus componentes dentro de los sedimentos o en la interfase agua-sedimento. Los depósitos de este tipo pueden incluir tanto sulfuros metálicos, como óxidos, hidróxidos y silicatos, aunque es importante tener en cuenta que se pueden producir modificaciones químico-mineralógicas posteriores a causa de las reacciones entre los sedimentos y los fluidos hidrotermales.

En función de la composición de los fluidos, el hidrotermalismo submarino da lugar a la formación de yacimientos de sulfuros, barita, talco, silicatos de hierro y óxidos de hierro y manganeso. La naturaleza diversa que pueden tener estos depósitos, y las diferencias en su composición química, mineralógica y modo de aparición, contrastan con la presencia más uniforme de un tipo especial de depósitos: los nódulos de manganeso, que se tratarán en detalle un poco más adelante. Actualmente se han contabilizado y catalogado más de un centenar de sitios en nuestro planeta donde existe o existió actividad hidrotermal submarina reciente. Todos ellos son potenciales modelos a explorar en Marte, no porque vayan a aparecer con idénticas características a las terrestres, sino porque su conocimiento detallado permite el establecimiento de geo y biomarcadores que podrían ser utilizados como criterios de exploración. A grandes rasgos, se pueden establecer

cuatro tipos de mineralizaciones: sedimentos metalíferos, depósitos de sulfuros, depósitos de óxidos de hierro y manganeso y nódulos de manganeso.

Sedimentos metalíferos: Están enriquecidos en hierro y manganeso, en relación con el aluminio y con otros elementos tales como tierras raras, uranio, torio, etc. Estos sedimentos han sido atribuidos a hidrotermalismo, por su proximidad a zonas activas y extensamente estudiados desde el punto de vista químico. Se les atribuye un origen relacionado con zonas de descarga de sistemas hidrotermales activos, en áreas próximas al lugar en que tiene lugar el «derrame» como resultado de la mezcla de las soluciones hidrotermales con las aguas frías y oxigenadas del océano.

Mineralizaciones de sulfuros: Los depósitos hidrotermales de este tipo no fueron considerados importantes hasta el descubrimiento de las mineralizaciones de sulfuros masivos, en el EPR a 21° N y 20° S. Más recientemente, también se describen mineralizaciones de sulfuros en la zona oriental del centro de emisión de las Galápagos. Este descubrimiento es una contribución importante tanto para el entendimiento del proceso metalogénico en sí, como para conocer mejor la química de los océanos. Estos sistemas activos constituyen una fuente de los metales y de los volátiles del manto, tales como el helio, con una relación $^3\text{He}/^4\text{He}$ mayor que la del helio atmosférico, lo cual es un buen indicador de la presencia de «penachos» hidrotermales, que son fuente de hidrógeno y metano.

Mineralizaciones de óxidos de hierro y manganeso: Estas dos fases minerales se encuentran en el mismo depósito y frecuentemente la fase rica en hierro está representada por nontronita (esmectita rica en hierro).

Por su importancia y extensión a escala planetaria, estas mineralizaciones requieren, sin duda, un tratamiento específico. Su composición química, su emplazamiento geológico, cerca de sistemas activos, y el rápido crecimiento, son algunas de las principales características utilizadas hoy día para distinguir entre mineralizaciones hidrotermales e hidrogénicas. En las primeras, el índice de crecimiento del depósito es mucho mayor que en las segundas, debido a una menor concentración de elementos en el agua del mar. En las zonas profundas del océano

no los sistemas hidrotermales se encuentran pobremente oxigenados mientras que en las zonas someras estos sistemas pueden incorporar mucho oxígeno y por ello formar soluciones muy ácidas. Por ello, los sedimentos volcánicos formados cerca de las islas volcánicas difieren mucho de los originados en profundidad. Desde el punto de vista geoquímico, los depósitos hidrotermales presentan unas relaciones $Fe/Ti \sim 20$, $Al/(Al+Fe+Mn) < 0,35$ y $U/Th > 1,0$ y, en algunos casos, mayor de 100. Además, muestran una relativa abundancia en tierras raras. Por ello, estas relaciones son útiles como indicadores genéticos y geomarcadores de exploración, incluso para depósitos de hierro-manganeso metamorfizados.

Nódulos de manganeso: Otro caso específico y peculiar por su extensión planetaria son los nódulos de manganeso. Fueron descubiertos en los fondos oceánicos durante la expedición de Challenger, en 1873-1876, pero no fue hasta después de la segunda guerra mundial, cuando hubo un interés hacia su geología, geoquímica, origen y posible explotación. A pesar de los estudios desarrollados durante los cien años posteriores a su descubrimiento, quedan aún muchos aspectos sin resolver en relación con su origen. Las primeras hipótesis genéticas proponían a la actividad volcánica, como proceso determinante, pero, durante las últimas décadas, se invoca más un origen hidrogénico, hidrotermal, biogénico, o, más frecuentemente, poligénico. Se ha comprobado en algunas áreas activas, como en el EPR entre 21° N y 20° S, que el manganeso puede ser transportado a zonas muy alejadas, desde el centro de emisión hacia las plataformas abisales. Además, probablemente, este flujo tiene lugar en direcciones determinadas por la circulación general del océano.

El manganeso, en forma de pequeñas partículas de hidróxido, es una de las mejores «esponjas» para los elementos traza en el océano (cobalto, cobre, níquel, etc.) y por lo tanto un elemento que podría ser potencial trazador para la exploración de supuestas zonas submarinas similares en Marte. Estos elementos asociados al manganeso tendrían su origen, en gran parte, en el fluido hidrotermal. No se sabe con certeza el número de metales que pueden ser introducidos en el océano por este mecanismo, pero algunos investigadores, sostienen que, para metales como litio y manganeso, esta fuente hidrotermal puede ser incluso más importante que la que aportan los ríos.

Durante el transporte por el océano, el manganeso también absorbe ^{230}Th y otros radio-nucleidos. Cuando el nódulo termina de formarse, o en un hiato (interrupción) en su formación, se expone a la «lluvia» oceánica de ^{230}Th . Esta exposición puede explicar la alta actividad que presenta dicho nódulo en sus últimos milímetros. Cuando se estudian en detalle estos nódulos, se observa una diferencia de actividad entre la parte superior e inferior. Esto se explica por el hecho de que sólo la parte superior ha sido expuesta, después de su formación, a una lluvia de ^{230}Th . En consecuencia, los campos de nódulos de manganeso se habrían formado durante periodos de importante actividad hidrotermal submarina.

4.2.2.1. Chimeneas submarinas

Las denominadas chimeneas negras o «black smokers» son fuentes termales situadas a lo largo de fisuras eruptivas en el centro de las zonas de expansión medio-oceánica, que descargan uno o varios tipos de fluidos hidrotermales cargados con sulfuros a temperaturas cercanas a los 350°C . El color negro de los fluidos se debe a la precipitación de partículas de sulfuros durante la mezcla con el agua del mar, justo en el orificio de emisión. Entre los sulfuros se incluyen calcopirita, pirrotina, pirita, y esfalerita y entre los sulfatos, anhidrita. Por el contrario, las chimeneas blancas o «white smokers», se caracterizan porque los fluidos son usualmente más fríos ($250\text{--}300^\circ\text{C}$), fluyen más lentamente que en las «black smokers» y son generalmente de menor tamaño. El color blanco se debe a la composición de los minerales que se forman cuando el fluido sale de la chimenea y se mezcla con el agua del mar, ya que estos no suelen contener metales. A estas chimeneas relacionadas con actividad hidrotermal hay que unir los otros tipos relacionados con las emisiones «frías» de metano, tales como las de las áreas de Hydrate y Blake Ridge, en las costas de Oregón y Carolina del Norte respectivamente y las de los mares de Noruega, Barents y Okhotsk, o las recientemente descubiertas frente al Golfo de Cádiz a las que nos referiremos como un caso español, importante a escala global.

Pues bien, en estas zonas donde las condiciones son tan extremas, bajo enormes presiones, altas temperaturas, sin luz

y con condiciones anóxicas se ha descubierto todo un mundo vivo. Microorganismos que cubren sus necesidades energéticas fundamentalmente sobre la base de reacciones quimiosintéticas y que, como se ha indicado previamente, constituyen una pieza clave tanto en la determinación del posible origen de la vida en nuestro planeta como en la exploración geológica y astrobiológica de otros cuerpos planetarios, en este caso Marte. El primer extremófilo secuenciado fue el *Methanococcus jannaschii*, un microorganismo de célula simple con extraordinarias características vitales. Vive cerca de las emisiones hidrotermales a 2.600 metros de profundidad bajo el nivel del mar, donde las temperaturas alcanzan el punto de ebullición del agua y la presión es suficiente para destrozar un submarino ordinario. En estas condiciones, *Methanococcus jannaschii* sobrevive en un ambiente de dióxido de carbono, hidrógeno y unas pocas sales minerales. No puede tolerar el oxígeno y cuida de sus necesidades energéticas mediante la producción de metano. Otro ejemplo es el *Pyrodictium*. La quimiosíntesis que lleva a cabo proporciona elementos nutricionales para todo el conjunto del ambiente en el que vive, algo que parece ser típico de todas las bacterias quimiosintéticas. Los tubos de gusanos asociados a estas zonas de emisión submarina (algunos de ellos enormes) proporcionan las estructuras donde viven las bacterias, mientras que éstas les proporcionan su nutrición. Pero probablemente el caso más singular de simbiosis encontrado en estas zonas son los agregados de entre 2 y 3 micrómetros de arqueas y bacterias sulfato-reductoras, encontrados en sedimentos sobre hidratos de gas (Oregón, USA). Los agregados contienen aproximadamente 100 arqueas que están rodeadas por unas 200 bacterias sulfato-reductoras.

Las chimeneas del Golfo de Cádiz

En España, desde hace casi veinte años, venimos estudiando la geología, geoquímica y metalogenia de varias de estas mineralizaciones hidrotermales submarinas, asociadas a distintos marcos geodinámicos y tipos de volcanismo tanto en la península Ibérica como en las Islas Canarias, y la nueva perspectiva de exploración planetaria añade un matiz adicional a nuestros trabajos que sin duda será necesario considerar para

futuras investigaciones. De todos estos estudios, sin duda alguna, el más novedoso y espectacular corresponde al descubrimiento realizado por el Instituto Español de Oceanografía y el Instituto Geológico y Minero de España de los campos de chimeneas del Golfo de Cádiz, en cuya primera caracterización tuve la oportunidad de participar directamente, estudiando su mineralogía y geoquímica y en la que continuamos trabajando (Díaz del Río et al., 2003, Merinero 2005, Merinero et al., 2005, 2006).

El Golfo de Cádiz, situado en el suroeste de la Península Ibérica, es una zona con una geología compleja caracterizada por la presencia del límite entre las placas de Eurasia y África y del límite entre corteza oceánica y continental de los márgenes de África y de la Península Ibérica. A estos hechos hay que añadir la migración hacia el oeste del cinturón orogénico Bético-Rifeño, cuyo extremo más occidental (el arco de Gibraltar) se sitúa al noreste del Golfo de Cádiz.

El límite entre las placas de Eurasia y de África se extiende desde las Azores al Mar Mediterráneo, entre la falla Gloria y el arco de Gibraltar. La actividad sísmica del Golfo de Cádiz se caracteriza por la existencia de terremotos dispersos de profundidad somera a intermedia (Vázquez y Vegas, 2000), por lo que es difícil de establecer la ubicación exacta del límite de placas en esta zona. Diferentes soluciones de plano de falla apoyan la existencia de una amplia zona transpresiva atribuible a la convergencia (2-4 mm/año) oblicua con dirección NO-SE iniciada durante el Mioceno superior (Dewey et al., 1989; Argus et al., 1989).

La mayor parte del fondo marino del Golfo de Cádiz está constituido por corteza continental que se adelgaza hacia el oeste (González-Fernández et al., 2001), encontrándose corteza oceánica en el Banco de Gorringe y las llanuras abisales de Herradura y Seine. Tras la apertura del Atlántico Central, la evolución geodinámica del Golfo de Cádiz está asociada a la convergencia N-S de las placas de África y Eurasia que tiene lugar entre el Oligoceno medio y el Mioceno superior. A partir del Mioceno superior (hace 10 millones de años) cambia la dirección (NO-SE) y disminuye la velocidad de la convergencia, permaneciendo estas características prácticamente invariables hasta la actualidad.

El desplazamiento y posterior colisión del Dominio de Alborán con el norte de África y el sur de Iberia durante el Mioceno inferior a medio, provocó el desarrollo del orógeno Bético-Rifeño, y el desplazamiento radial de grandes masas alóctonas sobre la cuenca del Guadalquivir (antepaís de Iberia), la cuenca de Rharb (antepaís del Norte de África) y el Golfo de Cádiz (Maldonado et al., 1999; Gracia et al., 2003).

El Dominio Oriental de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz (Medialdea et al., 2004), es un lugar donde se producen abundantes emisiones de fluidos ricos en hidrocarburos, especialmente metano, y se han observado distintas estructuras en el fondo marino relacionadas con dichas emisiones (Díaz del Río et al., 2003; Pinheiro et al., 2003; Somoza et al., 2003, Martín-Puertas, 2004) Los principales mecanismos propuestos para explicar estas emisiones ricas en hidrocarburos se basan en factores tectónicos y climáticos/oceanográficos en respuesta a:

1. Convergencia NO-SE entre las placas de África y Eurasia.
2. Avance gravitacional de las unidades alóctonas de evaporitas y arcillas, debido al empuje hacia el oeste del cinturón orogénico Bético-Rifeño.
3. Incremento de la carga sedimentaria en las unidades alóctonas.
4. Desestabilización de hidratos gaseosos por calentamiento debido a la influencia térmica de la corriente marina de salida del Mediterráneo.

Todos estos factores generan una sobrepresión en las unidades plásticas, principalmente las margas del Mioceno inferior-medio, que se resuelve mediante la migración de fluidos y fangos fluidificados a través de fallas y fracturas, con posterior emisión hacia el exterior de los mismos y la posterior formación de estructuras en el fondo marino, principalmente volcanes y diapiros de fango, chimeneas y costras carbonatadas y nódulos de hierro-manganeso. También se observan montículos de carbonatos incluyendo comunidades de corales de agua fría.

Las estructuras observadas en aguas profundas, entre 500 y 1.300 metros, forman auténticas alineaciones de conos y volcanes de fango y estructuras de colapso en forma de cráteres con relieve entre 50 y 300 metros y tamaños entre 0,8 y 2 km. de diámetro. Las principales características morfotectónicas se conocen como la Dorsal Diapírica del Guadalquivir (GDR) y la Dorsal Diapírica de Cádiz (CDR), y son diapiros dispuestos longitudinalmente con orientación NE-SO constituidos por margas plásticas del Mioceno inferior-medio. El campo GDR se caracteriza por la presencia de numerosos volcanes de fango subcirculares y conos de fango aislados. Los volcanes de fango aislados tienen forma de cono con pendientes relativamente suaves de 3° a 6°, formados por varias generaciones de precipitación de brechas de fango con indicaciones de saturación en gases, estructuras de desgasificación y presencia de ácido sulfhídrico. Los conos de fango tienen perfiles asimétricos con pendientes escarpadas de hasta 25° y contienen grandes depósitos superficiales de chimeneas y costras carbonatadas relacionadas con emisión de hidrocarburos.

La Dorsal Diapírica del Guadalquivir puede dividirse en tres áreas, de acuerdo con las estructuras que se encuentran en ella:

1. El área NE caracterizada por la existencia de una serie de amplios volcanes de fango subcirculares (Anastasya, Tarsis y Pipoca) rodeados por una depresión del fondo marino en forma de anillo.
2. Un sector intermedio con largas estructuras redondeadas en forma de cráter de origen incierto.
3. El sector SO, entre 8° O y 7° 40' O, que se caracteriza por una serie de montículos de fango, que limitan con el canal de Cádiz, denominados Ibérico, Cornide y Fila de Hormigas. En este área es donde se han recogido abundantes chimeneas carbonatadas, costras y calcarenitas.

Las chimeneas de carbonatos descubiertas en el Golfo de Cádiz están asociadas con campos de volcanes de fango y diapirismo de evaporitas/arcillas. Las áreas donde las chimeneas carbonatadas han sido encontradas pueden agruparse como sigue (Díaz del Río et al., 2003):

1. *El campo DIASOM*, formado por varios montículos alineados. El montículo ibérico fue el primero en ser descubierto, donde se recogieron hasta 76 muestras de chimeneas a profundidades que oscilan entre los 850 y los 1.100 metros, durante la campaña científica «Anastasya 2000». Este área fue explorada intensamente de nuevo en el año 2001, permitiendo descubrir un gran número de chimeneas carbonatadas en otros montículos (Cornide, Arcos y Coruña), a profundidades que oscilan entre los 1.100 metros y los 920 metros. Este campo se encuentra sobre la Unidad Alóctona del Guadalquivir, y es de donde provienen las muestras estudiadas hasta el momento

2. *El campo TASYO*, un área con múltiples emisiones fluidas, caracterizada por numerosas estructuras de colapso en forma de cráter y volcanes de fango. Se han recogido varias pequeñas chimeneas carbonatadas cilíndricas asociadas con costras carbonatadas a lo largo de los flancos del volcán de fango Hespérides, a profundidades entre 750 y 900 metros. El volcán de fango Hespérides es la mayor estructura del campo TASYO.

3. *El campo de la Cuenca del Guadalquivir (GBF)* relacionado con los diapiros salinos del Triásico, alineados según el frente cabalgante de la Unidad Alóctona del Guadalquivir. En esta área, todavía no estudiada de manera exhaustiva, se encontró una chimenea carbonatada a una profundidad de unos 514 metros.

4. *El campo oriental de Marruecos (EMF)* con vulcanismo de fango (Ivanov et al., 2000; Gardner, 2001) localizado dentro de la zona Diapírica del Triásico de la Unidad Alóctona del Guadalquivir. Aunque este área no ha sido investigada exhaustivamente, se han encontrado chimeneas en forma de seta a profundidades de unos 450 metros.

Las muestras de chimeneas fueron recogidas con una draga rectangular de arrastre, que consiste en un cajón de acero de bordes externos cortantes unido a una red resistente que va arrastrándose por el fondo marino, y que se remolca por el barco desde la popa. La red está protegida en todo su perímetro por un recubrimiento resistente de cuero, que evita desgarres en su arrastre sobre fondos irregulares y punzantes. La draga recoge las muestras que encuentra a su paso por la

superficie dragada. En la campaña del año 2000 se hicieron doce arrastres de los cuales sólo en uno se obtuvieron muestras de chimeneas carbonatadas. En el resto se obtuvieron multitud de muestras de costras carbonatadas, rocas, muestras de fango y gran cantidad de organismos bentónicos y planctónicos. En la campaña de 2001 se realizaron 20 arrastres, de los cuales en cinco se obtuvieron muestras de chimeneas carbonatadas. También se utilizaron testigos de gravedad estándar de tres metros de longitud para obtener muestras del sedimento fangoso que acompañaba a las chimeneas. Con la cámara submarina se obtuvieron un conjunto de fotografías en blanco y negro y en color siguiendo una línea de avance.

Las chimeneas que hemos estudiado están formadas por carbonatos autigénicos, dolomita rica en hierro y ankerita principalmente. La oxidación anaeróbica del metano junto con la reducción de sulfatos produce por un lado la precipitación de carbonatos autigénicos y por otro sulfuro de hidrógeno. Parte de ese sulfuro de hidrógeno queda atrapado en el sedimento, y otra parte reacciona con hierro disponible y queda atrapado en el interior de los carbonatos en forma de microcristales cocoidales que llegan a formar framboides. Es evidente la participación de los microorganismos en estos procesos de oxidación anaeróbica del metano y reducción de sulfatos.

En el caso específico de las mineralizaciones de hierro, la formación de texturas multiframeoidales se produciría tanto por agregación de microcristales en lugares con menor disponibilidad de espacio (porosidad intraclasto), como por particularización de framboides de mayor tamaño, en otros de menor tamaño, en lugares con mayor disponibilidad de espacio (porosidad interclasto). Se han reconocido diferentes texturas frambooidales que se han atribuido a diferentes grados de evolución textural:

- Framboides irregulares, sin morfología bien definida.
- Framboides subesféricos.
- Framboides subeuhedrales, con desarrollo de caras.
- Framboides euhedrales con textura framboidal.
- Framboides euhedrales sin textura framboidal.

Dichas texturas coexisten en las mismas muestras analizadas y se presentan tanto en framboides diseminados en la matriz como formando agrupaciones multiframboidales. Nuestros resultados indican que la evolución mineralógica pudo consistir en la formación de sulfuros de hierro precursores de pirita (mackinawita, greigita) y transformación posterior en pirita.

Más tarde se produciría la oxidación de la pirita, por exposición a condiciones más oxidantes, con formación de diferentes óxidos/hidróxidos de hierro, siendo la goethita la última fase en formarse. En dicha transformación se conserva la morfología de los sulfuros de hierro (pseudomorfismo). No se descarta tampoco la precipitación directa de hidróxidos de hierro para formar framboides.

En cuanto a la composición geoquímica, la evolución mineralógico/textural ha consistido en un enriquecimiento en hierro junto con un empobrecimiento en aluminio, silicio y magnesio. Los framboides se enriquecen durante los procesos de formación, agregación y particularización en determinados elementos traza como arsénico, molibdeno, cobalto y níquel. Durante el proceso de evolución textural y mineralógica dichos elementos son expulsados de la estructura mineral produciéndose un descenso del contenido de los mismos con respecto a texturas iniciales (framboides subesféricos).

La importancia de los posibles procesos hidrotermales en el pasado de Marte, junto con el descubrimiento realizado por la Agencia Espacial Europea, en 2005, de zonas donde aparentemente existe un enriquecimiento en metano, hacen de las chimeneas metanógenas del Golfo de Cádiz un potencial análogo marciano de exploración.

4.2.3. *De la hematites a la jarosita*

Al igual que otras disciplinas científicas abrieron en el pasado sus fronteras y expectativas de progreso más allá de los límites de nuestro planeta, la mineralogía espacial, como parte integrante de la geología planetaria, está consolidándose por sus propios méritos y por su utilidad a otras áreas del conocimiento. El que toda una misión de la NASA a Marte haya

estado guiada por la exploración de un mineral, la hematites, es una prueba palpable de ello.

La hematites es una importante y bien conocida mena de hierro. Su color es acerado o gris plata a negro y también rojo a marrón especialmente en las formas terrosas. Algunas veces presenta tonalidades iridiscentes, especialmente cuando aparece en su forma hidratada, conocida como turgita (normalmente una mezcla de goethita y hematites). Pertenece al sistema trigonal, sus cristales son opacos, tiene una dureza de entre 5 y 6 y una densidad de 5,3 (ligeramente superior a la media de los minerales metálicos). Sus hábitos cristalinos principales incluyen formas tabulares, algunas veces maclados, especulares, botroidales y masivos; también terrosos u oolíticos.

En la Tierra, la hematites se asocia frecuentemente con jaspe, en las famosas y bien conocidas «Banded Iron Formations (BIF)», con rutilo y pirita entre muchos otros minerales. Los yacimientos donde pueden encontrarse ejemplares magníficos de este mineral se encuentran en Inglaterra, México, Brasil, Australia y en la región del Lago Superior. Su génesis se relaciona con diferentes marcos metalogenéticos: depósitos de tipo skarn, procesos hidrotermales, ambientes pegmatíticos neumatolíticos, de origen sedimentario, etc.

Las acumulaciones marcianas de hematites, que cubren un área de aproximadamente 500 kilómetros, fueron descubiertas en 1998, en una zona denominada Sinus Meridiani, gracias al espectrómetro de emisión termal (TES) con el que iba equipado la Mars Global Surveyor. Los resultados espectrales indicaban, además, que se trataba de hematites de grano grueso (de tamaño arena o mayor). La existencia de hematites de grano fino ya había sido detectada previamente en Marte como un producto típico de alteración atmosférica. Pero este nuevo tipo de hematites de grano grueso resultaba mucho más intrigante, ya que suele ser común en ambientes terrestres relacionados con el agua. Los posibles modelos genéticos que se han sugerido para explicar estas masas de hematites son: la precipitación directa a partir de aguas bien oxigenadas ricas en hierro, por procesos de disolución y precipitación relacionados con el lixiviado por aguas subterráneas, o como hemos venido indicando a partir de sistemas hidrotermales. Por tanto, estas

acumulaciones ferruginosas marcianas descubiertas por el TES, cerca de la latitud 0 y entre una longitud de 0 a 5, constituyen una excelente zona de exploración en relación con la posible existencia de agua líquida en el pasado, con las implicaciones metalogenéticas y astrobiológicas que ello conlleva.

El 24 de enero de 2004 la sonda «Opportunity» (Mars Exploration Rover) amartizó en «Terra Meridiani», con el principal objetivo de explorar dicha área marciana, por la posible relación de este mineral con el agua. La sonda Opportunity no sólo tuvo éxito en la ratificación de la existencia de la hematites sino que realizó un descubrimiento asombroso relacionado con otro mineral de hierro, que paradójicamente tiene una relación con España: la jarosita (Klingelhöfer et al., 2004).

4.2.3.1. Jarosita: de su importancia histórica a la exploración en Marte

El reciente hallazgo en Marte, mediante el espectrómetro Mossbauer de la sonda *Opportunity*, del sulfato «jarosita» ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) constituye una prueba geológica y mineralógica extraordinaria relacionada con el agua. Este hallazgo no debe ser minimizado, ya que apoya contundentemente otras evidencias bien conocidas, como las posibles huellas de escorrentía sobre la superficie del planeta rojo, la detección por la Mars Odyssey de grandes cantidades de hidrógeno en el subsuelo o la identificación, realizada por la Mars Express en Enero de 2004, de hielo de agua en el polo sur marciano. Además, es paradójico que esta verificación mineralógica de que el agua estuvo presente en Marte, se deba a un mineral que fue citado por primera vez en España.

La primera referencia en la literatura científica a la jarosita procede del prestigioso mineralogista sajón Johan Friedrich August Breithaupt. Fue descubierta en 1852 en el andaluz barranco de El Jaroso, un paraje situado en Sierra Almagrera (Almería), que es precisamente la «localidad tipo» de este mineral a nivel mundial y una zona en la que hemos trabajado extensamente durante años, tanto en el contexto de programas científicos españoles como internacionales (IUGS/UNESCO, NATO). Como tendremos la oportunidad de comprobar, la historia de la jarosita se remonta mucho más lejos en el espacio y

más atrás en el tiempo y sus nuevas aplicaciones acrecientan su futuro interés científico y tecnológico (Amoros et al., 1981, Lunar y Martínez Frías, 2003, Martínez-Frías et al., 2004).

De visu, la jarosita resulta difícil de identificar ya que se confunde fácilmente con la limonita y la goethita. Tiene un color amarillo-pardo y es un mineral quizá poco considerado por los coleccionistas, porque lo más frecuente es que se presente en masas granulares, pulverulento o terroso, aunque a veces forma pequeños cristales tabulares, pseudocúbicos o romboédricos. Entre sus propiedades, destaca que a diferencia de otros sulfatos es insoluble en agua.

Desde el punto de vista geológico, su génesis está relacionada con procesos de alteración, tanto supergénicos como hidrotermales, de sulfuros y rocas encajantes. Se trata de procesos complejos en los que influyen múltiples variables como la mineralogía primaria, las condiciones de oxidación-reducción, el clima o la tectónica. Su presencia posee además un claro interés minero, como mineral indicador de la posible existencia de mineralizaciones profundas de sulfuros complejos. Realmente, más que referirse a la jarosita como mineral, es más correcto hablar de los «minerales del grupo de la jarosita». Se trata de sulfatos que pertenecen a la serie isomorfa alunita-jarosita y que comprenden desde la natroalunita hasta la plumbojarosita, con la posibilidad de sustituciones acopladas.

Los minerales de esta serie isomorfa también se conocen como *pedra de alumbre* y como *almagra*, ya que de ellos se obtenía esta sustancia cuyo conocimiento y usos en la industria textil se remonta a la antigüedad. Así, por ejemplo, en el Museo de Boston (Massachussets), se encuentra una capa egipcia de ceremonia, de unos 3.000 años, hecha de piel de gacela curtida, muy suave y flexible. Los estudios realizados indican que es muy posible que se aplicara un curtido en el que se utilizó el alumbre combinado con grasa muy semejante al conocido más tarde como curtido *glasé*. Los antiguos egipcios también utilizaban el alumbre con otros propósitos más «refrescantes» e incluso crematísticos. Se ha descubierto que inventaron varios tipos de desodorantes: los más comunes eran los fabricados a partir de trementina e incienso en polvo y los consistentes en una mezcla de alumbre, incienso y mirra, que se aplicaba en diferentes partes del cuerpo. Asimismo, se han

encontrado papiros escritos, enterrados en la arena, en tumbas, en sarcófagos de momias y en ruinas, que contienen multitud de fórmulas para la preparación (o falsificación) de oro, plata, piedras preciosas y materias colorantes. He aquí, por ejemplo, una fórmula para la confección de la plata: «Tómese cobre que haya sido preparado para el uso y sumérgase en vinagre de tintorero y alumbre, dejándolo empaparse durante tres días. Después se funde una mina del cobre, alguna tierra de Chio y sal de Capadocia y hasta seis dracmas de alumbre en escamas. Fundirlo cuidadosamente y resultará excelente...»

Se sabe que el alumbre, junto con la lana, era un recurso de gran importancia en el comercio internacional de la Edad Media. En esta época, el alumbre era el mineral industrial más importante por su valor estratégico. Se utilizaba, fundamentalmente, como mordiente en tintes y estampados, para curtido de pieles y como astringente en medicina. Los yacimientos más importantes se encontraban en Asia Menor, pero debido a la caída de Constantinopla el comercio del alumbre con occidente queda interrumpido por lo que se inició la búsqueda de nuevos depósitos. El hallazgo del yacimiento de Tolfa, en los Estados Pontificios, da lugar a que el Vaticano controle en gran medida el mercado de este mineral y promueva su investigación en otros muchos lugares. Esta circunstancia explica muy bien algunos hechos históricos, como el enorme interés del arzobispo de Toledo, a mediados del siglo xv, en la explotación del alumbre de algunos yacimientos como el de Casacarrillo, en La Rioja (Cooper y Mirete, 2001). La mineralogía del yacimiento consiste en natrojarosita, piritas oxidadas, abundante pirofilita, que se utilizaba como desengrasante, cuarzo y yeso. En 1465 el yacimiento estaba a pleno rendimiento. Se estuvo sacando mineral durante ocho años y, entre otras cosas, sirvió para financiar la construcción en Venecia, cosa que pocos turistas conocen. El dinero que iba a conseguir el ambicioso arzobispo iba a ser utilizado para comenzar la unificación de España, pero disputas internas con el Obispo de Calahorra llevaron a la guerra civil en Castilla. El cerro o cabezo de San Cristobal en Mazarrón es otro importante yacimiento que dio lugar a la primera villa de ese nombre en su falda noreste. En el siglo xv la producción de alumbre en este cerro era de 40.000 quintales (casi 2.000 toneladas) al año. En España sólo se consumían cerca de 10.000 quintales y el resto se exportaba a los Países Bajos y Estados Alemanes. El rey

Enrique IV concedió el privilegio de esta explotación a los Marqueses de Villena y a los de Vélez; Felipe II incorporó a la Corona todos los *veneros y minas de alumbre* en 1565. Los nobles antes citados, para burlar la Real Cédula, llamaron desde ese momento *almagra* a su producto, postergando el de alumbre. La almagra es un residuo que se obtenía en los trullos o grandes depósitos de lejías de alumbre antes de evaporarlas para cristalizarlas. Con ese cambio de nombre los marqueses mantuvieron este pingüe usufructo lo que quedaba de siglo y parte del siguiente. Hasta la Real Hacienda tuvo que comprarles *almagra* para los arsenales y para dar frescura y suavidad al famoso *tabaco colorado* de Sevilla.

Actualmente las nuevas aplicaciones de la jarosita van mucho más lejos, con implicaciones en la exploración de otros planetas, principalmente Marte. Una curiosa aplicación tecnológica de este mineral es la que recientemente están desarrollando científicos del Jet Propulsion Laboratory de la NASA, en Pasadena. Se están haciendo experimentos con globos en las partes más altas de la atmósfera terrestre cuyas características podrían extrapolarse a la superficie de Marte, y el alumbre se ha propuesto como uno de los posibles materiales para el recubrimiento de los globos, ofreciendo a estas sencillas naves, la ligereza y robustez necesarias para la exploración de dicho planeta.

4.2.3.2. Jarosita en Marte

El descubrimiento de jarosita en marzo de 2004 en el afloramiento marciano de «El Capitán», realizado por el robot Opportunity, es actualmente la evidencia científica más importante relativa a la posible presencia de agua líquida en el pasado de Marte.

El Opportunity aterrizó en Meridiani Planum en unas coordenadas 354.4742° E 1.9483° S, aproximadamente a 24 kilómetros al este de su blanco inicial. Aunque Meridiani es un lugar llano, el Opportunity, tras rebotar 26 veces contra la superficie del suelo marciano, rodó hasta caer en un pequeño cráter de unos 20 metros de diámetro. El 28 de enero de 2004, la NASA anunció que el lugar de desembarco se llamaba Challenger en honor a los siete astronautas muertos hace 20 años,

cuando el transbordador explotó poco después del lanzamiento en la misión Challenger (STS-51). La duración de la misión original para Opportunity era de 90 «soles». Muchos miembros de la misión esperaban que pudiera funcionar más tiempo, y el 8 de abril de 2004 la NASA anunció que apoyaba la extensión de la misión hasta septiembre dotando con los fondos y mano de obra necesarios. En julio, los encargados de la misión consideraron la posibilidad de extender la misión incluso más allá de los 250 días.

El cráter donde amartizó el robot tiene 22 metros de diámetro y 3 de profundidad, y los científicos estaban intrigados por el color gris y rojizo de las rocas. El afloramiento que captó la cámara en la primera panorámica emitida era la primera imagen de una «roca fresca» en Marte. Estos depósitos tienen 10 centímetros de alto y los estratos son tal y como se definieron «de grosor menor que un dedo», sólo unos milímetros en algunos casos.

El Opportunity alcanzó El Capitán en el Sol 27, y sacó fotos con su cámara panorámica. El Capitán debe su nombre español a una montaña de Texas, aunque en Marte corresponde a un afloramiento de pequeñas dimensiones, cuyas rocas tienen marcas o huellas (laminaciones, presencia de jarosita), que podrían constituir la prueba de la existencia de agua en el pasado. En el Sol 30, el Opportunity usó por primera vez el taladro denominado RAT («Rock Abrasion Tool»).

En la conferencia de prensa del 2 de marzo, los científicos de la misión expusieron sus conclusiones sobre las evidencias de la presencia de agua líquida durante la formación de las rocas en el lugar de aterrizaje del Opportunity (Squyres et al., 2004). Según el director, Steven Squyres: «el agua líquida fluyó alguna vez por estas rocas; cambió su textura, cambió su química y ahora hemos sido capaces de leer las huellas que dejó». El análisis de los datos recibidos indica que:

1. Las esférulas encontradas podrían tener un origen volcánico, haberse formado por gotas solidificadas tras un impacto meteorítico, o ser concreciones acumuladas en las rocas por contacto con una solución acuosa. El hecho de que dichas esférulas no estén distribuidas de manera estratificada en la roca sino de manera aleatoria parece descartar las dos primeras posibilidades.

2. Existen en la roca minúsculas marcas tubulares. Estas cavidades tienen un centímetro de longitud y 2,5 milímetros de ancho y pocos de profundidad y los geólogos las asocian, en la Tierra, a lugares donde se han formado cristales de sal en rocas sumergidas en agua. Después, bien a través de procesos erosivos, o por su disolución en agua menos salada, los cristales desaparecen, y quedan las pequeñas marcas.
3. La composición de las rocas analizadas muestra una alta concentración en sulfatos. Para Steven Squyres: «en El Capitán se ha encontrado una alta concentración de magnesio, hierro y sales sulfatadas, así como cloruros y bromuros».

Todo esto se une a un descubrimiento mineralógico importante: la jarosita. Los miembros de la misión presentaron los primeros datos, obtenidos mediante el espectrómetro Mossbauer, que revelaron la existencia de este mineral. Este hallazgo ha abierto la puerta a toda una nueva aplicación de la mineralogía hacia el espacio y está suponiendo un espaldarazo a la geología planetaria como herramienta para «entender el contexto». Es fundamental intentar ir más allá de la simple identificación física o química procedente de un equipo analítico para comprender los procesos geológicos que actuaron y su evolución espacio-temporal. Ahora, gracias al descubrimiento de la jarosita, se están explorando otros muchos minerales relacionados con el agua marciana, tales como el yeso, la kieserita o los filosilicatos. Para abordar estas investigaciones, además de los estudios «in situ» o los realizados por los orbitadores, también es necesario buscar e investigar en detalle análogos terrestres, más accesibles, que nos ayuden a entender el conjunto de posibilidades que ofrece la geología y la metalogía en estos ambientes para su posterior extrapolación.

4.2.3.3. Sistema Hidrotermal del Jaroso

Si hubiera que destacar tres procesos en Marte relacionados con la pasada existencia de agua, éstos serían: el hidrotermalismo, las evaporitas y el posible funcionamiento de sistemas hidrogeológicos subterráneos. En la Tierra no es fácil encontrar zonas donde varios procesos geológicos tan

«singulares», con implicaciones en la exploración planetaria, coexistan en el espacio y en el tiempo, y en los que su investigación pueda llevarse a cabo en afloramientos superficiales y en cuevas kársticas. En el SE español existe una zona geológicamente privilegiada donde ello sí es posible: la zona del Jaroso-Sorbas. El buen acceso en superficie a formaciones geológicas de varios orígenes (sedimentarias, volcánicas y metamórficas) y la posibilidad de realizar sondeos, exploraciones y análisis subterráneos mediante espectroscopia *in situ* de los sulfatos hidratados existentes en estas áreas, convierten a los procesos hidrotermales del sistema de mineralización del Jaroso y a las evaporitas y al karst en yeso de Sorbas en un «sistema doble» de gran interés. Este es un proyecto sobre «análogos terrestres» que ya se está abordando en España desde el Centro de Astrobiología en cuyos primeros estudios, en 1998, tuve la oportunidad de participar científicamente y en el que continúo involucrada mediante la comparación de las emisiones y chimeneas fósiles del Jaroso con las recientemente descubiertas en el Golfo de Cádiz y otras actuales a través de *InterRidge*: Programa Internacional para el estudio de los Fondos Oceánicos.

El sistema hidrotermal del Jaroso consiste en procesos ligados al volcanismo calcoalcalino-shoshonítico del Mioceno Superior, de carácter multietadial, que han generado mineralizaciones ricas en sulfatos, óxidos, carbonatos y sulfuros (jarosita, goethita, hematites, yeso, barita, siderita, pirita, galena, etc). A escala más amplia dicho sistema («Jaroso Hidrotermal System») se extiende por todo el borde mediterráneo sur-ibérico, cubriendo desde la zona norte de Almería (Rodalquilar) al sur de Murcia (Águilas-Mazarrón). Este sistema hidrotermal ha sido el responsable de la formación de una red de filones polimetálicos en Sierra Almagrera y de depósitos exhalítico-sedimentarios en el área de Las Herrerías y ha estado en funcionamiento durante el Terciario Superior, entre 5-10 Ma (Martínez-Frías 1998 y 1999, Martínez-Frías et al., 2004).

Algunos rasgos geológicos de estos dos distritos mineros nos pueden proporcionar claves para entender la historia geológica de Marte:

Jaroso: Sierra Almagrera

En Sierra Almagrera los filones están localizados exclusivamente al oeste de la Sierra con una dirección N170 y N150, con buzamientos muy variables (10-90°), casi siempre hacia el Este. Actualmente en superficie sólo existen restos visibles de algunas pequeñas vetas con espesores de 10-30 centímetros, aunque los denominados filones «Jaroso» y «Francés» alcanzaron los 10 metros de potencia y fueron explotados durante más de 40 años (1839-1880). La extensión vertical de los filones supera los 400 metros en muchos casos y presentan la siguiente zonalidad vertical de techo a muro:

1. Zona de alteración supergénica en la parte más superficial del filón (0-50 metros), con óxidos, carbonatos y sulfatos de hierro, cobre, plomo y zinc.
2. Zona de sulfosales-sulfuros (50-300 metros); bournonita, boulangerita, tetrahedrita, galena, esfalerita, calcopirita, pirita, marcasita, barita, siderita y cuarzo (escaso). Texturas: brechas hidrotermales, bandeados colomorfos, e intercrecimientos dendríticos.
3. Zona de sulfuros-sulfosales (300-350 metros); con esfalerita, calcopirita, bournonita, barita y siderita (escasa). Texturas: brechas y pequeños rellenos de fracturas.
4. Zona de sulfuros en la parte más profunda del filón (mayor de 350 metros): principalmente pirita y en menor proporción arsenopirita, barita (muy escasa) y cuarzo. Texturas: brechas y pequeños rellenos de fracturas.

La alteración hidrotermal se encuentra débilmente desarrollada alrededor de los filones y raramente se extiende más allá de unos pocos metros. Los tipos de alteración más frecuentes son silicificación, sericitización y propilitización.

Jaroso: Las Herrerías

Los fluidos hidrotermales también circularon a través de los sedimentos de arenas margosas del área de Las Herrerías, al pie de Sierra Almagrera, cuando ésta constituía una peque-

ña cuenca submarina somera. Esto dio lugar a la formación de una mineralización estratoligada y al desarrollo del depósito de exhalitas más importante de Europa. Aún hoy, es posible encontrar en las propias arenas estructuras de escape de fluidos, chimeneas fósiles, que estuvieron actuando durante los últimos estadios del proceso hidrotermal en el límite Tortoniense superior-Mesiniense (Martínez Frías et al., 1992 y López Gutiérrez et al., 1993).

Las exhalitas son sedimentos hidrotermales ricos en hierro y sílice (\pm manganeso) depositados en el fondo marino. Este término implica un «precipitado químico» sin especificaciones sobre su composición elemental y mineralógica. La asociación espacial existente entre las exhalitas y la mineralización de sulfuros masivos es un hecho bien documentado en muchos yacimientos como los de tipo Kuroko en Japón y se han utilizado como capas guía en la exploración de sulfuros masivos antiguos. Sin embargo, las investigaciones en áreas activas actualmente, como la del Franklin Seamount (con las chimeneas de barita enriquecidas en oro y plata), el EPR a 12° 43'N (con sulfuros de metales de base) o los «seamounts» intraplaca de las islas Society en el Pacífico Sur, indican que existen dificultades para la interpretación debido a la distribución errática de los elementos traza.

Las formaciones de exhalitas más importantes y sobre las que existe mayor documentación son las de Broken Hill (Lottermoser, 1989), y el Cinturón Árabe (Roobol & Hackett, 1987). Las exhalitas del Supergrupo Willyama de Broken Hill (Australia) están caracterizadas por una composición geoquímica y mineralógica inusual, que incluye variedades ricas en hierro, manganeso, bario, calcio y boro, en facies de silicatos, óxidos, carbonatos y sulfuros. Esto, unido al control estratigráfico, bandeo distintivo y continuidad a veces a lo largo de muchos kilómetros, ha permitido su caracterización como sedimentos químicos. Su mineralogía variada, el bandeo a pequeña escala y su interdigitación, sugieren que su composición y tasa de acumulación dependen de la variación de la temperatura, la fugacidad de oxígeno y el pH. En los cinturones sedimentarios del Cinturón Árabe sólo se consideran como exhalitas aquellos precipitados químicos que contienen más de 1 ppm de metales preciosos y/o más de 5.000 ppm de cobre, plomo y cinc.

En Las Herrerías hemos atribuido al término exhalita un sentido puramente genético, implicando a aquellos materiales de origen exhalativo hidrotermal, generados a partir de la precipitación química de una solución acuosa caliente, cargada en elementos tales como hierro, sílice, manganeso, bario (a veces algo de plata) y con una estructura macroscópica laminada. Este término no implica una paragénesis mineral concreta, ni está definido por los contenidos en determinados elementos mayores, menores y traza.

La mineralización de Fe-Ba-Ag de Las Herrerías, es de carácter «estratoligado» y está asociada al nivel de encostramientos ferruginosos, que aparece en la base de la serie sedimentaria del Mioceno, conocida localmente como «lágua». En ella, se diferencian de muro a techo tres tramos siendo en el tramo II donde se emplazan las mineralizaciones. Esta serie progradante se depositó en un ambiente marino somero de tipo «lagoon», con una profundidad de unos 200 metros, y posteriormente fue afectada por el hidrotermalismo.

En el cerro Virtud al sur de la localidad de Las Herrerías, es donde se puede encontrar la secuencia estratigráfica completa. Esta secuencia de muro a techo tiene una zonación vertical que refleja una secuencia deposicional contemporánea con la sedimentación Tortonense. Este proceso de mineralización se produjo a través de fallas extensionales durante los últimos estadios del magmatismo shoshonítico. La secuencia de mineralización es la siguiente:

1. Costras de óxidos e hidróxidos de hierro-manganeso, barita, plata nativa y sulfuros.
2. Lechos masivos de barita.
3. Lechos de exhalitas, constituidos principalmente por laminaciones de jaspe y barita.
4. Filones y chimeneas ricos en calcedonia, yeso y por óxidos e hidróxidos de hierro-manganeso.
5. Sílice amorfa rellenando los orificios de las estructuras fumarólicas.

Bario, hierro, manganeso, plata y en menor medida sulfuros de metales base, formarían parte de soluciones muy con-

centradas, en las cuales la precipitación mineral tendría lugar cerca de las zonas de emisión de los fluidos hidrotermales, después de una estancia relativamente corta de estos elementos en el agua marina. El proceso hidrotermal continuaría incluso después de la sedimentación de las margas messinienses, aunque con una capacidad mineralizadora mucho menor. Justamente, asociadas a estas margas, fue descubierto el único campo de fumarolas fósiles en España hasta el momento (Martínez-Frías et al., 1992); éste se encuentra a 300 metros al NE de la mina de Herrerías. Se trata de más de 30 estructuras fumarólicas que cortan claramente las margas messinienses, con formas cilíndricas y tamaños que superan el metro de longitud (visible) y anchuras que van desde los 5 a 50 centímetros de diámetro. Consisten en tubos concéntricos de margas silicificadas con sulfatos y óxidos metálicos asociados. Se ha supuesto que estas fumarolas representan los últimos estadios del proceso hidrotermal.

La comprensión del peculiar sistema hidrotermal del Jaroso como un potencial análogo de Marte puede ayudar a: 1) determinar las posibles fuentes de distribución de volátiles, especialmente agua, en sistemas marcianos similares (en el pasado); 2) comprender cómo fue su evolución, y 3) establecer las condiciones ambientales extremas que pudieron haber controlado la posible existencia de vida.

Muy recientemente (diciembre de 2005), el espectrómetro OMEGA de la sonda Mars Express ha identificado depósitos de filosilicatos que además de apoyar la idea de la existencia de agua líquida durante la época Noachiana en Marte, refuerzan al modelo del Jaroso como un análogo de gran interés. Como se ha indicado anteriormente, en la zona de Cabo de Gata (límite meridional del sistema hidrotermal del Jaroso) existen grandes masas de filosilicatos con composiciones prácticamente idénticas a las encontradas en Marte (montmorillonita, nontronita, chamosita). En marzo de este año una nueva sonda de la NASA, la Mars Recognition Orbiter (MRO), ha realizado con éxito la maniobra para entrar en la órbita elíptica del planeta rojo. Su principal objetivo será examinar su superficie, capas subterráneas y su atmósfera como exploración inicial para los viajes de naves tripuladas a Marte previstas por EEUU para las próximas décadas.

Tras reconstruir, quizá de manera apresurada, el camino recorrido por la exploración y explotación de los recursos naturales, no podemos dejar de considerar la magnitud del esfuerzo científico, tecnológico y económico desplegado por el hombre en esta aventura y el papel tan relevante que la ciencia que profeso, la Mineralogía, ha jugado. Nos ha permitido conocer las leyes científicas que rigen la génesis de los recursos y cómo explorarlos y extraerlos, nos ha dado herramientas para abordar la conquista de las sucesivas fronteras y nos ha proporcionado conceptos y métodos para tratar de resolver algunas de las preguntas más esenciales que nos hacemos, relacionadas incluso con nuestro propio origen.

Así pues, nos encontramos en un momento crucial en el ámbito de la exploración espacial. El ser humano se encuentra en la frontera científica y tecnológica para iniciar la migración hacia otros mundos. Pero, para ello, será necesario previamente conocer los materiales y los recursos que existen fuera de nuestro planeta. Llegará un día en que todo esto que hoy parece ciencia ficción será realidad, y cuando las generaciones futuras, tal vez ya la próxima, miren hacia atrás, no sean conscientes de que están formando parte de lo que hoy es nuestro sueño científico.

Debo concluir y concluyo como empecé agradeciendo afectuosamente a la Real Academia de Doctores de España su generosidad por acogerme entre sus ilustres miembros.

He dicho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrícola, G. (1546): «De Natura Fossilium». *Geol. Soc. of America Papers* **63**. 1995 (traducido al inglés por M. C. and J. A. Bandy).
- (1556): «De Re Metallica». *Dover Pub. Inc.* New York, 1950, 638 pp. (traducido al inglés por H. C. and L. H. Hoover).
- Alonso Barba, A. (1640): *El arte de los metales: en que se enseña el verdadero beneficio de los de oro y plata por azogue*. En Madrid en la Imprenta del Reino.

- Amorós, J. L.; Lunar, R. and Tavira, P. (1981): «Jarosite: A silver bearing mineral of the gossan of Río Tinto (Huelva) and La Unión (Cartagena)». *Mineralium Deposita*. **16**: 205-213.
- Aarhus, D. F.; Gordon, R. G.; Demets, C., Stein, S. (1989): «Closure of the Africa-Eurasia-North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault». *Journal of Geophysical Research* **94**, 5585-5602.
- Barney, G. O. (1982): *El mundo en el año 2000. En los albores del siglo XXI*. Informe técnico preparado por el Consejo sobre Calidad Ambiental y el Departamento de Estado de EE.UU. (Director del estudio). Edición en español. Edit. Tecnos, S. A. Madrid.
- Bischoff, J. L. and Piper, D. Z. (1979): «*Marine geology and oceanography of the Pacific manganese nodule provinces*». *Plenum*. New York, 839 p.
- Bonatti, E. (1983): «Hydrothermal metal deposits from the oceanic rifts: A classification». En: Rona, P. A.; Boström, K; Laubier, L. & Smith, K. L. *Hidrotermal procesos al seafloor spreading centres*. *Plenum Press*. 796 p.
- Calderon Arana, S. (1910): *Los minerales de España*. Junta Ampliación de estudios e Invest. Cientif. 2 volúmenes. Madrid, 561 p.
- Christensen, P. R.; J. L. Bandfield; R. N. Clark; K. S. Edgett; V. E. Hamilton; T. Hoefen; H. H. Kieffer; R. O. Kuzmin; M. D. Lane; M. C. Malin; R. V. Morris; J. C. Pearl; R. Pearson; T. L. Roush; S. W. Ruff, and M. D. Smith: «Detection of crystalline hematite mineralization on Mars by the Thermal Emission Spectrometer: Evidence for near-surface water», *J. Geophys. Res.*, **105**, 9623-9642, 2000.
- Clark, A. M. (1993): *Hey's Mineral Index*. 3rd. Ed. Chapman and Hall. London. 852 pp.
- Cooper, E., Mirete, S. (2001): *La mitra y la roca: intereses de Alfonso Carrillo, Arzobispo de Toledo, en la Ribera del Ebro*. Diputación Provincial de Toledo. 179 p.
- Dana, J. D. (1837-1892): *System of Mineralogy of Dana*. 6^a edition. John Wiley and Sons. New York (ampliada por E. S. Dana con suplementos en los años 1899, 1909 y 1915).
- Dewey, J. F.; Helman, M. L.; Turco, E.; Hutton, D. H. W.; Knott, S. D. (1989): Kinematics of the western Mediterranean. En: Coward,

- M. P.; Dietrich, D., Park, R. G. (Ed), *Alpine Tectonics. Geological Society of London, Special Publications*, pp 265-283.
- Díaz del Río, V.; Somoza, L.; Martínez Frías, J.; Hernández Molina, F. J.; Lunar, R.; Ortega, L.; Maestro, A.; Fernández Puga, M.; Llave, E.; Medialdea, T.; García A. & Vázquez, J. (2003): «Vast field of hydrocarbon-derived chimneys related to the accretionary wedge/olistrome of the Gulf of Cádiz». *Marine Geology*. **195**: 177-200.
- Fernández Abellán, J. L. (2005): *Estudio del establecimiento de una base semipermanente en la luna: condiciones y viabilidad de la explotación de sus recursos naturales*. Proyecto fin de carrera. ETSIM. Madrid.
- Gardner, J. M. (2001): «Mud volcanoes revealed and sampled on the western Moroccan continental margin». *Geophysical Research Letters* **28**: 334-342.
- González-Fernández, A.; Córdoba, D.; Matías, L. M.; Torne, M. (2001): «Seismic crustal structure in the Gulf of Cádiz (SW Iberian Peninsula)». *Marine Geophysical Researches* **22**: 207-233.
- González Sanz, F. J. (2004): *Los nódulos de hierro-manganeso del Golfo de Cádiz*. Trabajo de Investigación. Diploma de Estudios Avanzados. Facultad de Geología. Universidad Complutense de Madrid, 76 p.
- Grácia, E.; Dañobeitia, J.; Verges, J., Bartolomé, R. (2003): «Crustal architecture and tectonic evolution of the Gulf of Cádiz (SW Iberian margin) at the convergence of the Eurasian and African plates». *Tectonics* **22** (4): 1033(doi:10. 1029/2001TC901045).
- Harman, W. K; Miller, R. y Lee, P. (1987): *De la cuna al espacio. La exploración de las fronteras extraterrestres*. Edit. Planeta. Barcelona. ISBN: 84-320-4398-2.
- Ivanov, M. K.; Kenyon, N.; Nielsen, T.; Wheeler, A.; Monteiro, J.; Gardner, J.; Comas, M.; Akhmanov, G., Akhmetzhanov, A. (2000): *Goals and principle results of the TTR-9 cruise Final Procedure international Conference Geological Processes on European Continental Margins*. Granada. Spain. Unesco IOC Workshop Report 168.
- Kalogeropoulos, S. I. and Scott, S. (1983): «Minerology and geochemistry of tuffaceous exhalites (tetsusekiei) of the Fuzazawa mine, Hokuroku district, Japan». *Economic Geology Monograph*, **5**: 412-432.

- Klingelhöfer, G.; Morris, R. V.; Bernhardt, B.; Schröder, C.; Rodionov, D. S. Jr.; de Souza, P. A.; Yen, A.; Gellert, R.; Evlanov, E. N.; Zubkov, B.; Foh, J.; Bonnes, U.; Kankeleit, E.; Gütlich, P.; Ming, D. W.; Renz, F.; Wdowiak, T.; Squyres, S. W.; Arvidson, R. E. (2004): *Jarosite and Hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mössbauer Spectrometer Science*, Vol. 306, Issue 5702, 1740-1745.
- Lewis, J.; Matthews, M. S. and Guerrieri, M. L. Editors (1993): *Resources of Near-Earth Space*. The University of Arizona Press. 977 p.
- Lindgren, W. (1933): *Mineral Deposits*. 4th ed. New York: McGraw Hill. 930 p.
- López Gutiérrez, J.; Martínez-Frías, J.; Lunar, R. & López García, J. A. (1993): «El Rombohorst mineralizado de Las Herrerías: Un caso de "Doming" e hidrotermalismo submarino mioceno en el SE Ibérico». *Estudios Geológicos*, **49** (1-2), 13-19.
- Lottermoser, B. G. (1989): «Rare earth elements study of exhalites associated with Broken Hill sulfide deposit, Australia». *Mineralium Deposita*, **24**: 92-99.
- Lunar, R. y Martínez-Frías, J. (2003): «La Jarosita». *Historia Natural*, **2**: 34-36.
- Lyell, Ch. (1847): «Elementos de Geología». Edición española de *Principios de Geología*; editado en Londres. Traducido por Joaquín Ezquerro del Bayo y editado en la Imprenta de don Antonio Yenes de Madrid. Edición facsímil de la Sociedad Geológica de España de 1998.
- Maldonado, A.; Somoza, L., Pallares, L. (1999): «The Betic orogen and the Iberian-African boundary in the Gulf of Cadiz: geological evolution (central North Atlantic)». *Marine Geology* **155**: 9-43.
- Martín-Puertas, C. (2004): *Caracterización mineralógica de estructuras ligadas a escapes de metano en el Golfo de Cádiz*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz. 169 p.
- Martínez-Frías, J. (1991): «Sulphide and sulphosalt mineralogy and paragenesis from Sierra Almagrera (Betic Cordillera)». *Estudios Geológicos*, **47** (5-6), 271-279.
- (1998): «An Ancient Ba-Sb-Ag-Fe-Hg-bearing hydrothermal system in SE Spain». *Episodes*, **21-4**, 248-252.

- (1999): «Mining vs. Geological Heritage: The Cuevas del Almanzora Natural Area (SE Spain)», *AMBIO*, **28**, **2**: 204-207.
- Martínez-Frías, J.; García Guinea, J.; López Ruiz, J. & Reynolds, G. A. (1992): «Discovery of fossil fumaroles in Spain». *Economic Geology*, **87**, 444-447.
- Martínez-Frías, J.; Lunar, R.; Rodríguez-Losada, J. A. and Delgado, A. (2004): «The volcanism-related multistage hydrothermal system of El Jaroso (SE Spain): Implications for the exploration of Mars Earth», *Planets and Space*, **56**: 5-8.
- McKay D. S.; Gibson E. K.; Thomas-Keprta, K. L.; Vali, H.; Romanek, C. S.; Clemett, S. J.; Chilliier, X. D. F.; Maechling, C. R. and Zare, R. N. (1996): «Search for life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001». *Science*, **273**, 924-930.
- Medialdea, T.; Vegas, R.; Somoza, L.; Vázquez, J. T.; Maldonado, A.; Díaz del Río, V.; Maestro, A.; Córdoba, D., Fernández Puga, M. C. (2004): «Exstructure and evolution of the "oligostrome" complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): evidence from two long seismic cross-sections». *Marine Geology*, **209**, pp. 173-198.
- Merinero (2005): *Procesos de biomineralización multiframboidal en chimeneas submarinas metanógenas del Golfo de Cádiz*. Trabajo Investigación Diploma Estudios Avanzados. Facultad de Geología. Universidad Complutense de Madrid. 71 p.
- Merinero, R.; Lunar, R.; Martínez-Frías, J.; Somoza, L., Díaz del Río, V. (2005): *Bacteria-related framboids in submarine, methane-derived carbonate chimneys (Gulf of Cádiz, SW Iberian Peninsula)*. Heilderberg. Congreso EMU.
- (2005): «Biomíneralizaciones multiframboidales en chimeneas submarinas metanógenas (Golfo de Cádiz)». *Macla*, **3**: 135-139.
- (2006): «Iron-rich coccoidal microcrystals and framboids in submarine, methane-derived carbonate chimneys (Gulf of Cádiz, SW Iberian Peninsula): mineralogy, textures and astrobiological relevance». *European Geosciences Union*. Viena (Austria).
- Mero, J. L. (1965): *The mineral resources of the sea*. Elsevier, Amsterdam, 312 p.
- Niggli, P. (1929): *Ore Deposits of magmatic Origin*. Transl. By H. C. Boydell London: Thomas Murby.

- Nickel, E. H. (1995): «Definition of a mineral». *Bol. Soc. Esp. Min.*, **18**: 207-212.
- Pinheiro, L.; Ivanov, M. K.; Sautkin, A.; Akhmanov, G.; Magalhaes, V.; Volkonskaya, A.; Monteiro, J.; Somoza, L.; Gardner, J.; Hamouni, N.; Cunha, M. R. (2003): «Mud volcanism in the Gulf of Cadiz: results from the TTR-10 cruise». *Marine Geology*, **195**: 131-151.
- Prieto, C. (1968): «La minería en el Nuevo Mundo». *Revista de Occidente*, Madrid, 194 p.
- Rosenbauer, R. J. and Bischoff, J. L. (1983): «Uptake and transport of heavy metals by heated seawater: a summary of the experimental results». En: Rona, P. A.; Boström, K.; Laubier, L. & Smith, K. L., *Hidrotermal procesos al seafloor spreading centres*. Plenum Press. 796 p.
- Roobol, M. J., Hackett, D. (1987): «Paleovolcanic facies and exhalite geochemistry: Guides for selecting exploration areas in volcano-sedimentary complexes». *Economic Geology*, **82** (3): 691-705.
- Routhier, P. (1963): *Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherché*. Masson. Paris. 2 vol. 1282 p.
- Schneiderhöhn, H. (1941): *Lehrbuch der Erzlagerstättenkunde*. Jena: Gustav Fischer.
- Serna, J.: *Exhalitas de Las Herrerías (Almería) y Montejicar (Granada): Caracterización mineralógica y geoquímica e implicaciones metalogenéticas*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Geológicas. Universidad Compluense de Madrid.
- Somoza, L.; Díaz del Río, V.; León, R.; Ivanov, M. K.; Fernández Puga, M. C.; Lobato, A.; Maestro, A.; Hernández Molina, F. J.; Gardner, J.; Rodero, J.; Pinheiro, L.; Vázquez, J. T.; Medialdea, T.; Fernández Salas, L. M. (2003): «Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cádiz mud-volcano area: Acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data». *Marine Geology*, **195**: 153-176.
- Squyres, S. W.; Grotzinger, J. P.; Arvidson, R. E.; Bell III, J. F.; Calvin, W.; Christensen, P. R.; Clark, B. C.; Crisp, J. A.; Farrand, W. H.; Herkenhoff, K. E.; Johnson, J. R.; Klingelhöfer, G.; Knoll, A. H.; McLennan, S. M.; McSween, H. Y.; Morris, R. V.; Rice, Jr. J. W.; Rieder, R., Soderblom, L. A. (2004): «In situ evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum», *Mars, Science*, **306** (n.º 5702), 1709-1714.

- Vázquez, J. T., Vegas, R. (2000): «Estilos diferentes de deformación en el límite de placas entre África y Eurasia, desde el Arco de la Herradura al Mar de Alborán». 2.^a *Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Deofísica* SO3-19: 147-148.
- Virgili, C. (2003): *El fin de los mitos geológicos Lyell*. Edit Nivola. Colección Científicos para la Historia.
- Von Damm, K. L. (1990): «Seafloor hydrothermal activity: Black smoker chemistry and chimneys». En: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (Ed. G. W. Wetherill) **18**: 173-204.

OTRAS REFERENCIAS

- Jimmy Carter (1977): *The President's Environmental Program*. Washington: Government Printing Office, mayo de 1977, pág. M-11.
- IGME-CSIC (1992): *Minería iberoamericana. Repertorio bibliográfico y biográfico (1492-1892)*. 5 volúmenes.
- Naciones Unidas (2000): *Los objetivos de desarrollo del milenio y el papel de las Naciones Unidas*.
- <http://tierra.rediris.es/jarosite/>

**CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. DOCTOR D. AMANDO GARRIDO
PERTIERRA**

Excmo. Señor Presidente,

Excmas. Señoras y Señores Académicos,

Señoras y Señores:

La pertenencia a esta Real Academia me depara hoy la importante y grata tarea de recibir, en nombre de la misma, como nueva Académica a la Doctora Rosario Lunar Hernández, proclamar y exhibir los méritos que la han hecho acreedora de este honor y glosar su discurso de ingreso. Muchas gracias Señoras y Señores Académicos por la confianza que en mí habéis depositado para esta noble y satisfactoria misión.

Dice Tirso de Molina: *«Ciertamente más fineza se debe a una voluntad que, creciendo con la edad, se ha vuelto naturaleza»*. Pues bien, gracias a una férrea voluntad, la Doctora Lunar ha llegado a ser una personalidad en Ciencias Geológicas, concretamente en el campo de los yacimientos minerales. Personalidad granada en los entresijos de nuestra reciente evolución científica, madurada en la moderna Geología, fiel a los principios de excelencia y calidad y siempre dispuesta a compartir sus conocimientos con las genuinas cualidades de sencillez y amabilidad.

El 22 de junio del 2005 aparecieron publicados en el Boletín Oficial del Estado los Estatutos de esta Real Academia. Este hecho viene, oficialmente, a consolidar una posición estable de la misma y a reconocerla como una entidad cultural, científica y técnica al servicio de la sociedad española. Sin embargo, desde hace cerca de un siglo, la Academia ha venido siendo el lugar de reunión y trabajo donde se ha realizado la imprescindible interrelación científica, técnica y humanista. En este período de tiempo la historia de la cultura española y la historia de la Academia han sido mudables y reversibles.

Los objetivos, las actividades, las tendencias del saber y los progresos científico, técnico y artístico han formado una tupida red conexionando todos los campos del conocimiento. Un siglo, sobre todo en la segunda mitad, en el que han sido creadas varias Universidades y Centros de Investigación, han proliferado las especialidades y han aumentado, en cantidad y en calidad, la producción de tesis doctorales. Todo ello, al lado de la aparición de un nuevo sistema social que cultiva y gobierna el ejercicio de la Cultura, ha redundado en beneficio de nuestra Academia. La integración de las grandes áreas de especialización ha sido necesaria para completar el mosaico del conocimiento y facilitar el trasvase de ideas. Considero que la manera más efectiva de conservar la debida e irremplazable tradición académica es incorporar continuamente las corrientes culturales que dejan huella. Tradición y modernidad han de armonizarse en el camino hacia las metas propuestas, cuyo logro, como misión colectiva de esta Real Academia, se verá mejor cumplido con la incorporación de la Doctora Lunar. Y engarzada a su razón de ser, celebramos, con la brillantez que se merece, en este solemne acto su toma de posesión como Académica de Número adscrita a la Sección de Ciencias Experimentales con la medalla número 105.

Realizar el semblante de una persona amiga tiene sus riesgos: Por una parte, se debe diseccionar y analizar imparcialmente su obra, y por otra, se debe exponer de forma que resulte interesante a este docto auditorio. Nada me gustaría más que lograr ambos propósitos con estas palabras de contestación y bienvenida, en la forma y en la tradición, y con un entrañable afecto en el sentimiento personal.

Uno de los factores que más han influido en la vida y obra de la Doctora Lunar ha sido el entorno, comenzando por el familiar. El matrimonio Lunar Hernández, sus padres, se preocupó de organizar en su casa una educación especial para sus hijos; una educación que trató de desarrollar el entendimiento de forma que el saber fuese agradable y deseable. Un tipo de educación lejano de la memorización indiscriminada de datos y detalles repetidos al pie de la letra. Como escribió Montaigne: *«saber de coro no es saber, es conservar lo que se confía a la custodia de la memoria»*. Aparte de su interés por la enseñanza, tenían preocupaciones sociales que supieron inculcar a sus nueve hijos y que ha sido una constante en la vida de

nuestra recipiendaria. Sus hermanos le ayudaron en la elección de la carrera universitaria que, una vez iniciada, percibió iba ser su profesión. Este grato entorno aumentó y magnificó, aún más si cabe, cuando tuvo la suerte de casarse con Fernando en el que ha encontrado, en la vida y en el trabajo, un apoyo inestimable. Matrimonio con dos extraordinarios hijos, Fernando y Elena, Ingeniero Industrial y Licenciada en Farmacia, respectivamente.

El otro entorno importante lo encontró la Doctora Lunar en el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad Complutense de Madrid al que se incorporó como Becaria de Formación de Personal Investigador y la Empresa Nacional Adaro de investigaciones mineras, una vez finalizada la Licenciatura en Ciencias Geológicas con Premio Extraordinario, en 1973. Nace pues a la investigación científica en una época en que ser mujer significaba una barrera difícilmente franqueable en algunas profesiones y cuando se manifiesta el despegue socioeconómico de la ciencia española y, con ello, la posibilidad de desarrollo de disciplinas como los yacimientos minerales y la mineralogía. En 1976 se doctora con la máxima calificación en Geología económica con la tesis «Mineralogénesis de los yacimientos de hierro del noroeste de la península» y ese mismo año es nombrada Profesor Adjunto Contratado hasta 1979, año en que gana la oposición de Profesor Adjunto. En 1988 obtiene la Cátedra de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad Complutense de Madrid.

Las actividades profesionales de la Doctora Lunar han estado siempre vinculadas a la Enseñanza Superior, y en concreto a la Universidad Complutense: Ha sido investigadora principal de veintisiete proyectos de investigación competitivos, diez de ellos internacionales. Ha colaborado mediante contrato, con empresas privadas y organismos públicos. Ha publicado más de sesenta artículos en revistas extranjeras del SCI, más de medio centenar en revistas españolas de la especialidad y otras en revistas de divulgación científica. Es autora o coautora de cinco libros y de más de una veintena de capítulos de libros de la especialidad.

La actividad investigadora de la Doctora Lunar se vierte, también, en la dirección, a sus colaboradores y discípulos, de trabajos de investigación. Así, ha sido directora de dieciséis

Tesis Doctorales y de diecinueve tesis de Licenciatura, todas acreditadas con la máxima calificación. Ha participado en numerosos Congresos Nacionales e Internacionales perteneciendo, en muchos de ellos, a su Comité Organizador. De los numerosos cargos de gestión que ha llevado a cabo la Doctora Lunar, subrayamos que ha sido Secretaria de la Facultad de Ciencias Geológicas, Directora del Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Directora del Curso de Especialista Universitario: «Geología y Exploración de Yacimientos Minerales» y Presidenta de la Comisión de Evaluación de Ciencias Experimentales de la Agencia de Calidad, Acreditación y Prospectiva de las Universidades de Madrid, entre otros. Entre las múltiples conmemoraciones que tuvieron lugar en 1992, la Doctora Lunar presidió los Actos Conmemorativos del Bicentenario del Seminario de Minería en México. Actualmente es la coordinadora española del Programa Internacional InterRidge. Pertenecer a varias asociaciones científicas entre las que destacamos que es Miembro fundador y Secretaria de la Asociación Española de Geología Aplicada a los Yacimientos minerales, Miembro y Vocal de la Sociedad Española de Mineralogía, de la *International Association on the Genesis of Ore Deposits*, de la *Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, de la *Mining and Metallurgy*, de la *International Mineralogical Association*, de la *European Mineralogical Union*, etc.

La Doctora Lunar ha dedicado su vida profesional y su obra, dentro del Área de Cristalografía y Mineralogía, a los yacimientos minerales. Probablemente estas áreas de conocimiento no son suficientemente conocidas ni valoradas, en general, por la sociedad, y, en particular, por los científicos. Ello quizá sea debido a que otras disciplinas relacionadas con dicha Área, como la Biología, sea más cercana por su propia naturaleza. Los procesos esenciales de la vida están intrínsecamente unidos a la naturaleza de los organismos y su estudio conlleva el interés de intentar definir la vida en términos físico-químicos y proporcionar remedios para mantener o recuperar la salud. Sin embargo, no podemos olvidar que la vida (microbiana) surgió hace unos 3.500 millones de años a partir de un concentrado de moléculas orgánicas en la Biosfera; que los organismos viven y procuran adaptarse al entorno cambiante que les rodea y que la evolución no es más que un mecanismo de optimización que genera organismos más adaptados al medio. El gran geólogo C. Lyell en su obra «*Principles*

of Geology», publicado en 1830, definía la Geología «como la Ciencia que investiga los sucesivos cambios que han tenido lugar en los reinos orgánico e inorgánico de la naturaleza; investiga la causa de estos cambios y la influencia que han ejercido en modificar la superficie y estructura externa de nuestro planeta». El éxito de este libro fue enorme; de la primera edición se vendieron 4.500 ejemplares, 700 más de las que se vendieron en su momento de «El origen de las especies». Precisamente, C. Darwin dedicó a Lyell la segunda edición de esta obra, con estas palabras: «Con hondo reconocimiento se dedica esta segunda edición en homenaje a la parte principal que, en orden al posible mérito de este Diario y demás obras del autor, se debe al estudio de sus conocidísimos y admirables *Principles of Geology*». Se podían examinar y discutir los méritos respectivos de Darwin y Lyell y razonar sobre qué disciplina es más básica, la Biología evolutiva o la Geología. Lo que es cierto es que ambos investigadores fueron gigantes de la Ciencia de la naturaleza y que la dirigieron hacia senderos originales y fecundos.

Pero si la vida surgió de la materia inanimada, la materia viva no ha perdido su capacidad de producir materia inorgánica y así, mediante el proceso de biomineralización, se obtienen compuestos minerales o polímeros de moléculas orgánicas. Y esto ocurre desde los microorganismos a los animales vertebrados. Dos ejemplos que ilustran este proceso es la producción de nácar por los moluscos y la de la cáscara de huevo (carbonato cálcico) por las aves. El mecanismo de mineralización es extraordinariamente complejo y comprende varios procesos como la nucleación mineral en el seno de la matriz y su regulación molecular, la presencia de iones microencapsulados, de polielectrolitos, de proteínas ligantes del calcio y de enzimas que catalizan la formación de iones. El sistema de biomineralización, en general, comprende la matriz orgánica, las proteínas «interactivas» y un sistema transportador de iones para el crecimiento de la fase mineral. La matriz orgánica constituye el basamento, espacial y temporalmente definido, capaz de ser mineralizado. Así, en el hueso, las regiones de mineralización son discontinuas y limitantes del crecimiento primario de los cristales, mientras en el nácar y el enamel de los dientes, la matriz orgánica constituye los límites de los compartimientos dentro de los que la fase mineral es continua y forma acreciones de agregados de cristales.

El conocer si hay o ha habido agua en los planetas es un posible indicio de la existencia de vida. La presencia de agua en el pasado de Marte se ha visto confirmada a través de distintas evidencias. Una de ellas es la que encontró un equipo de científicos de la Universidad de Chicago. Analizaron seis meteoritos mediante calentamiento gradual en cámara de vacío y encontraron pequeñas cantidades de agua atrapadas en el interior de las rocas. La proporción de isótopos de oxígeno era distinta a la que se encuentra en los silicatos de los meteoritos, por lo que muy bien podían provenir de antiguas masas de agua. El hallazgo de minerales en la superficie marciana, cuya génesis exige la presencia de agua, como es el caso de la jarosita, según nos acaba de exponer la Doctora Lunar, confirma esta hipótesis. Según los científicos de la NASA, hace más de 3.500 millones de años había agua en la superficie de Marte, que fue desapareciendo sin que todavía se conozca la causa.

Que exista agua en la Luna parece algo increíble. A mediados de los años sesenta, durante la preparación del programa Apolo, las preguntas sobre la presencia de agua en la Luna no tenían una alta prioridad para los investigadores. Los geólogos y astrónomos estaban divididos en ese momento respecto si la superficie lunar era el resultado de fuerzas volcánicas o de fuerzas cósmicas exteriores. Grove Carl Gilbert propuso una respuesta en 1893. Este famoso geólogo sugirió que grandes objetos asteroidales impactaron contra la Luna, formando sus cráteres. Ralph Baldwin articuló la misma idea en 1949, y Gene Shoemaker recordó nuevamente esa hipótesis alrededor de 1960. Shoemaker, casi solo entre sus geólogos contemporáneos, consideró a la Luna como un importante objetivo en la Geología de campo. Sugirió la formación de los cráteres de la Luna como lógicos lugares de impactos que no se formaron gradualmente durante eones, sino explosivamente en segundos.

Los vuelos del Apolo confirmaron que el proceso geológico dominante en la Luna es el de los impactos. De hecho hoy sabemos que los impactos meteoríticos constituyen el proceso geológico más extendido en todo el sistema solar. Ese descubrimiento, a su vez, introdujo una nueva pregunta: ya que probablemente el agua de la Tierra fue depositada en gran medida por cometas y asteroides, ¿podría este proceso haberse repetido en la Luna?, y ¿podría encontrarse algo de esa agua allí todavía?

En 1994, la nave espacial Clementine de la NASA orbitó la Luna y trazó un mapa de su superficie. En un experimento, la Clementine emitió señales de radio en los umbrosos cráteres cerca del polo sur. Las señales de regreso, recibidas por antenas en la Tierra, parecían venir de material helado. Eso tiene sentido. Si hay agua en la Luna, probablemente esté escondida en las sombras permanentes de cráteres profundos, fríos; helada y sólida, y a resguardo de su vaporización por la luz del Sol.

Hasta aquí todo parecía enlazar bien, pero los datos de la Clementine no eran concluyentes, y cuando los astrónomos intentaron encontrar el hielo en los mismos cráteres usando el radar gigante de Arecibo en Puerto Rico, no lo consiguieron. Quizá Clementine, de alguna forma, se había equivocado. En 1998, la NASA envió otra nave espacial, la Lunar Prospector, a comprobarlo. Utilizando un espectrómetro de neutrones, Lunar Prospector exploró la superficie de la Luna en busca de minerales ricos en hidrógeno. Nuevamente los cráteres polares emitieron una señal intrigante, las proporciones de neutrones indicaban la presencia de hidrógeno. ¿Podría provenir el «hidrógeno» del H_2O ? Muchos investigadores así lo creen.

La importancia de estas supuestas reservas de hielo lunar es fundamental para garantizar la supervivencia de los habitantes de futuras bases permanentes o semipermanentes. El hielo puede aprovecharse para el suministro de agua y también, utilizando la energía de la luz solar, para obtener hidrógeno y oxígeno por electrolisis; el hidrógeno sería utilizado como combustible y el oxígeno para respirar. El hecho de poder fabricar combustible en otros planetas tiene otra ventaja añadida. La dificultad de las misiones espaciales radica, casi en su totalidad, en escapar del campo gravitatorio terrestre. Si la misión no despega desde la Tierra, los vehículos espaciales realizarían viajes interplanetarios con relativa facilidad y la tripulación podría llevar a cabo estudios y prospecciones detallados en los suelos y subsuelos de los planetas. Estos estudios serían de capital importancia para descubrir las reservas minerales y su posible explotación, como admirablemente nos ha expuesto la Doctora Lunar en el magnífico discurso que acabamos de escuchar, titulado «*Creciendo hacia el espacio próximo a la tierra*».

El salto científico de la Doctora Lunar, de la Tierra al espacio, era inevitable después de haber abordado la investigación en la Tierra sobre aspectos relacionados con yacimientos hidrotermales, mineralizaciones del manto terrestre y productos de alteración de minerales. Este salto ha sido coherente, cuando la propia sociedad se ha abierto a nuevos desafíos científicos y tecnológicos en el ámbito de la exploración actual.

Siendo muy escasos los grupos que en España abordan estos temas, la Doctora Lunar ha sido pionera, extrapolando sus conocimientos y experiencias hacia otros cuerpos planetarios:

- Estableciendo que el comportamiento geoquímico de determinados elementos, como níquel, cromo o elementos del grupo del platino, ayudan a entender los procesos del manto terrestre.
- A través de sus estudios sobre análogos terrestres enfocados a la exploración de Marte, como son los que se refieren a hidrotermalismo y chimeneas submarinas y a exhalitas, que además de remontarnos a los ambientes extremófilos donde podría aparecer vida en la Tierra primitiva, también están sirviendo como guías de exploración del pasado de Marte.
- Dando nuevos enfoques a sus trabajos sobre hematites y otros compuestos de hierro, que tienen ahora una nueva aplicación en la exploración de Marte.
- Planteando temas de Tesis Doctorales sobre esta disciplina, como las que se están desarrollando actualmente sobre «Chimeneas y nódulos de hierro-manganeso en el Golfo de Cádiz» o la realizada sobre mineralogía de meteoritos condriticos, primera tesis doctoral en España que aborda en profundidad la química y propiedades estructurales de los cóndrulos y que entre otras publicaciones internacionales dio lugar a la actualización del catálogo de meteoritos del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.
- Organizando eventos científicos, como el primer Seminario sobre mineralogía espacial y astromineralogía.

- Impartiendo en el doctorado con mención de calidad de su Facultad una de las pocas asignaturas que existen sobre este tema a escala europea.
- Manteniendo una estrecha relación científica con el Laboratorio de Geología Planetaria del Centro de Astrobiología y con la Unidad Asociada de Espectroscopía IR y Raman en Cosmogeoquímica y Astrobiología.

En definitiva, una capacidad de adaptación científica que define su dinamismo y el haber sabido evolucionar, con el esfuerzo que ello implica, de actualización del conocimiento y de integración con otras líneas científicas, algo que verifica que en ciencia los límites los ponemos nosotros, porque para la resolución de un determinado problema recurrimos a la interdisciplinariedad. Y esto ya está ocurriendo y explica cómo trabajos sobre la mineralogénesis están siendo decisivos para explicar el origen de la vida en la tierra y fuera de ella.

El discurso de entrada de la Doctora Lunar ha sido un acierto pleno, tanto en su elección como en su contenido. Ha traído a colación un tema apasionante y con su maestría lo ha hecho comprensible, despertando en nosotros el interés, en primer lugar, de cómo detectar los recursos de los cuerpos planetarios próximos a la Tierra y, en segundo lugar, de cómo obtener provecho de ellos.

Excmo. Señor Presidente,

Excmas. Señoras y Señores Académicos:

La Doctora Lunar, como hemos podido observar, entra en la Academia por sus propios méritos. La exposición de su *curriculum* nos ha dado idea de la ingente tarea llevada a cabo, abnegada sin ostentación e intensa con sencillez. Estoy seguro que prestará a esta Real Academia la contribución de su saber, de su prestigio y de su entusiasmo. Decía Gracián: «*Los dos polos para lucir las cualidades son el carácter y la inteligencia; el uno sin la otra es media buena suerte*». La Doctora Lunar tiene estos dos «polos», por eso brillan sus muchas cualidades; es una mujer con entera buena suerte. Y también nosotros, los Académicos, somos muy afortunados porque la vamos a tener

de compañera. Termino agradeciendo nuevamente a la Corporación el honor que me ha conferido para contestar al discurso de la nueva Académica, a quien felicito entusiastamente y deseo una dilatada y fecunda estancia.

Muchas gracias.