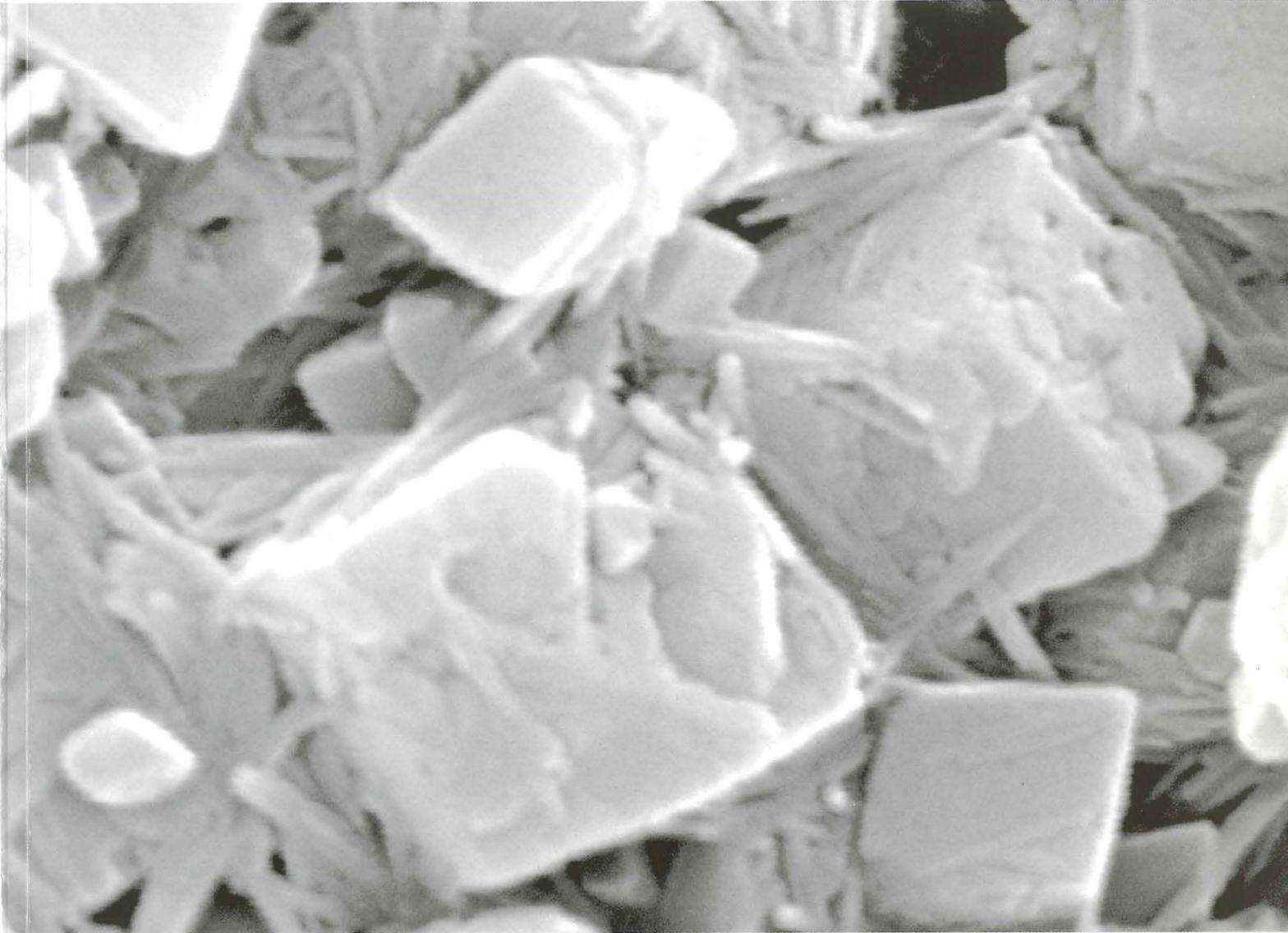


Número 1
2004



MACLA

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA
DE MINERALOGÍA

MACLA
Revista de la Sociedad Española de Mineralogía

Director	Manuel Pozo Rodríguez	Universidad Autónoma de Madrid	manuel.pozo@uam.es
Secretario	Javier Luque del Villar	Universidad Complutense de Madrid	jluque@geo.ucm.es
Comité Editorial	Benjamín Calvo Pérez	Universidad Politécnica de Madrid	subdir_re@minas.upm.es
	Carlos de la Fuente Cullell	Universidad de Barcelona	carlosdelafuente@ub.edu
	Purificación Fenoll Hach-Alí	Universidad de Granada	pfenoll@goliat.ugr.es
	Constanza Fernández-Nieto Fernández	Universidad de Zaragoza	constanza@posta.unizar.es
	Emilio Galán Huertos	Universidad de Sevilla	egalan@us.es
	Isabel González Díez	Universidad de Sevilla	igonza@us.es
	Alberto López Galindo	Universidad de Granada	alberto@ugr.es
	José López Ruiz	Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC)	lopezruiz@mncn.csic.es
	Jesús Martínez Frías	Centro de Astrobiología	martinezfrías@mncn.csic.es
	Salvador Mirete Mayo	IES Jaime Vera de Madrid	salvadmirete@telefonica.net
	A. Carmelo Prieto Colorado	Universidad de Valladolid	prieto@fmc.uva.es
	Manuel Prieto Rubio	Universidad de Oviedo	mprieto@geol.uniovi.es
	Magdalena Rodas González	Universidad Complutense de Madrid	rodas@geo.ucm.es
	Francisco Velasco Roldán	Universidad del País Vasco	nppverof@lg.ehu.es



Presentación

El Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía, que ha sido nuestra expresión científica nacional e internacional desde 1978, y a veces nuestra imagen, ha dejado de publicarse desde este año. El impacto del Boletín no ha permitido situarnos al mismo nivel de otras revistas internacionales y poder entrar en el SCI, un "indicador" cada vez más apreciado y/o necesario en el ámbito científico en que nos movemos, a pesar del gran esfuerzo desarrollado en este sentido por la profesora Purificación Fenoll Hach-Alí, a quien debemos agradecer su impagable dedicación a la Revista desde 1981.

Como contrapartida la SEM edita desde este año, junto con las Sociedades de Mineralogía de Alemania, Francia e Italia, la revista *European Journal of Mineralogy*, tras el acuerdo que firmamos en París el pasado diciembre. Además se editarán los Cursos que la SEM organiza en una Serie que se denominará "Seminarios de la SEM". El número 1 aparecerá en breve, con el título "Geoquímica Isotópica Aplicada al Medio Ambiente", resultado del curso que con este título se impartió el pasado 7 de julio de 2003 en el Puerto de Santa María (Cádiz), antecediendo a la XXIII Reunión de la SEM. Los editores para este volumen son los organizadores de ambos eventos, los doctores Luis Barbero y Pilar Mata. Esta serie puede llegar a constituir "libros de consulta" para investigadores, docentes y estudiantes.

Finalmente, para llenar también parte del hueco que deja la ausencia del Boletín, comenzamos con este número la publicación de una nueva revista, que hemos (el Comité Editorial de la SEM) denominado *MACLA*. En ella aparecerán artículos de divulgación científica, comentarios críticos de libros, reseñas de tesis doctorales recientemente leídas, notas sobre museos españoles y centros de investigación, aspectos de interés para coleccionistas, informaciones sobre congresos, nuevos minerales en el mercado, páginas Web relacionadas con la Mineralogía y la Petrología, etc. A las secciones que en este número aparecen se podrían unir otras por iniciativas de los socios, porque deseamos que esta revista sea un medio para comunicarnos.

Los contenidos del número que se presenta están esencialmente preparados a partir de la participación directa de los miembros del Comité Editorial de la SEM o por su mediación. Pero es de esperar que a partir de ahora sean los demás socios, de forma espontánea, los que enriquezcan esta revista. En este primer número de *MACLA* aparece un perfil biográfico del profesor José Luis Amorós, como homenaje póstumo a quien fue el Socio Fundador número 1 de nuestra Sociedad y por cuya iniciativa se constituyó la SEM.

La periodicidad de *MACLA* será de dos números anuales, estando uno de ellos dedicado a la publicación de los resúmenes de los trabajos que se presenten en la Reunión Anual.

Agradezco a todos los autores de las diferentes contribuciones, a los miembros del Comité Editorial y especialmente al director de la revista, doctor Manuel Pozo, el interés que han demostrado y el trabajo que han desarrollado para que en sólo unos meses pueda ponerse en marcha esta nueva revista, que espero y deseo sea bien recibida por todos los socios.

Sevilla, julio de 2004

EMILIO GALÁN HUERTOS
Presidente de la SEM

MACLA

Revista de la Sociedad
Española de Mineralogía

DIRECTOR

Manuel Pozo Rodríguez

SECRETARIO

Javier Luque del Villar

COMITÉ EDITORIAL

Benjamín Calvo Pérez

Carlos de la Fuente Cullell

Purificación Fenoll Hach-Alí

Constanza Fernández-Nieto

Fernández

Emilio Galán Huertos

Isabel González Díez

Alberto López Galindo

José López Ruiz

Jesús Martínez Frías

Salvador Mirete Mayo

A. Carmelo Prieto Colorado

Manuel Prieto Rubio

Magdalena Rodas González

Francisco Velasco Roldán

DISEÑO DE CUBIERTA

Manuel Pozo Rodríguez

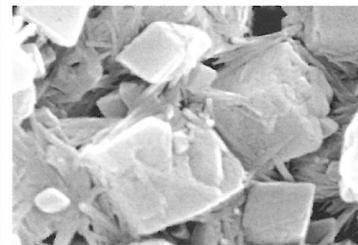
IMPRESIÓN

Eleccé Industria Gráfica, S.L.

Depósito Legal: M-38920-2004

ISSN: en tramitación

Fotografía: Cristales romboédricos de dolomita recubiertos de agregados fibrosos de paligorskita (Campo de Calatrava, Ciudad Real)





Presentación

El Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía, que ha sido nuestra expresión científica nacional e internacional desde 1978, y a veces nuestra imagen, ha dejado de publicarse desde este año. El impacto del Boletín no ha permitido situarnos al mismo nivel de otras revistas internacionales y poder entrar en el SCI, un "indicador" cada vez más apreciado y/o necesario en el ámbito científico en que nos movemos, a pesar del gran esfuerzo desarrollado en este sentido por la profesora Purificación Fenoll Hach-Alí, a quien debemos agradecer su impagable dedicación a la Revista desde 1981.

Como contrapartida la SEM edita desde este año, junto con las Sociedades de Mineralogía de Alemania, Francia e Italia, la revista *European Journal of Mineralogy*, tras el acuerdo que firmamos en París el pasado diciembre. Además se editarán los Cursos que la SEM organiza en una Serie que se denominará "Seminarios de la SEM". El número 1 aparecerá en breve, con el título "Geoquímica Isotópica Aplicada al Medio Ambiente", resultado del curso que con este título se impartió el pasado 7 de julio de 2003 en el Puerto de Santa María (Cádiz), antecedendo a la XXIII Reunión de la SEM. Los editores para este volumen son los organizadores de ambos eventos, los doctores Luis Barbero y Pilar Mata. Esta serie puede llegar a constituir "libros de consulta" para investigadores, docentes y estudiantes.

Finalmente, para llenar también parte del hueco que deja la ausencia del Boletín, comenzamos con este número la publicación de una nueva revista, que hemos (el Comité Editorial de la SEM) denominado *MACLA*. En ella aparecerán artículos de divulgación científica, comentarios críticos de libros, reseñas de tesis doctorales recientemente leídas, notas sobre museos españoles y centros de investigación, aspectos de interés para coleccionistas, informaciones sobre congresos, nuevos minerales en el mercado, páginas Web relacionadas con la Mineralogía y la Petrología, etc. A las secciones que en este número aparecen se podrían unir otras por iniciativas de los socios, porque deseamos que esta revista sea un medio para comunicarnos.

Los contenidos del número que se presenta están esencialmente preparados a partir de la participación directa de los miembros del Comité Editorial de la SEM o por su mediación. Pero es de esperar que a partir de ahora sean los demás socios, de forma espontánea, los que enriquezcan esta revista. En este primer número de *MACLA* aparece un perfil biográfico del profesor José Luis Amorós, como homenaje póstumo a quien fue el Socio Fundador número 1 de nuestra Sociedad y por cuya iniciativa se constituyó la SEM.

La periodicidad de *MACLA* será de dos números anuales, estando uno de ellos dedicado a la publicación de los resúmenes de los trabajos que se presenten en la Reunión Anual.

Agradezco a todos los autores de las diferentes contribuciones, a los miembros del Comité Editorial y especialmente al director de la revista, doctor Manuel Pozo, el interés que han demostrado y el trabajo que han desarrollado para que en sólo unos meses pueda ponerse en marcha esta nueva revista, que espero y deseo sea bien recibida por todos los socios.

Sevilla, julio de 2004

EMILIO GALÁN HUERTOS
Presidente de la SEM

MACLA

Revista de la Sociedad
Española de Mineralogía

DIRECTOR

Manuel Pozo Rodríguez

SECRETARIO

Javier Luque del Villar

COMITÉ EDITORIAL

Benjamín Calvo Pérez

Carlos de la Fuente Cullell

Purificación Fenoll Hach-Alí

Constanza Fernández-Nieto

Fernández

Emilio Galán Huertos

Isabel González Díez

Alberto López Galindo

José López Ruiz

Jesús Martínez Frías

Salvador Mirete Mayo

A. Carmelo Prieto Colorado

Manuel Prieto Rubio

Magdalena Rodas González

Francisco Velasco Roldán

DISEÑO DE CUBIERTA

Manuel Pozo Rodríguez

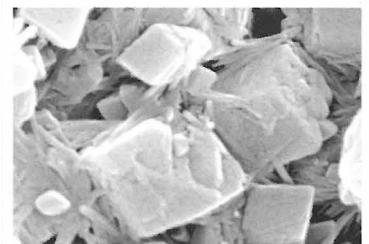
IMPRESIÓN

Elecc Industria Gráfica, S.L.

Depósito Legal: M-38920-2004

ISSN: en tramitación

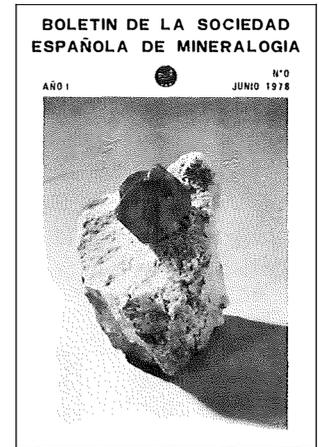
Fotografía: Cristales romboédricos de dolomita recubiertos de agregados fibrosos de paligorskita (Campo de Calatrava, Ciudad Real)





La actual necesidad de publicar en revistas internacionales que se encuentren dentro del SCI y la entrada en la revista EJM han provocado el final de una larga y fructífera etapa del Boletín de la SEM, en el que un gran número de generaciones científicas hemos tenido la oportunidad de publicar nuestras investigaciones. La labor de Purificación Fenoll Hach-Alf al frente del Boletín, durante tantos años, merece no sólo nuestro reconocimiento y admiración por el excelente trabajo realizado sino también nuestro agradecimiento por haber conseguido mantener viva la llama, a pesar de no pocas adversidades.

Cuando durante la celebración de la SEA de Almagro (2003), Emilio Galán, nuestro Presidente, me propuso la dirección de una nueva revista de la SEM, no lo pensé dos veces y le respondí de forma afirmativa con rotundidad. Mi decisión fue coherente con una actitud personal de colaboración en un proyecto que aparecía ante mis ojos como un reto, un desafío, en definitiva un objetivo a alcanzar. En mi rápida decisión fue determinante no sólo la confianza depositada en mí por Emilio y la mía en él, también, de manera especial, la idea de sacar a la luz un proyecto editorial que fuese seña de identidad de la Sociedad a la que pertenecemos y en la que, en su Comité Editorial, participarían colegas y amigos. En las reuniones de este Comité se fraguó la idea de crear una revista con unos objetivos que de alguna manera retomasen parte de las inquietudes y propuestas originales que allá por los años 70 dieron lugar a la fundación de la SEM y a la publicación de su número cero en 1978.



Permitidme hacer un poco de historia, efectivamente, la Sociedad Española de Mineralogía editó su primer Boletín, el denominado número cero, en junio de 1978, siendo su Director José María Melgar Escrivá de Romaní, el gerente Salvador Mirete Mayo y como jefes de redacción contaba con Emilio Galán Huertos y Purificación Fenoll Hach-Alf. En éste número, el entonces Presidente de la SEM Gonzalo Leal Echevarria ponía de manifiesto las dificultades que de diversa índole motivaron el retraso de su constitución y de la salida de ese primer número cero, estandarte de un colectivo de profesionales, amantes o curiosos de la Mineralogía. Así, en su Junta Directiva estaba representada la investigación, la docencia, el comercio, el coleccionismo, la industria minera y la museología. Se planteó como objetivo de la SEM la interacción o relación de dos o más de estos ámbitos. Esos objetivos de coordinación, agrupación y canalización de todo lo relacionado con los minerales y las rocas siguen plenamente vigentes en la nueva revista de la Sociedad Española de Mineralogía, que hemos nombrado *MACLA*. Con este nombre tanto mineralogistas como petrólogos y coleccionistas se pueden sentir perfectamente identificados. Por otra parte, este título hace referencia al símbolo de la Sociedad, los cristales maclados de aragonito.

Así pues, en un periodo de tiempo relativamente corto se ha gestado la revista *MACLA*, con un enfoque que pretende recoger aspectos relacionados con la enseñanza, divulgación, historia, noticias o investigación, de interés para personas relacionadas con la Mineralogía, Petrología o Geoquímica, incluyendo a todos aquellos apasionados del Coleccionismo y la Museología. Todos, docentes, investigadores, coleccionistas y aficionados tendrán un lugar en esta revista, que pretende ser de todos y para todos.

En este primer número han participado diversos compañeros a los que quiero transmitir mi agradecimiento por el tiempo dedicado, sin ellos los contenidos de la revista no existirían. Así en los distintos apartados han colaborado: F. Nieto, L. Barbero, P. Mata, J. Martínez Frías, R. Lunar, F. Rull, A. C. Prieto, M. Prieto, C. de la Fuente, E. Galán, P. Aparicio, I. González, A. López, F. Gervilla, M. Pozo, B. Calvo y S. Mirete. Asimismo, quiero agradecer al Secretario de la revista J. Luque su dedicación así como a los miembros del Comité Editorial que de diversa manera han contribuido a que este primer número de *MACLA* sea una realidad.

Finalmente, quiero pedirlos a todos los socios, desde vuestros diferentes ámbitos, intereses y preferencias, una participación activa que nos permita desde el Comité Editorial coordinar y canalizar temas, noticias, eventos y la posibilidad de encontrar patrocinadores y nuevos socios. Vuestra colaboración será decisiva en la supervivencia de la revista, pero además será la vía de expresión que nos permitirá mostrar a nuestros compañeros que los contenidos de la revista son interesantes para el colectivo mineralogista, complementando los de otras publicaciones periódicas con temática parecida. Contando con vuestro apoyo y participación, esta revista, nuestra revista, llegará hasta donde queramos que llegue. Como director de la misma quiero transmitir la firme voluntad del Comité Editorial y la mía propia de aportar con ilusión y tenacidad todo el trabajo necesario, sin escatimar esfuerzos, que nos permita conseguir una publicación divulgativa de calidad e interés para todos los que convivimos desde diferentes perspectivas con los minerales y las rocas.

Para todos, mi bienvenida a *MACLA* y un afectuoso saludo



Sumario

LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MINERALOGÍA	4
ESTATUTOS DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MINERALOGÍA	5
NOTICIAS DE LA SEM	
Nombramientos	7
Comité Editorial de la SEM	7
<i>European Journal of Mineralogy</i>	7
Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía	9
ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA	
Mineralogía Espacial: de la materia primigenia a la exploración de Marte	11
<i>J. Martínez-Frías, F. Rull y R. Lunar</i>	
Espectroscopia Raman: una herramienta al servicio del Patrimonio Histórico y Artístico	18
<i>A.C. Prieto y F. Rull</i>	
Transformaciones cristalinas en el manto terrestre: de los procesos a nanoescala a la dinámica global	29
<i>M. Prieto</i>	
Valor gemológico de las rocas	37
<i>C. de la Fuente</i>	
ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN	
Revisión de la situación de la enseñanza de la Mineralogía en España y otros países europeos	41
<i>E. Galán, P. Aparicio e I. González</i>	
La investigación mineralógica en la Estación Experimental del Zaidín (CSIC)	47
<i>M. Prieto</i>	
Comentario crítico de libros: Emeralds of the World. Extralapis nº 2: the legendary Green Beryl (2002); Mineralogía Aplicada (2003); Minerals: their constitution and origin (2004)	49
Lectura de tesis 2003-2004	52
LA COLECCIÓN DE MINERALES Y ROCAS	
La colección de minerales del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia (Escuela de Minas de Madrid)	73
<i>B. Calvo</i>	
El rincón del coleccionista: Métodos no instrumentales en la identificación de minerales. (I) Color y brillo	83
<i>S. Mirete</i>	
ASPECTOS HISTÓRICOS	
José Luis Amorós Portolés: vida y obra	85
<i>M.V. López-Acevedo y S. López</i>	
CONGRESOS Y REUNIONES	93
ADQUISICIÓN DE PUBLICACIONES DE LA SEM Y FACSIMIL DE LOS MINERALES DE ESPAÑA	94

Sociedad Española de Mineralogía

C/ Alenza, 1 (D-121)

Fundación Gómez Pardo 28003-MADRID

sem@minas.upm.es

La Sociedad Española de Mineralogía (S.E.M.) fue fundada en mayo de 1975 en la Universidad Complutense de Madrid por un grupo de profesores universitarios del área de Cristalografía y Mineralogía, junto con un nutrido grupo de coleccionistas y aficionados. Desde entonces la Sociedad se ha dedicado con gran esfuerzo a su principal objetivo: promover, difundir, coordinar y organizar trabajos de investigación en los campos científicos y aplicados de la mineralogía (*crystalografía, petrología, geoquímica y yacimientos minerales*), así como la *didáctica, la museología y el coleccionismo* (Art. 3 de los Estatutos).

Para ello ha contado con:

- Un número más o menos estable de socios. Desde su fundación han participado unas 700 personas, con un promedio anual de 300 socios activos.
- La organización anual de Reuniones Científicas, en colaboración con los departamentos de mineralogía y petrología de las universidades españolas o Entidades afines (este año se celebrará la XXIV Reunión/SEM'04, en Cuenca).
- La publicación del Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía hasta 2003 (han visto la luz 45 volúmenes, incluyendo los extraordinarios dedicados a las Actas de los Congresos organizados por la SEM), y la edición de un suplemento informativo "Noticias SEM" desde 1990.

Desde 2004 la Sociedad Española de Mineralogía ha cambiado su fisonomía:

- A partir de 2004, la Sociedad Española de Mineralogía es patrocinadora de la revista *European Journal of Mineralogy*.
- Del mismo modo, a partir de este año, se editará la revista *MACLA*, que recogerá aquellas aportaciones de carácter divulgativo de la mineralogía, prestando especial atención al campo de la docencia y el coleccionismo, los museos y amantes de la mineralogía, con artículos especializados, agendas, temas de interés, etc.
- La participación como Sociedad en foros nacionales como los Congresos Geológicos de España, y ferias nacionales de minerales.
- La pertenencia a organismos internacionales (*European Mineralogical Union, E.M.U. e International Mineralogical Association, I.M.A.*).
- Organización de cursos monográficos de carácter científico, así como el apoyo a actividades divulgativas de la mineralogía: ferias, mercadillos, museos, etc.

Para más información visite la página web:

www.ehu.es/sem

Estatutos de la Sociedad Española de Mineralogía

(Recoge la última modificación aprobada en Asamblea Extraordinaria en Oviedo el 4 de julio de 1990)

CAPÍTULO I.

NOMBRE, DOMICILIO Y FINALIDAD

Artículo 1

Se ha constituido en Madrid, estructurándose de acuerdo con los presentes estatutos, la "SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MINERALOGÍA".

Artículo 2

La Sociedad tendrá su domicilio en Madrid, en la calle Alenza, 1, despacho 201, pudiéndose trasladar la sede a cualquier otro centro sin que esto implique modificación estatutaria. El ámbito territorial previsto para esta Sociedad es el del Estado Español, pudiéndose a tal efecto constituir delegaciones en aquellas provincias que reúnan un mínimo de veinticinco asociados, mediante acuerdo adoptado en la asamblea general y a solicitud de los componentes interesados.

Artículo 3

La finalidad de la Sociedad Española de Mineralogía es la de promover, difundir, coordinar y organizar trabajos de investigación y desarrollo en los campos científicos, tecnológicos y aplicados que se refieren a la mineralogía. Velará por la conservación y defensa de los bienes naturales de carácter mineral y la calidad de la enseñanza de la mineralogía. Así mismo podrá asesorar a las instituciones y entidades que lo requieran, en materia científica y educativa, sirviendo como centro de información y difusión entre los interesados.

Artículo 4

La consecución de tales fines se llevará a cabo mediante:

- Organización de reuniones nacionales e internacionales destinadas a la exposición y discusiones de los resultados de la investigación científica y práctica y a la presentación y exposición de ejemplares minerales notables, junto con la discusión de las iniciativas propuestas por los socios y que puedan interesar a la ciencia y a la industria.
- Publicación de una revista periódica que reúna las actividades científica de los socios, que divulgue la bibliografía actual sobre la mineralogía, las actividades de otras sociedades afines, que dé a conocer reuniones, conferencias y congresos nacionales e internacionales, las actividades esenciales de la industria minera española, legislación minera, mercado nacional e internacional de materias primas minerales y otras actividades afines.

CAPÍTULO II. SOCIOS

Artículo 5

La admisión en esta Sociedad de cualquier persona física o jurídica, individual o colectiva deberá efectuarse a propuesta de dos socios. La junta Directiva admitirá o denegará la solicitud de admisión. Será socio de pleno derecho una vez ratificado por la Asamblea General.

Artículo 6

Los socios en número ilimitado podrán ser de las siguientes clases:

- *Socios fundadores.* Serán socios fundadores aquellas personas físicas que formen parte de la Sociedad con anterioridad al 1 de enero de 1978.

- *Socios ordinarios.* Serán socios ordinarios aquellas personas físicas que hayan solicitado el ingreso en la Sociedad y que hayan sido admitidos con arreglo al artículo 5.
- *Socios protectores.* Serán socios protectores aquellos socios ordinarios que contribuyan económicamente con una cuota superior, la cual será fijada en la Asamblea General ordinaria.
- *Socios vitalicios.* Serán socios vitalicios aquellos socios ordinarios que contribuyan al pago de veinte anualidades de una sola vez, quedando exentos de por vida del pago de la cuota a la Sociedad y teniendo los mismos derechos que el socio ordinario.
- *Socios colectivos.* Serán socios colectivos aquellas entidades, laboratorios o departamentos universitarios, que soliciten el ingreso en la Sociedad de acuerdo con el artículo 5 y pagarán la cuota que para los socios colectivos establezca la Asamblea Anual.
- *Socios de honor.* Serán todas aquellas personas que por relevante prestigio en el campo de la mineralogía, se hagan acreedores de tal distinción. Deberán ser propuestos al menos por cinco miembros de la Sociedad a la Junta Directiva, y su admisión deberá ser confirmada por la mayoría de las tres cuartas partes de la Asamblea General.

Los socios fundadores, protectores y vitalicios, serán considerados como socios ordinarios a efectos de sus derechos y deberes en la Asamblea General.

Artículo 7

Los socios podrán ser dados de baja por las siguientes causas:

- a) Por iniciativa propia, mediante escrito dirigido al Presidente de la sociedad.
- b) Por no haber hecho efectivo el importe de dos cuotas consecutivas.

La pérdida de su calidad de socio les será notificada por escrito al interesado, el cual podrá recurrir ante la Asamblea General por escrito en el plazo de un mes a partir de la fecha de la notificación.

Artículo 8

Son derechos de los socios, cualquiera que fuera la clase a la que pertenezcan, la de participar en los actos que la Sociedad organiza, recibir la revista y utilizar los medios de la Sociedad para la difusión de sus actividades.

Tendrán voto en la Asamblea General los socios Fundadores, los Ordinarios y los Vitalicios. Son deberes de los socios contribuir con arreglo a las cuotas acordadas por la Asamblea General.

Artículo 9

Las cuotas serán establecidas y actualizadas en Asamblea General según los conceptos de socio ordinario, estudiante, colectivo, protector y vitalicio.

CAPÍTULO III. ÓRGANOS DIRECTIVOS, JUNTAS Y ASAMBLEAS

Artículo 10

La Sociedad estará regida por la Junta Directiva formada por un Presidente, un Vicepresidente, un Tesorero, un Secretario General, un Secretario Adjunto y hasta veinte Vocales, y por la Asamblea General

que está constituida por todos los socios. Así mismo, existirá una Comisión Permanente de la Junta Directiva.

Artículo 11

Corresponde a la Asamblea General:

- 1) Nombrar y renovar a las personas que formen la Junta Directiva.
- 2) Revisar el estado de cuentas.
- 3) Aprobar el plan de gastos e ingresos previsibles.
- 4) Reformar los estatutos y aprobar el reglamento de régimen interno.
- 5) Solicitar la declaración de utilidad pública.
- 6) Acordar la admisión de los socios de honor.
- 7) Ratificar o rechazar a los nuevos socios propuestos.
- 8) Adoptar el acuerdo de disolución de la Sociedad, necesitando para este caso el voto favorable de las tres cuartas partes de los asociados.

Artículo 12

La asistencia a la Asamblea General será personal o por representación, bastando para acreditar esto un escrito firmado por el socio. Esta representación la tendrá que llevar otro socio.

Artículo 13

La Asamblea General se reunirá por lo menos una vez al año en sesión ordinaria, para aprobar los presupuestos, cuotas y programas de actuación, y en las demás ocasiones con carácter extraordinario, cuando lo considere conveniente o necesario la mayoría simple de la Junta Directiva o lo pidan al menos el 10 por ciento del número de socios ordinarios siempre que no sea inferior a 50. La convocatoria la hará llegar el Presidente con la indicación de los asuntos a tratar y hora, día y lugar de la reunión.

Las Asambleas Generales de la Sociedad, tanto ordinarias como extraordinarias, quedarán válidamente constituidas en primera convocatoria cuando concurren a ella, presentes o representados, la mayoría de los asociados, y en segunda convocatoria, cualquiera que sea el número de asociados concurrentes; entre la convocatoria y el día señalado para la celebración de la Asamblea General en primera convocatoria habrán de mediar al menos quince días, pudiendo, así mismo, hacerse constar la fecha en que, si procediese, se reunirá la Asamblea General en segunda convocatoria, sin que entre una y otra reunión pueda mediar un plazo inferior a media hora. En el supuesto de que no se hubiera previsto en el anuncio la fecha de la segunda convocatoria deberá ser ésta hecha con ocho días de antelación a la fecha de la reunión.

Excepcionalmente, y cuando la urgencia del caso lo requiera, podrá convocarse a Asamblea General extraordinaria con la antelación que sea posible para que la convocatoria pueda llegar a conocimiento de los interesados.

Artículo 14

Corresponde a la Junta Directiva velar por el cumplimiento de cuantos acuerdos se adopten en la Asamblea General. La Junta Directiva tendrá todas las atribuciones que sean necesarias para el perfecto funcionamiento y consecución de los fines de la Sociedad, salvo aquellos que específicamente corresponden a la Asamblea General. La Junta Directiva nombrará de entre sus miembros a cinco personas para constituir la Comisión Permanente. Así mismo, nombrará al Consejo Editorial de las publicaciones de la Sociedad.

Cada componente de esta Junta Directiva tiene las atribuciones siguientes:

- a) **Presidente.** Ostentará la representación legal de la Sociedad y la representará en Juicio o fuera de él en cuantos asuntos le afecten, actuando en su nombre y ejecutando los acuerdos adoptados por la Asamblea General o por la Junta Directiva.
- b) **Vicepresidente.** Sustituirá al Presidente en sus ausencias. Será el coordinador de los Grupos de Trabajo que se establezcan y los presidirá siempre que esté presente en las reuniones de estos grupos.
- c) **Secretario General.** Preparará con la debida antelación el programa de actuación de cada ejercicio, el plan de gastos previsibles, proponiendo los medios necesarios para hacer frente a los mismos. Custodiará los bienes de la Sociedad e informará

a los socios de la marcha de la misma. Levantará Acta de las reuniones de la Junta Directiva y de la Asamblea General.

- d) **Secretario Adjunto.** Sustituirá al Secretario General en su ausencia. Colaborará con el Secretario General en todas las tareas propias de éste.
- e) **Tesorero.** Se encargará de la custodia de los fondos de la Sociedad, expediendo los recibos de cuota y llevando la organización contable.
- f) **Vocales.** Tendrán las atribuciones específicas que se les asigne por la Junta Directiva.

La Junta Directiva podrá designar a uno o más socios para que representen a la Sociedad en Reuniones o Congresos de otras sociedades dedicadas a temas afines. Además, cada miembro de la Junta Directiva, disfrutará de aquellas atribuciones que se le confieran por la Asamblea General.

Artículo 15

Las renovaciones de la Junta Directiva se verificarán cada dos años, contados a partir de la Asamblea General ordinaria, no pudiendo ser sus cargos reelegibles en esa convocatoria. El turno de renovación comenzará por la mitad de la Junta Directiva constituida por el Vicepresidente, el Secretario General y la mitad de los vocales.

Cuando a juicio de la Junta Directiva y en casos excepcionales les sea necesario, se propondrá la reelección de un determinado miembro de la misma.

Las vacantes que se produzcan en la Junta Directiva sin agotar el período reglamentario serán cubiertas con elementos de la misma hasta la renovación reglamentaria.

Artículo 16

La Junta Directiva se reunirá al menos tres veces al año.

Artículo 17

Los acuerdos de la Asamblea se reflejarán en un Libro de Actas, cuya custodia corresponde al Secretario General.

El Patrimonio inicial de esta Sociedad está constituido por 100.000 pesetas.

CAPÍTULO IV. PATRIMONIO FUNDACIONAL. RECURSOS ECONÓMICOS PREVISTOS Y LÍMITES DEL PRESUPUESTO

Artículo 18

El Patrimonio inicial de esta Sociedad está constituido por 100.000 pesetas.

Artículo 19

Los recursos económicos previstos para la Sociedad están constituidos por las cuotas de todos los Socios. Así como por las subvenciones voluntarias que reciba de personas, centros de trabajo, oficiales y privados, sociedades, entidades u organismos públicos y privados.

La Sociedad podrá hacerse cargo de cuantas donaciones bibliográficas o de colecciones de minerales quieran hacer sus socios u otras entidades, pasando a incrementar el Patrimonio de la Sociedad.

El Secretario General es la persona habilitada para la recepción de cualquier tipo de ayudas económicas, subvenciones estatales, donaciones bibliográficas, etc.

El límite del presupuesto anual se fija en 10.000.000 de pesetas.

Artículo 21

En caso de disolución de la Sociedad, el Patrimonio Social se dedicará íntegramente a fines docentes o de investigación.

CAPÍTULO V. MODIFICACIÓN DE ESTATUTOS

El presente estatuto podrá ser modificado en Asamblea General extraordinaria.

Para la propuesta de la modificación del estatuto es necesaria la aprobación de 2/3 de los presentes o representados en la Asamblea siempre que esa mayoría supere a la mitad de los socios totales.



NOMBRAMIENTOS

Vicepresidente de la EMU

A propuesta de la Sociedad Española de Mineralogía la doctora **Purificación Fenoll Hach-Alí** (Universidad de Granada) ha sido elegida Vicepresidenta de la EMU (European Mineralogical Union), en la reunión celebrada en Frankfurt (Alemania) el día 6 de abril de 2004.

Vocal de la COSCE

El doctor **José López-Ruiz** (Museo de Ciencias Naturales-CSIC) ha sido elegido Vocal del Área de Ciencias de la Tierra, Agricultura y Medio Ambiente de la Confederación de Sociedades Científicas de España (COSCE). La Sociedad Española de Mineralogía, la Sociedad Geológica de España y la Asociación Española para el estudio del Cuaternario apoyaron la propuesta.

Socio de Honor de la SEM

La Junta Directiva de la Sociedad Española de Mineralogía acordó por unanimidad en su reunión del día 30 de enero nombrar Socia de Honor a doña **Purificación Fenoll Hach-Alí**, en reconocimiento a sus innumerables méritos en relación con la SEM. El acto de nombramiento tendrá lugar el día 10 de septiembre en Cuenca, durante la XXIV Reunión de la SEM.

COMITÉ EDITORIAL DE LA SEM

El pasado 30 de enero de 2004 se aprobó por la Junta Directiva de la Sociedad, constituir un nuevo Comité Editorial, que en su primer periodo estaría constituido por los siguientes socios: Benjamín Calvo Pérez, Purificación Fenoll Hach-Alí, Constanza Fernández-Nieto, Emilio Galán Huertos, Isabel González Díez, Alberto López Galindo, José López Ruiz, Carlos de la Fuente Cullell, Jesús Martínez Frias, Salvador Mirete Mayo, Manuel Pozo Rodríguez, Carmelo Prieto Colorado, Manuel Prieto Rubio, Magdalena Rodas González y Francisco Velasco Roldán. Este comité actuará como Asesor de la nueva Revista *MACLA*, e intervendrá en todas las publicaciones que edite la Sociedad. A propuesta del Presidente, se aprobó el nombramiento del Dr. Manuel Pozo como Director de la Revista *MACLA*.

Este Comité Editorial se constituyó y tuvo su primera reunión en Madrid el pasado 26 de marzo. En esta reunión se aprobó el siguiente reglamento:

- El comité estará constituido por un máximo de 15 miembros. Si el presidente de la SEM forma parte del Comité, será también su Presidente; en caso contrario el Comité elegirá un presidente.
- Cualquier miembro podrá renunciar por propia voluntad, o podrá ser invitado a abandonar el comité por decisión mayoritaria de los miembros del Comité, si no participa activamente.
- El tiempo máximo de permanencia en el Comité será de 8 años.
- Las renovaciones del Comité las llevará a cabo la Junta Directiva, cada vez que se renueve el Presidente.
- Uno de los miembros actuará como Director de la Revista y podrá convocar a los miembros una vez/año, coincidiendo en lo posible con una Reunión de la Junta Directiva.

En esta reunión se decidió el formato, nombre y contenido de *MACLA* y a propuesta del Director se ha designado Secretario de la Revista a nuestro socio Javier Luque del Villar.

EUROPEAN JOURNAL OF MINERALOGY

En 1989 se publica el primer número de *European Journal of Mineralogy*. Sólo hasta cierto punto se trata de una revista nueva; nace de la integración de *Fortschritte der Mineralogie*, *Bulletin de Minéralogie y Rendiconti*. Las sociedades de Mineralogía alemana, francesa e italiana habían alcanzado un acuerdo para integrar sus correspondientes revistas. El acuerdo no fue fácil ni estuvo exento de tensiones. En el seno de cada una de las sociedades fundadoras, aún hoy tal acuerdo es controvertido, aunque en general bien aceptado. Ya en el texto del acuerdo inicial se hace referencia al afán integrador en el ámbito europeo. En la misma línea de la integración económica/política iniciada por el Mercado Común,

los fundadores ponen en marcha el proceso, pero sin intenciones excluyentes. El propio título de la revista pone el énfasis en la idea europeísta.

No obstante tampoco aquí la integración es un camino diáfano. Inicialmente otras comunidades mineralógicas no se unen al proyecto porque no quieren o porque no pueden. La declaración existente en el acuerdo de fundación pretende convencer a los primeros y permitir a los segundos salvar los obstáculos. No obstante durante muchos años los primeros siguen sin estar convencidos y los propios gestores de la revista son reacios a abrir los brazos a los segundos a la hora de la verdad. Franceses, alemanes e italianos son conscientes de que disolver sus respectivas revistas ha supuesto un sacrificio y que han corrido un riesgo. La francesa y la alemana estaban ya entonces en lugares destacados del *Journal Scitation Report*, lugares que la nueva revista europea tardaría varios años en alcanzar y el *Bulletin* era ya una revista centenaria de prestigio mundial. Por tanto, en contra de la teoría, las sociedades, constituidas en definitiva por personas concretas, no dan facilidades a otras sociedades para su integración.

Así, tratando de solucionar la contradicción, en 1996 se da entrada en las tareas editoriales y en el Comité Ejecutivo a una representación de la European Mineralogical Union; es la forma de dar acceso en el funcionamiento cotidiano de la revista a los países europeos no fundadores. No obstante, la revista sigue siendo propiedad exclusivamente de los socios iniciales. El acuerdo resulta satisfactorio para los países pequeños, a los que la responsabilidad económica de la copropiedad les viene grande. Recuerdan a Confucio y tienen cuidado con lo que piden, no vaya a ser que se lo concedan.

La Sociedad Española de Mineralogía ha tenido desde el principio vocación de participar en la revista al más alto nivel. Desde los orígenes de EJM los autores españoles han publicado en ella, no han sido escasos los revisores españoles y hemos contado con editores asociados, en definitiva el nivel en el que se aceptan o rechazan los artículos. La participación en este conjunto de tareas con notable seriedad científica ha sido probablemente el principal aval con el que los sucesivos presidentes de la SEM han contado para negociar la integración de pleno derecho en la revista.

Finalmente, y tras quince años, EJM, como les gusta o mejor nos gusta llamarla, se siente madura, el presidente de la SEM piensa que por pedir la entrada lo peor que puede pasar es que digan que no y en un tórrido y húmedo junio padano hay *fumata bianca*. Sólo podía ser en Italia, aunque al fin y al cabo la Italia centro-europea. El acuerdo final se firma en diciembre en el más frío y formal París.

Hoy somos socios propietarios, los primeros no fundadores. La propia revista se muestra jubilosa en el editorial del primer fascículo de 2004, por haber cumplido su asignatura pendiente de la ampliación y nos da una calurosa bienvenida.

En el corto período transcurrido como editor jefe he recibido más artículos procedentes de científicos de las

sociedades fundadoras que de españoles, me consta que se han enviado artículos españoles a los otros editores jefes, se ha nombrado un editor asociado español a propuesta de miembros no españoles del Comité Ejecutivo y la propuesta española de nuevos editores asociados contendrá nombres no españoles. Todo ello es bueno. Es el concepto europeo-internacional de la revista, muy presente en la misma desde su nacimiento. Los propios mecanismos de revisión de artículos, que evitan la concentración en una misma nacionalidad de autores, editor jefe y editor asociado son una garantía de la internacionalización del proceso de revisión.

El principal motivo para entrar en EJM es que las ciencias relacionadas con la mineralogía habían alcanzado en España un nivel internacional maduro y nos corresponde la responsabilidad y el honor de tutelar, apoyar y decidir al más alto nivel sobre nuestra revista europea. En los tiempos venideros se van a plantear decisiones claves, tanto en el formato de las revistas científicas en general como en el propio contenido de las revistas de mineralogía.

Posiblemente dentro de cinco o diez años los conceptos de revista científica, o de biblioteca tengan poco que ver con los actuales. La revolución electrónica/informática irá arrinconando poco a poco el papel, los índices o incluso las referencias tradicionales. Para enero de 2005 está previsto el lanzamiento del GSW (GeoScienceWorld), un conglomerado de revistas de temas geológicos en formato electrónico, interconectadas entre sí, con referencias cruzadas y gestionado directamente a través de Georef. Es decir todo un nuevo concepto de archivo y gestión de la información geológica. La decisión de integrar o no EJM en el consorcio fundador es difícil desde cualquier punto de vista y arriesgada económicamente, tanto si la respuesta es positiva como negativa.

La mineralogía se viene enfrentando en los últimos años con su propia definición en términos de investigación. El problema de dinamizar y ampliar objetivos hacia temas más atractivos, con el objeto de mantenerla interesante y competitiva en el ámbito del resto de ciencias de la Tierra se ha planteado posiblemente de forma más aguda al otro lado del Atlántico, pero esta orilla tampoco permanece ajena al problema.

En todas estas decisiones es posible estar como socio propietario o como meros espectadores. Lo mismo sucede con la propia línea editorial de la revista. Según su definición, tienen cabida en ella todos los aspectos relacionados con la mineralogía entendida de forma amplia, con el mismo concepto de tres patas de la Mineralogical Society of America, cristalografía, mineralogía, petrología. Se mencionan explícitamente aspectos como la geoquímica o los yacimientos minerales. No obstante, el factor humano, las personas que integraron el núcleo editorial inicial de la revista, tendieron a darle una imagen de mineralogía profunda, con mucho peso a la petrología ígnea y metamórfica, la alta presión, la mineralogía física, los aspectos cristalográficos de los minerales, etc. Nuevamente, si se quiere que las sensibilidades más difundidas en nuestro entorno estén conveniente-

mente representadas es necesario estar dentro. Es, por tanto, en todos estos aspectos más generales en los que la integración de la SEM ha de dejarse sentir, ya que nuestra participación científica ya existía y estaba garantizada por el talante internacional de la revista.

Existe, aún un último aspecto que me parece digno de mencionar: nuestro carácter de puente con la floreciente comunidad iberoamericana. Uno de los primeros artículos que he recibido procedía de México. Fue una agradable sorpresa y espero que no sea la última.

En definitiva, se abre un tiempo en el que nos corresponde a todos incrementar nuestro grado de participación en la revista; de cada uno según sus posibilidades. Los socios de la SEM han hecho un generoso esfuerzo al incrementar sus cuotas hasta ponernos a un nivel equivalente al de las otras sociedades propietarias. Ahora conviene rentabilizar tal esfuerzo mediante la participación tanto como autores, como en los niveles editoriales y de toma de decisiones.

FERNANDO NIETO GARCÍA
Editor Jefe de la revista EJM

SEMINARIOS DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MINERALOGÍA

Se ha publicado recientemente el primer volumen de los Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía, dedicado a la Geoquímica Isotópica Aplicada al Medio Ambiente. En él se encuentran recogidas una serie de conferencias impartidas por diferentes expertos durante el I Seminario de la Sociedad Española de Mineralogía que tuvo lugar el 7 de julio de 2003 en la localidad de El Puerto de Santa María (Cádiz).

Los isótopos, especialmente los de origen ambiental, se utilizan en estudios de geoquímica de baja temperatura desde hace más de 50 años. Desde los más tempranamente incorporados a las herramientas del geoquímico (^{18}O , D, ^3H , ^{14}C , ^{13}C) hasta los de más reciente desarrollo (^3He , ^4He , ^{15}N , ^{222}Rn ...), las dos principales utilidades de los isótopos se centran en su uso como herramienta geocronológica, es decir para calcular edades de materiales y estimar tasas absolutas de procesos y como trazadores de diferentes procesos biogeoquímicos, tipos de aguas y temperaturas. En el presente volumen se presentan ejemplos de estas dos grandes aplicaciones.

En los últimos diez años, la creciente problemática de la contaminación de aguas y suelos ha favore-

cido un notable desarrollo de las técnicas de análisis isotópico mediante métodos de flujo continuo (EA-IRMS; GC-C/TC-IRMS; TC/EA-IRMS). Esto ha facilitado el uso combinado de nuevos isótopos ambientales (^{15}N , ^{34}S , ^{87}Sr , $^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$, $^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$, $^{13}\text{C}_{\text{mo}}$). Recientemente el análisis de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, D/H en compuestos específicos mediante cromatógrafos de gases o HPLC conectados a espectrómetros de masas (IRMS), algunas de estas técnicas aún en fase de desarrollo, promete convertirse en una potente herramienta en el ámbito del medio ambiente, permitiendo determinar el origen de los solutos y contaminantes orgánicos en aguas y los procesos biogeoquímicos acaecidos en éstas. Al no estar la composición isotópica de estos compuestos influenciada por los procesos de dilución, su uso permite cuantificar el grado de impacto ambiental de las distintas actividades humanas, así como la tasa de remediación en acuíferos contaminados.

Este primer volumen está estructurado en nueve capítulos, siguiendo un orden lógico desde los conceptos básicos hasta el estudio de casos reales. De esta forma, en los dos primeros capítulos se explican los fundamentos de geoquímica isotópica tanto de isótopos estables (E. Reyes) como de radiogénicos (L. Barbero) que deben conocerse en cierta profundidad antes de pasar su aplicación a problemas medioambientales.

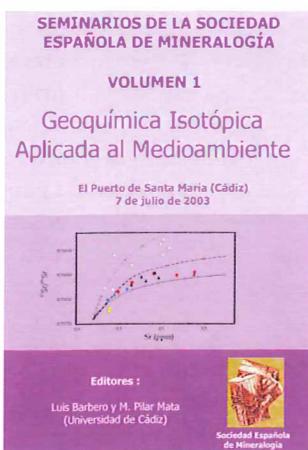
Desde el tercer al sexto capítulos, se presentan diversos casos de la aplicación de los isótopos estables a problemas medioambientales. El tercer capítulo (A. Delgado y E. Reyes) está centrado en el uso de los isótopos estables como herramientas paleoclimáticas y paleohidrológicas y aborda la problemática de la variabilidad de la composición isotópica de las aguas meteóricas aportando nuevas ecuaciones para equilibrios con carbonatos, fosfatos y arcillas.

En el capítulo cuarto (Vitoria *et al.*) se estudia la utilidad de los isótopos estables para evaluar los procesos de atenuación natural de un acuífero contaminado por nitratos en la comarca de Osona (provincia de Barcelona) y se pone de manifiesto el papel que juega la oxidación de la pirita presente como catalizadora de los procesos de atenuación mediante desnitrificación.

Siguiendo con las aplicaciones de los isótopos estables, en el capítulo quinto (Palau *et al.*) se presentan las bases del uso de los isótopos de C como trazadores del origen de compuestos etenoclorados en acuíferos así como en la evaluación de la atenuación natural o inducida presente.

El capítulo sexto (Manzano *et al.*) recoge un amplio estudio multiisotópico de las aguas contaminadas en el accidente de Aznalcóllar, acaecido en abril de 1998, centrándose en el origen de los sulfatos a los que se asigna dos fuentes fundamentales: procedente de fertilizantes químicos o bien de la oxidación de sulfuros provenientes de la interacción de la balsa de lodos derramada o con las aguas superficiales y subterráneas del sector.

Los cuatro últimos capítulos se refieren al uso de isótopos radiactivos y radiogénicos. El capítulo séptimo (Soler *et al.*) estudia el uso de los isótopos de Sr como



trazadores de contaminación y presenta un ejemplo de la cuenca del Río Llobregat.

El capítulo octavo (R. Ligeró) estudia el uso de los estudios de radiactividad ambiental, centrándose, en este caso, no en medios continentales sino en un ambiente costero. Se establece una interesante correlación entre variables radiométricas y variables litológicas o sedimentológicas. Este capítulo enlaza con el siguiente que presenta un modelo de migración vertical del ^{137}Cs en ambientes marinos (Casas *et al.*).

Por último, el capítulo noveno (A. Navas) estudia la aplicación ambiental de los isótopos de Cs y Pb para realizar estudios sobre tasas de sedimentación y erosión. Éstas son importantes cuando se estudian procesos de desertificación, conservación de suelos o incluso para el estudio del relleno sedimentario de embalses.

Para impartir el curso del que nace este primer volumen, además de especialistas de la Universidad de Cádiz

(doctor Rufino Ligeró, doctor Melquíades Casas y doctor Luis Barbero) se invitó a algunos de los mejores especialistas de España e incluso se contó con la participación de un profesor del Reino Unido el doctor Finlay Stuart, que impartió una conferencia sobre el uso de isótopos cosmogénicos en estudio de tasas de erosión que, por diversas razones, no ha podido ser recogida en este volumen. De la Universidad de Barcelona se contó con la presencia del doctor Albert Soler y la doctora Àngels Canals; de la Estación Experimental del Zaidín, CSIC, Granada, con los doctores Emilio Reyes y Antonio Delgado; de la Universidad Politécnica de Cartagena con la doctora Marisol Manzano y, por último, de la Estación Experimental de Aula Dei, CSIC, Zaragoza, con la doctora Ana Navas.

LUIS BARBERO y PILAR MATA



Mineralogía espacial: de la materia primigenia a la exploración de Marte

JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS^(1, 2), FERNANDO RULL^(1, 2) Y ROSARIO LUNAR⁽³⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Geología Planetaria, Centro de Astrobiología (CSIC/INTA), asociado al NASA Astrobiology Institute, Ctra. de Ajalvir, km 4. Torrejón de Ardoz, 28850 Madrid.

⁽²⁾ Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid y Unidad Asociada CSIC-Universidad de Valladolid a través del Centro de Astrobiología.

⁽³⁾ Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

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 y, por ello, 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 estadio 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 web. 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 signatura 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 a estudiar.

Nos tenemos que remontar muy atrás, a casi tiempos desconocidos en el pasado remoto de la humanidad, para encontrar las primeras referencias sobre los materiales que caen del espacio a nuestro planeta, aunque, como veremos más adelante, esta concepción sobre su origen extraterrestre no fue aceptada científicamente hasta mucho después. Los fenómenos cósmicos relacionados con meteoritos, bólidos y cometas tuvieron que despertar en el ser humano los miedos más terribles. Pero también encender esa pequeña luz de la curiosidad, algo que nos hizo mirar hacia arriba con temor ante lo grandioso que nos rodea, añadiendo esa dosis casi inevitable de interés innato hacia lo desconocido que nos ha movido, desde que éramos tan sólo pequeños microorganismos, a explorar nuestro entorno.

Considerando la relevancia de todas estas ideas previas —basadas más en los mitos primitivos, leyendas y textos religiosos que en la ciencia en sí—, existe un acuerdo más o menos unánime que acepta que el descubrimiento “propiamente científico” del sistema solar como marco de referencia en el que se desarrollan los procesos cósmicos pertenece al Renacimiento. Es a par-

tir de este momento cuando los filósofos decidieron admitir y utilizar en ciencia la observación y la lógica más que la tradición en sí misma. El *cogito ergo sum* de Descartes simboliza esta actitud, aunque la aceptación de un sistema centrado en el Sol llevó, como es bien sabido, varios cientos de años.

Desde el punto de vista mineralógico, resultaría prácticamente imposible pretender incorporar en tan corto espacio toda la información existente sobre la materia constituyente de los cometas y meteoritos asteroidales conocidos. Si a ello añadimos los constantes descubrimientos sobre meteoritos lunares y de Marte es evidente que se trata de un tema en continua actualización. Sin embargo, un primer paso, casi ineludible, conlleva el establecimiento de los eventos implicados en la evolución de la nube primigenia a partir de la que se generó nuestro sistema solar tal y como lo conocemos. Esta evolución vendría definida por una serie de episodios que comenzaron hace unos 4.600 M.a., cuya caracterización es fundamental para entender los distintos tipos de materia extraterrestre conocida y que llega a nuestro planeta:

- a) Una nube de gas y/o polvo interestelar (la nebulosa solar) sufre perturbaciones (por ejemplo, debidas a las ondas de choque de una supernova cercana) y colapsa bajo su propia gravedad.
- b) Según colapsa se calienta y comprime en su zona central. El calor es suficiente para que el polvo sufra vaporización. Se supone que el colapso inicial es un proceso rápido (< 100.000 años).
- c) El centro se comprime lo suficiente para convertirse en una protoestrella y el resto del polvo/gas orbita y fluye a su alrededor. La mayor parte del gas se supone que fluye hacia el interior y se añade a la estrella en formación, aunque el gas está rotando. La fuerza centrífuga contribuye a que se genere un disco de acreción alrededor de la estrella. El disco lanza su energía hacia el exterior del conjunto y se va enfriando progresivamente.
- d) El gas se enfría lo suficiente para que los metales, rocas y hielo se condensen fuera como pequeñas partículas (de acuerdo con datos radiométricos esto tuvo lugar hace unos 4, 4-4, 6 G.a.).
- e) Las partículas de polvo colisionan entre sí y van formando otras mayores hasta la generación de cuerpos del tipo de pequeños asteroides.
- f) Una vez que estos cuerpos son suficientemente grandes para alcanzar el punto de gravedad no trivial, su crecimiento se acelera y su tamaño dependerá de múltiples factores: distancia a la estrella, densidad y composición, etc. Se cree que la acreción de estos "planetesimales" duró entre 100.000 años y 20 millones de años.
- g) Los planetesimales comenzaron a generar proto-planetas y, en paralelo, según se produjo el enfriamiento de la nebulosa, la estrella generó un fuerte viento solar que lanzó hacia las zonas más externas los volátiles y materiales menos densos que posteriormente conformarían los cuerpos planetarios no-terrestres.

- h) La distribución de elementos en el Sistema Solar nos indica que el hidrógeno y el helio son los más abundantes, con una progresión general decreciente, de acuerdo con el incremento del número atómico. Asimismo, la masa en nuestro sistema solar está principalmente concentrada en el Sol: Sol: 99,85%, Planetas: 0,135%, Cometas: 0,01%?, Satélites: 0,00005%, Planetas Menores: 0,0000002%? Meteoroides: 0,0000001%? Medio Interplanetario: 0,0000001%?

Durante y con posterioridad a la formación de los planetas terrestres originados por acreción, se produjo un bombardeo catastrófico en el que los restantes planetesimales craterizaron la mayor parte de las superficies planetarias. Los "impactores", acoplados con intensa radiactividad y subsecuente concentración gravitacional, produjeron suficiente calor para fundir y diferenciar químicamente los planetas en su actual estructura (núcleo, manto, corteza). Las atmósferas de los planetas terrestres se formaron durante este episodio y después por desgasificación. En el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter se supone que la temperatura de la nebulosa solar fue lo suficientemente baja para que minerales ricos en carbono y agua pudieran coalescer y formar planetesimales. Desde Júpiter hacia el exterior las temperaturas fueron aún más bajas, de tal manera que enormes cantidades de agua congelada pudieron acumularse con el material rocoso en los planetesimales. A temperaturas todavía inferiores se formarían otros hielos, tales como de amonio y metano, dando a los planetesimales distantes una composición mezclada de hielo de agua, amonio y metano impregnada con una pequeña cantidad de material rocoso.

El Sistema Solar contiene desde sus orígenes una población de cometas y asteroides en continua evolución. Partículas de diversa composición y meteoritos procedentes de distintas fuentes (cometas, asteroides, planetas), además de polvo interplanetario intra y extranebular, alcanzan la Tierra. Nuestro planeta se ubica dentro de un conjunto de cuerpos que pueden (y lo han hecho) colisionar con su superficie. De aquí la importancia de los estudios mineralógicos y geoquímicos relacionados con impactos meteoríticos, como uno de los procesos geológicos más relevantes y extendidos en nuestro sistema solar. *La Tierra se encuentra en una interacción permanente con el espacio exterior.*

ASTROMINERALOGÍA: POLVO COMETARIO-IDP's

Los cometas son cuerpos de formas irregulares, frágiles y pequeños, compuestos por una mezcla de granos no volátiles y gases congelados. Tienen órbitas muy elípticas que los lleva muy cerca del Sol y los devuelve al espacio profundo, frecuentemente más allá de la órbita de Plutón. Sus estructuras son diversas y muy dinámicas, pero todos ellos desarrollan una nube de material difuso que los rodea, denominada cabellera, que general-

mente crece en tamaño y brillo según se acerca al Sol. Básicamente, los cometas están constituidos por gases congelados H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 y HCO_2 y embebidos en las estructuras del hielo se encuentran granos de materiales no volátiles (es decir, materiales que no pasan de sólido a gas fácilmente, tal y como silicatos, compuestos complejos de carbono y otros), que forman lo que se denomina "polvo cometario". La sonda GIOTTO atravesó el cometa Halley a gran velocidad y pudo registrar algunos espectros de las partículas que la impactaban. La mayoría de los granos de polvo eran carbonáceos, justificando la descripción del material como "CHON (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno)".

Estas partículas de polvo cometario son una parte importante de las denominadas IDPs (Interplanetary Dust Particles) que algunos autores también han homologado al "cosmic dust" de génesis diversa intra, e incluso, extranebular. Como se ha indicado previamente, la Tierra está constantemente siendo bombardeada por pequeñísimas partículas de polvo extraterrestre. Se ha estimado que alcanza nuestro planeta un flujo de unas 100 toneladas/día con tamaños promedio de unas 200 μm . Normalmente se piensa que este polvo deriva de colisiones entre asteroides y de cometas. En su mayor parte presenta una composición similar a la de los meteoritos condriticos y distinta a la de las rocas corticales terrestres. Por ejemplo, los elementos siderófilos, tales como el Ir y Os, están enriquecidos y tienen ratios isotópicos distintivos en las IDPs, cuando se comparan con los materiales de la corteza terrestre. Ello hace posible su reconocimiento y cuantificación en el registro sedimentario.

Muchas de estas IDPs están constituidas predominantemente por plaquitas de silicatos interestelares (por ejemplo enstatita) y lo que se ha denominado GEMS ("Glass with Embedded Metal and Sulfides"). Otro tipo de IDPs son los granos presolares. Actualmente se han descubierto siete tipos principales de granos presolares: diamante, carburo de silicio (fig. 1), grafito, nitruro de silicio, óxido de aluminio, espinela y óxido de titanio. Recientemente se han encontrado incluso carbonatos (calcita) cuya génesis está aún por resolver.

Diamante: son los granos de menor tamaño que han sido identificados hasta el momento (unos 2 nanómetros), conteniendo solamente unos mil átomos. La prueba de que son presolares viene dada sobre todo porque contienen xenón y nitrógeno isotópicamente inusuales.

Carburo de silicio: son probablemente los más y mejor estudiados, con tamaños entre 0,1 y 20 μm (fig. 1). Presentan composiciones isotópicamente inusuales de silicio, carbono, nitrógeno, magnesio, calcio, titanio y muchos otros. Se piensa que se han formado en estrellas "AGB" (un cierto tipo de gigantes rojas muy antiguas ricas en carbono), aunque algunos granos muestran composiciones isotópicas que indican otras fuentes estelares, incluyendo novae y supernovas.

Grafito: pueden ser relativamente grandes, hasta 20 mm de diámetro. Tienen una composición isotópica inusual en un gran número de elementos. Muchos de ellos tienen una estructura en capas de grafito, como la de una cebolla. Los propios granos de grafito hospedan

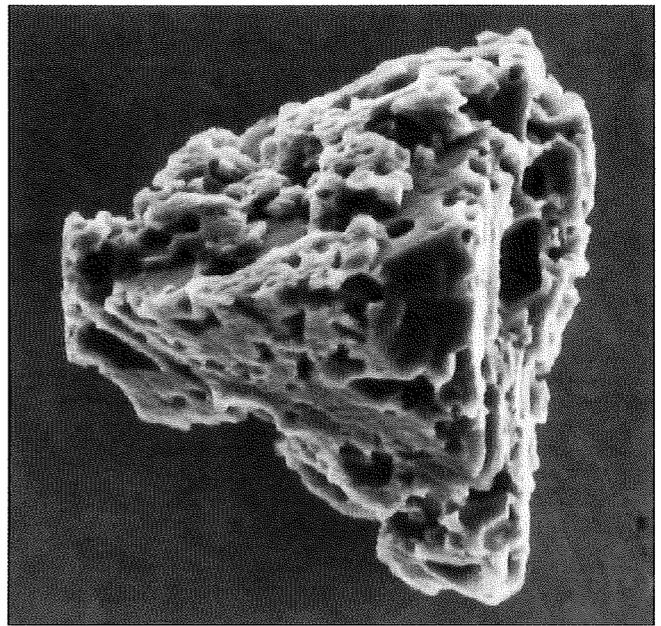


FIGURA 1. Partícula (IDP) de SiC, considerado uno de los granos presolares más frecuentes desde el punto de vista composicional. Tamaño del cristal: 10 μm .

sub-granos de otros minerales, tales como carburo de silicio y Fe-Ni.

Nitruro de silicio: sólo se han recuperado unos pocos granos con esta composición. Aunque son similares a los de carburo de silicio en tamaño y apariencia, son mucho menos comunes. Su composición isotópica indica que se formaron probablemente en explosiones de supernova.

Óxido de aluminio, espinela y óxido de titanio: solamente se han encontrado hasta el momento unos 150 granos presolares ricos en oxígeno, en contraste con los miles de granos de SiC y grafito. Los más frecuentes son de óxido de aluminio. Su composición isotópica indica que se formaron en gigantes rojas y estrellas AGB ricas en oxígeno. Sin embargo, uno o dos granos también presentan firmas isotópicas de supernovas y otros tienen origen desconocido.

METEORITOS ASTEROIDALES Y PLANETARIOS (MARTE Y LA LUNA)

Hace algo más de 200 años, E.F.F. Chladni, investigador de la Universidad de Berlín, se atrevió a proponer que los meteoritos no se generaron en la Tierra, sino que procedían del espacio exterior. Salvo contadas excepciones como Olbers en Alemania y Howard en Gran Bretaña, la respuesta de la comunidad científica de finales del siglo XVIII fue prácticamente unánime en su contra. A pesar del rigor científico de la época, los expertos llegaron a la conclusión de que la caída de los meteoritos sobre la Tierra era imposible. Como se suele hacer cuando no se entiende algo, o no se encuentra una explicación dentro de lo establecido, la ya conocida ultraortodoxia de la "ciencia oficial" negó la mayor y

todos los casos de caídas fueron considerados absurda ficción. Especialmente importantes por la significación del personaje fueron los comentarios de Lavoisier, quien incluso firmó un memorando en 1772 con otros científicos de la Academia de Ciencias de París que concluía de la siguiente manera:

“...Las piedras a las que se asignó un origen cósmico no son más que corrientes rocas terrestres que han sido alcanzadas por un rayo [...]” “[...] la caída de piedras del cielo es físicamente imposible [...]”

Este comportamiento de no aceptación de un fenómeno de origen desconocido como real, retardó el desarrollo de la ciencia de los meteoritos. Born, otro conocido mineralogista, cuya reputación podría ser puesta en duda por culpa de una colección de meteoritos, ordenó que todos ellos fueran descartados de la colección imperial en Viena. El resultado es que estas muestras únicas se perdieron para siempre. Tuvieron que pasar casi 10 años, durante los que Chladni sufrió el descrédito y las burlas de sus colegas, hasta que Biot, un miembro de la Academia de París, corroboró sus ideas tras estudiar la caída meteorítica que tuvo lugar el 26 de abril de 1803, cerca de la torre del Águila, en el norte de Francia. Una vez que su origen fue reconocido, los meteoritos ganaron rápidamente el interés y la popularidad de los científicos, y a finales del siglo XIX ya existían cientos de análisis detallados sobre su composición en una euforia analítica casi sin precedentes.

Básicamente, un meteorito puede definirse como un fragmento de material natural extraterrestre que alcanza la superficie de la Tierra; son residuos muy primitivos, que nos proporcionan datos cruciales acerca de la materia en los orígenes de nuestro sistema solar. Algunas veces el término meteorito se confunde con dos términos relacionados: meteoroide y meteorito. El meteoroide es un objeto pequeño que entra en la atmósfera terrestre y el fenómeno que produce se denomina meteorito. La mayoría de los meteoros que se observan (incluso cuando alcanzan la magnitud de *fireball*: bola de fuego, *no* llegan a impactar en forma de meteoritos. Cualquier intento de establecer una relación entre un hallazgo (meteorito encontrado) y el avistamiento de un evento de tipo bólido, bola de fuego o cualquier lluvia de fragmentos determinada, implica que existan sólidos fundamentos científicos para la determinación de su “edad terrestre” mediante la utilización de dataciones isotópicas u otros métodos “complementarios” (por ej. termoluminiscencia). Solamente de esta manera se podrá establecer de forma inequívoca dicha conexión, obteniendo el tiempo que el meteorito ha estado en la Tierra y evitar asignaciones erróneas (o inducidas de manera fraudulenta), de supuestos hallazgos meteoríticos con determinados avistamientos multitudinarios de bólidos. Desafortunadamente, este hecho a veces ha sucedido, propiciado por algunos coleccionistas y traficantes de meteoritos, con el simple objeto de incrementar el valor crematístico de las piezas para que museos u otras instituciones se interesen por ellos y los adquieran.

La mayor parte de los meteoritos son fragmentos procedentes de los asteroides, considerados sus principales cuerpos “padre”. Los asteroides son objetos rocosos y metálicos que orbitan alrededor del Sol, pero que son demasiado pequeños para ser considerados como planetas. Están constituidos por el material que sobró durante la formación del Sistema Solar. Dieciséis asteroides tienen un diámetro igual o superior a 240 km. Se han encontrado desde el interior de la órbita de la Tierra hasta más allá de la órbita de Saturno. La mayoría, sin embargo, están dentro del cinturón principal que existe entre las órbitas de Marte y Júpiter. Varios autores han sugerido que son los restos de un planeta que fue destruido por una gran colisión hace mucho tiempo. Sin embargo, es más probable que los asteroides sean el material que no llegó nunca a acrecionar para formar un planeta. De hecho, si se estima la masa total de todos los asteroides y se concentra en un solo objeto, este tendría menos de 1.500 km de diámetro.

Los asteroides de mayor tamaño y más representativos son: Ceres, con un diámetro de unos 1.030 km, y Pallas y Vesta, con diámetros de unos 450 km. Aproximadamente 200 asteroides tienen diámetros de más de 100 km, y existen miles de asteroides más pequeños. Como ya se ha indicado, la masa total de todos los asteroides del Sistema Solar es mucho menor que la masa de la Luna. Los cuerpos más grandes son más o menos esféricos, pero los que tienen diámetros menores de 160 km suelen presentar formas alargadas e irregulares. Quizá, en un principio, existieran unas pocas docenas de asteroides que posteriormente se fragmentaron en colisiones mutuas hasta producir el número actual. Un extraño asteroide del grupo Apolo, Faetón, de unos 5 km de ancho, se acerca al Sol más que cualquier otro asteroide conocido (20,9 millones de km). También se le relaciona con el regreso anual de la corriente de meteoros de Géminis.

Por término medio, una vez cada pocos cientos de años la Tierra es alcanzada por un objeto de unos 70 m de diámetro; cada diez mil años nos golpea un objeto de unos 200 m, y cada millón de años se produce el impacto de un cuerpo de más de 2 km de diámetro. Por último, cada 100 millones de años tiene lugar una catástrofe como la que sucedió, en el límite K-T, cuando se produjo el choque de un cuerpo de unos 10 km de diámetro o más contra nuestro planeta, al que se ha responsabilizado de la gigantesca estructura de impacto de Chicxulub, en el Golfo de México.

La energía liberada como consecuencia de los impactos meteoríticos es tremenda, de unos 10 Mt TNT para un cuerpo de unos 50 m. El paso de 100 a 200 m prácticamente multiplica por 10 la energía producida, de 75 a 600 Mt, y un impactor de alrededor de 1 km produciría una energía de 75.000 Mt. Se ha estimado que el área devastada por la colisión sería de unos 1.900 km² para un cuerpo de 50 m, 7.200 km² para uno de 100 m, 29.000 km² para uno de 200 m, 70.000 km² para uno de 500 m y 200.000 km² para un asteroide con un tamaño de alrededor de 1 km. A partir de un tamaño de 1,5-2 km la devastación sería total, a escala de todo el planeta. El registro más antiguo de grandes eventos de impacto en

nuestro planeta son las capas de esférulas del Arcaico inferior (3,5 a 3,2 Ga) que se han identificado en el "Barberton Greenstone Belt", en Suráfrica. Pero la dinámica geológica terrestre ha hecho que desaparecieran la mayor parte de las huellas y evidencias de estas gigantescas colisiones en un proceso que inexorablemente, con el paso del tiempo, va renovando la corteza.

Teniendo en cuenta que los meteoritos pueden alcanzar la Tierra con velocidades de 72 km/s, la energía cinética del impactor puede ser de 620.000 cal/g. La reducción de la energía cinética y potencial del meteorito durante su descenso suele ir acompañada de un incremento de la energía térmica del aire de alrededor, parte de la cual se transfiere a la superficie del meteorito. Esta fracción depende de la forma y velocidad de caída y de la altitud en que se encuentra el impactor. El calor se transmite del aire caliente al cuerpo por conducción y convección e incrementa su temperatura superficial que puede ser estimada en 273 °K (0 °C) cuando llega del espacio. El meteorito está frío cuando impacta contra el suelo y no se conocen casos, hasta el momento, de meteoritos que nada más caer no puedan mantenerse entre las manos. Si toda la energía cinética del meteorito se transformara en energía térmica, éste podría vaporizarse en su totalidad. Además de esta vaporización debida a la transformación de energía cinética en térmica, también se estima que durante su entrada en la atmósfera se pierde aproximadamente entre 1 y 4 mm por segundo de material. Esto significa, para velocidades de entrada de unos 10 km/s, que la pérdida puede, dependiendo evidentemente de su tamaño, alcanzar hasta el 100% del meteorito. Todas estas consideraciones son cruciales antes de abordar la investigación geológica de los resultados de los impactos. El primer cráter en la Tierra que fue ampliamente aceptado como de tipo meteorítico, no sin dificultades, fue el Barringer Meteor Crater alrededor del cual se encontraron fragmentos de meteoritos. En la actualidad, se han identificado alrededor de 170 estructuras de impacto (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>), con diámetros de unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros. Otros resultados verificables en el registro geológico, además de la formación de cráteres de impacto, implican: 1) la generación de nuevas fases minerales, como polimorfos de alta presión (ej. coesita), debidos a la transformación de minerales preexistentes en las denominadas "target rocks" (rocas afectadas por el impacto), 2) la formación de auténticas rocas de impacto "impact melts", que reciben distintas denominaciones (impactitas, suevitas...), 3) la existencia de anomalías en determinados elementos comunes en los meteoritos y escasos en la corteza, como por ejemplo el iridio, 4) la presencia de gases atrapados en el interior de fulerenos cuya signatura isotópica es extraterrestre, 5) el desarrollo de texturas de impacto a micro (PDF: "Planar Deformation Features") y meso y macroscale ("shatter cones") y 6) muchos otros criterios geodinámicos.

Composicionalmente, el principal propósito de las clasificaciones de los meteoritos es repartirlos en grupos de objetos similares que permitan comprender mejor su origen e interrelaciones. Una clasificación anti-

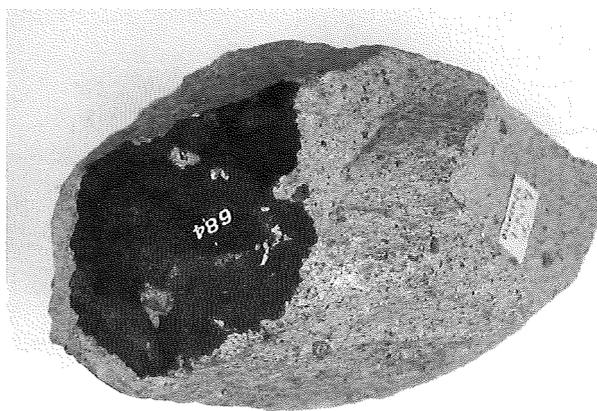


FIGURA 2. Ejemplar del meteorito caído en Olivenza (Badajoz) perteneciente a la colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid. Se trata de una condrita LL5 caída el 19 de junio de 1924. Peso del ejemplar: 50.076 g. Foto: MNCN.

gua, pero todavía muy utilizada, es la que los presenta en tres grandes grupos, de acuerdo con su abundancia modal en metal: los féreos o sideritos (irons), los petroféreos o siderolitos (stony-irons) y los pétreos o lititos o aerolitos (stony) (figs. 2 y 3). Estos últimos comprenden a su vez dos subgrupos importantes: condritas y acondritas. Según el número de caídas observadas, los lititos parecen ser unas quince veces más abundantes en el Sistema Solar que los sideritos y los siderolitos. No obstante, la proporción real es incluso mayor, ya que los lititos son más frágiles, y se desintegran con mayor facilidad en su paso por la atmósfera. A fecha de diciembre de 1999 se ha observado caer unos 1.000 meteoritos, aunque esto sólo representa una pequeña fracción de los objetos que nos llegan, la mayoría de los cuales se precipitan a los océanos o en áreas despobladas. Al contrario, se han encontrado más de 20.000 meteoritos, muchos de ellos a partir de 1969, cuando se descubrió que éstos se acumulan y conservan en canti-



FIGURA 3. Típico fragmento de meteorito siderítico. Obsérvense las estrías y regmaglifs en su superficie. Dimensiones: 50 x 45 x 38 cm.

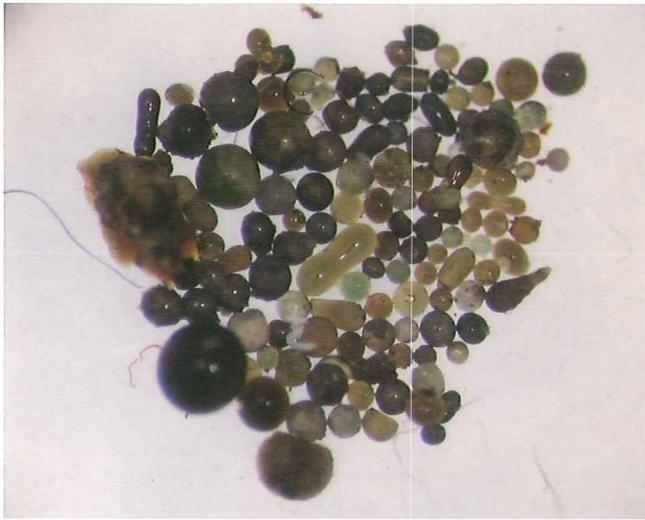


FIGURA 4. Esférulas de vidrio procedentes del regolito (suelo) lunar.

dad en las superficies heladas de la Antártida, y en desiertos como los del norte de África o el de Atacama (Chile). Sin embargo, apenas se recupera un 1% de las toneladas de material extraterrestre que alcanzan la superficie de la Tierra cada día.

Si previamente se había indicado que la mayor parte de los meteoritos proceden de los asteroides, también es cierto que un número mucho menor de ellos que alcanzan la superficie terrestre proceden de grandes impactos sobre planetas (Marte) o la Luna. Igual que existen criterios de distinta índole que permiten diferenciar las rocas terrestres de los meteoritos también existen criterios mineralógicos, estructurales, cosmogeoquímicos e isotópicos bien establecidos que permiten diferenciar aquellos que tienen un origen asteroidal de los meteoritos planetarios. Los meteoritos a los que se ha asignado un origen marciano se denominan SNCs, de acuerdo con las siglas de los tres primeros "ejemplares tipo": Shergotti, caído el 25 de agosto de 1865, Nakhla, caído el 28 de junio de 1911 y Chassigni, caído el 3 de octubre de 1915. Si hubiera que definir brevemente cuáles son los rasgos principales de los SNCs frente al resto, éstos son: *a)* tienen 1,3 Ga (o más jóvenes); *b)* tienen un mayor contenido en volátiles; *c)* presentan ratios Fe/Si vs. Ca/Si y Fe/Mn vs. Na/Si y Al/Si vs. Mg/Si diferenciales. Pero, sobre todo, la distribución de los gases atrapados en su interior coincide con la de la atmósfera de Marte.

También se distinguen los meteoritos de tipo lunar o "lunaitas" (procedentes de la Luna). Para su identificación fue fundamental el estudio de los más de 380 kg de muestras lunares que se recolectaron en las misiones Apolo. Gracias a ellas, hoy se pueden discriminar los principales tipos de rocas lunares, que son básicamente: 1) rocas gabroides de la serie ANT (Anortosita-Noritroctolita) y basaltos ricos en alúmina de las zonas elevadas. Edad: 4,6-4,0 Ga; 2) rocas basálticas ricas (KREEP). Edad: 4,0 y 3,8 Ga; 3) rocas basálticas de tipo FETI que extruyeron como coladas entre los 3,8 y 3,2 Ga y 4) numerosas variedades de brechas de impacto y depósitos piroclásticos dispersos en el regolito lunar (fig. 4).



FIGURA 5. Impresionante aflojamiento de "El Capitán", zona de Meridiani Planum (Marte) fotografiado por la Opportunity (enero 2004) en el que se han encontrado importantísimas evidencias mineralógicas (hematites, jarosita) y texturales que confirman la existencia pasada de agua líquida, que en algún momento afectó a estos materiales. Foto: NASA.

Como hemos visto todos estos estudios relacionados con la geología planetaria se centran básicamente en la caracterización del polvo interplanetario y los meteoritos y del resultado (mineralógico, petrológico, textural, estructural, etc.) de sus impactos contra nuestro planeta. Este mismo año hemos sido testigos de varios éxitos de la NASA y de la ESA relacionados con la investigación de Marte, con la identificación y descubrimiento de varias fases minerales, como la jarosita indicativas de la presencia de agua líquida para su formación (figs. 5-8). Sin embargo, se puede hacer también mineralogía espacial de manera indirecta, abordando la investigación de determinadas zonas de nuestro planeta que podrían ser consideradas "modelos análogos" a lo

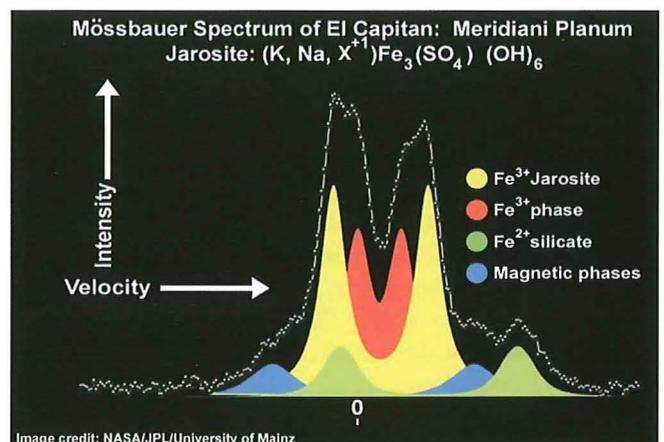


FIGURA 6. Espectro Mossbauer de la jarosita descubierta en "El Capitán", Meridiani Planum (Marte). Foto: NASA.

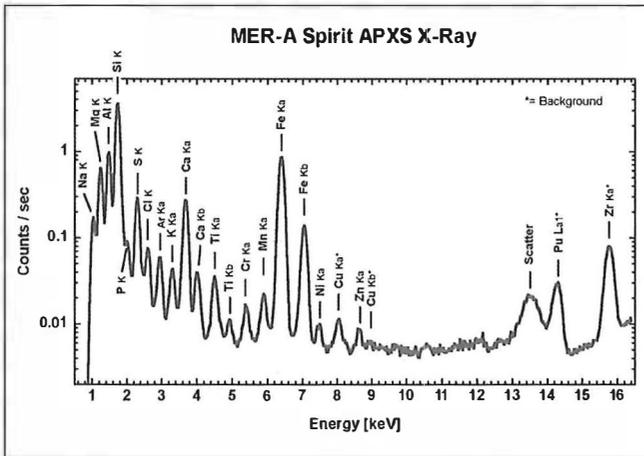


FIGURA 7. Distribución de elementos determinada por la sonda "Spirit" en el cráter Gusev de Marte.

que se espera encontrar en Marte, Venus, Europa u otros cuerpos planetarios de nuestro sistema solar. El caso de varias zonas de la Antártida es bien conocido y existen multitud de estudios que así lo demuestran, pero en España también disponemos de excelentes zonas muy interesantes como Río Tinto (fig. 9) o El Jaroso que han despertado el interés internacional de la NASA y muchos otros expertos internacionales.

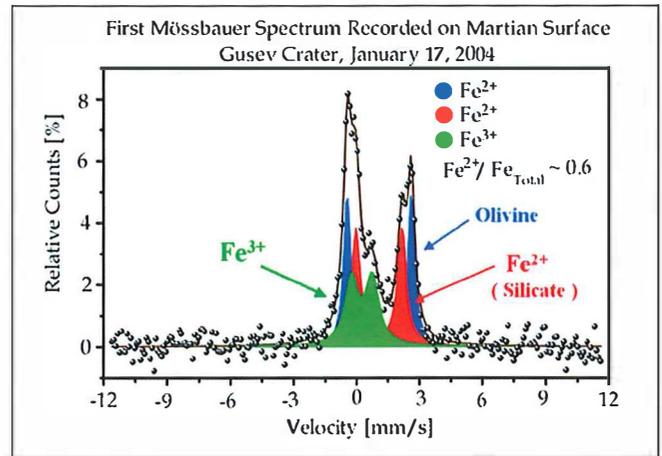


FIGURA 8. Espectros indicativos de olivino y silicatos de hierro obtenidos en el cráter Gusev de Marte. Foto: NASA.

La mineralogía espacial es una nueva disciplina que está tan sólo empezando a desarrollarse en nuestro país, pero nuestra riqueza geológica en tipologías de afloramientos de distinta edad y marcos geodinámicos y metalogénicos auguran un futuro muy prometedor en la identificación de nuevos "análogos", sobre la base también de estudios combinados de meteoritos asteroidales y planetarios, y sus impactos.



FIGURA 9. Detalle del agua en una zona rica en óxidos y sulfatos de hierro en Río Tinto (zona propuesta y actualmente en estudio como posible análogo de Marte).

Espectroscopia Raman: una herramienta al servicio del Patrimonio Histórico y Artístico

A. CARMELO PRIETO COLORADO Y FERNANDO RULL PÉREZ

Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía

Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid. 47011 Valladolid, España

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la utilización de la espectroscopia Raman se ha extendido rápidamente a casi todas las disciplinas científicas. Ello es debido, en parte, al gran avance tecnológico alcanzado en el campo de la microelectrónica que permite miniaturizar equipos y utilizar modernos sistemas de detección, y en parte a la puesta en valor de las enormes posibilidades científicas y gran polivalencia de esta técnica de análisis instrumental. No hay muchas técnicas instrumentales de análisis físico-químico que puedan ser aplicadas independientemente del estado de agregación de la materia (sólidos, líquidos, gases, vapores y aerosoles) ya sea molecular o cristalina, orgánica o inorgánica, a alta o baja temperatura (T) y/o presión (P). Se puede utilizar en análisis de superficies o de materia ocluida bajo agua, vidrios o minerales (inclusiones fluidas), o en geoquímica planetaria, con volúmenes y escalas analíticas de milímetros o micrómetros, con posibilidad de cartografiado 3-D e imagen Raman superficial, en objetos de tamaño grande, normal o casi invisible, sustancias puras o mezclas y aleaciones. No precisa trabajar en vacío ni de revestimientos superficiales, ni por supuesto preparación alguna de la muestra. Además, es capaz de detectar diferencias entre elementos químicos en compuestos iónicos de coordinación, a veces se pueden diferenciar isótopos y estados de oxidación tanto de elementos ligeros como pesados.

Los últimos e incesantes avances tecnológicos concernientes al desarrollo de nuevas fuentes láser, espectrómetros, sistemas de detección, componentes electrónicos y de control, junto con la miniaturización derivada del progreso en microelectrónica, han propiciado en paralelo, que se aumente la resolución espectral y la eficiencia en términos de calidad y rapidez. Así, en poco menos de treinta años se ha pasado de equipos que ocupaban una habitación completa y tiempos de adquisición de espectros largos y tediosos, a instrumentos convencionales que precisan menos de 1 m² de superficie o los sofisticados portátiles que pueden ser introducidos en un simple ordenador de bolsillo, precisando de pocos segundos para obtener un análisis de calidad.

Cuando una radiación pasa a través de un medio transparente cristalino, molecular o amorfo, ya sea sólido, líquido o gas, una fracción del haz se dispersa en todas las direcciones. Una pequeña porción de la radiación dispersada por ciertas moléculas presenta pequeñas diferencias en su número de onda respecto de la

radiación incidente. Este desplazamiento depende directamente de la estructura química de las moléculas constituyentes del medio dispersante y ello es conocido como "Efecto Raman".

Fue predicho por Smekal (1923), desarrollado por Kramers-Heisenberg (1925) y evidenciado científicamente por primera vez por Chandrasekhara Venkata Raman en 1928. Su biografía indica que C.V. Raman quedó impresionado, durante el verano del año 1921, en el transcurso de un viaje a Europa, por el intenso color azul que presentaba el mar Mediterráneo. De inmediato supuso que ello pudiera ser debido a la dispersión de la luz por parte de las moléculas del agua (Long, 1998). La verificación de tal supuesto implicaba establecer las leyes que rigen los fenómenos de dispersión de la luz por los líquidos. Pero es en una reunión, celebrada en Toronto en 1924, sobre el recientemente descubierto efecto Compton, cuando toma cuerpo la idea de un efecto similar pero de tipo óptico. El 16 de febrero de 1928, C.V. Raman junto con K.S. Krishnan envían a la revista *Nature* la nota "A new type of secondary radiation" (Raman and Krishnan, 1928) donde describen este posible fenómeno. Se inicia un proceso de amplia difusión escrita de sus trabajos, destacando junto al artículo precursor, publicado en *Nature* el 31 de marzo, que a finales del año 1928 se publican en torno a los 70 artículos referentes al efecto Raman y sus primeras aplicaciones.

En 1930 C.V. Raman recibe el premio Nóbel de Física por su descubrimiento. Pero también es justo recordar que sus investigaciones en la difusión de la luz o radiación secundaria no fueron aisladas, si no que, de modo paralelo en el tiempo, las escuelas francesa y rusa trabajaron con éxito en el mismo efecto. Yves Rocard envía el 23 de abril de 1928 una nota a la Academia de Ciencias de Francia dando cuenta de "Las nuevas radiaciones difundidas" y Jean Cabannes, el 30 de abril, presenta otra nota a la Academia: "Analyse spectroscopique de la lumiere obtenue par diffusion moleculaire d'une radiation monocromatique au sein d'une fluide". *Comptes Rendus*, 186, 1523, 1928. A su vez y sin aparentes lazos de unión ni con la escuela francesa ni con los trabajos del Profesor Raman, G. Langsber y L. Mandelstam envían el 6 de mayo de 1928 a la revista *Die Naturwissenschaften* el artículo "A new phenomenon in light scattering by crystals" con un espectro del cuarzo (SiO₂) como ejemplo aplicado del nuevo efecto.

Desde aquellos tiempos iniciales, el desarrollo de la espectroscopia Raman ha tenido diversas etapas, pa-

sando de ser una técnica casi exclusiva de laboratorios de física de sólidos, a ser aplicada en la caracterización de todo tipo de materiales. Las fibras ópticas, ópticas integradas, y micro ópticas han alcanzado un alto grado de sofisticación y en combinación con los diodos láser aumentan las posibilidades analíticas del Raman. La amplia gama de diseños en fibras ópticas pueden satisfacer las necesidades más difíciles descritas en el análisis de materiales. Incluso es posible guiar la radiación incidente y colectarla a larga distancia (hasta 200 m), lo que permite un grado de movilidad y análisis *in situ* que otras técnicas no poseen. Todo ello, las mejoras introducidas por la presencia de fibras ópticas, detectores bidimensionales de CCD, espectrógrafos de reducido tamaño, acoplamiento de microscopios petrográficos y la utilización de paquetes informáticos de adquisición y tratamientos de señales Raman, han propiciado una rápida expansión de su utilización en los más variados campos científicos y la espectroscopia Raman es utilizada, hoy en día, desde la investigación básica hasta la investigación aplicada y el análisis industrial.

Dado que la energía puesta en juego en la dispersión Raman se corresponde con las vibraciones atómico-moleculares, el espectro Raman se corresponde con el espectro vibracional de la sustancia analizada. Por consiguiente es complementario del espectro de absorción infrarroja, y depende de la composición y estructura estática o de equilibrio del material analizado, reflejando su estructura dinámica. A pesar de que hasta épocas recientes la espectroscopia Raman no ha sido utilizada, de modo general en nuestros laboratorios, para analizar la estructura dinámico-vibracional de fases minerales, hoy se ha convertido en una poderosa herramienta para el análisis estructural y físico-químico *in situ* de todo tipo de materiales.

A modo de resumen las ventajas principales de la espectroscopia Raman para alcanzar esta privilegiada situación son:

- Carácter no destructivo y a veces mínimamente invasivo.
- Altamente específica para cada analito, en composición química y estructura, dado que los mo-

dos vibracionales son únicos para cada especie química en un entorno estructural.

- Alto poder de resolución espacial, que en el caso de la espectroscopia microRaman está limitada por el criterio de difracción Rayleigh.
- Posibilidad de análisis *in situ* de muestras, independientemente del tamaño y forma que presenten.

Casi todos los objetos del patrimonio histórico y artístico precisan de estas características instrumentales: no perturbación de la muestra, análisis *in situ* macro y microscópico y alta resolución espacial. Así pues, se pretende en este trabajo presentar un amplio espectro de aplicaciones en la caracterización de obras del Patrimonio Histórico y Artístico mediante espectroscopia Raman.

EL EFECTO RAMAN

De modo resumido se puede definir el efecto Raman como un fenómeno de difusión inelástico de la luz por la materia. Cuando una radiación monocromática de frecuencia ν_0 , pasa a través de un medio transparente la mayor parte de ella es transmitida, algunos fotones son absorbidos y una pequeña parte son dispersados en todas las direcciones del espacio (fig. 1).

Estos fenómenos de dispersión son observables en nuestro quehacer diario. La luz solar es básicamente radiación blanca, con rango amplio de longitudes de onda y dado que la longitud de onda en el rango del azul es menor que la de la luz roja, se dispersa más que esta última, siendo esta razón por la que normalmente vemos el cielo azul. Por el contrario, al amanecer o atardecer, la luz que recibimos es la que ha sufrido una menor dispersión, y por ello percibimos el cielo con coloración rojiza. La intensidad de la luz dispersada depende del tamaño y naturaleza de la partícula o molécula centro de dispersión, geometría y ángulo de la detección respecto al haz incidente y frecuencia e intensidad de la radiación incidente.

Los fotones dispersados son de dos tipos fundamentales, unos con la misma energía que la radiación incidente (dispersión elástica o Rayleigh, que es la más común y

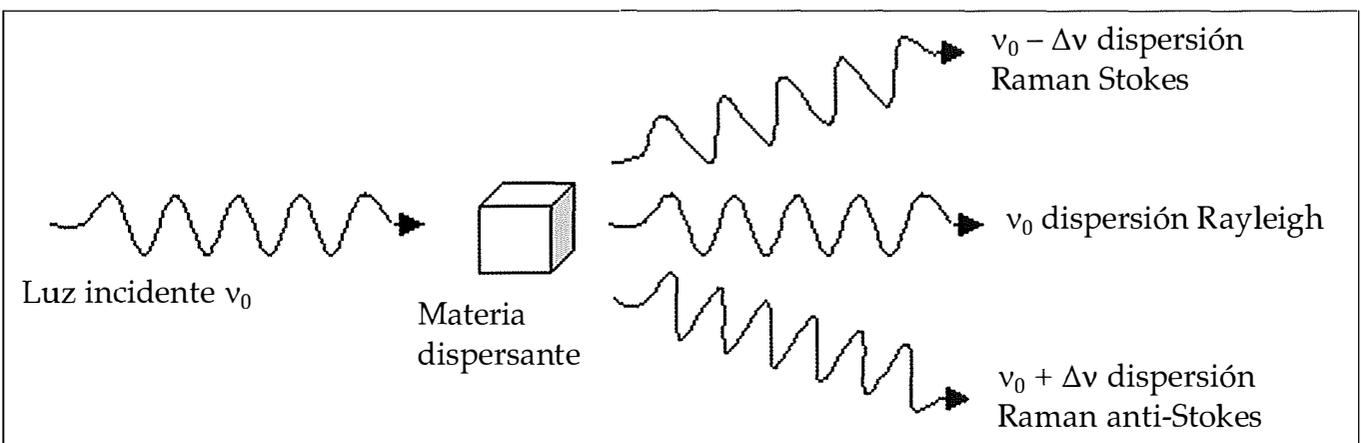


FIGURA 1. Esquema del proceso de dispersión de la luz por la materia.

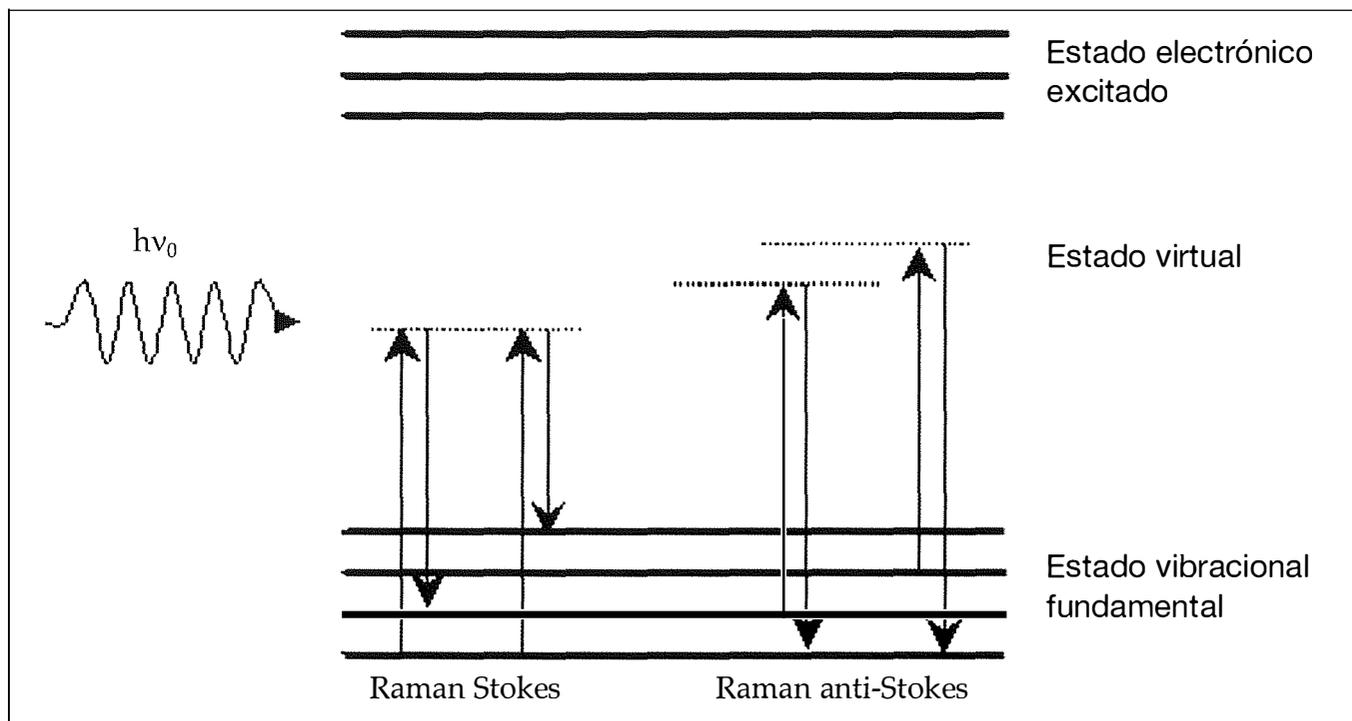


FIGURA 2. Esquema energético del Efecto Raman.

permite observar los objetos) y otros con diferente frecuencia (dispersión inelástica o Raman). La eficiencia de estos últimos es de 1-2 fotones por cada 10^{10-12} fotones incidentes. Esto supuso, la principal restricción al progreso de la espectroscopia Raman. El fotón dispersado puede tener menor energía que el de la radiación incidente (dispersión Raman Stokes) o mayor (dispersión Raman anti-Stokes) (fig. 1). Así pues, en el proceso Raman intervienen dos fotones de diferentes energías. La diferencia de energía se corresponde con cambios de estado, rotacionales o vibracionales de las moléculas, causados por la interacción con fotones. En consecuencia, el análisis de los espectros Raman ofrece información sobre propiedades moleculares relativas a los modos y tipos de vibraciones.

En términos de diagramas de niveles de energía, el proceso se esquematiza en la figura 2. Cuando el haz incidente interactúa con una molécula, la energía puesta en juego no es suficiente para promocionar electrones a un nivel electrónico superior, alcanzando sólo niveles energéticos "virtuales", por ello la dispersión Raman sólo involucra cambios en los niveles vibracionales de la molécula.

Además, como en condiciones normales la población electrónica de estados excitados es muy inferior a la del estado fundamental, la dispersión Raman Stokes será algo más intensa que la Raman anti-Stokes. Como se puede observar, en la figura 2, la diferencia de energía y por tanto de frecuencia es independiente de la longitud de onda utilizada como excitación, dependiendo sólo del salto vibracional promocionado. Por ello, tomando la energía incidente como origen, las líneas Stokes y anti-Stokes se dispondrán simétricamente respecto de la línea intensa de difusión elástica Rayleigh, con los mismos números de onda, y distinto signo, siendo

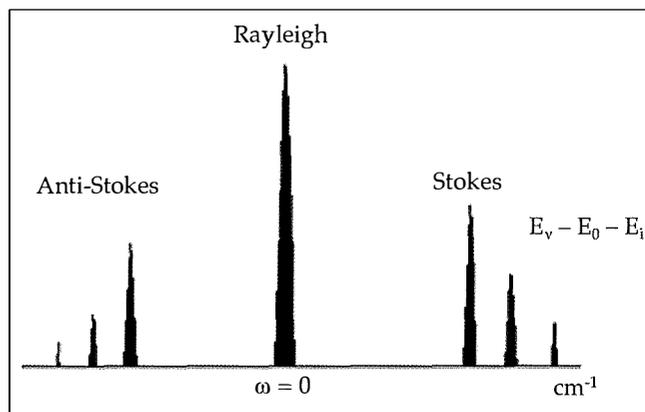


FIGURA 3. Esquema de registros (Stokes y anti-Stokes) de un espectro Raman.

las líneas Stokes algo más intensas que las anti-Stokes, por la razón antes expuesta. En la figura 3 se representa, de modo esquemático, el proceso general, con intensidades relativas y desplazamientos del número de onda de los modos vibracionales en cm^{-1} .

Existe abundante teoría acerca del efecto Raman, y una descripción detallada se escapa del objeto de este trabajo, pero análisis teóricos avanzados sobre espectroscopia Raman se pueden ver en las referencias (Ferraro y Nakamoto, 1994; Graselly y Bulkin, 1991; Hendra, Jones y Warnes, 1991; Laserna, 1996; Long, 1978, 1998; Nakamoto, 1997; Rull, 1993, y Strommen y Nakamoto, 1984).

La propiedad de la materia ligada directamente al efecto Raman es la polarizabilidad electrónica molecular α . Cuando una molécula, supuestos sus átomos en reposo se sitúa en un campo eléctrico \vec{E} , la nube electrónica que constituye sus enlaces se desplaza respecto

de la posición de la estructura nuclear positiva inicial, siguiendo la dirección del campo eléctrico \vec{E} . Esta distorsión, denominada polarización, induce un momento dipolar eléctrico. Para campos pequeños, como son los asociados a las o.e.m. de los láseres utilizados en espectroscopia Raman, el valor de este momento dipolar inducido \vec{P} , es proporcional al campo eléctrico, \vec{E} .

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}$$

La constante de proporcionalidad [α] es la polarizabilidad de la molécula y mide la facilidad de "modificación o desplazamiento" de la nube electrónica, con \vec{E} . Esta magnitud, en general, se representa mediante un tensor de segundo orden cuyas componentes caracterizan inequívocamente a la molécula en cuestión. Dado que el campo eléctrico es fluctuante y varía con el tiempo, generalmente de modo sinusoidal, se debe analizar el comportamiento de la materia ante este tipo de campos con frecuencias del tipo de las asociadas a la luz visible (10^5 cm^{-1}). En estas condiciones energéticas, sólo las nubes electrónicas fluctúan con el campo, ya que los núcleos, por poseer la mayor parte de la masa del sistema, no pueden seguir las alternancias impuestas por el campo eléctrico. Como consecuencia se genera un dipolo eléctrico inducido y oscilante de la misma frecuencia del campo incidente, \vec{E} y capaz, a su vez, de ser fuente de radiación electromagnética (Radiación Rayleigh). La polarización inducida por el campo eléctrico consta de tres términos. El primer término representa la evolu-

ción en el tiempo de la parte del vector polarización inducido \vec{P} , con igual frecuencia a la radiación incidente, correspondiéndose con la difusión Rayleigh. Los otros dos términos constituyen la denominada contribución Raman de la difusión, que se descompone en contribuciones anti-Stokes, y Stokes, de frecuencia inferior y superior a la radiación incidente, existiendo difusión Raman solamente si el valor de la polarizabilidad derivada α'_{kr} en el equilibrio es distinta de cero.

INSTRUMENTACIÓN RAMAN

Los espectros han sido realizados utilizando tres tipos de espectrómetros, uno con configuración convencional a 90° y otros dos con configuración a 180° o de retrodispersión. Un esquema general de espectrómetros microRaman puede observarse en la figura 4.

La configuración a 90° permite efectuar espectros fácilmente con luz polarizada, lo que es altamente ventajoso para establecer las reglas de selección de los modos vibracionales de cristales y minerales, y consecuentemente obtener una información de la estructura dinámica más precisa. La configuración a 180° presenta dos modalidades. Una de ellas es apta para los estudios *in situ* y se acopla de modo fácil a los montajes con fibra óptica. En este caso el cabezal Raman debe disponer de un filtro Notch que elimine las componentes de reflexión del láser y la radiación Rayleigh, ya que de lo contrario podría dañarse el sistema de detección al recibir una fuerte intensidad

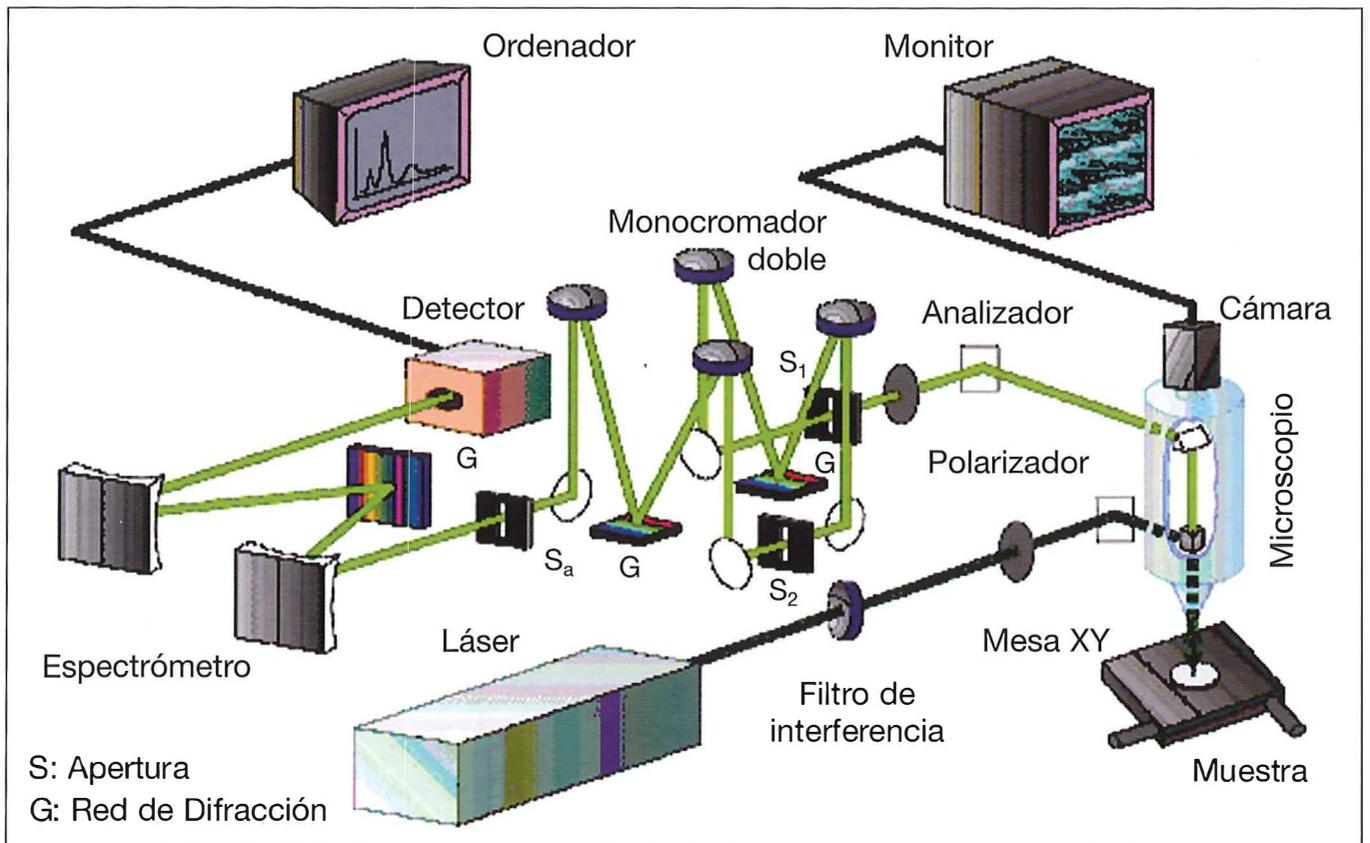


FIGURA 4. Esquema general de retrodispersión para un espectrómetro microRaman.

fotónica. La otra modalidad consiste en introducir la radiación láser en un microscopio petrográfico y a través del objetivo focalizar y recolectar el haz incidente sobre la muestra, efectuando análisis microRaman.

El equipo utilizado para dispersión Raman a 90° es un Ramanor HG-2S de Jovin Yvon dotado con redes holográficas e iluminado con láser de Ar⁺ a 514,5 nm y con potencias efectivas sobre las muestras de 100-200 mW. El sistema de detección es un fotomultiplicador con discriminador y contador de fotones, consiguiendo una resolución espectral de entre 2 y 4 cm⁻¹.

En retrodispersión se han utilizado dos equipos. El primero, consiste en un HoloLab 500 de Kaiser Optical Systems dotado de una red de dispersión por transmisión e iluminado por un láser de diodos a 785 nm, con un rango de potencias entre 2 y 20 mW. El sistema de detección es un dispositivo CCD de 1.024 x 256 píxeles, refrigerado por célula Peltier. La resolución espectral es de 4 cm⁻¹.

Los espectros micro-Raman se han recogido con un espectrómetro Raman Dilor XY provisto de un microscopio petrográfico Olympus BYH2 equipado con óptica DIC tipo Nomarski y objetivos con magnificaciones de hasta x100, con posicionamiento focal automático. Como fuente de excitación se ha utilizado la línea espectral de 514,5 nm procedente de un láser de Ar⁺ modelo 2020-0S de Spectra Physics, focalizado por el objetivo del microscopio que también recoge la radiación dispersada (configuración de retrodispersión) con el haz láser perpendicular al plano de la muestra. El diámetro del haz láser de interacción en el plano focal está limitado por el criterio de difracción de Rayleigh ($D = 1,22 \lambda / NA$) donde λ es la longitud de onda de la radiación incidente y NA la apertura numérica del objetivo utilizado. En condiciones normales y generales, las resoluciones laterales espaciales alcanzadas son cercanas a 1 μm , que significa la posibilidad de identificar granos minerales individuales del orden de nanogramos. El sistema está equipado con un detector CCD refrigerado con nitrógeno líquido. El espectrómetro consta de un monocromador que utilizado en modo substractivo, con la finalidad de eliminar el ruido de fondo espectral, permite obtener una señal óptima de la radiación dispersada, en el proceso de difusión Raman, en el espectrógrafo, obteniendo resoluciones espectrales cercanas a 1 cm⁻¹. Las condiciones experimentales microRaman utilizadas son: 2 acumulaciones, tiempos de adquisición de entre 1 y 3 minutos, rendijas de 250 μm y potencias comprendidas entre 7,3 y 160 mW, según la composición química elemental y la conductividad térmica de las fases minerales analizadas.

A partir del espectro Raman se puede extraer información muy diversa sobre la composición, estado y grado de conservación de los diversos componentes químicos y fases mineralógicas que constituyen el objeto a estudiar. Los parámetros Raman a evaluar son:

- Número de onda o posición de las bandas y picos Raman (cm⁻¹), los cuales permiten atribuir los modos fundamentales de vibración e identificar con precisión el tipo de material y especie química analizada.

- La intensidad de las bandas o área integrada del pico bajo la curva del registro Raman (u.a.), que permite realizar estudios cuantitativos y determinar relaciones de concentraciones entre analitos.
- La anchura a media altura de las bandas (FWHM, cm⁻¹), que ofrece información sobre la inarmonicidad de las bandas, presencia de tensiones extensivas o comprensivas que afectan a las distancias de enlace iónicos y moleculares involucrados en la dinámica vibracional y grado de cristalinidad del material.
- Descomposición del espectro en bandas componentes y análisis del perfil de las bandas Raman, atendiendo al carácter Gaussiano-Lorentziano, que ofrece información sobre la cristalinidad de las fases componentes y permite desarrollar modelos experimentales de estructuras químicas dinámicas.

Todos ofrecen una valiosa información sobre la dinámica vibracional de fases cristalinas y moleculares que componen la estructura de una obra de arte.

RESULTADOS

Se ha estructurado la presentación de resultados en dos grandes apartados, uno dedicado al análisis estructural microRaman, donde las muestras por su tamaño o por ser probetas extraídas pueden ser introducidas para su análisis bajo un microscopio petrográfico. El otro apartado contempla experiencias *in situ*, sin necesidad de modificar la situación del material, colectando la señal Raman mediante fibra óptica.

Experiencias microRaman

Una de las aplicaciones de la espectroscopia Raman en conservación del Patrimonio es la determinación de la autenticidad de gemas y piedras semipreciosas, en la ornamentación de obras de arte. Un buen ejemplo de la potencia determinativa de la espectroscopia microRaman se puede observar en la figura 5, donde se recogen tres espectros Raman de tres joyas de rubí (corindón, Al₂O₃). Se pone de manifiesto que la muestra denominada F, no se corresponde con la fase mineralógica del corindón, presentando un espectro característico de materiales poliméricos de baja cristalinidad, por tanto nos encontramos ante una falsificación. Por el contrario, los espectros de las muestras N y S presentan espectros típicos de cristales de Al₂O₃, con los picos centrados en 378, 416, 439, 576 y 747 cm⁻¹, atribuidos a los modos vibracionales del corindón E_g(Al³⁺), A_{1g}(Al³⁺), E_g(Al³⁺), E_g(p₁O⁻²) y E_g(aO⁻²), respectivamente. Estudios complementarios de micro-Raman sobre las inclusiones fluidas presentes en las muestras N y S y de catodoluminiscencia determinaron que las muestras S y N, se corresponden con rubíes sintéticos y naturales, respectivamente.

Un ejemplo de utilización de la espectroscopia Raman en materiales procedentes del Patrimonio Arqueológico es la utilización de los espectros Raman para de-

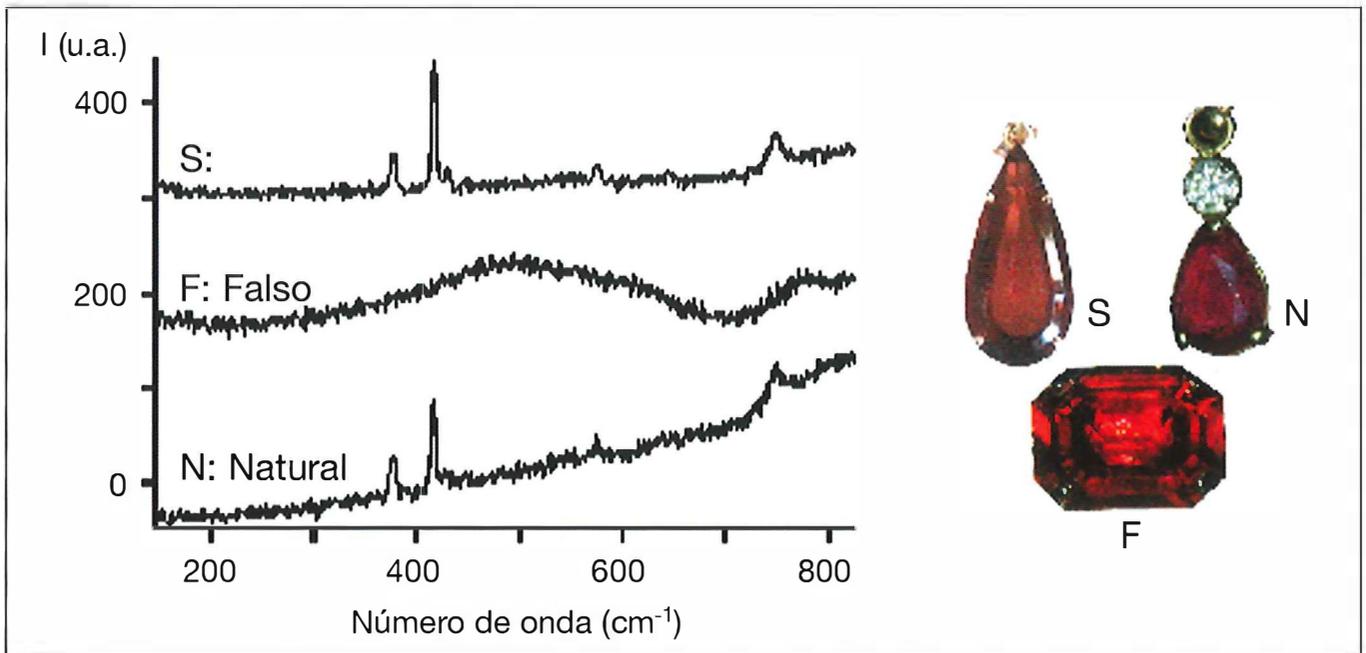


FIGURA 5. Espectros microRaman de tres rubíes: F, falso; S, sintético y N, natural.

terminar la temperatura de cocción de cerámicas. El uso de minerales coloreados en la decoración de obras de arte policromadas se conoce desde tiempos prehistóricos. Estos materiales pictóricos se han utilizado ampliamente debido a su elevada capacidad colorante y estabilidad bajo diferentes condiciones ambientales, luz, oxidación y corrosión. Los minerales coloreados que presentamos en este estudio son óxidos de hierro hidratados, goethita $\text{FeO}\cdot\text{OH}$ y óxido de hierro (III) hematites. Estos óxidos, ampliamente utilizados como pigmentos ocre en la decoración a la "almagra" de cerámicas neolíticas, pueden presentar diferente coloración, desde colores rojos-violetas pasando por rojos, pardos, naranjas, hasta amarillos. El que presenten una coloración u otra va a depender del tipo de óxido de hierro, de su estructura y de la temperatura que se haya alcanzado en el proceso de calentamiento al que se haya visto sometido.

El mineral de partida en el proceso de calentamiento a diferentes temperaturas es limonita, conocido como ocre claro u óxido de hierro amarillo. La espectroscopia micro-Raman se ha utilizado para la caracterización y diferenciación de las especies intermedias obtenidas, así como para determinar la estabilidad de las mismas. Como se puede observar en la figura 6, se recogen los espectros Raman correspondientes a goethita y limonita, ambos óxidos de hierro hidratados tienen la misma composición química y por tanto presentan espectro muy similar.

Las atribuciones de las principales bandas de estas fases minerales pueden ser consultadas en Farmer, 1974. También se recogen, en la figura 6, los registros Raman obtenidos para la limonita tratada a diferentes temperaturas (limo 100, 195, 235, 380, 580 y 720 °C) y un registro del producto final, hematites. Hasta los 235 °C, se pone de manifiesto que aún no ha tenido lugar ningún tipo de cambio estructural, sólo se produce un desprendimiento de agua de interposición, que se traduce

en diferente anchura de las bandas. La banda con simetría $E_g (p_1O_2)$ presenta un desplazamiento a frecuencias mayores (405 cm^{-1}) en la fase limo 380, respecto a los espectros de limonita fría, limo 100, limo 195 y limo 235, con bandas situadas a 397 y 399 cm^{-1} , respectivamente. Esto indica el inicio de la transformación a hematites, teniendo lugar desprendimientos de agua de constitución y un reordenamiento estructural asociado a la misma. Entre 380 y 560 °C se sigue produciendo el reordenamiento estructural, pero no es hasta 720 °C cuando se produce la transformación total a hematites, observando la banda con simetría $E_g (p_1O_2)$ en la fase limo 720

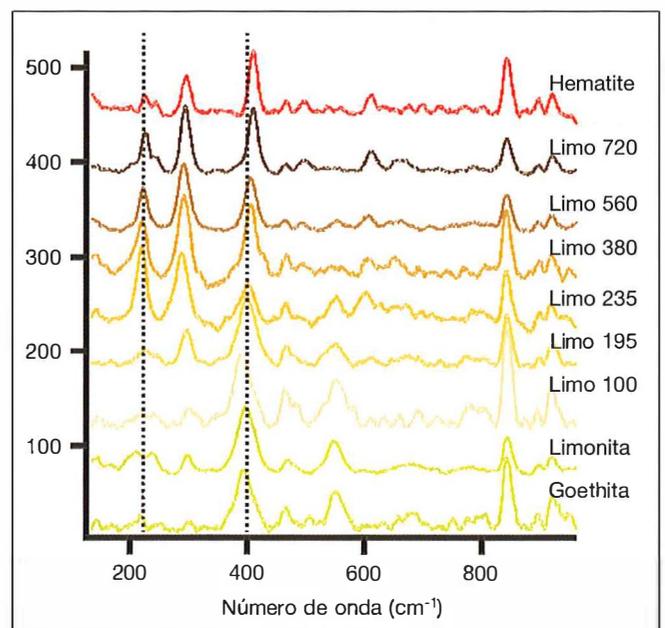


FIGURA 6. Espectros microRaman de ocre obtenidos térmicamente, utilizados en decoración a la "almagra" de cerámicas neolíticas.

y hematitas a 409 y 410 cm^{-1} , respectivamente. La evolución que experimenta la limonita al ser calentada puede ser evaluada a través de la variación que presenta la banda situada entre 394 y 410 cm^{-1} , en relación con la temperatura. Los parámetros Raman (Intensidad, área de la banda, anchura a media altura) permiten diferenciar entre los óxidos de hierro hidratados y los óxidos de hierro no hidratados. Se observa que existe una relación directa aparente entre la temperatura y la anchura a media altura (FWHM), la cual disminuye a medida que aumenta la temperatura, salvo en el caso de la fase limo 235 donde la FWHM aumenta debido a su baja cristalinidad. A 235 $^{\circ}\text{C}$ comienza la reestructuración sin dar lugar a la completa transformación a hematitas, y ello produce un grado de amorfización mayor para esta fase, manifestándose un ensanchamiento de la banda por la relajación de enlaces O-Fe. También se pone de manifiesto que la goethita sufre intensos cambios en su coloración al ser calentada, sin que llegue a producirse su completa transformación en hematitas, proceso que se inicia a partir de los 280 $^{\circ}\text{C}$ y que se completa a los 900 $^{\circ}\text{C}$. Se puede concluir que la goethita entre 300 y 400 $^{\circ}\text{C}$ adquiere una tonalidad rojiza sin que químicamente se detecte hematitas debido a que la transformación acaba de comenzar. A medida que aumenta la temperatura la transformación se va completando y se adquieren colores más pardos. Por tanto, el espectro Raman permite identificar el mineral utilizado como fase pigmentante y la temperatura aproximada en la que trabaja el alfar donde se coció la cerámica.

La espectroscopia microRaman permite también efectuar análisis en superficie, sin preparación previa de las muestras, con una gran resolución lateral. Esto presenta una relevante ventaja a la hora de identificar el estado de alteración de una superficie, por efecto de procesos químicos y/o físicos, a través de la identificación de las fases de alteración del material. Con ello se aporta una información valiosa, previa a la hora de abordar cualquier proceso de intervención en obras de arte, a los responsables de la conservación y restauración de bienes artísticos y culturales.

Esta característica del análisis e identificación de fases minerales depositadas sobre superficies metálicas se pone de manifiesto en el ejemplo recogido en la figura 7. Se trata de una moneda de cobre de Alfonso XII, acuñada en 1876, que muestra procesos de alteración y deterioro superficial. Las principales fases de alteración son Cu_2O y $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. El óxido de cobre presenta dos picos de intensidad alta y media a 913 y 150 cm^{-1} , junto con una pequeña banda a 220 cm^{-1} , asignadas a los modos vibracionales de tensión Cu-O en cuprita. Las masas verdes de acetato de cobre, denominado verdigrís o cardenillo, presentan en este rango espectral un pico intenso a 514 cm^{-1} junto con otras bandas situadas a 138, 269, 362 y 397 cm^{-1} , atribuibles a los modos de red del ión acetato ligado a Cu^{+2} . Incrustados en las masas verdes de cardenillo se han detectado pequeños cristales negros (imagen superior izquierda en la figura 7, con magnificación x16) que muestran un registro Raman típico de

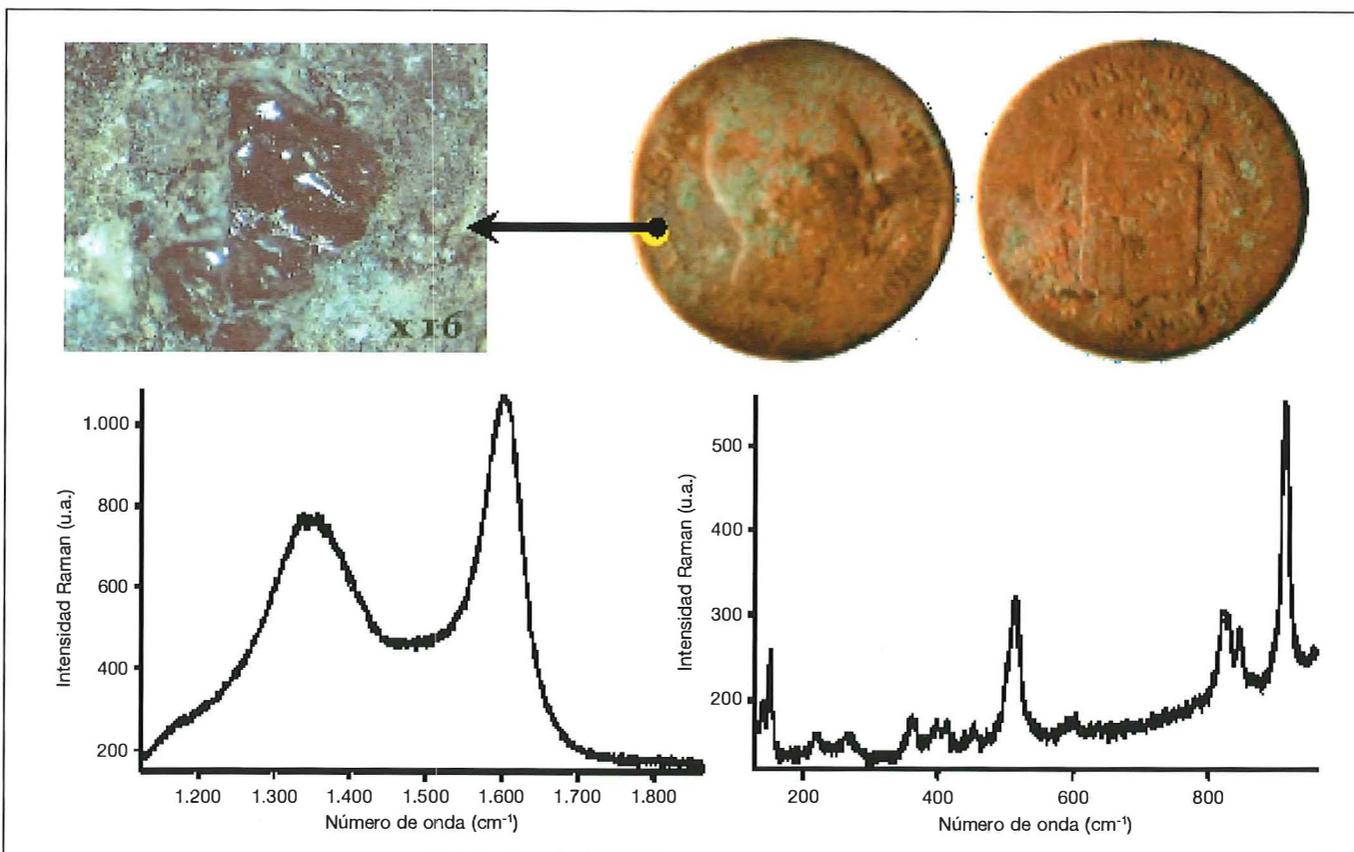


FIGURA 7. Espectros microRaman obtenidos en la superficie de alteración (cuprita y "cardenillo") de monedas de cobre de Alfonso XII (1876), con restos de materia orgánica poco organizada.

materia orgánica poco organizada. La banda D₁ situada en el espectro Raman de primer orden a 1.386 cm⁻¹, es consecuencia del desorden estructural y es normalmente asignada a las vibraciones entre enlaces C-C con hibridación sp³ o tipo diamante. Junto a ella aparece la banda de tipo G, característica de la hibridación sp² del grafito, centrada a 1.602 cm⁻¹ y atribuible a las tensiones E_{2g} (C-C) en estructuras aromáticas. Por tanto, se trata de cristales de carbón depositados en las zonas alteradas de las monedas, lo que indica que han sido recuperadas tras estar inmersas en un proceso térmico que alteró parcialmente su superficie.

Especial relevancia presenta la utilización de la espectroscopia Raman en el análisis de secciones transversales, estratigrafías, de obras pictóricas sobre caballete y escultura policromada. Esta técnica ofrece prestaciones que la hacen casi única para determinar los granos minerales y fases cromóforas utilizadas como pigmentos en capas de preparación, imprimación y pictórica (Bell *et al.*,

1997, Burgio and Clark, 2001, Prieto *et al.*, 2003). Permite, de modo mínimamente invasivo, conocer la paleta del autor y determinar el número y naturaleza de las posibles y sucesivas intervenciones que una obra ha podido sufrir a lo largo de su historia.

Un buen ejemplo de análisis estratigráfico es el desarrollado en la caracterización de los diferentes pigmentos existentes en sucesivos repintes y actuaciones efectuadas sobre una escultura de piedra caliza policromada de principios del siglo XVI. El grupo escultórico analizado es atribuido a Nicolás de Chanterenne y está actualmente localizado en el Museo de la Catedral de Santiago de Compostela. Es una magnífica muestra de tipo Santa Ana triple (figura 8), con una composición triangular, múltiples pliegues en la vestimenta y un profundo claroscuro, siendo una de las expresiones fundamentales del arte flamenco. La escultura de alta calidad y elegancia consta de Santa Ana con María y el Niño. La Virgen y el Niño muestran la intimidad de una familia

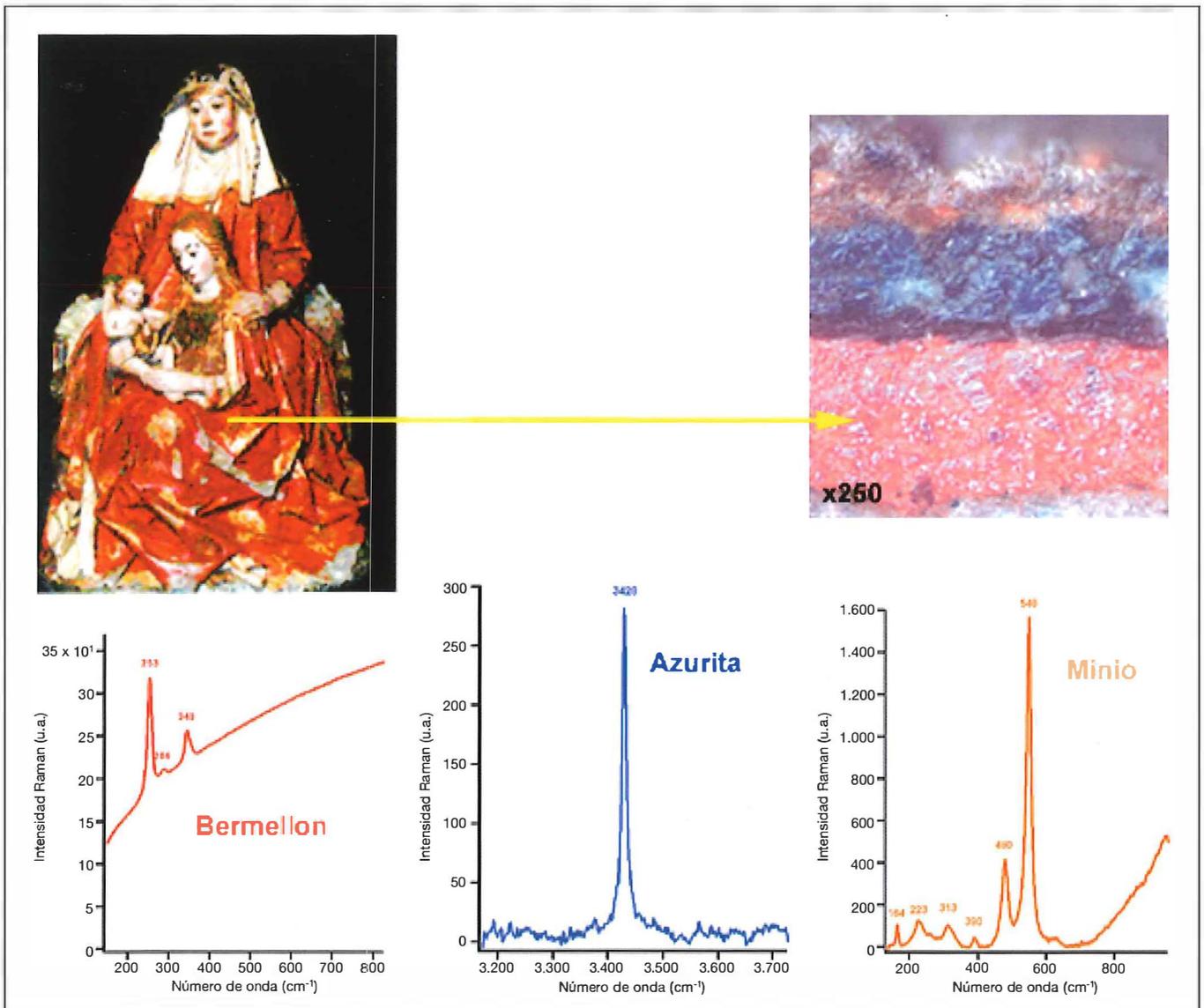


FIGURA 8. Grupo escultórico policromado "Las tres generaciones", de Nicolás de Chanterenne (siglo XVI), tras su restauración (Carmen Jiménez, Arteca-Conservación y Restauraciones S.L.). Disposición estratigráfica de pigmentos en sección transversal extraída del manto de la Virgen. Espectros microRaman de cristales de cinabrio, azurita y minio, utilizados como pigmentos minerales en diversas intervenciones precedentes.

en profunda armonía. La escultura está policromada, y en alguna de sus partes, donde el color dorado dominante ha desaparecido, aparece el color rojo intenso de la vestimenta de Santa Ana y de la Virgen. Las catas estratigráficas, procedentes de las partes más representativas ofrecen una visión completa de las paletas usadas en las sucesivas intervenciones sobre la escultura (el manto de la Virgen, suelo y zonas laterales del trono, vestido de Santa Ana y cara del Niño).

En la probeta correspondiente al manto de la Virgen se pueden apreciar cinco capas en disposición estratigráfica bien diferenciadas, como puede observarse en la figura 8 (micrografía x 250 de magnificación). La primera capa está constituida por el substrato calizo y la base de preparación e imprimación para soportar la policromía de la obra. Este primer estrato está compuesto de calcita (CaCO_3), mezclada con sulfato bórico (BaSO_4). Sobre el substrato se superpone una primera capa pictórica, que pasa a ser gris rosáceo, por lo que está compuesta, además de calcita, por fases cristalinas de los siguientes pigmentos: carbón (C), hematites (Fe_2O_3), cerusita (PbCO_3) e hidrocerusita ($\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$). Esta primera capa pictórica, en la probeta analizada, presenta lagunas y se confunde fácilmente con la matriz de CaCO_3 .

La segunda capa pictórica tiene un espesor de 65 μm . Consta de una masa rojo-anaranjada en la que hay incrustados gran cantidad de cristales de fuerte color granate. Ambas confieren a la capa el intenso color rojo. Tanto la masa que hace efectos de aglutinante, como los cristales de bermellón (HgS), constituyen la segunda capa pictórica, con albayalde (PbCO_3), como aglutinante. Un espectro microRaman de cinabrio (bermellón) se recoge en la figura 8. Se observan claramente los picos situados a 254, 287 y 347 cm^{-1} , atribuidos a las vibraciones de tensión $\nu(\text{A}_1)$ de Hg-S y los modos E_{LO} y E_{TO} , respectivamente.

Entre la capa azul y la capa roja existe una capa granate translúcida de unas 15 μm de espesor. Se trata de una veladura orgánica que contiene pequeños cristales de bermellón (HgS), y constituye el estrato número tres. El cuarto estrato está constituido por una capa de 45 mm de espesor, es de color azul, encontrándose incrustados cristales de tonalidad más clara de azurita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$). El espectro microRaman, recogido en la figura 8, muestra el pico $\nu_1(\text{OH}_2)$ a 3.428 cm^{-1} , junto con un pequeño hombro a más alta energía, asignado a la tensión antisimétrica $\nu_3(\text{OH})$. También se han determinado, formando parte de este estrato, tierras constituidas fundamentalmente por óxidos de hierro (Fe_2O_3). La quinta capa, de unos 30 μm de potencia, es un estrato de imprimación de oro de color naranja que puede proceder de una greca o adorno. Dentro de la masa existen cristales naranjas y blancos correspondientes a pigmentos de minio (Pb_3O_4) y calcita (CaCO_3), que actúan como pigmento y diluyente sólido respectivamente. En la figura 8 se recoge el espectro microRaman del minio con picos situados a 233, 313, 390, 480 y 548 cm^{-1} atribuidos a los modos de deformación $\delta(\text{PbO}_2)$, tensión $\nu(\text{PbO}_2)$ y longitudinal, $\nu_{\text{LO}}(\text{Pb-O})$ y transversal óptico, $\nu_{\text{TO}}(\text{Pb-O})$, respectivamente. Superpuesta se debería encontrar la sexta capa, constituida por una lámina de pan de oro.

Experiencias Raman *in situ*

Las experiencias *in situ* están aconsejadas principalmente para aquellas muestras que por su características y valor no pueden ser desplazadas de su lugar de origen o exposición, no pueden manipularse o extraer pequeñas muestras que faciliten su análisis, ni pueden ser introducidas bajo el objetivo de un microscopio por ser de un tamaño y volumen apreciable. Un magnífico ejemplo de la utilidad de la espectroscopia Raman en el análisis de los pigmentos minerales es en el caso de los manuscritos miniados, de los que nuestro Patrimonio posee ejemplares de valor incalculable.

Uno de ellos es el documento fundacional del Colegio de Santa Cruz, actual sede del Rectorado de la Universidad de Valladolid. Don Pedro de Mendoza, Cardenal de Toledo, Primado de España y Ministro de Hacienda de los Reyes Católicos, fundó el Colegio de Santa Cruz de Valladolid mediante este documento el día 21 de noviembre de 1483. En él se establece, a partir de una carta de merced del Papa Sixto IV concediendo un colegio a semejanza del de Salamanca, la ubicación y las lindes, el número de escolares, así como su consejo rector. El número de escolares admitidos en esta carta fundacional es de 20 (6 teólogos, 6 canonistas, 2 capellanes, 3 legistas y 3 médicos). Es nombrado rector el colegial Juan de Marquina y consiliarios, Diego de Muros, Diego de Espinosa y Juan de Fondea.

La miniatura más importante representa al Cardenal rodeado de obispos y colegiales en el acto de entrega del documento fundacional. La miniatura contiene diversos colores de entre los que destaca el color rojo intenso de la túnica. La identificación de los pigmentos componentes de esa coloración se realizó mediante un cabezal Raman acoplado por fibra óptica trabajando en modo macro a unos 4 cm de la muestra (diámetro de unas 20 micras de focal, al incidir sobre la muestra) y a muy baja potencia de la excitación láser con objeto de evitar el más mínimo deterioro de la muestra. Algunos de los resultados se muestran en la figura 9, donde cabe destacar la pureza de los compuestos usados. El rojo es cinabrio puro y el blanco es identificado como hidrocerusita. Resulta muy interesante comprobar que la carnación se realiza, en todos los casos, mediante la mezcla en distintas proporciones de estos dos minerales. El azul de los miniados es identificado como azurita.

También son de gran utilidad en los procesos de control y evaluación de la limpieza, mediante tecnología láser, de bienes muebles o inmuebles del patrimonio histórico. En este campo de actuación una de las aplicaciones de la espectroscopia Raman *in situ* es analizar las fases mineralógicas que se revelan en la superficie de una obra patrimonial al tiempo que ésta sufre una intervención de limpieza o conservación. Con ello se ejerce un control riguroso y científico de las capas a eliminar en el propio proceso de limpieza, pudiendo evitar efectos no deseables de sobre limpieza o pérdidas irreparables de cromaticidad y pátinas artificiales. En la figura 10 se recoge una micrografía procedente de los grupos escultóricos "Los Padres de la Iglesia" de la fachada principal

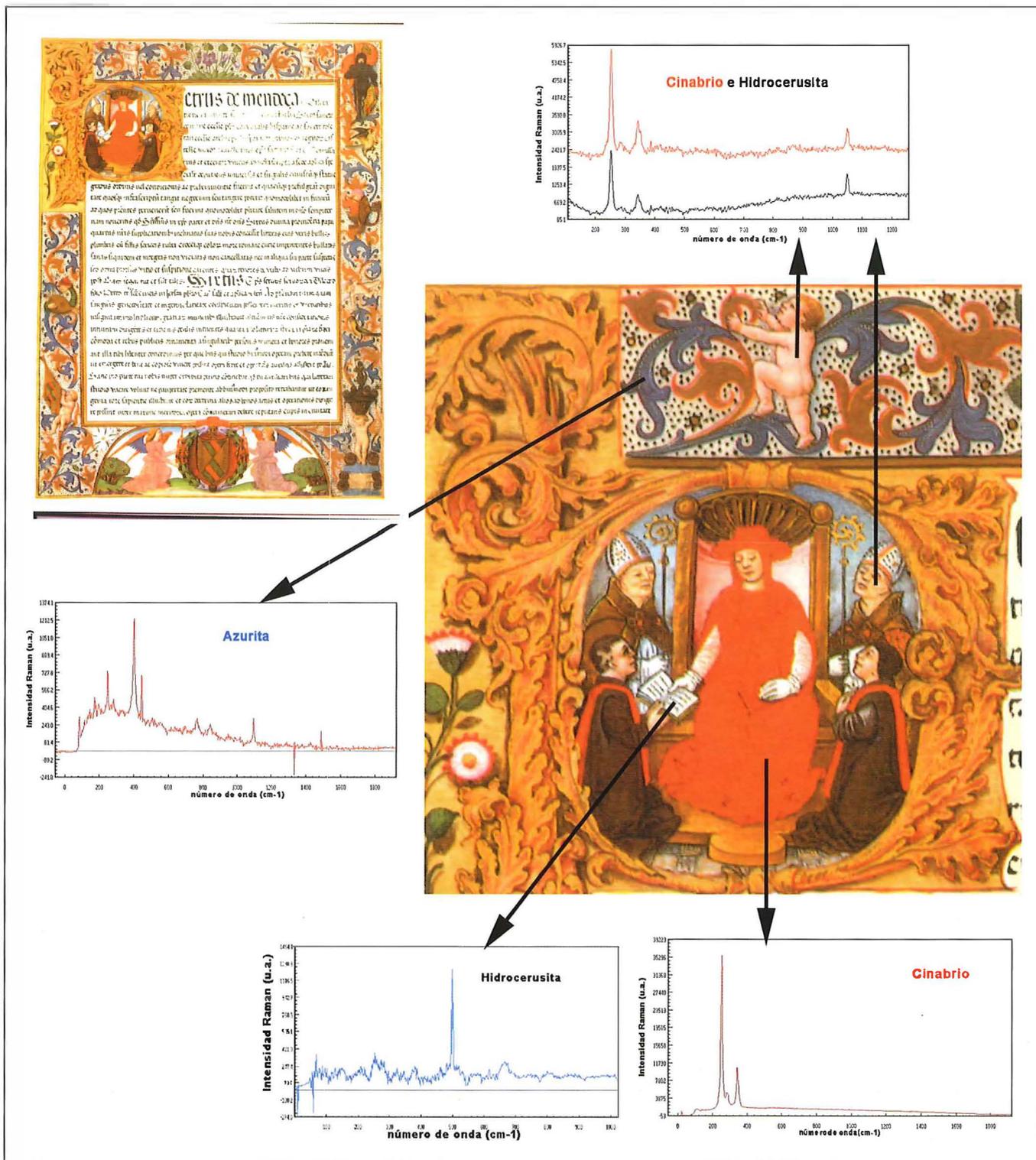


FIGURA 9. Ilustración en el Documento Fundacional del Colegio de Santa Cruz (Valladolid), siglo xv. Detalles de la ilustración y espectros Raman de cinabrio (bermellón), cerusita e hidrocerusita (albayalde o blanco de plomo) y azurita (azul de Alemania).

de la Iglesia Catedral de Valladolid, donde se observa la presencia de "costra negra", en el material calizo. Esta costra negra está constituida, en su mayor parte, por yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ debido a los efectos que la contaminación y lluvia ácida producen sobre las superficies de caliza, CaCO_3 . La disolución de carbonatos de calcio y posterior precipitación de sulfatos provoca daños irreparables en gran cantidad de monumentos.

La eliminación y control de esta "costra negra" mediante procesado láser, se ha realizado con un láser de Nd:YAG (modelo Surelite marca CONTINUUM) pulsado mediante un Q-switch, de emisión infrarroja y longitud de onda 1.064 nm, duración de pulso de 7 ns, frecuencia de repetición máxima de 20 Hz y energía máxima de 300 mJ/pulso. La radiación se transmite hasta el punto de interés mediante un brazo articulado que culmina con

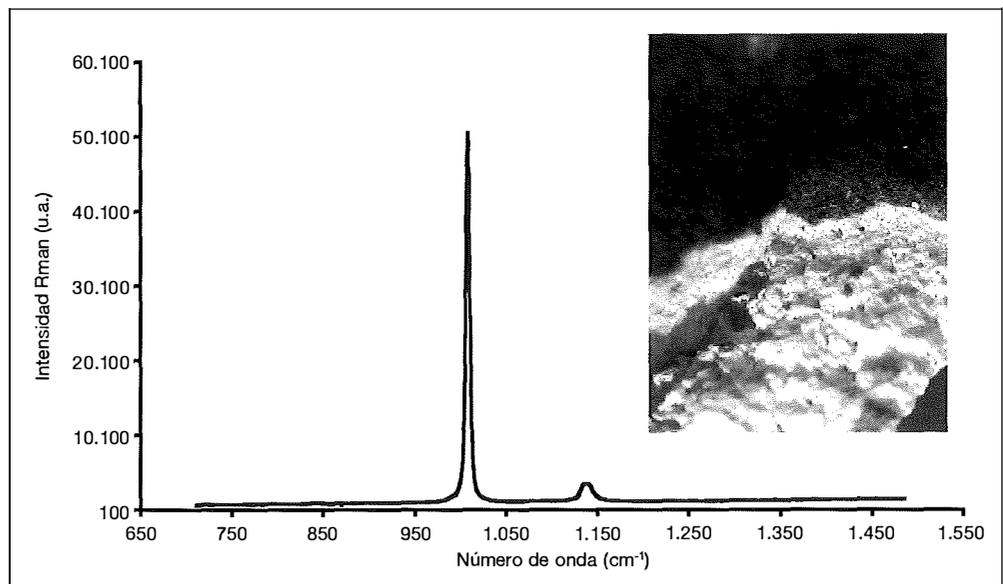


FIGURA 10. Espectro Raman de yeso obtenido en la zona blanca (limpieza por láser de Nd:YAG) de "costra negra" en esculturas de calizas de "Los Padres de la Iglesia". Fachada de la Catedral de Valladolid.

una lente convergente que permite focalizar la radiación en el punto de incidencia (focal de la lente 143,6 mm). Al tiempo, se incide y colecta la radiación incidente y dispersada de un láser de HeNe mediante un sistema de fibra óptica y se obtiene el espectro Raman (figura 10) de la superficie tratada fotónicamente en un espectrómetro portátil. El registro se corresponde con el espectro Raman de cristales de yeso. Muestra un pico intenso a 1.008 cm^{-1} y un doblete de intensidad mucho más débil a 1.137 cm^{-1} , que se corresponden con las tensiones simétrica $\nu_1(A_g)$ y antisimétrica $\nu_3(B_g)$ de los iones sulfato en el yeso, respectivamente. Por tanto, a pesar de que la desincrustación fotónica es efectiva desde el punto de vista morfológico y cromático, eliminando la costra negra, los cristales de yeso productos de la alteración por lluvia ácida, persisten en la superficie de la escultura ya blanca.

CONCLUSIONES

Se pone de manifiesto que la espectroscopia Raman es una técnica estructural que permite el análisis dinámico vibracional de fases sólidas y acoplada a un microscopio o a un dispositivo colector con fibra óptica se convierte en una poderosa herramienta para el análisis y caracterización de piezas y objetos de alto valor patrimonial. Su carácter no destructivo y su gran poder de resolución la hacen ser una técnica con altas prestaciones para el análisis y control de los procesos de conservación de bienes culturales. Dichas propiedades se han puesto de relevancia en la caracterización y análisis de objetos de diversos materiales, todos ellos pertenecientes al patrimonio cultural histórico y artístico.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Junta Directiva de la SEM y al Comité Editorial de la revista

Macla, la invitación para colaborar, mediante el presente artículo en su primer número.

REFERENCIAS

- Bel, I.M., Clark, R.J.H. y Gibbs, P.J. (1997). Raman Spectroscopy library of natural and synthetic pigments (pre- ~1850 AD). *Spectrochimica Acta*. Part A 53, 2159-2179.
- Burgio, L. y Clark, R.J.H. (2001). Library of FT-Raman spectra of pigments, minerals, pigment media and varnishes, and supplement to existing library of Raman spectra of pigments with visible excitation. *Spectrochimica Acta*. Part A 57, 1491-1521.
- Farmer, V.C. (1974). The anhydrous oxide minerals: in *The Infrared Spectra Minerals*, V.C. Farmer, ed., *Miner. Soc. Monograph* 4, London, 185-189.
- Ferraro, J.R. y Nakamoto K. (1994). *Introductory Raman spectroscopy*. Academic Press. New York.
- Graselly, J.G. y Bulkin, B.J. (1991). *Analytical Raman Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Hendra P., Jones G. y Warnes G. (1991). *Fourier Transform Raman spectroscopy*. Ellis Harwood. London.
- Laserna, J.J. (1996). *Modern Techniques in Raman Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Long, D.A. (1978). *Raman Spectroscopy*. McGraw Hill Co. London.
- Long, D.A. (1998). Early History of the Raman effect. *International Reviews in Physical Chemistry* 7, 317-349.
- Nakamoto, K. (1997). *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds, Part A: theory and applications in Inorganic Chemistry*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Prieto, A.C., Fernández, E. y González, M.A. (2003). *Base de Datos de Pigmentos*. Universidad de Valladolid. <http://goya.fmc.cie.uva.es>
- Rull, F. (1993). *Espectroscopia IR y Raman en cristales y minerales*. Universidad de Valladolid.
- Strommen, D.P. y Nakamoto, K. (1984). *Laboratory Raman Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Transformaciones cristalinas en el manto terrestre: de los procesos a nanoescala a la dinámica global

MANUEL PRIETO RUBIO

Departamento de Geología, Universidad de Oviedo

C/ Jesús Arias de Velasco, s/n. 33005-Oviedo. mprieto@geol.uniovi.es

Nos asentamos sobre placas litosféricas que se mueven encima de un manto de roca caliente en lenta convección. Nuestro conocimiento directo del planeta se circunscribe a esa delgada y frágil capa superficial. Sin embargo, el radio de la Tierra es de 6.400 kilómetros, profundidad a la que se alcanzan 6.000 grados centígrados y una presión tres millones de veces mayor que la atmosférica. ¿Cómo podemos conocer esa enorme masa planetaria que nos es inaccesible? Hasta hace aproximadamente dos décadas sólo disponíamos de la información indirecta que proporcionan las variaciones de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas con la profundidad. Hoy, la combinación de las observaciones indirectas con la experimentación y la computación está proyectando nuevas luces sobre la naturaleza de los materiales del interior de la Tierra y su papel en la dinámica global.

La teoría de la tectónica de placas constituye el gran logro de las Ciencias Geológicas en el siglo XX. La elegancia y la fuerza de esa teoría radican en su capacidad para integrar en un modelo coherente una gran diversidad de observaciones: la distribución y movimiento relativo de continentes y océanos, la topografía de las tierras emergidas y de los fondos marinos, la distribución geográfica de los terremotos, la composición de los materiales volcánicos en función del entorno tectónico, etc. En realidad, todos los procesos y configuraciones que se integran en ese modelo tectónico global no son otra cosa que manifestaciones del principal mecanismo de pérdida de calor en el planeta: la convección de los materiales subcorticales. Mediante la convección, el material profundo, más caliente, se expande y asciende para ser reemplazado por material superficial más frío y más denso.

A pesar de la fuerza explicativa de la teoría tectónica global, son muchos los detalles que permanecen sin dilucidar. Su clarificación constituye, sin duda alguna, uno de los principales retos científicos del siglo que comenzamos. Es necesario profundizar en la naturaleza del régimen convectivo del manto y en el transporte de material y calor a través del límite entre el manto superior e inferior. Se conoce muy pobremente el perfil térmico del manto inferior y la naturaleza del acoplamiento térmico, mecánico y electromagnético a través del límite manto-núcleo. Todos esos aspectos están ligados a las propiedades físicas de los minerales que constituyen el interior del planeta y, de ahí, la creciente importancia que está alcanzando la síntesis y caracterización de minerales en condiciones de ultra-alta presión. Los primeros logros conseguidos en esa dirección son un ejemplo muy elocuente

de las implicaciones megascópicas de fenómenos que se producen a escala molecular.

UN MATERIAL DE PARTIDA PARA LA EXPERIMENTACIÓN

El manto terrestre contiene el 84% del volumen y el 68% de la masa de la Tierra pero, aparte de estas magnitudes, ¿qué sabemos de él? La geofísica nos indica que en su interior existen dos discontinuidades claras, la primera a los 410 kilómetros de profundidad y la segunda a los 660 kilómetros. Esta última separa el manto superior del inferior y la región comprendida entre ambas se conoce como zona de transición. Se trata de dos discontinuidades en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas que se atribuyen a incrementos de la densidad del orden del 5% y del 10%, respectivamente. Obviamente, esas discontinuidades de la densidad podrían atribuirse a cambios globales en la composición, pero también a transformaciones estructurales que den lugar a minerales más densos, sin que se modifique la composición global. ¿Cómo podemos tomar una decisión al respecto?

La respuesta podría obtenerse experimentalmente si conociésemos la composición mineralógica del manto superior. Un estudio de las transformaciones que sufren los minerales del manto, al incrementarse la presión y la temperatura, permitiría establecer si existen transformaciones a las que puedan atribuirse los cambios de densidad observados a los 410 y a los 660 kilómetros. El problema radica en que el manto superior es, por el momento, inaccesible. Alguien podría objetar que la inaccesibilidad es sólo aparente, puesto que disponemos del material procedente del manto que llega a la superficie con las erupciones volcánicas basálticas que se producen en las dorsales oceánicas. Es cierto, pero el problema no es simple porque el manto está formado por un material con múltiples componentes. Los materiales mono-componente funden a una temperatura precisa (el punto de fusión) para dar fluidos mono-componente. Por el contrario, los materiales multi-componentes no funden a una temperatura única. Comienzan a fundir a una temperatura denominada *solidus* y su fusión culmina a una temperatura superior denominada *liquidus*. Entre ambos extremos se produce una fusión parcial, en la que se genera un fluido y un residuo sólido empobrecido en los componentes más "volátiles".

Los basaltos oceánicos proceden de la fusión parcial del manto, pero no son el manto. Están enriquecidos en

los componentes más volátiles, lo que supone la existencia de un residuo sólido enriquecido en los componentes menos volátiles. Afortunadamente, porciones de estos residuos sólidos, ricos en magnesio, alcanzan a veces la superficie dando lugar a los denominados nódulos ultramáficos que aparecen en las lavas basálticas (fig. 1). La composición del manto original debe ser necesariamente intermedia entre la de los magmas basálticos y los nódulos ultramáficos. Existen, además, otros "testigos" procedentes del manto que han llegado a la superficie terrestre. Por ejemplo, en las chimeneas kimberlíticas, resultado de un volcanismo explosivo de raíz muy profunda, aparecen xenolitos, que son fragmentos de origen mantélico. Finalmente, los denominados complejos ofiolíticos están formados por corteza oceánica y rocas del manto superior que han sido exhumadas a la superficie en zonas de convergencia de placas.

Con las inevitables imprecisiones, los testigos citados parecen indicar que el manto superior está formado por un 60% de olivino y, en menores proporciones, por ortopiroxeno, clinopiroxeno y granate. Todos ellos son minerales muy comunes, cuya estructura cristalina es sobradamente conocida. Lo que se desconocía hasta hace unos años era el comportamiento que podrían tener esos minerales a alta presión. En conjunto, constituyen

un material de partida sobre el que se han aplicado las condiciones de presión y temperatura existentes en la zona de transición y en el manto inferior.

SIMULANDO LA TIERRA

Aunque parezca paradójico, conseguir presiones y temperaturas similares a las existentes en el manto no requiere un equipamiento de sofisticación extrema. El dispositivo comúnmente empleado es a la vez simple y elegante. Se trata del denominado "yunque" de diamante. El material de partida se sitúa entre las puntas de dos diamantes con forma de pirámide truncada. El área truncada es muy reducida, de manera que una presión moderada aplicada sobre las bases mayores se amplifica enormemente entre las puntas. Además, la muestra puede calentarse haciendo incidir un haz de luz láser que atraviesa el diamante y se absorbe por la muestra generando calor. A pesar de su aparente sencillez, mediante esta técnica pueden obtenerse presiones de hasta 300 gigapascales y temperaturas próximas a los 4.000 grados centígrados (fig. 2).

El diamante es transparente a las radiaciones electromagnéticas, desde el infrarrojo lejano, pasando por el vi-

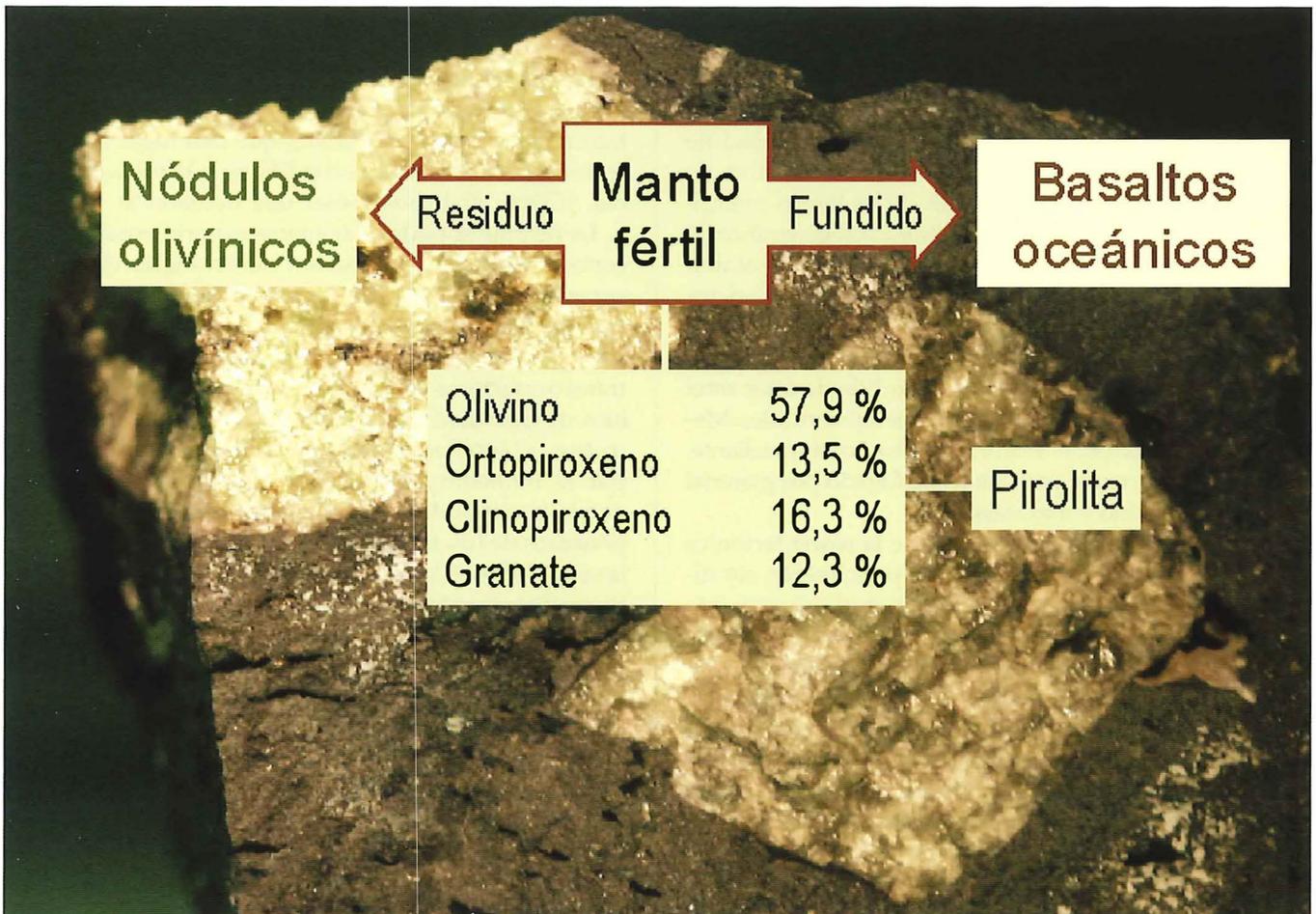


FIGURA 1. Los basaltos oceánicos son fruto de la fusión parcial del manto. Ringwood (1975) propuso el término "pirolita" para denominar a los materiales que forman el manto superior. Green y T.J. Fallon (1998) fijan la composición de la pirolita (% en peso) que se recoge en el recuadro. La fotografía del fondo muestra dos nódulos olivínicos incluidos en una masa de basalto (Cortesía del Museo de Geología de la Universidad de Oviedo).

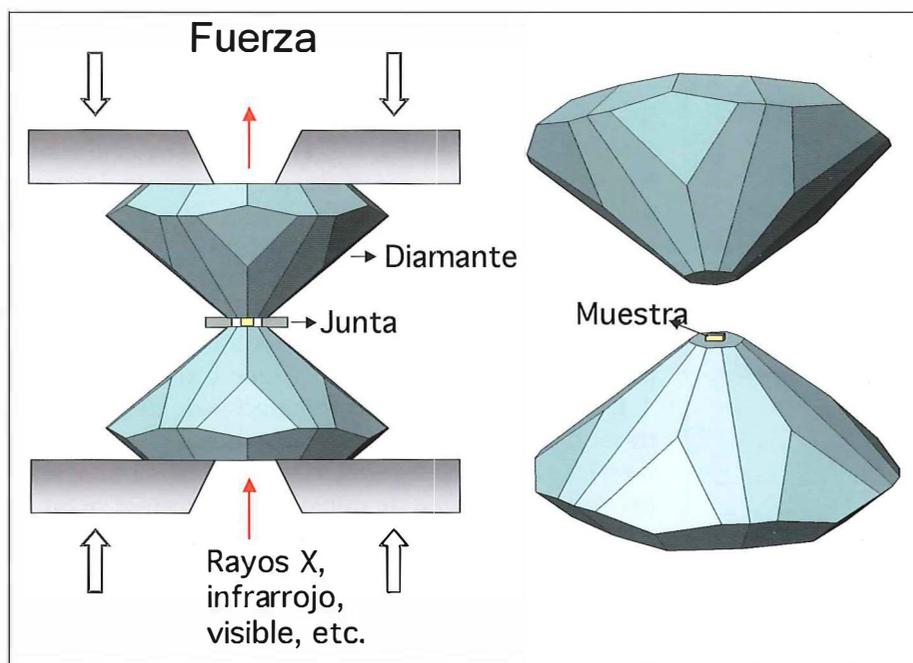
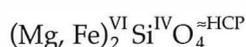


FIGURA 2. Celda-yunque de diamante para la realización de experiencias a alta presión. Cuando se aplica una fuerza en la base de los diamantes se comprime el pequeño volumen situado entre las cúspides. La transparencia de diamante permite estudiar las transformaciones cristalinas de la muestra mediante técnicas espectroscópicas y difracción de rayos X. La muestra puede calentarse mediante un láser. La presión se mide por medio de un estándar y la temperatura mediante el espectro de la radiación del cuerpo negro.

sible y el ultravioleta, hasta la región de los rayos X. La ventaja es evidente porque los diamantes son una ventana a través de la cual se puede "examinar" la muestra mediante una amplia variedad de técnicas espectroscópicas o de difracción: el pequeño yunque de diamante es una ventana abierta hacia el interior de la Tierra.

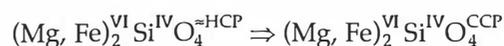
CRISTALOQUÍMICA DEL MANTO TERRESTRE

Dada su abundancia en el manto superior, el olivino es el primer candidato para la experimentación. Se trata de un silicato de composición relativamente sencilla, $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$. En su estructura cristalina, los oxígenos forman planos de configuración pseudo-hexagonal que se apilan para constituir, aproximadamente, una secuencia que se conoce como "empaquetado hexagonal compacto" (HCP). Los átomos de silicio ocupan la octava parte de los intersticios tetraédricos que dejan entre sí los oxígenos. De este modo, cada silicio está situado en el centro de tetraedro cuyos vértices son oxígenos, formando los grupos $[\text{SiO}_4]$ característicos de los silicatos. Los átomos de magnesio y hierro ocupan la mitad de los intersticios octaédricos, de manera que cada átomo está rodeado por 6 oxígenos. La proporción $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$ varía de unos ejemplares a otros, debido a que por su tamaño similar ambos cationes pueden sustituirse aleatoriamente en la estructura. En concreto, los olivinos presentes en el manto son considerablemente más ricos en el componente magnésico ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \approx 89\%$ molar) que en el ferroso (11% molar Fe_2SiO_4). Podemos incluir en la fórmula una parte de esta información estructural:



Los superíndices en números romanos indican el número de átomos de oxígeno que rodea a los diferentes ca-

lones. El superíndice $\approx\text{HCP}$ indica el tipo de empaquetado formado por los oxígenos. La estructura es bastante densa porque los planos de ritmo hexagonal son muy compactos, pero pueden formarse estructuras todavía más compactas manteniendo esa composición. Las experiencias realizadas en yunques de diamante demuestran que a altas presiones el olivino se transforma en una estructura tipo "silicato-espinela", de acuerdo con la reacción:



Como puede observarse, la única diferencia entre el primer y el segundo término es el superíndice de los oxígenos, CCP en el caso de la estructura tipo silicato-espinela. Ello significa que todas las características estructurales del olivino se mantienen en la estructura del silicato-espinela, excepto el empaquetamiento de los oxígenos. Es posible empaquetar los oxígenos de forma bastante más compacta que en el olivino. El empaquetado cúbico compacto (CCP) se construye también con planos de ritmo hexagonal, pero el apilamiento de estos planos se realiza de forma diferente. El resultado es una estructura cuya densidad es un 7,7% mayor que la del olivino. En el caso de los olivinos ricos en magnesio existen dos variantes de la estructura producto, β -silicato-espinela (wadsleyita) y γ -silicato-espinela (ringwoodita), que difieren en detalles menores, relacionados con la distribución de los cationes intersticiales. La estructura tipo γ -silicato-espinela es todavía más densa (aproximadamente un 2%) que la estructura tipo β -silicato-espinela y se forma a mayor presión. Aunque no se pueden formar en las condiciones de la superficie terrestre, tanto la wadsleyita como la ringwoodita se han encontrado en meteoritos y por ello tienen nombres minerales (fig. 3).

El olivino se transforma en β -silicato-espinela a una presión (13-14 gigapascales) equivalente a la que existe en el manto a 410 kilómetros de profundidad, siempre que

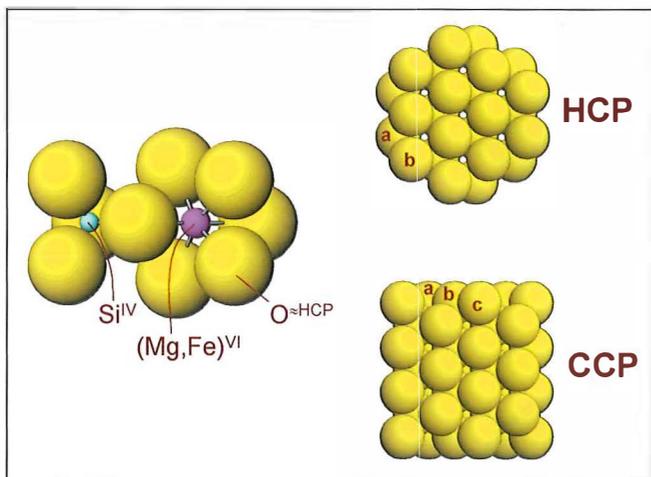
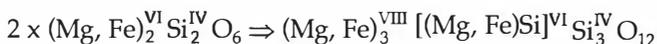


FIGURA 3. En la estructura del olivino los átomos de oxígeno forman un empaquetado hexagonal compacto (HCP) algo distorsionado, constituido por planos de ritmo hexagonal que se apilan según una secuencia "...a-b-a-b-a-b..." que se repite cada dos planos. En la estructura tipo silicato-espínela los planos de ritmo hexagonal se apilan según una secuencia "...a-b-c-a-b-c-a-b-c..." que se repite cada tres planos, formando un empaquetado cúbico compacto (CCP) bastante más denso. En ambos casos los átomos de silicio ocupan una octava parte de los intersticios tetraédricos que dejan entre sí los oxígenos y los átomos de magnesio (o hierro) la mitad de los intersticios octaédricos.

la temperatura sea de unos 1.600 °C. Casualmente, esa es la temperatura que el gradiente geotérmico permite prever para los 410 kilómetros. La conclusión es evidente: el cambio de velocidad que registran las ondas sísmicas a 410 kilómetros de profundidad es fruto de esa transformación cristalina. Debido al carácter bi-componente del olivino, la transformación involucra a un intervalo de unos 15 kilómetros en torno a dicho límite. En cuanto a la transformación a γ -silicato-espínela, el cambio de densidad asociado podría explicar la pequeña discontinuidad que han detectado los métodos geofísicos a 520 kilómetros de profundidad. Un aspecto crucial, sobre el que volveremos más adelante, es que ambas transformaciones son exotérmicas, por lo que pueden producirse a menor profundidad (menor presión) si la temperatura es menor.

La transformación del olivino a silicato-espínela no es la única reacción que se produce en las proximidades del límite de los 410 kilómetros. El ortopiroxeno $(Mg, Fe)_2Si_2O_6$, sufre una transformación que da lugar a la formación de una estructura tipo granate (majorita):

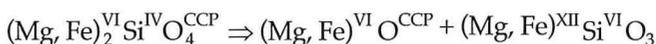


Un examen de los superíndices de ambas fórmulas explica el aumento de densidad que se produce en esta transformación. Algunos átomos de magnesio o hierro (3 por fórmula unidad) pasan a estar rodeados por ocho oxígenos, aumentando de este modo la coordinación y la compacidad de la estructura. Del mismo modo, uno de cada cuatro átomos de silicio pasa a estar rodeado por seis átomos de oxígeno. Esta coordinación silicio-oxígeno es imposible en las condiciones de presión de la superficie terrestre, pero es la vía más frecuente para

conseguir estructuras compactas, adaptadas a las condiciones de presión existentes en el manto.

La transformación en majorita $(Mg, Fe)_3[(Mg, Fe)Si^{VI} Si^{IV} O_{12}]$, guarda una relación estrecha con la presencia de granates de fórmula $(Ca, Mg, Fe)_3 Al_2 Si_3 O_{12}$ en el manto superior. De hecho, se postula que la majorita de nueva formación puede constituir soluciones sólidas de composición intermedia con los granates preexistentes. Finalmente, los clinopiroxenos son estables en todo el manto superior. En definitiva, todo parece indicar que, en la zona de transición, el manto está constituido esencialmente por granate (majorita), clinopiroxeno y silicato-espínela.

De manera análoga, las diferencias de densidad entre el manto superior y el manto inferior, se deben a transiciones de fase que afectan a todos los minerales presentes en la zona de transición. En primer lugar, el γ -silicato-espínela sufre una transformación compleja para dar dos compuestos con estructuras de elevada compacidad, magnesiowüstita y silicio-perovskita:



La estructura de la perovskita $-(Mg, Fe)SiO_3-$ merece una consideración más detenida. El nombre de este tipo estructural deriva de un óxido de calcio y titanio, $CaTiO_3$, que es estable a la presión atmosférica. Las perovskitas del manto tienen la misma estructura, pero su composición es muy diferente. Destacan dos rasgos en estas perovskitas que únicamente pueden presentarse a altas presiones: la coordinación de Mg^{2+} y Fe^{2+} con 12 oxígenos y la coordinación del silicio con 6 oxígenos. Esta elevada coordinación posibilita una estructura de enorme compacidad, hasta tal punto que la silicio-perovskita es un 23% más densa que el olivino. La presencia de silicio en coordinación 6 plantea además una paradoja curiosa: a pesar de ser compuestos con silicio, en sentido estricto estas perovskitas no pueden considerarse silicatos, ya que carecen de tetraedros $[SiO_4]$ (fig. 4).

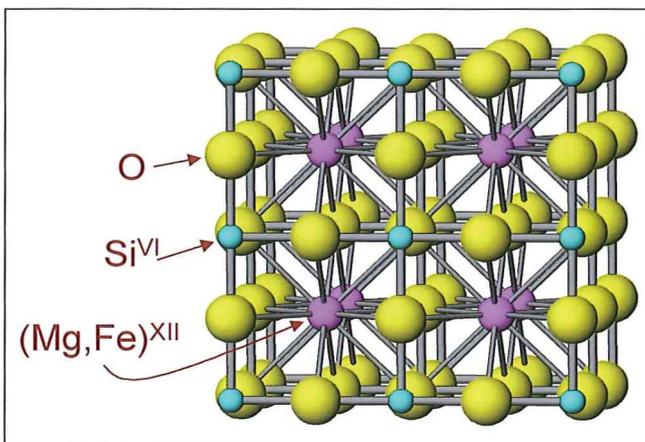


FIGURA 4. En la estructura de la silicio-perovskita los átomos de magnesio (o hierro) están rodeados por doce oxígenos y los de silicio por seis. El descubrimiento de este mineral de silicio de alta densidad se debe a Liu (1974), quien lo sintetizó a partir de granate. Desde entonces se ha podido demostrar que la casi totalidad de los minerales del manto se transforman en este tipo estructural a las presiones del manto inferior.

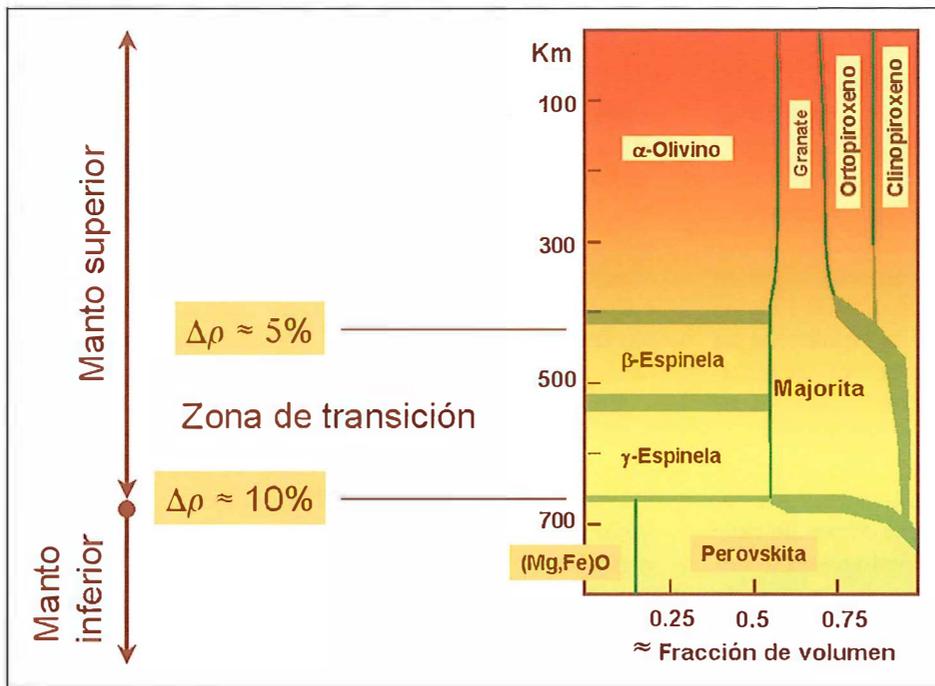
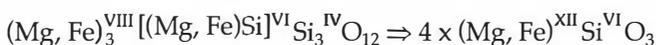


FIGURA 5. Composición mineral del manto terrestre. Ito y Takahashi (1987), a partir de sus propias investigaciones y de las desarrolladas por otros autores, postulan una distribución similar a la que se muestra en esta figura. Los detalles, especialmente la anchura de las zonas de transición, son todavía objeto de debate.

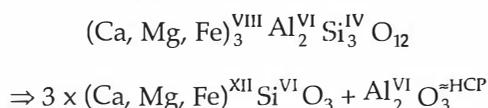
En cuanto a la magnesiowüstita —(Mg, Fe)O— su estructura es también muy densa. En el empaquetado cúbico compacto formado por los oxígenos, todos los huecos octaédricos están ocupados por Fe^{2+} o Mg^{2+} , mientras en las estructuras del olivino y de las silicato-espinelas únicamente estaba ocupada la mitad de estos intersticios.

Se ha demostrado experimentalmente que esta transformación generadora de perovskita se produce a una presión semejante a la que existe en el manto a 660 kilómetros de profundidad, siempre que la temperatura sea de unos 1.700 °C. Debido al carácter bi-componente del sistema, la transformación involucra rango de presiones de unos 0,15 gigapascales, lo que equivale a un estrecho intervalo de unos 4 kilómetros de profundidad. La temperatura es de nuevo un factor crítico, aunque, contrariamente a lo que sucedía con la transformación olivino-espínela, esta reacción es endotérmica y para que se produzca a menor temperatura es necesario alcanzar mayor profundidad. En cualquier caso, la transformación de la espínela en perovskita y magnesiowüstita parece ser la causa de la discontinuidad que marca el límite entre el manto superior y el inferior.

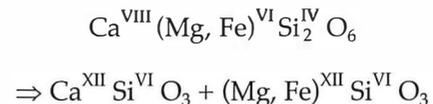
Los diferentes tipos de granate presentes en la zona de transición sufren transformaciones similares para adaptarse a las presiones existentes en el manto inferior. La majorita se transforma en perovskita:



Los granates con calcio y aluminio también se transforman en perovskita, aunque en este caso se forma simultáneamente Al_2O_3 (corindón):



Finalmente, los clinopiroxenos sufren un proceso similar para formar, ¡una vez más!, dos compuestos con estructuras tipo perovskita:



En definitiva, la perovskita parece ser el principal constituyente del manto inferior, una zona que comprende el 55% del volumen de la Tierra. Esto significa que el mineral más abundante del planeta no es exactamente un silicato, ¡aunque contiene silicio! (fig. 5).

CONVECCIÓN Y ¿CAOS? EN EL MANTO TERRESTRE

Aunque las rocas del manto responden como sólidos elásticos ante las ondas sísmicas, al mismo tiempo fluyen bajo el efecto de gradientes de densidad asociados a gradientes térmicos. La paradoja es sólo aparente. En realidad, el comportamiento reológico de un material depende de la “ventana” de tiempo del observador. Un material dado puede comportarse como un sólido elástico para tiempos de observación pequeños y como un fluido viscoso para tiempos de observación grandes. Eso sucede, por ejemplo, con el hielo de los glaciares: aunque ante una observación puntual los hielos glaciares se comportan como sólidos, los flujos anuales alcanzan valores considerables.

Las dislocaciones y la difusión atómica permiten transporte en estado sólido, pero para que se produzca flujo plástico en presencia de gradientes térmicos es necesario que el material se encuentre a temperatura “elevada”. La cuestión es... ¿qué entendemos por temperatura elevada? La pregunta no es trivial. Para el hielo una

temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ es muy elevada, puesto que funde a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cambio, para el extremo magnésico del olivino, con un punto de fusión de $1.890\text{ }^{\circ}\text{C}$, una temperatura de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ puede considerarse muy baja. La clave está en la energía potencial acumulada en los enlaces interatómicos que dan cohesión al sólido, de manera que los sólidos con enlaces muy energéticos tienen puntos de fusión altos. Para superar estas dificultades es conveniente recurrir al concepto de temperatura "homologada", que se define como el cociente entre la temperatura (en Kelvin) a la que se encuentra un determinado compuesto y su punto de fusión. Con esta definición la "receta" es sencilla: un material está en condiciones de fluir plásticamente si su temperatura homologada es superior a $2/3$.

Exceptuando la corteza, todos los materiales de la Tierra, incluidos los del manto, tienen una temperatura homologada superior a $2/3$ y están en condiciones de fluir en presencia de gradientes térmicos. En reología suele utilizarse el número de Rayleigh, R_a , para predecir el tipo de convección de un material en presencia de un gradiente térmico. Se trata de un parámetro adimensional que contiene información de las propiedades del material y de las características del sistema. La convección comienza para $R_a \approx 5000$ y se hace no lineal e incluso caótica para $R_a > 10^6$. Lo realmente relevante es que todas las estimaciones del número de Rayleigh realizadas para el manto dan valores superiores a 10^6 . El manto se comporta como un sólido elástico para el tiempo de observación característico de las ondas sísmicas, pero no parece ser muy diferente de la atmósfera a la escala de los tiempos geológicos.

¿PUEDEN ATRAVESAR LAS CORRIENTES DE CONVECCIÓN LAS DISCONTINUIDADES DEL MANTO?

El conocimiento del gradiente de temperatura y de las propiedades reológicas de los constituyentes del manto no es suficiente para modelar la convección. Es necesario, además, tener clara la geometría del sistema y las variaciones que se producen en dichos constituyentes con la profundidad. Como hemos visto, las discontinuidades del manto representan transiciones entre zonas que tienen la misma composición química global pero diferente composición mineral. ¿Qué le sucede al material del manto cuando, durante la convección, alcanza una de estas discontinuidades?

Situémonos en una zona de subducción. El material que desciende desde los niveles superiores del manto tenderá a transformarse cuando alcance la profundidad adecuada. La transformación del olivino en β -espinela debería producirse a los 410 kilómetros de profundidad, siempre que se alcance la temperatura media, allí reinante, de $\approx 1.600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, la subducción se produce precisamente porque el material descendente está más frío y es más denso que el material circundante. La consecuencia es radical: al estar a menor temperatura, la transformación olivino- β -espinela se produce a menor presión, es decir, antes de que se alcance la discontinuidad de los 410 kilómetros. Al producirse la transformación, el mate-

rial descendente, que ya tenía mayor densidad que las rocas circundantes, se hace todavía más denso y tiende a continuar su descenso. De este modo, la transformación cristalina actúa como un mecanismo de "tracción" sobre el material en subducción. Las corrientes de convección pueden, en consecuencia, traspasar sin problemas el límite superior de la zona de transición. La transformación del olivino en β -espinela, lejos de ser un obstáculo, acentúa la subducción. No obstante, el calor liberado como consecuencia de esta transformación exotérmica ejerce un efecto opuesto: calienta y dilata al material descendente y ello da lugar a fuerzas de resistencia al hundimiento (fig. 6).

En el límite entre el manto superior e inferior la situación es radicalmente distinta. La transformación que marca este límite es endotérmica y tiende a producirse a mayor profundidad si la temperatura es inferior a $1.700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando el material descendente, más frío, alcanza los 660 kilómetros de profundidad se encuentra con un material que, a pesar de estar más caliente, es más denso en razón de su estructura tipo perovskita. Esta anomalía negativa de la densidad produce una resistencia que se opone al hundimiento del material. El resultado es que la discontinuidad de los 660 kilómetros actúa como una barrera para las corrientes de convección, que tienden a desviarse y ralentizarse al alcanzar ese límite. Cuando, finalmente, se alcanzan las condiciones de presión-temperatura adecuadas y se produce la transformación, el calor absorbido enfría y contrae el material en inmersión, lo que favorece el flujo descendente (fig. 7).

CHIMENEAS Y AVALANCHAS EN EL MANTO

El descubrimiento de las transiciones de fase ha obligado a desarrollar modelos computacionales de la convección mantélica enormemente sofisticados. En presencia del cambio endotérmico de los 660 kilómetros de profundidad, todas las simulaciones dan como resultado una estructuración de la convección en dos pisos o capas. No obstante, los mismos estudios indican invariablemente que el piso superior tiene importantes "goteras". En general, las simulaciones numéricas proporcionan configuraciones mucho más complejas que el simple desarrollo de celdas de convección estacionarias. Los flujos descendente y ascendente forman distribuciones laminares y cilíndricas variables en el tiempo e incluso caóticas. En ese escenario general, el cambio endotérmico de los 660 kilómetros de profundidad ejerce una influencia determinante. El material frío en flujo descendente no puede atravesar ese límite, por lo que tiende a fluir lateralmente hasta acumularse en apilamientos cilíndricos en las zonas de intersección de varias láminas descendentes. Finalmente, cuando se almacena una cantidad suficiente de material, la barrera termina sobrepasándose y el material frío se hunde en el manto inferior formando lo que se conoce como una "avalancha".

El término avalancha tiene connotaciones catastróficas y puede parecer más que excesivo a la escala temporal de la vida cotidiana. Sin embargo, resulta muy realista si se examina el fenómeno desde una ventana temporal en la escala geológica. Cuando el material atraviesa la barrera

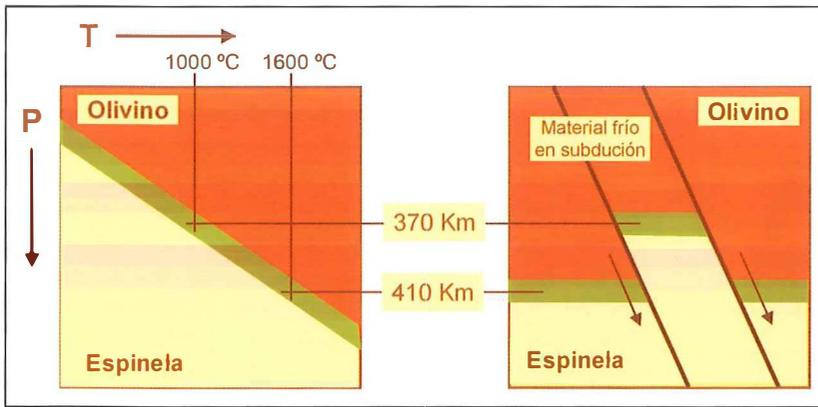
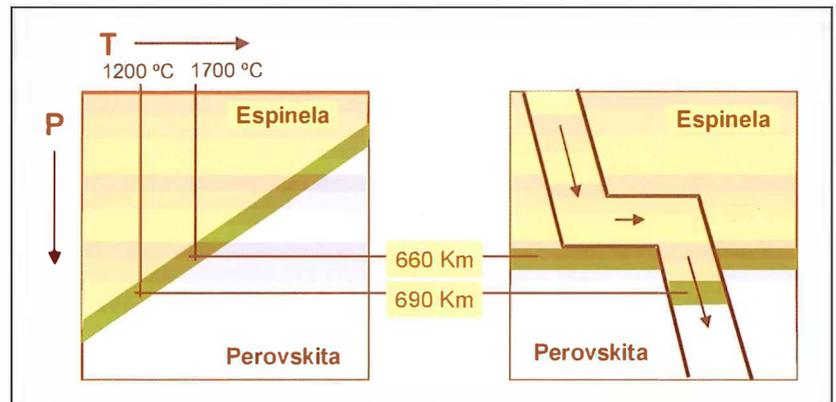


FIGURA 6. La pendiente del diagrama presión-temperatura para la transformación exotérmica del olivino en β -espinela es positiva. Ello significa que, a mayor temperatura, mayor es la presión necesaria para que se produzca la transformación y viceversa. La consecuencia es evidente: si el material en subducción está más frío que el manto circundante, la transformación se produce a menor profundidad en dicho material. El resultado es un incremento de densidad que favorece el descenso del material en subducción.

FIGURA 7. La pendiente del diagrama presión-temperatura para la transformación endotérmica de la espinela en perovskita es negativa. Si el material en subducción está más frío que el manto circundante su transformación se produce a mayor profundidad. Como consecuencia, cuando el material descendente alcanza la discontinuidad de los 660 kilómetros se encuentra con un medio que, a pesar de estar más caliente, es más denso en razón de su estructura tipo perovskita. La discontinuidad de los 660 kilómetros se convierte por esta causa en una barrera para las corrientes de convección, que tienden a desviarse y ralentizarse al alcanzar ese límite.



de los 660 kilómetros y se produce la transformación endotérmica, la absorción de calor asociada a este cambio enfría y densifica el material descendente, acelerando su hundimiento. Las avalanchas se hunden con relativa brusquedad en el manto inferior y terminan “desparrándose” sobre el límite manto-núcleo, refrigerando a este último. Se trata de procesos irregulares, esporádicos en el espacio y el tiempo que permiten un intercambio sustancial de materia entre el manto superior e inferior. Las simulaciones predicen largos períodos de tiempo en los que no se produce transferencia de masa a través de la barrera de los 660 kilómetros. Durante esos períodos el manto funciona como un sistema de dos capas cuyo límite se rompe ocasionalmente, permitiendo el desplome del material acumulado.

El ascenso de material caliente sigue una pauta complementaria a la descrita. En el manto superior las regiones calientes se extienden en amplias bandas o láminas, pero el intercambio de material con el manto inferior se realiza de forma más esporádica mediante columnas o chimeneas cilíndricas, denominadas “plumas”, que conectan el límite manto-núcleo con el manto superior. Como consecuencia de las avalanchas de material frío, en el límite manto-núcleo se forman dorsales calientes que separan las zonas “sepultadas” por las avalanchas. En las intersecciones de esas dorsales se produce la “erupción” irregular de columnas que transportan material caliente hacia el manto superior. Al igual que las corrientes descendentes, en el manto superior el material caliente

adopta estructuras laminares amplias y celdas de convección menores que se alimentan del material que asciende por las chimeneas cilíndricas (fig. 8).

Un aspecto importante a tener en cuenta es que mientras que la transformación espinela-perovskita es endotérmica, la transformación inversa que experimenta el material ascendente es exotérmica. El paso de un penacho de material caliente a través de la barrera de los 660 kilómetros se traduce en un incremento de su temperatura, debido al calor liberado con la transformación perovskita-espinela. Este calor adicional tiene importantes consecuencias, al favorecer el ascenso del material y la generación de “puntos calientes” y estructuras diapíricas en el manto superior.

¿IMPLOSIONES PROFUNDAS?... Y OTRAS INCERTIDUMBRES

Las observaciones realizadas mediante tomografía sísmica corroboran en gran medida los resultados de las simulaciones y demuestran que la transformación espinela-perovskita determina la convección mantélica. En general, el material frío que desciende en las zonas de subducción parece acumularse en el límite entre el manto superior y el inferior para, finalmente, descender masivamente hasta el límite manto-núcleo. Sin embargo, existe también la evidencia de que algunas corrientes descendentes atraviesan directamente la barrera de los

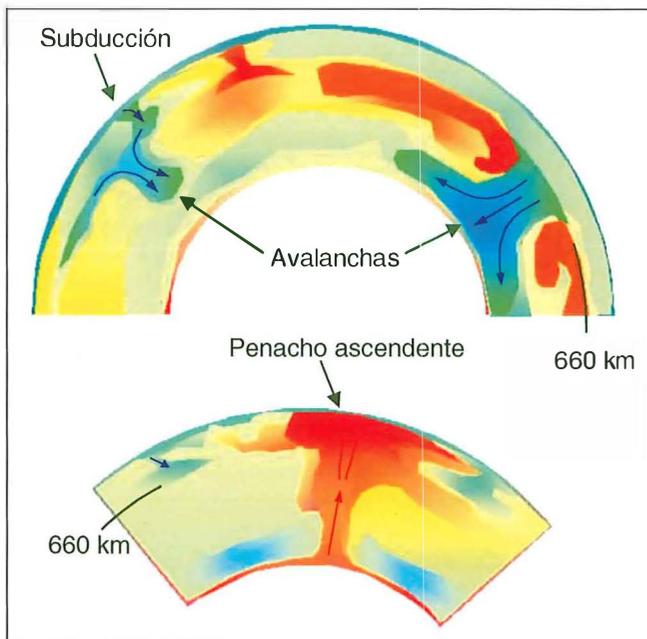


FIGURA 8. Simulaciones de la convección en el manto. El color azul verdoso representa el material frío y el rojo el material caliente. En el esquema superior puede observarse que el material procedente de una zona de subducción se desplaza sobre la barrera de los 660 kilómetros para terminar formando una avalancha. A la derecha del mismo esquema se muestra una avalancha cilíndrica esparciéndose sobre el límite manto-núcleo. En el esquema inferior una columna de material caliente se extiende en forma laminar en el manto superior. Los esquemas están inspirados en imágenes compendiadas por Schubert, Turcotte y Olson (2001).

660 kilómetros, algo que nunca sucede en simulaciones hechas con ordenador. Sin duda, ello se debe a deficiencias en los modelos numéricos de la Tierra, que trabajan con viscosidades constantes y no incorporan aspectos como la rigidez relativa del material descendente.

Los problemas a resolver son todavía numerosos, tanto en lo relativo a la elaboración de modelos numéricos, como en lo relativo a la experimentación. No basta con establecer el diagrama presión-temperatura correspondiente a una transformación determinada, también es necesario conocer su "cinética". La incorporación de los efectos cinéticos a los modelos de convección no es banal. Por ejemplo, la transformación del olivino en espinela supone una reorganización de las distribuciones atómicas que sólo es posible cuando la temperatura supera un cierto valor de "corte". Por debajo de esa temperatura la movilidad atómica es insuficiente y la transformación fracasa aunque la presión sea muy alta, conservándose el olivino como fase metaestable. Muchos autores han querido ver en este fenómeno el origen de los terremotos de foco profundo. En áreas de subducción rápida, el olivino puede alcanzar profundidades importantes cuando la placa en subducción todavía está muy fría. Cuando finalmente se supera la temperatura de "corte cinético", la transformación se produce de forma catastrófica, acompañada de una implosión. J.P. Devaux y colaboradores (1997) han elaborado modelos de subducción que incluyen los efectos debidos a la me-

taestabilidad del olivino, pero encuentran problemas para correlacionar los resultados de su modelo con las profundidades observadas para este tipo de terremotos.

Aunque la composición, el gradiente geotérmico y el ambiente físico-químico del manto superior están bastante claros, el contenido en agua y sus implicaciones en las propiedades de transporte se conocen muy pobremente. A pesar de ello, cada día cobra más fuerza la hipótesis de la responsabilidad del agua y de los fenómenos de deshidratación mineral en la generación de terremotos con focos intermedios y profundos. En un número reciente de la revista *Nature*, J. Zhang y otros científicos (2004) de la Universidad de California postulan que la precipitación de pequeñas partículas de agua en los bordes de grano podría inestabilizar y fragilizar el material en subducción, dando lugar a terremotos con focos situados en la zona de transición del manto.

Las lagunas de nuestros conocimientos aumentan con la profundidad y se hacen descorazonadoras en lo relativo al manto profundo. Con todo hay que ser optimistas porque las aportaciones que se realizan en este campo son incesantes. Por citar un ejemplo muy reciente, D.J. Frost y colaboradores (2004) demuestran que, a muy altas presiones, los iones Fe^{2+} presentes en la perovskita pueden dismutarse para producir Fe^{3+} y hierro metálico. Dicho hallazgo permite postular la existencia de una aleación metálica, rica en hierro, en equilibrio con la perovskita del manto profundo. Es muy poco probable que la humanidad llegue alguna vez a muestrear directamente el manto inferior, pero el avance en la experimentación y en la simulación dinámico-molecular de estructuras complejas va a permitir despejar muchas incógnitas.

REFERENCIAS

- Devaux, J.P., Schubert, G. y Anderson, C. (1997). Formation of a metastable olivine wedge in a descending slab. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 102, 24627-24637.
- Frost, D.J., Liebske, C., Langenhorst, F., McCammon, C.A., Tronnes, R.G. y Rubie, D.C. (2004). Experimental evidence for the existence of iron-rich metal in the Earth's lower mantle. *Nature* 428, 409-412.
- Green, D.H. y Falloon, T.J. (1998). Pyrolite: a Ringwood concept and its current expression. En *The earth's mantle: composition, structure and evolution* (ed.: I. Jackson). Cambridge University Press, Cambridge, pp. 311-378.
- Ito, E. y Takahashi, E. (1987). Ultrahigh pressure phase transformations and the constitution of the deep mantle. En *High-pressure research in mineral physics* (eds.: M. Manghni y Y. Syono). American Geophysical Union, pp. 221-229.
- Liu, L. (1974). Silicate perovskite from phase transformations of pyrope-garnet at high-pressure and high-temperature. *Geophysical Research Letters* 1, 277-280.
- Ringwood, A.E. (1975). *Composition and petrology of the earth's mantle*. McGraw Hill, New York, 618 pp.
- Schubert, G., Turcotte, D.L. y Olson, P. (2001). *Mantle convection in the earth and planets*. Cambridge University Press, Cambridge, 956 pp.
- Zhang, J., Green, H.W., Bozhilov, K. y Jin, Z. (2004). Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust. *Nature* 428, 633-636.

Valor gemológico de las rocas

CARLOS DE LA FUENTE CULLELL

Director de la Escuela de Gemología de la Universidad de Barcelona

C/ Marti Franques, s/n. 08028 Barcelona

La Gemología es la ciencia que se ocupa del estudio y conocimiento de las piedras preciosas o gemas. La Petrología es una ciencia geológica que estudia las rocas; entendiendo por roca todo agregado natural de individuos minerales.

En tanto en cuanto la gran mayoría de las gemas son de naturaleza mineral, es decir, se trata de minerales, resulta obvio que el gemólogo necesita tener conocimientos de Petrología dado que los minerales-gema se encuentran en la Naturaleza integrando determinadas rocas en cuyo seno se han generado y desarrollado, o donde han venido a concentrarse junto con otros minerales detríticos y también constituyen verdaderas rocas, independientemente del grado de cohesión alcanzado entre sus minerales integrantes.

La Gemología es una ciencia joven, a la que podemos considerar como una hijuela o parte específica de la Mineralogía, pero en la actualidad esta ciencia ya no limita su objeto de estudio al de unos minerales con unas características determinadas, sino que se extiende hacia el de otros materiales que carecen de la condición de mineral, por un lado, como pueden ser el ámbar, succinita, la perla, y en parte el coral y otras gemas organógenas y, por otro lado, extiende su estudio a materiales no naturales que son producto de procesos de síntesis, lo que se describe en el lenguaje gemológico como "las otras piedras preciosas".

Estos materiales gemológicos de origen sintético constituyen hoy en día un apasionante campo de estudio e investigación gemológica que ha propiciado una puesta a punto, aplicación y desarrollo de las más modernas tecnologías analíticas y con ello un creciente interés por los conocimientos de Gemología, aupado por la pugna existente entre la tecnología dedicada a la síntesis mineral de piedras preciosas, cuyo objetivo es producir materiales exactamente iguales a las gemas naturales, y la tecnología analítica dedicada a distinguir y diferenciar los materiales gemológicos sintéticos y los naturales. Claro está que en estas últimas siempre habrá un poderoso factor discriminante: el factor tiempo geológico, irreproducible en el laboratorio y en la industria dedicada a la síntesis de gemas. De este modo se pueden discriminar, mediante la aplicación de técnicas analíticas espectroscópicas (FRX, IR, Raman, etc.), diamantes naturales de los sintéticos Sumitomo, por ejemplo.

No cabe duda de que gran parte de la investigación científica en el campo de la Gemología está implicada en los procesos de síntesis de gemas y en aquellos que

llevan a discriminar la piedra sintética y/o tratada de la natural.

Y como en tantos ámbitos de la actividad humana es el factor económico el motor último de esa actividad investigadora. Basta comprobar las diferencias de valor y de precio entre las piedras preciosas naturales y sus correspondientes sintéticas, lo cual incentiva la producción de estas últimas. Nadie sintetiza una gema cuyo correspondiente natural sea más barato y prueba de ello es que el precio de una gema sintética está siempre muy por debajo de su correspondiente natural.

Para que un material tenga interés gemológico deben concurrir en él tres características esenciales: belleza, dureza y rareza.

La belleza es la más subjetiva de esas características pero con todo, es obvio que, desde los albores de la historia humana, el hombre se fijó en estos materiales por simples razones estéticas... son bonitos y le parecían y parecen bellos, capaces de producir una sensación agradable (fig. 1). De esto hace ya mucho tiempo. Recientemente, los arqueólogos han hallado en la caverna de Blombos, en Sudáfrica, un collar manufacturado hace



FIGURA 1. Cuarzo con inclusiones de un bonito color verde (Gemological Association of Great Britain).

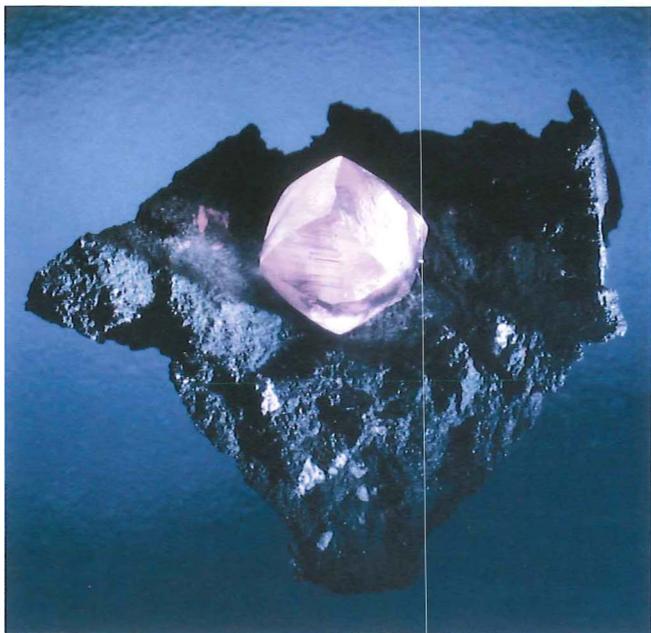


FIGURA 2. Diamante en bruto de forma octaédrica sobre una roca madre (Kimberlita).

75.000 años, que demuestra que el interés del hombre por los objetos de adorno es tan antiguo como el hombre mismo.

Otra propiedad exigible a las gemas, la dureza, conceptuada como la resistencia mecánica que opone un material a ser rayado, es en las gemas una garantía de durabilidad. "Un diamante es para siempre" reza un conocido eslogan publicitario de De Beers, la multinacional del diamante. Y hay una base de certeza en esta propaganda por cuanto el mineral diamante es el material más duro que existe, raya a todos los materiales y no es rayado por ningún otro material (fig. 2).

Finalmente, la rareza de un material, su escasez, es una propiedad que incide en los aspectos económicos más elementales. El hombre, antes y ahora, valora lo escaso, aquellos materiales raros y poco abundantes cuya posesión le permite singularizarse respecto a sus congéneres.

No olvidemos que criterios económicos impregnan y rigen muchas actividades humanas y la ciencia de las piedras preciosas no sólo no es una excepción sino que es de ello un buen exponente. La Economía, según precisa definición de Carl Polanyi en su obra *La grande transformation*, es la ciencia que se ocupa del estudio y la gestión de los recursos escasos. Para Lionel Robbins y Adam Smith (*Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*), la Economía es la ciencia que estudia el comportamiento humano como una relación entre los fines y los medios escasos que tienen usos alternativos. De ahí surge el problema a resolver de la gestión y asignación de los recursos escasos que configura el "homo oeconomicus" de Robbins.

Si volvemos al mundo mineral nos percataremos, sin necesidad de ser prestigiosos economistas, que el mineral y no digamos ya el mineral-gema, es y será siempre un recurso escaso.

En Economía se conceptúa como recurso escaso aquél cuyo ritmo generativo es muy inferior al consumitivo; es decir aquel que se consume con una velocidad muy superior a la velocidad con que se produce... pues bien, si aplicamos al mineral, a cualquier mineral, sea gema o no, este criterio económico, hemos de concluir que los minerales serán siempre recursos escasos, pues se producen a escala de tiempo geológico y se consumen o explotan sus yacimientos a escala de tiempo humana. La unidad de tiempo geológico es el millón de años y a escala humana es el segundo. No hay recurso más raro y escaso que el recurso mineral, que precisamente por eso se clasifica como "no renovable".

Estas cuestiones tan obvias son, sin embargo, determinantes en cuanto nos introducimos en el estudio y valoración de las gemas y materiales preciosos naturales, pero hay que tener en cuenta que también estos principios económicos, que teóricamente son muy racionales y están muy fundamentados, pueden en un momento o circunstancia dados, quebrar estrepitosamente y ser irrealistas, porque los hombres tienen emociones, sentimientos y opiniones que son influenciables y comportamientos y actitudes a veces irracionales.

Precisamente porque existen estas influencias sobre el hombre, la atribución de valor a las gemas es un tema delicado y nada fácil de objetivar. Existen gemas que en un determinado momento "están de moda" y en otro dejan de estarlo, y ello determina su valor de mercado.

De esta realidad tenemos multitud de ejemplos en el mundo de las piedras preciosas... uno muy reciente es el caso de las tanzanitas. La tanzanita es el nombre gemológico de un mineral, la zoisita, encontrado y descrito por primera vez en 1805, en la cordillera Saualpe, en Carintia, Austria, por el barón Von Zois y que hasta época reciente carecía de valor gemológico alguno. Pero en 1954 se halló en Arusha, en lo que hoy día es Tanzania, una roca verde con inclusiones negras de hornblenda y conteniendo rubíes de tamaño considerable aunque opacos. Esta roca constituye, debido a su impresionante contraste de colores, una roca ornamental muy decorativa y de alto precio que se conoce como zoisita-gema o zoisita-anfibolita, de hecho se trata de una verdadera roca-gema.

Desde 1967 se introduce en el mundo de las piedras preciosas una zoisita con el nombre de tanzanita. Esta gema proviene de Tanzania, de donde se extrae en un único yacimiento, el de Arusha, ya citado (fig. 3). El mineral responde a una composición de silicato aluminico cálcico ($\text{Ca}_2 \text{Al}_3 (\text{OH}, \text{O}, \text{SiO}_4, \text{Si}_2\text{O}_7)$) cristalizado en prismas rómbicos. La piedra es "resultona" desde el punto de vista estético y presenta unos colores que van del azul intenso del zafiro (con el que, a primera vista, puede confundirse) hasta el violeta. Tiene, además, una dureza ($H = 6.5 - 7$) suficientemente elevada para admitir un buen pulido. Esta tanzanita la "pone de moda" la famosa casa de joyería Tiffany's de Nueva York y se extiende comercialmente de modo muy rápido y fulgurante, aunque al principio las grandes firmas de joyería, por razones de competencia comercial, rechazan este



FIGURA 3. Tanzanitas de Arusha (Tanzania) talladas, unas gemas valorizadas por la moda y luego desvalorizadas por las circunstancias.

nombre de tanzanita y siguen llamándola zoisita azul. Sin embargo la influencia de Tiffany's acaba imponiéndose y ayudada por la circunstancia de que, pronunciado en inglés, "zoisite" recuerda a "suicidio", lo cual es poco comercial, el nombre de tanzanita se impone en joyería y se admite en Gemología.

Pero las circunstancias e influencias que sirvieron para promocionar la tanzanita al estrellato de las piedras preciosas y con ello su precio en los mercados, hacen que al cabo de unos años, esa misma tanzanita deje de estar de moda... y en esta ocasión por motivos totalmente ajenos a la realidad del material.

El 11 de septiembre de 2001 tiene lugar en Nueva York el salvaje atentado terrorista en las torres gemelas. Poco después un periódico americano de gran tirada, publica la noticia, no sé si debidamente contrastada, de que la empresa que explota en Tanzania el yacimiento de Arusha, está relacionada con la trama económica de Al Qaida..., las tanzanitas desaparecen de los escaparates de Tiffany's..., su precio en el mercado se hunde..., ya nadie aprecia las tanzanitas a los niveles en que llegó a apreciarse..., ¿acabará volviéndose a llamar zoisita azul?..., a fin de cuentas se trata de la misma piedra. Todo es posible en este mundo voluble y cambiante de la moda que tiene una indudable incidencia en la valoración de las piedras preciosas.

Estas cuestiones pueden parecer anecdóticas, pero la realidad es que el estudio completo de las piedras preciosas raramente puede prescindir de estos aspectos económicos consustanciales con las gemas, siendo como son, materiales de alto valor y cotización.

Por ello, no debe extrañar a nadie que las gemas naturales de gran valor tengan una verdadera pléyade de gemas sintéticas correspondientes a su composición y estructura y un mayor número aún de piedras de imitación y tratadas. Lo que conviene desechar de la terminología gemológica es lo de piedra auténtica y piedra falsa. Todas las piedras son auténticas si la denominación es correcta y responde a su naturaleza y estructura, no existe la "piedra falsa", la falsedad radi-

ca en la inadecuada atribución de una nomenclatura que no responde a su composición, estructura y origen.

Es también por motivaciones económicas por lo que recientemente se están incorporando al ámbito de estudio de la Gemología nuevos materiales naturales: las rocas. Sí, se puede hablar ya con toda propiedad de rocas-gema. Ya anteriormente, algunos materiales que tienen categoría de rocas, por su interés y valor, eran objeto de estudio en Gemología. Pensemos en la ya citada zoisita-roca, o en el azabache, por ejemplo, que es una roca sedimentaria organógena de indudable interés gemológico. Participando de las características de las gemas en cuanto a estética, resistencia mecánica a la abrasión en este caso, y escasez, que las convierte en materiales muy buscados y apreciados y por lo tanto valiosos, se están incorporando al conjunto de materiales de interés gemológico un buen número de rocas, las rocas-gema (fig. 4).

Estas rocas, todas ellas compactas, pueden ser tanto metamórficas como ígneas o sedimentarias, pero todas ellas presentan, además de una belleza considerable y una escasez evidente, una resistencia a la abrasión lo suficientemente elevada como para permitir un buen pulido. Los gemólogos saben muy bien que una gema dura es garantía no sólo de su durabilidad o permanencia en el tiempo, sino también de posibilitar un buen pulido. Pues bien, aquellas rocas ornamentales que presentando una buena estética, sean raras o escasas y propicien un buen pulido, están siendo ascendidas en la apreciación humana desde la categoría de roca ornamental hasta la de roca-gema.

Alabastros, mármoles serpentínicos, dolomías, latitas, mármoles ónice, además de algunos jaspes y determinadas rocas plutónicas y magmáticas raras y escasas están incorporándose, bajo nombres comerciales

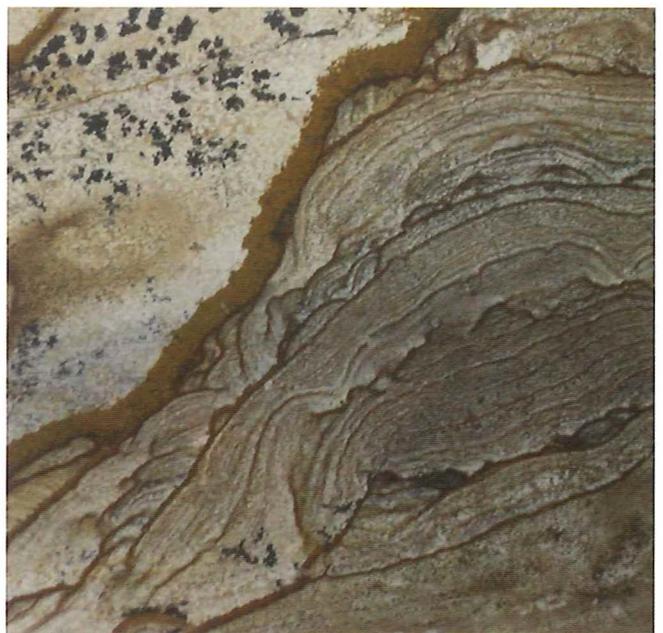


FIGURA 4. Muchas rocas ornamentales, por su rareza y belleza, son consideradas como rocas-gema. Paesita de la Aldea de San Nicolás de Tolentino (Gran Canaria).

diversos, al campo de los materiales naturales de interés gemológico y adquiriendo la condición de rocas-gema. Se trata de rocas ornamentales excepcionales, utilizadas en la fabricación de artículos y objetos decorativos de lujo en los que su valor está en razón de su excepcionalidad y su belleza. Se están utilizando hoy en día muy profusamente como materia prima para la elaboración de lo que se denomina arte funerario, por ejemplo. Es frecuente su empleo en la fabricación de urnas funerarias.

Dejando aparte estas utilizaciones específicas de las rocas-gema, sí nos interesa apuntar el hecho de que estas rocas incorporadas al mundo de las piedras preciosas tienen un futuro prometedor como materiales gemológicos, ya que, aunque no son por lo general materiales transparentes y por tanto difícilmente interesará tallarlos en facetas y su manipulación se va a limitar a un aserrado, burilado, pulido y, en el mejor de

los casos, un cabujonado, estos materiales gemológicos de medio volumen son perfectamente susceptibles para ser trabajados mecánicamente y obtener de ellos objetos de valor que sumen al valor del material el valor artístico añadido, a veces difícilmente evaluable, que pueden alcanzar.

Finalmente, las rocas-gema tienen frente a otros materiales gemológicos, hoy por hoy, una clara ventaja económica y es que así como la tecnología para la síntesis mineral está muy avanzada y se consiguen diamantes, corindones, berilos, topacios, cuarzos, turquesas, ópalos, espinelas, alejandritas, circones, turmalinas, fluoritas, lapislázulis, jadeítas y hasta malaquitas, corales y hematites sintéticos, la tecnología para producir estas rocas-gema sintéticas, máxime si se trata de rocas poliminerales, no está aún a punto y creo que tardará años en conseguirse..., y cuando esto ocurra, el hombre seguirá prefiriendo siempre lo natural.



Revisión de la situación de la enseñanza de la Mineralogía en España y otros países europeos

EMILIO GALÁN HUERTOS, PATRICIA APARICIO FERNÁNDEZ E ISABEL GONZÁLEZ DÍEZ

Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química.

Universidad de Sevilla, Apdo. 553, 41071 Sevilla. egalan@us.es, paporicio@us.es, igonza@us.es

Las universidades europeas han aceptado el reto que supone la creación de un Espacio Europeo de Educación Superior, lo que requiere definir una serie de objetivos y métodos de trabajo compartidos para que el resultado sea satisfactorio. No cabe duda que la Universidad, en su doble vertiente investigadora y docente, deberá tener un papel importante en la definición de la nueva dimensión europea. Esto supondrá ventajas desde el punto de vista sociolaboral, con igualdad de oportunidades para todos los titulados y la posibilidad de captación de estudiantes de otros países.

La situación actual permite reflexionar sobre el sistema educativo superior y asumir nuevos retos que permitan alcanzar una convergencia real de todas las Universidades Europeas. En este ámbito, durante la última reunión de Ministros de Educación (Berlín, 2003) se insistió en la necesidad de lograr mayor coherencia en las titulaciones (Bachelor y Máster), de la utilización de un lenguaje común y en acordar unos contenidos básicos (core) para cada titulación.

La regulación de la estructura de las titulaciones será el punto de mayor complejidad, y su futuro desarrollo deberá tener muy en cuenta las recomendaciones sobre los distintos niveles, con un primer nivel de contenidos reglados y una máxima flexibilidad en la oferta de titulaciones de segundo nivel (Máster y Doctorado), que serán señas de identidad de las distintas instituciones y estarán directamente relacionadas con las actividades investigadoras de cada centro.

En este ámbito y en relación con la enseñanza de la Mineralogía se ha estimado oportuno realizar un balance de la situación actual en España y otros países europeos, con el objeto de que esta revisión pueda servir para comparar las distintas ofertas universitarias relacionadas con esta materia.

Actualmente existen proyectos a nivel europeo en los que se está trabajando en este sentido. Uno de estos proyectos se denomina "Preparation of a Co-ordinated European Curriculum in Mineral Science" Erasmus CDA, y forman parte del mismo de manera oficial Ita-

lia, República Checa, Grecia, Austria, Hungría y Polonia, aunque a la última reunión de coordinación, celebrada en Berlín en septiembre de 2003, fueron invitados representantes de Eslovenia, Serbia, Eslovaquia, Francia y España.

Una de las conclusiones de la citada reunión fue que sería deseable ofertar Máster Europeos en Mineralogía, Recursos Minerales y/o temas relacionados con el Medio Ambiente, con objeto de que esta disciplina obtuviera un lugar representativo en los estudios ofertados en el nuevo espacio europeo de educación superior. Estos Másters deben basarse en acuerdos bi/multilaterales entre varios centros de educación (3-5 socios). Para empezar la unión de módulos debería considerarse sobre la base de áreas de alto nivel académico y de investigación de cada universidad social. Esta situación debería también beneficiar el establecimiento de centros de investigación. De igual forma la movilidad de los estudiantes puede ser una herramienta para crear cursos de especialización periódicos. Debido a las largas distancias la enseñanza a través de Internet debe formar parte del currículum.

Para poder planificar el diseño de estos Másters es necesario en primer lugar conocer cuál es la situación actual de la enseñanza en Mineralogía, es por ello por lo que a continuación se resume la situación en las universidades españolas, así como en algunas universidades de Austria, Eslovenia, Grecia, Hungría, Italia y República Checa. Los datos correspondientes a las universidades no españolas proceden del Acta de la última reunión del Proyecto "Preparation of a Co-ordinated European Curriculum in Mineral Science" (Budapest, septiembre de 2003).

SITUACIÓN ESPAÑOLA EN RELACIÓN CON LA ENSEÑANZA DE LA MINERALOGÍA

El Área de Conocimiento "Cristalografía y Mineralogía" se encuentra actualmente representada en veinticuatro departamentos universitarios, los cuales impar-

ten docencia de Mineralogía en diferentes licenciaturas (Geología, Química, Ciencias Ambientales, Ciencias del Mar, Biología, Farmacia, Ciencias de la Educación) e ingenierías (Ingeniería Geológica, Ingeniería de Minas, Ingeniería de Materiales, Ingeniería Industrial, Ingeniería Química).

Actualmente en España la Mineralogía sólo aparece de forma obligatoria en asignaturas pertenecientes a las carreras de Geología, Ingeniería Geológica, Ingeniería de Minas y Ciencias Ambientales, y no está incluida de forma obligatoria como disciplina en la mayoría de licenciaturas/ingenierías como Química, Ingeniería Química e Ingeniería de Materiales donde sería necesaria (tabla 1). Particularmente significativo es el caso de la licenciatura en Química donde el área de Cristalografía y Mineralogía está representada en quince Facultades, y sin embargo el número de asignaturas obligatorias es muy bajo en la mayoría de ellas.

Por otra parte, se ofertan diferentes asignaturas optativas relacionadas con la Mineralogía fundamentalmente en las carreras de Geología, Ingeniería Geológica, Química y Ciencias Ambientales (tabla 2).

En España, además, se ofertan asignaturas de libre configuración curricular (LCC) relacionadas con la Mineralogía que alumnos de distintas carreras científicas y técnicas pueden elegir para completar su formación. Algunas de estas asignaturas son: Geología, Introducción a la Mineralogía, Métodos Mineralógicos y Petrográficos en la Identificación de Rocas Industriales y Materiales Naturales y Sintéticos de Interés Arqueológico, Técnicas Analíticas al Servicio de la Arqueometría, Cerámica y Vidrio, Mineralogía de Sedimentos, Cristales y Minerales, Caracterización del Patrimonio Geológico, Geología Básica y Ambiental, Restauración de Monumentos, Minerales y la Salud Humana, Minerales y Rocas Industriales en Construcción, Materias Primas Minerales, etc.

Por otra parte, algunos estudios de postgrado ofertan asignaturas relacionadas con Mineralogía, tales como:

- Alteración y Restauración de Monumentos.
- Análisis de Estructuras Cristalinas.
- Caracterización Química y Estructural de Materiales Naturales y Sintéticos.
- Caracterización de la Contaminación del Suelo.
- Caracterización de Materiales Mediante Técnicas de Difracción de Rayos-X.
- Caracterización de Materias Primas y Derivados.
- Composición Mineralógica de los Suelos Mediterráneos.
- Contaminación de Suelos por Elementos Traza.
- Contexto Geodinámico y Modelización de los Yacimientos Minerales.
- Crecimiento Cristalino, Geoquímica de Aguas y Medio Ambiente.
- Equilibrio de Fases.

- Especialización Profesional en Diamante.
- Especialización Profesional en Gemología.
- Evaluación de Impacto Ambiental.
- Geofluidos.
- Geología y Control Estructural de Yacimientos Minerales.
- Geología y Tipos de Minerales y Rocas Industriales.
- Geoquímica de Isótopos Estables.
- Interacción Atmósfera-Materiales de Construcción.
- Las arcillas en el Control y Aislamiento de Residuos.
- Mineralogía Ambiental.
- Modelización Geoquímica Aplicada al Medio Ambiente.
- Problemas Mineralógicos del Patrimonio Artístico.
- Procesos y Materiales Cerámicos.
- Recursos Minerales: Génesis, Utilización y Problemática Medioambiental.
- Técnicas Analíticas en Mineralogía de Suelos.

SITUACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA MINERALOGÍA EN OTROS PAÍSES EUROPEOS

Austria

Desde octubre de 2003 el sistema universitario consta de tres ciclos: 1.º (tres años) que termina con el Bakkalaureat degree, el 2.º (dos años) que proporciona el Magister degree y el 3.º (dos años) con el que se obtiene el grado de Doctor (PhD degree).

En Viena durante el primer ciclo se ofertan asignaturas de especialización para dar acceso por ejemplo a Bakkalaureat en Mineralogía y Cristalografía. Además este sistema proporciona flexibilidad para cursar diferentes segundos ciclos de especialización, convalidándose asignaturas de contenido similar, aunque al mismo tiempo es necesario cursar un gran número de créditos en el caso de cambio de especialidad.

En el nuevo currículum la mayor parte de los contenidos tradicionales se han mantenido, aunque reorganizados entre los diferentes ciclos.

Eslovenia

La Mineralogía se incluye en el currículum en Geología de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Ljubljana. Mineralogía y Cristalografía son dos asignaturas de primer curso, teniendo 30 h teoría/30 h prácticas y 45 h teoría/30 h práctica, respectivamente. Además se oferta asignaturas de Técnicas en Mineralogía (30 h teoría/30 h prácticas) y Reconocimiento de Minerales en Depósitos (72 días de campo) durante el cuarto curso. Por otra par-

TABLA I: Asignaturas obligatorias/troncales relacionadas con la Mineralogía, impartidas por el área de Cristalografía y Mineralogía en diferentes Licenciaturas/Ingenierías.

	Geología [9]	Ingeniería Geológica [3]	Química [15]	Ingeniería de Minas [1]	Ingeniería Química [4]	Ciencias Ambientales [9]	Biología [1]	Ciencias del Mar [1]	Ingeniería de Materiales [1]
	Mineralogía (Silicatos) (9)	Cristalografía y Mineralogía (3)	Cristalografía y Mineralogía (5)	Mineralogía y Petrología (1)	Crecimiento de Cristales y Cristales Industriales (1)	El Medio Físico (3)	Introducción a la Geología (1)	Recursos Minerales Marinos (2)	Técnicas de Caracterización (1)
	Mineralogía (No Silicatos) (9)	Mineralogía (1)	Cristalografía (3)	Recursos Geológicos (1)	Mineralogía Ambiental (1)	Geología (1)		Geología (1)	
	Yacimientos Minerales (2)	Mineralogía Aplicada (1)	Ciencia de Materiales (3)	Prospección e Investigación de Recursos (1)	Mineralogía Química y Ambiental (1)	Arquitectura del Paisaje Geológico (2)			
	Yacimientos Minerales, Recursos Energéticos y Prospección Geoquímica (1)	Materiales de Construcción (1)	Geología Medioambiental (1)	Ingeniería Geológica y Ambiental (1)		Edafología Ambiental (2)			
		Depósitos Minerales (1)	Geoquímica y Mineralogía (2)	Geología (1)					
	Recursos Minerales Medioambientales (1)	Recursos Minerales y Energéticos (2)	Geología (1)	Ingeniería Técnica de Minas [3]			Ciencias Educación [2]		
			Cristaloquímica (1)		Minerales		Principios Básicos de Geología (1)		
				y Rocas Industriales (2)			Geología y Recursos Minerales (1)		
	Depósitos Minerales (2)	Exploración y Evaluación de Recursos (1)		Mineralogía y Petrografía (2)					
	Cristalografía (7)	Petrología (1)		Yacimientos Minerales y Rocas Industriales (2)					Ingeniería de Montes [1]
	Recursos Minerales y Energéticos (1)	Petrología Aplicada (1)		Geología (1)					Geología y Climatología (1)
	Termodinámica y Fenómenos de Transporte (1)	Termodinámica y Fenómenos de Transporte (1)							

[] Número de universidades que ofrecen licenciatura/ingeniería.
 () Número de universidades en las que la asignatura es obligatoria.

OBLIGATORIAS/TRONCALES

TABLA 2: Asignaturas optativas relacionadas con la Mineralogía en diferentes licenciaturas/ingenierías en universidades españolas.

	Geología [9]	Ingeniería Geológica [3]	Química [15]	Ciencias Ambientales [8]	Ingeniería Industrial [1]	Ciencias de la Educación [1]	Ingeniería Técnica de Minas [3]	Ingeniería Química [4]	Ciencias del Mar [1]	
OPTATIVAS	Geología (1)	Geoquímica de las Aguas Naturales (1)	Mineralogía y Aplicaciones de las Arcillas (1)	Técnicas de Análisis de Materiales Geológicos (1)	Minerales y Rocas Industriales (1)	Introducción a las Ciencias de la Tierra (1)	Rocas Ornamentales (1)	Rocas y Minerales (1)	Geología Económica de Recursos Marinos (1)	
	Mineralogía de Depósitos Metálicos (4)		Química y Mineralogía Ambiental (1)	Geoquímica Ambiental (1)						Sistemas y Métodos de Representación en Geología (1)
	Cristalquímica (1)		Geoquímica (2)	Laboratorio de Geología (1)		Degradación y Conservación de Rocas Ornamentales (1)	Degradación y Conservación de Rocas Ornamentales (1)			
	Geología de Arcillas (4)		Menas Metálicas (1)	Física y Química de Minerales (1)				Deterioro Ambiental de Monumentos y Obras Civiles (1)	Génesis Mineral en Ambientes Marinos (1)	
	Mineralogía Industrial (1)									
	Depósitos Minerales (2)									
	Mineralogía Óptica (2)	Geología de las Explotaciones a cielo abierto de Rocas Industriales (1)	Métodos Cristalográficos de Caracterización de Minerales (1)	Almacenamiento Geológico de Residuos (1)	Ingeniería de Materiales [2]					
	Estabilidad Mineral (1)									
	Recursos Minerales y Energéticos (2)	Geoquímica de las Degradaciones de Materiales Naturales (1)	Cristalografía, Mineralogía y Geoquímica (1)	Mineralogía Ambiental (1)	Materias Primas Minerales (1)					
	Minerales y Rocas Industriales (2)									
	Exploración y Evaluación de Depósitos Minerales (2)									
	Mineralogía de Arcillas (1)	Geología de Arcillas (1)	Mineralogía y Mineralogénesis (1)	Dinámica Externa del Medio Físico (1)						Biología [2]
	Mineralogía Aplicada (1)									
	Métodos de Prospección en Geología (1)	Mineralogía de Arcillas (1)	Química Física Mineral (1)	Recursos Minerales y Medioambiente (1)						
	Mineralogía de Menas y Minerales Industriales (1)									
Estructura y Propiedades Minerales (1)		Mineralogía (1)	Geología Medioambiental (1)						Procesos y Materiales Geológicos (1)	
Técnicas Instrumentales en Mineralogía (3)										
Materiales Cristalinos (2)										
Procesos Termodinámicos de Minerales (1)										
Materiales Geológicos en Protección del Patrimonio y Restauración (1)										
									Geología (1)	

[] Número de universidades que ofrecen licenciatura/ingeniería. () Número de universidades en las que la asignatura es obligatoria.

te, la Mineralogía también está presente en el contenido técnico mediante la asignatura Industria No Metálica Eslovena.

En relación con la oferta de postgrado los estudiantes pueden especializarse en: mineralogía de minerales naturales, mineralogía de minerales sintéticos (cerámica), difracción de rayos-X de minerales de la arcilla, determinación de estructuras por XRD...

Francia

Desde hace varios años la Mineralogía (incluyendo la sistemática, cristalografía, difracción de rayos-X) no forma parte del currículum en Geología en la mayoría de las universidades. Sin embargo, ramas como Geoquímica y Petrología se han fortalecido. Durante el primer ciclo la Mineralogía se imparte a alumnos de Ciencias de la Vida y de la Tierra. Otros temas relacionados con la Mineralogía son Minerales de Alta Presión (París, Lyon), o Fases Mineralógicas y Mineralogía de Arcillas (Poitiers, Orleáns, Marseille). Además, en Orleáns se incluyen asignaturas como Cristalografía y Difracción de rayos-X en el currículum de Física del Estado Sólido o Química.

Grecia

No existe actualmente ningún grado en Mineralogía, aunque ésta se incluye en el currículum de Geología o Ingeniería de Minas en las Universidades de Atenas, Tesalónica, Patrás y Creta.

Tradicionalmente los estudios de postgrado ofertan los siguientes programas: Estudios Avanzados (1 año), Grado de Máster (mínimo 18 meses) o Tesis Doctoral (mínimo 3 años). El segundo grado se puede obtener en Petrología-Geoquímica o en Recursos Naturales-Ciencias Medioambientales.

Hungría

El nuevo currículum del primer ciclo se ha comenzado a implantar durante este curso (2003/2004).

En Veszprem la Mineralogía forma parte de la formación en Ciencias Ambientales, Geoquímica, Ingeniería Química, Química (para maestros), Ciencia de Materiales, Ingeniería Ambiental y Ciencias Medioambientales (para maestros). Después del 5º semestre se ha introducido un filtro que consiste en alcanzar el 70% de los créditos recomendados. La Mineralogía se ha incluido en asignaturas básicas que constituyen el 44% del total.

Italia

Actualmente existen dos ciclos, el segundo de los cuales (en particular en el Área de Ciencias de la Tierra) ha

sido definido recientemente por cada Universidad, sobre la base de las directrices nacionales (120 CFU "crédito formativo unitario", 1/3 de los cuales está fijado por el Ministerio y el resto por cada universidad). En Pisa y Turín el segundo ciclo ha comenzado este curso académico, mientras que en el resto comenzó en el curso 2002/2003.

En Pisa se ofertan dos *curricula* en Ciencias de la Tierra: Geología Dinámica y Medioambiental y Geomateriales y Georrecursos, siendo en éste último en el que se incluyen aspectos de Mineralogía.

En Turín, hay tres diferentes grados en Ciencias de la Tierra: Geología Estructural, Paleontología y Medio Ambiente y Geología Aplicada, incluyéndose Mineralogía principalmente en el tercero, así como en otras líneas de estudio (Ciencia de Materiales, Química, Arqueología). Así mismo, se ofertan asignaturas tales como Mineralogía de Suelos, Protección del Patrimonio Arquitectónico o Mineralogía Aplicada. Debido a que el sistema sigue siendo lineal, cambiar de perfil entre el primer y segundo ciclo es difícil, por ejemplo un segundo ciclo en Mineralogía Aplicada sólo se oferta para alumnos que hayan finalizado el primer grado en Ciencias Ambientales.

República Checa

En la Charles University (Praga) los estudios que incluyen Mineralogía son: Geología-Mineralogía, Geología, Procesado de Recursos Naturales y Enseñanza de Ciencias Naturales. Los alumnos pueden matricularse de asignaturas relacionadas con la Mineralogía durante los tres primeros cursos (grado), o durante el cuarto, especialmente en el caso de estudiantes de la especialidad Mineralogía, mientras que no podrán cursarla durante el quinto curso. Por otra parte, se ofertan cursos más especializados para postgraduados.

El RNDr (Doctor en Ciencias Naturales) es un grado intermedio entre MSc y PhD, algo similar a la *Laurea triennale* o la *Laurea quinquennale* que se obtienen en Italia y Francia, respectivamente.

PROGRAMAS DE ESTUDIO INTENSIVO EN MINERALOGÍA

Actualmente se ofertan Programas de Estudio Intensivos (IP) en Mineralogía preparados por distintas Universidades Europeas. Por ejemplo, en el seno del Proyecto "Preparation of a Co-ordinated European Curriculum in Mineral Science" Erasmus CDA, se realizó el pasado año en Budapest un curso denominado "Ultrahigh pressure metamorphism", por el que los estudiantes han recibido un certificado de 2ECTS. Así mismo, los países integrantes del citado proyecto, en su reunión de septiembre de 2003, aprobaron un nuevo ciclo de tres años (2004/2006) con el título general "Advanced analytical methods and their implication in mineral sciences", siendo los temas y sedes de realización los

siguientes: *a)* IP2004: Spectroscopic Methods. Universidad de Viena, agosto-septiembre 2004; *b)* IP2005: Mineral Behaviour at Extreme Conditions. Universidad de Heidelberg; *c)* IP 2006: Materials Science. Suiza.

Otras propuestas futuras para Programas de Estudio Intensivos en Mineralogía son: Geochemical Tracers (Universidad de Pavia) y Cosmic Mineralogy (Universidad de Mainz).

EN CONCLUSIÓN

Sería deseable que los especialistas en Mineralogía de las Universidades Españolas aunaran esfuerzos para ofertar Programas de Estudios Intensivos en Mineralogía, que pudieran transformarse en Másteres reglados con la implantación del nuevo Espacio Europeo de Educación Superior.

La investigación mineralógica en la Estación Experimental del Zaidín (CSIC)

MANUEL PRIETO RUBIO

Departamento de Geología, Universidad de Oviedo.

C/ Jesús Arias de Velasco, s/n. 33005-Oviedo. mprieto@geol.uniovi.es

La Estación Experimental de Zaidín es un centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), quizás poco conocido en el ámbito de la comunidad mineralógica española. Sin embargo, muchas de las líneas de investigación que se abordan en dicho centro tienen una clara conexión con los aspectos más vanguardistas de la Mineralogía y la Geoquímica. En concreto, en el *Departamento de Ciencias de la Tierra y Química Ambiental* se conjugan la investigación básica y aplicada bajo un enfoque multidisciplinar en el que los aspectos mineralógicos y geoquímicos juegan un papel central. Por sus conexiones con la mineralogía, destacan especialmente el grupo de biogeoquímica de isótopos estables, el grupo de geoquímica de los procesos superficiales y el de modelización molecular.

El primero de estos grupos aborda las aplicaciones de los isótopos estables en sentido amplio, lo que abarca desde el estudio de génesis de yacimientos minerales hasta la determinación de la composición isotópica del vapor atmosférico, pasando por temas tan diversos como los relacionados con la trazabilidad de alimentos y la geoquímica orgánica de sedimentos. También se abordan otros aspectos más clásicos como son las aplicaciones en la geotermometría de procesos diagenéticos, paleoclimatología, hidrología y paleohidrología, etc. En la actualidad el grupo dispone de tres espectrómetros de masas (Finnigan MAT 251, Delta Plus XL y Delta XP) y diferentes sistemas de vacío y flujo continuo para el análisis de carbonatos, silicatos, fosfatos y materia orgánica (tanto total, como compuestos específicos mediante un cromatógrafo de gases conectado al espectrómetro de masas), pudiendo determinar $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, D/H, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$. El grupo tiene una elevada productividad científica y mantiene colaboraciones con diversas universidades y centros de investigación españoles y europeos, además de prestar servicio analítico a diversas empresas. En la actualidad desarrolla diversos proyectos y contratos relacionados con el medio ambiente como son el cambio climático, el desarrollo de zonas áridas o la biodegradación de vertidos de hidrocarburos en el medio marino. Entre las aportaciones de este grupo merece destacarse el uso de los minerales de la arcilla como geotermómetros de mineral único, o los estudios que relacionan la composición isotópica del agua de precipitación con la composición isotópica del fosfato presente en huesos y dientes de mamíferos.

El grupo de geoquímica de los procesos superficiales tiene una larga trayectoria en el campo de la síntesis mi-

neral. El objetivo central de su investigación consiste en el conocimiento de los procesos responsables de la dinámica de formación y destrucción de minerales en ambientes superficiales, tales como suelos, sedimentos, alteraciones superficiales, etc. Se trata de conocer los mecanismos que controlan dichos procesos y cuantificarlos, para así poder actuar sobre ellos y poder predecir la evolución o el origen de un sistema natural determinado. Para alcanzar este objetivo central se desarrollan una serie de líneas de investigación que se pueden encuadrar en el campo de la "interacción mineral-disolución" y en el de los estudios cinéticos, con una aproximación a los problemas tanto *in situ* como en el laboratorio, a través de lo que se ha denominado geoquímica experimental. A pesar de su carácter aparentemente básico, la actividad investigadora del grupo no ha abandonado en ningún momento un enfoque aplicado. El estudio experimental de los condicionantes físicos y químicos que determinan la formación y transformación mineral es el punto de partida para optimizar la utilización de minerales como barreras de ingeniería en almacenamiento de residuos nucleares de alta actividad. La actividad actual del grupo se puede encuadrar en tres líneas principales:

- Síntesis hidrotermal de filosilicatos: se estudian las condiciones de su formación controlando las diferentes variables del sistema, como presión, temperatura, tiempo, etc. Permite determinar condiciones de estabilidad, velocidades de formación y la cristalquímica de los productos neoformados. Como materiales de partida se utilizan minerales, materiales volcánicos o geles de composición muy variada.
- Bentonitas: estudio de las condiciones de formación de los yacimientos de bentonita del Cabo de Gata (Almería). Esta investigación tiene una aplicación muy importante en el uso de bentonitas como material de barrera de ingeniería en almacenamientos de residuos nucleares. Con este enfoque se estudian diferentes aspectos mineralógicos y geoquímicos de las bentonitas naturales, así como la utilización de arcillas modificadas que mejoren las propiedades de las naturales o que aporten nuevas propiedades.
- Físico-química de la interfase mineral-disolución: estudio de las reacciones de disolución, adsorción y precipitación que se producen en la superficie de los minerales, aplicando diferentes modelos



FIGURA 1. Fotografía de la sede de la Estación Experimental del Zaidín.

que permiten determinar las velocidades y mecanismos de disolución, las constantes de intercambio iónico, las condiciones de adsorción de aniones y cationes y su efecto sobre la estabilidad a largo plazo de los substratos.

Por último, el grupo especializado en modelización molecular puede considerarse pionero en la introducción en nuestro país de la mineralogía computacional. La mineralogía computacional es una nueva rama de la mineralogía que tiene su fundamento en la mineralogía tradicional, y que emerge de la mineralogía física a la luz de las nuevas teorías y técnicas computacionales, y, por supuesto, de forma ascendente y paralela con la informática. Como se sabe, los minerales de la arcilla han tenido y tienen hoy día una importancia fundamental en el medio ambiente, en la industria y en el almacenamiento de productos tóxicos y radiati-

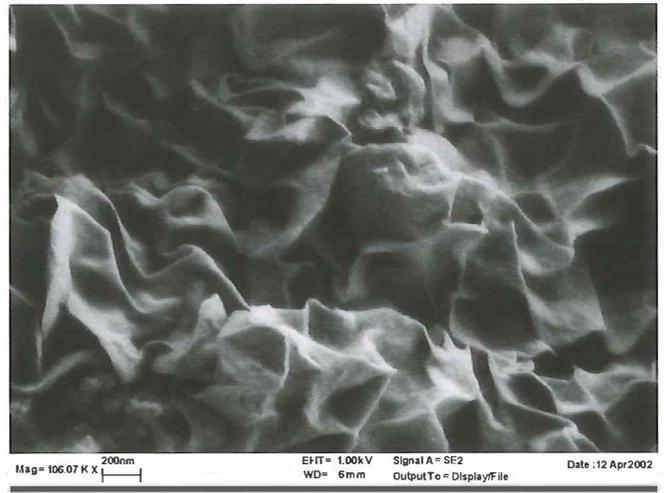


FIGURA 2. Imagen FEG-SEM de caolinita férrica sintetizada a 225 °C en agua destilada, con fórmula $(Al_{1.4}Fe_{0.6})Si_2O_5(OH)_4$.

vos. En este grupo se investigan los campos que están inexplorados y son difíciles de abordar experimentalmente, como son la influencia de la sustitución isomórfica sobre las propiedades cristalinas de silicatos laminares, el orden/desorden sustitucional, las transiciones de las fases ordenadas y desordenadas, la estabilidad y los mecanismos de las transformaciones minerales, etc. Los descubrimientos que se están llevando a cabo, en muchos casos, están apoyando lo que eran meras especulaciones y poniendo de manifiesto nuevos aspectos de la estructura y dinámica de estos minerales, permitiendo sistematizar, comprender, explicar más y mejor el mundo mineral de las arcillas y sus múltiples aplicaciones.

Agradecemos la información y el material gráfico aportados por los Drs. Emilio Reyes Canacho y Francisco Javier Huertas para la elaboración de esta reseña.

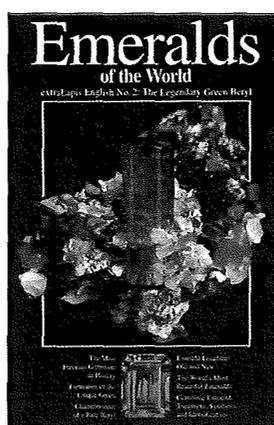
Comentario crítico de libros

EMERALDS OF THE WORLD. EXTRALAPIS NO 2: THE LEGENDARY GREEN BERYL (2002)

Traducido del alemán por Alfredo Petrov y Günter Neumeier
Christian Weise Verlag, Munich, y Lapis Internacional, East Hampton, Connecticut
ISBN: 0-971 5371-1-9
100 páginas
24 USD

Hay libros científicos excelentes cuya principal virtud reside en el amplio bagaje de conocimientos que atesoran y en la claridad con la que se presentan los mismos. En otros, sin embargo, sin menospreciar el rigor científico de la información que se transmite, se presta una especial atención a la presentación gráfica y a las ilustraciones. Este libro sobre las esmeraldas es uno de estos últimos. Combina una excelente exposición de los conocimientos mineralógicos, gemológicos y geológicos de las esmeraldas y sus yacimientos, con unas fotografías espectaculares de esta maravillosa gema. No hay que ser un experto para apreciar la calidad de este libro; está escrito de forma asequible. Ni siquiera es necesario ser aficionado a la mineralogía. Solo se requiere un poco de sensibilidad para disfrutar de la belleza del verde más puro que se conoce, y algo de curiosidad para adentrarse en la historia, la naturaleza y el mito de esta gema fascinante. El libro recopila trabajos de excelentes especialistas en el mundo de la esmeralda de forma que, en conjunto, se explica la naturaleza mineralógica de la esmeralda, los distintos tipos de yacimientos en los que aparece y las características gemológicas que contribuyen a la valoración de los ejemplares procedentes de tales yacimientos. Así mismo, se realiza una revisión de los diferentes métodos utilizados para sintetizar esmeraldas y de los tratamientos que se aplican para mejorar tanto el color como la transparencia de las piedras.

El libro está estructurado en 18 capítulos: 1) Berilo y esmeralda: palabras de la India; 2) Esmeraldas en exposición; 3) Esmeralda: Mineralógicamente un berilo; 4) Origen de la esmeralda; 5) Yacimientos e indicios de esmeraldas en el mundo; 6) Colombia: el mayor productor mundial; 7) Brasil; 8) África; 9) Asia; 10) Estados Unidos de América; 11) Gemología de la esmeralda; 12) ¿Qué es una esmeralda? Hechos y opiniones; 13) Tratamientos de las esmeraldas; 14) Embellecimiento de los



especímenes minerales; 15) Esmeraldas de laboratorio; 16) ¿Cuál es el precio de una esmeralda?; 17) Una talla denominada esmeralda; 18) Referencias.

Los tres primeros capítulos sirven de introducción al libro, presentando datos históricos y mineralógicos, como anticipo a una exhaustiva descripción de los aspectos petrogenéticos de la esmeralda revisando tanto los grandes yacimientos como los indicios descritos de esta gema. Así, en el primer capítulo se profundiza en la etimología de las palabras esmeralda y berilo; se rastrea la historia de esta gema desde

del antiguo Egipto hasta el descubrimiento de los yacimientos colombianos durante la colonización de América, y se exponen detalles curiosos sobre el significado mágico y/o el simbolismo de esta piedra para distintas culturas. Tal es el caso de los países árabes de religión islámica, para quienes ésta es su piedra emblemática y su color, el verde, significa oasis, paraíso... El segundo capítulo muestra algunas de las esmeraldas más famosas que se encuentran expuestas en los museos. Esmeraldas de gran tamaño y color excepcionales como la esmeralda gigante de Muzo, con 1.759 quilates, expuesta en el Museo del Oro de Bogotá (Colombia), y esmeraldas finamente labradas como la que sirvió de materia prima a Dionisio Miseroni para tallar un frasco de ungüento de 10 cm de tamaño y que se conserva en Museo de Historia del Arte de Viena (Austria). En el capítulo 3 se explican las características mineralógicas de la esmeralda como especie del mineral berilo, sintetizándolas en una excelente tabla. Así mismo, se realiza una comparación de la esmeralda con otros minerales verdes, se revisan otras especies de berilo y se hace un breve repaso de los yacimientos de esmeraldas en Europa.

El capítulo 4 inicia una segunda parte centrada en los yacimientos de esmeraldas. En este capítulo se revisan los distintos tipos de depósitos, centrando la exposición en los diferentes mecanismos que pueden hacer coincidir en una misma región geológica elementos químicos de comportamiento geoquímico y procedencia muy diferentes: el Be, un elemento volátil de procedencia esencialmente cortical, y el Cr y el V, dos elementos relativamente inmóviles de procedencia mantélica. Se clasifican los distintos yacimientos en 6 tipos (explicando cada uno de ellos con esquemas muy ilustrativos) y se muestra cómo la edad no es un factor condicionante del tipo de yacimiento. El siguiente capítulo es, en reali-

dad, una recopilación de fichas en las que se muestran, de una forma sintética, las características mineralógicas, geológicas y gemológicas de cada uno de los distritos en los que se ha descrito esmeralda, incluyendo tanto los grandes yacimientos de la Cordillera Oriental de Colombia, hasta el pequeño yacimiento de Franqueira (Galicia). Estas características se explican, ya de una forma más exhaustiva, en los siguientes capítulos 6 (Colombia), 7 (Brasil), 8 (África), 9 (Asia) y 10 (Estados Unidos de América), en los cuales, además, se hace una breve reseña de la historia minera de los distintos yacimientos y de la situación actual de las explotaciones.

En el capítulo 11 se analizan las principales características gemológicas de las esmeraldas, prestando especial atención a las causas del color verde y a los agentes colorantes, así como a los tipos de inclusiones que suelen contener. Estas características son signos de identidad de las gemas, a partir de los cuales se puede certificar su procedencia, tal y como muestra el autor de este capítulo a través del estudio de las esmeraldas procedentes de las localidades más importantes desde el punto de vista económico: Colombia, Santa Terezinha (Brasil), distrito de Swat Valley (Pakistán)... No obstante, se señala que, en contadas ocasiones, no es posible identificar la procedencia de las esmeraldas debido a que los procesos que las generan han sido los mismos en distintas regiones y edades geológicas.

En el capítulo 12, el autor discute los distintos factores que llevan a definir una gema como una esmeralda, estableciendo los límites que permitan acotar una definición adecuada. Se centra, sobre todo, en dos factores, la naturaleza mineralógica (un berilo) y el color provocado por la presencia de cromo y/o vanadio. En el capítulo 13 se hace un repaso a los distintos métodos de tratamiento utilizados para mejorar el color y rellenar fisuras indeseables en las esmeraldas, así como las técnicas que se utilizan para la identificación de estas esmeraldas tratadas: inspección visual, mediante rayos ultravioleta, espectroscopia Raman... El capítulo 14 analiza los procesos que se utilizan para la mejora de la calidad y el embellecimiento de diferentes especies minerales. Aunque, por supuesto, puede aplicarse a los ejemplares de esmeralda, el capítulo trata sobre ejemplares de otros minerales y parece estar un poco fuera de sitio en este volumen monográfico. Por el contrario, el capítulo 15 incide en un aspecto de especial relevancia en el comercio de esmeraldas, como es la síntesis de esta gema en laboratorio. Se hace un breve desarrollo histórico del proceso de síntesis y se analizan los distintos métodos utilizados para crear estas gemas en el laboratorio. Como es obvio, cada uno de estos métodos deja su huella en el cristal y, por tanto, a través del estudio de estas huellas (estructuras de crecimiento, inclusiones...) es posible reconocer el origen sintético de las gemas. En los siguientes capítulos se discuten las características que valoran económicamente a las esmeraldas, se presenta la talla ideal de estas gemas y, para finalizar, se recogen las referencias bibliográficas citadas en el texto que invitan al lector interesado, a profundizar en aquellos aspectos que le resulten de especial interés.

Como he señalado al principio, este es un libro para disfrutar de una gema excepcional, tanto para especialistas en mineralogía o gemología, como para todos aquellos lectores con sensibilidad ante la belleza de ese verde excepcional.

Fernando Gervilla Linares

MINERALOGÍA APLICADA (2003)

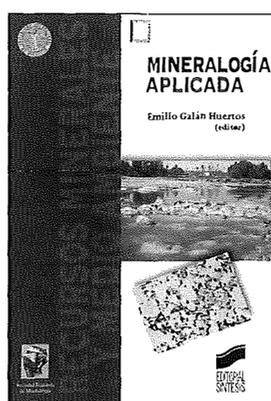
Emilio Galán Huertos (Editor principal)

Editorial Síntesis

ISBN: 84-9756-114-7

429 páginas

24,52 €



Publicado por la editorial Síntesis en el año 2003, el libro *Mineralogía Aplicada* recoge las lecciones impartidas en el curso que con ese mismo nombre organizó la Universidad Internacional de Andalucía, celebrándose el evento en Sevilla entre el 4 y 8 de junio de 2001.

El libro, editado por Emilio Galán, cuenta con la participación de diversos especialistas pertenecientes, en su mayoría, a universidades españolas (M. Rodas, J.M. Mesa, I. González, F. Velasco, G.R. Almodóvar, M. Bustillo, J.C. Fernández, S. Leguey, M. Prieto y E. Galán), aunque también han colaborado miembros del CSIC (J.L. Pérez) y del IGME (M. Regueiro). El volumen se ha estructurado en cuatro bloques temáticos que cubren los aspectos más importantes de la Mineralogía Aplicada.

Tras un capítulo 1 de introducción, se aborda un primer bloque dedicado a los Recursos Minerales que abarca desde el capítulo 2 al 10. En el capítulo 2 se recogen aspectos relacionados con la repercusión económica de los recursos minerales en España. Las características, tipo de yacimiento y aplicaciones de una selección de minerales industriales (feldespato, magnesita y talco) y rocas ornamentales (granito, mármol y pizarra) se presentan en los capítulos 3 y 4, respectivamente. Una especial atención se ha dedicado a los materiales arcillosos, diferenciándose, por un lado, las arcillas cerámicas y, por otro, las especiales. Las arcillas cerámicas (de construcción y fina) y la repercusión medioambiental de su explotación se presenta en el capítulo 5. Por su parte, las características, tipo de yacimiento, origen y aplicaciones de las arcillas especiales ocupan los capítulos 6 y 7. De estos últimos, el primero está dedicado al caolín y arcillas caoliníferas. El segundo se dedica a bentonitas y arcillas magnésicas fibrosas (sepiolita y paligorskita). Los aspectos geológicos de los recursos minerales metálicos y la importancia de la mineralogía en el tratamiento mineral para la separación de menas se recogen en los ca-

pítulos 8 y 9, respectivamente. Finaliza el primer bloque con el capítulo 10, dedicado a los programas informáticos mineros, describiendo sus posibilidades y aplicaciones en función de su coste.

El segundo bloque está dedicado a la repercusión de los minerales en el Medio Ambiente. Así, tras una introducción que pone de manifiesto las amplias posibilidades y proyección futura de la Mineralogía Ambiental (capítulo 11), se abordan temas de gran relevancia como el impacto derivado de la extracción y tratamiento de minerales (capítulo 12), o la problemática que origina en el Medio Ambiente el drenaje de aguas de mina ácida (capítulo 13). Dos aspectos medioambientales de gran actualidad como son la contaminación por metales pesados de suelos y el almacenamiento de residuos radiactivos, se recogen en los capítulos 14 y 15 respectivamente. El bloque finaliza en el capítulo 16, donde se pone de manifiesto la importancia y posibilidades que la Mineralogía Aplicada tiene en el estudio y conservación del patrimonio cultural.

El bloque tercero está constituido por el capítulo 17 en el que de forma sintética se hace un repaso de las diversas técnicas empleadas en la caracterización mineralógica.

El cuarto bloque finaliza, con el capítulo 18, el contenido de esta obra. En el mismo se enfatiza la importancia de los minerales con propiedades de interés tecnológico en la selección y obtención de análogos sintéticos, más fáciles de controlar en el laboratorio.

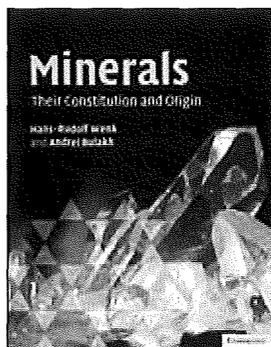
En esta obra, pionera en su título en el mercado español, se recoge lo más relevante y actual de la Mineralogía Aplicada, este hecho la convierte en una obra indispensable para la consulta de investigadores y docentes cuya actividad tiene relación, principalmente, con los recursos naturales minerales, el medio ambiente y la ciencia de los materiales.

Manuel Pozo Rodríguez

MINERALS: THEIR CONSTITUTION AND ORIGIN (2004)

Hans-Rudolf Wenk y Andrei Bulakh
Cambridge University Press
ISBN: 0 521 52958 1
646 páginas
55,90 €

Minerals: their constitution and origin es un libro de texto para estudiantes universitarios de Geología, Cien-



cia de los Materiales o Ciencias Medioambientales, que cubre todos los aspectos de la mineralogía desde un punto de vista moderno e integrado.

El libro se divide en cinco partes. La primera está dedicada a las características estructurales de los minerales, incluyendo los distintos tipos de enlaces, el concepto de red y estructura cristalina, morfología externa y simetría y sus representaciones gráficas, como la proyección estereográfica. Trata, igualmente, sobre crecimiento y defectos cristalinos, isomorfismo y polimorfismo. La parte segunda se centra en diferentes técnicas de investigación de los minerales, como difracción de rayos X, distintas propiedades físicas y mecánicas, propiedades ópticas y uso del microscopio petrográfico y los modernos métodos analíticos. La parte tercera se inicia con sendos capítulos sobre clasificación mineral e identificación de *visu*, para posteriormente describir los procesos de génesis mineral, con un notable capítulo sobre principios de termodinámica que facilita la comprensión del equilibrio mineral en distintos ambientes geológicos, de las soluciones sólidas y de las transformaciones de fase. La cuarta parte ofrece, dentro de un contexto ambiental y genético, una descripción sistemática de los distintos grupos en que tradicionalmente se clasifican los minerales. Por último, la parte quinta se dedica a mineralogía aplicada, como prospección de depósitos metálicos, gemología, cementos, o salud humana. Incluye igualmente sendos capítulos sobre mineralogía del sistema solar y el papel que los minerales han desempeñado en distintas etapas de la evolución de la Tierra.

A lo largo del texto se hace especial hincapié en ligar a los minerales con su formación en procesos y/o ambientes geológicos de amplio desarrollo. Igualmente, los autores destacan la importancia de los minerales en la vida cotidiana y su valor económico. El libro se completa con numerosas fotos, en blanco y negro y color, así como tablas y figuras bastante útiles y actualizadas, además de un glosario de términos, por lo que con toda seguridad será un texto de referencia en los próximos años para los estudiantes de mineralogía.

Alberto López Galindo

Lectura de Tesis 2003-2004

DEFORMACIÓN, METAMORFISMO Y EXHUMACIÓN DE LAS GRANULITAS DE ALTA PRESIÓN DE LA BACARIZA (COMPLEJO DE CABO ORTEGAL, NO DE ESPAÑA)

Autor:

Pablo Puelles Olarte

Director:

Benito Ábalos Villaro y José Ignacio Gil Ibaruchi

Departamento:

Dpto. Geodinámica. Universidad del País Vasco. Bilbao (Vizcaya)

Fecha de lectura:

28 de marzo de 2003

Tribunal:

Julia Cuevas (Presidenta), Miren Sorkunde Mendia (Secretaria), Ramón Capote, Fernando Bastida, Ricardo Arenas

Las granulitas de alta presión que constituyen la Formación Bacariza afloran extensamente en la parte central del Complejo de Cabo Ortegal, donde se observa que dicha formación muestra contactos tectónicos con las unidades adyacentes superiores (macizos ultramáficos de Limo y Herbeira y Uzal) e inferiores (formaciones eclogítica, Gneises Bandeados y de Chimparra). En la Formación Bacariza se han distinguido y cartografiado cinco tipos granulíticos principales: granulitas ultramáficas o pirigarnitas, granulitas máficas, granulitas máficas ricas en Mg, granulitas intermedias-félsicas y ortogneises granulíticos, cuyas asociaciones minerales en equilibrio están foadas principalmente por granate, clinopiroxeno y plagioclasa, apareciendo zoisita, distena, cuarzo, escapolita y rutilo en distinta proporción según el tipo granulítico considerado. Además, se han reconocido otras litologías de importancia volumétricamente mucho menor, tales como ultramilonitas de apariencia fluidal, niveles carbonatados, gneises con granate y biotita, rocas calcosilicatadas, eclogitas, metaserpentinitas y gabros no deformados.

Se han distinguido dos fases de deformación (D_1 y D_2) desarrolladas en condiciones de presión y temperatura propias de la facies de las granulitas de alta presión y enmarcadas en un proceso único de deformación progresiva. La primera fase tuvo lugar en condiciones de ca. $1,55 \pm 0,1$ GPa y 755 ± 35 °C y dio lugar al desarrollo de una fábrica penetrativa plano-linear S_1 - L_1 .

La lineación L_1 es subhorizontal y presenta una orientación muy constante NNE, subparalela a la dirección de las lineaciones L_1 del resto de las unidades de alta presión del Complejo de Cabo Ortegal. Las fábricas S_1 y L_1 fueron replegadas isoclinamente durante la propia fase de deformación D_1 , dando lugar a pliegues en vaina, pliegues de tipo -a-, interferencias de pliegues, pliegues desenraizados y otras estructuras de transposición tectónica. La segunda fase de deformación (D_2) tuvo lugar en condiciones de ca. $1,46 \pm 0,1$ GPa y 705 ± 40 °C y está relacionada con el desarrollo de zonas de cizalla dúctil, pliegues en vaina e isoclinales y milonitas. A escala cartográfica queda representada por las asociaciones estructurales de las zonas de contacto con las eclogitas y las formaciones gneísicas infrayacentes. La deformación asociada a la fase D_2 es del tipo de la constricción general, desviándose ligeramente de una deformación plana a volumen constante por cizalla simple heterogénea. Estos materiales se habrían deformado plásticamente en un régimen de esfuerzos diferenciales moderados a bajos. El análisis estructural de las trayectorias de las foliaciones pone de relieve la existencia de una estructuración interna en las granulitas adquirida durante episodios de deformación ligeramente anteriores a los relacionados con la fase D_1 y el reconocimiento de las zonas apicales de pliegues con geometría en vaina de escala kilométrica. Los procesos de deformación D_1 y D_2 fueron postdatados por un proceso de simplectitización estática en unas condiciones $1,23 \pm 0,05$ GPa y 695 ± 35 °C, a los que siguieron otros procesos de anfibolitización (normalmente estática, aunque ocasionalmente relacionadas con la formación de cizallas discretas de bajo ángulo durante una fase de deformación D_3) en unas condiciones de presión de $1,19 \pm 0,03$ GPa a una temperatura de 645 ± 40 °C.

El estudio petroestructural de algunos de los minerales principales y el análisis cinemático de sus diversas fábricas, microestructuras, así como el de las estructuras mayores han permitido concluir que los procesos deformacionales de alta presión tuvieron cierto carácter constrictivo y estuvieron acompañados de componentes rotacionales. Los criterios cinemáticos indican de forma congruente un desplazamiento tectónico de los bloques de techo hacia el NNE durante las fases de deformación D_1 y D_2 . El estudio de la deformación de los granates elongados de algunas granulitas sugiere la operatividad de procesos de plasticidad intracristalina a altas temperaturas. La microfracturación de este mineral evidencia una deformación frágil a temperaturas

inferiores a 300 °C, desarrollándose algunas de las fracturas en condiciones de esfuerzos y velocidades de deformación características de zonas sujetas a sismicidad. Las fábricas cristalográficas del anfíbol mimetizan a las del clinopiroxeno. El análisis petroestructural del cuarzo en cintas policristalinas muestra que los esfuerzos diferenciales debieron de ser bajos durante las fases de deformación de alta presión (entre 5 y 30 MPa), que las velocidades de deformación fueron relativamente elevadas en las zonas de cizalla D₂ (10⁻¹¹-10⁻¹³ s⁻¹) y que estas zonas de cizalla tuvieron un comportamiento reológico viscoso (con una viscosidad efectiva del orden de 10¹⁸ Pa·s).

MINERALOGÍA, TEXTURAS Y COSMOQUÍMICA DE CÓNDRULOS EN CONDRITAS H4, H5, L5 Y LL5

Autora:

María Jesús Muñoz-Espadas

Directores:

Jesús Martínez-Frías y Rosario Lunar Hernández

Centro:

Departamento de Geología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. C.S.I.C.

Fecha de lectura:

19 de mayo de 2003

Tribunal:

Benito del Castillo García (Presidente), María Lourdes Fernández Díaz (Secretaria), Ramón Capote del Villar, Emilio Galán Huertos, Fernando Rull Pérez

Los cóndrulos son elementos singulares y complejos de los meteoritos condriticos. Se trata de esferas generalmente submilimétricas de distintas composiciones, mineralogías y texturas, cuyo origen aún no está completamente aclarado. La abundancia de los cóndrulos varía entre los distintos grupos de condritas, pero puede alcanzar hasta un 70% en volumen en las condritas ordinarias, el grupo más abundante (93,5% de las condritas caídas). Puede decirse, por tanto, que una gran parte de la materia sólida de la nebulosa solar primitiva ha llegado a nosotros en forma de cóndrulos.

Las condritas son meteoritos no diferenciados, lo que significa que no han experimentado fusión tras su formación por acreción, hace unos 4.555 millones de años, y sus características revelan las condiciones en que se formaron en la nebulosa solar primitiva. Sin embargo, la mayor parte de ellas han estado sometidas a modificaciones por procesos secundarios en su cuerpo padre asteroidal. Estos procesos son metamorfismo térmico, metamorfismo de choque y alteración acuosa, y han actuado tanto sobre las condritas en su conjunto como sobre los propios cóndrulos.

Con el objetivo de establecer cómo y en qué extensión han actuado dichos procesos sobre los cóndrulos, en este trabajo se han estudiado textural y composicionalmente distintos tipos de cóndrulos, seleccionados en

varias condritas ordinarias equilibradas: Cañellas H4, Olmedilla de Alarcón H5, Reliegos L5 y Olivenza LL5. Se trata de ejemplares de la Colección de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, procedentes de caídas ocurridas en España.

Para su estudio, además de las técnicas descriptivas y analíticas que se emplean ya de forma habitual en cualquier estudio mineralógico y petrológico, se ha contado con la posibilidad de realizar análisis de PIXE y de Espectroscopia Raman, siendo ésta la primera vez que se aplican dichas técnicas en una tesis doctoral sobre materiales meteoríticos en nuestro país.

Todas las condritas muestran los efectos texturales del metamorfismo de impacto, y se las ha clasificado como grados S3 (Cañellas y Olivenza) y S4 (Olmedilla de Alarcón y Reliegos). Estos grados corresponden a intensidades débiles a moderadas, por lo que el metamorfismo de impacto no ha debido producir empobrecimientos significativos en el contenido de elementos volátiles de las condritas y sus cóndrulos. En los espectros Raman realizados sobre los olivinos y piroxenos de las muestras se aprecia un desplazamiento de los picos y un aumento de su anchura, respecto a los espectros de minerales no impactados. Estas diferencias son atribuibles a la existencia de un cierto desorden en la estructura cristalina de los mismos.

Como consecuencia del metamorfismo térmico, las condritas se han recrystalizado, los bordes de los cóndrulos han perdido nitidez, y se ha desvitrificado su mesostasia. Las composiciones minerales, además, son muy homogéneas. Los diagramas de distribución de los elementos en las condritas muestran secuencias en las abundancias según H > L > LL y litófilos ≥ siderófilos > calcófilos. El patrón de distribución de los elementos litófilos tiende a ser plano, salvo para los litófilos moderadamente móviles (Mn, Na, K) que describen una trayectoria ascendente. Los elementos siderófilos muestran una tendencia ascendente con el aumento de la movilidad, mientras que las abundancias de los calcófilos descienden con la movilidad. Las citadas secuencias coinciden con las observadas en condritas no equilibradas, por lo que dichos patrones deben tener un origen nebuloso, y no sufren modificaciones sustanciales bajo el efecto del metamorfismo térmico.

Las abundancias elementales de los cóndrulos seleccionados de cada condrita mantienen la secuencia litófilos ≥ siderófilos > calcófilos, pero no existe diferencia entre los cóndrulos según el tipo de condrita ordinaria de la que proceden (H, L o LL). Las diferencias en las abundancias de determinados elementos en cóndrulos concretos tampoco se muestran condicionadas por la condrita de la que proceden, ni por la textura y mineralogía del propio cóndrulo. Entre los elementos litófilos, las abundancias descienden desde los más refractarios, hasta aquellos con movilidades intermedias. Entre los siderófilos y calcófilos también se observan ese tipo de empobrecimientos con el aumento de la movilidad. La distribución de los elementos en el interior de los cóndrulos está gobernada por la mineralogía de los mismos. De esta forma, los elementos siderófilos se con-

centran principalmente en los granos de aleación metálica. La mesostasia está muy enriquecida en Ca, K, Al, Sr y Ga, mientras que Cr, V y Ti se alojan preferentemente en las cromitas.

Por último, la alteración acuosa es el proceso que menos ha afectado a las condritas. Sus efectos se aprecian únicamente por los zonados en elementos como Ca, K, Fe, Mn y Si que aparecen en el borde de algunos cóndrulos con texturas de grano fino (radiales de piroxeno), y en la mesostasia de cóndrulos porfídicos.

POSIBILIDADES DE USO CERÁMICO DE LOS MINERALES Y ROCAS INDUSTRIALES DE LA PROVINCIA DE JAÉN

Autora:

Mercedes Vázquez Vílchez

Director:

Juan Jiménez Millán

Centro:

Departamento de Geología de la Universidad de Jaén

Fecha de lectura:

26 de septiembre de 2003

Tribunal:

Emilio Galán Huertos (Presidente), M.^a José de la Torre López (Secretaria), Isabel González Díez, Fernando Nieto García, Teófilo Sanfeliu Montolio, Carlos Sánchez Jiménez

Introducción

Las materias primas utilizadas en la industria cerámica pueden clasificarse en dos grupos generales claramente definidos desde el punto de vista composicional y de los productos que permiten elaborar: las arcillas comunes y los caolines. Las arcillas comunes son utilizadas para la fabricación de piezas cerámicas de construcción, como ladrillos huecos o cara vista, tejas y pavimentos y revestimientos de color rojo. Estas arcillas también se emplean en el sector de la alfarería, en las industrias del cemento y como agregados ligeros. Por otra parte, los caolines son utilizados en los subsectores de los sanitarios, las vajillas, los esmaltes y engobes, las pastas blancas para pavimentos y revestimientos y las chamotas para gres natural.

En la provincia de Jaén aparecen extensos afloramientos de materiales de diferentes dominios geológicos que podrían clasificarse dentro de algunos de estos grupos de materias primas y cuyas características permitirían su potencial aplicación en distintos subsectores de la industria cerámica.

La investigación llevada a cabo ha consistido, principalmente, en la determinación de las posibilidades cerámicas de recursos geológicos poco o no utilizados actualmente en la industria cerámica de la provincia de Jaén. Para ello, se ha realizado una caracterización composicional y tecnológica de materiales alternativos

con el fin de evaluar sus aplicaciones cerámicas. En esta Tesis también se ha abordado el estudio de las características de los materiales más interesantes desde un punto de vista cerámico con el fin de establecer un modelo genético como criterio para la realización de trabajos de prospección.

Métodos de estudio

Las técnicas instrumentales empleadas en este trabajo pueden agruparse en dos grandes grupos:

- a) Técnicas para la caracterización composicional de las materias primas en crudo y cocidas:
 - Microscopía óptica de luz transmitida y de luz reflejada.
 - Difracción de rayos X (Siemens D-5000 con rendija automática, filtro de Ni y radiación Cu y Co $K\alpha$).
 - Fluorescencia de rayos (Philips PW 1404/10).
 - Microscopía electrónica de barrido (Jeol JSM-5800 con microanalizador de dispersión de energía de rayos X Oxford Link).
 - Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (Philips CM-20 (HRTEM) con un detector de estado sólido EDAX, trabajando a 200 kV con un filamento de LaB_6).
- b) Instrumentación empleada para la caracterización tecnológica:
 - Dispersión de rayo láser (espectrómetro Galai CIS-1).
 - Cuchara de Casagrande
 - Horno mufla (Hobersal CR-48).

Resultados y conclusiones

A continuación se expondrán los principales datos y conclusiones obtenidos para cada una de las materias primas estudiadas, así como las mezclas propuestas para la elaboración de productos de alto valor añadido. Finalmente, se comentarán los principales resultados de los estudios genéticos de los materiales más interesantes desde el punto de vista cerámico y las posibilidades de aplicación de las técnicas de teledetección en la localización de arcillas industriales.

Las pizarras paleozoicas de la parte meridional de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico en la provincia de Jaén

En esta tesis se ha evaluado la aplicabilidad de las pizarras del norte de la provincia de Jaén para fabricar materiales cerámicos. El área estudiada se encuentra en la unidad para-autóctona de la parte meridional de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico. El basamento de la zona estudiada está constituido por una sucesión

de pizarras y rocas metavolcánicas de edades comprendidas entre el Ordovícico y el Carbonífero. Las muestras han sido tomadas en dos áreas: la Sierra de Andújar, formada por rocas del Ordovícico Inferior al Carbonífero Inferior, y el área de La Carolina, constituida por rocas del Ordovícico al Carbonífero Inferior. Desde el punto de vista composicional, las pizarras estudiadas se encuentran en el intervalo de las materias primas generalmente utilizadas en la industria cerámica. Sin embargo, algunas diferencias mineralógicas, químicas y tecnológicas permiten diferenciar dos tipos de pizarras:

- a) Pizarras ricas en Fe de baja plasticidad.
En este grupo se incluyen la mayoría de las pizarras, con contenidos en Fe entre el 4 y el 9%, las cuales son sólo moldeables por presión y presentarían pobre cohesión durante el secado. Los valores de contracción lineal y de absorción de agua de las piezas cocidas alrededor de 1.000 °C sugieren que estos materiales son apropiados para la fabricación de baldosas cerámicas. Este estudio también ha revelado que, para temperaturas entre 1.150 y 1.200 °C, estas pizarras pueden ser usadas para fabricar gres.
- b) Pizarras alumínicas de plasticidad moderada.
En esta categoría sólo se incluyen las Pizarras Silúricas de la Carolina, cuyas características composicionales son bastante similares a las de las pizarras sericíticas o alumínicas, con altos contenidos en Al₂O₃ (28%) y caolinita e ilita como filosilicatos mayoritarios. Su plasticidad es lo suficientemente elevada para su moldeo por extrusión, debido a su elevado contenido en minerales de la arcilla (77%). Además el bajo contenido en Fe (1,33%) justifica que estos materiales puedan emplearse para la elaboración de piezas cerámicas de color claro. Estas características revelan que las pizarras alumínicas de La Carolina son la materia prima que permitiría aplicaciones cerámicas de mayor valor añadido.

En ambos grupos de pizarras, los minerales de cocción detectados han sido mullita, cristobalita, espinela, hematites y una fase vítrea.

Los materiales de meteorización de los cuerpos ígneos de Linares y Santa Elena

En este trabajo se han evaluado las posibilidades de uso cerámico directo, sin tratamiento previo, de los materiales formados por meteorización de los *stocks* de Linares y Santa Elena del Macizo Ibérico. El *stock* de Santa Elena está constituido mayoritariamente por rocas de composición granodiorítica. La litología predominante del plutón de Linares tiene una composición monzogranítica. Ambos *stocks* están intruidos por un complejo de diques de composición ácida y venas de cuarzo mineralizadas. Desde un punto de vista composicional,

estas materias primas son adecuadas para la fabricación de gres rojo, aunque existen algunas diferencias tanto mineralógicas, químicas como tecnológicas que nos permiten diferenciar dos grupos en función de su aplicabilidad cerámica:

- a) Materias primas ricas en cuarzo y feldespatos de baja plasticidad.
Dentro de este grupo se encuentran los materiales de Linares, caracterizados por sus altos contenidos en cuarzo (18-29%) y feldespatos (hasta 69%). La baja plasticidad desarrollada por estos materiales condiciona que sean potencialmente moldeables por prensado y que puedan presentar problemas originados por la pobre cohesión de las partículas durante el secado. Sus bajos valores de absorción de agua (< 4%) y contracción lineal (< 13%) restringen el empleo directo de estos materiales como aditivos cerámicos ricos en cuarzo y feldespatos.
- b) Materias primas ricas en filosilicatos de plasticidad moderada.
A este conjunto pertenecen los materiales de Santa Elena con mejor comportamiento plástico, permitiendo su moldeo por extrusión debido a su enriquecimiento en filosilicatos (hasta 85%). Sin embargo, la contracción lineal durante el secado es alta (hasta 0,84%), causada también por el alto contenido en minerales de la arcilla. Los niveles ricos en caolinita, que presentan colores claros a una temperatura de cocción de 1.000 °C, podrían ser de gran interés para ser empleados como materia prima principal en el diseño de mezclas para la fabricación de piezas cerámicas de color claro mediante extrusión. Los valores de absorción de agua y de contracción lineal de la mayoría de las muestras cocidas a 1.150 °C se aproximan a las condiciones aceptables requeridas para fabricar gres. Estas características revelan que los materiales de alteración de Santa Elena constituyen una materia prima de elevado interés cerámico ya que podrían ser usadas para la fabricación de piezas cerámicas de alto valor en el mercado.

Las piezas cocidas de los materiales de alteración de ambos *stocks* tienen una mineralogía compuesta por cuarzo, hematites y una fase vítrea. Sólo las muestras más ricas en filosilicatos de Santa Elena presentan mullita.

Las Capas Rojas Triásicas de la Cobertera Tabular del Macizo Ibérico (Norte de la provincia de Jaén)

Las Capas Rojas Triásicas de la Cobertera Tabular ocupan el borde meridional de la Meseta Ibérica en discordancia sobre los materiales paleozoicos del Macizo Ibérico. Se han distinguido tres unidades litológicas cuya potencia global es de 100 metros: 1) la Unidad Basal Conglomerática; 2) la Unidad Lutítica Inferior y 3) la

Unidad Lutítica Superior. Las muestras estudiadas fueron recogidas de dos secuencias estratigráficas pertenecientes a la Unidad Lutítica Inferior, compuesta por lutitas con niveles de areniscas y carbonatos, situada al norte de Bailén. Los análisis mineralógicos revelan que las arcillas estudiadas presentan una composición generalmente apropiada para la fabricación de piezas de cerámica estructural, con altas proporciones de filosilicatos (36-69%), cuarzo + feldespatos (hasta 53%) y carbonatos (hasta 47%). Desde un punto de vista tecnológico, las Capas Rojas Triásicas presentan mayoritariamente baja plasticidad para el moldeo por extrusión y podrían dar problemas de pobre cohesión durante el secado. Debido a los bajos valores de esta propiedad, la mayoría de las muestras estudiadas no podrían emplearse en la elaboración de ladrillos huecos y tejas por sí mismas. Sin embargo, la contracción lineal durante el secado es apropiada tanto para piezas cerámicas estructurales como para pavimentos y revestimientos cerámicos. Los valores de contracción lineal y absorción de agua son frecuentemente válidos para la fabricación de ladrillos en el rango de temperaturas comprendido entre 800 °C y 900 °C. Los altos contenidos de Fe₂O₃ (hasta 8,6%), K₂O (hasta 6,7%), CaO (hasta 14,7%) y MgO (hasta 10,3%) sugieren que estos materiales podrían ser usados para la manufactura de baldosas cerámicas. Este trabajo ha revelado que la mezcla de estos materiales con materias primas complementarias en diferentes proporciones, tales como cuarzo y feldespatos comerciales, podría permitir su empleo para fabricar baldosas cerámicas, concretamente, mayólica.

Las piezas cocidas de las muestras ricas en carbonatos presentan una mineralogía compuesta por gehlenita, wollastonita, clinopiroxeno y anortita. Sin embargo, la mineralogía de cocción de las muestras ricas en silicatos está constituida por mullita, cuarzo y hematites.

Las margas de la Formación Carbonero de la Cordillera Bética (Sur de la provincia de Jaén)

La Formación Carbonero, localizada en la transición Subbético Externo-Subbético medio de las Zonas Externas (S de la provincia de Jaén) está constituida por tres miembros: a) Margas del Miembro Inferior, b) Miembro Intermedio radiolarítico y c) Miembro Superior turbidítico. La proporción entre cuarzo + feldespatos (> 27%), filosilicatos (> 39%) y carbonatos (14-44%) es adecuada para la fabricación de ladrillos. Además, el bajo contenido en Fe (< 4%) permite el desarrollo de un color blanco tras la cocción. Desde un punto de vista tecnológico, la plasticidad de la mayoría de las margas de la Formación Carbonero es generalmente baja, lo cual condiciona que su moldeo deba ser exclusivamente por presión. La baja plasticidad y la alta contracción lineal en seco (hasta 0,77%) detectadas en estos materiales sugieren que puedan presentar problemas durante el secado. En cuanto a las propiedades de cocción, las muestras estudiadas presentan valores elevados de contracción lineal y de absorción de agua en el interva-

lo de temperatura entre 800 y 1.000 °C, lo cual es poco apropiado para su uso en la industria cerámica. Sin embargo, para este rango de temperatura, estos materiales mezclados en diferentes proporciones con cuarzo y feldespatos comerciales son apropiados para la fabricación de ladrillos cara vista de color claro por prensado.

Por último, las piezas cocidas de estos materiales presentan gehlenita, wollastonita y anortita como minerales neoformados durante la cocción.

Mezclas de materias primas

Algunos de los materiales estudiados tienen individualmente una aplicabilidad cerámica limitada. La existencia de materias primas con propiedades complementarias sugiere la posibilidad de plantear la formulación de mezclas que permitan obtener una gran variedad de productos cerámicos de gran calidad y de alto valor añadido. Teniendo en cuenta los productos que se pueden elaborar con estas materias primas se proponen las siguientes mezclas cerámicas:

- a) Mezclas de materias primas para la fabricación de productos de baja a moderada porosidad. Las pizarras más refractarias deberían ser mezcladas con otros materiales más fundentes, como por ejemplo los materiales de alteración de Santa Elena, los cuales presentan una baja temperatura de vitrificación (1.150 °C). Estas mezclas permitirían obtener productos cerámicos de baja a moderada porosidad por prensado, tales como, gres rojo y blanco, ladrillo de tipo "clinker" y mayólica. El resto de las pizarras estudiadas presentan baja plasticidad y pobre cohesión, por lo que deberían mezclarse con materiales que mejoraran esta propiedad. La materia prima que les aportaría más plasticidad son los materiales de alteración de Santa Elena. La mezcla entre estos materiales, aumentaría la plasticidad de las pizarras, y, también, reduciría la contracción lineal en seco de los materiales de Santa Elena, ya que normalmente las pizarras contienen elevados contenidos en cuarzo (hasta 36%). Estas pizarras también podrían mezclarse con las pizarras aluminicas de La Carolina, mejorando la plasticidad y aumentando la estabilidad de las propiedades de cocción. Estas mezclas permitirían la fabricación de piezas cerámicas de baja a moderada porosidad mediante prensado, como gres rojo y mayólica. En este trabajo se ha puesto de manifiesto la posibilidad de uso de las Capas Rojas Triásicas mezcladas con cuarzo y feldespatos comerciales para la fabricación de mayólica. Este tipo de producto también se podría fabricar mezclando esta materia prima con los materiales de alteración de Linares, ricos en cuarzo y feldespatos.
- b) Mezclas de materias primas para la fabricación de productos de alta porosidad.

Las Capas Rojas Triásicas podrían utilizarse para la formulación de mezclas aptas para la fabricación de ladrillos y tejas. Para ello, sería necesario mezclar esta materia prima con materiales que aumenten su plasticidad y disminuyan la contracción lineal durante la cocción, como por ejemplo los materiales de alteración de Santa Elena o las pizarras alumínicas de La Carolina. Estas mezclas podrían mejorar la gama de productos de cerámica estructural ya fabricados en la industria cerámica de Bailén.

Las margas de la Fm. Carbonero presentan baja plasticidad y contracciones lineales en seco frecuentemente elevadas, por lo que deberían ser mezcladas con materiales plásticos y ricos en cuarzo. En este trabajo de investigación, las pizarras alumínicas de La Carolina son los materiales estudiados que presentan una buena plasticidad y altos contenidos en cuarzo. Las mezclas de estos materiales permitirían elaborar ladrillos cara vista de color claro por extrusión.

Origen de los materiales más interesantes desde el punto de vista cerámico

La caracterización composicional y tecnológica del conjunto de materias primas estudiadas ha puesto de manifiesto que las propiedades de las pizarras alumínicas de La Carolina y de los materiales de meteorización de Santa Elena son las más apropiadas para el uso de estos materiales en aplicaciones cerámicas de alto valor añadido. Su mayor plasticidad, debida a la alta concentración de filosilicatos, así como su cocción en blanco hacen especialmente interesantes estas materias primas para la elaboración de productos gresificados por extrusión de color claro. Por este motivo, en este trabajo se ha realizado un estudio genético de estos materiales que nos permita obtener criterios para la realización de trabajos posteriores de prospección con el fin de localizar depósitos explotables.

De esta forma, en esta tesis se ha documentado que la asociación de filosilicatos de las pizarras alumínicas de La Carolina fue formada por la interacción entre diversas fases de actividad tectónica, magmatismo y actividad hidrotermal. En el área de trabajo, las secuencias de pizarras preordovícicas con un metamorfismo de grado bajo a muy bajo están intruidas por el *stock* granodiorítico de Santa Elena y por un complejo de diques mineralizados. La aureola de metamorfismo de contacto alargada, puesta de manifiesto por la presencia de andalucita, coincide con el afloramiento de las Pizarras Silúricas. Estas pizarras se localizan en una zona de cizalla de dirección E-O de unos 500 metros de espesor desarrollada en el borde sur del *stock* de Santa Elena. En la parte meridional de la zona de cizalla, pueden observarse zonas de microbrechas arcillosas, mientras que en la parte septentrional la deformación desarrolla una fábrica plano-lineal. La lineación de estiramiento está definida por intercrecimientos muy estirados de moscovi-

ta y caolinita. En la parte norte, se han observado cristales de clorita intercrecidos con caolinita rellenando fracturas en los granos de andalucita. Los bordes de los granos fracturados y rotados de andalucita se encuentran recubiertos por una película fina de moscovita. En la zona S, las microbrechas ricas en filosilicatos tienen una textura heterogénea y compleja. En esta área, la andalucita fue intensamente reemplazada por pequeños cristales de caolinita, lamelares y libres de defectos cristalinos. También están presentes pirofilita y moscovita deformada. La andalucita es postcinemática al metamorfismo regional y precinemática respecto a la etapa de deformación por cizalla. Esta deformación produjo una banda milonítica con una alta porosidad. La alta energía de deformación asociada a los defectos cristalinos junto a la presencia de un flujo apropiado de fluidos favorecido por la alta permeabilidad intra e intercristalina debieron jugar un papel esencial para el desarrollo del proceso de caolinitización. La cristalización de clorita y moscovita rellenando las sombras de presión, así como la presencia de relictos de pirofilita sugieren la existencia de una primera etapa sincinemática de interacción fluido-roca de alta temperatura. La alteración posterior de clorita, andalucita y moscovita a caolinita indica una segunda fase de interacción desarrollada en condiciones de menor temperatura. La ausencia de orientación tectónica preferente en la caolinita retrógrada que reemplaza a la andalucita es la principal evidencia de que la cristalización de caolinita continuó después de terminar el movimiento de la zona de cizalla.

En el caso de los materiales de meteorización, se han estudiado los factores que controlan el tipo de alteración desarrollada por los cuerpos ígneos de Linares y Santa Elena, con el fin de aportar datos que faciliten la exploración de materiales alterados con posibilidades de uso directo en la industria cerámica. Una de las características del *stock* de Santa Elena es el mayor desarrollo de la fracturación y el diaclasado que en el cuerpo de Linares. Además, el perfil de Linares está enriquecido en feldespato, mientras que en el de Santa Elena, la plagioclasa está prácticamente ausente y el contenido en minerales de la arcilla, especialmente caolinita, es alto. El estudio de SEM ha permitido observar en los feldespatos canales de disolución desarrollados a lo largo de los planos de exfoliación sellados por filosilicatos. También han sido detectados intercrecimientos de biotita-caolinita formando texturas expandidas por crecimiento epitaxial. En general, los materiales alterados están enriquecidos en Al y H₂O y empobrecidos en Fe, Ca, Na, Mg, Ti y P. Los materiales alterados de Santa Elena están más enriquecidos en H₂O que los de Linares y presentan menores valores de la razón Si/Al. Las evidencias mineralógicas y geoquímicas sugieren que la meteorización fue más intensa en el perfil de Santa Elena. La mayor fracturación y el mayor contenido en plagioclasa cálcica con una disposición textural interconectada han sido considerados como los factores principales que producen la mayor meteorización del *stock* de Santa Elena.

Aplicación de las técnicas de teledetección para la localización de pizarras aluminicas en los materiales paleozoicos del Macizo Ibérico Meridional del Norte de la provincia de Jaén

La teledetección es una técnica de exploración minera ampliamente usada para detectar alteraciones hidrotermales y realizar mapas de estructuras regionales y locales que han podido controlar las mineralizaciones. Por tanto, dado que el modelo genético de las pizarras aluminicas de la región se ajusta en gran medida a casos en los que la teledetección ha sido empleada con éxito, se consideró que esta herramienta sería útil para la localización de estas pizarras entre los materiales que afloran en la región. Para este estudio se ha utilizado una imagen Landsat 7 ETM, sobre la cual se efectuó la corrección atmosférica, el cálculo del índice de vegetación NDVI y un realce de tipo BCET para crear la imagen cociente TM5/TM7 de la zona de estudio. Esta imagen cociente muestra las zonas con mayor contenido en filosilicatos en tonos claros. Además, se creó una imagen de composición de falso color de los cocientes 5/7, 5/4, 3/1 (RGB), con el objetivo de localizar las pizarras con un mayor contenido en filosilicatos y un menor contenido en Fe₂O₃. La localización de estas pizarras corrobora que los principales yacimientos deben estar relacionados con la intrusión del *stock* de Santa Elena y la circulación de fluidos controlada por el efecto de una zona de cizalla.

EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL DE LOS MACIZOS ULTRAMÁFICOS DE CARRATRACA (MÁLAGA): INFLUENCIA DE LA SERPENTINIZACIÓN

Autor:

José Julián Esteban Guzmán

Director:

José María Tubía Martínez

Centro:

Departamento de Geodinámica Universidad del País Vasco. Bilbao (Vizcaya)

Fecha de lectura:

10 de octubre de 2003

Tribunal:

Julia Cuevas Urionabarrenechea (Presidenta), José Ignacio Gil Ibarguchi (Secretario), Miguel Orozco Fernández, Francisco Navarro Vilá, Juan Carlos Balanyá Roure

Las peridotitas de Ronda, los mayores afloramientos de lherzolitas orogénicas del mundo, afloran extensamente en el borde suroccidental de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas, a modo de láminas alóctonas de escasa potencia divididas en macizos de dimensiones variables. Uno de esos macizos es el conocido genéricamente como *macizo ultramáfico de Carratraca*, formado por las Sierras de la Robla y de Aguas situadas entre los municipios de Álora, Carratraca y Casarabonela de la comarca del Valle del Guadalhorce (Málaga). En el macizo de Carratraca se ha realizado la cartografía detallada de las facies petrográficas y microestructurales de las

rocas ultramáficas, estableciéndose tres principales: lherzolitas granulares, porfiroclásticas con espinela y miloníticas con granate. También se han elaborado los primeros mapas estructurales de foliaciones y lineaciones de los macizos, determinándose con ellos la estructura interna de los mismos. Su resultado es la detección de un diapiro del manto astenosférico desarrollado muy posible entre el Oligoceno y Mioceno, coherente con el metamorfismo de alta temperatura y la aceleración de la deformación extensional reconocida en toda la cordillera. El estudio geotermobarométrico realizado delimita las condiciones de recrystalización de las facies porfiroclásticas y miloníticas entre 800° y 977 °C, a presiones del orden de 200 MPa y 100 MPa, respectivamente. Las condiciones primarias deducidas para las lherzolitas se sitúan entre 1.050 ° y 1.150 °C, a presiones mínimas de 200 MPa. En lo referente a los materiales metamórficos infrayacentes al macizo de Carratraca, identificados como pertenecientes a la Unidad de Yunquera, se ha determinado la presencia de al menos dos episodios de metamorfismo regional cuantificables, con condiciones comprendidas entre 580 °-623 °C; 920-1.000 MPa y 628 °-717 °C; 520-660 MPa, respectivamente. Los datos obtenidos llevan a plantear una evolución tectonometamórfica para la unidad con al menos tres etapas claramente diferenciadas: dos sinmetamórficas, asociadas al engrosamiento y exhumación de la unidad, y una postmetamórfica relacionada con la evolución tardía de la misma.

La evolución de baja temperatura (< 500 °C) de las rocas ultramáficas así como de las coberteras metamórficas suprayacentes (manto de Los Reales) se ha realizado mediante la caracterización de los procesos de retrogradación de las rocas ultramáficas (serpentinización y rodingitización) y la geotermocronología mediante trazas de fisión en circones y apatitos. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la posibilidad de determinar mediante trazas de fisión: 1) la cinemática y la edad de los contactos mecánicos existentes entre las rocas ultramáficas y las metamórficas suprayacentes (p. ej.: Falla de Cerro Tajo-contacto extensional de bajo ángulo), 2) la identificación por primera vez de rodingitas, asociadas a los diques intruidos en las peridotitas de Ronda, de edades de 16,8 Ma y 3) la obtención de nuevas tasas de enfriamiento para el manto de Los Reales con valores medios de 350 °C/Ma y 130 °C/Ma, para los intervalos de tiempo comprendidos entre 20-18,5 Ma y 18,5-17 Ma, respectivamente.

TRANSFORMACIONES HIDROTERMALES DE LA CAOLINITA

Autora:

M.^a José Bentabol Manzanares

Directores:

M.^a Dolores Ruiz Cruz

Centro: Departamento de Química Inorgánica, Cristalografía y Mineralogía. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga

Fecha de lectura:

4 de julio de 2003

Tribunal:

Antonio Jiménez López (Presidente), Laureano Moreno Leal (Secretario), Emilio Galán Huertos, Saverio Fiore, Fernando Nieto García

Introducción

Las aplicaciones industriales de los minerales de la arcilla son extensas y variadas. Baste recordar, como ejemplo, su uso en la industria cerámica (como constituyentes esenciales de las pastas), en la industria del papel (como relleno), en la industria química (como catalizadores), en la industria farmacéutica, etc.

Uno de los minerales de la arcilla más usados con fines industriales es la caolinita, el politipo más abundante de los minerales del grupo del caolín. Las aplicaciones industriales de la caolinita derivan de sus propiedades físicas y químicas, especialmente de su composición química simple ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), de su color blanco, su pequeño tamaño de partícula ($< 2\mu m$) y su estructura y forma laminar.

Las condiciones físico-químicas en que se origina la caolinita son presiones y temperaturas relativamente bajas. No obstante, la estabilidad térmica de la caolinita pura es alta ($> 550\text{ }^\circ C$). Sin embargo, en sistemas químicos alejados de sus condiciones de formación y en condiciones de temperaturas crecientes, la caolinita puede dejar de ser estable y transformarse en fases diferentes, con propiedades físico-químicas también diferentes. Estas transformaciones pueden ser de importancia decisiva en ciertos campos de la industria en los que los sistemas químicos no son simples.

Las transformaciones de la caolinita son también un objeto de estudio importante en el campo puramente científico de la Geología. En este aspecto, es enormemente interesante determinar las condiciones de estabilidad de la caolinita y establecer la naturaleza de las nuevas fases formadas, en función de las condiciones físicas (especialmente temperatura) y del medio químico. Este estudio teórico puede ser de gran importancia en el campo de la diagénesis y de las alteraciones hidrotermales.

Estudiar las transformaciones de la caolinita en condiciones de pH variable y medios químicos de complejidad creciente, a temperaturas entre 200 y 300 $^\circ C$, es pues, el objetivo de esta Tesis doctoral.

Metodología

Muestra de partida: se utilizó una caolinita de Georgia (patrón KGa-2), que se utilizó tal como se suministró y tras someterla a una intensa molienda.

Reacciones ensayadas

1. Reacciones con sólo caolinita (Sistema Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O).

Caolinita no modificada: 3,4 g de caolinita/25 ml de agua desionizada.

Caolinita molida: 1,7 g caolinita/25 ml de agua desionizada.

2. Reacciones con caolinita y cloruros. (Sistema Na_2O - K_2O - MgO - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - HCl).

Con caolinita no modificada:

A: 1 caolinita + 2 SiO_2 + 0,5 NaCl + 0,25 KCl + H_2O

B: 1 caolinita + 2 SiO_2 + 0,5 NaCl + 0,25 KCl + 0,3 MgO + H_2O

C: 1 caolinita + 2 SiO_2 + 0,5 NaCl + 0,25 KCl + 0,15 MgO + 0,15 $FeCl_2$ + H_2O

D: 1 caolinita + 2 SiO_2 + 0,5 NaCl + 0,25 KCl + 0,3 MgO + 0,03 $FeCl_2$ + H_2O

Con caolinita molida:

E: 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 1 NaCl + 0,5 KCl + H_2O

F: 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 1 NaCl + 0,5 KCl + 0,3 $MgCl_2$ + H_2O

G: 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 1 NaCl + 0,5 KCl + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

3. Reacciones con caolinita molida e hidróxidos de Na y K. (Sistema Na_2O - K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O ± HCl).

G': 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 1 NaOH + 0,5 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

Ñ: 1 caolinita molida + 1 SiO_2 + 1 NaOH + 0,5 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

Ñ': 1 caolinita molida + 1 SiO_2 + 1 NaOH + 1 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

O: 1 caolinita molida + 1,5 NaOH + 0,6 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

O': 1 caolinita molida + 1,5 NaOH + 0,6 KOH + 0,3 $MgCl_2$ + H_2O

OS: 1 caolinita molida + 1,5 NaOH + 0,6 KOH + H_2O

K: 1 caolinita molida + 2 NaOH + 1 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

4. Reacciones con caolinita molida e hidróxidos de Li y K (o Na) (Sistema Na_2O - K_2O - Li_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - HCl).

M: 1 caolinita molida + 2 LiOH + 1 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

P: 1 caolinita molida + 1 SiO_2 + 1 LiOH + 0,5 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

L: 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 2 LiOH + 1 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

L': 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 2 LiOH + 1,6 NaOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

Q: 1 caolinita molida + 2 SiO_2 + 2 LiOH + 1 KOH + 0,6 $MgCl_2$ + H_2O

Determinaciones en productos sólidos y en soluciones

Sólidos	Soluciones
1. Estudio por difracción de rayos X.	1. Análisis químico: Espectrofotometría ultravioleta visible.
2. Estudio térmico.	Absorción-emisión atómica.
3. Estudio por espectroscopia infrarroja.	2. Construcción de diagramas de actividad.
4. Estudio por microscopia electrónica.	

Resultados

1. Recristalización de la caolinita y formación de caolinitas esféricas. Se observó en las reacciones con solo caolinita molida y en la reacción G' a pH neutro.
2. Formación de zeolitas (fundamentalmente analcima y zeolita Li-(ABW). Se observó en las reacciones O, O', OS, L, L' a pH básico.
3. Formación de sílice cristalina. Se observó en la reacción G' a 200 °C y pH neutro. Es la primera vez que se observa la formación de tridimita rómica a partir de caolinita.
4. Formación de ilita + clorita. La formación de ilita y clorita tuvo lugar durante las reacciones O, O' y OS a pH alcalino. Es la primera vez que se describe la formación de intercrecimiento e interstratificación mica/clorita.
5. Formación de interstratificados clorita/esmectita y clorita/vermiculita. Tuvo lugar a través de las reacciones G', L y L' a pH de neutro a alcalino.
6. Formación de clorita di, trioctaédrica. Se observó en las reacciones G', L y L' a 200 °C, a pH de neutro a alcalino.

Conclusiones

La evolución de las reacciones estudiadas y la mineralogía de los productos finales dependen de una serie de factores: 1) características estructurales de la caolinita de partida; 2) composición química del sistema; 3) duración del experimento; 4) temperatura. Las transformaciones de la caolinita tienen lugar de acuerdo con la regla de Ostwald, lo cual significa que la fase que requiere menor cambio de entropía se forma primero y que el equilibrio se alcanza gradualmente, a través de una serie de pasos intermedios.

En relación con las aplicaciones geológicas de este estudio, podemos concluir que: 1) en sistemas ricos en Al y bajas proporciones de minerales ferromagnesianos, el proceso dominante es la recristalización de la caolinita. 2) En sistemas deficitarios en sílice pero con una cierta proporción de minerales ferromagnesianos, la formación de ilita y clorita es un proceso generalizado a partir de 200 °C. 3) En sistemas químicos con exceso de sílice y una cierta proporción de fases ferromagnesianas, la caolinita es inestable a 200 °C, dando lugar a fases interstratificadas y posteriormente a sudoita.

En relación con las posibles implicaciones industriales, la conclusión más evidente es que la caolinita, considerada clásicamente como un mineral muy estable, química y térmicamente, pierde estas propiedades si los sistemas químicos son agresivos (pH alejados de la neutralidad) y en presencia de determinados cationes (especialmente K, Li, Fe y Mg). La fácil formación de zeolitas de tamaño de partícula uniforme (a pH alcalino), a partir de caolinita es otra conclusión de este trabajo.

ESMERALDAS DE LOS URALES (RUSIA): CONDICIONES DE FORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN COMPARATIVA CON LAS ESMERALDAS DE OTROS ORÍGENES

Autor:

Egor Gavrilenko

Director:

Benjamín Calvo Pérez

Centro:

Departamento de Ingeniería Geológica de la ETSI Minas de Madrid (UPM)

Fecha de la lectura:

10 de octubre de 2003

Tribunal:

Fernando Vázquez Guzmán (Presidente), María Teresa González Aguado (Secretaria), José Ángel López García, Elena Vindel Catena, José Laureano Canoira López

La presente tesis doctoral tiene dos objetivos fundamentales: establecer las condiciones de formación de las esmeraldas en los yacimientos de los Montes Urales y determinar sus propiedades características en comparación con las esmeraldas de otros orígenes.

La primera parte del trabajo (capítulo 1) contiene información de carácter general sobre la esmeralda. Este capítulo reúne los datos del actual estado del arte en las clasificaciones de yacimientos de esmeraldas, métodos de síntesis y problemas gemológicos relacionados con la esmeralda. El estudio de la procedencia geográfica de una gema a veces requiere también el conocimiento de la historia de descubrimientos y datos de la importancia económica de sus diversos yacimientos, datos también incluidos en este capítulo.

El capítulo 2 está dedicado al estudio de las condiciones de formación de las esmeraldas de los Montes Urales. Los yacimientos de esmeraldas en esta región tienen una larga historia minera. Tras su descubrimiento en el año 1831 han sido explotados intensamente, con algunos períodos de abandono relacionados con los tiempos de inestabilidad política y económica en Rusia. Las primeras teorías de su formación fueron ya expresadas en siglo XIX por los mineros que comenzaron su explotación. Durante la primera mitad del siglo XX, los yacimientos han sido estudiados por algunos eminentes geólogos, entre los cuales cabe citar a A. E. Fersman, que formuló aquí su teoría de "pegmatitas desilicificadas", posteriormente rebatida por los investigadores más tardíos. En el capítulo 2 se presenta la relación detallada de los antecedentes de estudios de la zona y la situación geológica de los yacimientos de esmeraldas, para proceder luego a la parte experimental del trabajo.

Dadas las restricciones para el acceso a la zona durante diversos períodos históricos, numerosas cuestiones sobre la génesis de estos yacimientos quedaban abiertas aún en la actualidad. No había sido establecida con detalle la secuencia de formación de minerales

en los complejos metamórficos esmeraldíferos. Las condiciones de presión y temperatura durante la formación de esmeraldas tampoco habían sido estudiadas por técnicas mineralógicas y geoquímicas modernas. El presente trabajo está orientado a esclarecer estas cuestiones para formular conclusiones respecto a la génesis de estos yacimientos.

Para ello se ha realizado un estudio petrográfico y mineralógico-geoquímico de las muestras de esmeraldas y minerales asociados recogidos por el autor en distintos yacimientos de la región de Minas de Esmeraldas. Además, se han caracterizado (petrografía, microtermometría y espectroscopia Raman) las inclusiones fluidas en esmeraldas y minerales asociados. Basándose en los resultados de este estudio, se han obtenido las siguientes conclusiones respecto a las condiciones de formación de las esmeraldas:

- La mineralización de berilio está relacionada con los fluidos post-magmáticos de origen granítico y tiene carácter metamórfico. Los cristales de berilio y esmeralda se desarrollan sobre un protolito compuesto por los minerales formados anteriormente, disolviéndolos y heredando en parte los rasgos de su quimismo. A este efecto se debe la gran variedad de coloraciones de berilio, pudiendo aparecer las esmeraldas de color verde intenso sólo si el metamatismo se desarrolla sobre un protolito enriquecido en cromo (rocas ultramáficas serpentinizadas). Se observa una evolución general del quimismo de las formaciones metamórficas esmeraldíferas, que se manifiesta por el enriquecimiento progresivo en Si, Al, K y F, así como por el empobrecimiento en Fe y Mg en generaciones más recientes de minerales. Este proceso se debe al aporte progresivo de fluidos tardíos relacionados con intrusión de magmas graníticos y con sus efectos metamórficos sobre el protolito derivado de las rocas ultramáficas.
- El aporte de los fluidos responsables de la cristalización de berilio y esmeralda tiene un carácter pulsatorio, pudiéndose observar varias generaciones de estos minerales dentro del mismo yacimiento. La mineralización se desarrolla en condiciones de actividad tectónica que afecta con frecuencia los cristales de berilio y esmeralda, los cuales se hallan fragmentados, budinados y cementados por generaciones posteriores del mismo mineral.
- El estudio de las inclusiones fluidas primarias en esmeraldas permite caracterizar el fluido responsable de la mineralización como un fluido básicamente acuoso, con pequeñas concentraciones de CO₂, CH₄ y NaCl. Las características medias del fluido corresponden a los siguientes valores (mol%): H₂O - 92,26, CO₂ - 5,27, CH₄ - 0,15, NaCl eq. - 2,32 y la densidad media del fluido es de 0,8355 g/cm³. Las inclusiones primarias homogeneizan a la fase líquida en un rango de tempe-

raturas comprendido entre 230 y 330 °C, siendo la temperatura media de homogeneización de 274 °C. La dispersión de los valores de las temperaturas de homogeneización se debe, probablemente, a los efectos de reequilibrio ("stretching") frecuentes en las inclusiones de los yacimientos estudiados.

- Las isocoras calculadas para las inclusiones fluidas primarias, junto con los datos de estimación independiente de la temperatura (geotermómetro de turmalina y biotita) y presión (evaluación de la profundidad de formación de los granitos adyacentes), proporcionan el siguiente rango aproximado de las condiciones P-T de la formación de las esmeraldas de los Urales: 350-400 °C y 1.500-2.000 bar, correspondientes a 5,7-7,5 km de profundidad.

Por otro lado, en gemología existe un problema para la determinación de la procedencia geográfica de gemas talladas. En ocasiones dicho origen puede influir sobre precio final de la gema; además tiene un indudable valor en el caso de gemas históricas y en estudios arqueológicos. El capítulo 3 del presente trabajo está dedicado a la caracterización comparativa de las esmeraldas de los Urales con las muestras procedentes de otros orígenes.

Para este estudio se ha creado una colección de muestras de contraste representando la mayoría de las regiones esmeraldíferas del mundo, así como las esmeraldas sintéticas obtenidas por distintos métodos de síntesis. Además, han sido utilizados los datos de las esmeraldas certificadas en el Instituto Gemológico Español a lo largo de los años del trabajo del autor en el Laboratorio de Análisis y Certificación de Gemas de este Centro.

Las muestras de la colección comparativa fueron estudiadas usando tanto los métodos gemológicos convencionales (índices de refracción, peso específico, luminiscencia) como otras técnicas mineralógicas más sofisticadas, sobre todo las de carácter no destructivo para la muestra, propias del estudio gemológico práctico. Se han realizado estudios sobre la composición química de las muestras (microsonda electrónica y fluorescencia de rayos X), espectroscopia óptica y de infrarrojos, isótopos estables en esmeraldas, composición de inclusiones minerales y caracterización de las inclusiones fluidas.

Como resultado de esta parte, se han establecido los rangos de variación de distintas propiedades en las esmeraldas de los Urales y se han caracterizado las posibilidades de cada método para la determinación de la procedencia geográfica de esmeraldas. Los métodos gemológicos convencionales han sido reconocidos como insuficientes para la resolución de esta tarea. Como métodos más informativos en este sentido han sido establecidos: el estudio de isótopos de oxígeno, composición de inclusiones minerales y caracterización completa (incluida la petrografía y microtermometría) de las inclusiones fluidas.

EL COMPLEJO FILONIANO TARDIHERCÍNICO ASOCIADO AL BATOLITO DE LOS PEDROCHES (ZONA CENTRO-IBÉRICA, ESPAÑA)

Autora:

Rut Jiménez San Pedro

Directores:

Manuel Carracedo Sánchez y Luis Ángel Ortega Cuesta

Centro:

Dpto. de Mineralogía y Petrología. Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad del País Vasco. Bilbao (Vizcaya)

Fecha de lectura:

12 de noviembre de 2003

Tribunal:

José Ignacio Gil Ibarguchi (Presidente), Antonio Castro Dorado (Secretario), M.^a José Huertas Coronel, Teodosio Donaire Romero Alarcón y Luis Eguíluz

El batolito de Los Pedroches, compuesto principalmente por granodioritas, granitos y adamellititas, se sitúa en el sur de la Zona Centro-Ibérica y dibuja una alineación de dirección N 110-120 °E. Se encuentra intruido por una extensa red de diques, los cuales siguen dos sistemas de fracturación principales: uno de orientación N-S, integrado por traquiandesitas, traquitas, dacitas y lamprófidos, y otro más tardío, de dirección N 120-130 °E, formado por riolitas. Además de éstos son relativamente comunes filones aplíticos, pegmatíticos y de cuarzo, cuyas orientaciones son muy variadas. De forma más esporádica afloran diques diabásicos, con predominio de direcciones N-S.

Lamprófidos (shoshonitas y latitas)

Son rocas básicas e intermedias y metaaluminosas. La relación media de MgO* [= (MgO/MgO+FeOt)] es de 0,55 y el porcentaje en peso de CaO (μ CaO = 5,40%) es, también, bastante elevado. Son mucho más pobres en Na₂O (μ Na₂O = 2,72%) que en K₂O (μ K₂O = 5,30%). Los contenidos en elementos de tierras raras (REE) son muy elevados (Σ REE = 247-722) y desarrollan un alto grado de fraccionación [μ (La/Lu)_N = 81,7]. En cuanto a otros elementos traza, destacan los altos valores de muchos de ellos: Ba (756-2925 ppm), Rb (79-181 ppm), Sr (588-3122 ppm), Cr (202-504 ppm), Ni (59-246 ppm), Zr (179-234 ppm)... Sus relaciones isotópicas iniciales de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr se sitúan en torno a 0,704 y los valores de εNd(305) varían entre 0,8 y 1,1. Por tanto, la fuente podría corresponderse con un manto superior.

Traquiandesitas y traquitas

Las traquiandesitas están formadas por rocas netamente metaaluminosas y de composición intermedia. La relación media de MgO* es de 0,58, el contenido en CaO varía desde 4,28% a 8,71% y son sensiblemente más po-

bres en Na₂O (μ Na₂O = 3,23%) que en K₂O (μ K₂O = 4,56%). Los contenidos en tierras raras son altos (Σ REE = 229-378 ppm), aunque más bajos que en los diques lamprófidos, y muestran una fraccionación bastante notable [μ (La/Lu)_N = 32,3]. También son más pobres que los lamprófidos en Ba (1.127-2.335 ppm), Sr (683-1.045 ppm), Cr (238-468 ppm) y Ni (96-231 ppm), pero son más ricos en Rb (125-226 ppm) y Zr (247-377 ppm). Sus relaciones isotópicas iniciales de estroncio oscilan entre 0,7046 y 0,7060, mientras que los valores de εNd(305) varían entre -1,4 y -2,3.

Las muestras traquíticas son rocas ácidas y metaaluminosas. La relación media de MgO* es de 0,55, el contenido en CaO varía desde 2,34% a 4,42% y son ligeramente más pobres en Na₂O (μ Na₂O = 3,71%) que en K₂O (μ K₂O = 4,65%). Los contenidos en tierras raras son altos (Σ REE 161-369 ppm) y muestran una fraccionación bastante notable [μ (La/Lu)_N = 23,3]. Con respecto a los diques traquiandesíticos son más pobres en REE, Ba (641-864 ppm), Sr (460-1.039 ppm), Cr (36-154 ppm), Zr (151-227 ppm) y Ni (17-102 ppm) pero más ricos en Rb (139-265 ppm). En este caso, las relaciones isotópicas iniciales son Sr(305) = 0,7044-0,7048 y εNd(305) = 0,8 a -0,4, próximas a las de la BSE.

Debido a que los diques de afinidad shoshonítica (lamprófidos, traquiandesíticos y traquíticos) destacan por sus elevados contenidos en LILE, LREE, U y Th, además de por sus altos valores en K₂O y sus relaciones isotópicas de Sr y Nd próximas a las de la BSE para el caso de algunos lamprófidos y traquitas, el origen de éstos se ha relacionado con la fusión, en diferentes condiciones físico-químicas, de un manto metasomatizado. El resto de los diques shoshoníticos muestra firmas isotópicas híbridas entre componentes corticales y mantélicas.

Dacitas

Desde el punto de vista químico estos diques son ácidos y ligeramente metaaluminosos a peraluminosos. La relación media de MgO* es de 0,41, el contenido en CaO varía desde 1,38% a 2,91% y son algo más pobres en Na₂O (μ Na₂O = 3,72%) que en K₂O (μ K₂O = 4,24%). Los contenidos en REE varían entre 116 y 173 ppm, con una fraccionación media de 23,3. Las dacitas tienen unos contenidos parecidos a los de los diques traquíticos en Ba (544-1.118 ppm), Rb (143-227 ppm) y Zr (136-184 ppm) pero son más pobres que éstos en REE, Sr (352-485 ppm), Cr (35-79 ppm) y Ni (15-34 ppm). Las dacitas se proyectan en el diagrama TAS prácticamente sobre la línea que separa los campos de las dacitas y riolitas, y sobre el campo de las traquidacitas y traquitas. Las composiciones isotópicas iniciales [Sr(305) = 0,7051-0,7065 y εNd(305) = -1,7 a -4,0] son híbridas entre fuentes corticales y mantélicas.

Las rocas dacíticas muestran unas características petrográficas, mineralógicas, composicionales e isotópicas similares a las de las granodioritas de Los Pedroches. Por tanto la fuente y los procesos de génesis son

probablemente similares. Se ha propuesto para resolver el origen de ambos fundidos un modelo basado en la fusión de una fuente compuesta, integrada por rocas básicas e intermedias (generadas a partir del enfriamiento y cristalización fraccionada de magmas básicos de afinidad shoshonítica) y rocas corticales sedimentarias. Dicha fusión generaría magmas de composición intermedia y ácida que se mezclarían después de su segregación para generar magmas híbridos de composición granodiorítica, adamellítica y dacítica.

Riolitas

Las rocas de la familia riolítica se han subdividido en cinco tipos distintos en función del tamaño y porcentaje modal de los fenocristales. No obstante también existen diferencias mineralógicas y químicas entre los diferentes grupos.

Todas las muestras riolíticas analizadas presentan un carácter ácido y, generalmente, peraluminoso. El contenido en K_2O es elevado en todos los tipos texturales ($\mu K_2O = 4,21-7,53\%$) y siempre sensiblemente superior al contenido en Na_2O ($\mu Na_2O = 1,40-2,97\%$); la relación K_2O^* (K_2O/K_2O+Na_2O) tiene un valor medio de 0,67, sin mostrar grandes diferencias de un tipo a otro. Por otro lado, son pobres en CaO , con contenidos que varían entre el 0,02% y 1,12%.

A nivel de elementos traza, los tipos texturales definidos muestran una notable variabilidad. Los de mayor tamaño porcentaje y tamaño de fenocristales son claramente los más enriquecidos en Cr, Sr, Th, V, Zr y Ba, y los más pobres en Rb. Lo mismo ocurre con el contenido total en REE: superior a 45 veces el condrito en los tipos con mayor porcentaje y tamaño de fenocristal e inferior a 29 en el caso de otros grupos de riolitas; el grado de fraccionación varía entre muy escaso y moderado [(La/Lu)_N = 1,01-28,36], aunque los espectros prácticamente planos están restringidos a las riolitas más diferenciadas.

Las relaciones isotópicas iniciales [$Sr_{(290)} = 0,7063-0,7082$ y $\epsilon Nd_{(290)} = -2,4$ a $-3,1$] para las riolitas más básicas, aun siendo híbridas, son más radiogénicas que las de los diques N-S. Por tanto su fuente es mixta pero con mayor afinidad cortical.

Las características petrográficas, mineralógicas, químicas e isotópicas de las riolitas menos evolucionadas son similares a las de los granitos de Los Pedroches. Por tanto la fuente y el proceso de génesis puede ser similar. Por otro lado, las riolitas más ácidas guardan estrecho parecido químico con las aplitas y leucogranitos del batolito.

El origen de los fundidos riolíticos y graníticos puede asociarse, igualmente, con la fusión de una fuente mixta con materiales de afinidad shoshonítica, de procedencia mantélica, y rocas corticales sedimentarios, pero con mayor participación de los segundos que en el caso de las dacitas y granodioritas. Las diferencias texturales y composicionales entre los distintos tipos de riolitas se deben, en gran parte, a variaciones en la ve-

locidad de enfriamiento y a la diferenciación por flujo. Pero, además, en la diversidad de tipos riolíticos deben participar otros factores como las condiciones de fusión (temperatura, contenido en H_2O ...).

Aplitas y diabasas

Las aplitas son rocas muy ácidas y próximas al límite metaaluminoso-peraluminoso. La cantidad de potasio y sodio es alta y muy baja la de calcio. Estas rocas están muy empobrecidas en elementos traza (incluidas REE), comparándolas con las restantes litologías del complejo filoniano. Solamente destacan los valores relativamente altos en Rb y Co. Las aplitas y pegmatitas constituyen generalmente los últimos fundidos residuales en procesos de cristalización fraccionada. Los diferentes pulsos magmáticos que han actuado para formar el batolito de Los Pedroches han podido generar su particular cortejo aplítico. Algunas aplitas, sin embargo, podrían proceder de la fusión directa de rocas de la corteza.

Las diabasas son básicas, metaaluminosas, con contenidos altos en K_2O , Na_2O y CaO . Tanto la suma de REE como su fraccionación son elevados. Las relaciones de campo apuntan hacia una generación más tardía con respecto al resto de facies asociadas al batolito de Los Pedroches. Además, su composición química se separa de cualquiera de las tendencias evolutivas marcadas por el resto de las litologías filonianas. Todo esto induce a considerarlas con un magmatismo diferente.

Emplazamiento y modelo petrogenético

Conocimientos estructurales y tectónicos previos han relacionado el batolito de Los Pedroches con una zona de cizalla subvertical, derecha, de dirección N 110-120 °E, de escala cortical y desarrollada en un régimen trans-tensional. En este esquema de cizalla la intrusión de los diques ha sido asociada con fracturas Riedel de tipo R' (diques de orientación N-S) y R (los de dirección N 120-130 °E), generadas en el mismo sistema de esfuerzos.

Sintetizando todos los datos obtenidos, se ha propuesto un modelo final para explicar los procesos implicados en la formación del batolito de Los Pedroches y del complejo filoniano asociado, que se resume de la siguiente manera:

En una primera etapa intruyen sills y diques basálticos, procedentes de un manto metasomatizado, en la corteza inferior para generar una fuente compuesta. En una segunda etapa, la intrusión de magmas mantélicos (lamprófidos y traquitas) favorece la fusión de esta nueva fuente heterogénea. En este escenario coinciden fundidos de naturaleza muy variada, derivados tanto de los magmas básicos mantélicos que se están enfriando y cristalizando como de la fusión de la fuente híbrida o compuesta por rocas básicas y sedimentarias. Los fundidos granodioríticos y adamellíticos finalmente generados se emplazan (~ 310 Ma) a través de una zona de cizalla dúctil, de dirección N120°E. Posteriormente

(~ 305 Ma) fundidos lamproffídicos, traquiandesíticos, traquíuticos y dacíticos intruyen a favor de fracturas Riedel de tipo R' asociadas al sistema de esfuerzos de cizalla. En los últimos estadios de la fusión aumenta la participación del material metasedimentario en el proceso, formándose así los magmas graníticos y riolíticos, que se emplazan, entre 300 y 290 Ma, en forma de plutones y diques que aprovechan fracturas Riedel de tipo R, respectivamente.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS RELACIONES TEXTURALES Y DE FASES EN GRANITOS PERALUMÍNICOS DE LA "SERIE MIXTA" DEL MACIZO IBÉRICO: EL CASO DE CABEZA DE ARAYA (CÁCERES)

Autora:

Olga García Moreno

Director:

Luis Guillermo Corretgé Castañón y Antonio Castro Dorado

Centro:

Departamento de Geología. Universidad de Oviedo.

Fecha de lectura:

19 de diciembre de 2003

Tribunal:

Fernando Bea Barredo (Presidente), Ofelia Suárez Méndez (Secretaria), François Holtz, Ramón Capdevila, Francisco J. Martínez Fernández

En este trabajo se aborda el estudio experimental de las relaciones de fases en una de las tipologías graníticas del Macizo Ibérico: los monzogranitos cordieríticos de la "serie mixta". La génesis de este tipo de rocas, con características intermedias entre aquellas de las series alcalina y calcoalcalina, carece, hasta la fecha, de un modelo que permita explicar sus características geoquímicas y texturales específicas. Con el fin de elaborar un modelo petrogenético de validez general, la investigación experimental se ha acompañado de un estudio textural de las rocas del Plutón de Cabeza de Araya, como ejemplo típico de la "serie mixta".

Las rocas de la "serie mixta" o granitos de caracteres mixtos (Capdevila *et al.*, 1973) poseen, como hemos dicho, características intermedias entre aquellas de la "serie alcalina" y las de la "serie calcoalcalina". A grandes rasgos, las rocas de la "serie mixta" coinciden con las rocas de la Suite Monzogranítica con cordierita del dominio Norte del Macizo Ibérico, propuesta por Castro *et al.* (2002). Esta tipología granítica se caracteriza por su quimismo intermedio, por ser granitos tardíos con respecto a las principales fases de deformación varisca, por su carácter peraluminico, por sus relaciones isotópicas de Sr relativamente bajas y por formar plutones alóctonos zonados.

Las rocas del Batolito de Cabeza de Araya (Corretgé, 1971) constituyen, dentro de todos los granitos del Macizo Ibérico, el ejemplo o la tipología granítica representa-

tiva de la "serie mixta" reuniendo todas las características anteriormente descritas. Se trata de un plutón complejo dentro del Batolito de Extremadura Central (Castro, 1984), constituido por tres Facies principales: Facies A de monzogranitos y granodioritas con megacrístales de Kfs y Crd, Facies B de granitos de grano grueso con Bt y Ms, y Facies C de granitos aplíticos y leucogranitos con Bt y Ms. Corretgé (1971) definió otras facies siendo las tres nombradas las más importantes desde el punto de vista volumétrico y petrogenético. De todos modos, se debe destacar también la presencia de cuerpos ligeramente más básicos (tonalitas y granodioritas) en plutones anexos al plutón principal de Cabeza de Araya, como son las intrusiones de Zarza la Mayor y Arroyo de la Luz. El papel de estos cuerpos, como se discute más adelante, pudo ser crucial en la génesis de las rocas menos diferenciadas del plutón principal. Otra característica destacable de las rocas de Cabeza de Araya es su pobreza en enclaves. García-Moreno (1999) estudió los tipos de enclaves en estas rocas, distinguiéndose metamórficos e ígneos. Dentro de los enclaves ígneos, los tonalíticos son los más importantes frente a los de composiciones más félsicas. La interpretación de la presencia y características de los enclaves en estas rocas es una clave fundamental en el estudio de su petrogénesis.

La investigación experimental con este tipo de rocas está justificada, ya que los modelos petrogenéticos derivados de los estudios experimentales de fusión parcial en la corteza no han podido explicar las características composicionales de las rocas de la serie mixta. Los monzogranitos de la "serie mixta", cuya composición es peraluminica, tienen más calcio, hierro y magnesio que los fundidos generados por ruptura de micas (fusión parcial de metapelitas y gneises ricos en micas) y, sin embargo, son demasiado potásicos en comparación con los fundidos generados por ruptura de anfíbol (fusión parcial de anfíbolitas).

Los objetivos básicos planteados, como se refleja en el título de esta Tesis, fueron:

- a) la construcción del diagrama de fases T/H₂O/P para la composición de un monzogranito cordierítico de Cabeza de Araya mediante experimentos de cristalización, con el fin de conocer las variables físico-químicas que controlaron la cristalización de estos magmas
- b) la observación de las texturas resultantes en los experimentos, con las que se podría establecer una relación entre el contenido en agua del sistema y las relaciones texturales del mismo para las condiciones experimentales elegidas.

Al observar los resultados experimentales y su comparación con las paragénesis naturales de las rocas de Cabeza de Araya, se ampliaron las condiciones de presión de los experimentos de cristalización. También se plantearon distintos tipos de experimentos como los de asimilación, disolución de enclaves, etc., con el fin de llegar a conocer la fuente y el proceso petrogenético que generó los granitos objeto del estudio.

Desde el punto de vista metodológico, se han realizado experimentos de fusión (roca natural) y de cristalización (vidrios sintéticos hidratados), con la composición de una roca del Plutón de Cabeza de Araya (monzogranito cordierítico). También se han llevado a cabo experimentos de disolución de enclaves y de asimilación de gneises por fundidos granodioríticos. Dichos experimentos se han llevado a cabo a diferentes presiones y temperaturas, y con diferentes contenidos en agua inicial. Para la realización de los experimentos se han utilizado aparatos "piston cylinder" en la Universidad de Huelva y aparatos "cold seal" e "internally heated pressure vessels", en el Instituto de Mineralogía de la Universidad de Hannover. Los resultados experimentales se han estudiado mediante secciones de las cápsulas experimentales para su estudio con microsondas de electrones y microscopios electrónicos de barrido, con los que se han obtenido composiciones de fases minerales y fundidos (ahora vidrios) en equilibrio bajo las condiciones experimentales, así como imágenes digitales para el estudio de las texturas.

Aparte del trabajo experimental, se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de las texturas de las rocas de Cabeza de Araya, sobre todo en la zona de contacto entre dos de las facies principales: monzogranitos con megacristales (Facies A) y granitos de grano grueso con dos micas (Facies B), con la realización de un corte geológico de detalle y la recogida de muestras para su estudio geoquímico y textural. El estudio detallado de las texturas se ha realizado a partir de la distribución de los tamaños de grano (CSD) en rocas seleccionadas de dicho contacto. Los resultados del estudio textural mediante CSD se han interpretado conjuntamente con el estudio experimental para la construcción del modelo petrogenético final.

Los resultados experimentales muestran, para los experimentos de fusión, que el *liquidus* en condiciones anhidras se sitúa por encima de los 1.000 °C, para las tres presiones estudiadas: 12, 6 y 4 kbar. Para condiciones hidratadas, en saturación de agua, se ha probado la influencia de la duración de los experimentos en las relaciones de fases a 850 °C y 6 kbar, con el fin de establecer la duración idónea en los siguientes experimentos bajo condiciones similares, eligiendo 72 horas como tiempo más razonable.

Con la realización de los experimentos de cristalización con vidrio sintético hidratado con la composición de un monzogranito cordierítico de Cabeza de Araya, se ha podido establecer las relaciones de fases del sistema elegido a diferentes condiciones de presión, así como deducir un posible origen para los fundidos que muestran la composición de los monzogranitos cordieríticos.

Las paragénesis experimentales obtenidas difieren de las paragénesis naturales de Cabeza de Araya, sobre todo para las fases ferromagnesianas, no reproduciéndose en los experimentos la cristalización de cordierita, omnipresente en la Facies A y presente en ocasiones en la Facies B. La ausencia de cordierita en los experimentos ha sido comprobada mediante la realización de experimentos dopados con semillas de Crd y Grt a diferentes pre-

siones, disolviéndose estas semillas en los fundidos en todos los casos. A 2 kbar ha podido observarse la reacción de ciertas semillas de Crd con el fundido que las engloba para formar plagioclasa muy rica en Ca. Nuevas semillas añadidas de Pl en estos experimentos muestran los mismos resultados, lo que indica que la Crd no es una fase estable experimentalmente en este sistema concreto. Descartando los problemas cinéticos de nucleación de Crd mediante la utilización de semillas, debemos explicar la presencia de esta fase (ausente en los experimentos) mediante un mecanismo de hibridación, como se verá más adelante. Los fundidos con la composición del monzogranito cordierítico no representan un líquido primario. El líquido primario con el que la cordierita ha debido estar en equilibrio en un momento de la historia de cristalización de estos granitos, ha visto modificada su composición por un mecanismo de hibridación.

Con los experimentos de cristalización se han podido construir tres diagramas de fases T-XH₂O para cada una de las tres presiones estudiadas: 2, 4 y 6 kbar. Los campos de estabilidad de las fases minerales en el campo T-XH₂O han sido comparados con diagramas similares publicados por otros autores para composiciones próximas a las del sistema monzogranítico estudiado.

Un resultado inesperado en los experimentos de cristalización ha sido la variación anómala del porcentaje de fundido con el descenso de la temperatura para los experimentos realizados a 4 y 6 kbar. El porcentaje de fundido no disminuye gradualmente con el descenso de la temperatura por un aumento progresivo de las fases minerales que cristalizan: por el contrario, para determinadas temperaturas se observan unas inflexiones en el porcentaje de fundido, aumentando éste con el descenso de la temperatura. Para la presión más baja estudiada, 2 kbar, se observó un descenso gradual del porcentaje de fundido con el descenso de la temperatura, como es de esperar en un sistema cerrado de cristalización en equilibrio. Estas anomalías observadas en el porcentaje de fundido para las presiones más elevadas, han sido interpretadas en este trabajo como una consecuencia del comportamiento anómalo del agua en los fundidos generados. Este comportamiento anómalo, podría estar relacionado con el cambio de la curvatura de solubilidad de agua con la temperatura a presiones intermedias, según el modelo de Paillat *et al.* (1992).

Las paragénesis minerales obtenidas experimentalmente, así como ciertos resultados anómalos en los experimentos de cristalización usando como material de partida un vidrio sintético con la composición de un monzogranito cordierítico, han indicado, como se ha explicado anteriormente, la procedencia de estas composiciones a partir de un proceso de hibridación (la composición no corresponde con la de un líquido primario). A la vista de estos resultados y de las evidencias petrológicas en los granitos de Cabeza de Araya y su entorno más próximo, se ha intentado comprobar experimentalmente cuál podría haber sido dicho mecanismo de hibridación.

Se han realizado experimentos de asimilación utilizando un vidrio granodiorítico hidratado que simularía un fundido granodiorítico, y un gneis, que simula-

ría la roca asimilada por esos fundidos. Los resultados obtenidos a diferentes temperaturas, presiones y porcentajes de fundido: roca asimilada no ofrecen resultados satisfactorios, obteniéndose composiciones distintas a las del monzogranito cordierítico, con déficit de TiO_2 , MgO , FeO y CaO en la mayoría de los casos.

Las relaciones isotópicas de los monzogranitos cordieríticos estudiados, con relaciones de Sr relativamente bajas, también parecen indicar que ha existido un mecanismo de hibridación en la génesis de estas rocas. Sin embargo, observando las relaciones granito-enclave en estas rocas, se observa un equilibrio para el sistema Sr, pero no para el Nd, así como una riqueza en REE de los enclaves que no puede explicarse por un mecanismo de hibridación del tipo "magma mixing", comúnmente invocado para explicar la hibridación de rocas similares en todo el mundo. Como alternativa a este proceso de "magma mixing" en este trabajo se propone el mecanismo de disolución de enclaves. De esta manera, hemos probado experimentalmente y mediante balance de masas el proceso de disolución de enclaves a fin de determinar el papel de los enclaves microgranudos tonalíticos en la génesis de los monzogranitos cordieríticos. Los experimentos han simulado la descompresión sufrida en el ascenso o emplazamiento de los magmas y el alcance de la saturación en agua de los fundidos. En este proceso de descompresión se ha observado cómo los enclaves se disuelven en mayor proporción en los fundidos hidratados al alcanzar éstos la saturación en agua, en comparación con el porcentaje de enclave disuelto en experimentos isobáricos a la misma temperatura. Paralelamente, para comprobar la validez del modelo experimental, se ha realizado un balance de masas para elementos mayores e isótopos. Estos balances han mostrado la invalidez del proceso de mezcla de magmas como proceso de hibridación efectivo en este tipo de rocas. Los resultados muestran que el balance de masas se debe obtener por una disolución selectiva de ciertas fases minerales, más que por la mezcla homogénea de dos fundidos de composiciones contrastadas. El proceso de disolución de enclaves satisface esta condición, ya que es la plagioclasa del enclave la que se disuelve selectivamente con mayor facilidad que el resto de fases minerales, imponiendo así una determinada composición de elementos mayores y las relaciones isotópicas de los monzogranitos cordieríticos.

Finalmente, el modelo petrogenético que se propone para la génesis de las rocas de la "serie mixta" combina procesos de fusión parcial de rocas corticales con la contaminación de los fundidos generados en dicho proceso mediante la disolución de enclaves tonalíticos:

En una zona relativamente profunda (nivel de anatexia) entorno a 6 kbar, se produce la fusión parcial de rocas del Complejo Esquisto-grauváquico por ruptura de biotita y moscovita, con la generación de un fundido granítico peraluminico hidratado pero subsaturado, en el que la cordierita es fase estable.

Se produce la segregación *in situ* de los fundidos graníticos en el campo de estabilidad de la cordierita. En esta zona de fusión parcial existen diques de intru-

siones tonalíticas precoces y fragmentos de estos diques son arrastrados e incorporados en los fundidos graníticos. Estos fundidos segregados se enfrían lentamente y cristalizan fases anhidras mayoritariamente, por lo que el porcentaje de agua en los fundidos va en aumento, aunque manteniéndose subsaturado. Los feldespatos crecen sufriendo poco sobreenfriamiento formando megacristales. La temperatura en este estadio debe ser relativamente alta en relación con el siguiente estadio en zonas menos profundas. Antes de alcanzarse la saturación o de alcanzar el *solidus*, este magma comienza a ascender o sufre descompresión en su emplazamiento, comenzando el siguiente estadio.

En zonas menos profundas, alrededor de 3 a 4 kbar, los fragmentos de tonalita que eran arrastrados prácticamente intactos por los fundidos graníticos hidratados, comienzan a disolverse: los fundidos se vuelven más ricos en calcio, hierro y magnesio, y cesa la cristalización de cordierita, aunque permanece estable, sin reaccionar o disolverse. El sobreenfriamiento que sufren estos nuevos fundidos en esta zona menos profunda provoca la cristalización de plagioclasa algo más cálcica (matriz de Facies A) y posteriormente los bordes albiticos en el feldespato potásico (texturas *rapakivi*).

Estos fundidos evolucionan por el proceso de cristalización, llegando un estadio en el que logran segregarse dando lugar a los fundidos que generarán las rocas de la Facies B. Estos fundidos son ricos en agua, pero no tienen suficiente hierro y magnesio para que la cordierita pueda ser fase estable. Estos fundidos sufren un mayor sobreenfriamiento, con una consiguiente mayor tasa de nucleación y menor tasa de crecimiento de los cristales. Puede que en ese mismo estadio, pero en zonas más profundas, la zona de anatexia continuase activa, y los fundidos de la Facies B siguieran recibiendo nuevos aportes de los fundidos más profundos.

Una vez han cristalizado los fundidos de la Facies B, la zona de anatexia, empobrecida en fases hidratadas y en agua por la segregación previa de los fundidos, sigue activa. Estos nuevos fundidos serán los que generarán las rocas de la Facies C, en equilibrio con silicatos de aluminio (andalucita). De esta manera se distribuyen las facies en el interior y hoy son observadas en el nivel de afloramiento.

GEOQUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO DE HUELVA, SUROESTE DE ESPAÑA

Autora:

Ana María Sánchez de la Campa Verdone

Directores:

Xavier Querol i Carceller; Andrés Alastuey Urós y Jesús de la Rosa Díaz

Centro:

Departamento de Geología. Universidad de Huelva.

Fecha de lectura:

1 de abril de 2004

Tribunal:

Feliciano Plana Llevat (Presidente), Antonio José Fernández Espinosa (Secretario), Jesús Miguel Santamaría Ulecia, Juan Pedro Bolívar Raya, Artiñano Rodríguez Begoña

En los últimos años, el estudio del material particulado atmosférico ha suscitado un gran interés debido a sus adversos efectos sobre la salud humana y su posible relación con ciertos indicios de impactos ambientales. Desde mediados de 1960 la zona de la Ría de Huelva, al igual que otras ciudades españolas, ha sufrido un intenso desarrollo industrial derivado de un importante sector químico, petroquímico y metalúrgico. Estas industrias se agrupan en tres polígonos industriales de los cuales dos se instalan entre la ciudad y la costa. En la actualidad las principales actividades industriales son los procesos petroquímicos y de producción de fosfatos y derivados. Este contexto hace de Huelva una ciudad vulnerable a evidentes impactos ambientales, especialmente en la calidad del suelo, agua y aire. Por ello, y en lo que al aire se refiere, este estudio tiene como objetivo principal la caracterización físico-química del MPA en suspensión, con el propósito de identificar las principales fuentes de emisión (naturales y antropogénicas) que le afectan, así como la cuantificación de sus contribuciones.

Para llegar a tal fin, se establecen las siguientes fases de trabajo: el estudio e interpretación de series temporales antiguas (período 1996-2000), limitado a cuatro estaciones en Andalucía occidental y otras cuatro en Andalucía oriental, caracterizadas como estaciones de fondo urbano, industrial y de tráfico, y series recientes (período 1999-2001) de PST y PM10, PM2.5 y PM1 medidas en Huelva. En esta primera fase se pretende identificar el origen de los episodios de MPA en suspensión en Andalucía y la determinación de fuentes principales y fracción granulométrica de las partículas en Huelva. La segunda fase de trabajo viene dada por el estudio geoquímico de contribuciones de fuentes en PST, PM10 y PM2.5, para comprobar cuantitativamente los aportes de cada fuente. También se ha realizado un estudio geoquímico y granulométrico detallado de las fuentes principales mediante campañas intensivas de medida y muestreo de contaminantes guía, los cuales permiten caracterizar los focos de emisión y la dinámica atmosférica que condicionará la dispersión de los penachos industriales en las zonas circundantes a los focos emisores. Desde comienzos y mediados de 2001, se inician las medidas de PM10 en los municipios de Paterna del Campo y Trigueros, con el fin de establecer el área de influencia de los Polígonos de Nuevo Puerto, Punta del Sebo y Tartessos. Por último, mediante microscopía electrónica de barrido se ha determinado las fases presentes del MP.

Los resultados del estudio de series temporales antiguas nos ha permitido identificar las principales fuentes de los episodios de altos niveles de PM10, como son: a) emisiones de contaminación local resultado de la actividad urbana (tráfico) e industrial, siendo el invierno

el periodo de mayor impacto, b) episodios de contaminación regional, habituales durante los meses de primavera a otoño (según Millán *et al.*, 1997), y c) intrusiones de masas de aire de origen norteafricano (desierto del Sahara/Sahel), que representan la principal fuente de aporte de polvo mineral. Su frecuencia es mayor en los meses de febrero-marzo y verano. La identificación de los distintos episodios de procedencia, especialmente para las masas de aire saharianas, se realiza en base a la observación diaria de mapas de índice de aerosoles (TOMS), mapas pronósticos del tiempo (SKIRON) e imágenes satélites (SeaWIFS) fundamentalmente, y de los mapas NAAPs.

Los niveles medios de PM10 correspondientes a las series antiguas en Andalucía (1996-2000) varían entre 35-54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el número de superaciones medias anuales del valor límite diario entre 48-190 días, en Motril y Colodro, respectivamente. Teniendo en cuenta los valores límites establecidos por la Directiva CE/30/1999 para el 2005 y 2010 (40 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como límite anual de PM10 y un valor máximo diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no puede ser superado más de 35 y 7 días año, respectivamente), ninguna estación cumpliría dichos valores límites para 2010 aún sin considerar las superaciones de origen norteafricana (exceptuando Motril con 34 superaciones caracterizadas de origen no sahariano).

Este estudio ha demostrado que para la media anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (valor límite para 2005) le corresponde un valor límite diario (percentil 90) de 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en lugar de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o que el número equivalente anual de superaciones diarias permitidas del valor límite diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ debería ser 78 y no 35, o bien su equivalente (percentil 70%).

Respecto a los valores medios obtenidos durante 1999-2001 en Huelva, 35-38 $\mu\text{gPM10}/\text{m}^3$, 19 $\mu\text{gPM2.5}/\text{m}^3$ y 15 $\mu\text{gPM1}/\text{m}^3$, y de 30 y 33 $\mu\text{gPM10}/\text{m}^3$ en Paterna y Trigueros, respectivamente, todos cumplirían el límite anual establecido para 2005 de 40 $\mu\text{gPM10}/\text{m}^3$, y por un día, también el número de excedencias anual permitido ya que de los 85 días de superación para el 2001, 51 de ellos se registraron simultáneamente con episodios africanos.

Los niveles medios de MP varían estacionalmente, la fracción PM10 aumenta en verano, y entre febrero-marzo, debido a condiciones meteorológicas particulares, mientras los niveles de PM2.5 y PM1 describen una tendencia más suave. La proporción PM2.5/PM10 es mayor en invierno debido al aumento de los aportes antropogénicos invernales de granulometría fina (PM2.5-PM1), resultado de unas condiciones dispersivas desfavorable y menor espesor de la capa de mezcla. En verano el ratio PM2.5/PM10 es claramente menor debido a la intensificación de los procesos de resuspensión y a la frecuencia de intrusiones de masas de aire saharianas, generalmente cargadas de partículas principalmente gruesas PM10. En el 68% de los días de 2001 ha predominado el transporte de masas de aire desde el Océano Atlántico, dando lugar a medias diarias de niveles de partículas en suspensión relativamente bajas. Los episodios de aporte de polvo africano han afectado

a Huelva un 23% de los días, durante los cuales las medias diarias de los niveles de partículas en suspensión han alcanzado valores elevados (53, 28 y 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, PM2.5 y PM1, respectivamente).

La caracterización química de PST, y PM10 y PM2.5 muestreado en la estación urbana de fondo (M. Lois), permitió diferenciar una componente crustal con un porcentaje mayor en PST (34, 32 y 14%), un incremento del CIS hacia la fracción PM2.5 (23, 21 y 28%) y una componente marina presente en mayor porcentaje en la fracción gruesa (5, 8 y 4%), para PST, PM10 y PM2.5. Como cabría esperar, la composición media de PM10 en Paterna y Trigueros viene dada por una componente crustal y marina inferior, y CIS y NO_3^- superiores a la de Huelva, para ambos municipios, respectivamente.

Las proporciones relativas de OM+EC incrementa desde PST hacia PM10, con máximo en PM2.5. Las proporciones de $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ determinadas, junto con los altos valores de SO_4^{2-} , Cu, Ti, Zn, PO_4^{3-} , As, Pb, Sb, Ni, Cd y V pone de manifiesto la existencia de una contribución industrial importante respecto a las emisiones típicamente urbanas. Dicha contribución se refleja claramente en el análisis de componentes principales (ACP), ya que de las 5 fuentes o factores identificados tres son fuentes antropogénicas; petroquímica-tióxido (entre 8-10% de la varianza), una mezcla de metalurgia y fosfatos (con un 6-20% de la varianza total), y el tráfico (5-7% de la varianza). Las dos fuentes naturales determinadas son el factor crustal, que expresa la mayor varianza del sistema (31-47%), y el marino (9-15% de la varianza total). En el ACP de PM2.5 y PM10 en Huelva capital y áreas circundantes (Paterna y Trigueros), se obtuvieron los mismos factores con la salvedad de que en PM2.5 se caracterizó una nueva fuente de componentes secundarios y la ausencia del factor marino, y la designación de una única fuente industrial en Paterna y Trigueros, resultado de los procesos de dispersión y fraccionamiento granulométrico, que afectan a las emisiones de Nuevo Puerto, Punta del Sebo y Tartessos conjuntamente.

Acerca del análisis de contribución de fuentes a los niveles de PM10, éste resultó ser el siguiente: 33% tráfico, 27% crustal, 17% metalurgia-fosfatos (Polígono Punta del Sebo), 15% petroquímica-tióxido (Polígono de Nuevo Puerto), 5% marino y un 3% indeterminado.

Los resultados granulométricos y composicionales obtenidos en campañas de muestreo intensivas realizadas durante el año 2001, indican que los penachos de Fertiberia-Abonos presentan una granulometría fina, y niveles de partículas elevados. Estos penachos están compuestos químicamente por cloruros, fosfatos, amonio y potasio. El penacho resultado de las emisiones de Fertiberia-Fosfóricos, Rhodia y Foret es de granulometría trimodal, y con niveles de partículas elevados en las zonas próximas al foco emisor. Estas partículas se presentan en forma de fosfatos, sodio y cobre. En cambio, en los penachos de Atlántic Copper son característicos los bajos niveles de partículas aso-

ciados a altos niveles de gases (SO_2) en zonas próximas al foco emisor y de granulometría fina (PM1). Químicamente están constituidos por sulfato, hierro, zinc, plomo, cobre, arsénico, antimonio, bario, bismuto, cadmio y estaño fundamentalmente. Su impacto en Huelva origina niveles de inmisión de partículas de bajo ratio PM10/PM1 junto con altos niveles de SO_2 , As y Cd. Los penachos procedentes del Polígono de Nuevo Puerto presentan una distribución granulométrica muy variada. En este caso la composición química está constituida por carbono no mineral, titanio, vanadio y cobalto. Del mismo modo, se muestreó la resuspensión de las balsas de fosfoyesos, tales depósitos presentan un alto grado de compactación y humedad, descartándose la posibilidad de incidencia de las partículas procedentes de dichas balsas sobre la ciudad de Huelva y sus alrededores. También se muestreó la resuspensión de cenizas de pirita la cual presenta una granulometría predominantemente gruesa y composición química de hierro, zinc, plomo, cobre, arsénico, antimonio y estaño.

El estudio realizado mediante Microscopía Electrónica de barrido (SEM-EDS) mostró que las partículas naturales más abundantes son cuarzo, feldespatos, micas y arcillas, originadas tanto por la resuspensión local como por episodios de intrusión masas de aire norteafricanas. Respecto a las partículas antropogénicas destacar aquellas que actúan como trazadores de la actividad industrial de la zona, tales como óxidos de titanio (tióxido, Polígono Nuevo Puerto), pirita y calcopirita (Atlantic Copper, Fertiberia, Foret, Rhodia y Fosfórico, Polígono Punta del Sebo). Estos compuestos alcanzan la estación de muestreo, junto con altos niveles de SO_2 y NO_2 , bajo vientos locales de componente Sur.

Por último, la realización de un estudio comparativo entre los resultados obtenidos en este estudio y los trabajos realizados en ciudades europeas, permite establecer diferencias importantes en los niveles y composición de PM10 en Huelva, y en general en la Península Sur de Europa, respecto de los países del Norte de Europa. La carga crustal es mayor en las estaciones de España respecto a las de Europa, mientras que la fracción fina (aerosoles secundarios) incrementa hacia el norte peninsular, con ligeras diferenciaciones en relación al resto de Europa. Desde el punto de vista composicional, Huelva se caracteriza por unos niveles elevados de sulfato, nitrato, y en As, Ti, Cu, Bi y Zn principalmente. Estas variaciones en los niveles y composición del material particulado atmosférico se explican debido a: a) la aridez de los suelos, que implica un incremento generalizado de las concentraciones de PM10; b) las reacciones fotoquímicas, que intervienen favoreciendo el desarrollo de aerosoles secundarios; c) la proximidad con el norte del continente africano convierten al sector Sur europeo en receptor principal de material particulado procedente de los desiertos del Sahara-Sahel; d) una menor periodicidad y tasa de precipitación, y e) tipo de actividad industrial de la zona y uso de fertilizantes.

**FÍSICO-QUÍMICA Y PAUTAS DE
CRISTALIZACIÓN DE SOLUCIONES SÓLIDAS
DE SUSTITUCIÓN ANIÓNICA. SISTEMAS
BaSeO₄-BaSO₄-H₂O; CaSeO₄·2H₂O-CaSO₄·2H₂O-H₂O;
CaMoO₄-CaWO₄-H₂O**

Autor:

Ángel Andara

Directores:

Manuel Prieto Rubio y Ángeles Fernández González

Centro:

Departamento de Geología. Universidad de Oviedo

Fecha de lectura:

22 de abril de 2004

Tribunal:

Guillermo Corretge Castañón (Presidente), Amalia Jiménez Bautista (Secretaria), Fernando Rull Pérez, José María Alía Robledo, Carlos Manuel Pina Martínez

En la presente Tesis Doctoral se estudian la termodinámica de equilibrio, la cinética de nucleación y los caminos de reacción a lo largo del proceso de crecimiento para tres sistemas concretos. Hasta el presente, la mayoría de los estudios de cristalización en sistemas Solución Sólida-Disolución Acuosa (SS-DA) se han realizado con soluciones sólidas de sustitución catiónica, especialmente con carbonatos y sulfatos, siendo las de sustitución aniónica, salvo contados casos, poco estudiadas. En esta tesis se presenta el estudio de tres soluciones sólidas de sustitución aniónica —Ca(MoO₄,WO₄), Ba(SeO₄,SO₄) y Ca(SeO₄,SO₄)·2H₂O—.

En primer lugar se ha investigado la cristalografía de cada una de las soluciones sólidas. Ello ha supuesto la determinación de la evolución de los parámetros cristalográficos con la composición. Además, la estructura cristalina de alguno de los miembros extremos de la solución sólida estaba sin resolver, por lo que ha sido necesario proceder a su resolución como paso previo. El estudio se ha completado con el empleo de técnicas térmicas (calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría) estudiándose la influencia de la composición en la temperatura y entalpía de las transiciones de fase características de cada sistema.

En segundo lugar se han establecido las relaciones de equilibrio en los sistemas SS-DA correspondientes. Con este fin se han calculado los diagramas de Lippmann y Roozeboom y los coeficientes de distribución de equilibrio partiendo de los productos de solubilidad de los extremos puros. El grado de idealidad de las soluciones sólidas se ha estimado conjugando diferentes observaciones (evolución de los parámetros de celda con la composición, presencia de huecos de miscibilidad, variación de la capacidad calorífica con la composición, etc.).

Se ha estudiado el comportamiento de nucleación de estas soluciones sólidas en sistemas difusión-reacción, empleándose hidrogel de sílice como medio de difusión. La finalidad de este estudio ha consistido en la determinación de coeficientes de distribución "efectivos"

de los iones vicariantes entre las fases sólida y fluida. Las observaciones realizadas han permitido contrastar el modelo cinético desarrollado por Pina y Putnis (2002).

Se han estudiado los procesos de crecimiento cristalino para los tres sistemas. Al igual que en el caso de la nucleación, la investigación se ha llevado a cabo a partir de los experimentos realizados en medio gel. El estudio implica el establecimiento de los caminos de reacción seguidos por los sistemas partiendo de diferentes concentraciones relativas de los iones vicariantes, lo que supone la interpretación, sobre bases termodinámicas y cinéticas, de la evolución composicional y morfológica de los cristales a lo largo del proceso.

Finalmente, se ha hecho interaccionar SeO₄²⁻ (aq) con substratos de barita y yeso, con el objeto de establecer los mecanismos de sorción de estos iones sobre la superficie de los minerales citados.

**CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS
Y ESTÉRILES GENERADOS EN LAS GRAVERAS
DEL RÍO JARAMA Y SUS APLICACIONES
EN LA INDUSTRIA CERÁMICA**

Autor:

Iván Blanco García

Directores:

Magdalena Rodas González; Carlos J. Sánchez Jiménez y Jacinto Alonso Azcárate

Centro:

Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura:

14 de mayo de 2004

Tribunal:

Guillermina Garzón Heydt (Presidente), Francisco Javier Luque del Villar (Secretario), Emilio Galán Huerτος, Jacques Tirlocq, Juan Jiménez Millán

Los depósitos cuaternarios del sistema fluvial del Jarama están formados por cantos de cuarcita y cuarzo, bien redondeados, lo que permite clasificarlos entre los mejores áridos del continente europeo. Las reservas de gravas y arenas del Jarama superan los 1.400 millones de toneladas, con una producción anual superior a 25 millones de toneladas, lo que supone el 80% de la Comunidad de Madrid. Este enorme volumen de producción genera anualmente más de 2 millones de toneladas de lodos residuales, que constituye un enorme problema para los productores de áridos. El objetivo final del estudio realizado es el de buscar una aplicación industrial —en el sector cerámico en este caso—, definiendo los factores que potencian o limitan dicha aplicación, proponiendo un conjunto de acciones destinadas al reciclado del mayor volumen posible de estériles y residuos, incrementando de este modo los recursos minerales explotables en la Comunidad de Madrid, minimizando en la medida de lo posible los efectos

ambientales y económicos relacionados con la acumulación de estos residuos en balsas de decantación.

La zona estudiada se ubica íntegramente en la Comunidad de Madrid, y puede ser dividida en dos tramos: el *curso medio* del sistema fluvial del Jarama, desde la localidad de El Vellón hasta la desembocadura del río Henares en el Jarama, y el *curso bajo*, desde la desembocadura del río Henares hasta la desembocadura del río Jarama en el río Tajo, en Aranjuez. Se ha realizado el muestreo en 23 explotaciones pertenecientes a 21 empresas del sector de los áridos, recogiendo 108 muestras, siguiendo diversos criterios: nivel, edad y tipo de sustrato de las terrazas explotadas, importancia de los afluentes, variabilidad del proceso de lavado, mecanismo de movilización y concentración de los lodos, etc.

En las explotaciones de áridos fluviales, la generación de estériles (arcillas de la llanura de inundación) y residuos (lodos de lavado de arenas y gravas) lleva asociado un proceso de separación, transporte y depósito de estos materiales que, por sus características físicas y/o químicas no cumplen la normativa y las exigencias de calidad para su venta como áridos, por lo que se acumulan en escombreras o balsas de lodos. En el ciclo de clasificación de arenas y gravas se eliminan las fracciones limo-arcillosas que aglomeran el árido por medio de lavado con agua, facilitando la separación de los granos de modo individual. Para reutilizar el agua en el ciclo de lavado, el lodo residual generado es conducido por medio de tubos o cauces hasta balsas de decantación y, en casos puntuales, a tanques espesadores de lodos, donde se produce la separación entre el agua y las partículas que contiene.

La acumulación de los efluentes del lavado en balsas es el método más utilizado ya que suele ser el más económico, si bien lleva asociado un gran número de limitaciones y desventajas: necesidad de *grandes superficies* para el almacenaje de los residuos, preferiblemente ocupando un *hueco de grandes dimensiones*, que debe situarse a cota *topográficamente por debajo de la planta de lavado* ya que de lo contrario el lodo debe ser bombeado, lo que supone un gasto adicional importante.

En los estudios realizados sobre materiales de origen similar en Australia, Alemania, Suiza o Brasil, se ha empleado el residuo como aditivo (< 50% de la materia prima cerámica), con el propósito de mejorar ciertas propiedades. Sin embargo, en este trabajo se han empleado exclusivamente los residuos y estériles generados en las graveras del río Jarama, es decir, todos los materiales cerámicos fabricados tanto a escala de laboratorio como a escala semi-industrial, se han obtenido utilizando en el 100% de su composición residuos y estériles generados en las graveras del río Jarama.

Los lodos residuales están compuestos por filosilicatos, cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y fragmentos de rocas, reflejando la litología de las áreas fuente de los materiales detríticos que constituyen los diferentes sistemas de terrazas del río Jarama. Esta asociación mineralógica básica se ve modificada por dos aspectos fundamentales: 1º. Ubicación de la terraza explotada, y 2º. Localización del muestreo en el ciclo de eliminación

de los lodos. La ubicación de la terraza explotada condiciona fundamentalmente la presencia adicional de carbonatos y yeso:

- Los lodos residuales generados en el curso medio se caracterizan por la ausencia de carbonatos en cantidades cuantificables. Sin embargo, los residuos del curso medio contienen calcita sólo si proceden del lavado de las terrazas superiores.
- Todos los lodos residuales generados en el curso bajo se caracterizan por presentar carbonatos (en forma de calcita) con un valor medio para el conjunto del 12%. Esta calcita es fundamentalmente autigénica, formando los cementos de arenas y gravas.
- La presencia de yeso está limitada exclusivamente a un número reducido de residuos de las graveras del curso bajo. Su contenido puede ser significativo si la terraza explotada se encuentra "contaminada" por los abanicos aluviales que erosionan los escarpes yesíferos, que delimitan lateralmente el valle fluvial del Jarama en su curso bajo.

La localización del muestreo en el ciclo de eliminación de los lodos condiciona la relación filosilicatos/ (cuarzo + feldespatos) de los residuos, debido a que existe una relación directa entre los tamaños de grano y la mineralogía global:

- Las muestras recogidas en las balsas de acumulación de lodos tienden a enriquecerse en las partículas de granulometría fina, donde se concentran los filosilicatos.
- Las muestras recogidas en los cauces que unen la planta de lavado con las balsas de acumulación están enriquecidas en arenas y limos, constituidas principalmente por cuarzo y feldespatos.
- Los residuos muestreados en las norias de lavado (residuo "todo uno") concentran sus partículas en las fracciones limoarcillosas, presentando una composición mineralógica global intermedia a la reconocida en los cauces y balsas, si bien muestran mayor semejanza con estas últimas.

El estudio específico de las fracciones limo y arcilla ha permitido establecer una elevada homogeneidad composicional en todo el sistema fluvial del Jarama, tanto en los residuos como en los estériles:

- La fracción 2-20 μm está compuesta por illita, caolinita e indicios de clorita y esmectita. Sólo las terrazas intermedias del curso medio presentan un importante enriquecimiento en caolinita, debido al aporte directo del arroyo de la Galga, que erosiona los potentes paleosuelos caoliníticos Villafranquienses, ubicados en las proximidades de la localidad de Mesones (Guadalajara).
- La asociación mineralógica de la fracción arcilla está formada por montmorillonitas cálcicas, con

illita y caolinita subordinadas, e indicios de clorita e interestratificados illita/esmectita. Las arcillas provenientes del lavado de las terrazas intermedias del curso medio muestran un ligero enriquecimiento en caolinita respecto a la illita.

- Esta homogeneidad en la composición de los residuos indica que el ciclo de eliminación de los lodos no afecta significativamente a la fracción $< 20 \mu\text{m}$, en la que se concentran los filosilicatos. Las diferencias encontradas se deben básicamente a la localización de la terraza explotada por la gravera.

Los estudios tecnológicos realizados a escala de laboratorio sobre veintinueve mezclas de residuos y tres mezclas de estériles, han permitido establecer que tanto los residuos como los estériles presentan unas características composicionales y físico-químicas que permiten su utilización directa como materias primas para la fabricación de productos prensados y extruidos, sin necesidad de incorporar aditivos externos. Sus contenidos en óxidos colorantes (principalmente Fe_2O_3 y TiO_2) favorecen la producción de materiales cerámicos de pasta coloreada. Además, la existencia de residuos con y sin carbonatos, perfectamente diferenciables por su localización geográfica, favorece su aplicación industrial a gran escala.

Tanto los estériles como los residuos se han mostrado como materias primas óptimas para el conformado mediante prensado, mejorando los parámetros medidos en seco al someter la materia prima a una molienda por vía húmeda. El aumento de la fracción arcilla y/o la reducción de la fracción arenosa provoca el incremento de la plasticidad, contracción de secado, resistencia a flexión en seco, densidad en seco y volumen en seco, disminuyendo la relación de compresión.

Los residuos y estériles generados en el curso bajo del río Jarama constituyen materias primas adecuadas para la producción de revestimientos porosos debido a su contenido en carbonatos. Las composiciones óptimas, cocidas en ciclos lentos entre 1.000 y 1.050 °C, son las que presentan las siguientes características:

Carbonatos (8-35%), filosilicatos (45-70%) y cuarzo + feldspatos (10-50%).

Fracción $< 4 \mu\text{m}$ (25-65%), $4-63 \mu\text{m}$ (35-75%) y $> 63 \mu\text{m}$ ($< 25\%$).

Sin embargo, el contenido moderado en materia orgánica limita las posibilidades de aplicación de los residuos y estériles en la producción de revestimientos porosos, en ciclos rápidos de cocción.

Los mejores resultados tecnológicos se han obtenido sobre los productos fabricados mediante extrusión. El comportamiento mostrado por los residuos en fase de moldeo y secado es similar al que presentan las materias primas empleadas en la producción industrial de cerámica estructural. Debido a la homogeneidad composicional de los residuos, en sus fracciones limo y arcilla, el control de la granulometría resulta básico: los mejores

productos cerámicos se han obtenido por la extrusión de composiciones con $< 50\%$ de fracción $< 2 \mu\text{m}$, y con $< 35\%$ de fracción $> 20 \mu\text{m}$, que suponen aproximadamente el 80% en volumen de los residuos generados.

Las distribuciones granulométricas continuas de los residuos favorecen que el efecto de la fracción arcillosa, netamente esmectítica, se vea "amortiguado" por las fracciones no arcillosas ($> 2 \mu\text{m}$), mejorando el empaquetado de las partículas en la fase de moldeo, y la contracción y resistencia a flexión en los productos secos. Los ensayos de cocción han mostrado un elevado número de residuos con muy buenos parámetros tecnológicos, quedando patente el importante efecto de los carbonatos en las pastas cerámicas:

- Los residuos del curso bajo, que contienen carbonatos, muestran una alta estabilidad en su absorción de agua, reducción dimensional, color y resistencia mecánica, para las cocciones comprendidas entre 850 y 1.050 °C. A temperaturas superiores a los 1.100 °C se produce un ennegrecimiento de las piezas y una pérdida importante de resistencia mecánica, aumentando considerablemente las dimensiones internas de los poros.
- Los residuos del curso medio (sin carbonatos) muestran una variación continua de la absorción de agua, resistencia mecánica y color, acelerada a partir de 950 °C con el incremento de la temperatura de cocción. A 1.150 °C presentan un color marrón oscuro, mostrando un avanzado estado de vitrificación, con alta densidad y elevada resistencia a flexión y compresión.

Todos los productos extruidos presentan una elevada resistencia al hielo, cuando se cuecen a temperaturas iguales o superiores a 950 °C. El contenido en sales solubles es mayor en los residuos provenientes del curso bajo, mostrando valores máximos adecuados, similares al de otras materias primas habitualmente empleadas en Europa para la producción de productos extruidos. Además, el desarrollo de eflorescencias en las superficies de los productos se ve favorecido por las muestras de granulometría gruesa, debido a su mayor permeabilidad, manifestándose como eflorescencias medias y más frecuentemente como eflorescencias débiles y nulas. Los residuos generados en el curso bajo del río Jarama exhiben un mejor comportamiento ante la expansión por humedad, debido a su enriquecimiento en carbonatos.

Esta caracterización efectuada a escala de laboratorio se completó con una caracterización a escala semiindustrial, realizada sobre dos composiciones representativas del conjunto estudiado a escala de laboratorio. Así, se recogieron unas 4 toneladas de cada uno de estos dos residuos: residuo CM, del curso medio y residuo CB, del curso bajo, fabricando 4 tipos de ladrillos (perforado, macizo, hueco sencillo y hueco doble) con cada residuo.

Ambos residuos se consideran materias primas aptas para la fabricación de ladrillos a gran escala, cocidos

entre 950 y 1.100 °C. Se ha determinado una muy buena correlación entre los parámetros de moldeo, secado y cocción, medidos en los materiales fabricados en laboratorio, y los parámetros medidos en los productos fabricados a escala semiindustrial. Sin embargo, la optimización de los parámetros dimensionales, de forma y de masa requiere el estudio y desarrollo de unas bocas de extrusión específicas para el conjunto de residuos generados en el río Jarama.

Los ciclos de secado deben ser relativamente lentos, para evitar la formación de grietas y fisuras, especialmente en las piezas de mayor espesor. Los ladrillos perforados y macizos, cuya puesta en obra se destina a edificaciones portadoras de carga, cumplen sobradamente los valores mínimos de resistencia a compresión. Todos

los ladrillos ensayados han mostrado alta resistencia al hielo y no han desarrollado eflorescencias.

Por tanto, el estudio geológico, mineralógico, físico-químico y tecnológico, realizado sobre los estériles y los lodos residuales generados por el lavado de áridos en veintitrés graveras del curso medio y bajo del río Jarama, demuestra que es posible obtener productos cerámicos de calidad, utilizando estos residuos como únicas materias primas. Este hecho se ha comprobado específicamente obteniendo ladrillos a escala semi-industrial que cumplen la normativa europea para este tipo de productos cerámicos estructurales. De este modo, se ha conseguido transformar el enorme volumen de residuos en recursos utilizables como materias primas cerámicas.



La colección de minerales del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia (Escuela de Minas de Madrid)

BENJAMÍN CALVO PÉREZ

Director del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia

INTRODUCCIÓN

El Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia se encuentra en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Pertenece, por tanto, a la Universidad Politécnica de Madrid, y es parte de su patrimonio. Sin embargo, sus fondos y su construcción son muy anteriores a la constitución de dicha Universidad. Sus colecciones de minerales, fósiles, conchas, lámparas de mina, instrumentos antiguos, maquetas mineras y metalúrgicas, y su valiosa biblioteca están vinculados a la enseñanza de la Ingeniería de Minas en España, enseñanza que comienza en Almadén en 1777, y que se traslada a Madrid en 1835.

Como se ve, el Museo no es exclusivamente mineralógico, aunque es más conocido por los ejemplares valiosos y antiguos de sus colecciones de minerales. De hecho, todo el edificio histórico de la Escuela es monumental, y fue declarado monumento histórico artístico de carácter nacional en 1985. Recibió el nombre del Príncipe de Asturias, D. Felipe de Borbón y Grecia, para conmemorar la visita que éste realizó a la Escuela, en 1888, con motivo de la celebración del bicentenario de la muerte del Rey Carlos III, fundador de la Escuela de Minas.

En la actualidad, el Museo tiene acceso libre y gratuito para los que deseen visitarlo, si bien su carácter de "gabinete decimonónico" y sus reducidas dimen-

siones impiden las visitas de grupos de más de 25 o 30 personas. Se llevan a cabo visitas de colegios dos días a la semana, y se abren sus puertas los primeros domingos de cada mes, coincidiendo con las Ferias de Minerales, Fósiles y Gemas que se organizan en la Escuela de Minas. Además de esto, se abre en cualquier momento, previa solicitud telefónica, escrita o personal.

EL EDIFICIO

El edificio histórico que es sede social de la Escuela de Ingenieros de Minas de Madrid desde 1893 se encuentra en la calle Ríos Rosas, 21. Fue construido expresamente para albergar dicha Escuela, que había tenido varias sedes de alquiler, desde su traslado a Madrid en 1835. Es una obra singular del arquitecto Ricardo Velázquez Bosco, autorizada en 1886 y terminada en 1893.

Tiene una concepción clásica y muy racional, pensada minuciosamente por el arquitecto para dar el mejor servicio de docencia teórica y práctica a los escasos alumnos y profesores que constituían la plantilla a finales del siglo XIX. Desde el punto de vista ornamental, es uno de los mejores testimonios de las artes aplicadas, que tanto florecieron en España en esa época: forja, vidrio, madera, estuco, cerámica, entelados, alfombras... Todas las artesanías de la época se dan cita en este notable edi-



ficio, que conserva el sabor clásico de un tiempo ya pasado, combinado con la racionalidad que permite su perfecto aprovechamiento.

El edificio es de planta rectangular, de 48 metros por 33. Su disposición general está constituida por un patio central cubierto, con galerías abiertas, rodeado de una ancha crujía por los cuatro lados. En los cuatro ángulos hay otros tantos pabellones, coronados con torreones, formados por los cruces de las crujías de cada lado, y en el centro de la fachada principal hay un cuerpo avanzado para la entrada y el vestíbulo, sobre el que se encuentra una amplia balconada de piedra.

Las alas oriental y occidental del edificio están ocupadas, respectivamente, por la Biblioteca Histórica, y por el Museo de minerales y fósiles, con disposición simétrica y con ornamentación similar. El patio central y los cuerpos laterales están cubiertos por techos de vidrio incoloro sobre armaduras metálicas, de forma que la luz en estas dependencias es cenital. Esto permite que las fachadas superiores oriental y occidental del edificio no tengan ventanas, lo que fue magistralmente aprovechado por Velázquez Bosco para disponer dos grandes paneles de azulejos, obra de Daniel de Zuloaga, que son muy representativos de la Escuela de Minas y son visibles desde las calles adyacentes. Las cerámicas aluden a las ciencias estudiadas en la carrera de Ingeniero de Minas (Mineralogía, Química, Metalurgia, etc.). También se representan figuras emblemáticas de la historia de la minería española, como Fausto de Elhúyar o Andrés Manuel del Río. El edificio que alberga la Escuela es, en resumen, un edificio muy singular, cuyos valores son poco conocidos incluso por los ingenieros que en él estudiaron.

EL MUSEO DE MINERALES Y FÓSILES

Este museo ocupa el ala oeste en el piso superior del edificio de la Escuela. Consta de una sala principal rectangular, que comunica por cada uno de sus extremos con otras dos salas cuadradas. Éstas corresponden a los dos torreones occidentales del edificio.

La parte sur del museo, es decir la mitad izquierda según se accede desde la galería de la planta superior, se dedica a los minerales. Son éstos el testimonio de la riqueza minera de España y del resto de Europa desde el siglo XVIII y también de la vinculación existente entre la Escuela y las explotaciones, porque gran parte de los minerales expuestos se deben a donaciones o encargos hechos a las principales minas, en explotación a lo largo del siglo XIX (y parcialmente el XX), pero en su mayoría inactivas en la actualidad. Por tanto, los minerales unen a su valor científico indudable, a su rareza o calidad, el valor histórico que les da el haber sido encontrados, regalados y estudiados por ilustres ingenieros que contribuyeron de forma decisiva a la geología y la minería españolas. Este valor histórico prima, a juicio de los gestores del museo, sobre cualquier otra consideración didáctica o estética, por lo que se han tratado de reagrupar colecciones dispersas, y preservar su unidad. No siempre se ha conseguido, porque este criterio

no se ha mantenido a lo largo del tiempo, y en el museo se registran, al menos, dos reenumeraciones. Por tal motivo, algunas valiosas colecciones, como la de Fausto de Elhúyar, se han disgregado y sus ejemplares se han mezclado con los procedentes de otros orígenes.

La ordenación de los minerales sigue, en la actualidad, dos criterios principales. En las vitrinas laterales de la sala central se ordenan, por clases minerales, según la clasificación de Strunz, los minerales más habituales. El criterio es, pues, eminentemente didáctico. Seis de las vitrinas exentas de la sala central se han dedicado a diversos fines a lo largo del tiempo, y aún en la actualidad no tienen una misión museística bien definida. Albergan minerales que siguen aproximadamente la clasificación anterior. Las tres vitrinas exentas centrales se dedican, dos a minerales mexicanos, y otra a una colección recientemente adquirida por generosa donación de doña María Jesús Bielza, esposa del ingeniero de minas Juan Manuel Burriel Barceló. En el torreón sur, en cambio, se ha conservado un criterio esencialmente minero. En sus 10 vitrinas se muestran ejemplares de famosas minas o provincias mineras españolas, hoy inactivas casi todas ellas.

En la galería superior, que hace pocos años se dotó de cajoneras para muestras, se guardan aquellas que no presentan características para ser expuestas, pero que tienen un indudable valor histórico. Así, las colecciones (o lo que se conserva de ellas) del Marqués de Elduayen, de Naranjo y Cía (que se formó por la unión de las colecciones particulares de dos famosos profesores de Mineralogía de la Escuela, Felipe Naranjo y Garza y Policarpo Cía), de don Amalio Gil y Maestre, de Filipinas, etc. También hay una amplia colección de libros de Ciencias Naturales, muchos de ellos antiguos, procedentes de la antigua Cátedra de Paleontología.

LA HISTORIA DE LA COLECCIÓN DE MINERALES

Una de las colecciones más extensas y representativas del Museo, tal vez la más conocida por ser objeto de exposición permanente, es la de los minerales. Se trata, en realidad, de un conjunto de colecciones, de las que algunas conservan su identidad histórica, y otras no, pues fue sacrificada por criterios didácticos o estéticos. Por su antigüedad y por el valor intrínseco de muchas de sus piezas es una de las mejores colecciones de España. Así ha sido reconocido en muchas publicaciones nacionales e internacionales.

Cronológicamente, la primera adquisición de la que se tiene noticia escrita se remonta a 1831. Se sabe que de la Escuela de Almadén, cuando se trasladó a Madrid, se trajeron algunos minerales, y se tiene la convicción de haber encontrado algunos de ellos, basándose en criterios de escritura de etiquetas, etc., pero no se ha encontrado testimonio documental hasta la fecha.

En 1830, los ingenieros destacados a Freiberg pensionados por Fausto de Elhúyar recibieron la orden de comprar una colección de minerales "ilustrativa de sus caracteres externos", es decir, que sirviera para la ense-

ñanza de la Mineralogía. La colección, comprada con fondos de la Dirección General de Minas, constaba de 309 ejemplares, y se conserva el catálogo original, en alemán y en castellano. Se compró al depósito de minerales de la Real Academia de Freiberg.

Hacia la misma fecha, o poco después, la misma Dirección General de Minas compró otra colección de 2.200 ejemplares al doctor Rohatzsh, inspector general médico de las minas de Freiberg y gran aficionado a la Mineralogía. Se ignora la fecha exacta de adquisición, aunque se conservan los catálogos, pero se sabe que por orden de la Dirección General de Minas de 21 de septiembre de 1841, se destinaron siete ejemplares de esta colección a la Escuela de Almadén.

En 1851 la Dirección General compró una nueva colección, compuesta por 1.581 ejemplares, a la viuda de don Ciriaco González Carbajal, Oidor Decano de la Real Audiencia de México. Esta colección fue desembalada y comprobada el día 4 de julio de 1854 por los ingenieros Lorenzo Gómez Pardo y Pedro María Zubiaga.

Se compró una colección de 68 ejemplares, siempre con fondos de la Dirección General de Minas, a la viuda de D. Fausto de Elhúyar, tras solicitud e informes previos de los profesores de Mineralogía y Geognosia (José Amar de la Torre), y de Docimasia y Metalurgia (Lorenzo Gómez Pardo), el día 22 de junio de 1835.

Aunque, por agrupamientos y reidentificaciones posteriores se ha perdido el conocimiento de casi todos los minerales de estas colecciones, se puede afirmar que un magnífico cristal de pirargirita, procedente de la famosa mina de Guadalcanal (Sevilla), perteneció a la colección de Elhúyar, pues está citado y descrito en su catálogo. Es poco probable que existan en el mundo otras muestras de similar calidad, y de la misma procedencia.

El 19 de mayo de 1850 se registró una compra de 70 ejemplares, sin precisar la procedencia. Realizaron la adquisición los ingenieros Lorenzo Gómez Pardo, Joaquín Ezquerro del Bayo e Isidro Sainz de Baranda.

Sumando el contenido de las colecciones adquiridas, puede verse que entre 1830 y 1850 la Dirección General de Minas compró, al menos, 4.228 ejemplares.

El 15 de mayo de 1850, el Encargado de Negocios en Dinamarca regaló al Museo una colección de 90 ejemplares, algunos de gran tamaño. Con igual fecha el Museo Nacional de Copenhague regaló a la Dirección General de Minas otros cinco. De esta colección, por su tamaño y por su descripción, se han podido identificar algunos ejemplares. Por ejemplo, una extraordinaria plata nativa de Kongsberg (Noruega) y un cristal de calcita (espato de Islandia completamente transparente y con caras de cristal, no de exfoliación) de 20 cm de arista, procedente de Islandia.

La Junta de profesores de la Escuela, en su reunión de 23 de mayo de 1859 decidió la creación de un catálogo, en el que se recogieran los ejemplares colocados en los estantes de la Cátedra de Mineralogía. El catálogo (que ya debía de estar hecho) fue realizado y firmado, el día 26 de mayo del mismo año, por el profesor de Mineralogía y Director de la Escuela, don Felipe Naranjo y Garza. Constaba de un primer "estante", en el que se agrupaban

343 ejemplares, dispuestos según los caracteres exteriores, cristalográficos y químicos de los minerales. En los estantes 2 y 3 de la misma Cátedra fueron igualmente ordenados otros 1.006 ejemplares, ordenados por los criterios fisiográficos de la clasificación de Dufrenoy.

El 21 de abril de 1879 se hizo una revisión de las colecciones anteriores por el profesor Ramón Pellico, que anotó los ejemplares que ya entonces faltaban. Estas ordenaciones, tan valiosas desde el punto de vista didáctico, tuvieron, sin embargo, necesariamente, que alterar las numeraciones y mezclar ejemplares de las colecciones almacenadas hasta la fecha.

Por acuerdo unánime de la Junta de Profesores, el día 24 de diciembre de 1859 se compró a Felipe Naranjo, profesor de Mineralogía y Director de la Escuela, su colección particular, que constaba de 701 ejemplares. En 1863 cedió o vendió también su colección otro profesor, Policarpo Cía. En un extenso listado que compuso años después Nicolás Sainz y que titula "Datos para la formación del catálogo de minerales, de los existentes en el Museo de la nueva Escuela de Ingenieros de Minas", se unen los ejemplares de ambas colecciones, y también otros, de la antigua colección de Rohatzsch, y tal vez de otras. Este catálogo lleva unas anotaciones al final, de autor desconocido.

Gran parte de la colección de Felipe Naranjo y de Policarpo Cía se ha podido recuperar, porque Nicolás Sainz tuvo la precaución de acompañar los minerales de esta colección mixta con etiquetas grandes y resistentes, en cartón amarillo muy característico y con buena identificación. En la actualidad se encuentra en el piso superior o balcón del Museo, y no se expone, salvo algunos ejemplares muy destacados. El trabajo de recuperación ha sido costoso e incompleto, porque los minerales que quedaban se hallaban dispersos por todo el Museo y los laboratorios de Mineralogía de la Escuela. Se emplearon para docencia durante décadas, y muchos se perdieron.

En mayo de 1872, la Sociéte de la Nouvelle Montagne regaló al Museo 78 ejemplares. Existe testimonio de que por aquellas fechas se enviaron 93 ejemplares a la Comisión Española en Filadelfia.

La Inspección General de Minas de Filipinas remitió a la Escuela una colección de minerales, rocas, escorias y lingotes de fundición, compuesta por 236 ejemplares, en virtud del decreto del Gobernador General de las Islas, de fecha 8 de julio de 1897. Esta colección ha podido también ser reagrupada en gran parte, por la exótica procedencia de los materiales y también por las espectaculares etiquetas que los acompañan, en las que se aprecia el escudo de España y de las Provincias Filipinas.

El 30 de septiembre de 1897 el profesor y Director de la Escuela Amalio Gil y Maestre hizo una donación de más de 600 ejemplares de minerales y rocas, que también se conservan en su mayor parte, tras largas labores de recuperación.

Una donación fundamental, que se conserva de forma muy aceptable, es la del Marqués de la Ribera, que hacia 1870-1880 regaló al Museo los 2.481 ejemplares de la colección del Marqués de Elduayen. Se ignora la fecha exacta de la donación, pero al ser una colección tan com-

pleta puede colegirse por la existencia de algunos minerales característicos de algunas minas, y por la inexistencia de otros. La colección fue catalogada en 1927, seguramente por el profesor Antonio Baselga. Por el donante se impuso la condición de que sus ejemplares deberían exponerse agrupados, con independencia de los del resto del Museo, y expresando sus orígenes. Esta condición se quebrantó al enviar algunos de sus ejemplares a la Exposición Internacional de Sevilla, en 1929, de donde jamás regresaron. La colección está ordenada según los criterios de Phillips, aunque en algunos puntos se sigue la clasificación de Dana. La gran mayoría de los ejemplares son de pequeño tamaño, muchos cristalizados, y vienen acompañados de curiosas etiquetas, hechas a mano, en las que se detalla el nombre y la descripción en varios idiomas (según el país en el que se encontraba el coleccionista), los índices cristalográficos y otras curiosidades. En 1973 la colección ocupaba dos bellos armarios de cajones que aún se conservan, fabricados sin duda para ese exclusivo fin. Se hallaba en la Cátedra de Mineralogía y muchos de sus ejemplares se empleaban para clase. Ha hecho falta una labor minuciosa de búsqueda, identificación, reclasificación y limpieza, pero hoy la colección se encuentra casi completa en el Museo, se ha hecho una nueva catalogación, aunque respetando la ordenación inicial, se han guardado adecuadamente las etiquetas, que estaban deteriorándose y, aunque no se expone por el pequeño tamaño de sus ejemplares, es una de las joyas del Museo. Es necesario expresar un testimonio de agradecimiento a la esforzada labor del becario Eugenio Andrades Yunta, hoy ingeniero de minas, que en los años 1987-1988 dedicó muchas horas a la recuperación de esta colección.

En 1923, don Adolfo Prieto donó una colección de 204 minerales mexicanos y extranjeros. En mayo del mismo año se comenzó un catálogo provisional de los ejemplares existentes en vitrinas horizontales que, colgadas de la barandilla de la galería que circunda el patio central, mostraban de forma permanente las colecciones a los estudiantes. Algunas de estas vitrinas se conservan todavía en el Departamento de Ingeniería Geológica de la Escuela. El catálogo fue confeccionado por Antonio Baselga y Luis Ferrat, y seguía la ordenación de Lapparent, cuyo libro de Mineralogía servía de texto en aquellos años en la Escuela.

Si se exceptúa la donación de minerales hecha al museo por el profesor Rosso de Luna en los años sesenta, al parecer después de un viaje suyo por África Oriental (Rhodesia, Mozambique), no hay constancia de nuevas adquisiciones a partir de esta fecha, hasta épocas recientes. La guerra civil puso fin a toda actividad, e hizo peligrar, con el traslado de ejemplares, la supervivencia del museo mismo. Afortunadamente, recuperados éstos por la iniciativa de Carlos Muñoz Cabezón, las colecciones permanecen hasta 1984 prácticamente abandonadas y descuidadas. Con la llegada de la nueva dirección al museo, de la que se hace cargo Benjamín Calvo Pérez, profesor de Mineralogía, se inicia en 1984 una política de adquisiciones, no muy numerosas por falta de espacio y de presupuesto, pero que ha conseguido paliar de alguna

forma las graves carencias que se aprecian por cualquier aficionado al visitar las instalaciones. En los últimos veinte años se han adquirido unos 1.700 ejemplares de minerales y unos 300 de fósiles. El criterio ha sido, preferentemente, la adquisición de ejemplares españoles e iberoamericanos, o bien aquellos que por sus especiales condiciones fueran adecuados para la docencia. Al no disponer de una ordenación completa de los minerales cuando se inició la compra de los nuevos, se comenzó la nueva numeración en el número 5.000, pues se comprobó que ninguno de los existentes alcanzaba esta cifra.

Además de los minerales comprados, en los últimos tiempos merecen especial mención dos donaciones que han enriquecido el patrimonio museístico de minerales y fósiles. La primera, documentada en el año 2000, se debe a la generosidad de Doña María Jesús Bielza, esposa del ingeniero de minas Juan Manuel Burriel Barceló. La colección de este infatigable coleccionista, que ha sido regalada íntegramente a la Escuela, consta de 989 ejemplares, principalmente españoles, algunos de los cuales se exponen en una de las vitrinas centrales del museo. La otra donación corresponde a don Santiago Jiménez García, y tuvo lugar también en el año 2000. Se trata de una completa muestra de minerales de la Comunidad de Madrid, que durante muchos años formó parte de la colección itinerante de Iberdrola. En total tiene unos 200 ejemplares, y tiene un singular valor didáctico, al que se une la espectacularidad de muchos de los ejemplares. También es previsible un futuro valor histórico porque, como bien saben los aficionados madrileños, es cada vez más difícil encontrar muestras minerales interesantes en la provincia. El desarrollo urbanístico y la rapacidad científica la han dejado esquilmada.

La base de datos con la colección completa de los minerales inventariados puede consultarse en la página web de la Escuela de Minas (www.minas.upm.es).

LA SALA CENTRAL: ORDENACIÓN ACTUAL Y MINERALES PRINCIPALES

Las vitrinas perimetrales guardan minerales extranjeros, y también algunos españoles, dispuestos según la clasificación internacional de Strunz, que hoy es la más usada en museos y colecciones públicas. Destacan por su calidad o por la rareza de su procedencia algunos ejemplares de oro nativo de Transilvania y de Filipinas, algunas platas nativas de México, dos ejemplares de arsénico de Andreasberg (Alemania), un azufre de Agrigento (Sicilia, Italia), una tetraedrita de Kavnic (Rumania), tres manganitas de Ilfeld (Sajonia, Alemania), un ejemplar de dolomita con calcopirita de Eugui (Navarra, España), algunas crocoítas de los Urales (Rusia), varios ejemplares de clinomimetita de Johanngeorgenstadt (Alemania), grandes cristales de apatito de Canadá y Brasil, un excelente grupo de cristales de hübnerrita sobre cuarzo, procedente de la mina Pasto Bueno, en Ancash (Perú), y algunos silicatos, tales como berilo aguamarina y topacio de los Urales, granate almandino de Alaska, kornerupina de Groenlandia, turmalina rubelita de Mozambique, etc.

Los minerales de la sílice (cuarzo y sus variedades, cristobalita, ópalo...) se sitúan al final de los silicatos, primando así sus características estructurales sobre su composición, que aconsejaría ubicarlos entre los óxidos. Hay algunos ejemplares notables, ahumados, de la desaparecida Cueva del Cristal, en La Cabrera (Madrid), y una gran variedad de jaspes y calcedonias, algunas procedentes de la localidad clásica de Idar Oberstein (Alemania).

En las vitrinas exentas que constituyen las filas laterales (seis en total), se guardan minerales extranjeros y españoles que siguen la misma ordenación que las vitrinas adosadas a las paredes. Son, en general, minerales de menor valor, aunque se deben destacar algunos muy significativos. Por ejemplo, un ejemplar de turmalina negra (chorlo) de Brasil, con prismas que se abren de forma capilar, dando al conjunto una apariencia de mechones de cabello, y una "gigantolita", espectacular cristal pseudo hexagonal de cordierita pinnitizada.

Por último, las tres vitrinas exentas que se sitúan en el centro izquierda de la sala se han reservado, dos de ellas para algunos minerales mexicanos, y una para los mejores ejemplares de la colección de Burriel. Entre los minerales de México cabe destacar la presencia de un cristal de yeso espectacular, y de varios cuarzos amatisa de la clásica mina La Valenciana, de Guanajuato, algunas de ellas asociadas con la variedad de ortoclasa conocida como "valencianita".

Los minerales más valiosos de la sala central, aunque no sean los más espectaculares, son los de las primeras colecciones, ya que pertenecen a yacimientos centro europeos agotados. Están dignamente representadas las paragénesis de Freiberg, Altenberg, Ilfeld, Johanngeorgenstadt, Chessy, Harz, los Urales y otras localidades históricas. También se conservan en esta sala los valiosos ejemplares mexicanos pertenecientes a la colección del Oidor General de la Real Audiencia, González Carbajal, y de Prieto. No es fácil saber qué ejemplar corresponde a cada una de las colecciones, pero en conjunto constituyen una interesante representación de minerales mexicanos, a los que se unen algunos de reciente adquisición.

Aunque no se han citado como ejemplares individuales, hay una buena colección de calcitas, baritinas y fluoritas europeas, de localidades clásicas (Freiberg, Harz, Derbyshire, etc.).

LOS MINERALES ESPAÑOLES

Aunque algunos ejemplares se encuentran en la sala central, la mayor parte de los minerales españoles se han concentrado en el torreón Sur, esto es, el que se encuentra a la izquierda según se accede al museo. En su conjunto, son lo mejor y más representativo de la colección de minerales del Museo Histórico Minero Don Felipe de Borbón y Grecia. Se ha tratado de dar a toda la ordenación un carácter didáctico. Para ello se han separado los minerales por procedencias, tratando de identificar los distritos mineros españoles más clásicos, o bien aquéllos de los que se disponía de mejores ejemplares. Se han adquirido muchos ejemplares nuevos, y se han

dispuesto en las vitrinas carteles con explicaciones de las paragénesis, la geología local, las denominaciones mineras más habituales, la historia de las explotaciones y algunas otras curiosidades que complementan la mera observación de los ejemplares, si bien algunos de ellos son muy valiosos, e incluso únicos. El trabajo de selección y ordenación de las muestras, así como los textos de los carteles ilustrativos y didácticos, se debe al becario Manuel Arlandi Rodríguez, que llevó a cabo esta magnífica labor entre los años 1993-1994.

Los distritos o provincias mineras representados son los siguientes:

• Las minas de mercurio de Almadén

Almadén, Almadenejos, Las Cuevas, El Entredicho, La Concepción... son localidades clásicas, las más ricas del mundo en mercurio. Esta provincia metalogénica excepcional, tan importante en la historia de la minería y causa de la creación de la Escuela de Minas, ocupa el lugar central en el torreón dedicado a los yacimientos españoles. El yacimiento de Almadén se encuentra en el extremo suroeste de la provincia de Ciudad Real, a unos 300 km al sur de Madrid. Geológicamente, es un yacimiento de tipo volcánico-sedimentario exhalativo, formado por exhalación de disoluciones hidrotermales en ambiente marino, que se encuentra en el borde sur de la Zona Centro-Ibérica, en el llamado Sinclinorio de Almadén, formado por materiales precámbricos, ordovícicos, silúricos y devónicos, afectados por metamorfismo regional de bajo grado.

Conocidas, al menos, desde la época romana, citadas por Vitrubio como explotadas desde época anterior, comentadas por Plinio, explotadas por árabes y cristianos, por banqueros alemanes y por la Hacienda española, casi sin interrupción hasta nuestros días, las minas de Almadén son emblemáticas en la minería española. En la vitrina se muestran, además de textos explicativos de la geología, los sistemas de explotación y beneficio del mercurio, la paragénesis y otros datos, excelentes agregados de cristales de **cinabrio**, **baritinas** cristalizadas llenas de microcristales de cinabrio, excepcionales cristales de **calomelano**, un ejemplar muy bueno de **bournonita**, "gorrones" de pirita, etc.

• Las minas argentíferas de Hiendelaencina (Gualajara)

Intencionadamente se ha dedicado a estas minas la primera vitrina, la más ostensible al entrar en la sala. El yacimiento de Hiendelaencina, descubierto por Pedro Esteban Górriz en 1844 y explotado, con altibajos de fortuna, hasta 1914, puede considerarse uno de los más ricos del mundo, y depositario, además, de especies minerales muy poco comunes, alguna de las cuales (freieslebenita) era muy poco conocida hasta el descubrimiento de estos yacimientos, y sólo en ellos se encuentra en cantidades apreciables.

El yacimiento se encuentra en el límite este del Sistema Central, en el denominado Anticlinorio de Hiendelaencina, constituido por gneises y migmatitas porfiroides de edad preordovícica. Es un yacimiento epitermal de plata relacionado con vulcanismo andesítico tardi-

hercínico. La mineralización se localiza en dos sistemas de filones, de los que el "Filón Rico" se ha hecho famoso. Las minas más famosas fueron "Verdad de los Artistas" y "Santa Cecilia".

En la vitrina se muestran algunos de los mejores ejemplares del mundo de **freieslebenita** (un sulfoantimoniuro de plomo y plata), además de **pirargiritas** excepcionales, **plata nativa**, stephanita, alguna embolita, una muestra de tetraedrita argentífera (freibergita), una bournonita y fluoritas de La Bodera.

• **La provincia de plomo y cinc de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia)**

Entre el Mediterráneo y la llanura del Mar Menor, al este de la ciudad de Cartagena, se alza la sierra de igual nombre, conformada por relieves que no superan los 450 metros. Estos cerros han sido testigos de una febril actividad minera, que se remonta a los tiempos prerromanos. Geológicamente, la Sierra de Cartagena se localiza en la zona interna de las Cordilleras Béticas. Está constituida por una serie de mantos de cabalgamiento superpuestos, de edad alpina, afectados por un metamorfismo decreciente de abajo hacia arriba. Este edificio de mantos, tras una fase de erosión, fue recubierto por una serie sedimentaria neógena transgresiva. Tras el Neógeno, hay una importante fase de fracturación, seguida de vulcanismo y levantamiento de la Sierra. Las mineralizaciones se relacionan genéticamente con la actividad volcánica neógena, y se localizan en el norte de la Sierra, en cerros llamados localmente "cabezos".

A esta región minera, excepcional por su riqueza y por su historia, se han dedicado las tres vitrinas exentas restantes en la sala. Explotada desde tiempo de los cartagineses, hace 2.500 años, estratégica en muchos períodos de la historia, protagonista del desarrollo industrial de la zona Sureste de España durante la segunda mitad del siglo XIX y primera mitad del XX, la Sierra de Cartagena ha suministrado, además, desde el punto de vista mineralógico, una paragénesis muy extensa de sulfuros polimetálicos y minerales de montera (minerales de plata-plomo-cinc-hierro-manganeso-estaño y otros metales), con gangas muy valoradas también por la belleza de sus cristalizaciones. La paragénesis comprende más de 100 especies, de las que sólo se dispone de algunas, aunque en ejemplares muy valiosos. En la vitrina pueden verse ejemplares extraordinarios de **anglesita** y **cerusita**, y otros interesantes de galena, esfalerita, pirolusita, pirrotina, marcasita, ludlamita, vivianita, baritina, calcita, yeso, cuarzo amatista, calcedonia y otros minerales.

• **La faja pirítica-manganesífera del Suroeste de España (Río Tinto, Tharsis...)**

Esta extensa provincia metalogénica de sulfuros masivos polimetálicos se extiende desde Sevilla (Aznalcóllar) hasta Portugal (San Domingos, Lousal, Arinteiro...). En ella se encuentran algunas de las más famosas minas del mundo (Río Tinto, Tharsis, Herrerías..), explotadas desde tiempos muy antiguos, y de cuyas monteras ferruginosas extraían los romanos el oro y la plata.

La Faja Pirítica forma parte de la zona sur-portuguesa, situada en el sur del Macizo Hercínico. Está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas del Paleozoico Superior (Devónico y Carbonífero), entre las que se encuentran grandes masas de sulfuros masivos, de origen exhalativo sedimentario marino. Muchos yacimientos muestran monteras ferruginosas de oxidación, con la presencia de minerales nativos y oxidados (oro, plata, cobre, cuprita, acantita, hematites, malaquita, azurita, etc.).

Hoy casi todas las minas se encuentran inactivas, pero desde las antiguas explotaciones inglesas del siglo XIX se conservan en el museo algunos ejemplares notables de **cobre nativo** y de goethita irisada, así como algunos ejemplares de menas de manganeso (pirolusita, rodocrosita, rodonita...) procedentes de localidades cercanas, en las que se explotó en la primera mitad del siglo XX. También algunos sulfatos raros, adquiridos recientemente (voltaíta, coquimbita, melanterita, calcantita...).

• **La provincia argentífera de Almería (Sierra Almagrera)**

La Sierra Almagrera es una pequeña alineación montañosa de escasa altitud, que se sitúa en el extremo noroeste de la provincia de Almería, entre el valle del río Almanzora, el Mar Mediterráneo y la provincia de Murcia. Los núcleos de población más cercanos son los pueblos de Herrerías, El Ardeal y Villaricos.

En el pasado se explotaron filones de plomo, plata, cinc y cobre en las zonas de Barranco Jaroso y Barranco del Francés, así como niveles ferruginosos de hierro y plata próximos a la localidad de Herrerías.

Geológicamente, la Sierra Almagrera forma parte de la zona interna de las Cordilleras Béticas. Es una antiforma de dirección NE-SO que unos autores asignan al Complejo Alpujárride y otros al Nevado-Filábride. Los materiales son micaesquistos y micacitas grafitosas. Las mineralizaciones son epitermales polimetálicas, relacionadas con vulcanismo de edad terciaria. Hay una importante alteración hidrotermal en la roca de caja.

En la vitrina que se ha dedicado a esta provincia metalogénica se encuentran minerales emblemáticos y de gran calidad, como las **platas nativas esponjosas** de Herrerías, las galenas antimoniales de curiosa cristalización que se conocen con el nombre de **quiroguita**, en honor del famoso mineralogista Quiroga, algún ejemplar de jarosita, platas nativas fibrosas y dendríticas, etc.

La quiroguita es una galena que cristaliza en forma de octaedros alargados con los vértices truncados, lo que le da un hábito tetragonal. Esta particular forma de cristalizar, y su composición rica en antimonio, indujeron a su descubridor, Fernández Navarro, en 1895, a considerar que se trataba de una nueva especie mineral. Habitualmente se presenta acompañada de agujitas de anglesita. Se han encontrado sobre todo en las minas San Andrés, Georgiana y Paraíso.

• **La provincia cincífera del Norte de España (Reocín, Áliva, Comillas, La Troya...)**

La provincia metalogénica cincífera del norte de España es la más importante de la Península Ibérica, por

Los minerales de la sílice (cuarzo y sus variedades, cristobalita, ópalo...) se sitúan al final de los silicatos, primando así sus características estructurales sobre su composición, que aconsejaría ubicarlos entre los óxidos. Hay algunos ejemplares notables, ahumados, de la desaparecida Cueva del Cristal, en La Cabrera (Madrid), y una gran variedad de jaspes y calcedonias, algunas procedentes de la localidad clásica de Idar Oberstein (Alemania).

En las vitrinas exentas que constituyen las filas laterales (seis en total), se guardan minerales extranjeros y españoles que siguen la misma ordenación que las vitrinas adosadas a las paredes. Son, en general, minerales de menor valor, aunque se deben destacar algunos muy significativos. Por ejemplo, un ejemplar de turmalina negra (chorlo) de Brasil, con prismas que se abren de forma capilar, dando al conjunto una apariencia de mechones de cabello, y una "gigantolita", espectacular cristal pseudo-hexagonal de cordierita pinnitizada.

Por último, las tres vitrinas exentas que se sitúan en el centro izquierda de la sala se han reservado, dos de ellas para algunos minerales mexicanos, y una para los mejores ejemplares de la colección de Burriel. Entre los minerales de México cabe destacar la presencia de un cristal de yeso espectacular, y de varios cuarzos amatisa de la clásica mina La Valenciana, de Guanajuato, algunas de ellas asociadas con la variedad de ortoclasa conocida como "valencianita".

Los minerales más valiosos de la sala central, aunque no sean los más espectaculares, son los de las primeras colecciones, ya que pertenecen a yacimientos centroeuropeos agotados. Están dignamente representadas las paragénesis de Freiberg, Altenberg, Ilfeld, Johanngeorgenstadt, Chessy, Harz, los Urales y otras localidades históricas. También se conservan en esta sala los valiosos ejemplares mexicanos pertenecientes a la colección del Oidor General de la Real Audiencia, González Carbajal, y de Prieto. No es fácil saber qué ejemplar corresponde a cada una de las colecciones, pero en conjunto constituyen una interesante representación de minerales mexicanos, a los que se unen algunos de reciente adquisición.

Aunque no se han citado como ejemplares individuales, hay una buena colección de calcitas, baritinas y fluoritas europeas, de localidades clásicas (Freiberg, Harz, Derbyshire, etc.).

LOS MINERALES ESPAÑOLES

Aunque algunos ejemplares se encuentran en la sala central, la mayor parte de los minerales españoles se han concentrado en el torreón Sur, esto es, el que se encuentra a la izquierda según se accede al museo. En su conjunto, son lo mejor y más representativo de la colección de minerales del Museo Histórico Minero Don Felipe de Borbón y Grecia. Se ha tratado de dar a toda la ordenación un carácter didáctico. Para ello se han separado los minerales por procedencias, tratando de identificar los distritos mineros españoles más clásicos, o bien aquéllos de los que se disponía de mejores ejemplares. Se han adquirido muchos ejemplares nuevos, y se han

dispuesto en las vitrinas carteles con explicaciones de las paragénesis, la geología local, las denominaciones mineras más habituales, la historia de las explotaciones y algunas otras curiosidades que complementan la mera observación de los ejemplares, si bien algunos de ellos son muy valiosos, e incluso únicos. El trabajo de selección y ordenación de las muestras, así como los textos de los carteles ilustrativos y didácticos, se debe al becario Manuel Arlandi Rodríguez, que llevó a cabo esta magnífica labor entre los años 1993-1994.

Los distritos o provincias mineras representados son los siguientes:

• Las minas de mercurio de Almadén

Almadén, Almadenejos, Las Cuevas, El Entredicho, La Concepción... son localidades clásicas, las más ricas del mundo en mercurio. Esta provincia metalogénica excepcional, tan importante en la historia de la minería y causa de la creación de la Escuela de Minas, ocupa el lugar central en el torreón dedicado a los yacimientos españoles. El yacimiento de Almadén se encuentra en el extremo suroeste de la provincia de Ciudad Real, a unos 300 km al sur de Madrid. Geológicamente, es un yacimiento de tipo volcánico-sedimentario exhalativo, formado por exhalación de disoluciones hidrotermales en ambiente marino, que se encuentra en el borde sur de la Zona Centro-Ibérica, en el llamado Sinclinorio de Almadén, formado por materiales precámbricos, ordovícicos, silúricos y devónicos, afectados por metamorfismo regional de bajo grado.

Conocidas, al menos, desde la época romana, citadas por Vitrubio como explotadas desde época anterior, comentadas por Plinio, explotadas por árabes y cristianos, por banqueros alemanes y por la Hacienda española, casi sin interrupción hasta nuestros días, las minas de Almadén son emblemáticas en la minería española. En la vitrina se muestran, además de textos explicativos de la geología, los sistemas de explotación y beneficio del mercurio, la paragénesis y otros datos, excelentes agregados de cristales de **cinabrio**, **baritinas** cristalizadas llenas de microcristales de cinabrio, excepcionales cristales de **calomelano**, un ejemplar muy bueno de **bournonita**, "gorrones" de piritita, etc.

• Las minas argentíferas de Hiendelaencina (Gualajara)

Intencionadamente se ha dedicado a estas minas la primera vitrina, la más ostensible al entrar en la sala. El yacimiento de Hiendelaencina, descubierto por Pedro Esteban Górriz en 1844 y explotado, con altibajos de fortuna, hasta 1914, puede considerarse uno de los más ricos del mundo, y depositario, además, de especies minerales muy poco comunes, alguna de las cuales (freieslebenita) era muy poco conocida hasta el descubrimiento de estos yacimientos, y sólo en ellos se encuentra en cantidades apreciables.

El yacimiento se encuentra en el límite este del Sistema Central, en el denominado Anticlinorio de Hiendelaencina, constituido por gneises y migmatitas porfiroides de edad preordovícica. Es un yacimiento epitermal de plata relacionado con vulcanismo andesítico tardi-

hercínico. La mineralización se localiza en dos sistemas de filones, de los que el "Filón Rico" se ha hecho famoso. Las minas más famosas fueron "Verdad de los Artistas" y "Santa Cecilia".

En la vitrina se muestran algunos de los mejores ejemplares del mundo de **freieslebenita** (un sulfoantimoniuro de plomo y plata), además de **pirargiritas** excepcionales, **plata nativa**, stephanita, alguna embolita, una muestra de tetraedrita argentífera (freibergita), una bourmonita y fluoritas de La Bodera.

• **La provincia de plomo y cinc de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia)**

Entre el Mediterráneo y la llanura del Mar Menor, al este de la ciudad de Cartagena, se alza la sierra de igual nombre, conformada por relieves que no superan los 450 metros. Estos cerros han sido testigos de una febril actividad minera, que se remonta a los tiempos prerromanos. Geológicamente, la Sierra de Cartagena se localiza en la zona interna de las Cordilleras Béticas. Está constituida por una serie de mantos de cabalgamiento superpuestos, de edad alpina, afectados por un metamorfismo decreciente de abajo hacia arriba. Este edificio de mantos, tras una fase de erosión, fue recubierto por una serie sedimentaria neógena transgresiva. Tras el Neógeno, hay una importante fase de fracturación, seguida de vulcanismo y levantamiento de la Sierra. Las mineralizaciones se relacionan genéticamente con la actividad volcánica neógena, y se localizan en el norte de la Sierra, en cerros llamados localmente "cabezos".

A esta región minera, excepcional por su riqueza y por su historia, se han dedicado las tres vitrinas exentas restantes en la sala. Explotada desde tiempo de los cartagineses, hace 2.500 años, estratégica en muchos períodos de la historia, protagonista del desarrollo industrial de la zona Sureste de España durante la segunda mitad del siglo XIX y primera mitad del XX, la Sierra de Cartagena ha suministrado, además, desde el punto de vista mineralógico, una paragénesis muy extensa de sulfuros polimetálicos y minerales de montera (minerales de plata-plomo-cinc-hierro-manganeso-estaño y otros metales), con gangas muy valoradas también por la belleza de sus cristalizaciones. La paragénesis comprende más de 100 especies, de las que sólo se dispone de algunas, aunque en ejemplares muy valiosos. En la vitrina pueden verse ejemplares extraordinarios de **anglesita** y **cerusita**, y otros interesantes de galena, esfalerita, pirolusita, pirrotina, marcasita, ludlamita, vivianita, baritina, calcita, yeso, cuarzo amatista, calcedonia y otros minerales.

• **La faja pirítica-manganesífera del Suroeste de España (Río Tinto, Tharsis...)**

Esta extensa provincia metalogénica de sulfuros masivos polimetálicos se extiende desde Sevilla (Aznalcóllar) hasta Portugal (San Domingos, Lousal, Arinteiro...). En ella se encuentran algunas de las más famosas minas del mundo (Río Tinto, Tharsis, Herrerías..), explotadas desde tiempos muy antiguos, y de cuyas monteras ferruginosas extraían los romanos el oro y la plata.

La Faja Pirítica forma parte de la zona sur-portuguesa, situada en el sur del Macizo Hercínico. Está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas del Paleozoico Superior (Devónico y Carbonífero), entre las que se encuentran grandes masas de sulfuros masivos, de origen exhalativo sedimentario marino. Muchos yacimientos muestran monteras ferruginosas de oxidación, con la presencia de minerales nativos y oxidados (oro, plata, cobre, cuprita, acantita, hematites, malaquita, azurita, etc.).

Hoy casi todas las minas se encuentran inactivas, pero desde las antiguas explotaciones inglesas del siglo XIX se conservan en el museo algunos ejemplares notables de **cobre nativo** y de goethita irisada, así como algunos ejemplares de menas de manganeso (pirolusita, rodocrosita, rodonita...) procedentes de localidades cercanas, en las que se explotó en la primera mitad del siglo XX. También algunos sulfatos raros, adquiridos recientemente (voltaíta, coquimbita, melanterita, calcantita...).

• **La provincia argentífera de Almería (Sierra Almagrera)**

La Sierra Almagrera es una pequeña alineación montañosa de escasa altitud, que se sitúa en el extremo noreste de la provincia de Almería, entre el valle del río Almanzora, el Mar Mediterráneo y la provincia de Murcia. Los núcleos de población más cercanos son los pueblos de Herrerías, El Arteal y Villaricos.

En el pasado se explotaron filones de plomo, plata, cinc y cobre en las zonas de Barranco Jaroso y Barranco del Francés, así como niveles ferruginosos de hierro y plata próximos a la localidad de Herrerías.

Geológicamente, la Sierra Almagrera forma parte de la zona interna de las Cordilleras Béticas. Es una anti-forma de dirección NE-SO que unos autores asignan al Complejo Alpujarride y otros al Nevado-Filábride. Los materiales son micaesquistos y micacitas grafitosas. Las mineralizaciones son epitermales polimetálicas, relacionadas con vulcanismo de edad terciaria. Hay una importante alteración hidrotermal en la roca de caja.

En la vitrina que se ha dedicado a esta provincia metalogénica se encuentran minerales emblemáticos y de gran calidad, como las **platas nativas esponjosas** de Herrerías, las galenas antimoniales de curiosa cristalización que se conocen con el nombre de **quiroguita**, en honor del famoso mineralogista Quiroga, algún ejemplar de jarosita, platas nativas fibrosas y dendríticas, etc.

La quiroguita es una galena que cristaliza en forma de octaedros alargados con los vértices truncados, lo que le da un hábito tetragonal. Esta particular forma de cristalizar, y su composición rica en antimonio, indujeron a su descubridor, Fernández Navarro, en 1895, a considerar que se trataba de una nueva especie mineral. Habitualmente se presenta acompañada de agujitas de anglesita. Se han encontrado sobre todo en las minas San Andrés, Georgiana y Paraíso.

• **La provincia cincífera del Norte de España (Reocín, Áliva, Comillas, La Troya...)**

La provincia metalogénica cincífera del norte de España es la más importante de la Península Ibérica, por

lo que respecta a este metal. Forma una banda paralela a la costa cantábrica, que se extiende desde Navarra hasta Lugo. Los yacimientos más importantes se localizan en Cantabria. Las mineralizaciones se asocian a paquetes de carbonatos cretácicos, de tipo arrecifal, que han sufrido un proceso de dolomitización, por lo que son frecuentes las cavidades kársticas y las sustituciones y rellenos por sulfuros.

La gran mina de Reocín fue descubierta en 1856 por J. Van der Heyden Hauzeur, ingeniero de minas belga, y se ha trabajado de forma ininterrumpida desde aquel año. En sus comienzos se explotaron las calaminas de las zonas de montera, que llegaron a tener hasta un 50% de cinc. A principios del siglo XX se alcanzó la base de la montera, comenzándose por entonces a explotar los sulfuros. Está situada en el flanco sureste del sinclinal de Santillana. En la mineralización predominan la esfalerita, galena y marcasita, aunque es mucho más abundante la primera.

Las minas de Áliva se encuentran también en Cantabria, en los Picos de Europa, y son famosas por la esfalerita acaramelada que se extraía en ellas. El mineral (blenda acaramelada) se presenta en forma de cristales y masas exfoliables, y por sus bellos colores, alto brillo y transparencia muchos ejemplares tienen alto valor gemológico. El yacimiento fue descubierto en 1859, y ha permanecido en explotación de forma discontinua, hasta que en 1990 se cerró definitivamente, clausurándose la entrada, por lo que es imposible conseguir nuevos ejemplares.

En la vitrina dedicada a la provincia cincífera del norte de España se encuentran magníficos ejemplares de **esfalerita acaramelada** de Áliva y La Troya, algunos bien cristalizados, **calaminas** (nombre minero de la mezcla de smithsonita, hidrocincita y hemimorfita) de Reocín, Comillas y Udías, marcasitas con los clásicos agregados "en cresta de gallo" y esfaleritas zonadas de Reocín, un ejemplar espectacular de pirita y otros minerales.

• Los yacimientos de fluorita de Asturias (Solís, Caravia, Berbes, La Collada...)

Los principales yacimientos de fluorita asturianos (Caravia, Villabona y Berbes) se relacionan regionalmente con la discordancia existente entre el zócalo paleozoico y la cobertera permotriásica. Otros yacimientos de menor rango van asociados a rocas paleozoicas (Aramo, Campo del Raso, etc.). Pueden considerarse como mineralizaciones epitermales o diagenéticas tardías, de paragénesis pobres de sulfuros y sulfosales. Los yacimientos encajan en rocas de alta permeabilidad, que fueron mineralizadas por soluciones hidrotermales, que ascendieron a lo largo de fallas y fracturas desde zonas profundas. La morfología de los yacimientos puede ser tanto filonina como estratoligada.

Existen preciosas cristalizaciones de **fluorita**, asociadas en ocasiones a bellas **calcitas**, **baritinas** y **cuarzos**. En la vitrina pueden verse agrupaciones de cristales de fluorita de las localidades más famosas, de diversos colores y formas cristalográficas.

• Los minerales de Madrid (Montejo, Horcajo, Prádena, Bustarviejo...)

Madrid es una provincia que, aunque reducida en extensión, presenta casi todos los grandes tipos de rocas: ígneas, metamórficas, migmatíticas y filonianas en el norte y oeste, en la Sierra de Guadarrama. Sedimentarias detríticas (arcosas, conglomerados, arenas...) en la zona central, como productos de la erosión y transporte de los materiales de la Sierra, y lutitas, yesos y sales en el sur, que son los restos de la sedimentación y precipitación de materiales en un antiguo lago, correspondiendo más o menos con lo que hoy conocemos como Valle del Tajo.

En esta geología tan variada se encuentran numerosos minerales interesantes, de los que se guarda testimonio en una vitrina del torreón sur, además de otras vitrinas situadas fuera del museo. Corresponden éstas a la reciente donación de D. Santiago Jiménez García, a la que ya se ha aludido.

La mayor parte de los minerales expuestos pertenecen a la Sierra. Son **cuarzos** hialinos y ahumados de Prádena, La Cabrera o El Cardoso, **sillimanita**, **cianita**, **andalucita**, **estaurolita** y **granate** de Montejo, Horcajo, Horcajuelo y Prádena del Rincón, grandes cristales de **ortosa** de Bustarviejo, etc. De la zona sur se pueden ver curiosas calcedonias que seudomorfizan cristales cúbicos, en forma de tolva, de halita. También glauberita y thenardita de Villarrubia de Santiago, y sepiolita de Vicálvaro.

• Los minerales de plomo-plata ligados al batolito de Los Pedroches (Ciudad Real, Jaén, Badajoz, Córdoba)

El batolito de Los Pedroches es una extensa región de afloramientos graníticos que se extiende por el Sur de Ciudad Real y Badajoz, y norte de Jaén, Córdoba y Sevilla. En relación genética con él se han explotado históricamente yacimientos de plomo, plata, bismuto, níquel, cobre y otros metales, con una riqueza muy notable, sobre todo en plomo y plata.

En el museo de minerales se han dedicado dos vitrinas a muestras de estos yacimientos, una con piezas muy singulares por su rareza, otra con ejemplares más comunes, en la que se muestran galenas del distrito minero de Linares y La Carolina, destacables sin embargo por su cristalización o por otras razones.

Una de las vitrinas, como se ha dicho, se ha dedicado monográficamente a las galenas y minerales asociados de Linares y La Carolina. Se muestran ejemplares notables de Santa Elena, El Centenillo y otras minas, destacando algunos espejos de falla en galena y una magnífica muestra de este mineral asociado con siderita, en una agrupación de cristales que simula una acumulación de monedas.

La segunda vitrina se ha dedicado a los minerales de plomo y plata de minas históricas, como El Borracho o El Horcajo. Esta última mina, situada en el borde sur de la provincia de Ciudad, lindando con Córdoba, tuvo gran fama por la cantidad y calidad de minerales secundarios de plomo (sobre todo **piromorfita**), que se obtuvieron en ella. Aunque la explotación principal de es-

tas ricas minas tuvo lugar en el siglo XIX y principios del XX, al construirse hace una década la línea del tren de alta velocidad (AVE) Madrid-Sevilla se afectaron antiguas escombreras, y se descubrieron algunas muestras interesantes de mineral. Las muestras excepcionales de pirromorfita que se pueden ver en la vitrina correspondiente fueron traídas a la Escuela en el siglo XIX.

En la famosa mina El Borracho se encontraron cristales de **cerusita** de gran belleza, asociados a moldes negativos, en piritita, de primitivos cristales, que por su forma parecen ser de baritina o calcita. El conjunto es espectacular, y existen varias muestras muy notables de cerusita sobre piritita, que merecen destacarse. Igualmente hay muestras valiosas de **plata nativa**, galena y anglesita.

• **Los minerales de plata-bismuto-níquel de Córdoba-Sevilla-Huelva**

Guardando relación genética también con el batolito de Los Pedroches, se encuentran en diversas zonas de Sevilla y Córdoba diversas minas históricas, en las que se han explotado ricas mineralizaciones filonianas de plata, bismuto, cobalto, etc. Más al sur, en el norte de la provincia de Huelva y sur de la de Badajoz, se encuentra otra provincia metalogénica distinta, caracterizada por la abundancia de yacimientos de tipo *skarn*, con magnetita, calcopirita, vonsenita, skutterudita y otros minerales de hierro, cobalto y níquel. Son bien conocidas las minas de Cala (Huelva), y Monchi, El Colmenar, La Judía, San Guillermo o Santa Justa, de Burguillos del Cerro (Badajoz), explotadas hasta épocas relativamente recientes.

En una vitrina adosada a la pared de la sala sur que se está comentando pueden verse ejemplares de la mina de plata de Guadalcanal, de bismuto de la Espuela de San Miguel, de hierro y níquel de Cala (Huelva), etc. La antigua mina de Guadalcanal, situada en el extremo norte de la provincia de Sevilla, es un yacimiento muy singular. La mineralización estuvo constituida principalmente por plata nativa, miargirita, stephanita y pirargirita, y se restringía principalmente al llamado "Pozo Rico". Al parecer consistía en un filón de 0,5 m de potencia con una ley media de 10 kg de plata por tonelada, que llegó a proporcionar a mediados del siglo XVI casi 70.000 kg de plata. La famosa mina, explotada de forma intermitente entre 1555 y 1778, perteneció a la Corona Española, fue la primera reserva del Estado (1559-1576), tuvo graves problemas de inundaciones (1570), fue después cedida a los banqueros alemanes Fugger (1632), y a empresas suecas (1725) y francesas (1768). A partir de 1778 sufrió varios intentos de explotación, pero fue definitivamente abandonada a mediados del siglo XIX. Quedan poquísimos ejemplares de esta histórica mina, y uno de los mejores, perteneciente a la colección de Fausto de Elhúyar, se encuentran en esta vitrina.

También se puede ver en esta vitrina un ejemplar de **niquelina**, extraordinario por su tamaño, encontrado en la mina La Granjuela (Córdoba), ejemplares de **bismuto nativo** de La Espuela de San Miguel y parte de la paragénesis de Cala y Burguillos del Cerro (níquel-skutterudita, ferroactinolita, vonsenita, etc.)

• **El arco del estaño-wolframio (Ourense, Zamora, Salamanca, Cáceres...)**

La minería de esta amplia provincia metalogénica tiene una gran tradición. El estaño se conoce desde el segundo milenio antes de Cristo. El descubrimiento del bronce, aleación de estaño y cobre, significó la explotación durante la época fenicia y romana de los yacimientos gallegos, especialmente aluviales. La actividad minera cesa después de la caída del Imperio Romano debido a las invasiones bárbaras y a la sustitución del cobre por el hierro. A partir del siglo XVIII se reactiva la minería del estaño, por la invención de la hojalata. En esta época se explotan nuevos yacimientos en Galicia, Zamora, Salamanca y Extremadura. En 1985 se produce una brusca caída mundial de los precios y todas las minas cierran hasta la fecha.

El wolframio, descubierto por los hermanos Elhúyar en 1782, tiene una historia mucho más reciente. Las primeras explotaciones se inician con la I Guerra Mundial, pero la minería del wolframio alcanza su cima con la II Guerra Mundial, por el incremento de precios, ya que el wolframio se usa en aleaciones con acero para fabricación de armas. Durante algunos años España fue productor muy importante de este metal. Posteriormente el mercado se mantuvo de modo oscilante, hasta la brusca caída de precios de 1981, que obligó al cierre de todas las explotaciones.

Estaño y wolframio se encuentran genéticamente asociados, en paragénesis de alta temperatura (pegmatítico-neumatolíticas), enclavadas normalmente en granitos hercínicos o en sus proximidades. Minas importantes han sido Santa Comba, San Finx, Monte Neme y Penouta, en Galicia; Barruecopardo, Golpejas, La Fregeneda y El Cubito, en Salamanca; Santa María y Teba, en Cáceres; La Parrilla, en Badajoz.

En la vitrina pueden verse algunos interesantes cristales de casiterita, wolframita, berilo, etc.

• **Las piritas cristalizadas de la Sierra de Cameros, en La Rioja (Navajún, Valdeperillo, Ambasaguas)**

En el sur de La Rioja y norte de la provincia de Soria se encuentran unas formaciones sedimentarias mesozoicas, constituidas por lo general por arcillas y margas, conocidas por los coleccionistas por presentar, en algunos puntos, unas bellísimas cristalizaciones dispersas de piritita en formas generalmente cúbicas, pero también a veces octaédricas o combinadas. Son conocidas también las "piñas", o agregados de muchos cubos de piritita, encontradas en la localidad de Ambasaguas en margas carbonosas negras. En conjunto, estas piritas, de las que ya hay ejemplares en los mejores museos mineralógicos del mundo, pueden considerarse los más bellos ejemplares que se encuentran hoy de este mineral tan común.

Una vitrina adosada a la pared del torreón sur se ha dedicado a estas espectaculares **pirititas**, que no tienen valor industrial, pero sí un alto valor para coleccionismo. Pueden verse cubos de gran tamaño (mina de Navajún), agrupaciones en piña y formas cristalinas combinadas de cubo, octaedro y piritoedro (Ambasaguas), cubos deformados con aspecto de prismas tetragonales o rómbicos (Valdeperillo), etc.

MINERALES REPRESENTATIVOS DEL MUSEO HISTÓRICO D. FELIPE DE BORBÓN Y GRECIA



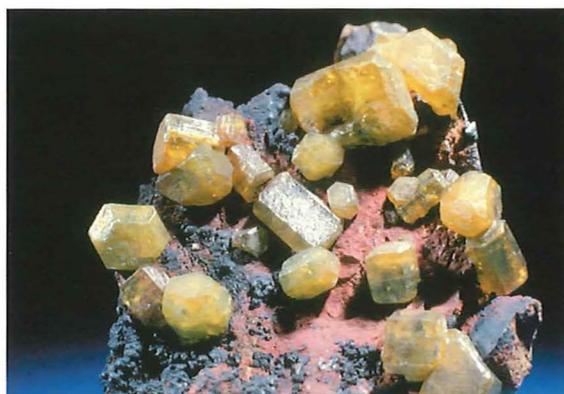
1



2



3



4



5



6



7



8

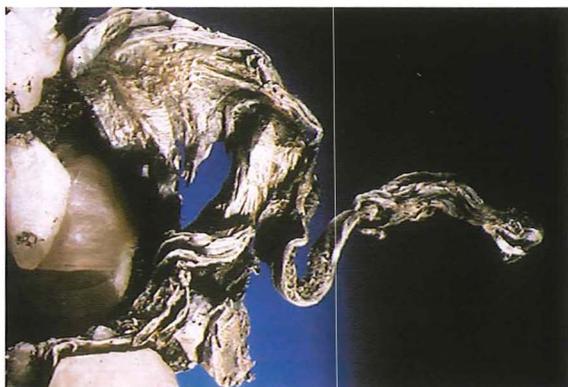
PIES DE FIGURAS: 1. Vitrina con minerales (Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia). 2. Azufre (Agrigento, Italia). 3. Cinabrio (Almadén, España). 4. Clinomimetesita (Johanngeorgensta, Alemania). 5. Cuprita (Chessy-les-Mine, Francia). 6. Esfalerita (Canaleño, España). 7. Freieslebenita (Hiendelaencina, España). 8. Ópalo (Real de Zimapán, Méjico).



9



10



11



12



13



14



15



16

PIES DE FIGURAS: 9. Oro (Rumania). 10. Pargasita (Pargas, Parainen, Finlandia). 11. Plata (Kongsberg, Noruega). 12. Tetraedrita (Cavnic, Rumania). 13. Bournonita (Cornwall, Reino Unido). 14. Piromorfita (Espiel, Córdoba). 15. Pirargirita (Guadalcanal, Sevilla). 16. Fluorita (La Collada, Asturias)

El rincón del coleccionista: Métodos no instrumentales en la identificación de minerales. (I) Color y brillo

SALVADOR MIRETE MAYO

IES Jaime Vera de Madrid

Se sabe que los minerales tienen una serie de propiedades intrínsecas de la especie por las cuales con experiencia se puede llegar a una aproximación en su identificación o inclusive a una identificación completa. Lo que no cabe duda es que un buen análisis de "visu" ayuda para las posteriores labores de identificación mediante técnicas instrumentales.

Los aficionados y coleccionistas saben mucho de estas propiedades, aunque en muchas ocasiones nos conduzcan al error o a una indeterminación que ha de ser resuelta por análisis posteriores más fiables.

Digamos que las técnicas no instrumentales se basan en el examen de las propiedades organolépticas, es decir aquellas que pueden ser percibidas por nuestros órganos de los sentidos, de todos ellos es la vista, como es lógico, el más general, seguido del tacto y del gusto; el olfato y el oído quedan más postergados en su utilización.

Por medio de la vista podemos percibir principalmente el *color* y el *brillo*, además del *hábito cristalino*, *fractura* y *dureza*, esta última compartida con el sentido del tacto.

Es sin duda el Color lo que más nos atrae de los minerales y la propiedad que desde el principio se utilizó para clasificarlos. En la actualidad comprobamos cómo muchos ejemplares fueron mal etiquetados en museos y colecciones privadas por fiarse de esta primerísima propiedad. Este error puede deberse a dos circunstancias: la primera, la cantidad de especies que comparten el mismo color y, la segunda, las muchas que presentan varios colores.

Pero, ¿qué es el color?, físicamente lo definimos como el resultado de la reflexión de la luz sobre la superficie de un objeto. Dicha superficie absorbe todos los colores menos el suyo que es el que refleja y el que vemos.

¿De qué depende el resultado de esta reflexión, es decir, el color?; se sabe que los minerales están formados por un ordenamiento estructural de átomos o moléculas, esto quiere decir que cada motivo debe de tener una posición exacta en la red cristalina de la especie mineral, sin embargo, en la naturaleza esto no es así, las estructuras presentan defectos, *defectos cristalinos* que en algo trastocan este orden riguroso, es más, se llega a decir que la red cristalina crece a base de defectos que equilibran su energía.

Cuando decimos que el cromo da el color verde al berilo dando como resultado su variedad esmeralda, en realidad no hay que pensar que el átomo de cromo tiene color verde al igual que el átomo de cobalto no tiene color violeta, más bien lo que ocurre es que estos áto-

mos son propicios a entrar en la red de unas determinadas especies minerales provocando defectos cristalinos que determinarán el resultado final de la reflexión de la luz variando las absorciones de origen y por consiguiente el color (fig. 1).

Modernamente se ha descubierto y puesto de moda una variedad en el cuarzo, la *bolivianita* que presenta bellas coloraciones violetas y amarillas, es decir, la *amatista* y el *falso topacio* o *cuarzo cetrino* comparten en poco espacio una superficie del mineral, es una prueba de lo voluble que es el color y lo susceptible que es a cualquier intromisión o alteración de su red estructural.

Existen dos tipos de defectos, pero los que más afectan al color son los de *átomo intersticial* y los de *vacante*, es decir, cuando un átomo que incluso puede ser de la misma red original, por las causas que ahora no procede analizar, se introduce entre otros que están en su posición correcta o cuando en un lugar falta el átomo que debiera de estar allí.

Existen otras causas que a buen seguro redundan en los defectos, como son las radiaciones; las mismas solares pueden variar el color de origen de una especie, este es el caso por ejemplo de sulfatos como la baritina y celestina, que originariamente blancos, expuestos a la luz solar pueden tornarse en azules e incluso rojizos.

El color de los minerales es un tema apasionante y poco abordado por la investigación, muchas veces explicado muy superficialmente pero casi nunca llegando a las verdaderas causas de orden estructural que motivan el cambio de color, véase por ejemplo el caso de la *bolivianita* que hemos mencionado (fig. 2).

Así pues, decir que un mineral es rojo, bien es cierto que es un primer dato, pero si está alterado, la costra o pátina de alteración nos lo está ocultando, de ahí que para muchos mineralogistas el verdadero color está en lo que llaman la *raya*; es el color en fresco, el real cuando

con un objeto punzante hemos quitado hasta cierta profundidad esa



FIGURA 1. Esmeralda de Ortiigueira (Vigo-Pontevedra). Quizá uno de los casos más espectaculares en la variación de color en una especie, se produzca en el berilo. La entrada del cromo, da el hermoso color verde que llega a constituir una de las piedras preciosas más valoradas: la esmeralda. Este es el caso de las encontradas en Ortiigueira. (Colección del autor).



FIGURA 2. *Bolivianita de Mina Anahi (Bolivia). Obsérvese el cambio paulatino de color (violeta/amarillo) desde la parte superior a la inferior en esta bolivianita de la Mina Anahi. (Colección del autor).*

ligera capa de alteración. El color de la raya es mucho más fiable pues presenta menos variabilidad, es más constante en una misma especie, además estamos probando otra propiedad como es la *dureza* de la cual hablaremos en otro capítulo.

El brillo es quizá con el color, la propiedad más atractiva de los minerales, se suele decir en el mundillo coleccionista "si brilla es cosa buena". Indudablemente que



FIGURA 3. *Estefanita de Hiendelaencina (Guadalajara). El brillo es un buen referente a la hora de clasificar de visu un mineral, la presencia del brillo metálico como en este ejemplar de Estefanita de Hiendelaencina, centra la investigación en un reducido número de especies. (Colección del autor).*

el brillo representa una perfección, es una cristalización bien acabada de su estructura hasta la misma superficie; claro que nos estamos refiriendo al "fuerte brillo": tipo adamantino o metálico, sin menospreciar los demás que son buenos indicios para la identificación de la especie (fig. 3). El brillo vítreo, sedoso, céreo, grasoso, nacarado etc., son propios de muchas especies o de sus variedades.

El brillo es lo primero que pierde el mineral, pues es lo más susceptible a la alteración por agua, oxígeno atmosférico y otros procesos como puedan ser recrecimientos, epitaxias y pseudomorfosis, estas últimas originan minerales carentes de brillo (térreo) es el caso de los cristales de antimonita que en superficie se van transformando en ocre de antimonio sin brillo alguno la mayor parte de las veces, excepto algunos casos de *kermesitas*.

La pérdida del brillo en un ejemplar es la alarma de que se nos está perdiendo y no es de extrañar que con el tiempo se nos reduzca a polvo, incluso pasando por otras variedades; es el caso de la *laumontita*, pierde brillo y transparencia para pasar a *leonardita* blanco y sin brillo, la última fase será el desmoronamiento definitivo de la muestra. El cambio de color acompaña a la pérdida del brillo debido a ciertas alteraciones, como por ejemplo ocurre en el caso del *rejalgar* que de fuerte color rojo y brillante, expuesto a la luz se va transformando en *oropimente*, amarillo algo brillante y finalmente de aspecto térreo.

No hay nada más bello que un cristal bien conformado y brillante, estará cumpliendo la definición "porción de materia cristalina limitada por caras planas", sin duda en estos casos el cristal es perfecto (fig. 4).

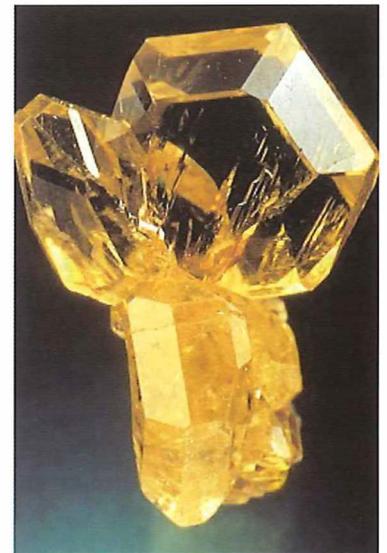


FIGURA 4. *Crisoberilo de Minas Geraes (Brasil). La transparencia es otro indicativo de calidad y pureza del ejemplar, es una propiedad entre el color y el brillo, aunque por lo regular todos los minerales que muestran transparencia tienen brillo vítreo alto. El crisoberilo de Minas Geraes muestra una excelente transparencia sin perder su genuino color amarillo.*



José Luis Amorós Portolés: vida y obra

M^a VICTORIA LÓPEZ-ACEVEDO Y SOL LÓPEZ ANDRÉS

Dpto. de Cristalografía y Mineralogía. Facultad de Ciencias Geológicas. UCM. 28040 Madrid

E-mail.- vcornejo@geo.ucm.es y antares@geo.ucm.es

"The most active among the Spanish crystallographers is J.L. Amorós who after graduating at the university in Barcelona in 1942 worked there in the Instituto Lucas Mallada of the Higher Research Council (CSIC) before becoming the professor of crystallography in Madrid. Together with his numerous co-workers he is investigating structures as well as physical properties of crystals and the methods of their analysis. Interesting and useful publications have been issued by this group which provide the new generations of students with texts to study".

(P. P. EWALD, 1962)

El profesor José Luis Amorós Portolés fue socio fundador de la Sociedad Española de Mineralogía. Su conocida trayectoria como investigador y docente le hacen merecedor indiscutible de inaugurar, con su biografía, este primer número de *MACLA*, la nueva revista de la SEM.

HISTORIAL ACADÉMICO Y CIENTÍFICO. CARGOS HONORÍFICOS

Nace en Barcelona el 17 de diciembre de 1920. Su padre José Vicente Amorós era catedrático de Numismática de la Universidad de Barcelona. Luis Buñuel (primo hermano de su madre) fue su padrino.

En 1943 se licencia en Ciencias (Sección de Naturales) por la Universidad de Barcelona, con la calificación de sobresaliente. Desde este año y hasta 1955 trabaja en el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de Barcelona con el profesor Francisco Pardillo Vaquer. Fue becario del Instituto Lucas Mallada de Investigaciones Geológicas del CSIC (1943-1947) y ayudante de prácticas de Cristalografía en la Universidad de Barcelona entre los cursos 1943-1944 al 1946-1947. En 1941 ingresó como socio en la Real Sociedad Española de Historia Natural.

En 1945 defendió su tesis doctoral en la Universidad Central de Madrid obteniendo la calificación de sobresaliente y el grado de Doctor en Ciencias (Sección de Naturales). La memoria titulada: *La estructura de la kernita* ($B_4O_7 \cdot Na_2 \cdot 4H_2O$) había sido dirigida por el profesor Pardillo.

Fue profesor adjunto por oposición de Cristalografía de la Universidad de Barcelona en 1947. En esta misma fecha obtiene una beca del Instituto Lucas Mallada del CSIC, para trabajar sobre el "Método de Fourier de análisis de cristales" en el centro Alonso Barba de Madrid con el profesor J. Palacios.

En 1948 fue colaborador científico de Geología del CSIC (adscrito al Patronato Alfonso X el Sabio) en la Sección de Cristalografía de Barcelona. Obtuvo una pensión del Instituto Juan de la Cierva (1948-1950) para trabajar en "Rayos X divergentes y agitación térmica de cristales" en el University College de Londres con la profesora K. Lonsdale. Este mismo año recibió el Premio ordinario de la Academia de Ciencias de Madrid por el trabajo "Óptica estructural cristalina".

Un año más tarde, en 1949, pasó a ser Investigador Científico del CSIC en el Departamento de Cristalografía de Barcelona, hasta 1955 que pidió la excedencia de este puesto.

Entre 1948 y 1958 participa en un "programa general de construcción de instrumentos cristalográficos" en el Instituto Leonardo Torres Quevedo de Física Aplicada. Fue miembro de la Comisión de Instrumentos Científicos de la Unión Internacional de Cristalografía (UIC) (1951-1957).

Durante estos años fue subvencionado por el CSIC para realizar estancias en los siguientes centros extranjeros:

- Universidad de Glasgow en el Chemistry Department, con el profesor J. M. Robertson en "Análisis de Fourier de sustancias orgánicas".
- Universidad de Leeds en el Department of Biomolecular Structure, con el profesor Astbury en "Estructura de proteínas fibrosas y grandes moléculas".
- Rothamsted Experimental Station en el Pedology Department con el doctor MacEwan en "Minerales de la arcilla".
- Universidad de Cambridge en el Crystallographic Department con el profesor W.L. Bragg y el doctor W. H. Taylor en "Síntesis tridimensional de Fourier".
- Universidad de Oxford en el University Museum con la doctora Hodgkins en "Síntesis tridimensional de moléculas complicadas".

- Massachussets Institute of Technology de Boston con el profesor Martín J. Buerger en "Nuevas funciones cristalográficas y termodinámicas de los procesos polimorfos" (1950).
- Universidad de State College Pennsylvania en el Department of Physics con el profesor R. Pepinsky en "Efecto de la terminación de series en la síntesis de Fourier" (1950).
- Universidad de Groningen (Holanda) en el Physical Chemistry Department con el profesor Wiebenga (1953).
- Universidad de Delft (Holanda) en el Crystallographic Department con el profesor Jong (1953).

(En estos dos últimos centros realizó el estudio de las "Cámaras Wiebenga y Jong-Bouman".)

- Universidad de Leeds (UK) en 1956.

Durante los años 1954 a 1960 fue Catedrático de Cristalografía, Mineralogía y Mineralotecnía en las universidades de Sevilla (1954), Barcelona (1955) y Madrid (1956-1966). Dirigió el Departamento de Cristalografía Física del CSIC en Madrid, entre los años 1956 y 1966 y fue director en funciones del Museo Nacional de Ciencias Naturales en Madrid (1960).

En este mismo período (1954-1966) disfruta de diferentes ayudas y contratos para investigar en los siguientes temas:

- "Propiedades térmicas de los cristales" (Fundación Juan March, 500.000 ptas.).
- "Research in the area of Crystallography" (Contrato: AF61(052)196, U.S. Air Force (EEUU), 7.500 \$).
- "Studies of thermal motion in crystals" (Contrato: AF61(514)1146, U.S. Air Force (EEUU), 7.500 \$).
- "Thermal expansion of solids". (Contratos: Grant AF-EOAR-62-92 y Grant AF-EOAR-596-64, European Office of Air Research, 20.000 \$).
- "*Studies on polymorphism in single crystals*" (Contratos: EUC-1084-01-1310-59, DA-91-591-EUC-1388 y DA-91-591-EUC-1717, US Army (EEUU), 19.500 \$).

Entre 1957 y 1968 fue miembro de la Comisión de Enseñanza de la Cristalografía de la Unión Internacional de Cristalografía (UIC).

En 1960 fue vicepresidente de la Real Sociedad Española de Historia Natural e ingresó como miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba (Argentina). En 1961 ocupó el cargo de Presidente de la Real Sociedad Española de Historia Natural.

En 1962 inició en Estados Unidos una estancia que duró hasta 1974. Durante este tiempo fue:

- Profesor visitante del Departamento de Física de la Universidad del Estado de Pensilvania y director en funciones del Materials Science Research Center de la Universidad del Estado de Pensilvania (1962).

- Profesor de Ciencias de Materiales en la Escuela de Tecnología de la Southern Illinois University (1965-1971).
- Catedrático Supernumerario de la Universidad de Madrid (1966-1974).
- Profesor de Investigación del CSIC (en excedencia voluntaria) (1972-1976).
- Secretario de la Asociación Internacional de Mineralogía (IMA), desde su fundación y hasta 1965 y miembro de la Comisión de Museos de la IMA entre 1962 y 1964.
- En 1965 ingresó como Miembro de la Real Academia de Ciencias y Letras de Barcelona.

Durante estos años recibió algunos premios y menciones y disfrutó de varios contratos para realizar diferentes investigaciones:

- En 1963, junto a M.^a Luisa Canut, su esposa, el premio Francisco Franco de Ciencias del CSIC, por su trabajo sobre la "Difracción difusa de los cristales".
- Contratos AF-AFOSR-596-64 (1964-1966) y AF-AFOSR-596-66 (1966-1968), US Air Force (EEUU) (97.500 \$) para: "Study of single crystals under thermal gradients".
- Contrato Grant AF-AFOSR-68-1587 (1968-1970), US Air Force (EEUU) (50.000 \$) para: "Temperature and pressure effects on atomic repulsion in aeroface electronic materials".
- Recibe el Research Recognition Citation de la Southern Illinois University.
- Contrato Grant AF-AFOSR-69-0954 (1968) US Air Force (EEUU) (53.400 \$) para: "Study of ferroelectrics".
- En 1970 el premio Leo Kaplan de la Sociedad Sigma XI (USA).

En 1974 volvió a ocupar su Cátedra de Cristalografía, Mineralogía y Mineralotecnía de la Universidad Complutense de Madrid hasta 1987 en que se jubiló anticipadamente. En este período fue:

- Decano de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (1975-1977).
- Jefe de la Sección de Mineralogía Aplicada y Materiales del Departamento de Geología Aplicada, CSIC (1975).
- Vicerrector de Investigación (1976-1978).
- Director del Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense (1978-1981).
- Decano de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (1981-1986). Una de las gestiones más destacadas que realizó en este período fue la fundación de la biblioteca de la Facultad de Ciencias Geológicas, en la que se centralizaron los fondos bibliográficos de esta facultad.

- Director de algunos proyectos de investigación CAICYT sobre:
 - “Obtención y caracterización de materiales filamentosos y paracrystalinos” con una dotación de 2.500.000 ptas. (1975).
 - “Síntesis hidrotermal de materiales piezoeléctricos” con una dotación de 2.950.000 ptas. (1978).
 - “Hidrometalurgia y biominería” con una dotación de 7.095.000 ptas. (1978).
- Socio fundador de la Sociedad Española de Mineralogía, donde ocupó los cargos de secretario desde 1975 hasta 1978 y de vicepresidente desde 1978 hasta 1980.

El 15 de marzo de 2001 falleció en Palma de Mallorca.

TEMAS DE INVESTIGACIÓN Y PUBLICACIONES RELACIONADAS

Cristalografía

- El isomorfismo de la serie Alunita-Hamlinita. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, **43**, 517-523 (1945).
- Los rayos Roentgen y la estructura de los cristales. J. L. Amorós. *Euclides*, **49**, 172-179 (1945).
- Notas cristalológicas. I: El isomorfismo como problema estructural. J. L. Amorós. *Euclides*, **55**, 471-474 (1945).
- Átomos, iones y moléculas en los cristales. J. L. Amorós. *Euclides*, **56**, 546-551 (1945).
- La estructura de la Kernita. J. L. Amorós. *Euclides*, **57-58**, 599-608 (1945).
- Notas cristalológicas: III: Cristalografía del boro. Ensayo de sistematización de las estructuras de este elemento. J. L. Amorós. *Euclides*, **59-60**, 73-78 (1946).
- Notas cristalológicas: II: El boro en radicales. J. L. Amorós. *Euclides*, **59-60**, 148-154 (1946).
- La estructura de la Kernita. J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **5**, 1-80 (1947).
- Notas sobre la macla (011) de la Kernita. J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **7**, 21-26 (1947).
- Estudio de la morfología y estructura del $[\text{Ni}(\text{CN})_4]\text{Na}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. F. Pardillo y J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **7**, 55-66 (1947).
- Óptica estructural de los silicatos. J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **7**, 67-76 (1947).
- La determinación directa de la estructura cristalina. J. L. Amorós. *Euclides*, **67**, 388-402 (1947).
- Métodos gráficos para la numeración de diagramas de tipo Weissenberg. J. L. Amorós y F. J. Fabregat. *Euclides*, **67**, 490-501 (1947).
- Notas cristalológicas. IV: Clasificaciones modernas de los minerales y en especial de los silicatos. J. L. Amorós. *Euclides*, **68**, 1-5 (1947).
- Los incrementos de refracción iónica en la problemática estructurocristalina. J. L. Amorós. *An. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **1-2**, 89-122 (1948).
- Diagramas de polvo con cristal único. J. L. Amorós y M. S. Ahmed. *An. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **9-10**, 605-607 (1948).
- Cristalografía de los cianuros. J. L. Amorós. *Las Ciencias*, **2**, 319-330 (1948).
- Óptica estructural cristalina. J. L. Amorós. *Mem. R. Acad. Cienc. Exac. Fis. Nat.*, **2**, 5-22 (1949).
- La investigación röntgenográfica de las arcillas. D. M. C. MacEwan y J. L. Amorós. *An. edafol. fisiol. veg.*, **9**, 363-380 (1950).
- Nota sobre el método de las diferencias vectoriales. J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **47**, 139-140 (1951).
- Expresión del complejo vectorial en cada uno de los 230 grupos cristalinos. J. L. Amorós y M. Font-Altaba. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **47**, 167-172 (1951).
- Empleo de métodos mecánicos en el cálculo de la síntesis tridimensional del Co_2Al_9 . J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **47**, 239-250 (1951).
- El análisis de cristales por rayos X divergentes. K. Lonsdale y J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **47**, 251-256 (1951).
- Particularidades cristalológicas de la molécula orgánica. J. L. Amorós y M. Font-Altaba. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **47**, 267-274 (1951).
- Particularidades de la estructura del crisotilo. F. Pardillo y J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **48**, 11-16 (1952).
- Particularidades de la resolución directa de estructuras a partir de la interpretación total del espacio Patterson. J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **48**, 37-44 (1952).
- Expresión de las concentraciones vectoriales lineal y plana. J. L. Amorós y M. Font-Altaba. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **48**, 89-98 (1952).
- Aplicación de la convolución al análisis de Fourier de cristales. J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **48**, 367-369 (1952).
- La elección de la orientación más adecuada para un cristal. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **50**, 53-58 (1952).
- Relaciones estructurales existentes entre la hidracida del ácido isonicotínico y la del ciancético. J. L. Amorós y J. M. Coves. *1.ª Reunión Nac. Soc. Esp. Ciencias Fisiológicas*, 21-23 (1953).
- Morfología y estructura de la hidracida del ácido isonicotínico. I. Estudio cristalográfico e interpretación del Patterson. F. Pardillo y J. M. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 13-23 (1953).
- Extensión de la teoría morfológica de Hartman a la exfoliación y deslizamiento en cristales. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 105-109 (1954).
- El espacio de Patterson y su significado en la determinación de estructuras cristalinas. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 111-128 (1954).
- Cristal real-cristal ideal. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **2**, 7-24 (1955).
- Interpretación racional de los Lauediagramas. M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 15-24 (1958).
- Determinación de la simetría Laue de un cristal mediante un solo Laue cilíndrico. J. L. Amorós, J. Vargas y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 363-378 (1958).
- Subestructura antiferroeléctrica del NO_3NH_4 -II. M. L. Canut, M. T. Iceta y J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **20**, 65-72 (1964).
- Estudio topográfico de las imperfecciones de un cristal por difracción de rayos X: método del haz paralelo. J. L. Amorós y P. Tavira. *Rev. Cienc. Apl.*, **18**, 217-222 (1964).
- La energía de Madelung en los minerales. I. Los polimorfos de la sílice. J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **22**, 135-141 (1966).
- Cleavage features in a domain (twin) crystal. J. L. Amorós. *International Mineralogical Association (4º General Meeting IMA), papers*, 189-196 (1966).
- Book Review. Optical transform. Their preparation and application to x-ray diffraction problems, C. Taylor & H. Lipson. J. L. Amorós. *Analytical Chemistry*, **39**, 81-82 (1967).
- The difference Fourier-transform (DFT) method for direct crystal-structure determination. J. L. Amorós and M. L. Canut. *Zeitschrift für Kristallographie*, **124**, 262-274 (1967).
- Symmetry-Factor Maps: Computing Programs and Dichromatic Symmetry. J. L. Amorós. En: *Final scientific report. Southern Illinois University School of Technology, Carbondale, Illinois. Grant AF-AFOSR-832-67 (1967-1968)*, 98 pp. (1968).
- Temperature and pressure effects on atomic repulsion in aerospace electronic materials. J. L. Amorós. En: *Final scientific re-*

port. Southern Illinois University School of Technology, Carbondale, Illinois. Grant AF-AFOSR-68-1587 B (1968-1970), 23 pp. (1971).
 Simetría dicromática en los mapas de factores de estructura. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, **42**, 97-126 (1973).

Crecimiento de cristales

Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. IV. Crecimiento de cristales de ácido atípico. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Mín.*, **2**, 223-235 (1955).
 Obtención de monocristales de naftaleno. J. Díaz y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 419-426 (1958).
 Complejos y aductos urea-ácidos dicarboxílicos: obtención y datos cristalográficos. J. L. Amorós y M. L. Palomar. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 25-29 (1961).
 La formación de triquitos y otras particularidades del crecimiento en el fosfato monopotásico. J. L. Amorós, E. Riaño y J. J. Alonso. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 157-166 (1961).
 Técnicas para obtención de monocristales grandes de sustancias orgánicas. E. Riaño y J. L. Amorós. *Rev. Cienc. Apl.*, **83**, 489-494 (1961).
 Crecimiento de cristales. I. Velocidades de crecimiento en condiciones de competencia. J. L. Amorós, E. Martín y P. Tavira. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **61**, 177-200 (1963).
 Crecimiento, dislocaciones y fractura cristalinis. J. L. Amorós. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba (Argentina)*, **43**, 173-202 (1963).
 Crecimiento de cristales en geles. I. Técnica. J. M. García Ruiz y J. L. Amorós. *Estudios Geol.*, **34**, 161-166 (1978).
 Velocidades de crecimiento y condiciones hidrodinámicas en la técnica de convección artificial. M. Prieto y J. L. Amorós. *Estudios Geol.*, **34**, 367-374 (1978).
 Crecimiento de cristales en geles. II. Nueva variante. J. M. García Ruiz y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **77**, 101-119 (1979).
 Sobre la influencia del transporte en la formación de caras curvas en cristales. I. Parte teórica. M. Prieto, J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós. *Estudios Geol.*, **35**, 319-323 (1979).
 Sobre la influencia del transporte en la formación de caras curvas en cristales. II. Contrastación experimental. J. M. García-Ruiz, M. Prieto y J. L. Amorós. *Estudios Geol.*, **35**, 449-457 (1979).
 Crecimiento de triquitos sobre sustrato poroso. P. Tavira y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **78**, 189-200 (1980).
 Sobre la precipitación polimórfica del carbonato cálcico. J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós. *Estudios Geol.*, **36**, 193-200 (1980).
 Crystal aggregates with induced morphologies grown by silica gel technique. J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós. *Bulletin de Mineralogie*, **104**, 107-113 (1981).
 On the influence of hydrodynamic environment on crystal growth. M. Prieto y J. L. Amorós. *Bulletin de Mineralogie*, **104**, 114-119 (1981).
 Growth of calcite crystals with non-singular faces. M. Prieto, J. M. García-Ruiz & J. L. Amorós. *Journal of Crystal Growth*, **52**, 864-867 (1981).
 Morphological aspects of some symmetrical crystal aggregates grown by silica gel technique. J. M. García-Ruiz & J. L. Amorós. *Journal of Crystal Growth*, **55**, 379-383 (1981).
 On the transition amorphous calcium phosphate to crystalline octacalcium phosphate. J. M. García-Ruiz, V. López-Acevedo y J. L. Amorós. En: *Urolithiasis: Clinical and basic research*. Plenum Publishing Corporation, pp. 459-464 (1981).
 Crystal growth processes in Portland cement pastes. J. L. Soriano y J. L. Amorós. *Estudios Geol.*, **38**, 259-269 (1982).

Crystal growth processes in KNO₃ solutions. C. Viedma, J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós. En: *First International Symposium on Crystal Growth Processes in Sedimentary Environments*, pp. 32 (1982).
 Expresiones configuracionales del transporte en el crecimiento de cristales a partir de soluciones agitadas. M. Prieto y J. L. Amorós. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, **1**, 55-80 (1983).
 Cristalización polimórfica del KNO₃ (Nitro) a partir de soluciones. C. Viedma, M. Prieto, J. M. García-Ruiz y J. L. Amorós. En: *I Congreso Español de Geología*, tomo II, 305-316 (1984).
 Modificación del hábito cristalino por acción de colorantes orgánicos. I. Influencia de la fuchina ácida sobre la morfología y la velocidad de crecimiento del sulfato potásico. J. L. Martín-Vivaldi y J. L. Amorós. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, **3**, 49-70 (1985).
 Mecanismos de formación de anillos de Liesegang de fosfatos octacálcico en gel de sílice. V. López-Acevedo, J. L. Amorós y J. M. García-Ruiz. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, **3**, 71-88 (1985).

Dilatación térmica

Dilatación térmica de compuestos tipo ClNa. I. Dilatación térmica de la galena entre -150 °C y 150 °C. E. Riaño y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 345-361 (1958).
 Dilatación térmica de compuestos tipo ClNa. II. Dilatación térmica del óxido de magnesio entre -150 °C y 200 °C. E. Riaño y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 391-404 (1958).
 Dilatación térmica de compuestos tipo ClNa. III. Dilatación térmica de los haluros alcalinos entre -150 °C y 150 °C. E. Riaño y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **58**, 181-198 (1960).
 On the thermal expansion of some ferroelectrics. M. Gutiérrez, M. L. Canut & J. L. Amorós. *Acta Cryst.*, A166 (1963).
 Sobre la dilatación térmica del nitrato sódico ferroeléctrico. J. L. Amorós, M. Gutiérrez y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **62**, 5-21 (1964).
 La dilatación térmica del nitro, NO₃K (sal de piedra). J. L. Amorós, M. Gutiérrez y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **62**, 23-39 (1964).
 Dilatación térmica y desorden de apilamiento en cristales moleculares. I. 2,2-piridil. A. Félix, J. L. Amorós y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **62**, 187-197 (1964).
 Thermal expansion of [beta]-succinic acid and [alfa]-adipic acid in relation to their crystal structures. J. L. Amorós, M. L. Canut and E. Neira. *Proceedings of the Royal Society A*, **285**, 370-381 (1965).
 Dilatación térmica del grupo isomorfo de la baritina. M. Gutiérrez y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **65**, 57-71 (1967).
 Study of single crystals under thermal gradient. J. L. Amorós. En: *Final scientific report. Southern Illinois University School of Technology, Carbondale, Illinois*. Grant AF-AFOSR-596-64 (1964-1966). 9 pp. (1967).
 Dilatación térmica del grupo isomorfo de la baritina. II. Grupo B, dilatación térmica del ClO₄NH₄ y MnOK₄. M. Gutiérrez y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **66**, 61-69 (1968).
 Study of single crystals under thermal gradient (II). J. L. Amorós. En: *Final scientific report. Southern Illinois University School of Technology, Carbondale, Illinois*. Grant AF-AFOSR-596-66 (1966-1968), 34 pp. (1968).
 Sobre las direcciones de dilatación nula en los cristales. J. L. Amorós y J. L. Martín-Vivaldi. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **78**, 217-226 (1980).

Dinámica cristalina

- Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. I. Difracción difusa del ácido oxálico dihidratado. M. Velasco, M. L. Canut y J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 157-164 (1954).
- Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. II. Difracción difusa del ácido atípico. M. Velasco, M. L. Canut y J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 165-171 (1954).
- Desorden térmico. J. L. Amorós y M. L. Canut. *P. Dep. Crist. Min.*, **2**, 25-46 (1955).
- Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. III. Relaciones entre dilatación térmica, vibraciones atómicas y radiación difusa en el ácido oxálico dihidratado. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Pub. Dep. Crist. Min.*, **2**, 155-162 (1955).
- Vibraciones de átomos en los cristales. J. L. Amorós. *Euclides*, **17**, 226-229 (1957).
- Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. V. Determinación directa de la amplitud de la oscilación térmica. J. L. Amorós, C. Belgrano y M. L. Canut. *P. Dep. Crist. Min.*, **3**, 5-13 (1957).
- Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. VI. Difracción difusa de los ácidos dicarboxílicos de la serie par: succínico y atípico. M. L. Canut y J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **3**, 15-25, (1957).
- Estudios acerca de la dinámica reticular en cristales moleculares. VII. Difracción difusa de los ácidos dicarboxílicos de la serie impar: pimélico. M. L. Canut y J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **3**, 27-31 (1957).
- Thermal vibrations in dicarboxylic acids. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Acta Cryst.*, **10**, 794-795 (1957).
- Ondas térmicas en cristales en cadenas. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 25-50 (1958).
- Aplicación de la transformada de Fourier al estudio de la difracción difusa térmica de cristales moleculares. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 305-322 (1958).
- Dinámica de redes en cristales moleculares. VIII. Difracción difusa térmica de la hexamina $C_6H_{12}N_4$. M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 323-338 (1958).
- Dinámica de redes en cristales moleculares. IX. Difracción difusa térmica en el pentaeritrol. P. Alonso, M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 379-390 (1958).
- Dinámica de redes en cristales moleculares. X. Difracción difusa térmica del naftaleno. A. de Acha, M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 405-418 (1958).
- Dinámica de redes en cristales moleculares. IX. Difracción difusa térmica en el pentaeritrol. (Rectificación). P. Alonso, M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **57**, 5-30 (1959).
- Thermal waves in chain structures. J. L. Amorós & M. L. Canut. *P. Dep. Crist. Min.*, **4**, 7-22 (1959).
- Elipsoides de vibración de los átomos y simetría del cristal. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **58**, 7-16 (1960).
- Difracción difusa térmica del ácido oxálico dihidratado, $CO-OH-COOH$, $2H_2O$. M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **58**, 17-23 (1960).
- Dinámica de redes en cristales moleculares. XI. Difracción difusa continua y simetría dinámica. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **58**, 25-41 (1960).
- Efecto de las vibraciones moleculares independientes en la difracción difusa térmica. M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **58**, 43-58 (1960).
- Thermal motion in molecular crystals. M. L. Canut y J. L. Amorós. *Acta Cryst.*, **13**, 1106 (1960).
- On the x-ray temperature diffuse scattering of anthracene and stearic acid. S. Annaka and J. L. Amorós. *J. Phys. Soc. Japan*, **15**, 356-357 (1960).
- Interpretation of the extended continuous diffuse regions of x-ray thermal diffuse scattering of molecular crystals. J. L. Amorós, M. L. Canut and A. de Acha. *Zeitschrift für Kristallographie*, **114**, 39-65 (1960).
- On the x-ray diffuse scattering of anthracene. S. Annaka and J. L. Amorós. *Zeitschrift für Kristallographie*, **114**, 423-438 (1960).
- Agitación térmica y difracción difusa en los cristales moleculares. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba (Argentina)*, **42**, 205-224 (1961).
- L'agitation thermique dans les cristaux moléculaires: la diffusion des rayons X par l'acridine III. J. L. Amorós, A. de Acha y M. L. Canut. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, **84**, 40-50 (1961).
- On the inversion temperature function of the first order (one phonon) scattering and the determination of Debye characteristic temperatures. M. L. Canut and J. L. Amorós. *Proceedings of the Physical Society, London*, **77**, 712-720 (1961).
- Temperature dependence of the X-ray diffuse scattering of molecular crystals: naphthalene. M. L. Canut and J. L. Amorós. *J. Phys. Chem. Solids*, **21**, 146-155 (1961).
- X-ray thermal diffuse scattering in azelaic and pimelic acids. R. L. Banerjee, M. L. Canut and J. L. Amorós. *Indian Journal of Physics*, **35**, 62-76 (1961).
- Empleo de análogos ópticos en el estudio de la difracción difusa de rayos X por los cristales. M. L. Canut, L. M. Valdés y J. L. Amorós. *Rev. Cienc. Apl.*, **92**, 199-213 (1963).
- On the X-ray critical scattering of $NaNO_2$ at 160 °C and at 215 °C. J. Mendiola, M. L. Canut & J. L. Amorós. *Acta Cryst.*, **A190** (1963).
- Temperature dependence of atom-atom potential in molecular crystals. J. L. Amorós & D. Bork. *Zeitschrift für Kristallographie*, **125**, 52-69 (1967).
- On the effect of the electron shell structure of the atoms in x-ray diffraction. J. L. Amorós and M. L. Canut. *Zeitschrift für Kristallographie*, **127**, 5-20 (1968).
- Optical analogs as a tool in the analysis of disorder functions of the cubic form of ammonium nitrate. M. L. Canut and J. L. Amorós. *Zeitschrift für Kristallographie*, **127**, 44-60 (1968).
- Electron density analysis via the selected-electron-shell (SES) method. J. L. Amorós. *Acta Cryst.*, **A25**, S84 (1969).
- Analysis of density distribution of the outer electrons in Hexamine. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Zeitschrift für Kristallographie*, **129**, 124-141 (1969).
- On the core-and outer-electrons approximation to the x-ray scattering factor and electron density of atoms and ions. J. L. Amorós, M. L. Canut, L. Montoto and A. Singhabhandhu. *Zeitschrift für Kristallographie*, **130**, 241-253 (1969).
- The selected- electron- shell method. Part I. Theory. J. L. Amorós and M. L. Canut. *The Transactions of the Illinois State Academy of Science*, **63**, 117-124 (1970).
- The selected- electron- shell method. Part II. Implementation. M. L. Canut, T. Casper, C. Walters and J. L. Amorós. *The Transactions of the Illinois State Academy of Science*, **63**, 125-135 (1970).
- Analysis of the electron density and potential of solid benzene. J. L. Amorós y M. L. Canut. *The Transactions of the Illinois State Academy of Science*, **64**, 292-299 (1971).
- The effect of correlations in diffuse scattering and its application to phase transitions. J. L. Amorós and M. L. Canut. *Trans. Amer. Cryst. Assoc.*, **7**, 77-87 (1971).
- Análisis de la densidad electrónica de los cristales. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, **42**, 3-71 (1973).

Polimorfismo

Dinámica de redes en cristales iónicos. I. Difracción difusa de las formas polimorfas IV (entre -18 °C y 32 °C) y III (entre 32 °C y 84 °C) del nitrato amónico. P. Alonso, M. L. Canut y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 51-64 (1958).
 Transformaciones polimorfas en monocristales. I. Formación de superestructura en la transición IV-V (-18 °C) del nitrato amónico. J. L. Amorós, P. Alonso y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 65-75 (1958).
 Transformaciones polimorfas en monocristales. II. Transición IV-II (84 °C) del nitrato amónico y forma metaestable II (55 °C). J. L. Amorós, P. Alonso y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 77-91 (1958).
 Lattice dynamics in ionic crystals I: Diffuse scattering of the polymorphic forms IV- (-18 °C to 32 °C) and III- (32 °C to 89 °C) ammonium nitrate. P. Alonso, M. L. Canut & J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **4**, 23-29 (1959).
 El mecanismo de transición IV-II en el nitrato amónico. J. L. Amorós y R. L. Banerjee. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **58**, 165-180 (1960).
 Studies on the phase transformations of NH₄NO₃, NaNO₂, NaNO₃. J. L. Amorós, M. L. Canut, P. Alonso, E. Riaño, R. L. Banerjee, M. Moreno, F. Arrese y C. Abasolo. *Acta Cryst.*, **13**, 1070-1071 (1960).
 Un nuevo tipo de polimorfismo: polimorfismo inducido en el aducto urea-subérico. J. L. Amorós y C. Abasolo. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 31-35 (1961).
 El polimorfismo del nitrato amónico. J. L. Amorós y M. L. Canut. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **60**, 15-40 (1962).
 The crystal structure of the low-temperature phase of NH₄NO₃(V) at -150 °C. J. L. Amorós, F. Arrese and M. L. Canut. *Zeitschrift für Kristallographie*, **117**, 92-107 (1962).
 Sobre la coexistencia de las fases I y II de NO₃NH₄ y la difracción difusa de desorden de la fase I. M. L. Canut, M. Ayllón y J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **20**, 57-64 (1964).

Divulgación

Crystallography in Spain. J. L. Amorós & K. Lonsdale. *Nature*, **166**, 391-393 (1950).
 La técnica röntgenográfica en la Gran Bretaña. J. L. Amorós. *Physica*, **3**, 15-18 (1950).
 Técnicas cristalográficas en el análisis químico industrial. J. L. Amorós. *Técnica Metalúrgica*, **8**, 289-301 (1952).
 Aplicación de la difracción de los rayos X a problemas metalúrgicos. J. L. Amorós. *Técnica Metalúrgica*, **8**, 325-332 (1952).
 Acerca de la problemática geológica. J. L. Amorós. *Anales de la Universidad de Sevilla* (1954).
 Coordinación de las técnicas analíticas en la investigación industrial. J. L. Amorós. *Técnica Metalúrgica*, **10**, 1-6 (1954).
 Simbolismo para los niveles de la red recíproca. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 445-446 (1958).
 Vocabulario de Cristalografía. J. L. Amorós. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico*, **58**, 3-14 (1960).
 Especialización. J. L. Amorós y J. García Santesmases. *1.º Seminario de Enseñanza Superior Científica y Técnica*, 181-193 (1960).
 Profesionalidad de las Ciencias Geológicas. J. L. Amorós, F. Hernández Pacheco y B. Meléndez. *1.º Seminario de Enseñanza Superior Científica y Técnica*, 227-230 (1960).
 Temas y técnicas de investigación en el Departamento de Cristalografía Física. J. L. Amorós. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba (Argentina)*, **42**, 225-238 (1961).
 Nomenclatura y símbolos en Cristalografía y Mineralogía. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 101-103 (1961).
 La enseñanza de la geología en U.S.A. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 257-259 (1961).

Nomenclatura mineral. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **60**, 133-134 (1962).
 Un código de buena práctica en las publicaciones científicas. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **61**, 143-144 (1963).
 El problema de la investigación en la Universidad. J. L. Amorós. *Gea*, **2**, 9-10 (1963).
 La geología es ya una ciencia independiente. J. L. Amorós. *Gea*, **2**, 25-26 (1963).
 Reglas para escribir un trabajo de investigación científica. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **62**, 129 (1964).
 Cristalografía. J. L. Amorós. *Enciclopedia de Cultura Española*, **563** (1965).
 Mineralogía. J. L. Amorós. *Enciclopedia de Cultura Española*, **329-330** (1965).
 The introduction of Werner's mineralogical ideas in Spain and in the Spanish Colonies of America. J.L. Amorós & D. Bork. *Freiberger Forschungshefte*, **C223**, 231-236 (1967).
 Simetría Dinámica, donde arte y ciencia se encuentra. J. L. Amorós. En: *Forma y Criterio (Un seminario)*. Editorial Complutense, pp. 9-26 (1982).
 Discurso correspondiente a la solemne apertura del curso 1983-1984 de la UCM. J. L. Amorós. Universidad Complutense de Madrid, 1983.
 Los mosaicos geométricos: Una nueva tecnología para su estudio. F. Mingarro, J. L. Amorós y M. C. López de Azcona. *Archivo Español de Arqueología*, **59**, 163-190 (1986).

Geología

La agitación microsísmica en la costa mediterránea española. J. L. Amorós. *Rev. R. Acad. Cienc. Madr.*, **40**, 1-27 (1946).
 El mecanismo plutónico como fenómeno cooperativo: Introducción a la teoría. J. L. Amorós y A. San Miguel. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, **61**, 81-98 (1961).
 Estudio palinológico de la turbera del Estany (Olot, Gerona). J. Menéndez Amor y J. L. Amorós. *Geologie en Mijnbouw*, **43**, 118-122 (1964).
 La presión como agente geológico. J. L. Amorós. *Publicaciones del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación Provincial de Barcelona*, **19**, 49-61 (1965).
 The pressure field and the internal constitution of the earth. J. L. Amorós y A. San Miguel. *Technophysics*, **5**, 287-294 (1968).
 El campo de presión y la constitución interna de la Tierra y Luna. A. San Miguel y J. L. Amorós. *Publicaciones del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación provincial de Barcelona*, **29**, 5-22 (1974).
 Comparative model of the interior of the Earth and Moon. A. San Miguel & J. L. Amorós. *Publicaciones del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación provincial de Barcelona*, **31**, 73-96 (1976).

Historia de la cristalografía y mineralogía

Don Francisco Pardillo Vaquer. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **2**, 79-83 (1955).
 Notas sobre la historia de la Cristalografía y Mineralogía I. La controversia Haüy-Mitscherlich. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **57**, 5-30 (1959).
 Notas sobre la Historia de la Cristalografía y Mineralogía II. El "Lapidario" de Alfonso X el Sabio. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 131-155 (1961).
 Notas sobre la Historia de la Cristalografía y Mineralogía. III. La colección del caballero Franco Dávila y el origen del Real Gabinete de Historia Natural. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **61**, 9-37 (1963).

- Notas sobre la Historia de la Cristalografía y Mineralogía. IV. La Mineralogía española en la época del Barroco: Alonso Barba. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **61**, 167-186 (1963).
- Notas sobre la historia de la Cristalografía y Mineralogía V. La Mineralogía española en 1800: La "Orictognosia" de Andrés del Río. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **62**, 199-200 (1964).
- Memorial of Francisco Pardillo (May 19, 1884-July 19, 1955). J. L. Amorós. *American Mineralogist*, **58**, 383-384 (1973).
- Weiss y los orígenes de la Cristalografía. J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **75**, 23-33 (1977).
- Los orígenes de la Mineralogía: El Peri Liton de Teofrasto. J. L. Amorós y P. Tavira. *Rev. Mat. Proc. Geol.*, **1**, 119-148 (1983).
- La geología de Avicena (980/370-1037/428). J. L. Amorós, S. D. Eliasi y P. Tavira. *Rev. Mat. Proc. Geol.*, **5**, 11-42 (1987).

Instrumentación

- Cámara universal para la determinación de estructuras cristalinias por el método Weissenberg. J. M. Torroja, E. Pajares y J. L. Amorós. *Rev. Cienc. Apl.*, **9**, 250-254 (1949).
- La utilización de una nueva cámara Jong-Bouman. J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **47**, 161-166 (1951).
- A single crystal x-ray camera for direct recording of the reciprocal lattice. J. M. Torroja, E. Pajares y J. L. Amorós. *J. Sci. Instrum.*, **28**, 44-46 (1951).
- Una nueva cámara para el registro directo de la red recíproca. J. M. Torroja, J. L. Amorós y E. Pajares. *Rev. Cienc. Apl.*, **27**, 325-330 (1952).
- Focalización de rayos X con muestra plana. J. L. Amorós, J. M. Codina y J. M. Serra. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **49**, 97-106 (1953).
- La divergencia vertical del haz de rayos X en una cámara de focalización con preparado plano. J. M. Codina y J. L. Amorós. *Anal. R. Soc. Esp. Fis. Quim.*, **49**, 269-273 (1953).
- Nueva cámara de focalización con preparado plano. J. L. Amorós y J. M. Serra. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 43-52 (1953).
- Cámara de polvo para rayos X. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **1**, 87-92 (1954).
- Un difractor de rayos X para monocristal. J. L. Amorós, M. L. Canut, A. de Acha, M. Moreno y M. Guibert. *Rev. Cienc. Apl.*, **75**, 289-302 (1960).
- Un goniómetro Weissenberg vertical para altas y bajas temperaturas. J. L. Amorós, M. Guibert, M. L. Canut y F. Arrese. *Rev. Cienc. Apl.*, **15**, 289-297 (1961).
- Un difractor de rayos X de dos limbos para altas y bajas temperaturas y su utilización en medidas absolutas de difracción difusa. J. L. Amorós, A. Carbonell y M. L. Canut. *Rev. Cienc. Apl.*, **16**, 385-396 (1962).

Mineralogía

- Investigación de la superficie de un cristal de piritita. J. L. Amorós. *P. Dep. Crist. Min.*, **2**, 89-100 (1955).
- Estudio roentgenográfico de arenas. I. Técnica. J. L. Amorós y E. Sainz Amor. *P. Dep. Crist. Min.*, **2**, 201-222 (1955).
- Estudios sobre la superficie de los cristales. II. Recuperación de estructuras de baja temperatura. M. A. Brandoly & J. L. Amorós. En: *Trabajos de la 3ª Reunión Internacional sobre Reactividad de Sólidos*, **1**, 171-185 (1957).
- Procesos de silicificación en calizas magnesianas. J. Galván y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 5-13 (1958).
- Contribución al estudio de los minerales españoles. I. Caracterización roentgenográfica de las sepiolitas. J. Galván, M. Martín de los Ríos y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **56**, 427-444 (1958).

- La cinética de reacciones endotérmicas en minerales. I. Deshidratación del yeso. J. L. Amorós, J. Galván y P. Alonso. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **59**, 13-23 (1961).
- Composición mineralógica de las arenas de la Ría de Vigo. E. Sainz-Amor y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **60**, 177-194 (1962).
- Superficies de cristales. III. Superficies de crecimiento y fractura en la piritita. J. L. Amorós y M. T. Pascual. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **60**, 213-227 (1962).
- Superficies de cristales. IV. Distribución, generación y movimiento de dislocaciones en piritita. J. L. Amorós y M. T. Pascual. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **61**, 39-49 (1963).
- Deslizamiento cruzado ("cross-gliding") de dislocaciones en la superficie de la piritita. J. L. Amorós y M. T. Pascual. *Estud. Geol.*, **20**, 73-78, (1964).
- Spodumene from Namacotche (Alto Ligonha, Mozambique). R. Quadrado, J. L. Amorós. *García de Orta (Lisboa)*, **13**, 453-460 (1965).
- Esposdumena de Namacotche (Alto Ligonha, Mozambique). R. Quadrado y J. L. Amorós. *Estud. Geol.*, **22**, 25-30 (1966).
- Energy density and stability field of silicates. J. L. Amorós. *The Indian Mineralogist*, **10**, 8-15 (1969).
- Mecanismo de crecimiento de la forma (210) en cristales de piritita. J. L. Amorós y M. A. Caballero. *Estud. Geol.*, **33**, 281-286 (1977).
- Densidad de energía como medida de estabilidad de minerales. P. Saiz y J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (G)*, **77**, 127-140 (1979).
- Estudio de cristalizaciones naturales. I. Formación de cristales huecos y esqueléticos. J. L. Amorós y J. L. Barrera. *Estudios Geol.*, **35**, 253-258 (1979).
- Mineralogy of the oolitic deposits of the Ponferrada-Astorga zone (NW of Spain). R. Lunar y J. L. Amorós. *Economic Geol.*, **74**, 751-762 (1979).
- Textural aspects in bauxitas. S. Ordóñez y J. L. Amorós. *Travaux du Comité International pour l'Etude des Bauxites, de l'Alumine, et de l'Aluminium*, **15**, 49-54 (1979).
- Estudio de las cristalizaciones naturales. II. Evolución morfológica en cristales zonados. J. L. Amorós y J. L. Barrera. *Estudios Geol.*, **36**, 93-102 (1980).
- Jarosite: a silver bearing mineral of the Gossan of Rio Tinto (Huelva) and La Unión (Cartagena, Spain). J. L. Amorós, R. Lunar and P. Tavira. *Mineralium Deposita*, **16**, 205-213 (1981).
- Estudio mineralógico y geoquímico del gossan de los depósitos de Fe, Pb, Zn de la Unión (Sierra de Cartagena). R. Lunar, J. I. Manteca, P. Rodríguez y J. L. Amorós. *Boletín Geológico y Minero*, **93**, 244-253 (1982).
- Chalcopyrite-sphalerite textures in some Spanish syngenetic and epigenetic deposits: Guadarrama Mountains, Aznalcollar and La Unión. J. L. Amorós, J. A. López, R. Lunar, J. Martínez, J. Sierra & E. Vindel. En: *Syngeneses and epigenesis in the formation of mineral deposits*. Springer-Verlag Ed., pp. 18-27 (1984).
- Growth mechanism and surface defects in the (210) form in pyrite crystals. M. A. Caballero, M. González Mañas y J. L. Amorós. *Physics and Chemistry of Minerals*, **15**, 59-63 (1987).

Otros

- Radiobiología: ¿Una nueva ciencia de la vida?. J. L. Amorós. *Euclides*, **49**, 320-323 (1945).
- El barón von Uexkull y la "Teoría del Mundo ambiente". J. L. Amorós. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, **44**, 263-267 (1946).
- Las radiaciones mitogenéticas y el poder radiante de la sangre. J. L. Amorós. *Euclides*, **62**, 203-206 (1947).
- Los anillos de Liesegang como detectores de ondas biológicas. J. L. Amorós. *Euclides*, **67**, 429-433 (1947).

LIBROS Y MONOGRAFÍAS

Cristaloquímica. José Luis Amorós. *Monografías de Ciencia Moderna*, nº 26, 157 pp. C.S.I.C., Instituto Lucas Mallada, 1951.

Técnica del análisis cristaloquímico. José Luis Amorós. *Monografías de Ciencia Moderna*, nº 37, 129 pp. C.S.I.C., Instituto Lucas Mallada, 1952.

Yacimientos minerales de rendimiento económico. Alan M. Bateman. Traducción de la 2ª edición americana de José Luis Amorós Omega, cop., 1957.

Cristalofísica. I. Propiedades continuas. José Luis Amorós. *Ciencia y técnica*, 233 pp, Aguilar, 1958.

Manual de mineralogía (2.ª ed.). James D. Dana & Cornelius S. Hurlbut. Versión española de la 17.ª ed. norteamericana de José Luis Amorós. *Reverté*, cop., 1960.

Introducción al estado sólido: I. El cristal. José Luis Amorós. Depósito Legal M-10 403-1961, 344 pp. J. L. Amorós (Ed.), 1962.

La difracción difusa de los cristales moleculares. José Luis Amorós y M.ª Luisa Canut. 363 pp. C.S.I.C., 1965.

Molecular crystals : their transforms and diffuse scattering. José Luis Amorós & M.ª Luisa Canut. *Monographs in Crystallography*, 479 pp. John Wiley & Sons, cop., 1968.

Yacimientos minerales de rendimiento económico (1.ª edición y 3.ª impresión). Alan M. Bateman. Traducción de la 2.ª edición americana de José Luis Amorós. Omega, 1968.

Manual de mineralogía (2.ª edición y reimpresión). James D. Dana & Cornelius S. Hurlbut. Versión española de la 17.ª ed. norteamericana de José Luis Amorós. *Reverté*, cop., 1972.

El Cristal: una introducción al estado sólido (2.ª ed. revisada y ampliada). José Luis Amorós. ISBN 84-85218-03-5, 423 pp, Urania, D.L., 1975.

The Laue method. José Luis Amorós, Martin J. Buerger y M.ª Luisa Canut. ISBN 0-12-057450-0, 375 pp. Academic Press, 1975.

Cristalkit: Conjunto para la construcción de modelos atómicos de cristales. José Luis Amorós. 16 pp. *Ediciones Urania*, 1975.

La gran aventura del cristal: naturaleza y evolución de la ciencia de los cristales. José Luis Amorós. ISBN 84-7491-000-5, 327 pp, Editorial Universidad Complutense, 1978.

Geología. José Luis Amorós et al. *Manuales de Orientación Universitaria*. ISBN 84-207-1396-1, 623 pp. Anaya, D.L., 1979.

El Cristal: una introducción al estado (3.ª ed. revisada y ampliada). José Luis Amorós. ISBN 84-363-0553-1, 560 pp. Atlas, D.L., 1982.

El primer lapidario de Alfonso X el Sabio. Alfonso X, Rey de Castilla (1221-1284). Facsímil del códice h.I.15 de la Biblioteca de San Lorenzo el Real de El Escorial. Contiene: vol. I: Facsímil y vol. II: El códice y su texto por María Brey y Mariño, con comentarios científicos de Jose Luis Amorós. Ciencia en el Lapidario por Jose Luis Amorós. Arte en el Lapidario por Ana Domínguez Rodríguez. Jose Luis Amorós (Ed.). ISBN 84-85197-24-0. Edilan, 1982.

Forma y criterio: (un seminario). ISBN 84-7491-050-1, 133 pp. Jose Luis Amorós (Ed.). Universidad Complutense de Madrid, 1982.

Elementos de orictognosia: o del conocimiento de los fósiles dispuestos según los principios de A.G. Werner. Andrés Manuel del Río (1795-1805). Facsímil de la edición Mejicana de 1795 de la imprenta de Mariano Joseph de Zuñiga y Ontiveros. ISBN 84-7491-173-7. Jose Luis Amorós (Ed.). Universidad Complutense de Madrid, 1985.

Sistema de informatización de una biblioteca (SINBIB). M.ª Luisa Canut y José Luis Amorós. ISBN 84-7491-194-x, 224 pp. Editorial de la Universidad Complutense, 1986.

La Villa romana de Campo de Villavidel (León). Arqueología, Simetría, Color y Petrografía de los mosaicos. F. Mingarro, J. L. Avello, J. L. Amorós y M.C. López de Azcona. ISBN 84-7491-185-0. Editorial de la Universidad Complutense y Universidad de León, 1986.

Mizan Al Hikma. El libro de las balanzas. Abdolrahman Jazeni. Traducción de José Luis Amorós, Djavad Eliazi y Pedro Tavira. Resalat, 1987.

Anatomía de una cultura : cien años de la Revista de Menorca: 1888-1988. M.ª Luisa Canut y José Luis Amorós. ISBN 84-86752-11-6, 381 pp. Institut Menorquí d'Estudis, 1989.

El cristal: morfología, estructura y propiedades físicas (4.ª ed. ampliada). José Luis Amorós. ISBN 84-363-1079-9, 600 pp. Atlas, D.L., 1990.

Brujas, médicos y el Santo Oficio. José Luis Amorós. Institut Menorquí d'Estudis y Torre del Puerto, 1990.

Geología. José Luis Amorós et al. *Manuales de Orientación Universitaria*. ISBN 8420713961, 623 pp. Anaya, D.L., 1991.

Europa 1700: el gran tour del menorquín Bernardo José. José Luis Amorós, M.ª Luisa Canut y Fernando Martí Camps. ISBN 84-7628-110-2, 502 pp. Serbal, IME, 1993.

Lo que vio Bernardo José en su viaje por Flandes, Holanda y sur de Inglaterra. José Luis Amorós y M.ª Luisa Canut. ISBN 84-606-2610-5, 425 pp. Ministerio de Asuntos Exteriores, 1995.

Geología. José Luis Amorós et al. *Manuales de Orientación Universitaria*. ISBN 8420713961, 623 pp. Anaya, D.L., 1996.

Geología. José Luis Amorós et al. *Manuales de Orientación Universitaria*. ISBN 8420713961, 623 pp. Anaya, D.L., 1998.

Al creuer de la història. L'època i la vida de Bernat Josep Olives de Nadal. José Luis Amorós. ISBN 84-87026-87-7. Conselleria d'Educatió, Cultura i Esports, 1999.

Maestras y libros, 1850-1912: la primera Normal femenina de Baleares. M.ª Luisa Canut y José Luis Amorós. ISBN 84-7632-570-3, 466 pp. Universitat Illes Balears; Mahón. IME, 2000.

INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS DESARROLLADOS

- Cámara Weissenberg, modelo Torroja vertical (1949).
- Cámara Jong-Bouman, técnica de cono constante (1951).
- Cámara de focalización de Seeman-Bohlin-Phragmen con muestra plana (1953).
- Cámara de polvo Debye-Scherrer-Hull, modelo MacEwan (1954).
- Difractómetro de rayos X para monocristal (1960).
- Goniómetro Weissenberg vertical para altas y bajas temperaturas (1961).
- Aparato automático de refinamiento por zonas para sustancias de bajo punto de fusión (1961).
- Horno para obtención de monocristales de sustancias con punto de fusión bajo (1961).
- Difractómetro de dos limbos para altas y bajas temperaturas (1962).

REFERENCIAS

Fifty years of X-Ray Diffraction. (Dedicated to the international union of crystallography on the occasion of the commemoration meeting in Munich. July 1962). Ed. P.P. Ewald and numerous crystallographers. International Union of crystallography. Utrecht (Netherlands).

2004

Jornada Científica de la SEA

La Sociedad Española de Arcillas organizará una Jornada Científica (sesión póster y conferencias) coincidiendo con la Asamblea Anual. La reunión se celebrará en Madrid el día 15 de noviembre en el Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC, calle Serrano 115 duplicado.

2005

SEM-2005

La XXV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, se celebrará en la Universidad de Alicante. en la primera quincena del mes de julio. Los detalles de la reunión se comunicarán próximamente.

CONGRESOS INTERNACIONALES

2004

19 de octubre de 2004

The Mineralogical Society (of Great Britain and Ireland): Clay Minerals Group: New developments in the study of clay minerals and fine-grained materials

Abstract deadline: September 13, 2004

Details: Dr Javier Cuadros, Department of Mineralogy Natural History Museum, Cromwell Road, London, SW7 5BD
Tel: 020 7942 5543; Fax: 020 7942 5537

Email: j.cuadros@nhm.ac.uk

Web page:

<http://www.minersoc.org/pages/meetings/CMG/cmgoct04>

2005

6-7 de enero

Environmental Mineralogy, Geochemistry and Mineral Physics Groups: Mineralogical Society Winter Meeting

Bath, UK

Abstract deadline: ?

Details: E. Valsami-Jones

Email: E.Valsami-Jones@nhm.ac.uk

Web page:

<http://www.minersoc.org/pages/meetings/Environment.htm>

28 de mayo-2 de junio

American Crystallographic Association (ACA) Annual Meeting

Walt Disney World, FL, USA

Abstract deadline: ?

Details: Ed Collins, Program Chair

Email: edward_collins@med.unc.edu

Web page: <http://www.hwi.buffalo.edu/ACA/futuremeetings.html>

18 a 21 de agosto

Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 8th Biennial Meeting

Beijing, China

Abstract deadline: ?

Details: 8th SGA Biennial Meeting, Dr. Jingwen Mao-Secretary, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 26 Baiwanzhuang Road, Beijing 100037, China.
Phone: +86 10 68 32 73 33. Fax: +0086 - 10 68 33 63 58

Email: mail@sga2005.com

Web page: <http://www.sga2005.com>

21 a 27 de agosto

Claysphere: past, present and future: 13th International Clay Conference

Waseda University, Tokyo, Japan

Abstract deadline: end Feb. 2005

Details: Prof. T. Sakamoto

Tel: +81-86-252-8922

Email: icc13@das.ous.ac.jp

Web page: <http://www.soc.nii.ac.jp/cssj2/13ICC/>

23 a 31 de agosto

XX Congress of International Union of Crystallography

Florence-Italy

Abstract deadline: ?

Details: Congress Secretariat, XX Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography c/o Dipartimento di Energetica, University of Florence, via S. Marta 3, 50139 Firenze, Italy phone ++39-055-4796209, fax ++39-055-4796342

Email: iucr@iucr2005.it

Web page: www.iucr2005.it

23 a 25 de agosto

3rd FEZA Conference, Federation of European Zeolite Associations

Prague, Czech Republic

Abstract deadline: Oct. 1, 2004

Email: feza2005@jh-inst.cas.cz

Web page: <http://www.jh-inst.cas.cz/~feza2005/>

11 a 16 de septiembre

68th Annual Meteoritical Society Meeting

Gatlinberg, TN USA

Abstract deadline: ?

Details: Dr. Hap McSween

OR Kimberly Taylor (LPI Meeting Coordinator), Program Services Department, Lunar and Planetary Institute, 3600 Bay Area Boulevard, Houston TX 77058-1113, USA. Phone: (281) 486 2151. Fax: (281) 486 2160

Email: metsoc2005@utk.edu OR taylor@lpi.usra.edu

Web page: <http://geoweb.gg.utk.edu/2005/metsoc2005.html>

2006

23 a 28 de julio de 2006

19th General Meeting of the International Mineralogical Association

Kobe, Japan

For info: Contact Prof. T. Yamanaka

E-mail: b61400@center.osaka-u.ac.jp

Website: <http://www.wobs.univ-bpclermont.fr/imal/>

CURSOS

2005

19 a 28 de junio de 2005

EMU School: Mineral behaviour at extreme conditions

Heidelberg, Germany

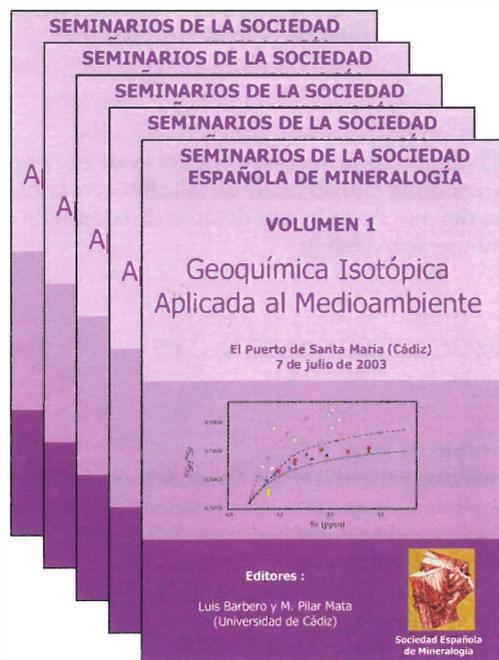
Email: EMU2005@min.uni-heidelberg.de

Web page:

http://www.univie.ac.at/Mineralogie/EMU/emusch_7.htm

Adquisición de publicaciones de la SEM y facsímil de *Los Minerales de España*

Existe la posibilidad para los miembros de la SEM que lo deseen, de adquirir las publicaciones de la Sociedad Española de Mineralogía y el libro *Los Minerales de España* de Salvador Calderón.

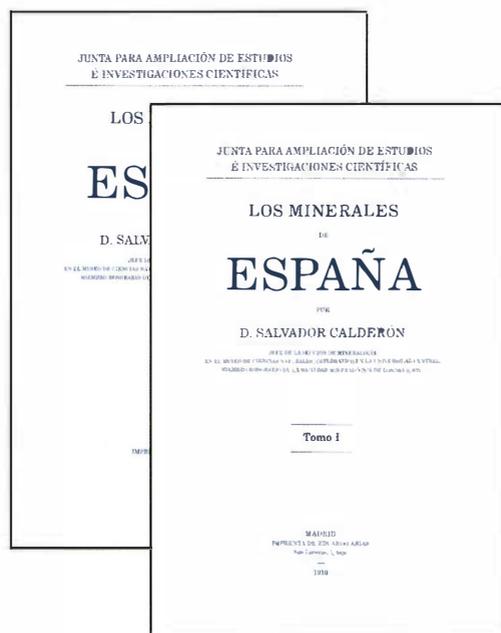


Colección completa del Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía.

Se podrá adquirir el lote completo, hasta fin de existencias al precio de 150 € (socios SEM) y 250 € (no socios).

Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía. Volumen 1. Geoquímica Isotópica Aplicada al Medio Ambiente.

Se podrá adquirir, hasta fin de existencias al precio de 15 € (socios SEM) y 18 € (no socios).

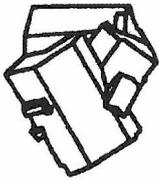


Edición especial del afamado libro *Los Minerales de España* de Salvador Calderón. Una edición especial realizada por la SEM en su Reunión en La Coruña en el año 2000, con motivo del 25 aniversario de la Sociedad.

El precio de los dos volúmenes indivisibles es de 40 € (socios SEM) y 60 € (no socios).

Hasta fin de existencias.

Interesados, dirigirse a: Secretaría de la Sociedad Española de Mineralogía
C/ Alenza, 1; -Fundación Gómez Pardo- D. 121. 28003 MADRID



Sociedad Española de Mineralogía

C/ Alenza, 1 (D-121)

Fundación Gómez Pardo - 28003-MADRID

☎ 627 681 108 sem@minas.upm.es

FICHA DE INSCRIPCIÓN

Nombre _____ Apellidos _____

_____ Fecha y lugar de nacimiento _____

Domicilio _____

Código postal, población y provincia _____

Teléfono part. _____ Teléfono trabajo y extensión _____

Fax _____ Correo electrónico _____ Profesión _____

Dirección del centro de trabajo _____

_____ Código postal, población y provincia _____

Preferencia para el envío de la correspondencia y la revista: domicilio particular ; dirección del trabajo

Tipo de socio (marcar con una X): ordinario ; estudiante ; colectivo ; protector ; vitalicio .

Temas de interés: Cristalografía ; Mineralogía ; Petrología ; Geoquímica ; Yacimientos ; Restauración ; Medio ambiente ; Inclusiones Fluidas ; Coleccionismo ; Otros _____

Firmas de dos socios avalistas

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Cuotas vigentes para el año 2004

Socio ordinario	72 €.	Socio Colectivo	250 €.
Socio estudiante	36 €.	(Empresas, Instituciones, etc.)	
(adjuntar documento acreditativo)		Socio sin revista EJM	50 €.
Socio Protector	500 €.	Socio Honorario:	exento

La cuota del año de ingreso debe abonarse en metálico, mediante cheque, transferencia bancaria a nombre de la Sociedad Española de Mineralogía (Caja Murcia 2043 0129 71 0200512387) o autorización de cargo en tarjeta de crédito VISA. Las de años sucesivos se efectuarán por domiciliación bancaria o autorización tarjeta VISA, cumplimentando estos datos:

✂ _____

Sr. Tesorero de la Sociedad Española de Mineralogía
Alenza 1, Despacho 121, 28003 MADRID

Le ruego tramite el cobro de las cuotas anuales de la Sociedad Española de Mineralogía, con cargo a:

TARJETA VISA N.º: (16 dígitos) _____ Fecha caducidad: _____
o a la siguiente cuenta bancaria:

BANCO/CAJA DE AHORROS _____ Código (4 dígitos) _____

Sucursal/población _____

Código oficina (4+2 dígitos) _____ N.º cuenta (10 dígitos) _____

Firmado (nombre y apellidos) _____

✂ _____

ENVIAR ESTA PARTE AL BANCO

Sr. Director del Banco / Caja de Ahorros _____

Sucursal y dirección _____

Le ruego atienda el cobro de la cuota anual de la Sociedad Española de Mineralogía, con cargo a la cuenta bancaria siguiente:.

N.º cuenta completo (20 dígitos) _____

Firmado (nombre y apellidos) _____

Domicilio _____

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MINERALOGÍA

JUNTA DIRECTIVA DE LA SEM 2002-2004

(elegida en Asamblea General de Socios celebrada en Logroño, 16 de septiembre de 2002)

Presidente:	Emilio Galán Huertos	Universidad de Sevilla	egalan@us.es
Vicepresidente:	Guillermo Corretgé Castañón	Universidad de Oviedo	corretge@geol.uniovi.es
Tesorero:	Rafael Arana Castillo	Universidad de Murcia	rafarana@fcu.um.es
Secretario:	Carlos Sánchez Jiménez	Universidad de Castilla-La Mancha	carlos.sanchezj@uclm.es
Vicesecretaria:	Carmen Galindo Francisco	Universidad Complutense, Madrid	cgalindo@geo.ucm.es
Vocales:	Benjamín Calvo Pérez	Universidad Politécnica de Madrid	subdir_re@minas.upm.es
	Angels Canals Sabaté	Universidad de Barcelona	angels@geo.ub.es
	Constanza Fernández-Nieto Fernández	Universidad de Zaragoza	constanza@posta.unizar.es
	José López Ruiz	CSIC, Madrid	lopezruiz@mncn.csic.es
	Fernando Nieto García	Universidad de Granada	nieto@ugr.es
	Manuel Prieto Rubio	Universidad de Oviedo	mprieto@geol.uniovi.es
	Magdalena Rodas González	Universidad Complutense, Madrid	rodas@geo.ucm.es
	Fernando Rull Pérez	Universidad de Valladolid	rull@fmc.uva.es
	Gabriel Ruiz de Almodóvar Sel	Universidad de Huelva	almodovar@uhu.es
	Francisco Velasco Roldán	Universidad del País Vasco, Leioa	nppverof@lg.ehu.es

REPRESENTANTES EN ORGANISMOS INTERNACIONALES

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE MINERALOGÍA (IMA)

Representante español: Emilio Galán Huertos

Representantes en Comisiones y Grupos de Trabajo:

Comisión de Mineralogía Aplicada	Emilio Galán	Universidad de Sevilla
Comisión de Materiales Gemológicos	Carlos de la Fuente	Universidad de Barcelona
Comisión de Crecimiento Mineral y Procesos de Intercara	Manuel Prieto	Universidad de Oviedo
Comisión de Museos	Benjamín Calvo	Universidad Politécnica de Madrid
Comisión de Nuevos Minerales y Nomenclatura Mineral	Nicolás Velilla	Universidad de Granada
Comisión de Mineralogía de Menas	Purificación Fenoll/Fernando Gervilla	Universidad de Granada
Grupo de Trabajo de Astromineralogía	Fernando Rull	Universidad de Valladolid
Grupo de Trabajo de Inclusiones Minerales	Salvador Morales	Universidad de Granada

UNIÓN EUROPEA DE MINERALOGÍA (EMU)

Vicepresidenta: Purificación Fenoll (Universidad de Granada)

EUROPEAN JOURNAL OF MINERALOGY

Editor Jefe: Fernando Nieto (Universidad de Granada)



Sociedad Española de Mineralogía

C/ Alenza, 1 (D-121)

Fundación Gómez Pardo 28003-MADRID

sem@minas.upm.es (www.ehu.es/sem)