

# Manual de Mineralogía

## Vol. 2

cuarta edición

Basado en la obra de J. D. Dana

Cornelis Klein \ Cornelius S. Hurlbut, Jr

EDITORIAL REVERTÉ



# Manual de Mineralogía

## Vol. 2

cuarta edición

Basado en la obra de J. D. Dana

**Cornelis Klein**

The University of New Mexico

**Cornelius S. Hurlbut, Jr**

Harvard University



EDITORIAL  
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

*Título de la obra original:*

**Manual of Mineralogy, 21<sup>st</sup> Edition**

*Edición original en lengua inglesa publicada por*

**John Wiley & Sons, Inc., New York, USA**

Copyright © by John Wiley & Sons, Inc.

*Edición en español:*

© Editorial Reverté, S. A., 1997

Edición en papel

ISBN: 978-84-291-4606-6 Tomo I

ISBN: 978-84-291-4607-3 Tomo II

ISBN: 978-84-291-4608-0 Obra completa

Edición e-book (PDF)

ISBN: 978-84-291-9455-5 Tomo I

**ISBN: 978-84-291-9456-2 Tomo II**

*Versión española por*

**Dr. J. Aguilar Peris**

Catedrático de Terminología de la Universidad Complutense de Madrid

**Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

La mineralogía es una parte fundamental de la educación de los alumnos de geología y puede también formar parte de un currículum en ciencia de los materiales. Para ello se requiere el desarrollo de uno o más cursos de mineralogía. Estos cursos se consideran requisitos previos para cursar otros de nivel superior en petrología, geoquímica, geología económica o en la propia mineralogía. El primer curso de esta ciencia debe tratar tanto los conceptos básicos como los aspectos descriptivos de los minerales más comunes. Generalmente los conceptos y principios básicos se imparten en las clases teóricas, mientras que los aspectos descriptivos y el estudio de las muestras de minerales y rocas se tratan generalmente en el laboratorio. Debido a esta dualidad (conceptos frente a materiales descriptivos), los profesores suelen tener una preferencia personal a la hora de poner el énfasis en uno u otro aspecto. Por ello, algunos textos destacan especialmente el orden interno de los cristales, sus propiedades químicas y los aspectos estructurales de los cristales, así como la evaluación cuantitativa de las propiedades físicas, tales como el color, el magnetismo, la dureza, la densidad y los parámetros ópticos. En cambio, otros textos pueden conducir a los estudiantes hacia un trabajo exhaustivo de laboratorio, relacionado con los aspectos más descriptivos y determinativos de la mineralogía. Este último enfoque prepara mejor al estudiante para la petrología de muestreo a costa de una menor preparación en los aspectos más conceptuales de la ciencia.

En esta nueva edición (cuarta versión española, correspondiente a la 21ª edición americana del *Manual de Mineralogía*) intentaremos de nuevo conseguir un equilibrio entre conceptos y principios por una parte, y entre el tratamiento descriptivo y sistemático de la mineralogía por otra. Este objetivo equilibrado requiere el tratamiento de muchos temas. No todos ellos pueden tratarse en un curso de un año y mu-

cho menos en un curso semestral o trimestral. En esta edición, los capítulos 2 a 9 se refieren a conceptos, principios y técnicas. Los capítulos 10 a 13 tratan de la mineralogía sistemática y descriptiva. El capítulo 14 es una introducción a la petrología y el Capítulo 15 ofrece una introducción a las gemas más comunes.

Esta edición incorpora importantes revisiones y adiciones al tratamiento ofrecido en la edición anterior. Así se incorpora un capítulo casi totalmente nuevo sobre “Química de cristales” (Capítulo 4) y una importante revisión de “Química de minerales” (incorporada al Capítulo 5); incluye un nuevo capítulo sobre “Diagramas de estabilidad de los minerales” (Capítulo 9) a fin de preparar al estudiante para el uso extensivo de estos diagrama en los capítulos subsiguientes (capítulos 10 a 14) sobre “Mineralogía sistemática” y “Conjuntos minerales”; presenta un tratamiento más lógico de “Morfología” (Capítulo 2) que en la edición anterior a costa de un menor énfasis sobre la simetría interna en el Capítulo 2; en el Capítulo 3 “Orden y simetría interna” se incorpora una nueva secuencia lógica y bien ilustrada del orden y la simetría en una, dos y tres dimensiones; por último, en los capítulos que tratan la “Mineralogía sistemática” (Capítulos 10 a 13) se eliminan las referencias sobre información poco usada (por ejemplo, ángulos interfaciales, relaciones axiales, y datos químicos obtenidos por soplete) y se incluye información actualizada sobre yacimientos minerales importantes. A lo largo de esta nueva edición se han incluido abundantes nuevas ilustraciones para una mejor comprensión de los conceptos abordados en el texto.

El principal tema unificador de este texto, al igual que en las ediciones anteriores, es el de “Química de cristales”, es decir, el estudio y aclaración de las relaciones entre composición química, estructura interna y propiedades físicas de la

materia cristalina. La materia expuesta en los ocho primeros capítulos ha sido dispuesta de modo que el profesor pueda elegir aquellos capítulos que considere más esenciales. Resultará imposible en la mayor parte de los cursos cubrir la materia expuesta en estos capítulos. Por ejemplo, los capítulos 7 y 8 sobre mineralogía de rayos X y mineralogía óptica respectivamente, no juegan por regla general un papel importante en un curso de introducción a la mineralogía. Sin embargo, se incluyen estos temas porque en el tratamiento subsiguiente sobre “mineralogía sistemática”, la descripción de cada especie mineral incluye un listado de diagnósticos por rayos X y propiedades ópticas. De igual modo, el Capítulo 15, sobre gemas, puede no ser esencial en un curso específico. Sin embargo, si el estudiante desea conocer cuáles son las técnicas de rayos X y ópticas utilizadas para la determinación de los distintos parámetros y qué cualidades únicas distinguen las piedras preciosas de los minerales ordinarios, la exposición pertinente puede localizarse en los capítulos apropiados.

El Capítulo 1 proporciona una breve introducción a la historia de la mineralogía, a las fuentes de su literatura y a algunos de los desarrollos recientes sobre la instrumentación que permite la evaluación química estructural de los materiales cristalinos a escala muy pequeña. Incluye también una relación de aquellos científicos que han realizado contribuciones reconocidas internacionalmente en los campos de la mineralogía, petrología y geoquímica en las últimas cinco décadas.

En el Capítulo 2 trata de la forma externa y de la simetría de los cristales, mientras que el orden interno se trata en el Capítulo 3. La exposición dentro del capítulo se verifica de modo que el estudio de la forma externa y la deducción de la simetría correspondiente pueda cubrirse sin referencia a la proyección estereográfica, si el profesor así lo desea. Esta proyección se introduce en la página 60, después de la cual cada uno de los sistemas cristalinos (y clases de cristales) se trata sistemáticamente con estereogramas. Al igual que en la edición anterior (20ª edición americana), el tratamiento sistemático de la morfología cristalina comienza con el cristal de más baja simetría y termina con el sistema de simetría máxima. Sin embargo, dentro de cada sistema cristalino, las clases de cristales se disponen en orden de simetría decreciente. Aunque esto parece ilógico respecto a la simetría creciente de los sistemas cristalinos, esta secuencia de clases de cristales es menos complicada, porque las clases de menor simetría pueden describirse como casos especiales de la clase de máxima simetría. Además, si se carece del tiempo su-

ficiente para el desarrollo de todas las clases de cristales, pueden tratarse al menos aquéllas de máxima simetría.

El Capítulo 3 trata del orden en diagramas ordenados de una, dos y tres dimensiones y proporciona una introducción a los grupos espaciales. La secuencia lógica de discusión de los aspectos de simetría y traslación de diagramas de una, dos y tres dimensiones ha sido muy revisada y mejorada en esta edición. Esperamos que esto permita al estudiante alcanzar una mejor comprensión de los componentes de simetría única y traslación de filas, de distribuciones planarias (redes planarias y grupos puntuales) distribuciones ordenadas de tres dimensiones (incluyendo el desarrollo de las redes de Bravais y su relación con los grupos espaciales). El último objetivo de este capítulo es familiarizar al estudiante con las interrelaciones que existen entre la morfología externa, la estructura interna y la notación del grupo espacial. Tal conexión está elaborada con considerable detalle para tres minerales comunes. La exposición del orden ideal en tres dimensiones se continúa con una exposición muy amplia del isoestructuralismo, polimorfismo, politipismo, el estado metamórfico y las complejidades y defectos estructurales. El análisis de la morfología (Capítulo 2) precede al tratamiento del orden interno (Capítulo 3). Hemos tomado esta decisión porque muchos estudiantes encuentran más fácil localizar la simetría en objetos físicos (por ejemplo, modelos cristalinos) que en diseños más abstractos (tales como diagramas de motivos). Sin embargo, esta secuencia no es necesaria en un curso específico, ya que ninguno de los dos capítulos es requisito previo para el estudio del otro.

El Capítulo 4, sobre “Cristaloquímica”, ofrece un tratamiento completamente revisado y mucho más amplio del tema. Para aquellos estudiantes con un buen conocimiento previo en química, este capítulo ofrece una buena revisión sobre el tema, los estudiantes con menor formación química encontrarán una introducción eficiente y de fácil comprensión. El texto avanza desde una exposición sobre el átomo, el sistema periódico, el modelo atómico de Bohr, el modelo de Schrödinger a través de la notación cuántica y la configuración electrónica, sigue con los conceptos de ion, radios iónicos y atómicos, coordinación, relaciones radiales, mecanismos de enlace químico y termina con una introducción a los tipos estructurales, cambios de tipos estructural en función de la profundidad creciente en la Tierra y aspectos de la radiatividad.

El Capítulo 5, sobre “Química mineral”, ofrece una supervisión introductoria de las técnicas de análisis químico más usadas, tales como análisis químico húmedo, espectroscopía de absorción atómica, fluorescencia de rayos X, técni-

cas de microsonda electrónica y análisis espectrográfico óptico. A continuación se expone una discusión detallada de la variación en composición de minerales, como resultado de diversos mecanismos de soluciones sólidas. Otro concepto importante es el de exsolución o desmezcla previo a una discusión extensa con ejemplos de nuevos cálculos de análisis minerales y diversos esquemas de representaciones gráficas de datos químicos.

El Capítulo 6 sobre “Propiedades físicas de los minerales” trata de propiedades como la exfoliación, dureza, densidad, color y magnetismo. En este capítulo se han renovado completamente las secciones de color y magnetismo a base de los conceptos químicos cristalinos desarrollados en el Capítulo 4.

Los Capítulos 7 y 8 tratan específicamente de la cristalografía de rayos X y de las propiedades ópticas de los cristales, son muy semejantes a los de la edición anterior.

El Capítulo 9, “Diagramas de estabilidad de los minerales” es totalmente nuevo y suministra una introducción a los diagramas de estabilidad comúnmente utilizados para ilustrar los equilibrios de los minerales. Comienza con una breve introducción a algunos aspectos básicos de la termodinámica, pero su parte principal está dedicada a una comprensión básica de diagramas de uno, dos y tres (o más) componentes, diagramas para reacciones minerales que implican  $H_2O$  ó  $CO_2$  y representaciones Eh-pH. Está ilustrado abundantemente con ejemplos de relaciones de estabilidad de minerales que comúnmente forman parte de la composición de las rocas, la mayoría de los cuales se muestran de nuevo en capítulos subsiguientes (del 10 al 13) que tratan de “Mineralogía sistemática”. Este nuevo Capítulo 9 está diseñado específicamente para suministrar al estudiante un conocimiento básico de la estabilidad de los minerales *antes* de la exposición sobre minerales específicos y los aspectos interpretativos de su ocurrencia.

Los Capítulos 10 a 13 tratan de las descripciones sistemáticas de unos 200 minerales, así como de sus asociaciones petrológicas y las localizaciones geográficas de las más importantes localidades minerales. La descripción de cada grupo mineral o serie principal de minerales vienen precedida por una sinopsis de las características más notables de su química y estructura. Cada una de las aproximadamente 200 descripciones contiene una sección sobre “Composición y estructura”. Las estructuras minerales vienen ilustradas con las mejores representaciones disponibles poliédricas y geométricas. A estos cuatro capítulos se han añadido aproximadamente 40 nuevas ilustraciones (incluyendo representaciones de estructuras, fotografías del microscopio

electrónico de alta resolución, reproducciones de especies minerales y dibujos de línea). Cada una de las descripciones minerales se ha diseñado eliminando los datos de los ángulos interfaciales, relaciones axiales y análisis de soplete.

El Capítulo 14, sobre “Conjuntos minerales”, presenta una breve introducción a la petrología y su relación con la mineralogía. La exposición incluye esquemas actualizados de clasificación de tipos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. También se incluyen representaciones gráficas de conjuntos de rocas metamórficas.

El Capítulo 15 proporciona una breve supervisión de las gemas más corrientes y las técnicas usadas en gemología. Contienen cuatro láminas en color de gemas y minerales de gemas. Este tema ha sido incluido en el texto –normalmente no se incluye en los textos mineralogía– por la siguiente razón: Los estudiantes de mineralogía terminan sus estudios de esta ciencia y generalmente no saben más sobre las gemas que un profano en este tema. Esto es desafortunado, pero también innecesario. Muy pocos cursos de mineralogía, si es que los hay, incluirán una importante exposición sobre gemas y mucho menos tendrán un laboratorio sobre esta especialidad. Sin embargo, el estudiante encontrará en este capítulo el tratamiento necesario (sin referencia a ningún curso) para convertirse en un cliente bien informado de cualquier establecimiento o joyería de piedras preciosas.

Al final de cada capítulo se ofrecen referencias seleccionadas que pueden orientar al estudiante dentro la literatura más relevante sobre el tema. Las tablas determinativas (Apéndice) y el Índice de minerales, todo ello actualizado, son especialmente útiles para el estudio en el laboratorio y para la identificación de minerales desconocidos.

Resumiendo, al escribir esta edición del *Manual de Mineralogía* nuestro objetivo era el de crear un libro de introducción a la mineralogía que cumpliera dos propósitos: (1) proporcionar al estudiante un conocimiento actualizado de los conceptos y principios básicos de cristalografía, química de cristales, química general, aspectos físicos de los minerales y conceptos de petrología introductorios, esenciales para comprender la génesis de los minerales y rocas; y (2) suministrar una referencia para la identificación rápida y certera de los minerales comunes en el campo y en el laboratorio. Este libro ha sido diseñado para ambos objetivos: un curso de iniciación mineralogía y una referencia mineralógica permanente. Así se ha intentado, con vistas a los alumnos que realizarán posteriores trabajos en mineralogía, así como a aquéllos que seguirán un solo curso sobre este tema.

## RECONOCIMIENTOS

---

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a diversos colegas que nos proporcionaron (1) revisiones de la edición 20 del Manual de Mineralogía y/o (2) revisiones de los primeros seis capítulos de la presente edición:

Marc J. Defant, University of South Florida,  
 Malcolm D. Hill, Northeastern University,  
 David M. Jenkins, State University of New York at Binghamton,  
 Bruce M. Loeffler, Colorado College, y  
 Paul H. Ribbe, Virginia Polytechnic Institute and State University.

También agradecemos a los siguientes colegas que revisaron secciones específicas de este texto:

Andrew R. Campbell, New Mexico Institute of Mining and Technology,  
 Carl A. Francis, Harvard University,  
 John Husler, University of New Mexico,  
 Gregory J. McCarthy, North Dakota State University,  
 Henry O. A. Meyer, Perdue University,  
 William C. Metropolis, Harvard University,  
 Malcolm Ross, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, y  
 Crayton J. Yapp, University of New Mexico.

Muchas de las nuevas fotografías de estructuras obtenidas con el microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HRTEM) y de muestras minerales para esta edición fueron generosamente proporcionadas por

Jillian F. Banfield, University of Wisconsin,  
 Peter R. Buseck, Arizona State University,  
 Rodney C. Ewing, University of New Mexico,  
 Carl A. Francis, Harvard University,  
 Ermanno Galli, Instituto di Mineralogia e petrologia, Modena, Italia,  
 Eugene A. Smelick, Princeton University,  
 David R. Veblen, Johns Hopkins University, y  
 LuMin Wang, University of New Mexico.

El procesado por ordenador de la mayor parte de las revisiones de esta edición fue en su mayor parte realizado con eficacia y entrega por Mabel T. Chavez de Santo Domingo Pueblo.

C. K. agradece especialmente a su mujer, Angela, por su continuo apoyo.

*Cornelis Klein*  
*Cornelius S. Hurlburt, Jr.*

# ÍNDICE ABREVIADO

## TOMO I

---

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2	CRISTALOGRAFÍA	17
CAPÍTULO 3	CRISTALOGRAFÍA: ORDEN INTERNO Y SIMETRÍA	117
CAPÍTULO 4	CRISTALOQUÍMICA	185
CAPÍTULO 5	QUÍMICA MINERAL	241
CAPÍTULO 6	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES	275
CAPÍTULO 7	CRISTALOGRAFÍA DE RAYOS X	303
CAPÍTULO 8	PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES	319
CAPÍTULO 9	DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD MINERAL	341

## TOMO II

---

CAPÍTULO 10	MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte I: elementos nativos, sulfuros y sulfosales	369
CAPÍTULO 11	MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte II: óxidos, hidróxidos y haluros	411
CAPÍTULO 12	MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte III: carbonatos, nitratos, boratos, sulfatos, cromatos, volframatos o tungstatos, molibdatos, fosfatos, arseniatos y vanadatos	447
CAPÍTULO 13	MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte IV: silicatos	489
CAPÍTULO 14	ASOCIACIONES DE MINERALES: INTRODUCCIÓN A LA PETROLOGÍA Y MINERALES FILONIANOS	619
CAPÍTULO 15	MINERALES GEMA	657
APÉNDICE	TABLAS DETERMINATIVAS	A-1
	ÍNDICE DE MINERALES	IM-1
	ÍNDICE ALFABÉTICO	I-1



# ÍNDICE ANALÍTICO

## CAPÍTULO 10 Mineralogía sistemática

---

### Parte I: elementos nativos, sulfuros y sulfosales

<b>10.1 Clasificación mineral</b>	<b>370</b>
<b>10.2 Elementos nativos</b>	<b>371</b>
10.2.1 Metales nativos	371
10.2.2 Semimetales nativos	378
10.2.3 No-metales nativos	378
<b>10.3 Sulfuros</b>	<b>388</b>
<b>10.4 Sulfosales</b>	<b>409</b>
Referencias y lecturas sugeridas	410

## CAPÍTULO 11 Mineralogía sistemática

---

### Parte II: óxidos, hidróxidos y haluros

<b>11.1 Óxidos</b>	<b>412</b>
11.1.1 Grupo de las hematitas $X_2O_3$	418
11.1.2 Grupo del rutilo, $XO_2$	422
11.1.3 Grupo de las espinelas, $XY_2O_4$	426
<b>11.2 Hidróxidos</b>	<b>434</b>
<b>11.3 Haluros</b>	<b>441</b>
Referencias y lecturas sugeridas	446

## CAPÍTULO 12 Mineralogía sistemática

---

### Parte III: carbonatos, nitratos, boratos, sulfatos, cromatos, volframatos o tungstatos, molibdatos, fosfatos, arseniatos y vanadatos

<b>12.1 Carbonatos</b>	<b>448</b>
12.1.1 Grupo de la calcita	448

12.1.2 Grupo del aragonito	456
12.1.3 Grupo de la dolomita	461

<b>12.2 Nitratos</b>	<b>464</b>
<b>12.3 Boratos</b>	<b>465</b>
<b>12.4 Sulfatos y cromatos</b>	<b>469</b>
12.4.1 Grupo de la baritina	471
<b>12.5 Volframatos (o tungstatos) y molibdatos</b>	<b>477</b>
<b>12.6 Fosfatos, arseniatos y vanadatos</b>	<b>480</b>
12.6.1 Grupo del apatito	482
Referencias y lecturas sugeridas	488

## CAPÍTULO 13 Mineralogía sistemática

---

### Parte IV: silicatos

<b>13.1 Nesosilicatos</b>	<b>495</b>
13.1.1 Grupo de la fenaquita	498
13.1.2 Grupo del olivino	498
13.1.3 Grupo del granate	501
13.1.4 Grupo $Al_2SiO_5$	506
13.1.5 Grupo de la humita	510
<b>13.2 Sorosilicatos</b>	<b>514</b>
13.2.1 Grupo de la epidota	516
<b>13.3 Ciclosilicatos</b>	<b>520</b>
<b>13.4 Inosilicatos</b>	<b>527</b>
13.4.1 Grupo de los piroxenos	527
13.4.2 Grupo de los piroxenoides	537
13.4.3 Grupo de los anfíboles	541
<b>13.5 Filosilicatos</b>	<b>554</b>
13.5.1 Grupo de las serpentinas	562
13.5.2 Grupo de minerales arcillosos	568
13.5.3 Grupo de las micas	571
13.5.4 Grupo de las cloritas	577

<b>13.6 Tectosilicatos</b>	<b>581</b>
13.6.1 Grupo SiO <sub>2</sub>	582
13.6.2 Grupo de los feldespatos	589
13.6.3 Grupo de los feldspatoides	602
13.6.4 Serie de las escapolitas	607
13.6.5 Grupo de las zeolitas	609
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>617</b>

## CAPÍTULO 14 Asociaciones de minerales: introducción a la petrología y minerales filonianos

<b>14.1 Rocas ígneas</b>	<b>620</b>
14.1.1 Yacimientos generales y textura	621
14.1.2 Composición química	622
14.1.3 Clasificación	622
14.1.4 Composición mineralógica	626
14.1.5 Rocas plutónicas	626
14.1.6 Rocas volcánicas	629
<b>14.2 Rocas sedimentarias</b>	<b>632</b>
14.2.1 Composición química	633
14.2.2 Composición mineralógica	633
14.2.3 Clasificación	634
<b>14.3 Rocas metamórficas</b>	<b>644</b>
14.3.1 Composición química	645
14.3.2 Composición mineralógica	646
<b>14.4 Filones y minerales filonianos</b>	<b>654</b>
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>656</b>

## CAPÍTULO 15 Minerales gema

<b>15.1 Minerales gema</b>	<b>658</b>
<b>15.2 Propiedades de las gemas</b>	<b>658</b>
<b>15.3 Tipos de tallas en las gemas</b>	<b>659</b>
<b>15.4 Usos primitivos de las gemas</b>	<b>660</b>
<b>15.5 Gemas importantes: ayer y hoy</b>	<b>661</b>
15.5.1 Diamante	661
15.5.2 Berilo	661
15.5.3 Rubí y zafiro	662
15.5.4 Ópalo	663
15.5.5 Jade	663
15.5.6 Crisoberilo	664
15.5.7 Topacio	664
15.5.8 Turmalina	664
15.5.9 Cuarzo	665
15.5.10 Turquesa	665
15.5.11 Granate	665
15.5.12 Circón (o zircón)	665
15.5.13 Olivino	666

<b>15.6 Propiedades de las gemas e instrumentos para su determinación</b>	<b>666</b>
15.6.1 Observación	666
15.6.2 Lupa de mano	666
15.6.3 Microscopio	666
15.6.4 Polariscopio	667
15.6.5 Índice de refracción y refractómetro	667
15.6.6 Dispersión	668
15.6.7 Índices de refracción de gemas anisótropas	669
15.6.8 Pleocroísmo	670
15.6.9 Fluorescencia	670
15.6.10 Filtros de color	670
15.6.11 Espectroscopio	671
15.6.12 Propiedades físicas	671
15.6.13 Difracción de rayos X	672
<b>15.7 Gemas sintéticas</b>	<b>673</b>
15.7.1 Proceso Verneuil	673
15.7.2 Proceso de Czochralski	673
15.7.3 Crecimiento por fundente	673
15.7.4 Crecimiento hidrotermal	673
<b>15.8 Tratamiento de gemas</b>	<b>674</b>
15.8.1 Teñido	674
15.8.2 Tratamiento térmico	674
15.8.3 Irradiación	674
<b>15.9 Gemas sintéticas y tratadas</b>	<b>674</b>
15.9.1 Berilo	674
15.9.2 Crisoberilo	675
15.9.3 Corindón (rubí y zafiro)	675
15.9.4 Diamante	675
15.9.5 Jade	676
15.9.6 Ópalo	677
15.9.7 Cuarzo	677
15.9.8 Rutilo	677
15.9.9 Espinela	677
15.9.10 Turquesa	678
<b>15.10 Gemas manufacturadas sin contrapartida natural</b>	<b>678</b>
15.10.1 Granate	678
15.10.2 Titanato de estroncio, SrTiO <sub>3</sub>	678
15.10.3 Circonita cúbica (Zirconita o zirconia)	678
<b>Referencias y lecturas sugeridas</b>	<b>679</b>

## APÉNDICE TABLAS DETERMINATIVAS A-1

<b>Tabla A.1 Brillo: metálico o submetálico</b>	<b>A-3</b>
<b>Tabla A.2 Minerales ordenados según su peso específico</b>	<b>A-35</b>
<b>Tabla A.3 Minerales no opacos y algunos compuestos sintéticos ordenados según el índice de refracción creciente</b>	<b>A-37</b>

## ÍNDICE DE MINERALES IM-1

## ÍNDICE ALFABÉTICO I-1

## CAPÍTULO 10

## MINERALOGÍA SISTEMÁTICA

### PARTE I: ELEMENTOS NATIVOS, SULFUROS Y SULFOSALES

10.1 CLASIFICACIÓN MINERAL	370
10.2 ELEMENTOS NATIVOS	371
10.2.1 METALES NATIVOS	371
10.2.2 SEMIMETALES NATIVOS	378
10.2.3 NO-METALES NATIVOS	378
10.3 SULFUROS	388
10.4 SULFOSALES	409
REFERENCIAS Y LECTURAS SUGERIDAS	410

Este capítulo y los tres siguientes incluyen las descripciones de todos los minerales comunes y de aquéllos más raros que poseen una importancia económica grande. La lista, que alcanza un número aproximado de 200, es relativamente pequeña, si se compra con los 3500 que han sido descritos y reconocidos por los mineralogistas como especies válidas. Se cita también el nombre de algunos minerales que no se describen, así como su composición química. Las descripciones de los siguientes minerales<sup>1</sup> tienen un esquema de presentación común. Los epígrafes usados y los datos de cada uno de ellos se expresan a continuación:

**Cristalografía.** Bajo este título se dan las siguientes informaciones cristalográficas:

Sistema cristalino y símbolo de la clase cristalina.

Características cristalográficas usualmente observadas por la simple inspección, tales como el hábito, maclas y formas.

Otros datos interesantes son detallados sin subtítulos. Como ejemplo, consideremos los datos siguientes para la cerusita:

*Pmcn* (grupo espacial)  $a = 5,15$ ,  $b = 8,47$ ,  $c = 6,11$  Å (dimensiones de la celda unidad),  $Z = 4$  (peso de la celda unidad).

*d's*: 3,59(10), 3,50(4), 3,07(2), 2,49(3), 2,08(3) (líneas de rayos X más destacadas en unidades angström con intensidades relativas, entre paréntesis).

**Propiedades físicas.** *Exfoliación*, **H** (dureza), **G** (densidad), *Brillo*, *Color*, y propiedades *Ópticas* (breve resumen de datos ópticos).

**Composición y estructura.** Composición química, usualmente con los porcentajes de los elementos u óxidos y los elementos que pueden sustituir a aquéllos que son dados en la fórmula química. Breve descripción de los aspectos más importantes de la estructura cristalina.

**Diagnóstico.** Las propiedades sobresalientes y los ensayos que ayudan a reconocer el mineral y distinguirlo de otros.

**Yacimiento.** Una breve información del modo como se presenta el mineral y características de su asociación con otros.<sup>2</sup> Localidades en donde se encuentran o han encontrado yacimientos notables por su cantidad o calidad. De aquellos minerales que se encuentran en abundancia en todo el mundo, se citan principalmente lugares de EE.UU. y España.

**Empleo.** En los minerales de importancia económica, se da una breve descripción de sus aplicaciones.

**Especies similares.** La similitud de otros minerales con aquél cuya descripción se ha dado puede basarse tanto en su composición química como en su estructura cristalina.

## 10.1 CLASIFICACIÓN MINERAL

La composición química ha sido la base de la clasificación de los minerales desde la mitad del siglo diecinueve. De acuerdo con este esquema los minerales se dividen en clases, según el anión o grupo aniónico dominante (por ej., óxidos, haluros, sulfuros, silicatos, etc.). Existen una serie de razones que justifican este criterio para la clasificación de los minerales. En primer lugar, los minerales que poseen el mismo anión o grupo aniónico dominante en su composición poseen semejanzas familiares inconfundibles, más clara y fuertemente marcadas que aquéllas que comparten los minerales que poseen el mismo catión dominante. Así, los carbonatos se parecen entre sí más que los minerales de cobre. En segundo lugar, los minerales relacionados por el dominio del mismo anión tienden a presentarse juntos en el mismo lugar o en yacimientos geológicos semejantes. Así, los sulfuros se presentan en asociación mutua próxima en depósitos del tipo de vetas o reemplazamiento, mientras que los silicatos forman la mayor parte de las rocas de la corteza terrestre. En tercer lugar, este esquema de clasificación de los minerales está en concordancia con la práctica química corriente de nomenclatura y clasificación de los compuestos inorgánicos.

Sin embargo, pronto se reconoció que la química sola no basta para caracterizar adecuadamente un mineral. Una apreciación completa de la naturaleza de los minerales exige el uso de los rayos X para la determinación de las estructuras internas. La clasificación mineral debe basarse en la composición química y en la estructura interna, pues ambas conjuntamente representan la esencia de un mineral y determinan sus propiedades físicas. Los principios cristalóquímicos fueron utilizados por vez primera por W. L. Bragg y V. M. Goldschmidt para los minerales silicatos. Este gran grupo de minerales se dividió parcialmente en subclases sobre la base de la composición química y principalmente en función de la estructura interna. Dentro de la clase silicatos, por tanto, existen silicatos a láminas y en cadenas que son subclases basadas en la disposición estructural de los tetraedros de  $\text{SiO}_4$ . Estos principios estructurales, en combinación con la composición química, proporcionan una clasificación lógica. Este esquema de clasificación es el utilizado en las siguientes secciones sobre mineralogía sistemática.

<sup>1</sup> Los nombres de minerales se dan en letras negritas mayúsculas (por ej., **ORO**) o minúsculas (por ej., **Acantita**). Los primeros se consideran más comunes o importantes.

<sup>2</sup> Véase Cap. 14 para un estudio de los tipos de rocas, asociación de minerales y algunos términos relacionados con las menas.

Las divisiones más amplias de la clasificación usadas en este libro (basadas en las obras de C. Palache, H. Berman y C. Frondel, *Dana's System of Mineralogy*, 7ª ed. y H. Strunz, *Mineralogische Tabellen*, 5ª ed., véase Referencias) son:

1. Elementos nativos	}	Capítulo 10
2. Sulfuros		
3. Sulfosales		
4. Óxidos	}	Capítulo 11
(a) Simples y múltiples		
(b) Hidróxidos		
5. Haluros	}	Capítulo 12
6. Carbonatos		
7. Nitratos		
8. Boratos		
9. Fosfatos		
10. Sulfatos		
11. Volframatos		
12. Silicatos	Capítulo 13	

Estas se subdividen en *familias*, basándose en los tipos químicos, y la familia, a su vez, se divide en *grupos*, que presentan una gran similitud cristalográfica y estructural. El grupo está formado por *especies*, que pueden formar *series* entre sí. Las especies tienen la misma estructura pero diferente composición química. Una *especie* puede subdividirse en *variedades* químicas mediante adjetivos modificadores que reflejan la presencia de cantidades no usuales de constituyente químicos. Ejemplos de estos adjetivos son:

aluminico:	rico en Al
cálcico:	rico en Ca
crómico:	rico en Cr
ferroso:	rico en Fe <sup>2+</sup>
férrico:	rico en Fe <sup>3+</sup>
magnésico:	rico en Mg
manganesico:	rico en Mn, etc.

Algunos ejemplos son: egirina manganesica, diópsido férrico, o augita magnésica.

En cada una de las clases, se da primero el mineral que posee la relación más alta de metal a no metal, seguido por aquellos minerales que contienen progresivamente menos metal. Como en este libro se describe un número relativamente pequeño de minerales, con frecuencia sólo se representa un miembro de un grupo o familia y por tanto resulta impracticable una rigurosa división y subdivisión.

Como introducción a cada una de las clases químicas se hacen algunas observaciones preliminares referentes a su cristalografía y estructura cristalina.

## 10.2 ELEMENTOS NATIVOS

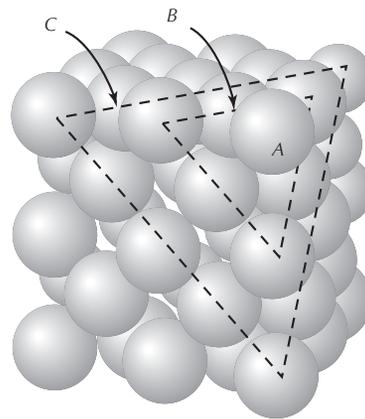
Con excepción de los gases libres de la atmósfera, solamente unos veinte elementos se encuentran en estado nativo. Estos elementos pueden dividirse en: 1) metales; 2) semimetales; 3) no metales. Los *metales nativos* más comunes, que presentan estructuras muy sencillas, forman tres grupos: el *grupo del oro* (grupo espacial:  $Fm\bar{3}m$ ), que comprende oro, plata, cobre y plomo, todos ellos isoestructurales; el *grupo del platino* (grupo espacial:  $Fm\bar{3}m$ ), que comprende el platino, paladio, iridio y osmio, todos ellos isoestructurales y el *grupo del hierro* (grupo espacial  $Fm\bar{3}m$ ), que comprende hierro y ferroníquel, de los cuales el hierro puro y la kamacita poseen el grupo espacial  $Im\bar{3}m$  y la variedad rica en Ni del ferroníquel (taenita) posee el grupo espacial  $Fm\bar{3}m$ . Se han encontrado también mercurio, tántalo, estaño y zinc. Los *semimetales nativos* forman dos grupos isoestructurales: arsénico, antimonio y bismuto (grupo espacial  $R\bar{3}m$ ), y los menos frecuentes selenio y telurio (grupo espacial  $P3_121$ ). Los *no metales* importantes: azufre y carbono, en forma de diamante y grafito.

ELEMENTOS NATIVOS			
Metales		Semimetales	
Grupo del oro		Grupo del arsénico	
Oro	Au	Arsénico	As
Plata	Ag	Bismuto	Bi
Cobre	Cu	No metales	
Grupo del platino		Azufre	S
Platino	Pt	Diamante	C
Grupo del hierro		Grafito	C
Hierro	Fe		
(Kamacita	Fe, Ni)		
(Taenita	Fe, Ni)		

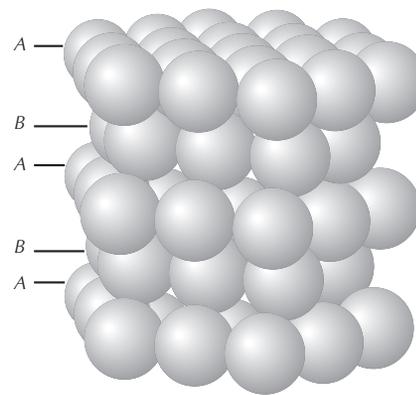
### 10.2.1 Metales nativos

Es propio que la *mineralogía sistemática* comience con el estudio del grupo del oro porque los conocimientos que tiene el hombre acerca de las propiedades y utilidad de los metales proceden del descubrimiento casual de pepitas y masas de estos minerales. En muchas de las civilizaciones primitivas relativamente avanzadas el empleo de los metales estuvo limitado al de aquéllos que encontraron en estado nativo.

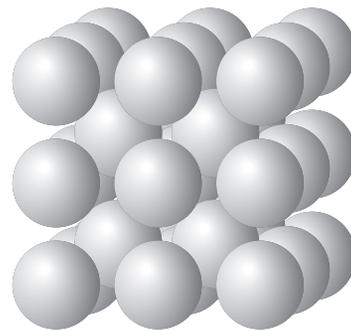
Los elementos del *grupo del oro* pertenecen a la misma familia en la clasificación periódica de los elementos y, por lo tanto, sus átomos tienen propiedades químicas algo seme-



(a)



(b)



(c)

**FIGURA 10.1** (a) Modelo de empaquetamiento cúbico compacto (ABCABC...) de esferas iguales presentado por el Cu, Au, Pt y otros muchos metales. Cada átomo metálico está rodeado por 12 vecinos próximos (Figs. 4.19 y 4.20). Las capas de empaquetamiento compacto son paralelas a {111}. A la derecha se ilustra la red cúbica centrada en las caras (F) compatible con esta secuencia de empaquetamiento. (b) Empaquetamiento hexagonal compacto (ABAB...) de esferas iguales presentado por el Mg, Zn y Cd. Cada átomo metálico está rodeado por 12 vecinos próximos (véanse también figs. 4.19 y 4.20). Este tipo de empaquetamiento conduce a una red hexagonal (H), como se ilustra a la derecha, que puede interpretarse como una red romboédrica (R) (véase Fig. 3.17; nº 11). (c) Empaquetamiento cúbico centrado en el cuerpo de esferas iguales, presentado por el Fe. Cada esfera está rodeada por 8 vecinos próximos. Este empaquetamiento no es tan compacto como el ECC y el EHC. La red centrada en el cuerpo (I) compatible con este modelo de empaquetamiento viene ilustrada a la derecha.

jantes y todos son lo suficientemente inertes como para encontrarse en un estado elemental en la naturaleza. Cuando no están combinados con otros elementos, los átomos de estos metales están formando estructuras cristalinas con un enlace metálico que es bastante débil. Los minerales son isoestruc-

turales, con redes cúbicas centradas en las caras, con átomos idénticos en coordinación 12 (Fig. 10.1a). Una solución sólida completa tiene lugar entre el oro y la plata, pues estos dos elementos poseen los mismos radios atómicos (1,44 Å). El cobre, debido a su menor radio atómico (1,28 Å), presenta

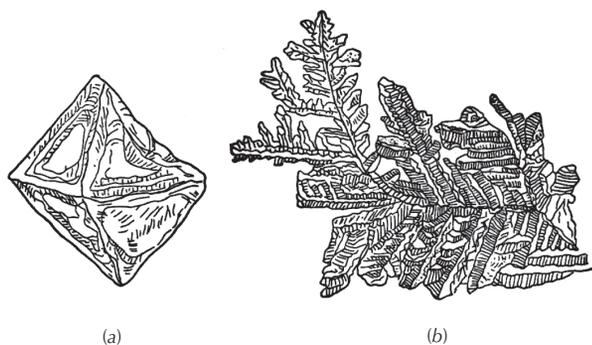


FIGURA 10.2 (a) Octaedro de oro deformado. (b) Oro dendrítico.

una solución sólida limitada en oro y en plata. Recíprocamente, el cobre nativo sólo posee trazas de oro y plata en solución sólida.

Las propiedades similares de los miembros de este grupo provienen de su estructura común. Todos son más bien blandos, maleables, dúctiles y sectiles. Todos son buenos conductores del calor y de la electricidad, tienen brillo metálico y fractura astillosa, con puntos de fusión más bien bajos. Estas propiedades son consecuencia de su enlace metálico. Todos son cúbicos hexaquisoctaédricos y tienen densidades muy elevadas. Estas propiedades son consecuencia del empaquetamiento muy apretado, llamado *empaquetamiento cúbico compacto*.

Las propiedades que diferencian a los minerales de este grupo dependen de las propiedades de los átomos de los distintos elementos. Así, el amarillo del oro, el rojo del cobre y el blanco de la plata son propiedades atómicas. Los pesos específicos dependen igualmente de las propiedades atómicas y están en proporción aproximada con los pesos atómicos.

Aunque aquí sólo se tratará el platino, el grupo del platino también incluye los minerales raros paladio, platiniridio e iridosmina. Los dos últimos son, respectivamente, aleaciones de iridio y platino e iridio y osmio, con estructura hexagonal de empaquetamiento compacto,  $P6_3/mmc$ . Sin embargo, la estructura del platino y del paladio es de empaquetamiento cúbico compacto, similar a los metales del grupo del oro con grupo espacial  $Fm3m$ . Los metales de platino son más duros y tienen puntos de fusión más elevados que los metales del grupo del oro.

Los miembros del *grupo del hierro* son isométricos e incluyen el hierro puro (Fe), que se presenta raramente en la superficie de la Tierra, y dos especies de ferróníquel (*kamacita* y *taenita*), que son corrientes en los meteoritos. El hierro y el níquel tienen radios atómicos casi idénticos (1,26 Å y

1,25 Å, respectivamente) y por ello el níquel puede (y así lo hace usualmente) sustituir al hierro. El hierro puro y la kamacita, que contienen aproximadamente un 5,5% en peso de Ni, presentan un empaquetamiento cúbico compacto con el grupo espacial  $Im3m$ . La taenita, con un contenido variable del 27 al 65 por ciento en peso de Ni, posee un empaquetamiento cúbico compacto con el grupo espacial  $Fm3m$  (Figs. 10.1a y 10.1c). Estos dos minerales son característicos de los meteoritos de hierro y se supone que las aleaciones de Fe-Ni de este tipo constituyen una gran parte del núcleo de la Tierra.

### ORO —Au

**Cristalografía.** Isométrico;  $4/m\bar{3}2/m$ . Los cristales son corrientemente octaédricos (Fig. 10.2a), pocas veces presentan caras de dodecaedro, cubo o trapezoedro {113}. Frecuentemente, aparecen en grupos arborescentes con cristales alargados en la dirección del eje de simetría ternaria, o aplastados paralelos a una cara del octaedro. Los cristales se forman irregularmente, pasando por formas filiformes, reticuladas y dendríticas (Fig. 10.2b). Raras veces adoptan formas de cristal; normalmente, lo hacen en forma de placas irregulares, escamas o masas.

$Fm3m$ ;  $a = 4,079$  Å;  $Z = 4$ .  $d$ 's: 2,36(10), 2,04(7), 1,443(6), 1,229(8), 0,785(5).

**Propiedades físicas.**  $H$   $2\frac{1}{2} - 3$ ,  $G$  19,3 cuando es puro. La presencia de otros metales hace disminuir el peso específico, que puede llegar a bajar hasta 15. **Fractura** irregular. Muy maleable y dúctil. Opaco. **Color:** varias tonalidades de amarillo, dependiendo de su pureza; hácese más pálido al aumentar el porcentaje de plata presente.

**Composición y estructura.** Entre el oro y la plata existe una serie completa de soluciones sólidas y la mayor parte del oro contiene plata. El oro de California contienen de 10 a 15% de plata y cuando este último elemento está en proporción mayor del 20%, la aleación es llamada *electro*. Pueden hallarse presentes pequeñas cantidades de cobre y hierro, así como trazas de bismuto, plomo, estaño, zinc y metales del grupo del platino. La pureza o *ley* del oro se expresa en partes por 1000; la mayor parte del oro contiene un 10%, aproximadamente, de otros metales y, por lo tanto, su ley es 900. La estructura del oro está basada en el empaquetamiento cúbico compacto de los átomos de Au (Fig. 10.1a).

**Diagnóstico.** El oro se distingue de otros sulfuros amarillos (particularmente la pirita y la calcopirita) y de las pajuelas amarillas de mica alterada, por su sectilidad y gran peso específico.

**Yacimiento.** El oro tiene una abundancia media de 0,004 ppm en la corteza terrestre y es, por tanto, un elemento raro. Aparece en la naturaleza diseminado en pequeñas cantidades. Se le halla corrientemente en filones que tiene relación genética con rocas ígneas de tipo silíceo. La mayor parte del oro aparece como elemento nativo. Para una relación de otros minerales (raros) de oro, véase más adelante “Especies semejantes”.

La principal fuente de oro son los llamados filones hidrotermales de cuarzo y oro, donde, junto con la piritita y otros sulfuros, el oro fue depositado por soluciones minerales ascendentes que lo contenían. El oro se recupera también como subproducto de los depósitos de sulfuros explotados esencialmente para la obtención de los metales correspondientes. El oro está simplemente mezclado mecánicamente con los sulfuros, y no en forma de combinación química alguna. En la mayoría de los filones, el oro está tan finamente dividido, y distribuido de forma tan uniforme, que su presencia sólo puede ser detectada por técnicas microscópicas.

Los filones que contienen oro, sometidos a la acción del tiempo y meteorizados, liberan el oro que, o bien queda en el manto del suelo, en arenas eluviales, o bien es arrastrado a los arroyos vecinos para formar placeres. Debido a su gran peso específico, el oro se separa mecánicamente de los materiales más ligeros, de las arenas y gravas del lecho de la corriente y se aloja en las irregularidades o grietas del lecho rocoso. El oro se encuentra entonces en forma de granos redondos o aplastados, las pepitas, que pueden separarse con una batea, que es un proceso de lavado que sólo retiene las partículas más pesadas, de las cuales se selecciona fácilmente el oro. Para operar en gran escala se emplea el lavadero. La arena que contiene oro es lavada en lavaderos mecánicos donde el oro queda detenido por unas mesas vibratorias o separadores, y después es amalgamado con mercurio. La minería hidráulica se emplea para mover grandes cantidades de gravas mediante lavaderos. Muchos placeres se explotan actualmente con dragas, algunas de las cuales son gigantes y pueden extraer el oro de miles de metros cúbicos de grava por día.

De la producción mundial estimada de oro en 1981, 1176,7 toneladas, aproximadamente, la mitad procede de la República de Sudáfrica. Las principales fuentes del oro de Sudáfrica son el conglomerado precámbrico Witwatersrand “el Rand”, en Transvaal y otros conglomerados semejante en el Estado libre de Orange. Se supone que los filones de estos conglomerados, en los cuales está concentrado el oro, son placeres fósiles. Hoy se estima que aproximadamente el 20% de la producción de oro del mundo procede de la Co-

munidad de Estados Independientes (CIS), que es por tanto, el segundo país productor del mundo. Hay yacimientos en los Montes Urales, pero se estima que los 2/3 de la producción procede de placeres de Siberia. En tercer lugar está la China, seguida por el Canadá, los Estados Unidos y el Brasil.

En EE.UU., los estados más importantes en la producción de oro son actualmente: Dakota del Sur, Nevada, Utah, Arizona y Montana. El oro de Arizona y Utah es esencialmente un subproducto de la extracción del cobre. Durante 100 años, después del descubrimiento de oro en los torrentes de California en 1848, este estado fue el primer productor. Los distritos productores de oro más importantes fueron los de Mother Lode, filones de cuarzo aurífero situados a lo largo de la vertiente occidental de Sierra Nevada.

En España no existen yacimientos importantes de oro. Antiguamente se beneficiaron las arenas auríferas del Darro, Miño, Sil y otros ríos españoles.

**Empleo.** La mayor parte del oro existente pertenece a diversos países en forma de lingotes y se utiliza como garantía de pagos internacionales. Una forma creciente, en forma de medallas y pequeñas barras, se utiliza como forma de inversión. Otros usos son la joyería, instrumentos científicos, electrodeposición, pan de oro y prótesis dentales.

**Especies semejantes.** Además del oro nativo existen 19 raros (o muy raros) en los cuales el oro se combina con otros elementos. La mayoría son telururos. Los ejemplos más destacados son: *calaverita*,  $\text{AuTe}_2$ , asociado con otros telururos en Cripple Creek, Colorado, y en Kalgoorlie, Australia Occidental; y *silvanita*,  $(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$ , también encontrada en las localidades citadas. Otros son: *krennerita*,  $(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$ ; *petzita*,  $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ ; *kostovita*,  $\text{CuAuTe}_4$ ; *montbrayita*,  $(\text{Au}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ ; y *muthmannita*,  $(\text{Ag}, \text{Au})\text{Te}$ . Otros compuestos son: *uytenbogaardita*,  $\text{Ag}_3\text{AuS}_3$ ; *fischesserita*,  $\text{Ag}_3\text{AuSe}_2$ ; y *nagyagita*,  $\text{Pb}_5\text{Au}(\text{Te}, \text{Sb})_4\text{S}_{5-8}$ . Para una relación completa de minerales que contienen oro, véase Wilson (1982).

## PLATA —Ag

**Cristalografía.** Isométrica;  $4/m\bar{3}2/m$ . Comúnmente se da en cristales mal formados y en grupos ramosos, arborescentes y reticulados. Se la encuentra normalmente en masas irregulares, placas y escamas; a veces granuda o en finos alambres (Fig. 10.3).

$Fm\bar{3}m$ ;  $a = 4,09 \text{ \AA}$ ;  $Z = 4$ .  $d$ 's: 2,34(10), 1,439(6), 1,228(8), 0,936(7), 0,934(8).

**Propiedades físicas.**  $H 2\frac{1}{2} - 3$ ,  $G 10,5$ , en ejemplares puros, 10-12 en los impuros. *Fractura* astillosa. Maleable y dúctil. *Brillo* metálico. *Color y huella* blanco de plata; frecuentemente, con pátina castaño o gris-negro.



FIGURA 10.3 Plata, Kongsberg, Noruega.

**Composición y estructura.** La plata nativa contiene frecuentemente mercurio, cobre y oro en aleación; en casos menos frecuentes, platino, antimonio y bismuto. La *amalgama* es una solución sólida de plata y mercurio. La estructura de la plata está basada en un empaquetamiento cúbico compacto de átomos Ag (Fig. 10.1a).

**Diagnóstico.** La plata puede distinguirse de otros minerales de aspecto similar por su naturaleza maleable, su color en superficie fresca y su alto peso específico.

**Yacimiento.** La plata nativa está extensamente distribuida en pequeñas cantidades, principalmente en la zona de oxidación de los depósitos de minerales. Los grandes depósitos de plata natural son probablemente el resultado de una deposición primaria de plata de soluciones hidrotermales. Hay tres tipos de depósitos primarios: (1) Asociada a sulfuros, zoolitas, calcita, barita, fluorita y cuarzo, tipificada en los yacimientos de Kongsberg, Noruega. Las minas de esta localidad, explotadas durante centenares de años, han producido magníficas muestras de alambre de plata. (2) Con arseniuros y sulfuros de cobalto, níquel y plata y con bismuto nativo. Ésta es la forma en la que aparece en las antiguas minas de plata de Freiberg y Schneeberg, en Sajonia, y de Cobalt, Ontario. (3) Con uraninita y minerales de cobalto-níquel. De este tipo son las antiguas minas, todavía activas, de Joachimsthal, Bohemia y del Lago del Gran Oso, Territorios del Noroeste, Canadá.

En los Estados Unidos, pequeñas cantidades de plata nativa primaria están asociadas con cobre nativo en la Península de Keweenaw, Michigan. En otras partes la plata nativa aparece generalmente como secundaria. La mayor parte del suministro mundial de plata procede de sulfuros y sulfosales de plata. Los principales productores de plata son Canadá, Perú, Méjico y los Estados Unidos. Méjico es un productor históricamente muy importante.

En España se encuentra en cantidad en Huelga de la Cruz, Guadalajara, Horcajo, Ciudad Real, y Las Herrerías, Almería.

**Empleo.** Como mena de plata, aunque la mayor parte de la producción mundial proviene de otros minerales, como la *acantita*,  $\text{Ag}_2\text{S}$ , *proustita*,  $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$  y *pirargirita*,  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ . Los principales usos de la plata son para emulsiones fotográficas, plateado, aleaciones con cobre, cubiertos de mesa y equipos electrónicos. A causa de la disminución de su producción y su precio creciente, las monedas de plata han sido ampliamente sustituidas en todos los países por metales como el níquel y el cobre.

## COBRE —Cu

**Cristalografía.** Isométrico;  $4/m\bar{3}2/m$ . comúnmente con caras de tetraquishexaedro, también cubo, dodecaedro y octaedro. Los cristales aparecen normalmente mal formados y en ramas o grupos arborescentes (Figs. 10.4a y b). Generalmente, se da en masas, placas y escamas irregulares, en formas torcidas y en alambre.

$Fm\bar{3}m$ ;  $a = 3,615 \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ ,  $d$ 's: 2,09(10), 1,81(10), 1,28(10), 1,09(10), 1,05(8).

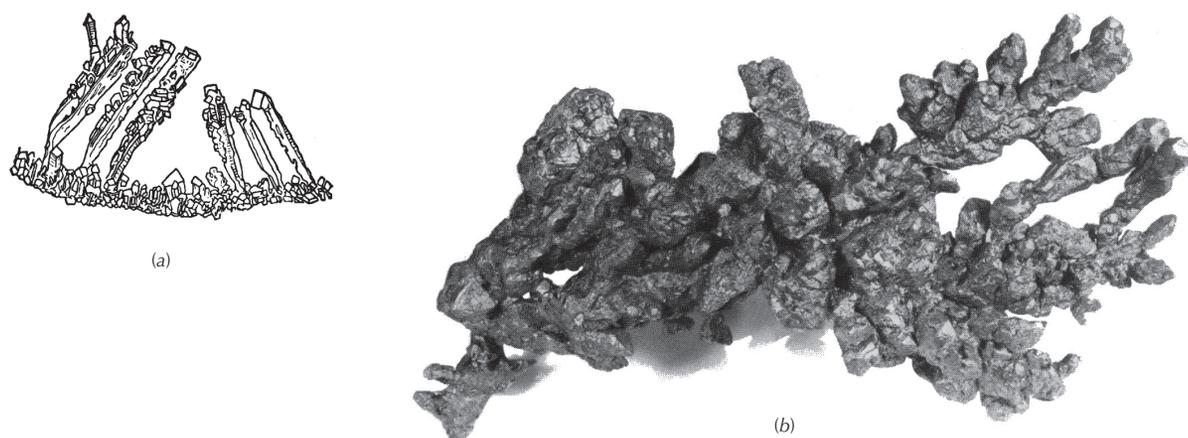
**Propiedades físicas.**  $H 2\frac{1}{2} - 3$ ,  $G 8,9$ . Muy dúctil y maleable. *Fractura* astillosa. *Brillo* metálico. *Color* rojo cobre en su superficie fresca, normalmente oscuro con brillo apagado por su pátina.

**Composición y estructura.** El cobre nativo contiene generalmente pequeñas cantidades de plata, bismuto, mercurio, arsénico y antimonio. La estructura del cobre está basada en el empaquetamiento cúbico compacto de átomos de Cu (Fig. 10.1a).

**Diagnóstico.** El cobre nativo puede reconocerse por su color rojo en superficie reciente, su fractura astillosa, su gran peso específico y su maleabilidad.

**Yacimiento.** Se encuentran pequeñas cantidades de cobre nativo en muchos lugares, en las zonas oxidadas de los depósitos de cobre, asociado a cuprita, malaquita y azurita.

Los depósitos de cobre nativo más primarios están asociados a lavas basálticas, donde la deposición de cobre es el resultado de soluciones hidrotermales con minerales de óxi-



**FIGURA 10.4** (a) Cobre dendrítico, Broken Hill, Nueva Gales del Sur, Australia. (b) Cobre nativo, Península de Keweenaw, Michigan (Harvard Mineralogical Museum).

do de hierro. Los depósitos de cobre nativo más importantes en el mundo se hallan en la Península de Keweenaw, al noroeste de Michigan, en la orilla sur del lago Superior. Las rocas de la región están compuestas por lavas básicas del Precámbrico interestratificadas con conglomerados. La serie, extendida 160 km a lo largo de la península, se sumerge hacia el noroeste por debajo del lago Superior y emerge en la isla Royal, a 80 km de distancia. Cortando estas rocas se encuentran algunas venas de cobre, pero donde más se presenta es en las lenguas de lava que llenan las cavidades o en los conglomerados que rellenan los intersticios o sustituyen a los guijarros. Está asociado a minerales tales como prehnita, epidota, datolita, calcita y varias zeolitas. Están presentes pequeñas cantidades de plata nativa. El cobre de Michigan fue aprovechado hace tiempo por los indios americanos, pero no fue hasta 1840 que se localizó su origen. Poco después comenzó su explotación y durante los 75 años siguientes hubo una gran actividad minera a lo largo de la Península de Keweenaw. La mayor parte del cobre del distrito aparecía en trozos irregulares muy pequeños, aunque también se encontraron grandes masas; en 1859 se descubrió una que pesaba 520 toneladas.

Yacimientos esporádicos de cobre, similares al del distrito del lago Superior, han sido hallados en las áreas de arenisca de la parte oriental de los Estados Unidos, especialmente en Nueva Jersey, y en la morrena glacial, que cubre una área similar en Connecticut. En Corocoro, al sudoeste de La Paz (Bolivia), existe también un importante yacimiento en arenisca. El cobre nativo, a veces en grupos de finos cristales, aparece asociado en cantidades pequeñas a las menas oxida-

das de cobre en Ajo, Bisbee y Ray, Arizona, y en la Mina del Chino, Santa Rita, Nuevo Méjico.

En España se ha encontrado cobre nativo en Linares, Jaén, y en el distrito minero de Río Tinto, aunque siempre en pequeñas cantidades.

**Empleo.** Una mena secundaria de cobre. Los sulfuros de cobre son hoy en día la principal mena del metal. Se emplea principalmente para usos eléctricos, especialmente cables. Viene utilizándose extensamente en aleaciones, tales como latón (cobre y zinc), bronce (cobre y estaño con algo de zinc) y lata alemana (cobre, zinc y níquel). Éstos y otros empleos de menor importancia hacen del cobre el metal más esencial en la civilización moderna, después del hierro.

## PLATINO — Pt

**Cristalografía.** Isométrica;  $4/m\bar{3}2/m$ . Los cristales cúbicos son poco frecuentes y normalmente están deformados. Se encuentra, por lo general, en pequeños granos y escamas; en algunos lugares, en masas irregulares y pepitas de gran tamaño.

$Fm\bar{3}m$ ;  $a = 3,923 \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ .  $d$ 's: 2,27(9), 1,180(10), 1,956(8), 1,384(8).

**Propiedades físicas.**  $H$  4–4 $\frac{1}{2}$  (excepcionalmente grande para un metal).  $G$  21,45 puro; 14 a 19, nativo. Maleable y dúctil. *Color* gris de acero, con brillo reluciente. Es magnético cuando es rico en hierro.

**Composición y estructura.** El platino contiene normalmente en aleación diversos porcentajes de hierro y pequeñas cantidades de iridio, osmio, rodio y paladio; también de cobre, oro y níquel. La estructura del platino está basada en un

empaquetamiento cúbico compacto de átomos de Pt (Fig. 10.1a).

**Diagnóstico.** Queda determinado por su alto peso específico, su maleabilidad y su color acerado.

**Yacimiento.** El platino aparece casi exclusivamente en su estado nativo en rocas ultrabásicas, especialmente dunitas asociadas a olivino, cromita, piroxeno y magnetita. Los depósitos más próximos a las rocas ígneas parentales que contienen platino.

El platino fue descubierto por primera vez en Colombia, América del Sur. Se trajo a Europa en 1735, donde recibió el nombre de *platina*, de la palabra española plata, debido a su parecido con ella. Todavía se producen en Colombia pequeñas cantidades de platino procedentes de placeres en dos distritos cerca de la costa del Pacífico. En 1822, el platino fue descubierto también en placeres en el río Tura superior, en la vertiente oriental de los montes Urales, CIS. Desde entonces, la mayor parte de la producción mundial de platino proviene de los placeres de este distrito, cuyos centros mineros rodean la ciudad de Nizhne Tagil, pero en 1934, debido a la gran cantidad de platino recuperado de las menas de cobreníquel de Sudburg, Ontario, Canadá pasó a ser el primer productor. En 1954 la República de Suráfrica pasó a ocupar el primer lugar. Parte de la producción de Sudáfrica es un subproducto de la minería del oro en el Rand, pero la fuente principal es la de Merensky Reef, en las rocas básicas del complejo ígneo de Bushveld. El Merensky Reef es un horizonte de esta capa intrusiva de unos 30 cm de espesor que se extiende a lo largo de muchos kilómetros y que tiene un contenido uniforme de platino de unos 15 g por tonelada de mineral. Los centros principales de explotación están próximos a Rustenburg, en Transvaal. Hoy se estima que aproximadamente el 50% de los metales del grupo del platino del mundo proceden del CIS. En los EE.UU. se producen pequeñas cantidades como un subproducto de la minería de cobre. En el Canadá la mayor parte del platino procede de la *esperrilita*,  $\text{PtAs}_2$ , la cual se encuentra en la mena de cobreníquel de Sudburg, Ontario.

En España se ha encontrado en las arenas del Darro, Granada, y en formación primaria, en la serranía de Ronda, en dunitas.

**Empleo.** El empleo del platino depende principalmente de su alto punto de fusión ( $1755^\circ\text{C}$ ), su resistencia a los ataques químicos y gran dureza. Su principal uso es como catalizador para controlar las emisiones de escape de los automóviles y en las industrias química y del petróleo. Es empleado también por los odontólogos, en instrumental médico, joyería y equipamiento eléctricos.

**Especies similares.** El *iridio*, *iridosmina*, una aleación de iridio y osmio, y el *paladio* son minerales raros del grupo del platino asociados al mismo.

## Hierro —Fe

**Cristalografía.** Isométrico;  $4/m\bar{3}2/m$ . Cristales raros. *Terrestre*: en nódulos y masas grandes; *meteórico* (*kamacita*): en placas grandes y masas laminares, y en regular intercrecimiento con ferroníquel (*taenita*).

Hierro ordinario ( $\alpha$ -Fe y *kamacita*) cúbico centrado en el cuerpo,  $Im\bar{3}m$ ,  $a = 2,86 \text{ \AA}$ ,  $Z = 2$ .  $d$ 's: 2,02(9), 1,168(10), 1,430(7), 1,012(7). Ferroníquel (*taenita*), cúbico centrado en las caras,  $Fm\bar{3}m$ ,  $a = 3,56 \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ .  $d$ 's: 2,06(10), 1,073(4), 1,78(3), 1,27(2).

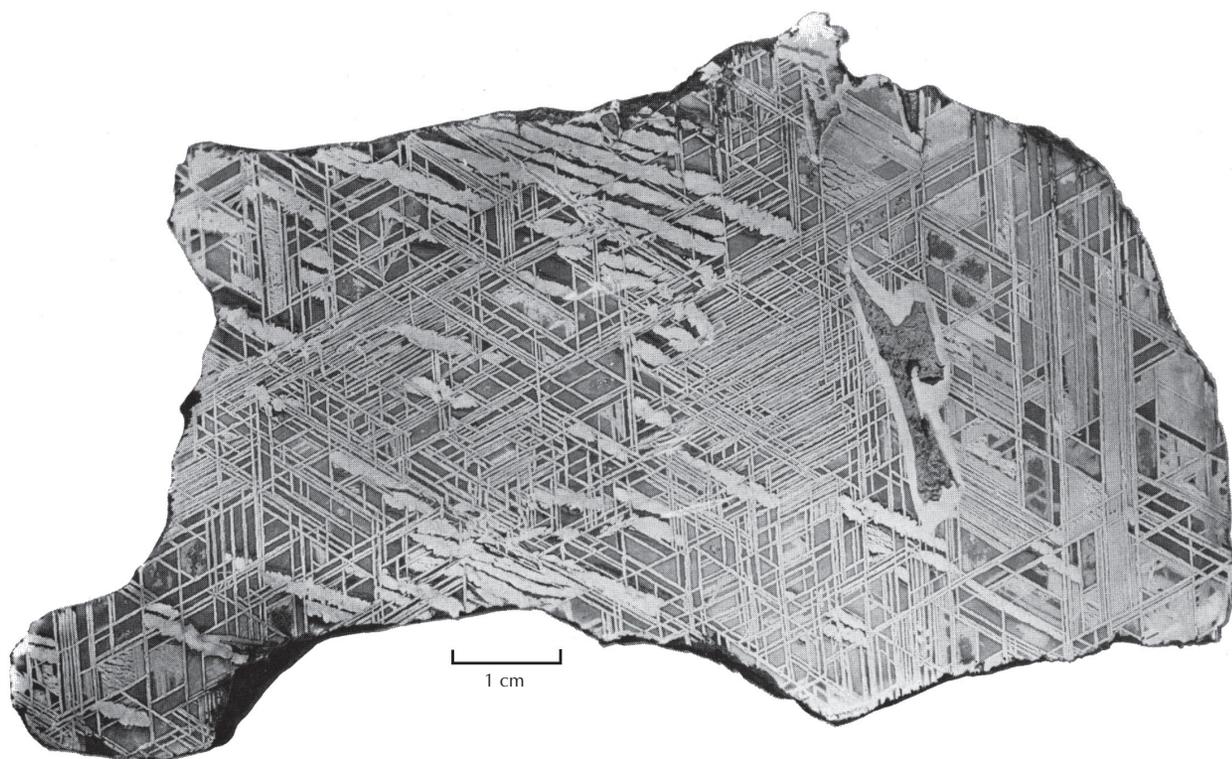
**Propiedades físicas.** ( $\alpha$ -Fe), exfoliación {010} imperfecta.  $H$   $4\frac{1}{2}$ ,  $G$  7,3 a 7,9. *Fractura* astillosa. Maleable. Opaco. *Brisillo* metálico. *Color* gris acerado a negro. Fuertemente magnético.

**Composición y estructura.** ( $\alpha$ -Fe) siempre con algo de níquel y frecuentemente con pequeñas cantidades de cobalto, cobre, manganeso, azufre y carbono. El mineral *kamacita* contiene aproximadamente el 5,5 por ciento de peso en Ni. La *taenita* varía mucho en su contenido de Ni (del 27 al 65% en peso). Las estructuras del  $\alpha$ -Fe y la *kamacita* están basadas en un empaquetamiento cúbico centrado en el cuerpo (Fig. 10.1c), mientras que la estructura de la *taenita* está basada en el empaquetamiento cúbico centrado en las caras (Fig. 10.1a).

**Diagnóstico.** El hierro puede reconocerse por su fuerte magnetismo, su maleabilidad y la pátina de óxido que normalmente cubre su superficie.

**Yacimiento.** Aparece como hierro terrestre y en meteoritos. El hierro en su estado elemental (nativo) es muy inestable en condiciones oxidantes en rocas de la corteza superior y en la atmósfera terrestre. El hierro está normalmente presente como  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$  en óxidos como la magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , o hematites,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o hidróxidos como la goethita,  $\text{FeO}\cdot\text{OH}$ . El hierro terrestre está considerado como constituyente magnético primario o como producto secundario formado por la reducción de los compuestos de hierro por el material carbonáceo asociado. La localización más importante está en la isla Disko, situada en la costa oeste de Groenlandia, donde se hallan fragmentos incluidos en el basalto que van desde el tamaño de granos a grandes masas de toneladas. Se han encontrado masas de ferroníquel en los condados de Josephine y Jackson, en Oregon.

Los meteoritos de hierro están compuestos fundamentalmente por un intercrecimiento regular de *kamacita* y *taenita*.



**FIGURA 10.5** Diagrama de Widmanstätten en el meteorito de hierro de Edmonton (Kentucky). El diagrama octaédrico viene representado por la kamacita gruesa (visible) y las láminas muy delgadas de taenita (invisible). La inclusión irregular que aparece en el centro derecha es de troilita (FeS). (Smithsonian Astrophysical Observatory, cortesía, J. A. Wood. Harvard Mineralogical Museum.)

Evidencia de este intercrecimiento es el diagrama de Widmanstätten (Fig. 10.5) que aparece en las superficies pulimentadas y corroídas de estos meteoritos. Los meteoritos litosideritos están formados por mezclas de silicatos, kamacita, taenita y troilita (FeS).

### 10.2.2 Semimetales nativos

Los semimetales arsénico, antimonio y bismuto pertenecen a un grupo isoestructural con el grupo espacial  $R\bar{3}m$ . Sus estructuras, distintas a las de los metales, no pueden representarse por un simple empaquetamiento de esferas, pues cada átomo está algo más próximo a tres de sus vecinos que al resto de los átomos que le rodean. En la Fig. 10.6a, que representa la estructura del arsénico (o antimonio), las esferas se cortan entre sí a lo largo de áreas circulares planas. El enlace entre los cuatro átomos más próximos que forman grupos piramidales (Fig. 10.6b) es debido a la naturaleza covalente de estos enlaces. Esta covalencia está relacionada con la posición de estos semimetales en el grupo V del sistema periódico

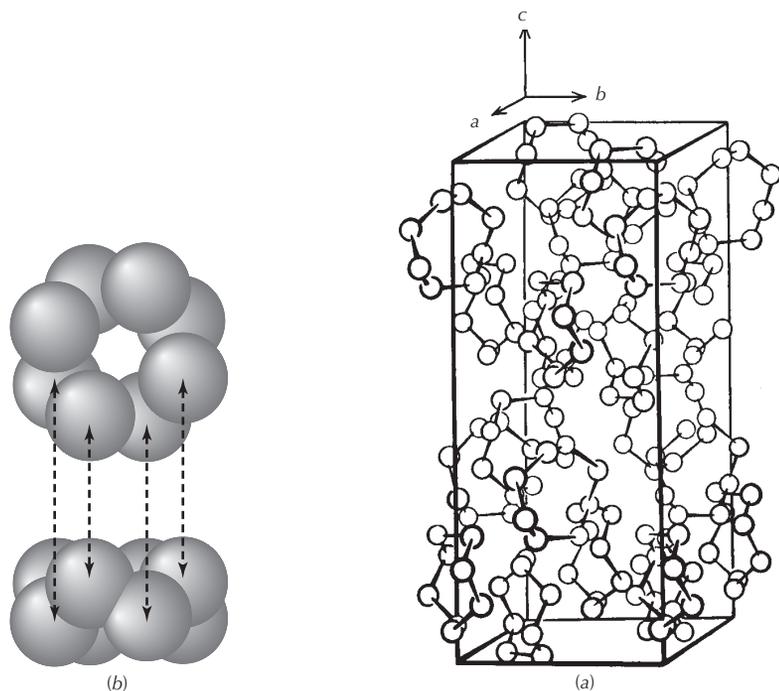
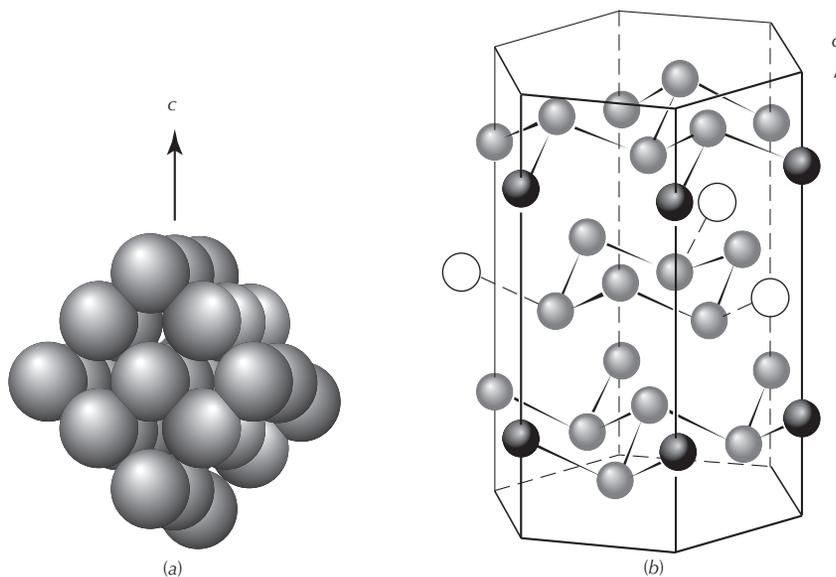
co hacia el extremo electronegativo de una fila. El enlace relativamente fuerte a los cuatro vecinos más próximos da lugar a una estructura en capas como la indicada en la Fig. 10.6b. Estas capas son paralelas a  $\{0001\}$  y el débil enlace entre ellas da lugar a una fácil exfoliación. Los miembros de este grupo poseen propiedades físicas semejantes. Son quebradizos y conducen el calor y la electricidad mucho peor que los metales nativos. Estas propiedades reflejan un tipo de enlace intermedio entre el metálico y el covalente; es más fuerte y más direccional en sus propiedades que el puramente metálico, dando lugar a una simetría inferior.

Como el arsénico y el bismuto nativos son poco comunes como minerales, no incluimos descripciones detalladas de estas especies.

### 10.2.3 No-metales nativos

La estructura de los no-metales azufre, diamante y grafito es muy distinta a la de los metales y semimetales. El *azufre* se presenta ordinariamente en forma de cristal ortorrómbico

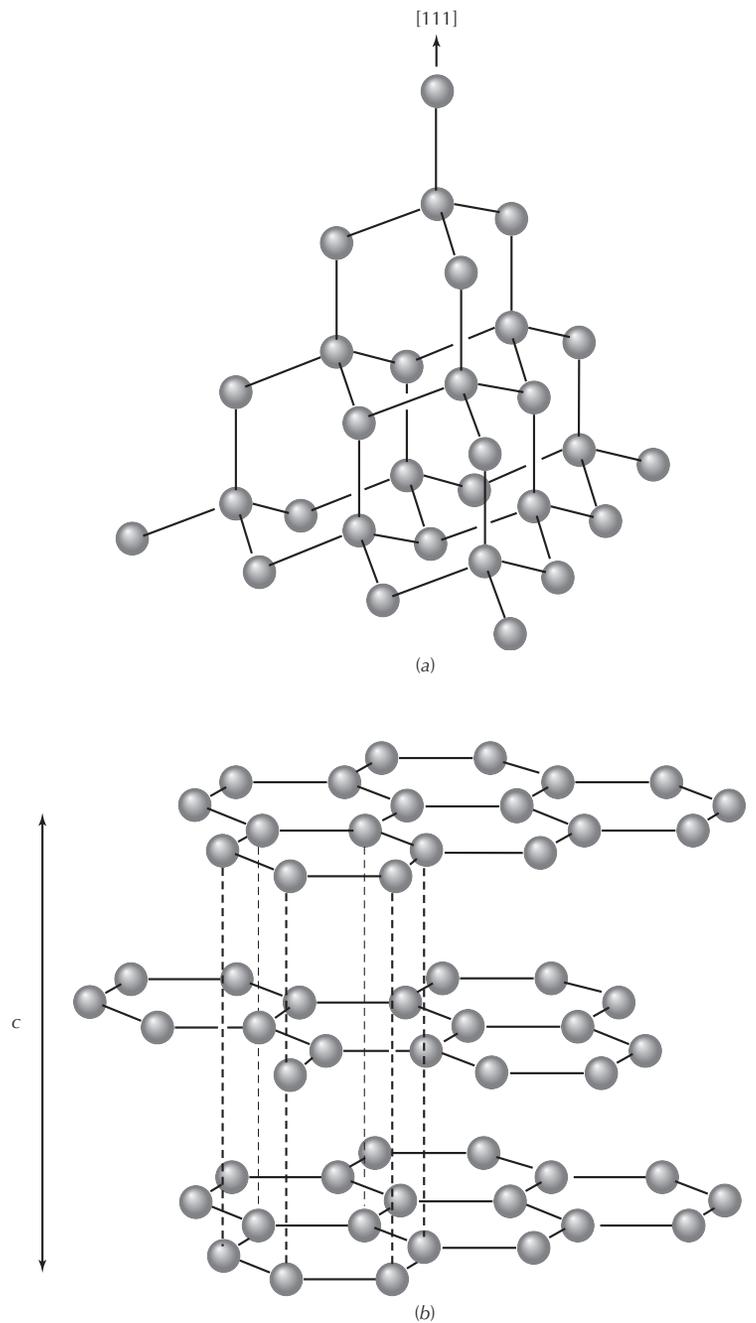
**FIGURA 10.6** (a) Modelo de empaquetamiento compacto de la estructura del As y Sb. Las áreas planas representan el solapamiento entre átomos contiguos. (b) Dibujo ampliado de la estructura de As o Sb, mostrando las capas con pliegues de los grupos enlazados covalentemente, paralelos a {0001}.



**FIGURA 10.7** (a) Anillos S<sub>8</sub> en el azufre ortorrómbico, en visión paralela (bajo) y perpendicular (arriba) a los anillos. Celda unitaria de la estructura del azufre, mostrando la distribución de los anillos de S<sub>8</sub>.

(con grupo espacial *Fddd*) en la naturaleza; dos polimorfos monoclínicos son muy raros en la naturaleza, pero son comunes sintéticamente. La estructura ortorrómbica del S es estable a la presión atmosférica por debajo de 95,5°C y una

forma monoclínica es estable de 95,5 a 119°C. Este polimorfo monoclínico funde por encima de 119°C. La celda unitaria de la forma ortorrómbica del azufre contiene un gran número de átomos S, exactamente 128. Los átomos de azu-

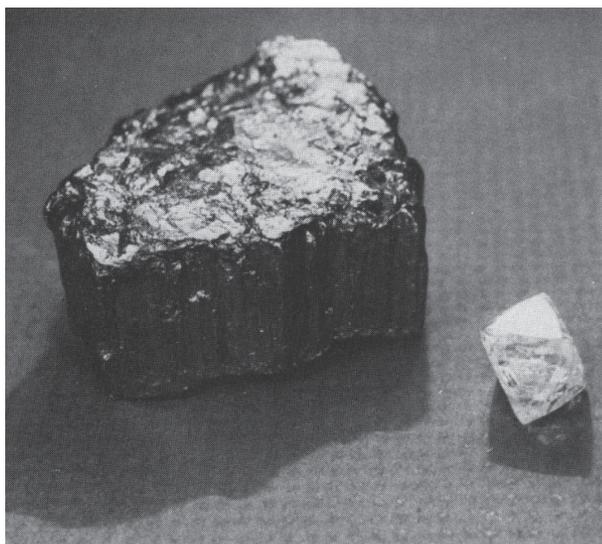


**FIGURA 10.8** (a) Representación parcial de la estructura del diamante. El plano horizontal es (111). (b) La estructura del grafito en láminas // {0001}. Las líneas verticales de trazos unen los átomos de capas sucesivas. Estas líneas no representan enlaces.

fre están dispuestos en anillos plegados de ocho átomos que forman moléculas  $S_8$  fuertemente enlazadas (Fig. 10.7a). Estos anillos se enlazan unos con otros por fuerzas de van der Waals dejando un espaciado relativamente ancho entre ellos (Fig. 10.7b); en las celdas unitarias existen 16 de estos ani-

llos. Pequeñas cantidades de selenio (radio atómico,  $1,16 \text{ \AA}$ ) pueden sustituir al S (radio atómico  $1,04 \text{ \AA}$ ) en la estructura.

En las Figs. 10.8a y b pueden verse las estructuras de los dos polimorfos del carbono, *diamante* y *grafito*. El diamante tiene una estructura excepcional ligada y con fuertes enlaces,

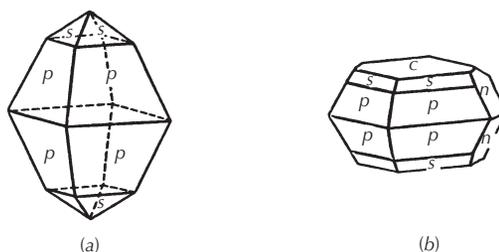


**FIGURA 10.9** Los dos polimorfos del carbono: grafito fibroso de Buckingham, Quebec, Canadá y un diamante octaédrico de la República de Sudáfrica. (*Harvard Mineralogical Museum.*)

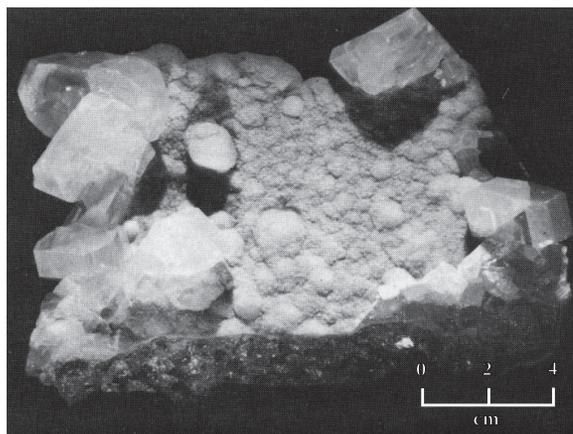
en la cual cada átomo de carbono está ligado por poderosos enlaces covalentes altamente direccionales a cuatro carbonos vecinos dispuestos en los vértices de un tetraedro regular. La estructura resultante, aun poseyendo fuertes enlaces, no tiene un empaquetamiento compacto, pues tan sólo está ocupado el 34% del espacio disponible. La presencia de hojas de átomos de carbono bastante espaciadas en la estructura, paralelas a los planos  $\{111\}$  (Fig. 10.8a), explica la exfoliación octaédrica prominente del diamante. Las hojas  $\{111\}$  son planos de máxima población atómica.

La estructura del grafito representada en la Fig. 10.8b, consta de anillos de seis miembros en los cuales cada átomo de carbono tiene tres vecinos próximos dispuestos en los vértices de un triángulo equilátero. Tres de los cuatro átomos de valencia pueden ser considerados como ligados por fuertes enlaces covalentes a sus tres vecinos más próximos en el plano de la hoja. El cuarto queda libre para vagar por la superficie de la hoja, creando una carga eléctrica dispersa que presta al grafito su conductibilidad eléctrica relativamente elevada. En contraste con esto, el diamante en el cual los cuatro electrones de valencia están fijados por enlaces covalentes es uno de los mejores aislantes eléctricos conocidos.

Las hojas que componen un cristal de grafito están apiladas de tal manera que están alternativamente en idéntica posición y las hojas intermedias están desplazadas una distancia igual a la mitad del periodo de identidad (Fig.



**FIGURA 10.10** Cristales de azufre.



**FIGURA 10.11** Cristales de azufre. Cinciana, Sicilia, Italia. (*Harvard Mineralogical Museum.*)

10.8b). La distancia entre hojas es mucho mayor que un diámetro atómico y las fuerzas de enlace de Van der Waals, perpendiculares a las hojas, son muy débiles. Esta gran separación y la debilidad del enlace, dan lugar a la perfecta exfoliación basal y al fácil deslizamiento paralelo a las hojas. Debido a esta estructura abierta, en el grafito sólo está ocupado el 21%, aproximadamente, del espacio disponible, y su peso específico es, proporcionalmente, menor que el del diamante. En la Fig. 10.9 se muestra una fotografía de los dos polimorfos del carbono, diamante y grafito.

## AZUFRE —S

**Cristalografía.** Ortorrómico:  $2/m2/m2/m$ . Con hábito piramidal (Fig. 10.10a), frecuentemente con dos bipirámides, prisma  $\{011\}$  y base en combinación (Figs. 10.10b y 10.11). Por lo común se encuentra en masas irregulares, imperfectamente cristalizadas; también en masas reniformes, estalactíticas, como incrustaciones y terrosas.

*Fddd*;  $a = 10,47$ ,  $b = 12,87$ ,  $c = 24,49$  Å;  $Z = 128$ . *d's*: 7,76(4), 5,75(5), 3,90(10), 3,48(4), 3,24(6).

**Propiedades físicas.** *Fractura* concoidea o desigual. Frágil. **H**  $1\frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$ . **G** 2,05-2,09. *Brillo* resinoso. *Color* amarillo de azufre, que varía con las impurezas a tonalidades amarillas de verde, gris y rojo. *Transparente* a traslúcido. *Óptica*: (+);  $\alpha = 1,957$ ,  $\beta = 2,037$ ,  $\gamma = 2,245$ ,  $2V = 69^\circ$ .

Mal conductor del calor. Cuando se sostiene un cristal en la mano cerca del oído, se le puede oír crujir debido a la dilatación de las capas superficiales, por el calor de la mano, mientras que el interior no lo hace debido a la poca conductibilidad calorífica del mineral. Los cristales de azufre deben ser, por lo tanto, tratados con cuidado.

**Composición y estructura.** El azufre nativo puede contener pequeñas cantidades de selenio en sustitución del S. La estructura del polimorfo ortorrómbico viene dada en la Fig. 10.7. Esta estructura consiste en grupos  $S_8$  enlazados covalentemente en forma de anillos plegados. Estos anillos  $S_8$  discretos y compactos están débilmente ligados entre sí por enlaces de van der Waals. La celda unitaria del azufre contiene 128 átomos de este elemento distribuidos entre 16 anillos  $S_8$ . El azufre funde a  $119^\circ\text{C}$ , dando lugar a un líquido en el cual los anillos  $S_8$  enlazados covalentemente mantienen su identidad hasta  $160^\circ\text{C}$ . Los polimorfos monoclinicos (azufre  $\alpha$  y  $\beta$ ) son muy raros en la naturaleza.

**Diagnóstico.** El azufre puede ser reconocido por su color amarillo y por la facilidad con que arde. La ausencia de una buena exfoliación lo distingue del oropimente.

**Yacimiento.** El azufre se encuentra frecuentemente en o cerca del borde de los cráteres volcánicos activos o extinguidos donde se ha depositado procedente de los gases emanados en las fumarolas. Éstas pueden suministrar el azufre como producto directo de sublimación o por la oxidación incompleta del gas sulfhídrico. Se forma también por la acción de bacterias autótrofas. El azufre se encuentra a veces en filones, asociado a sulfuros metálicos y formado por la oxidación de éstos. Generalmente se le encuentra en las rocas sedimentarias de la época Terciaria y asociado a menudo a la anhidrita, al yeso y a la calcita; frecuente se le halla también en las rocas arcillosas; también en los depósitos bituminosos. Los grandes depósitos cercanos a Girgenti, Sicilia, son mundialmente famosos por los bellos cristales asociados a la celestina, yeso, calcita, aragonito. Existe también el azufre asociado a los volcanes de México, Hawai, Japón, Argentina y Ollagüe (Chile), donde es explotado a una altura de 5700 metros.

En los Estados Unidos los depósitos más productivos están en Texas y Louisiana. Allí el azufre está asociado a an-

hidrita, yeso y calcita en la roca que cubre los domos de sal. Existen diez o doce localidades productoras, pero la mayor es la de Boling Dome, en Texas, y Grand Ecaille, Plaquemines Parish, en Louisiana. Existen otros muchos depósitos explotables de azufre, como los asociados a domos de sal en México y los existentes en las aguas costeras no profundas del golfo de México. El azufre se obtiene de estos depósitos por el método de Frasch. Se inyecta en la zona del azufre agua sobrecalentada a presión, fundiendo el mineral; el aire comprimido obliga al azufre fundido a salir a la superficie.

Aproximadamente la mitad del azufre mundial se obtiene del elemento nativo; el resto se recupera como subproducto de la fusión de las menas de sulfuro, del gas natural sulfurado y de la pirita.

En España es un mineral relativamente abundante. Se encuentra en capas interestratificadas con margas fosilíferas en Libros, Teruel.

**Empleo.** Se emplea en la fabricación de compuestos de azufre como el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Grandes cantidades de azufre elemental se utilizan en insecticidas, fertilizantes artificiales y en la vulcanización del caucho. Los compuestos de azufre se utilizan en la manufactura de jabones, textiles, curtidos, papel, pinturas, pigmentos y en el refinado del petróleo.

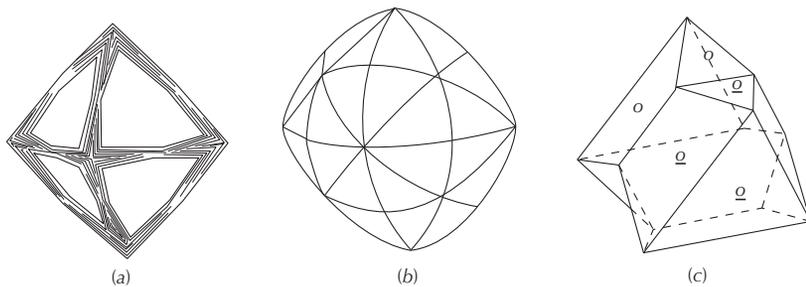
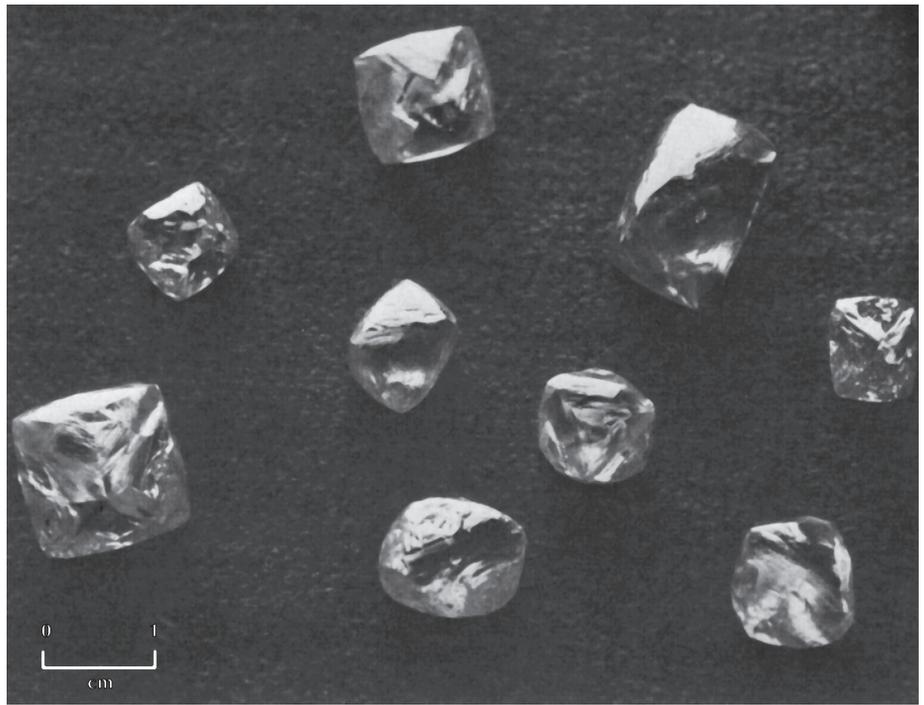
## DIAMANTE —C

**Cristalografía.** Isométrico;  $4/m\bar{3}2/m$ . Los cristales suelen ser octaédricos, pero también cúbicos o dodecaédricos. Se observan con frecuencia caras curvas, sobre todo del octaedro (véase fig. 10.12) y hexaquisoctaedro (Figs. 10.13a y b; véase también Lámina I, nº 1 en el Capítulo 15). Los cristales pueden ser aplastados en  $\{111\}$ . Son corrientes las maclas en  $\{111\}$  (ley de la espinela), por lo general aplastadas paralelas al plano de macla (Fig. 10.13c). El *bort*, que es una variedad del diamante, tiene formas redondeadas y un aspecto externo basto, resultado de su condición de agregado radial o criptocristalino. Este término se emplea también al referirse a diamantes coloreados o defectuosos, sin valor como gema.

*Fd3m*;  $a = 3,567$  Å,  $Z = 8$ . *d's*: 2,06(10), 1,26(8), 1,072(7), 0,813(6), 0,721(9).

**Propiedades físicas.** *Exfoliación* perfecta  $\{111\}$ . **H** 10 (la sustancia más dura conocida). **G** 3,52. *Brillo* adamantino; los cristales sin tallar tienen un aspecto graso característico. El alto índice de refracción, 2,42, y la fuerte dispersión de la luz proporcionan brillo y “fulgor” al diamante tallado. Normalmente su *color* es amarillo pálido o incoloro; también presenta tonalidades pálidas de rojo, anaranjado, verde, azul pardo. Son muy raras las tonalidades fuertes. El *carbonado*

**FIGURA 10.12** Cristales de diamante mostrando un hábito octaédrico pronunciado. (Cortesía del *Diamond Information Center*, New York, N. Y.)



**FIGURA 10.13** Cristales de diamante.

o *carbón* es un bort negro o negro grisáceo. No es exfoliable, es opaco y menos frágil que los cristales puros.

**Composición, estructura y síntesis.** Carbono puro. La estructura del diamante viene ilustrada en las Figs. 10.8a y 3.30. La Fig. 10.8a muestra que cada carbono está rodeado por cuatro átomos de carbono próximos en coordinación tetraédrica. Este es el resultado del enlace covalente en el cual cuatro electrones de valencia presentes en cada carbono completan los orbitales de enlace de los cuatro átomos por compartimiento electrónico. Cada átomo de carbono está así ligado a otros cuatro, formando una red continua. La Fig. 3.30c muestra la distribución centrada en las caras de los áto-

mos de carbono en una celda unitaria cúbica y la Fig. 3.30 la posición de algunos de los elementos de simetría de la celda unitaria del diamante. La Fig. 3.30e ilustra muchas complejidades del grupo espacial diamante,  $F4_1/d\bar{3}2/m$  (abreviado,  $Fd3m$ ).

El diamante, como es lógico por su elevado peso específico y su empaquetamiento compacto, es el polimorfo estable a presiones altas (véase Fig. 10.14). A bajas presiones o temperaturas es inestable respecto al grafito, y puede convertirse en este polimorfo a temperaturas moderadas. La razón de que el diamante y el grafito coexistan a temperaturas y presiones ordinarias (atmosféricas) es que la reacción

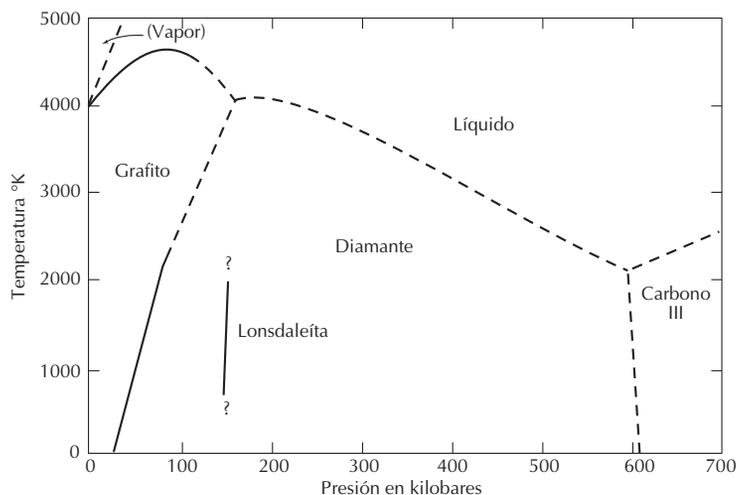


FIGURA 10.14 Diagrama de fases P-T del carbono, basado en datos experimentales de varias fuentes.

polimórfica reconstructiva es muy lenta. Para que el grafito se convierta en diamante es necesaria una temperatura extraordinariamente alta, es decir, una gran energía de activación que permita que los átomos de carbono en estructura gráfica debiliten por agitación térmica sus enlaces y queden en condiciones de construir la estructura diamante. El aumento de temperatura incrementa también la presión necesaria para verificar la reacción polimórfica.

La síntesis del diamante está basada en los campos de estabilidad de los diversos polimorfos del carbono, como indica la Fig. 10.14. Los primeros diamantes sintéticos fueron obtenidos en 1953 por el Dr. Erik Lundblad en los laboratorios de investigación de ASEA en Suecia. Para ello se requirieron condiciones experimentales de unos 2400 K y aproximadamente 76 kilobares mediante el uso de un aparato que simultáneamente ejercía presiones muy elevadas y resistía temperaturas extraordinariamente altas. La técnica ASEA no se patentó en aquel momento porque el mecanismo de síntesis no se comprendía totalmente. En 1955 la General Electric comenzó la manufactura sintética de pequeños diamantes. La producción mundial es ahora del orden de 300 millones de quilates<sup>1</sup>, es decir, tres veces mayor que la producción de diamantes extraídos de minas terrestres. El material sintético, que es idéntico al de los diamantes naturales, ofrece la perspectiva de un suministro seguro e ilimitado de diamantes. En los últimos años las técnicas experimentales han producido diamantes de 11,1 quilates de buena calidad con cierta coloración amarilla; sin embargo, el proceso sin-

tético es todavía demasiado costoso para ser competitivo con los diamantes más grandes de alta calidad de origen natural.

El éxito conseguido con la síntesis del diamante animó a experimentar con el nitruro de boro, BN, cuya estructura es similar a la del grafito. A presiones y temperaturas muy altas (del orden de 85 kilobares y 2100 K) el BN se transforma, de un modo semejante a la transición grafito-diamante, en nitruro de boro cúbico (con el nombre comercial de *borazón*). Este material es extraordinariamente resistente y duro, el segundo después del diamante. Se fabrica en cantidades considerables y se usa principalmente como abrasivo. Esta síntesis ilustra la aplicación de los conceptos cristalocímicos desarrollados y ensayados originalmente en los minerales.

Después de la síntesis inicial del diamante, científicos de la General Electric Company continuaron los experimentos. En 1967 obtuvieron un cristal polimorfo hexagonal transparente de carbono cuya densidad e índice de refracción diferían muy poco de los correspondientes al diamante. Casi simultáneamente fue encontrado un diamante hexagonal en material meteorítico en el cráter del Cañón del Diablo, Arizona. A este polimorfo hexagonal del diamante, de ocurrencia natural, se le dio el nombre de *lonsdaleíta* (véase Fig. 10.14). La lonsdaleíta se ha encontrado también interpuesta con el diamante policristalino, *carbonado* en la *yakutiita*, llamado así por su presencia en depósitos aluviales al norte de Yakutia, Siberia. Es probable que la yakutiita sea el resultado del impacto de un meteorito.

Las investigaciones más recientes sobre la síntesis de diamantes está centrada en el depósito de diamantes de un

<sup>1</sup> Un quilate = 200 miligramos; unidad de peso de las gemas.

gas carbonáceo a presiones inferiores a la atmosférica, obteniéndose una lámina delgada de diamante policristalino en sustratos como el vidrio, silicio, volframio y molibdeno. Este proceso, llamado de deposición química de vapor (CVD), proporciona películas delgadas de diamante que actúan como recubrimiento protector en diversos materiales y que pueden mejorar las cualidades de instrumentos cortantes y materiales semiconductores.

**Diagnóstico.** El diamante se distingue de los otros minerales de apariencia similar por su gran dureza, su brillo adamantino y su exfoliación.

**Yacimientos.** Los diamantes se han encontrado en los lugares más diversos, pero en cantidades notables sólo en unos cuantos sitios. Corrientemente, el diamante se encuentra en depósitos aluviales debido a su naturaleza química inerte, a su gran dureza y a su gran peso específico. En varias regiones de África y Norteamérica, así como en China, Venezuela, Australia, India y Siberia, los diamantes se han encontrado *in situ*. La roca donde aparecen se denomina *kimberlita*, nombre que procede de la localidad de Kimberley, Sudáfrica. Las kimberlitas constituyen un grupo de rocas ultrabásicas potásicas ricas en materias volátiles (principalmente CO<sub>2</sub>) con una variación de composiciones megacristalizadas sobre un sustrato de grano fino (un megacristal es un cristal macroscópicamente visible que destaca claramente del sustrato más fino, aunque no se sabe con certidumbre si se formó en el mismo magma de la kimberlita). El conjunto megacristalizado puede estar formado por ilmenita, granate piropo, olivino, clinopiroxeno, flogopita, enstatita y cromita. La mineralogía de la matriz es compleja, pero puede incluir olivino, flogopita, perovskita, espinela y diópsido. Aunque estos cuerpos intrusivos varían en tamaño y en forma, muchos son aproximadamente circulares y tienen forma de tubo, y son conocidos por los gemólogos con el nombre inglés de “pipes” de diamantes. En las minas más profundas de Kimberley, Sudáfrica, el diámetro de los tubos decrecía con la profundidad y su explotación se interrumpió a unos 1000 metros, aunque los tubos continuaban. En la superficie, la kimberlita, por efecto de los agentes naturales, se convierte en una roca amarilla, “tierra amarilla”, que en profundidad origina una “tierra azul”, más dura. La relación entre los diamantes y la roca estéril varía de un tubo a otro. En la mina de Kimberley era de 1 : 8000000, pero en ocasiones puede ser 1 : 30000000.

Los diamantes se encontraron primeramente en la India, que fue su única fuente hasta que en 1725 se descubrieron en el Brasil. Los primeros diamantes procedían de las gravas de los ríos de la India central y meridional, estimándose que en esta área se produjeron 12 millones de quilates. La produc-

ción actual de la India es sólo de unos pocos centenares de quilates por año.

Después de su descubrimiento en las gravas de los lechos de los ríos en el estado de Minas Gerais, Brasil, los diamantes se encontraron también en los estados de Bahía, Goiás y Mato Grosso. La producción actual del Brasil se centra en las gravas de los ríos, aunque también se explotan extensos depósitos, situados en tierras altas, de gravas y arcillas que contienen diamantes. La variedad carbonada negra se obtiene sólo en Bahía, Brasil.

Los primeros diamantes africanos se descubrieron en 1866, en las gravas del río Vaal, Sudáfrica y en 1871 lo fueron en la “tierra amarilla” de varios “pipes” localizados cerca de la actual ciudad de Kimberley. Aunque algunos diamantes se recuperan todavía de las gravas, la principal producción de Sudáfrica procede de los “pipes” de kimberlita. Las minas se explotaron en un principio a cielo abierto, pero a medida que crecía la profundidad, se adoptaron los métodos subterráneos. La mina de diamantes mayor y más productiva del mundo es la Premier, a 38 km al este de Pretoria, Sudáfrica. Desde que comenzó su explotación en 1903 se han extraído 30 millones de quilates, es decir, 6 toneladas de diamantes. Allí se encontró en 1905 el diamante más grande del mundo, el Cullinan, con un peso de 3106 quilates. La prospección de diamantes ha localizado en Sudáfrica alrededor de 700 “pipes” de kimberlita, diques y galerías, en su mayoría improductivos. En 1966 entró en producción Finsch Mine, situada a 130 km al oeste de Kimberley. Más recientemente se han encontrado diamantes en kimberlitas de Boswana y al norte de Sudáfrica, en una zona próxima a la frontera con Zimbabue. El “pipe” más productivo de todos se descubrió en 1979 en Australia Occidental y se conoce como Argyle Mine. Este yacimiento está formado por *lamproíta*, nombre de roca que se refiere a material ígneo altamente potásico, pobre en aluminio y que consta de la siguiente variedad de minerales: flogopita, tremolita sódica rica en K (también llamada richterita), leucita, sanidina, diópsido y una variedad de silicatos y óxidos ricos en K, Ba, Ti y Zr.

En la provincia de El Cabo, en la costa desértica situada al sur de la desembocadura del río Orange, fueron descubiertos en 1927 depósitos sedimentarios que contenían diamantes de excelente calidad. Previamente, en 1908, se encontraron diamantes cerca de Luderitz, en la costa de Namibia. En otras partes de África se han encontrado diamantes, casi siempre aluviales, en una docena de países. Los principales productores son Zaire, Bostwana, Angola, Ghana, Sierra Leona, República de África Central y Tanzania. Zaire es con mucho el mayor productor y suministra a partir

de kimberlitas y depósitos en placeres menores el 20% de la producción mundial. Estos diamantes de Zaire son fundamentalmente de tipo industrial y sólo el 10% son de calidad gema. La Comunidad de Estados Independientes es también un productor importante de diamantes, procedentes de “pipes” y de placeres. Localidades importantes con yacimientos de kimberlita en el CIS son: Mir kimberlita, Mirny y Udachmaya kimberlita, ambas en Yakutia; y Pomorskaya kimberlita, Arkangel, Península de Omega, Mar Blanco. En los Urales y en Yakutia se encuentran importantes depósitos aluviales con diamantes en ríos y placeres.

Los principales productores de diamantes del mundo, con cifras correspondientes a 1988 (producción en bruto) y expresadas en millones de quilates, son:

Australia	35,0
Zaire	23,0
Botswana	15,0
CIS	12,0
Sudáfrica	9,0
Namibia	0,9
Sudamérica	0,85

(Datos de Wilks and Wilks, 1991).

En los Estados Unidos se han encontrado esporádicamente diamantes en varios lugares. Ocasionalmente se descubrieron pequeñas piedras en los lechos arenosos de la vertiente oriental de los montes Apalaches, en Virginia, al sur de Georgia. Los diamantes se han beneficiado también de las arenas auríferas del norte de California y sur del Estado de Oregon. Yacimientos esporádicos de diamantes han sido reconocidos en las morrenas glaciares en Wisconsin, Michigan y Ohio. En 1906 se encontraron diamantes en un “pipe” de lamproíta situado cerca de Murfreesboro, Pike County, Arkansas. Esta localidad, que recuerda los “pipes” de diamantes de Sudáfrica, ha facilitado alrededor de 40 000 piedras, pero actualmente es improductiva. En 1951, las viejas minas fueron abiertas a los turistas, a quienes se autorizaba la búsqueda de diamantes por una módica cuota. Actualmente es un parque nacional.

**Empleo.** *En la industria.* Los fragmentos de los cristales de diamante se emplean para cortar vidrio. El polvo fino se emplea para triturar y pulir diamantes y otras gemas. Para cortar las rocas y otros materiales duros se usan discos impregnados de polvo de diamante. Las brocas de acero están guarnecidas con diamantes, especialmente de la variedad criptocristalina, *carbonado*, para fabricar las taladradoras de diamante que se emplean en los trabajos de saneo minero. El

diamante se emplea en el trefilado de alambres y en herramientas para rectificar las ruedas de afilar.

**Gemas.** El diamante es una de las gemas de más alto precio. Su valor depende de su dureza, de su brillo, que resulta de su alto índice de refracción, y de su fulgor, originado por fuerte dispersión de la luz. En general, las gemas más valiosas son las incoloras o con un color blanquiazul sin manchas. El color amarillo paja pálido, que presentan frecuentemente ciertos diamantes, les resta mucho valor. Las tonalidades fuertes de amarillo, rojo, verde o azul, conocidas como piedras preciosas, se aprecian mucho y llegan a tener precios muy altos. Se puede comunicar a los diamantes intensos matices de verde mediante irradiación con partículas nucleares de elevada energía, neutrones, deuterones y partículas alfa, y de azul exponiéndolos a la acción de electrones rápidos. Una piedra teñida de verde por irradiación puede tomar un color amarillo intenso mediante un tratamiento térmico adecuado. Estas piedras coloreadas artificialmente son difíciles de distinguir de las que tienen color natural. Véase Cap. 15 para un estudio más ampliado e ilustraciones de diamantes gemas.

**Etimología.** El nombre de diamante es una corrupción de la palabra griega *adamas*, que significa *invencible*. El término *adamantino* describe el brillo intenso de los minerales con un alto índice de refracción, tal como el diamante y la cerusita.

## GRAFITO —C

**Cristalografía.** Hexagonal;  $6/m2/m2/m$ . Se da en cristales tabulares de forma hexagonal con plano basal muy desarrollado. Son muy raras las otras formas. Ciertas trazas triangulares sobre la base son el resultado de deslizamientos según una pirámide  $\{hh\bar{2}hl\}$ . Aparece normalmente en masas hojosas o escamosas, pero puede ser radiado o granular.

$P6_3/mmc$ .  $a = 2,46$ ,  $c = 6,74$  Å,  $Z = 4$ .  $d's$ : 3,36(10), 2,03(5), 1,675(8), 1,232(3), 1,158(5).

**Propiedades físicas.** *Exfoliación* perfecta  $\{0001\}$ . **H** 1-2 (marca fácilmente el papel y ensucia los dedos). **G** 2,23. *Brillo* metálico, algunas veces terroso opaco. *Color y huella*, negro. Tacto graso. Hojas flexibles pero no elásticas (Fig. 10.9).

**Composición y estructura.** Carbono. Ciertos grafitos impuros con óxido de hierro, arcilla u otros minerales. La estructura viene ilustrada en la Fig. 10.8b.

**Diagnóstico.** El grafito se reconoce por su color, su naturaleza hojosa y su tacto graso. Se distingue de la molibdenita por su color negro (la molibdenita tiene un tono azul) y por la huella negra que deja sobre la porcelana.