

# AAU

AMERICAN ANDRAGOGY  
UNIVERSITY





# **Ciencias de la Tierra**

## **Una introducción a la geología física**

# CONTENIDO BREVE

<b>CAPÍTULO 1</b>		
Introducción a la Geología .....	2	
<b>CAPÍTULO 2</b>		
Tectónica de placas: el desarrollo de una revolución científica .....	22	
<b>CAPÍTULO 3</b>		
Materia y minerales .....	84	
<b>CAPÍTULO 4</b>		
Magma, rocas ígneas y actividad intrusiva .....	124	
<b>CAPÍTULO 5</b>		
Los volcanes y los riesgos volcánicos.....	158	
<b>CAPÍTULO 6</b>		
Meteorización y suelo.....	200	
<b>CAPÍTULO 7</b>		
Rocas sedimentarias.....	230	
<b>CAPÍTULO 8</b>		
Metamorfismo y rocas metamórficas.....	262	
<b>CAPÍTULO 9</b>		
El tiempo geológico .....	292	
<b>CAPÍTULO 10</b>		
Deformación de la corteza.....	318	
<b>CAPÍTULO 11</b>		
Los terremotos y los riesgos sísmicos .....	344	
<b>CAPÍTULO 12</b>		
El interior de la Tierra.....	380	
<b>CAPÍTULO 13</b>		
Bordes divergentes: origen y evolución del fondo oceánico ....	406	
<b>CAPÍTULO 14</b>		
Bordes convergentes: formación de las montañas y evolución de los continentes.....		436
<b>CAPÍTULO 15</b>		
Procesos gravitacionales: obra de la gravedad.....		464
<b>CAPÍTULO 16</b>		
Corrientes de aguas superficiales.....		492
<b>CAPÍTULO 17</b>		
Aguas subterráneas .....		530
<b>CAPÍTULO 18</b>		
Glaciares y glaciaciones.....		564
<b>CAPÍTULO 19</b>		
Deformación de la corteza.....		600
<b>CAPÍTULO 20</b>		
Líneas de costa.....		626
<b>CAPÍTULO 21</b>		
El cambio climático global.....		666
<b>CAPÍTULO 22</b>		
La evolución de la Tierra a través del tiempo geológico .....		706
<b>CAPÍTULO 23</b>		
Energía y recursos minerales.....		746
<b>CAPÍTULO 24</b>		
Geología planetaria.....		780
<b>APÉNDICE A</b>		
Comparación entre unidades métricas y británicas.....		821
<b>GLOSARIO</b> .....		823
<b>ÍNDICE ANALÍTICO</b> .....		841

# CONTENIDO

Prólogo ..... XXI

## 1

### Introducción a la Geología ..... 2

La ciencia de la geología ..... 4

La geología, el ser humano y el medio ambiente ..... 5

Algunas reseñas históricas acerca de la geología ..... 7

Catastrofismo ..... 7

**Perfil profesional** Oportunidades laborales en Geociencias ..... 8

Nacimiento de la Geología moderna ..... 9

La Geología actual ..... 9

Tiempo geológico ..... 10

La magnitud del tiempo geológico ..... 10

La datación relativa y la escala de tiempo geológico ..... 10

Naturaleza de la investigación científica ..... 12

Hipótesis ..... 12

Teoría ..... 15

El método científico ..... 15

La tectónica de placas y la investigación científica ..... 15

Las esferas de la Tierra ..... 17

Una visión de la Tierra ..... 17

Hidrosfera ..... 18

Atmósfera ..... 19

Biosfera ..... 19

Geosfera ..... 20

La Tierra como un sistema ..... 20

La ciencia del sistema Tierra ..... 20

El sistema Tierra ..... 22

Evolución de la Tierra primitiva ..... 23

El origen del planeta Tierra ..... 24

Formación de la estructura en capas de la Tierra ..... 26



Estructura interna de la Tierra ..... 26

La corteza de la Tierra ..... 27

El manto de la Tierra ..... 27

El núcleo de la Tierra ..... 28

¿Cómo sabemos lo que sabemos? ..... 28

La superficie de la Tierra ..... 29

Principales características de los continentes ... 32

Principales características del fondo oceánico... 33

 Las rocas y el ciclo de las rocas ..... 34

Tipos básicos de rocas ..... 34

El ciclo de las rocas: uno de los subsistemas de la Tierra ..... 38

Resumen ..... 40

Términos fundamentales ..... 41

Preguntas de repaso ..... 41

MasteringGeology ..... 42

**Recuadro 1.1 Enteder la Tierra** El estudio de la Tierra desde el espacio ..... 14

**Recuadro 1.2 Enteder la Tierra** ¿Se mueven los glaciares? Una aplicación del método científico ..... 16






## 2

### Tectónica de placas: el desarrollo de una revolución científica ..... 44

Deriva continental: una idea que se adelantó a su época ..... 46

















Evidencias: el rompecabezas continental . . . . .	47
Evidencia: los fósiles coinciden en costas opuestas de los mares . . . . .	47
Evidencia: tipos de roca y características geológicas . . . . .	49
Evidencias paleoclimáticas. . . . .	49
El gran debate. . . . .	50
Rechazo de la hipótesis de la deriva continental. La deriva continental y el método científico . . . . .	51
Deriva continental y paleomagnetismo . . . . .	51
El campo magnético de la Tierra y el paleomagnetismo. . . . .	52
Deriva polar aparente . . . . .	52
Comienzo de una revolución científica . . . . .	54
La hipótesis de la expansión del fondo oceánico. Inversiones magnéticas: pruebas de la expansión del fondo oceánico . . . . .	55
 Tectónica de placas: el nuevo paradigma . . . . .	58
Las principales placas de la Tierra . . . . .	59
Bordes de placa . . . . .	62
 Bordes divergentes. . . . .	62
Las dorsales oceánicas y la expansión del fondo oceánico. . . . .	62
La fragmentación continental . . . . .	63
 Bordes convergentes . . . . .	64
Convergencia oceánica-continental . . . . .	65
Convergencia oceánica-oceánica. . . . .	65
Convergencia continental-continental . . . . .	66
 Bordes de falla transformante . . . . .	68
¿Cómo cambian las placas y los bordes de placa? . . . . .	69
Comprobación del modelo de la tectónica de placas. . . . .	70
Pruebas procedentes de sondeos oceánicos. . . . .	70
Puntos calientes y plumas del manto. . . . .	72
 Medición del movimiento de placas. . . . .	73
Plumas del manto y movimientos de las placas . El paleomagnetismo y los movimientos de placas. . . . .	73
	75

Medición de las velocidades de las placas desde el espacio. . . . .	76
¿Qué impulsa los movimientos de las placas? . . . . .	76
Convección placa-manto . . . . .	76
Fuerzas que impulsan el movimiento de las placas. . . . .	77
Modelos de convección placa-manto . . . . .	78
La importancia de la teoría de la tectónica de placas. . . . .	80
Resumen. . . . .	80
Términos fundamentales. . . . .	81
Preguntas de repaso . . . . .	81
MasteringGeology . . . . .	82
<b>Recuadro 2.1 Enteder la Tierra</b> Alfred Wegener (1880-1930): explorador polar y visionario . . . . .	53
<b>Recuadro 2.2 Enteder la Tierra</b> La prioridad de las ciencias. . . . .	59
<b>Recuadro 2.3 Enteder la Tierra</b> Fragmentación de Pangea . . . . .	71

### 3

<b>Materia y minerales. . . . .</b>	84
 <b>Minerales: componentes básicos de las rocas. . . . .</b>	86
<b>Átomos: las unidades de construcción de los minerales. . . . .</b>	89
Propiedades de los protones, neutrones y electrones. . . . .	89
Los elementos definidos por su número de protones. . . . .	89
¿Por qué se unen los átomos? . . . . .	90
Enlaces iónicos: la transferencia de electrones . . . . .	91
Enlaces covalentes: compartiendo electrones . . . . .	92
Enlaces metálicos: los electrones tienen libertad de movimiento . . . . .	93
Otros enlaces: enlaces híbridos . . . . .	93
Isótopos y desintegración radiactiva . . . . .	94
<b>Cristales y cristalización . . . . .</b>	94
¿Cómo se forman los minerales? . . . . .	94
Estructuras cristalinas . . . . .	96
Variaciones de composición en los minerales . . . . .	99
Variaciones estructurales de los minerales . . . . .	100
 <b>Propiedades físicas de los minerales. . . . .</b>	101
Propiedades ópticas. . . . .	102
Forma o hábito del cristal . . . . .	103
Fuerza mineral . . . . .	103
Densidad y peso específico . . . . .	106
Otras propiedades de los minerales . . . . .	106
<b>Denominación y clasificación de los minerales. . . . .</b>	107
Clasificación de los minerales . . . . .	107
Principales clases de minerales . . . . .	108

Los silicatos.....	108	 Actividad ígnea intrusiva.....	149
El tetraedro silicio-oxígeno.....	109	Naturaleza de los cuerpos intrusivos.....	150
Ensamblaje de las estructuras de los silicatos.....	110	Cuerpos intrusivos tabulares: diques y sills.....	151
 Silicatos comunes.....	111	Cuerpos intrusivos masivos: batolitos y stocks.....	152
Los silicatos claros.....	111	Resumen.....	154
Los silicatos oscuros.....	114	Términos fundamentales.....	155
 Minerales no silicatados importantes.....	116	Preguntas de repaso.....	156
Resumen.....	120	MasteringGeology.....	157
Términos fundamentales.....	121	<b>Recuadro 4.1 Entender la Tierra</b> Láminas	
Preguntas de repaso.....	121	delgadas e identificación de las rocas.....	137
MasteringGeology.....	122	<b>Recuadro 4.2 Entender la Tierra</b> Un	
<b>Recuadro 3.1 El hombre y el medio ambiente</b> Hacer vidrio a partir de		acercamiento a la serie de reacción de	
minerales.....	88	Bowen.....	148
<b>Recuadro 3.2 El hombre y el medio ambiente</b> Asbesto: ¿cuáles son los			
riesgos?.....	99		
<b>Recuadro 3.3 La Tierra como sistema</b>			
Piedras preciosas.....	118		
<h2>4</h2>		<h2>5</h2>	
<b>Magma, rocas ígneas y actividad intrusiva.....</b>	124	<b>Los volcanes y los riesgos volcánicos.....</b>	158
 Magma: el material parental de las rocas ígneas.....	126	 Naturaleza de las erupciones volcánicas.....	161
La naturaleza de los magmas.....	126	Factores que afectan a la viscosidad.....	163
De los magmas a las rocas cristalinas.....	127	¿Por qué hacen erupción los volcanes?.....	163
Procesos ígneos.....	127	 Materiales expulsados durante una erupción.....	165
 Composiciones ígneas.....	128	Coladas de lava.....	165
Composiciones graníticas (félsicas) frente a		Gases.....	167
composiciones basálticas (máficas).....	128	Materiales piroclásticos.....	167
Otros grupos composicionales.....	129	 Estructuras volcánicas y estilos de erupción.....	169
El contenido de sílice como indicador de la		Anatomía de un volcán.....	169
composición.....	129	Volcanes en escudo.....	170
 Texturas ígneas: ¿Qué pueden decirnos?.....	130	Conos de cenizas.....	173
Tipos de texturas ígneas.....	131	Conos compuestos.....	175
 Denominación de las rocas ígneas.....	134	Vivir a la sombra de un cono compuesto.....	176
Rocas ígneas félsicas (graníticas).....	134	Erupción del Vesubio, 79 d.C.....	177
Rocas ígneas intermedias (andesíticas).....	139	Nubes ardientes: una colada piroclástica mortal.....	178
Rocas ígneas máficas (basálticas).....	139	Lahares: corrientes de barro en conos activos e	
Rocas piroclásticas.....	139	inactivos.....	180
Origen de los magmas.....	140	Otras formas volcánicas.....	181
Generación del magma a partir de roca sólida.....	140	Calderas.....	181
Evolución de los magmas.....	143		
Serie de reacción de Bowen y composición			
de las rocas ígneas.....	143		
Asimilación y mezcla de magmas.....	145		
Fusión parcial y composición de los magmas.....	146		
Formación de magmas basálticos.....	147		
Formación de magmas andesíticos y graníticos.....	147		





Erupciones fisurales y llanuras de basalto.....	184
Domos de lava.....	184
Chimeneas y pitones volcánicos.....	185
Tectónica de placas y actividad ígnea.....	186
Vulcanismo en los bordes convergentes de la placa.....	188
Vulcanismo en los bordes de placa divergentes.....	188
Vulcanismo intraplaca.....	189
<b>Perfil profesional</b> Chris Eisinger. Estudiando los volcanes activos.....	189
Vivir con los volcanes.....	193
Los riesgos volcánicos.....	194
Control de la actividad volcánica.....	195
Resumen.....	196
Términos fundamentales.....	196
Preguntas de repaso.....	197
MasteringGeology.....	198
<b>Recuadro 5.1 Entender la Tierra</b> Anatomía de una erupción.....	162
<b>Recuadro 5.2 La Tierra como sistema</b> Contaminación volcánica del aire: un riesgo en Hawái.....	170
<b>Recuadro 5.3 El hombre y el medio ambiente</b> El continente perdido de Atlántida.....	179

## 6


<b>Meteorización y suelo</b> .....	200
Procesos externos de la Tierra.....	202
Meteorización.....	203
Meteorización mecánica.....	203
Fragmentación por el hielo (gelifracción).....	204
Crecimiento de cristales salinos.....	204
Lajamiento.....	205
Expansión térmica.....	207
Actividad biológica.....	207
Meteorización química.....	208
Disolución.....	208
Oxidación.....	211

Hidrólisis.....	212
Meteorización esferoidal.....	213
<b>Velocidades de meteorización</b> .....	214
Características de la roca.....	214
Clima.....	214
Meteorización diferencial.....	215
<b>Suelo</b> .....	215
Una interfase en el sistema Tierra.....	216
¿Qué es el suelo?.....	216
<b>Controles de la formación del suelo</b> .....	216
Roca madre.....	216
Tiempo.....	217
Clima.....	218
Plantas y animales.....	218
Topografía.....	219
El perfil del suelo.....	219
Clasificación de los suelos.....	221
Erosión del suelo.....	223
Cómo se erosiona el suelo.....	223
Velocidad de erosión.....	224
Sedimentación y contaminación química.....	225
Resumen.....	227
Términos fundamentales.....	228
Preguntas de repaso.....	228
MasteringGeology.....	228
<b>Recuadro 6.1 Entender la Tierra</b> El Hombre Viejo de la Montaña.....	206
<b>Recuadro 6.2 La Tierra como sistema</b> Lluvia ácida: un impacto humano sobre el sistema Tierra.....	210
<b>Recuadro 6.3 El hombre y el medio ambiente</b> Despejar el bosque tropical: impacto en sus suelos.....	222

## 7


<b>Rocas sedimentarias</b> .....	230
La importancia de las rocas sedimentarias.....	232
El origen de las rocas sedimentarias.....	233
Rocas sedimentarias detríticas.....	234
Lutita.....	235
Arenisca.....	236
Conglomerado y brecha.....	239
Rocas sedimentarias químicas.....	240
Caliza.....	240
Dolomía.....	243
Rocas silíceas (sílex).....	243
Evaporitas.....	244
Carbón, una roca sedimentaria orgánica.....	245
Transformación del sedimento en roca sedimentaria: diagénesis y litificación.....	246
Clasificación de las rocas sedimentarias.....	248



 Ambientes sedimentarios.....	251
Tipos de ambientes sedimentarios .....	251
Facies sedimentarias .....	254
Estructuras sedimentarias .....	255
Resumen.....	259
Términos fundamentales.....	260
Preguntas de repaso .....	260
MasteringGeology.....	261
<b>Recuadro 7.1 La Tierra como sistema</b>	
El ciclo del carbono y las rocas sedimentarias .....	247
<b>Recuadro 7.2 El hombre y el medio ambiente</b> Nuestros arrecifes de coral amenazados.....	249

## 8

### Metamorfismo y rocas metamórficas.....

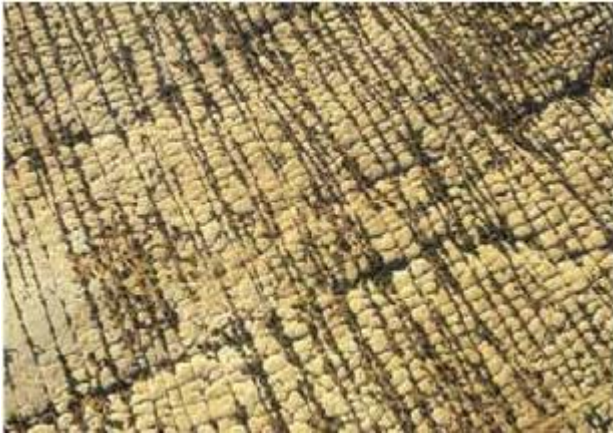
 <b>Metamorfismo</b> .....	264
 ¿Qué impulsa el metamorfismo?.....	265
El calor como agente metamórfico .....	265
Presión de confinamiento y esfuerzo diferencial.....	267
Fluidos químicamente activos .....	268
La importancia del protolito .....	268
 <b>Texturas metamórficas</b> .....	269
Foliación .....	269
Texturas foliadas .....	270
Otras texturas metamórficas .....	272
 <b>Rocas metamórficas comunes</b> .....	273
Rocas foliadas.....	273
Rocas no foliadas .....	276
<b>Ambientes metamórficos</b> .....	277
Metamorfismo térmico o de contacto.....	277
Metamorfismo hidrotermal .....	278
Metamorfismo de enterramiento y de zona de subducción .....	280
Metamorfismo regional.....	280
Otros ambientes metamórficos .....	280
<b>Zonas de metamorfismo</b> .....	282
Variaciones de textura.....	282
Minerales índice y grado metamórfico.....	284
<b>Interpretación de los ambientes metamórficos</b> .....	285
Resumen.....	288
Términos fundamentales.....	289
Preguntas de repaso .....	289
MasteringGeology.....	290
<b>Recuadro 8.1 Entender la Tierra</b> El metamorfismo de impacto y las tectitas.....	283
<b>Recuadro 8.2 Entender la Tierra</b> Estabilidad mineral .....	287

## 9

### El tiempo geológico.....




La geología necesita una escala temporal.....	294
 <b>Datación relativa: principios clave</b> .....	294
Ley de la superposición .....	295
Principio de la horizontalidad original .....	296
Principio de la intersección .....	296
Inclusiones .....	296
Discontinuidades estratigráficas .....	296
Aplicación de los principios de datación relativa.....	298
Correlación de las capas rocosas.....	299
<b>Fósiles: evidencias de vida en el pasado</b> .....	300
Tipos de fósiles.....	300
Condiciones que favorecen la conservación .....	304
Fósiles y correlación .....	304
 <b>Datación con radiactividad</b> .....	306
Repaso de la estructura básica del átomo .....	306
Radiactividad .....	306
Periodo de semidesintegración .....	307
Datación radiométrica.....	308
Datación con carbono-14 .....	309
Importancia de la datación radiométrica .....	310
 <b>Escala de tiempo geológico</b> .....	310
Estructura de la escala temporal .....	310
El Precámbrico .....	312
<b>Dificultades de datación de la escala de tiempo geológico</b> .....	313
Resumen.....	314
Términos fundamentales.....	315
Preguntas de repaso .....	316
MasteringGeology.....	317
<b>Recuadro 9.1 Entender la Tierra</b> Aplicación de los principios de datación relativa en la superficie lunar.....	302
<b>Recuadro 9.2 Entender la Tierra</b> La terminología en la escala de tiempo geológico.....	312






## 10

### Deformación de la corteza ..... 318

Geología estructural: estudio de la arquitectura terrestre.....	320
 Deformación y esfuerzo .....	321
Esfuerzo: la fuerza que deforma las rocas .....	321
Deformación: un cambio de forma causado por el esfuerzo .....	321
Cómo se deforman las rocas .....	322
Deformación elástica, frágil y dúctil.....	322
Factores que afectan a la resistencia de las rocas.....	324
 Estructuras formadas por deformación dúctil .....	325
<b>Perfil profesional</b> Michael Collier. Pies calientes: Un geólogo divulgador.....	326
Plegues.....	327
 Estructuras formadas por deformación frágil .....	331
Fallas .....	332
Fallas con desplazamiento vertical .....	333
Fallas de desplazamiento horizontal .....	336
Diaclasas .....	338
Cartografía de las estructuras geológicas .....	339
Dirección y buzamiento .....	340
Resumen.....	341
Términos fundamentales.....	342
Preguntas de repaso .....	343
MasteringGeology.....	343
<b>Recuadro 10.1 Entender la Tierra</b>	
Denominación de las unidades rocosas locales .....	340


## 11

### Los terremotos y los riesgos sísmicos ..... 344

 ¿Qué es un terremoto? .....	346
Descubrimiento de las causas de los terremotos .....	347

Sismos precursores y réplicas .....	348
Fracturación, fallas y terremotos .....	348
La naturaleza de las fallas .....	349
Ruptura de falla y propagación.....	351
<b>Perfil profesional</b> Andrea Donnellan.	
Pronosticadora de terremotos.....	351
 Sismología: el estudio de las ondas sísmicas.....	352
 Localización del epicentro de un terremoto .....	355
 Medición de las dimensiones sísmicas .....	356
Escala de intensidad .....	356
Escala de magnitud .....	357
Cinturones sísmicos y bordes de placa .....	359
Destrucción causada por los terremotos.....	361
Destrucción causada por las vibraciones sísmicas.....	361
Deslizamientos y subsidencia del terreno.....	364
Incendios.....	365
¿Qué es un tsunami?.....	365
¿Pueden predecirse los terremotos?.....	367
Predicciones a corto plazo .....	367
Pronósticos a largo plazo .....	370
Los riesgos sísmicos en la falla de San Andrés.....	372
 Terremotos: pruebas de la tectónica de placas.....	373
Resumen.....	376
Términos fundamentales.....	377
Preguntas de repaso .....	377
MasteringGeology.....	378
<b>Recuadro 11.1 Entender la Tierra</b>	
Amplificación de las ondas y riesgos sísmicos.....	363
<b>Recuadro 11.2 El hombre y el medio ambiente</b> El estudio de la Tierra desde el espacio .....	375


## 12

<b>El interior de la Tierra.....</b>	<b>380</b>
La gravedad y los planetas con estructuras en capas .....	382
Sondeo del interior de la Tierra: «ver» las ondas sísmicas .....	383
 Las capas de la Tierra .....	384
La corteza de la Tierra.....	385
Manto de la Tierra .....	388
El núcleo de la Tierra.....	389
La temperatura de la Tierra .....	391
Cómo alcanzó la Tierra tanto calor .....	391
Flujo de calor .....	392
Perfil de temperatura de la Tierra .....	394
Estructura tridimensional de la Tierra.....	396
Gravedad de la Tierra .....	396
Tomografía sísmica .....	397
El campo magnético de la Tierra.....	399

Resumen.....	403
Términos fundamentales.....	404
Preguntas de repaso.....	404
MasteringGeology.....	405
Recuadro 12.1 <b>Entender la Tierra</b> Recrear la profundidad terrestre.....	386
Recuadro 12.2 <b>La Tierra como sistema</b> Conexiones dinámicas globales.....	401

## 13


### Bordes divergentes: origen y evolución del fondo oceánico.....

 Una imagen emergente del fondo oceánico ..	408
Cartografía del fondo oceánico.....	408
Observación del fondo oceánico desde el espacio.....	410
Provincias del fondo oceánico.....	410
 Márgenes continentales.....	410
<b>Perfil profesional</b> Susan DeBari. Una carrera en Geología.....	411
Márgenes continentales pasivos.....	412
Márgenes continentales activos.....	414
 Características de las cuencas oceánicas profundas.....	414
Fosas submarinas.....	414
Llanuras abisales.....	415
Montes submarinos, guyots y mesetas oceánicas.....	416
 Anatomía de la dorsal oceánica.....	416
Dorsales oceánicas y expansión del fondo oceánico.....	418
Expansión del fondo oceánico.....	420
¿Por qué las dorsales oceánicas son elevadas? ..	420
Velocidades de expansión y topografía de las dorsales.....	420
Estructura de la corteza oceánica.....	421
Formación de la corteza oceánica.....	422
Interacción entre el agua marina y la corteza oceánica.....	423
Ruptura continental: el nacimiento de una nueva cuenca oceánica.....	423
Evolución de una cuenca oceánica.....	423
Mecanismos de ruptura continental.....	427
Destrucción de la litosfera oceánica.....	430
¿Por qué la litosfera oceánica subduce?.....	430
Placas en subducción: la desaparición de una cuenca oceánica.....	431
Resumen.....	433
Términos fundamentales.....	434
Preguntas de repaso.....	434

MasteringGeology.....	435
Recuadro 13.1 <b>Entender la Tierra</b> Explicación de los atolones de coral: la hipótesis de Darwin.....	417
Recuadro 13.2 <b>La Tierra como sistema</b> Las chimeneas hidrotermales submarinas profundas.....	424

## 14

### Bordes convergentes: formación de las montañas y evolución de los continentes.....

Formación de las montañas.....	438
Convergencia y placas en subducción.....	440
Principales estructuras de las zonas de subducción.....	440
Dinámica en las zonas de subducción.....	441
Subducción y formación de las montañas.....	441
Arcos volcánicos de islas.....	442
Formación de montañas a lo largo de los bordes de tipo andino.....	442
Sierra Nevada, las Sierras Costeras y el Gran Valle.....	446
 Cinturón orogénico o montañoso colisional ..	448
Fragmentos de corteza (terranes) y formación de las montañas.....	448
Colisiones continentales.....	449
El Himalaya.....	450
Los Apalaches.....	452
Montañas de bloque de falla.....	454
Provincia Basin and Range.....	454
Movimientos verticales de la corteza.....	458
Isostasia.....	458
Convección del manto: un motivo del movimiento vertical de la corteza.....	460











Resumen .....	461
Términos fundamentales .....	462
Preguntas de repaso .....	462
MasteringGeology .....	463
<b>Recuadro 14.1 Entender la Tierra</b>	
Terremotos en el noroeste del Pacífico .....	444
<b>Recuadro 14.2 Entender la Tierra</b> El sur	
de las Rocosas .....	456
<b>Recuadro 14.3 Entender la Tierra</b> ¿Las	
montañas tienen raíces? .....	460

## 15

### Procesos gravitacionales: obra de la gravedad..... 464





Los deslizamientos de tierra como desastres naturales .....	466
Procesos gravitacionales y desarrollo de las formas del terreno .....	466
Papel de los procesos gravitacionales .....	466
Las pendientes cambian con el tiempo .....	468
 Controles y desencadenantes de los procesos gravitacionales.....	468
Papel del agua .....	468
Pendientes sobreempinadas .....	468
Eliminación de la vegetación .....	469
Terremotos como desencadenantes .....	472
¿Deslizamientos sin desencadenantes? .....	473
Posibles deslizamientos de tierra .....	473
Clasificación de los procesos gravitacionales ..	474
Tipo de material .....	474
Tipo de movimiento .....	474
Velocidad de movimiento .....	475
 Deslizamiento rotacional.....	477
 Deslizamiento de rocas.....	479
 Flujo de derrubios .....	480
Flujos de derrubios en las regiones semiáridas ..	480
Lahares .....	481
<b>Perfil profesional</b> Bob Rasely, Especialista en procesos gravitacionales .....	483

 Flujos de tierra .....	484
 Movimientos lentos.....	484
Reptación .....	485
Soliflucción.....	485
El sensible paisaje del permafrost.....	486
Deslizamientos submarinos.....	488
Resumen.....	489
Términos fundamentales.....	489
Preguntas de repaso .....	490
MasteringGeology .....	490

<b>Recuadro 15.1 El hombre y el medio ambiente</b> Peligro de derrumbamientos en La Conchita, California .....	470
<b>Recuadro 15.2 El hombre y el medio ambiente</b> El desastre de la presa de Vaiont .....	476










## 16

### Corrientes de aguas superficiales..... 492

 La Tierra como sistema: el ciclo hidrológico ..	494
 Las aguas de escorrentía .....	496
Cuencas de drenaje .....	496
Sistemas fluviales.....	497
 Flujo de corriente.....	498
Velocidad de la corriente .....	498
Gradiente y características del cauce .....	499
Caudal.....	500
Cambios corriente abajo.....	500
La acción de las corrientes de agua.....	502
Erosión de las corrientes.....	502
Transporte del sedimento por las corrientes .....	503
Depósitos de sedimentos por las corrientes fluviales.....	505
Cauces de los ríos.....	505
Lechos rocosos .....	505
Cauces aluviales.....	506
Nivel de base y corrientes gradadas .....	508
 Forma de los valles fluviales .....	510
Excavación del valle .....	510
Ampliación del valle .....	513
Meandros encajados y terrazas fluviales .....	513
Formas de los depósitos .....	515
Deltas.....	515
El delta del Mississippi.....	516
Diques naturales .....	517
Abanicos aluviales.....	518
Redes de drenaje.....	518
Formación de una garganta .....	519
Erosión remontante y captura .....	521



Inundaciones y control de la inundación.....	521
Tipos de inundaciones .....	523
Control de las inundaciones.....	526
Resumen.....	527
Términos fundamentales.....	528
Preguntas de repaso .....	528
MasteringGeology.....	529
<b>Recuadro 16.1 El hombre y el medio ambiente</b> Las zonas húmedas costeras desaparecen del delta del Mississippi.....	520
<b>Recuadro 16.2 El hombre y el medio ambiente</b> Avenidas .....	525

## 17

 <b>Aguas subterráneas</b> .....	530
 Importancia de las aguas subterráneas .....	532
 Agua subterránea: un recurso básico .....	533
 Distribución de las aguas subterráneas .....	534
 El nivel freático .....	535
Variaciones en el nivel freático.....	535
Interacción entre las aguas subterráneas y las corrientes de agua .....	536
Factores que influyen en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas.....	538
Porosidad .....	538
Permeabilidad, acucluidos y acuíferos .....	538
Circulación de las aguas subterráneas .....	539
La ley de Darcy .....	540
Diferentes escalas de movimiento .....	542
 Manantiales o fuentes .....	542
 Fuentes termales y géiseres .....	544
 Pozos .....	546
 Pozos artesianos.....	548
Problemas relacionados con la extracción del agua subterránea .....	549
Tratamiento del agua subterránea como un recurso no renovable.....	550
Subsidencia.....	550
Contaminación salina .....	551
Contaminación del agua subterránea.....	553
El trabajo geológico del agua subterránea.....	555
Cuevas.....	555
Topografía kárstica .....	557
Resumen.....	560
Términos fundamentales.....	561
Preguntas de repaso .....	561
MasteringGeology.....	562
<b>Recuadro 17.1 La Tierra como sistema</b> El impacto de la sequía en el sistema hidrológico .....	541

<b>Recuadro 17.2 El hombre y el medio ambiente</b> Subsistencia del terreno en el valle de San Joaquín.....	552
---	-----

## 18






<b>Glaciares y glaciaciones</b> .....	564
 Los glaciares: una parte de dos ciclos básicos.....	566
Glaciares de valle (alpinos) .....	566
Glaciares de casquete .....	567
Otros tipos de glaciares.....	568
¿Qué pasaría si se fundiera el hielo?.....	569
 Formación y movimiento del hielo glaciario .....	570
Formación del hielo glaciario .....	570
Movimientos de un glaciario.....	570
Velocidades de movimiento de un glaciario.....	571
Balance de un glaciario.....	572
Erosión glaciario .....	574
 Formas creadas por la erosión glaciario.....	576
Valles glaciares .....	577
Aristas y horns .....	579
Rocas aborregadas.....	580
 Depósitos glaciares.....	581
Formas compuestas por tills .....	582
Morrenas laterales y medianas .....	582
Morrenas terminales y de fondo .....	583
Drumlins.....	584
Formas constituidas por derrubios glaciares estratificados .....	586
Llanuras aluviales y trenes de valle .....	586
Depósitos en contacto con el hielo .....	587
Algunos efectos indirectos de los glaciares del periodo glacial cuaternario .....	587
Subsidencia de la corteza y reajuste .....	587
Cambios en el nivel del mar.....	588
Cambios en ríos y valles.....	588
Las presas glaciares crean lagos proglaciares .....	590







Lagos pluviales .....	590
La teoría glaciár y el periodo glaciár cuaternario .....	592
Causas de las glaciaciones .....	593
Tectónica de placas .....	594
Variaciones en la órbita de la Tierra .....	594
Otros factores .....	596
Resumen. ....	597
Términos fundamentales. ....	598
Preguntas de repaso .....	598
MasteringGeology .....	599
<b>Recuadro 18.1 La Tierra como sistema</b>	
Glaciares en retroceso .....	579
<b>Recuadro 18.2 Entender la Tierra</b> El lago glaciár Missoula, megainundaciones y las Channeled Scablands .....	591

## 19

<b>Deformación de la corteza .....</b>	<b>600</b>
 Distribución y causas de las regiones secas. .	602
Desiertos de latitudes bajas .....	602
Desiertos de latitudes medias .....	603
 Procesos geológicos en climas áridos .....	605
Meteorización. ....	607
Papel del agua .....	607
 «Basin and Range»: la evolución de un paisaje desértico .....	609
Transporte de sedimentos por el viento. ....	611
Carga de fondo. ....	612
Carga en suspensión .....	613
 Erosión eólica .....	613
Deflación y depresiones de deflación. ....	614
Pavimento desértico .....	614
Ventifactos y yardangs .....	616
 Depósitos eólicos .....	616
Depósitos de arena .....	617

Tipos de dunas de arena. ....	618
Resumen. ....	622
Términos fundamentales. ....	623
Preguntas de repaso .....	623
MasteringGeology .....	624
<b>Recuadro 19.1 Entender la Tierra</b> ¿Qué se entiende por «seco»? .....	605
<b>Recuadro 19.2 El hombre y el medio ambiente</b> La desaparición del mar de Aral: un gran lago se transforma en un terreno baldío. ....	606
<b>Recuadro 19.3 Entender la Tierra</b> El monte Uluru de Australia. ....	612

## 20

<b>Líneas de costa .....</b>	<b>626</b>
La línea litoral: una interfase dinámica. ....	628
La zona costera .....	629
Características fundamentales. ....	629
Playas. ....	630
 Olas. ....	630
Características de las olas. ....	631
Movimiento orbital circular .....	632
Olas en la zona de rompiente. ....	633
Erosión causada por las olas .....	633
Movimiento de la arena de la playa .....	634
Movimiento perpendicular a la línea litoral .....	635
Refracción de las olas .....	635
Transporte de las corrientes litorales .....	636
<b>Perfil profesional</b> Rob Thieler. Geólogo marino. ....	637
Corrientes de retorno (resaca) .....	638
Estructuras de la línea de costa .....	638
Formas de erosión .....	638
Formas deposicionales .....	639
Evolución de la costa. ....	640
 Estabilización de la costa .....	642
Estabilización firme. ....	643
Alternativas a la estabilización firme .....	646
Problemas de erosión a lo largo de las costas estadounidenses .....	647
Costas atlántica y del Golfo .....	647
Costa del Pacífico. ....	647
Los huracanes: el máximo peligro en la costa. .	649
Perfil de un huracán .....	651
Destrucción de los huracanes. ....	652
Clasificación de las costas. ....	654
Costas de emersión .....	655
Costas de inmersión .....	655
Mareas .....	656
Causas de las mareas. ....	656

Ciclo mensual de las mareas .....	657
Modelos mareales .....	658
Corrientes mareales .....	658
Mareas y rotación de la Tierra .....	661
Resumen .....	661
Términos fundamentales .....	663
Preguntas de repaso .....	663
MasteringGeology .....	664
<b>Recuadro 20.1 El hombre y el medio ambiente</b> La mudanza del siglo: la recolocación del faro del cabo Hatteras ...	648
<b>Recuadro 20.2 El hombre y el medio ambiente</b> Predicción de los huracanes ...	659

## 21

<b>El cambio climático global</b> .....	666
El clima y la geología están conectados .....	668
El sistema climático .....	668
¿Cómo se detecta el cambio climático? .....	669
El sedimento del fondo oceánico, un almacén de datos climáticos .....	670
Análisis de los isótopos de oxígeno .....	671
Registro del cambio climático en la Era Glacial ..	672
Los anillos de los árboles, archivos de la historia medioambiental .....	672
Otros tipos de datos indirectos .....	673
Algunos conceptos atmosféricos básicos .....	675
Composición de la atmósfera .....	675
Extensión y estructura de la atmósfera .....	677
El destino de la energía solar entrante .....	679
El calentamiento de la atmósfera: el efecto invernadero .....	679
Causas naturales del cambio climático .....	681
Actividad volcánica y cambio climático .....	681
Variabilidad solar y clima .....	684
<b>Perfil profesional</b> Michael Mann. Climatólogo .....	685
Impacto humano sobre el clima global .....	686
Dióxido de carbono, otros gases y cambio climático .....	688
Los niveles de CO <sub>2</sub> están aumentando .....	688
La respuesta de la atmósfera .....	688
El papel de los oligogases .....	691
Mecanismos de retroalimentación del clima ..	693
Cómo influyen los aerosoles en el clima .....	694
Algunas consecuencias posibles del calentamiento global .....	696
Elevación del nivel del mar .....	696
Los cambios en el Ártico .....	698
Aumento de la acidez del océano .....	701
La posibilidad de «sorpresas» .....	701

Resumen .....	702
Términos fundamentales .....	703
Preguntas de repaso .....	704
MasteringGeology .....	704
<b>Recuadro 21.1 La Tierra como sistema</b> Una posible relación entre el vulcanismo y el cambio climático en el pasado geológico .....	687
<b>Recuadro 21.2 Entender la Tierra</b> Modelos informáticos del clima: herramientas importantes, pero imperfectas .....	695
<b>Recuadro 21.3 La Tierra como sistema</b> El cambio climático global impacta en Estados Unidos .....	698

## 22

<b>La evolución de la Tierra a través del tiempo geológico</b> .....	706
¿Es única la Tierra? .....	708
El planeta adecuado .....	708
La ubicación adecuada .....	709
El momento adecuado .....	710
El nacimiento de un planeta .....	712
De los planetesimales a los protoplanetas .....	712
Evolución de la Tierra primitiva .....	712
Origen de la atmósfera y los océanos .....	714
La atmósfera primitiva de la Tierra .....	714
Oxígeno en la atmósfera .....	714
Evolución de los océanos .....	715
La historia precámbrica: la formación de los continentes terrestres .....	716
Los primeros continentes de la Tierra .....	716
La formación de Norteamérica .....	718
Supercontinentes del Precámbrico .....	719
Historia geológica del Fanerozoico: la formación de los continentes modernos de la Tierra .....	721
Historia del Paleozoico .....	722
Historia del Mesozoico .....	722





Historia del Cenozoico .....	724
Primera vida terrestre.....	726
La era Paleozoica: la explosión de la vida ....	730
Primeras formas de vida del Paleozoico .....	730
Los vertebrados se desplazan a tierra.....	731
La gran extinción del Pérmico.....	733
<b>Perfil profesional</b> Neil Shubin. Paleontólogo. 734	
Era Mesozoica: la edad de los dinosaurios ....	735
La era Cenozoica: la edad de los mamíferos .	737
De los reptiles a los mamíferos .....	737
Grandes mamíferos y extinción.....	740
Resumen.....	742
Términos fundamentales.....	743
Preguntas de repaso .....	743
MasteringGeology .....	744
<b>Recuadro 22.1 Entender la Tierra</b> Lutitas de Burgess .....	727
<b>Recuadro 22.2 Entender la Tierra</b> La desaparición de los dinosaurios.....	738

## 23

<b>Energía y recursos minerales...</b>	746
Recursos renovables y no renovables.....	748
Recursos energéticos .....	749
Carbón.....	750
Petróleo y gas natural .....	751
Formación del petróleo.....	751
Trampas petrolíferas .....	752
Arenas asfálticas y lutitas bituminosas:	
¿petróleo para el futuro?.....	753
Arenas asfálticas.....	754
Lutitas bituminosas.....	755
Fuentes de energía alternativas .....	756
Energía nuclear .....	756
Energía solar.....	758
Energía eólica.....	759
Energía hidroeléctrica .....	761

Energía geotérmica .....	761
Energía mareal .....	764
<b>Perfil profesional</b> Sally Benson. Especialista en clima y energía .....	764
Recursos minerales .....	765
Recursos minerales y procesos ígneos.....	766
Segregación magmática .....	766
Diamantes.....	768
Disoluciones hidrotermales .....	768
Recursos minerales y procesos metamórficos.	770
Meteorización y yacimientos minerales.....	771
Bauxita.....	771
Otros yacimientos .....	771
Yacimientos de placeres.....	771
Recursos minerales no metálicos .....	773
Materiales de construcción.....	774
Minerales industriales.....	774
Resumen.....	776
Términos fundamentales.....	777
Preguntas de repaso .....	777
MasteringGeology .....	778
<b>Recuadro 23.1 Entender la Tierra</b> Hidratos de gas: un combustible procedente de los sedimentos del fondo oceánico.....	755
<b>Recuadro 23.2 El hombre y el medio ambiente</b> Bingham Canyon, Utah: la mayor mina a cielo abierto.....	767

## 24

<b>Geología planetaria.....</b>	708
Nuestro Sistema Solar: una visión de conjunto	782
Teoría de la nebulosa: formación del sistema solar .....	782
Los planetas: estructuras internas, atmósferas y meteorología.....	783
Impactos planetarios .....	788
La luna: un trozo del antiguo bloque terrestre.	790
Planetas y lunas.....	792
Mercurio, el planeta más interno.....	792
Venus, el planeta velado.....	794
Marte, el planeta rojo.....	797
Júpiter, el señor del cielo.....	800
Saturno, el planeta elegante.....	804
Urano y Neptuno, los gemelos .....	807
Cuerpos menores del Sistema Solar .....	810
Asteroides: residuos de los planetesimales .....	810
Cometas: bolas de nieve sucias .....	812
Meteoroides: visitantes de la Tierra .....	814
Planetas enanos .....	816
Resumen.....	817



Términos fundamentales.....	818
Preguntas de repaso .....	819
MasteringGeology.....	819
<b>Recuadro 24.1 Entender la Tierra</b>	
El estudio de la Tierra desde el espacio ...	804
<b>Recuadro 24.2 La Tierra como sistema</b>	
¿Está la Tierra en una dirección de colisión?.....	811

<b>Apéndice A</b>	
<b>Comparación entre unidades métricas y británicas .....</b>	<b>821</b>
Glosario.....	823
Índice .....	841



# PRÓLOGO



La Tierra es una parte *muy* pequeña de un vasto universo, pero es nuestro hogar. Proporciona los recursos que sostienen nuestra sociedad moderna y los ingredientes necesarios para mantener la vida. El conocimiento de nuestro entorno físico es crucial para nuestro bienestar y vital para nuestra supervivencia. Un curso de geología básica puede ayudar a una persona a adquirir dicho conocimiento. Puede aprovechar a su vez el interés y la curiosidad que muchos de nosotros tenemos sobre nuestro planeta, sus paisajes y los procesos que los crean y los alteran.

La décima edición de *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*, como sus predecesoras, es un texto universitario pensado para servir como estudio significativo, no técnico para estudiantes que cursan su primer año de Geología. Además de ser informativo y estar actualizado, uno de los principales objetivos de *Ciencias de la Tierra* es satisfacer las necesidades de los estudiantes de disponer de un texto fácil de leer y de utilizar, un libro que sea una «herramienta» muy utilizable para el aprendizaje de los principios y los conceptos básicos de la geología.

## CARACTERÍSTICAS QUE LO DISTINGUEN

### Facilidad de lectura

El lenguaje de este libro es directo y está escrito para ser entendido. Los comentarios claros y de fácil lectura, con un mínimo de lenguaje técnico, son la norma. Los títulos y subtítulos frecuentes ayudan a los estudiantes a seguir el argumento y a identificar las ideas importantes presentadas en cada capítulo. En esta décima edición se ha conseguido una mayor facilidad de lectura al examinar la organización y el flujo de los capítulos y al escribir en un estilo más personal. Grandes secciones del libro se han vuelto a escribir prácticamente de nuevo en un esfuerzo por hacer más comprensible y accesible el material. En particular, los lectores familiarizados

con la edición anterior notarán el esfuerzo de los autores a este respecto en los Capítulos 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 22 y 24.

### El programa artístico

La geología es muy visual. Por eso, el programa artístico desempeñó un papel crucial en un libro introductorio. Como en las nueve ediciones anteriores, por Dennis Tasa, un artista con talento y reputado ilustrador geológico, ha trabajado de nuevo estrechamente con los autores para planificar y producir los diagramas, los mapas, los gráficos y los bocetos que son tan básicos para la comprensión del estudiante. Literalmente centenares de figuras son nuevas o se han vuelto a dibujar. El resultado es un arte más claro y más fácil de entender. Numerosos diagramas y mapas vienen acompañados de fotografías para una mayor eficacia. Muchas representaciones artísticas nuevas y revisadas tienen también etiquetas añadidas que «narran» el proceso que se está ilustrando o «guían» a los lectores a medida que examinan la figura.

### Fotografías

La décima edición de *Ciencias de la tierra* tiene más de 250 fotografías de gran calidad *nuevas* e imágenes vía satélite. Además de los bocetos del geólogo que acompañan a muchas imágenes importantes, se añadieron numerosas etiquetas a muchas otras fotografías. Nuestro objetivo es conseguir una *eficacia máxima* del componente visual del libro.

Nos ayudó mucho en esta tarea Michael Collier. En la nueva edición se utilizaron docenas de sus extraordinarias fotografías aéreas. Michael es un geólogo fotógrafo galardonado. Entre sus muchos premios se cuenta *el American Geological Institute Award for Outstanding Contribution to the Public Understanding of the Geosciences*. Somos afortunados de haber contado con la ayuda de Michael en la décima edición de *Ciencias de la Tierra*. Encontrará más información sobre Michael en el Capítulo 10 «perfil profesional» (pag. 286).

## Concentración en el aprendizaje

La décima edición de *Ciencias de la Tierra* consiste en dos productos, un libro de texto universitario tradicional de una página web para acompañante interactiva. Ambos contienen útiles ayudas al aprendizaje.

### Revisión al final del capítulo

Cuando ha acabado un capítulo, cuatro dispositivos útiles ayudan a los estudiantes a repasar. En primer lugar, el *Resumen del capítulo* recapitula todos los puntos importantes, luego hay una lista de *Términos fundamentales* con referencia a la página. El aprendizaje de la terminología geología ayuda a los estudiantes a aprender el material. Esto va seguido de una sección de *Preguntas de repaso*, que ayuda a los estudiantes para examinar su conocimiento de hechos e ideas significativas.

## Concentración en los principios básicos y flexibilidad del instructor

En *Ciencias de la Tierra* se tratan muchos aspectos tópicos, no obstante, el principal foco de esta nueva edición sigue siendo el mismo que el de sus predecesores, fomentar la comprensión de los principios básicos por el estudiante. Si bien la principal preocupación es el uso del texto por parte de los estudiantes, también es importante la adaptabilidad del libro a las necesidades y deseos del instructor. Siendo conscientes de la amplia diversidad de cursos introductorios que existen en cuanto a contenido y enfoque, hemos diseñado cada capítulo para que sea lo más independiente posible para que el material pueda enseñarse en una secuencia diferente de acuerdo con la preferencia del instructor por los departamentos del laboratorio. Por tanto, el instructor que desee comentar los procesos erosivos antes que los terremotos, las placas tectónicas y la formación de montañas podrá hacerlo sin dificultad.

## TEMAS IMPORTANTES

### La Tierra como sistema

Un aspecto importante de la ciencia moderna ha sido nuestro descubrimiento de que la Tierra es un sistema multidimensional gigante. Nuestro planeta consta de muchas partes separadas, pero interactuantes. Un cambio en una parte puede producir cambios en otra o en todas las demás, a menudo de maneras que no son obvias ni evidentes inmediatamente. Aunque no es posible estudiar el sistema entero de una vez, es posible

desarrollar un conocimiento y apreciación del concepto y de muchas de las interrelaciones importantes del sistema. Por tanto, empezando con una exposición en el Capítulo 1, el tema de «La Tierra como un sistema» se repite en lugares oportunos a lo largo del libro. Es un hilo que «se teje» a través de los capítulos y que ayuda a unirlos. Algunos de los recuadros nuevos y revisados de especial interés se refieren a «La Tierra como un sistema».

## El ser humano y el medio ambiente

Dado que es necesario conocer nuestro planeta y cómo funciona para nuestra supervivencia y bienestar, el tratamiento de los temas ambientales ha sido siempre una parte importante de *Ciencias de la Tierra*. Estos aspectos sirven para ilustrar la importancia y la aplicación del conocimiento geológico. Con cada nueva edición, se ha mantenido e intensificado el énfasis en este punto, lo cual es especialmente cierto en esta décima edición. El texto integra una gran cantidad de información sobre la relación entre las personas y el ambiente natural, y explora la aplicación de la geología para comprender y resolver los problemas que surgen de esas interacciones. Además de los muchos aspectos básicos del texto, en más de 20 de los recuadros de especial interés del texto se aborda el tema «El hombre y el medio ambiente».

## Entender la Tierra

Como miembros de una sociedad moderna, se nos está recordando constantemente los beneficios derivados de la ciencia. Pero, ¿cuál es la naturaleza exacta de la investigación científica? Llegar a comprender cómo se hace la ciencia y cómo trabajan los científicos es otro tema importante que aparece a lo largo de este libro, empezando con la sección revisada sobre «La naturaleza de la investigación científica» del Capítulo 1. Los estudiantes examinarán algunas de las dificultades que los científicos afrontan al intentar obtener datos fiables sobre nuestro planeta y algunos de los métodos ingeniosos que se han desarrollado para superar estas dificultades. Los estudiantes también explorarán muchos ejemplos de cómo se formulan y se prueban las hipótesis a la vez que aprenderán la evolución y el desarrollo de algunas de las principales teorías científicas. Muchos comentarios básicos del texto, así como algunos de los recuadros de especial interés sobre «Entender la Tierra» permiten al lector extraer un sentido de las técnicas de observación y los procesos de razonamiento que intervienen en el desarrollo del conocimiento científico. El énfasis no se pone solo en lo que saben los científicos, sino en cómo lo dedujeron.

## NUEVO PARA ESTA EDICIÓN

nueva introducción, la sección nueva titulada «El clima y la geología están conectados», y una sección revisada y ampliada sobre «Conceptos atmosféricos básicos». «El impacto humano sobre el clima global» el énfasis principal de la última mitad del capítulo, se ha revisado y actualizado por completo para incluir los últimos datos y materiales del panel intergubernativo sobre cambio climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC]) y del informe de junio de 2009 el programa de investigación sobre cambio climático Estados Unidos (*U.S. Global Change Research Program*).

capítulos se incluyen ensayos que presentan perfiles de geólogos en ejercicio. Estos recuadros especiales están pensados para dar a los estudiantes una orientación de lo que hacen los geólogos y una perspectiva sobre una variedad de carreras científicas.

nueva característica en la décima edición de *Ciencias de la Tierra* son los *Esquemas del geólogo*, que acompañan a muchas fotografías e imágenes por satélite importantes. Cada esquema, que recuerda lo que un geólogo podría anotar en su cuaderno de campo, ayuda al estudiante a identificar aspectos importantes y a veces sutiles de una imagen. Esta colaboración autor - artista contribuye a convertir un programa artístico ya fuerte en una ayuda de aprendizaje todavía más fuerte y eficaz.

nuevas fotografías e imágenes vía satélite de gran calidad.

jar prácticamente.

gina Web

página web acompañante

námica de los acontecimientos geológicos que ocurren en el mundo utilizando entradas RSS a partir de los recursos del USGS en tiempo real. Trabajando con datos de los terremotos, volcanes, deslizamientos de tierra y acontecimientos climatológicos extremos recientes, los estudiantes participan en ejercicios de pensamiento crítico para aplicar los conceptos comprendidos en clase al mundo real.

## MÁS SOBRE LA DÉCIMA EDICIÓN

La décima edición de *Ciencias de la Tierra* representa una revisión exhaustiva. Todas las partes del libro se examinaron con sumo cuidado con el doble objetivo de

mantener los temas actuales y mejorar la claridad de la exposición del texto. Quienes conocen ediciones anteriores encontrarán muchas novedades en la décima edición. La lista específica es larga; a continuación se incluyen algunos ejemplos:

de una revolución científica», se revisaron sustancialmente y se volvieron a redactar algunas exposiciones, entre ellas: «Medir el movimiento de las placas desde el espacio», «Qué impulsa el movimiento de las placas» y «Puntos calientes y plumas del manto».

ha vuelto a redactar, en un esfuerzo por facilitar a los estudiantes principiantes la comprensión de un tema a veces difícil (orientado a la química). Las exposiciones sobre la estructura atómica básica, los enlaces, los cristales y la cristalización, las variaciones estructurales y en composición, y los silicatos son las que han recibido la mayor atención.

trusiva» se titulaba en un principio «Rocas ígneas». El nuevo título del capítulo refleja la reorganización que se ha producido. La exposición sobre actividad intrusiva que estaba anteriormente en el Capítulo 5 constituye ahora la parte correspondiente a la conclusión del Capítulo 4. Como es lógico, aparece a continuación de las secciones sobre el «Origen del magma» y «Cómo evoluciona el magma». La exposición entera correspondiente a «Actividad ígnea intrusiva» se ha revisado y se ha vuelto a escribir, así como la sección «Texturas ígneas: ¿Qué pueden decirnos?»

revisado y redactado de nuevo por completo la exposición sobre flujos piroclásticos, así como la sección sobre calderas. El recuadro sobre el problema de Hawái con la contaminación del aire volcánico es nuevo.

cas», contiene secciones revisadas y reescritas sobre «¿Qué impulsa el metamorfismo?» y «Metamorfismo hidrotermal».

tualizada sobre la escala de tiempo geológico refleja los cambios más recientes acaecidos en esta herramienta básica, mientras que en un nuevo recuadro se aclara algo de la terminología asociada con la escala temporal.

una sección *completamente nueva* sobre «Deformación y esfuerzo», que incluye una excelente representación a modo de resumen.

ye una exposición *completamente nueva* sobre «Fallas, producción de fallas y terremotos», en la que se explora la importante relación entre estos fenómenos y

que incluye una nueva representación gráfica a modo de resumen. Las secciones dedicadas a las escalas de magnitud y la predicción de los terremotos se revisaron de manera sustancial y se ha añadido una nueva sección, «Riesgos sísmicos en la falla de San Andrés».

bió sustancialmente para hacer más accesible al estudiante principiante un tema tan complejo. Se hizo énfasis significativo en mejorar la legibilidad. Además, se revisó el material sobre el flujo de calor, así como el texto correspondiente a la relación entre el gradiente geotérmico y las curvas de punto de fusión.

la fuerza de la gravedad», hay mucho texto nuevo, como una nueva sección sobre «el Potencial para los deslizamientos de terreno» y nuevo material sobre los deslizamientos provocados por terremoto que devastaron partes de China en mayo de 2008.

ternos, el Capítulo 16, «Corrientes de agua superficiales», recibió la mayor atención. El discurso avanza de una manera más lógica y clara para el estudiante principiante. Los temas que recibieron especial atención fueron la naturaleza de las cuencas de drenaje, las características de los flujos de corriente, la formación de los valles fluviales y la comparación entre canales de lechos rocosos y aluviales.

una nueva introducción y tiene una sección *completamente nueva* sobre Aguas subterráneas: un recurso básico.»

un nuevo recuadro sobre «Glaciares en retirada» y una nueva exposición dedicada a «Balance glacial de Groenlandia».

material sobre las corrientes de retorno o de resaca y una sección completamente revisada y reescrita sobre «Huracanes, el máximo peligro en la costa», que incluye una exposición *completamente nueva* sobre el «Perfil de un huracán». Se ha añadido también un recuadro *nuevo* sobre «Pronosticar los huracanes».

ye estadísticas actualizadas así como textos completamente revisados y actualizados sobre la energía eólica y la energía solar.

sado y actualizado para reflejar la investigación más reciente. Se trata de la revisión *más completa* realizada nunca a este capítulo. El contenido está mejor organizado, es más fácil de leer y está más actualizado. Las exposiciones avanzan de una manera que resultan más fácil de seguir para el estudiante principiante. El capítulo está lleno de muchas imágenes nuevas.

## Otros aspectos destacados

«A veces los alumnos preguntan...» Esta popular característica se ha conservado y mejorado en la décima edición. Los profesores y los estudiantes siguen reaccionando favorablemente y han indicado que las preguntas y las respuestas repartidas por cada capítulo añaden interés y relevancia a las exposiciones.

cuadros de interés especial, pero algunos son totalmente nuevos o están sustancialmente revisados. Como en la edición anterior, la mayoría están pensados para ilustrar y reforzar los tres temas de «La Tierra como sistema», «El hombre y el medio ambiente» y «Entender la Tierra».

## AGRADECIMIENTOS

Escribir un libro de texto universitario requiere el talento y la cooperación de muchas personas. Valoramos el excelente trabajo de Mark Watry y Teresa Tarbuck de la Sping Hill College, cuyo talento nos ayudó a mejorar el Capítulo 3, «Materia y minerales», y el Capítulo 24, «Geología planetaria». Ambos contribuyeron a que los dos capítulos resultaran más fáciles de leer, atractivos y actualizados. Trabajar con Dennis Tasa, que es responsable de todas las extraordinarias ilustraciones y de gran parte del trabajo de desarrollo de *GEODE: Ciencias de la Tierra*, es siempre algo especial para nosotros. No solo valoramos su talento e imaginación artísticos, sino también su amistad.

Expresamos nuestro agradecimiento sincero a Michael Collier, cuyas contribuciones como fotógrafo aéreo y geólogo aportaron mucho a este proyecto. Colaborar con Michael fue un placer especial.

Estamos también muy agradecidos a los colegas que prepararon revisiones exhaustivas. Sus comentarios críticos y su aportación seria ayudaron a guiar nuestro trabajo y fortalecieron de una manera clara el texto. Queremos expresar nuestro especial agradecimiento a:

Randal Babcock, Western Washington University; Bill Dupree, University of Houston; Nels Forsman, University of North Dakota; Melida Guterrez, Missouri State University; Duane Hampton, Western Michigan University; Kevin Hefferan, University of Wisconsin-Stevens Point; Sarah Johnson, Northern Kentucky University; Richard Josephs, University of Iowa; Steve Kadel, Glendale Community College; Michael Kimberley, North Carolina State University; David King, Auburn University; Kyle Mayborn, Western Illinois University; Michael Mann, Pennsylvania State University; Leslie Melim, Western Illinois University; Lauren Neitzke, Rutgers University; Phil Novack-Gottshall, University of West Georgia; Ray Rector, MiraCosta College; y Dean Whitman, Florida International University.

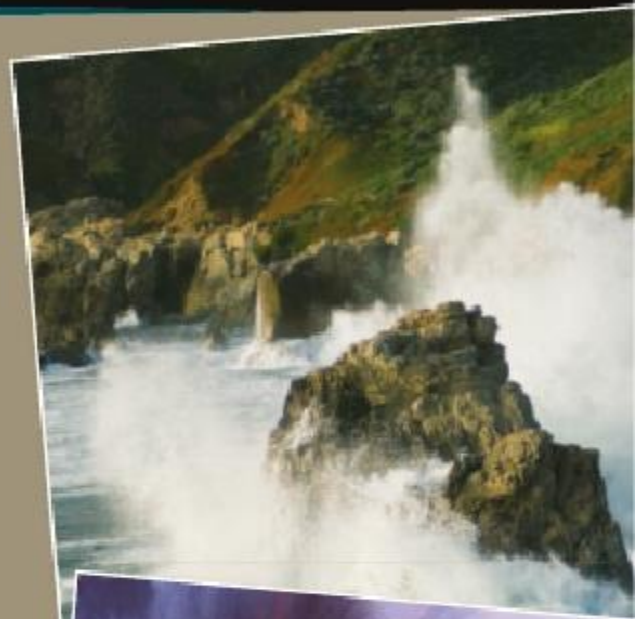
Como siempre, queremos dar las gracias al equipo de profesionales de Prentice Hall. Apreciamos sinceramente el fuerte y constante apoyo de la empresa a la excelencia y la innovación. Todos están comprometidos a producir los mejores libros de texto posibles. Nuestro agradecimiento especial a nuestro editor jefe Nicole Folchetti por la dirección del proyecto y a nuestra Directora de proyecto, Crissy Dudonis, por un trabajo bien hecho. El equipo de producción, dirigido por Patty Donovan en Laserwords Maine, hizo una vez más un

trabajo excelente. Apreciamos también la ayuda en producción de Connie Long y Ed Tomas de Pearson, que contribuyeron a que el proceso avanzara sin problemas. La búsqueda fotográfica de Kristin Piljay fue también una gran ayuda. Todos ellos son unos verdaderos profesionales con quienes nos sentimos muy afortunados de estar asociados.

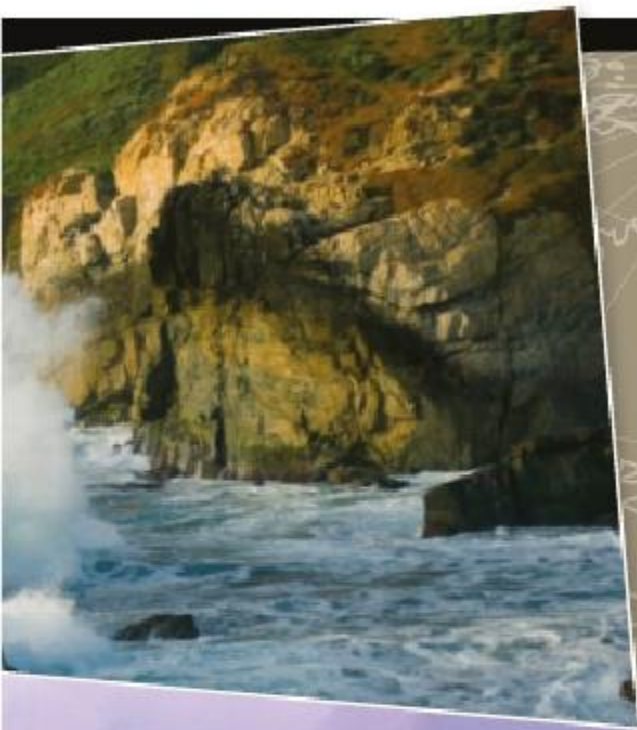
Ed Tarbuck  
Fred Lutgens

# CAPÍTULO 1

## Introducción a la Geología







La espectacular erupción de un volcán, el terror causado por un terremoto, el magnífico escenario de una cadena montañosa y la destrucción causada por una avalancha o una inundación son temas de estudio para el geólogo (Figura 1.1). El estudio de la Geología aborda muchas cuestiones fascinantes y prácticas sobre nuestro entorno físico. ¿Qué fuerzas producen las montañas?, ¿habrá pronto otro gran terremoto en California?, ¿cómo fue el periodo glacial?, ¿habrá otro?, ¿cómo se formaron estos yacimientos?, ¿deberíamos buscar agua aquí?, ¿es útil la explotación a cielo abierto en esta zona?, ¿se encontrará petróleo si se perfora un pozo en este lugar?

## LA CIENCIA DE LA GEOLOGÍA

El tema de este libro es la **geología**, del griego *geo*, «Tierra», y *logos*, «discurso». Es la ciencia que persigue la comprensión del planeta Tierra. La ciencia de la Geología se ha dividido tradicionalmente en dos amplias áreas: la física y la histórica. La **Geología física**, sobre la que trata este libro, estudia los materiales que componen la Tierra y busca comprender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre. El objetivo de la **Geología histórica** es comprender el origen de la Tierra y su evolución a lo largo del tiempo. Por tanto, procurar ordenar cronológicamente los múltiples cambios físicos y biológicos que han ocurrido en el pasado geológico. El estudio de la Geología física precede lógicamente al estudio de la historia de la Tierra, porque, antes de intentar revelar su pasado, debemos comprender primero cómo funciona la Tierra. Debe señalarse también que la Geología física

e histórica se dividen en muchas áreas de especialización. En la Tabla 1.1 se proporciona una lista parcial. Cada capítulo de este libro representa una o más áreas de especialización en Geología.

Entender la Tierra constituye un reto, porque nuestro planeta es un cuerpo dinámico con muchas partes que interaccionan y una historia larga y compleja. En el transcurso de su larga existencia, la Tierra ha ido cambiando. De hecho, está cambiando mientras usted lee esta página y continuará haciéndolo en un futuro previsible. Algunas veces los cambios son rápidos y violentos, como cuando se producen deslizamientos o erupciones volcánicas. Aunque, a menudo, los cambios tienen lugar de una manera tan lenta que no se aprecian durante toda una vida. Las escalas de tamaño y espacio también varían mucho entre los fenómenos que los geólogos estudian. Algunas veces, deben concentrarse en fenómenos submicroscópicos, mientras que en otras ocasiones deben tratar con características de escala continental o global.



**FIGURA 1.1.** Sheep Mountain, Wyoming, tiene capas de rocas que se desploman desde su línea dorsal central. Las rocas de sus flancos fueron en una ocasión láminas planas de arenisca y lutita. Después, hace unos 65 millones de años, los procesos que dieron lugar a las montañas plegaron los estratos enterrados. De manera gradual, la meteorización y la erosión fueron eliminando las capas. En su libro, *Over the Mountains*, Michael Collier, el fotógrafo geólogo que tomó esta fotografía describía su escena del siguiente modo, «me resulta imposible mirar abajo y negar que algo estupendo sucedió aquí, capas de rocas de millares de metros de grosor, dobladas como trozos de una lámina de metal» (Foto de Michael Collier, *Over the Mountains, An Aerial View of Geology*. New York: Mikaya Press, 2007).

La Geología se percibe como una ciencia cuyo trabajo se desarrolla al aire libre, lo cual es correcto. Una gran parte de la Geología se basa en observaciones, mediciones y experimentos llevados a cabo en el campo. Pero la Geología también se realiza en el laboratorio, donde, por ejemplo, el estudio de varios materiales terrestres permite comprender muchos procesos básicos. Con frecuencia, la Geología requiere una comprensión y una aplicación del conocimiento y los principios de la Física, la Química y la Biología. La Geología es una ciencia que pretende ampliar nuestro conocimiento del mundo natural y del lugar que ocupamos en él.

**Tabla 1.1.** Diferentes áreas de estudio geológico\*.

Geología arqueológica	Ciencias oceánicas
Biogeociencias	Paleoclimatología
Ingeniería geológica	Paleontología
Geología forense	Petrología
Geoquímica	Geología planetaria
Geomorfología	Geología sedimentaria
Geofísica	Sismología
Historia de la geología	Geología estructural
Hidrogeología	Tectónica
Geología médica	Vulcanología
Mineralogía	

\* Muchas de estas áreas de estudio representan secciones de interés y especialidades de sociedades afiliadas a Geological Society of America ([www.geosociety.org](http://www.geosociety.org)) y la American Geophysical Union ([www.agu.org](http://www.agu.org)), dos sociedades profesionales a las que pertenecen muchos geólogos.

## LA GEOLOGÍA, EL SER HUMANO Y EL MEDIO AMBIENTE

El objetivo principal de este libro es desarrollar una comprensión de los principios geológicos básicos, pero a lo largo del texto exploraremos numerosas relaciones importantes entre las personas y el entorno natural. Muchos de los problemas y cuestiones tratados por la Geología tienen un valor práctico para las personas.

Los riesgos naturales son parte de la vida en la Tierra. Cada día afectan de forma adversa literalmente a millones de personas en todo el mundo y son responsables de daños asombrosos (Figura 1.2). Entre los procesos terrestres peligrosos estudiados por los geólogos, se cuentan los volcanes, las inundaciones, los *tsunami*, los terremotos y los deslizamientos. Por supuesto, los riesgos geológicos comprenden simplemente procesos *naturales*. Solo se vuelven peligrosos cuando las personas intentan vivir donde estos procesos suceden (Figura 1.3).



A.



B.

**FIGURA 1.2.** Los riesgos naturales forman parte de la vida sobre la Tierra. **A.** Vista aérea de la destrucción de un terremoto en Muzaffarabad, Paquistán, 31 de enero de 2006 (Foto de Danny Kemp/AFP/Getty Images). **B.** Inundaciones sin precedentes en el Río Rojo del Norte a finales de marzo de 2009 en la zona Fargo, Dakota del norte/Moorhead, Minnesota (Foto de Scott Olson/Getty Images).



**FIGURA 1.3.** Erupción del monte Etna en Italia a finales de 2006. Este volcán domina Catania, la segunda ciudad más grande de Sicilia. Los riesgos geológicos son procesos *naturales*. Solo se convierten en riesgos cuando las poblaciones intentan vivir donde se producen estos procesos (Foto de Marco Fulle).

Según las Naciones Unidas, por primera vez en 2008 vivían más personas en las ciudades que en las zonas rurales. Esta tendencia global hacia la urbanización concentra millones de personas en megaciudades, muchas de las cuales son vulnerables a los riesgos naturales. Las zonas costeras son cada vez más vulnerables porque el desarrollo a menudo destruye las defensas naturales, como humedales y dunas de arena. Además, hay una amenaza creciente asociada con las influencias humanas en el sistema Tierra, como el aumento del nivel del mar que está ligado al cambio climático global<sup>1</sup>. Otras megaciudades están expuestas a riesgos sísmicos (terremotos) y volcánicos, donde el uso inapropiado de la tierra y las malas prácticas de construcción, asociadas al rápido crecimiento de la población, están aumentando la vulnerabilidad.

Los recursos representan otro tema central de la Geología, que es de gran valor práctico para los seres

humanos. Estos recursos son el agua y el suelo, una gran variedad de minerales metálicos y no metálicos, y la energía (Figura 1.4). En conjunto, forman la verdadera base de la civilización moderna. La Geología aborda no solo la formación y la existencia de estos recursos vitales, sino también el mantenimiento de sus existencias y el impacto ambiental de su extracción y su uso.

El rápido crecimiento de la población mundial y las aspiraciones de todos a un mejor modo de vida están complicando todas las cuestiones ambientales. Esto significa una demanda cada vez mayor de recursos y una presión creciente para que las personas habiten en ambientes con riesgos geológicos significativos.

No solo los procesos geológicos tienen un impacto sobre las personas, sino que nosotros, los seres humanos, podemos influir de forma notable en dichos procesos geológicos. Por ejemplo, las crecidas de los ríos son algo natural, pero las actividades humanas, como la tala de bosques, construcción de ciudades y de embalses, pueden cambiar su magnitud y frecuencia. Por desgracia, los sistemas naturales no se ajustan siempre a los cambios artificiales de

<sup>1</sup> La idea del sistema Tierra se explora más adelante en este capítulo. El cambio climático global y sus efectos son el tema central del Capítulo 21.



**FIGURA 1.4.** La mina de cobre a cielo abierto en Morenci, Arizona, es una de las mayores productoras de cobre en Estados Unidos. Cuando la demanda de cobre es grande, la mina funciona sin interrupción, procesando 700.000 toneladas de roca al día y produciendo unos 389 millones de kilogramos de cobre al año (Foto de Michael Collier).

una manera que podamos prever. Así, una alteración en el medio ambiente que se preveía beneficiosa para la sociedad a menudo tiene el efecto opuesto.

En determinados puntos de este libro, tendrá la oportunidad de examinar distintos aspectos de nuestra relación con el ambiente físico. Será raro encontrar un capítulo que no se refiera a algún aspecto de los riesgos naturales, las cuestiones ambientales o los recursos. Partes importantes de algunos capítulos proporcionan el conocimiento geológico básico y los principios necesarios para comprender los problemas ambientales. Además, algunos recuadros de especial interés del libro se concentran en la Geología, las personas y el medio ambiente exponiendo estudios de casos o destacando una cuestión de actualidad.

## ALGUNAS RESEÑAS HISTÓRICAS ACERCA DE LA GEOLOGÍA

La naturaleza de nuestro planeta (sus materiales y procesos) ha sido objeto de estudio durante siglos. Los escritos sobre temas como los fósiles, las gemas, los terremotos y los volcanes se remontan a los griegos, hace más de 2.300 años.

Sin duda, el filósofo griego más influyente fue Aristóteles. Por desgracia, las explicaciones de Aristóteles sobre la naturaleza del mundo no se basaron en

observaciones y experimentos sagaces. Antes bien, fueron opiniones arbitrarias. Aristóteles creía que las rocas habían sido creadas bajo la «influencia» de las estrellas y que los terremotos se producían cuando el aire entraba con fuerza en el terreno, se calentaba por los fuegos centrales y escapaba de manera explosiva. Cuando se enfrentaba a un pez fósil, explicaba que «muchos peces viven en la tierra inmóviles y se encuentran al excavar».

Aunque las explicaciones de Aristóteles pudieran ser adecuadas para su época, por desgracia se las siguió aceptando durante muchos siglos, impidiendo así la elaboración de explicaciones más racionales. Frank D. Adams afirma en *The Birth and Development of the Geological Sciences* (Nueva York: Dover, 1938; El nacimiento y desarrollo de las Ciencias Geológicas) que «a lo largo de toda la Edad Media Aristóteles fue considerado el principal filósofo, aquél cuya opinión sobre cualquier tema era la definitiva y más autorizada».

## Catastrofismo

A mediados del siglo xvii (1650), James Ussher, arzobispo anglicano de Armagh, primado de Irlanda, publicó un importante trabajo que tuvo influencias inmediatas y profundas. Reputado estudioso de la Biblia, Ussher construyó una cronología de la historia humana y de la Tierra en la que determinó que la Tierra tenía solo unos pocos miles de años, ya que había sido creada en el 4004 a.C. El tratado de Ussher consiguió aceptación generalizada entre los líderes científicos y religiosos de Europa, y su cronología acabó figurando impresa en los márgenes de la misma Biblia.

Durante los siglos xvii y xviii la doctrina del **catastrofismo** influyó con gran fuerza en el pensamiento occidental sobre la Tierra. Dicho brevemente, los catastrofistas creían que los paisajes de la Tierra habían sido formados inicialmente por grandes catástrofes. Estructuras como las montañas o los cañones, cuya formación hoy sabemos que requiere mucho tiempo, se explicaban como si hubieran sido el resultado de desastres súbitos y a menudo a escala planetaria, producidos por causas desconocidas que ya no actúan. Esta filosofía era un intento por hacer encajar la velocidad de los procesos terrestres con las ideas entonces reinantes sobre la antigüedad de la Tierra.

### A veces los alumnos preguntan...

¿Cuál es la población mundial actual y a qué velocidad está creciendo?

Hubo que esperar hasta el año 1800 para que la población del mundo alcanzara los 1000 millones de personas. En 1970, esa cifra era de unos 4000 millones. Al principio de 2010, se estimaba que la población mundial era de unos 6800 millones de personas. En la actualidad el número de personas aumenta en nuestro planeta en casi 80 millones al año.

## PERFIL PROFESIONAL

### Oportunidades laborales en Geociencias

Hay muchas áreas diferentes de estudio geológico. Dos sitios donde se puede saber lo que hacen los geólogos son las páginas web indicadas al pie de la Tabla 1.1. En la página de la Sociedad Geológica de América, pulse en «Secciones y Divisiones» (*Sections and Divisions*). Vaya a la sección «Nuestra Ciencia» si accede a la página de la Unión geofísica americana (*American Geophysical Union*).

El *United States Department of Labor, Bureau of Labor Statistics* (<http://www.bls.gov>) es una fuente de información y datos abundantes sobre carreras y oportunidades de empleo. Si consulta el *Occupational Outlook Handbook*, Edición de 2008-09 (<http://www.bls.gov/oco>), de nuevo obtendrá información útil de las posibles salidas profesionales para un geólogo\*. Además de describir la naturaleza y las condiciones de trabajo, el manual proporciona información sobre la formación y los estudios necesarios, los gastos y las oportunidades de empleo esperadas.

A continuación ofrecemos algunos hechos sobre las profesiones de geólogo del manual. Los geólogos estudian la composición, la estructura y otros aspectos físicos de la Tierra. Estudian el presente y el pasado geológico de la Tierra utilizando sofisticados instrumentos para analizar la composición de los diversos materiales. Muchos geólogos ayudan a la búsqueda de recursos naturales como el agua subterránea, los metales y el petróleo. Otros trabajan estrechamente con los científicos que estudian el medio ambiente y otros que lo preservan y lo limpian.

Algunos geólogos pasan la mayor parte de su tiempo en una oficina, pero otros dividen su tiempo entre el trabajo de campo y la oficina y el trabajo de laboratorio.

Una titulación de grado es adecuada para algunos puestos básicos, pero la mayoría de los geólogos necesitan un máster en Geología o en Ciencias de la Tierra. Un máster es la formación preferida para la mayoría de los puestos de investigación básicos en la industria privada, agencias federales y estudios geológicos estatales. Para la mayor parte de puestos de investigación y enseñanza de nivel superior se



Recogiendo muestras de rocas para análisis. (Fotografía de Peggy/Yoram Kahana/ Peter Arnold, Inc.)

necesita un doctorado, pero puede no ser necesario para otros trabajos.

Los geólogos ocuparon unos 31.000 puestos de trabajo en 2006. Hay muchos otros puestos que los geólogos ocupan en los cuerpos docentes de las universidades.

Entre 2006 y 2016 se prevé un crecimiento del empleo para los geólogos del 22 por ciento, mucho mayor que la media para cualquier profesión. Las necesidades de energía, la protección ambiental, la gestión responsable del agua y de la tierra ampliarán la demanda de empleo.

**«Entre 2006 y 2016 se prevé un crecimiento del empleo para los geólogos del 22 por ciento, mucho mayor que la media para cualquier profesión.»**

Los graduados con un grado de máster disfrutarán de excelentes oportunidades laborales, sobre todo en consultoría técnica y científica y en la industria de servicios de ingeniería. Hay menos oportunidades para los recién graduados que solo tengan un grado en geología pero es posible que puedan encontrar buenas oportunidades en empleos relacionados, como profesores de ciencias en institutos o técnicos de laboratorio.

A lo largo de los capítulos restantes de este libro encontrará varios artículos que presentan perfiles profesionales para proporcionarle una perspectiva sobre la variedad de las carreras profesionales en Geología.

\* Este manual virtual es una fuente de información profesional reconocida en todo el país (EEUU) diseñada para proporcionar una valiosa asistencia para las personas que tienen que tomar decisiones sobre su futuro. Se revisa cada dos años. Además de la sección sobre geólogos, existe una sección centrada en los científicos ambientales e hidrólogos.

## Nacimiento de la Geología moderna

Contra este telón de fondo de las teorías aristotélicas y de la creación de la Tierra en el 4004 a.C., un físico y terrateniente escocés, James Hutton, publicó su *Theory of the Earth (Teoría de la Tierra)* en 1795 (Figura 1.5). En su trabajo, Hutton estableció un principio fundamental que constituye el pilar de la Geología actual: el **uniformismo**. Establece que las *leyes físicas, químicas y biológicas que actúan hoy, lo han hecho también en el pasado geológico*. Esto significa que las fuerzas y los procesos que en la actualidad observamos que conforman nuestro planeta han estado actuando durante mucho tiempo. Por tanto, para comprender las rocas antiguas, debemos entender primero los procesos petrogenéticos y sus resultados en la actualidad. Esta idea suele expresarse diciendo que *el presente es la clave del pasado*.

Antes de la *Teoría de la Tierra* de Hutton, nadie había demostrado de manera eficaz que los procesos geológicos se producían a lo largo de periodos extremadamente largos. Sin embargo, Hutton sostuvo con persuasión que fuerzas que parecen pequeñas producen, a lo largo de periodos prolongados de tiempo, efectos exactamente igual de grandes que los derivados de acontecimientos catastróficos súbitos. A diferencia de sus predecesores, Hutton citó con sumo cuidado observaciones verificables para apoyar sus ideas.

Por ejemplo, cuando sostenía que las montañas eran esculpidas y, en última instancia, destruidas por la

meteorización y la acción de las aguas superficiales, y que sus restos eran llevados a los océanos por procesos observables, Hutton decía: «Tenemos una cadena de hechos que demuestran claramente (...) que los materiales de las montañas destruidas han viajado a través de los ríos»; y además: «En realidad, no hay un solo paso en toda esta sucesión de acontecimientos (...) que no se perciba». Pasó a continuación a resumir este pensamiento planteando una pregunta y proporcionando inmediatamente la respuesta. «¿Qué más podemos necesitar? Nada, salvo tiempo».

## La Geología actual

En nuestros días, los principios básicos del uniformismo son tan viables como en época de Hutton. De hecho, nos damos cuenta con más fuerza que nunca de que el presente nos permite una percepción del pasado y que las leyes físicas, químicas y biológicas que gobiernan los procesos geológicos se mantienen invariables a lo largo del tiempo. Sin embargo, también entendemos que esta doctrina no debería tomarse demasiado al pie de la letra. Cuando se dice que en el pasado los procesos geológicos fueron los mismos que los que operan en la actualidad no se pretende sugerir que tuvieran siempre la misma importancia relativa o que actuaran precisamente a la misma velocidad. Además, algunos procesos geológicos importantes no pueden observarse en la actualidad, pero hay pruebas fehacientes de que suceden. Por ejemplo, sabemos que la Tierra ha sufrido impactos de meteoritos grandes aunque no haya testigos humanos. Acontecimientos como estos alteraron la corteza de la Tierra, modificaron su clima e influyeron enormemente en la vida sobre el planeta.

La aceptación del uniformismo significó la aceptación de una historia muy larga para la Tierra. Aunque la intensidad de los procesos terrestres varía, estos siguen tardando mucho en crear y destruir los principales accidentes geográficos del paisaje (Figura 1.6).

Por ejemplo, los geólogos han llegado a la conclusión de que en el pasado existieron montañas en zonas de las actuales Minnesota, Wisconsin, Michigan and Manitoba. En la actualidad, la región consiste en colinas bajas y llanuras. La erosión (proceso que desgasta la Tierra) destruyó de forma gradual esos picos. Los cálculos indican que el continente norteamericano está siendo rebajado a un ritmo de unos 3 cm cada 1.000 años. A este ritmo, el agua, el viento y el hielo tardarían 100 millones de años en rebajar unas montañas cuya altitud fuera de 3.000 m.

Pero incluso este lapso de tiempo es relativamente pequeño en la escala temporal de la historia de la Tierra; el registro rocoso contiene pruebas de que la Tierra ha experimentado muchos ciclos de formación y erosión de montañas. En lo referente a la naturaleza en continuo



**FIGURA 1.5.** James Hutton (1726–1797), fundador de la Geología moderna (Foto cortesía del Museo de Historia Natural de Londres).

cambio de la Tierra a través de grandes periodos de tiempo, Hutton hizo una afirmación que se convertiría en una cita clásica. En la conclusión de su famoso artículo publicado en 1788 en las *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, afirmó: «Por consiguiente, el resultado de nuestra presente investigación es que no encontramos vestigios de un principio; ni perspectivas de un fin».

En los capítulos siguientes examinaremos los materiales que componen nuestro planeta y los procesos que lo modifican. Es importante recordar que, si bien muchos rasgos de los paisajes de nuestro entorno parecen no cambiar durante los decenios que nosotros los observamos, sin embargo, sí están cambiando, pero a escalas temporales del orden de centenares, miles o incluso muchos millones de años.

## TIEMPO GEOLÓGICO

Aunque Hutton y otros reconocieron que el tiempo geológico es extremadamente largo, no tenían métodos para determinar con precisión la edad de la Tierra. Sin embargo, en 1896 se descubrió la radiactividad. La utilización de la radiactividad para datación se intentó por primera vez en 1905 y se ha perfeccionado desde entonces. Los geólogos pueden ahora asignar fechas bastante exactas a acontecimientos de la historia de la Tierra<sup>2</sup>. Por ejemplo, sabemos que los dinosaurios se extinguieron hace alrededor de 65 millones de años. En la actualidad se sitúa la edad de la Tierra en unos 4.600 millones de años.

### La magnitud del tiempo geológico

El concepto de tiempo geológico es nuevo para muchos no geólogos. Las personas estamos acostumbradas a tratar con incrementos de tiempo que se miden en horas, días, semanas y años. Nuestros libros de historia suelen examinar acontecimientos que transcurren a lo largo de siglos, pero incluso un siglo es difícil de apreciar por completo. Para la mayoría de nosotros, algo o alguien que tenga 90 años es *muy viejo*, y un artefacto de 1.000 años es *antiguo*.

Por el contrario, quienes estudian la Geología deben tratar a diario con enormes periodos temporales: millones o miles de millones de años. Cuando se contempla en el contexto de los 4.600 millones de años de antigüedad de la Tierra, un acontecimiento geológico que ocurrió hace 10 millones de años puede ser calificado de «reciente» por un geólogo, y una muestra de roca que haya sido datada en 10 millones de años puede denominarse «joven». En el estudio de la Geología,

<sup>2</sup> En el Capítulo 9 hay una discusión más completa sobre esta cuestión.

es importante la apreciación de la magnitud del tiempo geológico, porque muchos procesos son tan graduales que se necesitan enormes lapsos de tiempo antes de que se produzcan cambios significativos.

¿Qué representan 4.600 millones de años? Si empezáramos a contar a un ritmo de un número por segundo y continuáramos 24 horas al día, siete días a la semana y nunca paráramos, ¡tardaríamos aproximadamente dos vidas (150 años) en alcanzar los 4.600 millones! Otra interesante base de comparación es la siguiente:

Comprimamos, por ejemplo, los 4.500 millones de años de tiempo geológico en un solo año. A esa escala, las rocas más antiguas que conocemos tienen fecha de mediados de marzo. Los seres vivos aparecieron en el mar por primera vez en mayo. Las plantas y los animales terrestres emergieron a finales de noviembre y las amplias ciénagas que formaron los depósitos de carbón de Pensilvania florecieron aproximadamente durante cuatro días a principios de diciembre. Los dinosaurios dominaron la Tierra a mediados de diciembre, pero desaparecieron el día 26, más o menos a la vez que se levantaron por primera vez las Montañas Rocosas. Criaturas de aspecto humano aparecieron en algún momento de la tarde del 31 de diciembre y los casquetes polares más recientes empezaron a retroceder desde el área de los Grandes Lagos y el norte de Europa alrededor de 1 minuto y 15 segundos antes de la media noche del 31. Roma gobernó el mundo occidental durante cinco segundos, desde las 11 h 59:45 hasta las 11 h 59:50. Colón descubrió América tres segundos antes de la medianoche, y la ciencia de la Geología nació con los escritos de James Hutton pasado un poco el último segundo del final de nuestro memorable año<sup>3</sup>.

Lo anterior no es más que una de las muchas analogías que se han concebido en un intento por comunicar la magnitud del tiempo geológico. Aunque útiles, todas ellas, por muy inteligentes que sean, solo empiezan a ayudarnos a comprender la vasta extensión de la historia de la Tierra.

### La datación relativa y la escala de tiempo geológico

Durante el siglo XIX, mucho antes del advenimiento de la datación radiométrica, se desarrolló una escala de tiempo geológico utilizando los principios de la datación relativa. **Datación relativa** significa que los acontecimientos se colocan en su secuencia u orden apropiados sin conocer su edad en años. Esto se hace aplicando

<sup>3</sup> Don L. Eicher, *Geologic Time*, segunda edición (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1978), págs. 18-19. Reimpreso con permiso. En este ejemplo se utiliza una edad de la Tierra de 4.500 millones de años. Las estimaciones actuales colocan la cifra más próxima a los 4.600 millones de años.





**FIGURA 1.6.** A lo largo de millones de años, la meteorización, la gravedad y el trabajo erosivo del Río Colorado y las corrientes que desembocan en él han excavado el Gran Cañón de Arizona. Los procesos geológicos a menudo actúan tan despacio que pueden no ser visibles en una vida humana entera. Las edades relativas de las capas de rocas en el cañón pueden determinarse aplicando la ley de la superposición. Las rocas más jóvenes están arriba y las más antiguas abajo. Las edades numéricas de las rocas del cañón abarcan centenares de millones de años. Los geólogos deben tratar de manera sistemática con materiales antiguos y acontecimientos que se produjeron en el pasado geológico distante (Foto de Marc Muench/Muench Photography, Inc.).

principios como la **ley de superposición** (*super* = sobre, *positum* = situar). Esta regla básica se aplica a los materiales que se depositaron originalmente en la superficie de la Tierra, como las capas de rocas sedimentarias o de coladas de lava, y establece simplemente que la capa más joven se encuentra en la parte superior y la más antigua, en la inferior (en el supuesto de que nada haya volcado las capas, lo cual a veces sucede). Dicho de otro modo, una capa es más antigua que las que están encima de ella y más joven que las inferiores. El Gran Cañón de Arizona proporciona un buen ejemplo, en el que las rocas más antiguas se sitúan en el interior del desfiladero y las rocas más jóvenes se hallan en el borde. Así, la ley de superposición establece la *secuencia* de las capas de roca (pero no, por supuesto, sus edades numéricas) (Figura 1.6). En nuestros días, esta proposición parece elemental, pero hace 300 años, significó un gran avance en el razonamiento científico al establecer una base racional para las determinaciones del tiempo relativo.

Los fósiles, restos o impresiones de vida antigua, fueron también esenciales para el desarrollo de la escala de tiempo geológico (Figura 1.7). Los fósiles son la base del **principio de sucesión de fósiles**, que establece que *los organismos fósiles se sucedieron unos a otros en un orden definido y determinable, y, por tanto, cualquier periodo geológico puede reconocerse por su contenido en fósiles*. Este principio se desarrolló con gran laboriosidad durante decenios

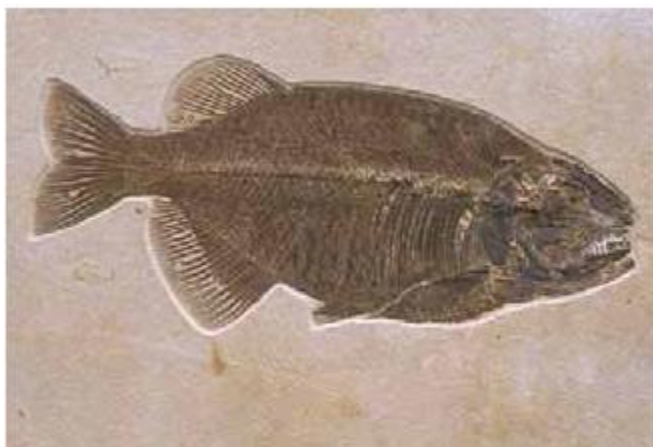
recogiendo fósiles de incontables capas de rocas por todo el mundo. Una vez establecido, este principio permitió a los geólogos identificar rocas de la misma edad en lugares completamente separados y construir la escala de tiempo geológico mostrada en la Figura 1.8.

Obsérvese que las unidades en que se divide el tiempo geológico no tienen necesariamente el mismo número de años. Por ejemplo, el periodo Cámbrico duró unos 54 millones de años, mientras que el Silúrico abarcó solo unos 28 millones. Como destacaremos de nuevo en el Capítulo 9, esta situación existe porque la base para el establecimiento de la escala de tiempo no fue el ritmo regular de un reloj, sino el carácter variable de las formas de vida a lo largo del tiempo. Las fechas absolutas se añadieron mucho después del establecimiento de la escala temporal. Un vistazo a la Figura 1.8 revela también que el eón fanerozoico se divide en muchas más unidades que los eones anteriores aun cuando abarque solo alrededor del 12 por ciento de la historia de la Tierra. El escaso registro fósil de esos primeros eones es la principal razón de la falta de detalle en esta porción de la escala. Sin fósiles abundantes, los geólogos pierden su principal herramienta para subdividir el tiempo geológico.

Además de la *ley de superposición* y el *principio de sucesión biótica*, hay una serie de otros métodos útiles de datación relativa, que se examinarán e ilustrarán en el Capítulo 9.



A.



B.

**FIGURA 1.7.** Los fósiles son herramientas fundamentales para el geólogo. Además de ser muy importantes para la datación relativa, los fósiles pueden ser indicadores ambientales útiles. **A.** *Archaeopteryx*, un pájaro primitivo que vivió durante el periodo Jurásico (véase la Escala de Tiempo Geológico en la Figura 1.8). (Foto de Michael Collier).

**B.** Pez fósil del Eoceno procedente de la Green River Formation, en Wyoming (Foto: Francois Gohier/Photo Researchers, Inc.).

## NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Como miembros de una sociedad moderna, se nos está recordando constantemente los beneficios aportados por la ciencia. Pero, ¿cuál es exactamente la naturaleza de la investigación científica? La comprensión de cómo se hace la ciencia y cómo trabajan los científicos es un tema importante que aparece a todo lo largo de este libro. Se explorarán las dificultades para recopilar datos y algunos de los ingeniosos métodos que se han desarrollado para superar esas dificultades. Se verán también muchos ejemplos de cómo se formulan y se comprueban las hipótesis, y se informará de la evolución y la elaboración de algunas de las principales teorías.

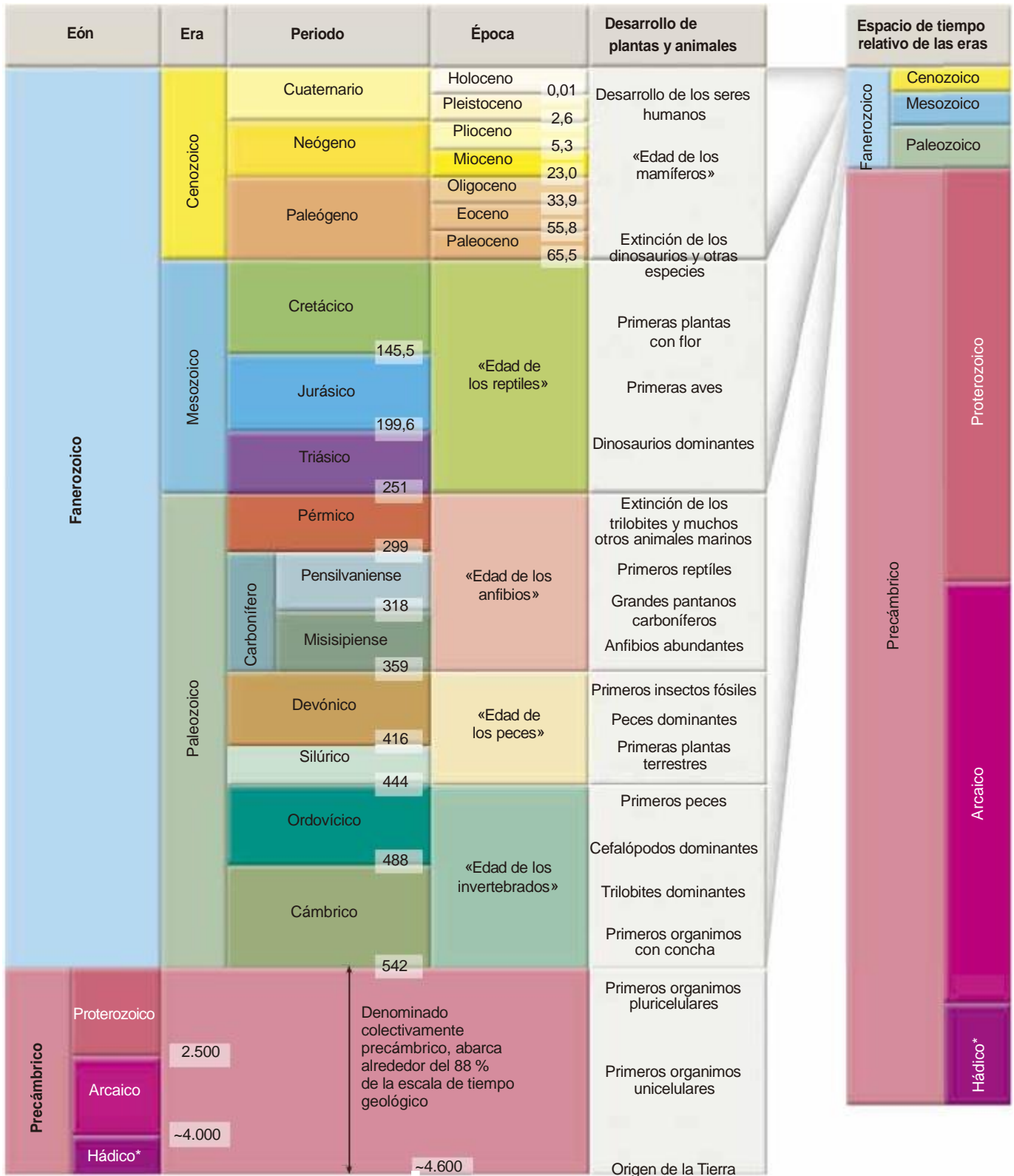
Toda la ciencia se basa en la suposición de que el mundo natural se comporta de una manera constante y predecible que puede comprenderse mediante el estudio atento y sistemático. El objetivo general de la ciencia es descubrir los modelos subyacentes en la naturaleza y luego utilizar ese conocimiento para hacer predicciones sobre lo que cabría o no cabría esperar que ocurriera dados ciertos hechos y circunstancias. Por ejemplo, sabiendo cómo se forman los yacimientos de petróleo, los geólogos pueden predecir los sitios más favorables para la exploración y, quizá igual de importante, cómo evitar las regiones con escaso o nulo potencial.

El desarrollo de nuevos conocimientos científicos implica algunos procesos lógicos básicos que son universalmente aceptados. Para determinar qué está ocurriendo en el mundo natural, los científicos recogen «hechos» científicos a través de la observación y la medida. Como el error es inevitable, la exactitud de una medida o una observación particular es siempre cuestionable. No obstante, esos datos son esenciales para la ciencia y sirven como trampolín para el desarrollo de las teorías científicas (véase Recuadro 1.1).

### Hipótesis

Una vez recogidos los hechos y formulados los principios que describen un fenómeno natural, los investigadores intentan explicar cómo o por qué las cosas suceden de la manera observada. Lo hacen elaborando una explicación provisional (o no probada), que denominamos una **hipótesis** científica. Es mejor que un investigador pueda formular más de una hipótesis para explicar un conjunto determinado de observaciones. Si un solo investigador no puede idear múltiples modelos, los otros miembros de la comunidad científica desarrollarán casi siempre explicaciones alternativas. Con frecuencia, a todo ello le sigue un debate encendido. Como consecuencia, quienes proponen hipótesis opuestas llevan a cabo una investigación extensa y los resultados se ponen a disposición del resto de la comunidad científica a través de las publicaciones de esta materia.

Antes de que una hipótesis sea aceptada como parte del conocimiento científico, debe someterse a pruebas y análisis objetivos. (Si una hipótesis no puede probarse, no es científicamente útil, por muy interesante que pueda parecer.) El proceso de verificación requiere que se hagan *predicciones* según la hipótesis que se esté considerando y que las predicciones se prueben comparándolas con observaciones objetivas de la naturaleza. En otras palabras, las hipótesis deben poder aplicarse a las observaciones distintas de las utilizadas para formularlas en primer lugar. A la larga, las hipótesis que suspenden esta prueba rigurosa se descartan. La historia de la ciencia está repleta de hipótesis descartadas. Una de las mejor conocidas es la idea de que la Tierra era el centro del universo, una



\* Hádico es el nombre informal para el lapso que empieza en la formación de la Tierra y acaba con las primeras rocas conocidas de la Tierra

**FIGURA 1.8.** Escala de tiempo geológico. Las cifras indicadas en la escala vertical representan el tiempo en millones de años antes del presente (MA, AP). Estas fechas fueron añadidas mucho después de que se hubiera establecido la escala de tiempo utilizando técnicas de datación relativa. El Precámbrico representa más del 88 por ciento del tiempo geológico (Datos procedentes de la Sociedad Geológica de América).

## ENTENDER LA TIERRA

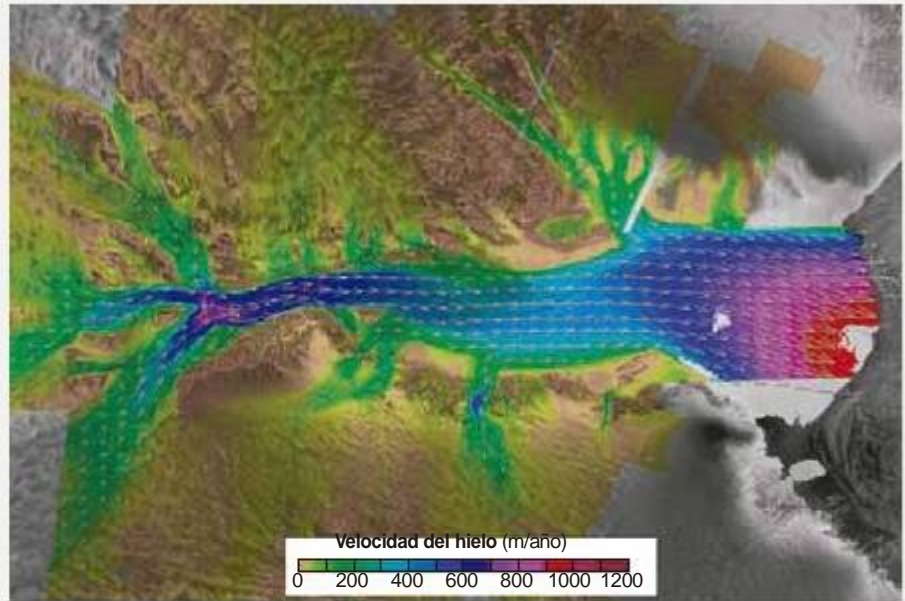
El estudio de la Tierra desde el espacio

RECUADRO 1.1

Los hechos científicos se recogen de muchas maneras, como en los estudios científicos y en las observaciones y mediciones de campo. Las imágenes de satélite como las descritas aquí son otra fuente de datos útil. Estas imágenes proporcionan perspectivas difíciles de obtener mediante fuentes más tradicionales. Además, los instrumentos de alta tecnología instalados a bordo de muchos satélites permiten a los científicos recoger información de regiones remotas cuyos datos serían escasos de otro modo.

La imagen de la Figura 1.A se creó utilizando datos de radar por satélite de la Misión Cartográfica de la Antártida. Muestra el movimiento del glaciar Lambert de la Antártida. Los glaciares más pequeños que se unen al Lambert exhiben velocidades bajas, mostradas en verde, de 100-300 m al año. Cerca de su término, donde el hielo se despliega y adelgaza, las velocidades aumentan hasta 1.000-1.200 m al año. Debido a lo remoto de su ubicación y a las extremas condiciones meteorológicas asociadas con esta región, solo se habían comunicado previamente un puñado de medidas de velocidad *in situ* tradicionales. Ahora que se dispone de medidas precisas por satélite, los científicos tienen una línea basal cuantitativa para comparaciones futuras.

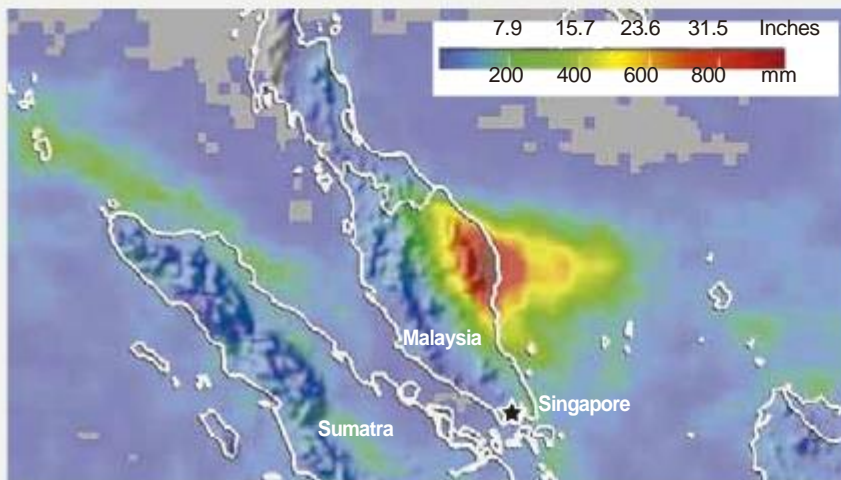
La imagen de la Figura 1.B procede de la *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* de la NASA. Se han estudiado los patrones de precipitaciones sobre el continente durante



**FIGURA 1.A.** Esta imagen de satélite proporciona información detallada sobre el movimiento del glaciar Lambert de la Antártida. Dicha información es básica para entender los cambios en el comportamiento del glaciar a lo largo del tiempo. Las velocidades del hielo se determinan a partir de pares de imágenes obtenidas con una diferencia de 24 días, utilizando una técnica denominada interferometría con radar (NASA).

muchos años utilizando radares y otros instrumentos con base en el suelo. En la actualidad, los instrumentos instalados a bordo del satélite *TRMM* han ampliado en gran medida nuestra capacidad de recoger datos

sobre las precipitaciones. Además de los datos para los continentes, este satélite proporciona medidas extremadamente precisas de lluvia sobre los océanos que los instrumentos con base en tierra no pueden ver. Esto es especialmente importante porque gran parte de la lluvia de la Tierra cae en las zonas tropicales cubiertas por océano y mucha de la energía del planeta que produce el clima procede del intercambio de calor implicado en el proceso de la lluvia. Hasta la *TRMM*, la información sobre la intensidad y la cantidad de lluvia caída sobre los trópicos era escasa. Estos datos son cruciales para entender y predecir el cambio climático global.



**FIGURA 1.B.** Este mapa de precipitaciones para el 7-13 de diciembre de 2004 en Malasia se construyó utilizando datos de *TRMM*. Cayeron más de 800 mm de lluvia a lo largo de la península (área roja más oscura). Las extraordinarias lluvias causaron extensas inundaciones y provocaron muchas avalanchas de lodo (NASA/imagen de *TRMM*).

propuesta que se sustentaba en el aparente movimiento diario del Sol, la Luna y las estrellas alrededor de la Tierra. Como afirmó con tanta habilidad el matemático Jacob Bronowski: «La ciencia es muchas cosas, pero al final todas vuelven a esto: la ciencia es la aceptación de lo que funciona y el rechazo de lo que no lo hace».

## Teoría

Cuando ha sobrevivido a una comprobación intensiva y cuando se han eliminado los modelos competidores, una hipótesis puede ser elevada al estatus de **teoría** científica. En el lenguaje cotidiano solemos decir «eso es solo una teoría». Pero una teoría científica es una visión bien comprobada y ampliamente aceptada que, en opinión de la comunidad científica, es la que mejor explica ciertos hechos observables. Algunas teorías muy documentadas y extremadamente bien sustentadas tienen un gran alcance. Por ejemplo, la teoría de la tectónica de placas proporciona un marco para la comprensión del origen de las montañas, los terremotos y la actividad volcánica. Además, la tectónica de placas explica la evolución de los continentes y las cuencas oceánicas a lo largo del tiempo (ideas que se explorarán con cierto detalle en los Capítulos 2, 13 y 14).

## El método científico

El proceso que se acaba de describir, en el cual los investigadores recogen hechos a través de observaciones y formulan hipótesis y teorías científicas, se denomina *método científico*. Al contrario de la creencia popular, el método científico no es una receta estándar que los científicos aplican de una manera rutinaria para desenmarañar los secretos de nuestro mundo natural. Antes bien, es una empresa que implica creatividad e intuición. Rutherford y Ahlgren lo expresaron de esta forma: «Inventar hipótesis o teorías para imaginar cómo funciona el mundo y luego apañárselas para ponerlas a prueba con los hechos reales es tan creativo como escribir poesía, componer música o diseñar rascacielos»<sup>4</sup>.

No hay un camino fijo que los científicos puedan seguir siempre y les conduzca infaliblemente al conocimiento científico. No obstante, en muchas investigaciones científicas intervienen las siguientes etapas: (1) recogida de hechos científicos a través de la observación y la medida (Figura 1.9); (2) formulación de preguntas que relacionen los hechos y elaboración de una o varias hipótesis de trabajo que puedan responder a esas preguntas; (3) desarrollo de observaciones y experimentos para probar la hipótesis; y (4) aceptación, modificación o rechazo de las hipótesis sobre la base de extensas pruebas (véase Recuadro 1.2).

<sup>4</sup> F. James Rutherford y Andrew Ahlgren, *Science for All Americans* (New York: Oxford University Press, 1990), pág. 7.



**FIGURA 1.9.** El trabajo de laboratorio es una parte importante de lo que hacen muchos geólogos. Estos científicos están trabajando con un testigo de sondeo de sedimento. Estos testigos suelen contener datos útiles sobre el pasado geológico y la historia climática de la Tierra (Foto de Science Source/Photo Researchers, Inc.).

Otros descubrimientos científicos pueden proceder de ideas simplemente teóricas, que se enfrentan resueltamente a un extenso examen. Algunos investigadores utilizan ordenadores de gran velocidad para crear modelos que simulen lo que sucede en el mundo «real». Estos modelos son útiles para tratar los procesos naturales que suceden en escalas de tiempo muy largas o que se producen en lugares extremos o inaccesibles. También, otros avances científicos tienen lugar tras la producción de un suceso totalmente inesperado durante un experimento. Estos descubrimientos casuales son más que pura suerte; como dijo Louis Pasteur, «en el campo de la observación, la suerte favorece solo a la mente preparada».

El conocimiento científico se adquiere a través de varias vías, de modo que quizá sea mejor describir la naturaleza de la investigación científica como métodos de la ciencia y no como el método científico. Además, debe recordarse siempre que incluso las teorías científicas más convincentes siguen siendo solo explicaciones simplificadas del mundo natural.

## La tectónica de placas y la investigación científica

En las páginas de este libro tendrá muchas oportunidades para desarrollar y reforzar su comprensión sobre el funcionamiento de la ciencia y, en particular, sobre el funcionamiento de la ciencia de la Geología. Aprenderá los métodos de recogida de datos y desarrollará un sentido de las técnicas de observación y los procesos de razonamiento que utilizan los geólogos. El Capítulo 2, «Tectónica de placas: el desarrollo de una revolución científica», es un ejemplo excelente.

## ENTENDER LA TIERRA

¿Se mueven los glaciares? Una aplicación del método científico

RECUADRO 1.2

En el Recuadro 1.1 aprendimos que los instrumentos que hay a bordo de los satélites nos permiten controlar los glaciares desde el espacio. Por supuesto, este es un avance reciente. En el siglo XIX, conocer el comportamiento de los glaciares era mucho más difícil y trabajoso.

El estudio de los glaciares proporciona una temprana aplicación del método científico. En las zonas altas de los Alpes suizos y franceses existen pequeños glaciares en las zonas superiores de algunos valles. A finales del siglo dieciocho y principios del diecinueve, los agricultores y ganaderos de esos valles sugerían que los glaciares de los trechos más elevados habían sido antiguamente mucho mayores y ocupado las zonas bajas del valle. Basaban su explicación en el hecho de que en el fondo de los valles se encontraban cantos angulosos y otros derrubios rocosos dispersos que parecían idénticos a los materiales que podían ver en los glaciares y cerca de ellos en las cabeceras de los valles.

Aunque la explicación para estas observaciones parecía lógica, otros no aceptaban la idea de que masas de hielo de centenares de metros de grosor fueran capaces de moverse. El desacuerdo se resolvió al diseñarse y llevarse a cabo un experimento sencillo



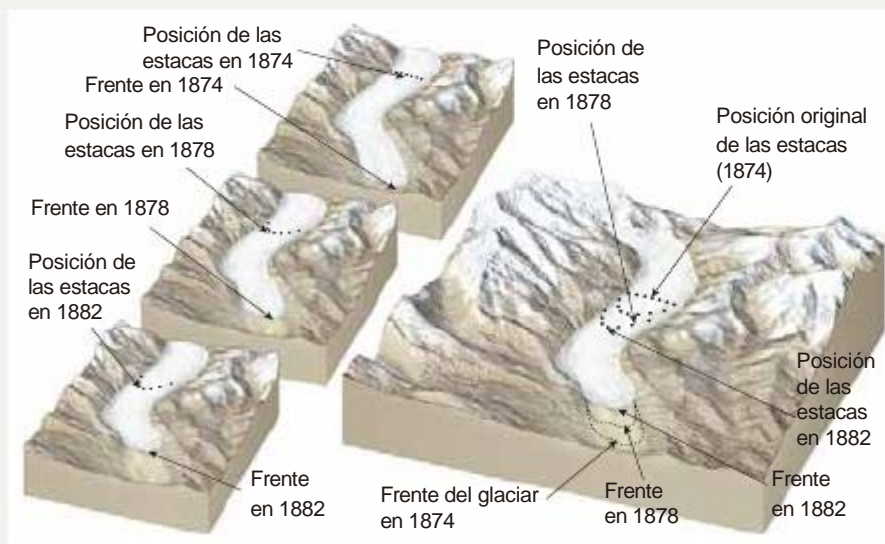
**Figura 1.C.** El hielo glacial se mueve tan despacio que es necesario hacer medidas cuidadosas para detectarlo. Alguno de los primeros intentos se realizó en los Alpes (Fotografía de Laurent Gillieron/Keystone/Corbis).

para comprobar la hipótesis de que el hielo del glaciar podía moverse.

Se colocaron marcadores en línea recta atravesando por completo un glaciar alpino, y la posición de la línea se señaló en las paredes del valle de manera que, si el hielo se

movía, pudiera detectarse el cambio de posición. Después de un año o dos, los resultados eran claros: los marcadores colocados en el glaciar habían descendido por el valle, demostrando que el hielo glacial se mueve. Además, el experimento demostró que, dentro de un glaciar, el hielo no se mueve a una velocidad uniforme, porque los marcadores del centro avanzaban más deprisa que los que había a lo largo de los márgenes. Aunque la mayor parte de los glaciares se mueve demasiado despacio para una detección visual directa, el experimento demostró de manera satisfactoria que se produce movimiento. En los años siguientes este experimento se repitió muchas veces con más precisión utilizando técnicas de vigilancia más modernas. Cada vez, se verificaron las relaciones básicas establecidas por los primeros intentos.

El experimento ilustrado en la Figura 1.D se llevó a cabo en el glaciar Rhone suizo a finales del siglo diecinueve. No solo permitió trazar el movimiento de los marcadores dentro del hielo, sino también cartografiar la posición del frente del glaciar. Obsérvese que, aun cuando el hielo situado dentro del glaciar estuviera avanzando, el frente de hielo estaba retrocediendo. Como suele ocurrir en ciencia, las observaciones y los experimentos diseñados para comprobar una hipótesis proporcionan nueva información que precisa análisis y explicación ulteriores.



**Figura 1.D.** Movimiento del hielo y cambios en el frente del glaciar Rhone, Suiza. En este estudio clásico de un glaciar de valle, el movimiento de las estacas demostró claramente que el hielo se mueve y que el movimiento de los laterales del glaciar es más lento que el movimiento del centro. Obsérvese también que, aun cuando el frente de hielo estaba retrocediendo, el hielo dentro del glaciar seguía avanzando.

En las últimas décadas, se ha aprendido mucho sobre la dinámica de nuestro planeta. Este periodo ha constituido una revolución sin igual en nuestra comprensión de la Tierra. La revolución empezó a principios del siglo xx con la propuesta radical de la *deriva continental*, la idea de que los continentes se movían sobre la superficie del planeta. Esta hipótesis contradecía el punto de vista establecido, según el cual los continentes y las cuencas oceánicas eran características permanentes y estacionarias sobre la superficie terrestre. Por esta razón, la idea de los continentes a la deriva se recibió con gran escepticismo e incluso se consideró ridícula. Tuvieron que pasar más de 50 años antes de que se recogieran datos suficientes para transformar esta hipótesis controvertida en una teoría sólida que enlazara todos los procesos básicos que, se sabía, actuaban en la Tierra. La teoría que finalmente apareció, denominada *teoría de la tectónica de placas*, proporcionó a los geólogos el primer modelo exhaustivo del funcionamiento interno de la Tierra.

Al leer el Capítulo 2, no solo adquirirá conocimientos sobre el funcionamiento de nuestro planeta, sino que, además, verá un ejemplo excelente de cómo las «verdades» geológicas se ponen al descubierto y se reelaboran.

### A veces los alumnos preguntan...

En clase, se comparó una hipótesis con una teoría. ¿En qué se diferencian cada una de ellas de una ley científica?

Una ley científica es un principio básico que describe un comportamiento particular de la naturaleza que, en general, tiene un alcance reducido y puede exponerse, brevemente, como una ecuación matemática simple. Dado que se ha demostrado una y otra vez que en las leyes científicas coinciden las observaciones y las medidas, se descartan en muy pocas ocasiones. Sin embargo, puede ser necesario modificar las leyes para ajustarlas a los nuevos descubrimientos. Por ejemplo, las leyes del movimiento de Newton son todavía útiles para las aplicaciones cotidianas (la NASA las utiliza para calcular las trayectorias de los satélites), pero no funcionan a velocidades próximas a la velocidad de la luz. Por ello, han sido sustituidas por la teoría de la relatividad de Einstein.

## LAS ESFERAS DE LA TIERRA

### Una visión de la Tierra

La visión clásica de la Tierra, como la que se muestra en la Figura 1.10A, proporcionó a los astronautas del *Apollo 8* y al resto de la humanidad una perspectiva única de nuestro planeta. Vista desde el espacio, la Tierra es espectacular por su belleza y llamativa por su soledad. Una imagen como esta nos recuerda que la Tierra es, después de todo, un planeta pequeño, autónomo y, de



A.



B.

**FIGURA 1.10.** A. Perspectiva de la Tierra que vieron los astronautas del *Apollo 8* conforme su nave espacial salía de detrás de la Luna (NASA). B. África y Arabia destacan en esta imagen de la Tierra tomada desde el *Apollo 17*. Las zonas de color marrón que carecen de nubes situadas sobre los continentes coinciden con las principales regiones desérticas. La banda de nubes que cruza África central se asocia con un clima mucho más húmedo que en algunos lugares y sostiene las selvas tropicales. El azul oscuro de los océanos y las nubes arremolinadas nos recuerdan la importancia de los océanos y la atmósfera. La Antártida, un continente cubierto por hielo glaciar, es visible en el Polo Sur (NASA).

algún modo, incluso frágil. Bill Anders, uno de los astronautas del *Apollo 8*, lo expresó de este modo, «Hicimos todo ese camino para explorar la Luna y lo más importante es que descubrimos la Tierra».

A medida que nos acercamos a nuestro planeta desde el espacio, se pone de manifiesto que la Tierra es mucho más que roca y suelo (Figura 1.10B). De hecho, los rasgos más llamativos no son los continentes, sino las



**FIGURA 1.11.** La línea de costa es un ejemplo obvio de una interfaz, un límite común donde interactúan diferentes partes de un sistema. En esta imagen, las olas del océano (*hidrosfera*) creadas por la fuerza del aire en movimiento (*atmósfera*) se rompen contra la costa rocosa Big Sur de California (*geosfera*). La fuerza del agua puede ser poderosa y el trabajo de erosión que se lleva a cabo, importante (Foto: Kevin Schafer/www.DanitaDelimont).

nubes turbulentas suspendidas encima de la superficie y el enorme océano global. Estas características subrayan la importancia del aire y el agua en nuestro planeta.

La visión cercana de la Tierra desde el espacio, mostrada en la Figura 1.10B, nos ayuda a apreciar por qué el medio físico se divide tradicionalmente en tres partes principales: la porción de agua de nuestro planeta, *la hidrosfera*; el envoltorio gaseoso de la Tierra, *la atmósfera*; y, por supuesto, la Tierra sólida, o *geosfera*.

Debe destacarse que nuestro medio ambiente está muy integrado. No está dominado únicamente por rocas, agua o aire. En cambio, se caracteriza por interacciones continuas entre ellos a medida que el aire entra en contacto con las rocas, las rocas con el agua y el agua con el aire. Además, *la biosfera*, que constituye la totalidad de vida vegetal y animal sobre nuestro planeta, interactúa con cada uno de los tres reinos físicos y es una parte igualmente integrada del planeta. Así, se puede pensar que la Tierra está formada por cuatro esferas principales: la hidrosfera, la atmósfera, la geosfera y la biosfera.

Las interacciones entre las cuatro esferas de la Tierra son incalculables. La Figura 1.11 nos proporciona un ejemplo fácil de visualizar. La línea de costa es un lugar obvio de encuentro entre las rocas, el agua y el aire. Las

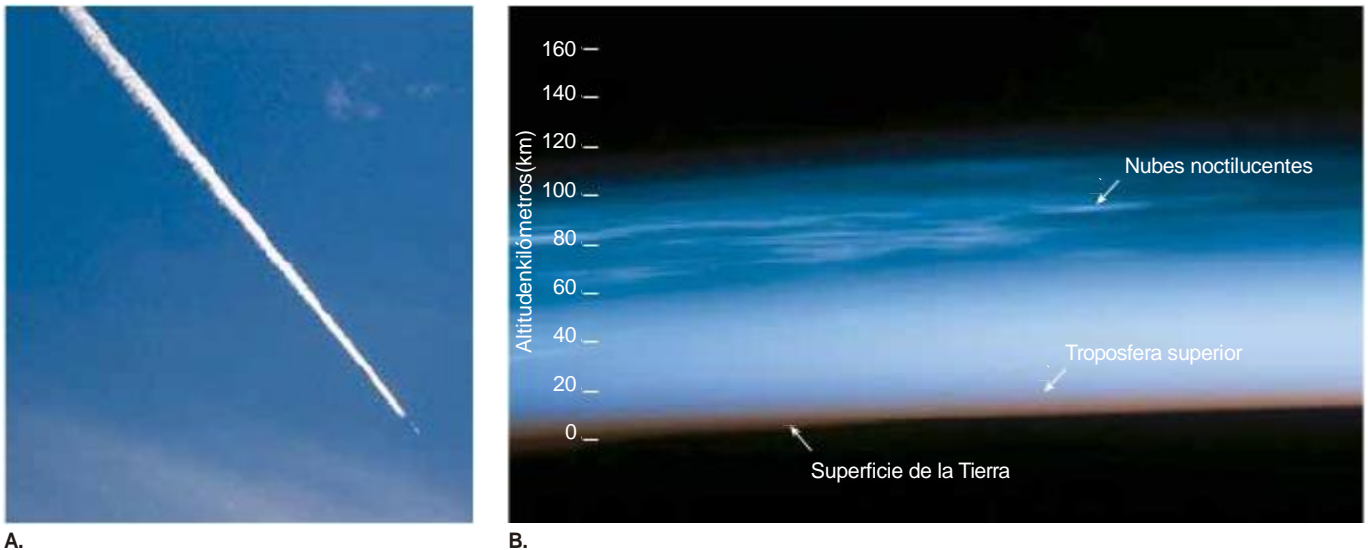
olas oceánicas, que se forman por el arrastre de aire que se mueve sobre el mar, se rompen contra la costa rocosa. La fuerza del agua puede ser poderosa y el trabajo de erosión que se lleva a cabo, importante.

## Hidrosfera

A la Tierra se le llama a veces el planeta *azul*. El agua, más que cualquier otra cosa, hace que la Tierra sea única. La **hidrosfera** es una masa de agua dinámica que está en movimiento continuo, evaporándose de los océanos a la atmósfera, precipitándose sobre la Tierra y volviendo de nuevo al océano por medio de los ríos. El océano global es, por supuesto, el rasgo más destacado de la hidrosfera: cubre casi el 71 por ciento de la superficie terrestre hasta una profundidad media de unos 3.800 m y representa alrededor del 97 por ciento del agua de la Tierra. Sin embargo, la hidrosfera incluye también el agua dulce que se encuentra en los torrentes, lagos y glaciares. Además, el agua es un componente importante de todos los seres vivos.

Aunque estas últimas fuentes constituyen tan solo una diminuta fracción del total, son mucho más importantes de lo que indica su escaso porcentaje. Además de proporcionar el agua dulce, tan vital para la vida en la





**FIGURA 1.12.** A. Este avión está volando en la atmósfera a una altitud de más de 9.000 m. Más de dos tercios de la atmósfera están debajo de esta altura. Para alguien que esté sobre el suelo, la atmósfera parece extenderse una gran distancia. Sin embargo, comparada con el grosor (radio) de la Tierra sólida, la atmósfera es una capa muy delgada (Foto de Warren Faidley/Weatherstock). B. Esta imagen única de la atmósfera de la Tierra fundiéndose con el vacío del espacio recuerda una pintura abstracta. Fue tomada en el oeste de China en junio de 2007 por un miembro de la tripulación de la lanzadera espacial. Las finas tiras plateadas (denominadas nubes noctilucuentes) arriba en la zona azul están a una altitud de unos 8 km. La atmósfera a esta altitud es *muy* delgada. La presión del aire aquí es inferior a una milésima la presión al nivel del mar. La fina zona rojiza en la parte inferior de la imagen es la parte más densa de la atmósfera. Es aquí, en la capa denominada *troposfera*, donde tienen lugar todos los procesos climatológicos y la formación de las nubes. El 90 por ciento de la atmósfera terrestre ocupa solo 16 km desde la superficie (NASA).

Tierra, los torrentes, glaciares y aguas subterráneas son responsables de esculpir y crear muchos de los variados paisajes de nuestro planeta.

## Atmósfera

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa denominada **atmósfera** (Figura 1.12). Cuando vemos un avión que vuela alto en el cielo, parece que la atmósfera se extiende una gran distancia hacia arriba. Sin embargo, cuando se compara con el grosor (radio) de la Tierra sólida (unos 6.400 km), la atmósfera es una capa muy delgada.

La mitad se encuentra por debajo de una altitud de 5,6 km y el 90 por ciento ocupa una franja de tan solo 16 km desde la superficie de la Tierra. A pesar de sus modestas dimensiones, este delgado manto de aire es una parte integral del planeta. No solo proporciona el aire que respiramos, sino que también nos protege del intenso calor solar y de las peligrosas radiaciones ultravioletas. Los intercambios de energía que se producen de manera continua entre la atmósfera y la superficie de la Tierra y entre la atmósfera y el espacio, producen los efectos que denominamos tiempo y clima.

Si, como la Luna, la Tierra no tuviera atmósfera, nuestro planeta no solo carecería de vida, sino que, además, no actuarían muchos de los procesos e interacciones que hacen de la superficie un lugar tan dinámico.

Sin la meteorización y la erosión, la faz de nuestro planeta se parecería mucho a la superficie lunar, que no ha cambiado apreciablemente en casi tres mil millones de años de historia.

## Biosfera

La **biosfera** incluye toda la vida en la Tierra. La vida oceánica está concentrada en las aguas superficiales del mar iluminadas por el Sol (Figura 1.13). La mayor parte de la vida en la Tierra está concentrada también cerca de la superficie, alcanzando las raíces de los árboles y los animales excavadores unos pocos metros bajo tierra y los insectos voladores y los pájaros un kilómetro más o menos en la atmósfera. Una sorprendente variedad de formas de vida están adaptadas también a ambientes extremos. Por ejemplo, en el fondo oceánico, donde las presiones son extremas y la luz no penetra, hay lugares donde se descargan (emiten) a borbotones líquidos calientes ricos en minerales que sustentan comunidades de formas de vida exóticas. En tierra, algunas bacterias medran en rocas a profundidades de hasta 4 km y en fuentes termales. Además, las corrientes de aire pueden transportar microorganismos muchos kilómetros en la atmósfera. Aun cuando consideremos estos extremos, todavía debemos pensar en la vida como confinada a una estrecha banda muy cerca de la superficie de la Tierra.



**FIGURA 1.13.** La hidrosfera contiene una porción significativa de la biosfera de la Tierra. Los actuales arrecifes de coral son ejemplos únicos y complejos y son el hogar de alrededor del 25 por ciento de todas las especies marinas. Dada esta diversidad, a veces se hace referencia a ellos como el equivalente oceánico de los bosques tropicales. En el Recuadro 7.2, pág. 249 encontrará más información sobre los arrecifes de coral (Foto de Darryl Leniuk/age fotostock).

Las plantas y los animales dependen del ambiente físico para los procesos básicos de la vida. Sin embargo, los organismos no solo responden a su entorno físico. De hecho, la biosfera influye poderosamente en las otras tres esferas. Sin la vida, la constitución y la naturaleza de la geosfera, la hidrosfera y la atmósfera serían muy diferentes.

## Geosfera

Debajo de la atmósfera y los océanos se encuentra la Tierra sólida o **geosfera**. La geosfera se extiende desde la superficie hasta el centro del planeta, una profundidad de casi 6.400 km, lo que hace de ella, con gran distancia, la mayor de las cuatro esferas de la Tierra. Gran parte de nuestro estudio de la tierra sólida se concentra en los accidentes geográficos superficiales más accesibles. Por fortuna, muchos de estos accidentes representan las expresiones externas del comportamiento dinámico de los materiales que se encuentran debajo de la superficie. Examinando los rasgos superficiales más destacados y su extensión global, podemos obtener pistas para explicar los procesos dinámicos que han conformado nuestro planeta. Un primer vistazo a

la estructura del interior de la Tierra y a las principales estructuras de la superficie de la geosfera se presentará más adelante en este capítulo.

El *suelo*, el fino barniz de material de la superficie de la Tierra que sustenta el crecimiento de las plantas, puede considerarse como parte de las cuatro esferas. La porción sólida es una mezcla de los restos de roca meteorizada (geosfera) y la materia orgánica de la vida vegetal y animal en descomposición (biosfera). Los restos de roca descompuesta y desintegrada son el producto de los procesos de meteorización que requieren aire (atmósfera) y agua (hidrosfera). El aire y el agua ocupan también los espacios abiertos entre las partículas sólidas.

## LA TIERRA COMO UN SISTEMA

Cualquiera que estudie la Tierra aprende pronto que nuestro planeta es un cuerpo dinámico con muchas partes o *esferas* separadas pero interactuantes. La hidrosfera, la atmósfera, la biosfera y la geosfera pueden estudiarse por separado. Sin embargo, las partes no están aisladas. Cada una se relaciona de alguna manera con las otras para producir un todo complejo y continuamente interactuante que denominamos *sistema Tierra*.

## La ciencia del sistema Tierra

Un ejemplo sencillo de las interacciones entre distintas partes del sistema Tierra tiene lugar cada invierno, cuando el agua se evapora del océano Pacífico y cae después en forma de lluvia en las colinas y montañas del sur de California, provocando deslizamientos destructivos. En el Capítulo 15 encontrará un caso de estudio en el que se explora un acontecimiento de este tipo. Los procesos que mueven el agua desde la hidrosfera hacia la atmósfera y luego hacia la geosfera tienen un profundo impacto en las plantas y los animales (incluidos los seres humanos) que habitan las regiones afectadas. En la Figura 1.14 se proporciona otro ejemplo.

Los científicos han reconocido que para comprender mejor nuestro planeta, debemos aprender cómo están interconectados sus componentes (tierra, agua, aire y formas de vida). Esta tentativa, denominada **ciencia del sistema Tierra**, tiene el objetivo de estudiar la Tierra como un *sistema* compuesto por numerosas partes interactuantes o *subsistemas*. Antes que mirar a través de la lente limitada de solo una de las ciencias tradicionales (geología, ciencias atmosféricas, química, biología, etc.) la ciencia del sistema Tierra intenta integrar el conocimiento de diversos ámbitos académicos. Mediante un enfoque interdisciplinario, quienes practican la ciencia del sistema Tierra intentan alcanzar el nivel de comprensión necesario para entender y resolver muchos de nuestros problemas ambientales globales.



**FIGURA 1.14.** En esta imagen se proporciona un ejemplo de interacciones entre diferentes partes del sistema Tierra. Vista aérea de Caraballeda, Venezuela, cubierta por material procedente de un flujo de derrubios (popularmente denominados aludes de barro). En diciembre de 1999, lluvias extraordinarias desencadenaron este flujo de derrubios y millares de otros a lo largo de esta zona costera montañosa. Caraballeda estaba situado en la boca de un empinado desfiladero. Se perdieron un total estimado de 19.000 vidas (Foto de Kimberly White/Reuters/Corbis/Bettmann).

### ¿Qué es un sistema?

Muchos de nosotros oímos y utilizamos el término *sistema* a menudo. Quizá atendamos al *sistema* de enfriamiento de nuestro coche, hagamos uso del *sistema* de transporte de la ciudad y participemos en el *sistema* político. Una noticia quizá nos informe de la aproximación de un *sistema* meteorológico. Además, sabemos que la Tierra es tan solo una parte pequeña de un gran sistema conocido como *Sistema Solar*, que, a su vez, es un subsistema de un sistema todavía mayor llamado Vía Láctea.

Una definición poco precisa de **sistema** podría ser la de un grupo, de cualquier tamaño, de partes interactuantes que forman un todo complejo. La mayoría de los sistemas naturales pueden funcionar gracias a fuentes de energía que desplazan la materia o la energía de un lugar a otro. Una analogía simple es un sistema de enfriamiento de un coche, que contiene un líquido (habitualmente agua y anticongelante) que sale del motor hacia el radiador y vuelve. El papel de este sistema es transferir el calor generado por combustión en el motor al radiador, donde el aire en movimiento lo hace salir del vehículo. De ahí el término sistema de enfriamiento.

Los sistemas como el de enfriamiento de un coche son autónomos con respecto a la materia y se denominan **sistemas cerrados**. Aunque la energía se desplaza libremente dentro y fuera de un sistema cerrado, no entra ni sale materia (líquido en el caso de nuestro sistema

de enfriamiento de un coche) del sistema. (En el supuesto de que no haya una fuga en el radiador.) Por el contrario, la mayoría de los sistemas naturales son **sistemas abiertos** y son mucho más complicados que el ejemplo anterior. En un sistema abierto, tanto la energía como la materia fluyen hacia dentro y hacia fuera del sistema. En un sistema meteorológico como un huracán, factores como la cantidad de vapor de agua disponible para la formación de nubes, la cantidad de calor liberado por el vapor de agua que se condensa y la corriente de aire que entra y sale de la tormenta pueden fluctuar mucho. En ocasiones la tormenta puede fortalecerse; en otras ocasiones puede permanecer estable o debilitarse.

### Mecanismos de realimentación

La mayoría de los sistemas naturales tiene mecanismos que tienden a intensificar el cambio, así como otros mecanismos que tienden a resistirlo y, de este modo, estabilizar el sistema. Por ejemplo, cuando tenemos demasiado calor, transpiramos para enfriarnos. Este fenómeno de enfriamiento sirve para estabilizar nuestra temperatura corporal y se denomina **mecanismo de realimentación negativa**. Los mecanismos de realimentación negativa sirven para mantener el sistema tal como es o, en otras palabras, para mantener el *status quo*. Por el contrario, los mecanismos que intensifican o impulsan el cambio se denominan **mecanismos de realimentación positiva**.

La mayoría de los sistemas terrestres, en especial el sistema climático, contienen una amplia variedad de mecanismos de realimentación negativa y positiva. Por ejemplo, pruebas científicas sustanciales indican que la Tierra ha entrado en un periodo de calentamiento global. Una consecuencia del calentamiento global es que algunos de los glaciares y los casquetes polares han empezado a fundirse. Las superficies cubiertas por nieve o hielo, muy reflectantes, están siendo sustituidas de una manera gradual por suelos marrones, árboles verdes u océanos azules, todos ellos más oscuros, de modo que absorben más luz solar. El resultado es una realimentación positiva que contribuye al calentamiento.

Por otro lado, un aumento de la temperatura global también provoca un incremento de la evaporación del agua de la superficie continental y oceánica de la Tierra. Un resultado de la existencia de más vapor de agua en el aire es el aumento del espesor de las nubes. Como la parte superior de las nubes es blanca y reflectante, una mayor cantidad de luz solar se refleja de nuevo hacia el espacio, con lo cual se reduce la cantidad de luz solar que llega a la superficie terrestre y las temperaturas globales disminuyen. Además, las temperaturas más cálidas tienden a fomentar el crecimiento de la vegetación. Las plantas, a su vez, toman el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire. Como el dióxido de carbono es uno de los *gases invernadero* de la atmósfera, su eliminación tiene un impacto negativo en el calentamiento global<sup>5</sup>.

Además de los procesos naturales, debemos considerar también el factor humano. La tala y el desbroce extensivos de las selvas y la quema de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) provocan un aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico. Esta actividad está contribuyendo al aumento de la temperatura global que nuestro planeta está experimentando. Una de las tareas abrumadoras de los científicos del sistema Tierra es predecir cómo será el clima en el futuro teniendo en cuenta muchas variables: los cambios tecnológicos, las tendencias de la población y el impacto general de numerosos mecanismos de realimentación positiva y negativa opuestos.

## El sistema Tierra

El sistema Tierra tiene una serie casi infinita de subsistemas en los que la materia se recicla una y otra vez. Un ejemplo, que se abordará en el Capítulo 7, traza el movimiento del carbono entre las cuatro esferas de la Tierra. Nos demuestra, por ejemplo, que el dióxido de carbono en el aire y el carbono de los seres vivos y en ciertas rocas forma parte de un subsistema descrito mediante el *ciclo del carbono*.

<sup>5</sup> Los gases invernadero absorben la energía calorífica emitida por la Tierra y de este modo ayudan a mantener la atmósfera cálida.

## Los ciclos en el sistema Tierra

Un bucle o subsistema más familiar es el ciclo *hidrológico*. Representa la circulación sin fin del agua terrestre entre la hidrosfera, la atmósfera, la biosfera y la geosfera. El agua entra en la atmósfera por evaporación desde la superficie de la Tierra y por transpiración desde las plantas. El vapor de agua se condensa en la atmósfera y forma nubes, que a su vez producen precipitación que cae de nuevo sobre la superficie terrestre. Una parte de la lluvia que cae sobre la superficie penetra y es absorbida por las plantas o se convierte en agua subterránea, mientras otra parte fluye por la superficie hacia el océano.

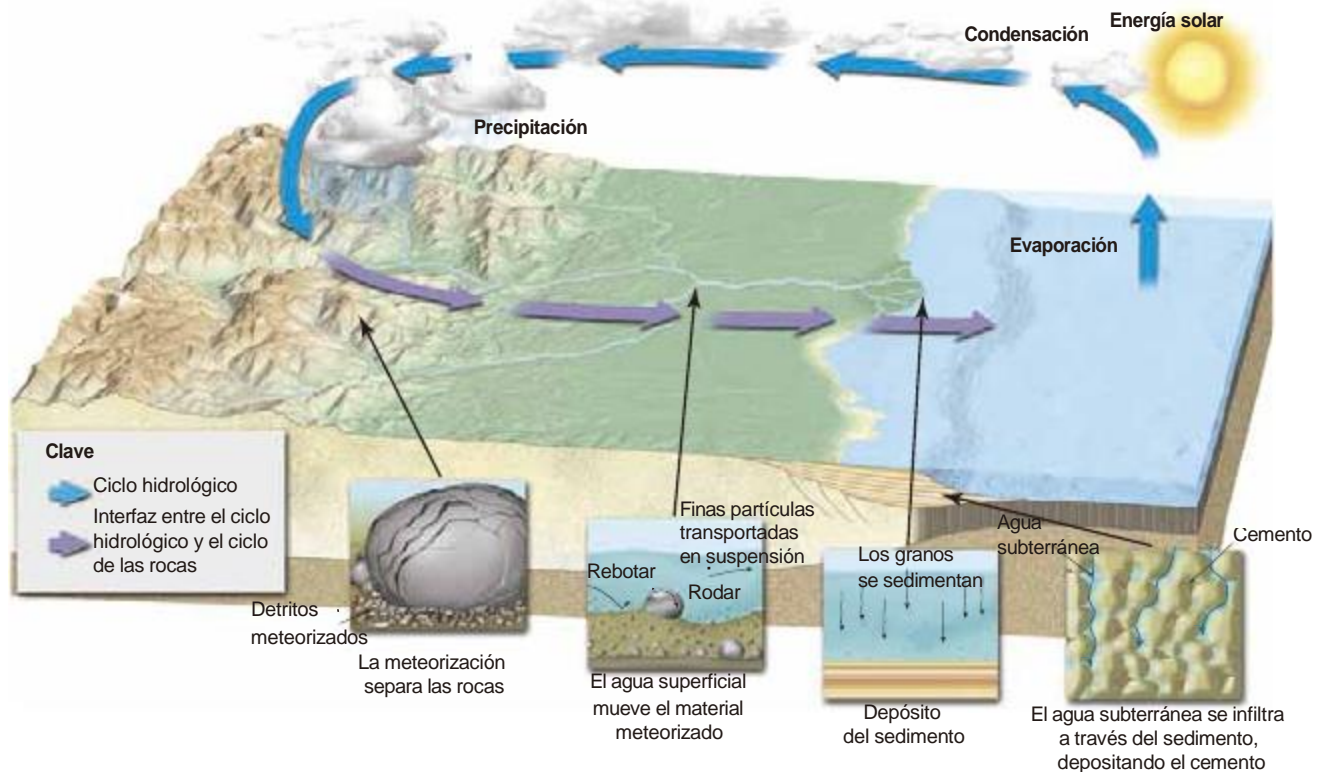
Consideradas a lo largo de lapsos prolongados de tiempo, las rocas de la geosfera están formándose, cambiando y reformándose constantemente. El bucle que implica los procesos por los cuales una roca cambia a otra se denomina el *ciclo de las rocas* y se comentará algo más adelante en este capítulo. Los ciclos del sistema Tierra, como el ciclo hidrológico y de las rocas, no son independientes entre sí. Por el contrario, hay muchos lugares donde interactúan. Una **interfaz** es un límite común donde las diferentes partes de un sistema entran en contacto e interactúan. Por ejemplo, en la Figura 1.15, la meteorización en la superficie desintegra y descompone de manera gradual la roca sólida. El trabajo de la gravedad y las aguas superficiales pueden acabar moviendo este material a otro lugar y depositarlo. Más adelante, el agua subterránea que se infiltra a través de los residuos pueden dejar detrás materia mineral que cementa los granos transformándolos en roca sólida (una roca que suele ser muy diferente de la roca con la que empezamos). Este cambio de una roca en otra no podría haberse producido sin el movimiento de agua a través del ciclo hidrológico. Hay muchos lugares en los que un ciclo o bucle en el sistema Tierra interactúa con, y es una parte básica de otro.

## La energía para el sistema Tierra

El sistema Tierra es impulsado por la energía procedente de dos fuentes. El Sol impulsa los procesos externos que tienen lugar en la atmósfera, la hidrosfera y la superficie de la Tierra. El tiempo y el clima, la circulación oceánica y los procesos erosivos son accionados por la energía del Sol. El interior de la Tierra es la segunda fuente de energía. El calor que queda de cuando se formó nuestro planeta y el calor que está siendo continuamente generado por la desintegración de los elementos radiactivos impulsan los procesos internos que producen los volcanes, los terremotos y las montañas.

## Las partes están relacionadas

Las partes del sistema Tierra están relacionadas, de manera que un cambio en una de ellas puede producir cambios



**FIGURA 1.15.** En este diagrama se muestra la interfaz (límite común) entre dos ciclos importantes del sistema Tierra, el ciclo hidrológico y el ciclo rocoso.

en otra o en todas las demás. Por ejemplo, cuando un volcán hace erupción, la lava del interior de nuestro planeta puede fluir en la superficie y bloquear un valle próximo. Esta nueva obstrucción influye en el sistema de drenaje de la región creando un lago o haciendo que las corrientes de agua cambien su curso. Las grandes cantidades de cenizas y gases volcánicos que pueden emitirse durante una erupción pueden ascender a las capas altas de la atmósfera e influir en la cantidad de energía solar que llegue a la superficie. El resultado sería una disminución de la temperatura del aire en todo el hemisferio.

Allí donde la superficie está cubierta por coladas de lava o por un grueso estrato de ceniza volcánica, los suelos existentes son enterrados. Esto hace que los procesos de formación del suelo empiecen de nuevo a transformar el nuevo material superficial en suelo (Figura 1.16). El suelo que finalmente se forma reflejará la interacción entre muchas partes del sistema Tierra, el material volcánico original, el clima y el impacto de la actividad biológica. Por supuesto, habría también cambios significativos en la biosfera. Algunos organismos y su hábitat serían eliminados por la lava y las cenizas, mientras que se crearían nuevos ámbitos de vida, como los lagos. El posible cambio climático afectaría también a algunas formas de vida.

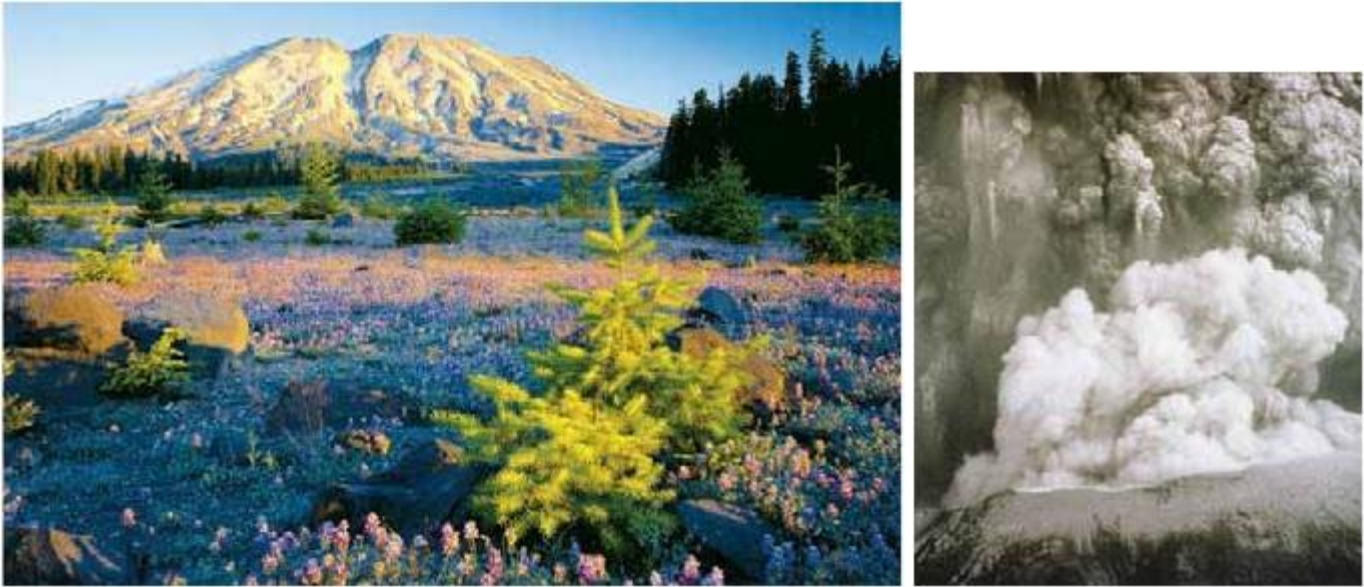
El sistema Tierra se caracteriza por procesos que varían en escalas espaciales desde fracciones de milímetros hasta miles de kilómetros. Las escalas temporales

para los procesos de la Tierra oscilan entre milisegundos y miles de millones de años. A medida que vamos aprendiendo sobre la Tierra, resulta cada vez más claro que, pese a las significativas separaciones en distancia o tiempo, muchos procesos están conectados, y un cambio en un componente puede influir en el sistema entero.

Los seres humanos son *parte* del sistema Tierra, un sistema en el cual los componentes vivos e inertes están entrelazados e interconectados. Por consiguiente, nuestras acciones producen cambios en todas las otras partes. Cuando quemamos gasolina y carbón, eliminamos nuestros residuos y limpiamos los terrenos, hacemos que otras partes del sistema respondan, a menudo de manera imprevista. A lo largo de todo este libro conoceremos muchos de los subsistemas de la Tierra: el sistema hidrológico, el sistema tectónico (formación de montañas) y el ciclo de las rocas, por citar unos pocos. Recordemos que estos componentes y *nosotros, los seres humanos*, formamos todos parte del todo interactuante complejo que denominamos sistema Tierra.

## EVOLUCIÓN DE LA TIERRA PRIMITIVA

Los terremotos recientes causados por los desplazamientos de la corteza terrestre, junto con las lavas procedentes de la erupción de volcanes activos, representan solo el último de una larga serie de acontecimientos



**FIGURA 1.16** Cuando el monte St. Helens entró en erupción en mayo de 1980, la zona de la imagen quedó enterrada por una colada de barro volcánico. En la actualidad se ha restablecido la vegetación y se está formando suelo nuevo (Jack W Dykinga/foto de CORBIS).

por medio de los cuales nuestro planeta ha alcanzado su forma y su estructura actuales. Los procesos geológicos que se producen en el interior de la Tierra pueden comprenderse mejor cuando se observan en el contexto de acontecimientos muy anteriores en la historia de la Tierra.

## El origen del planeta Tierra

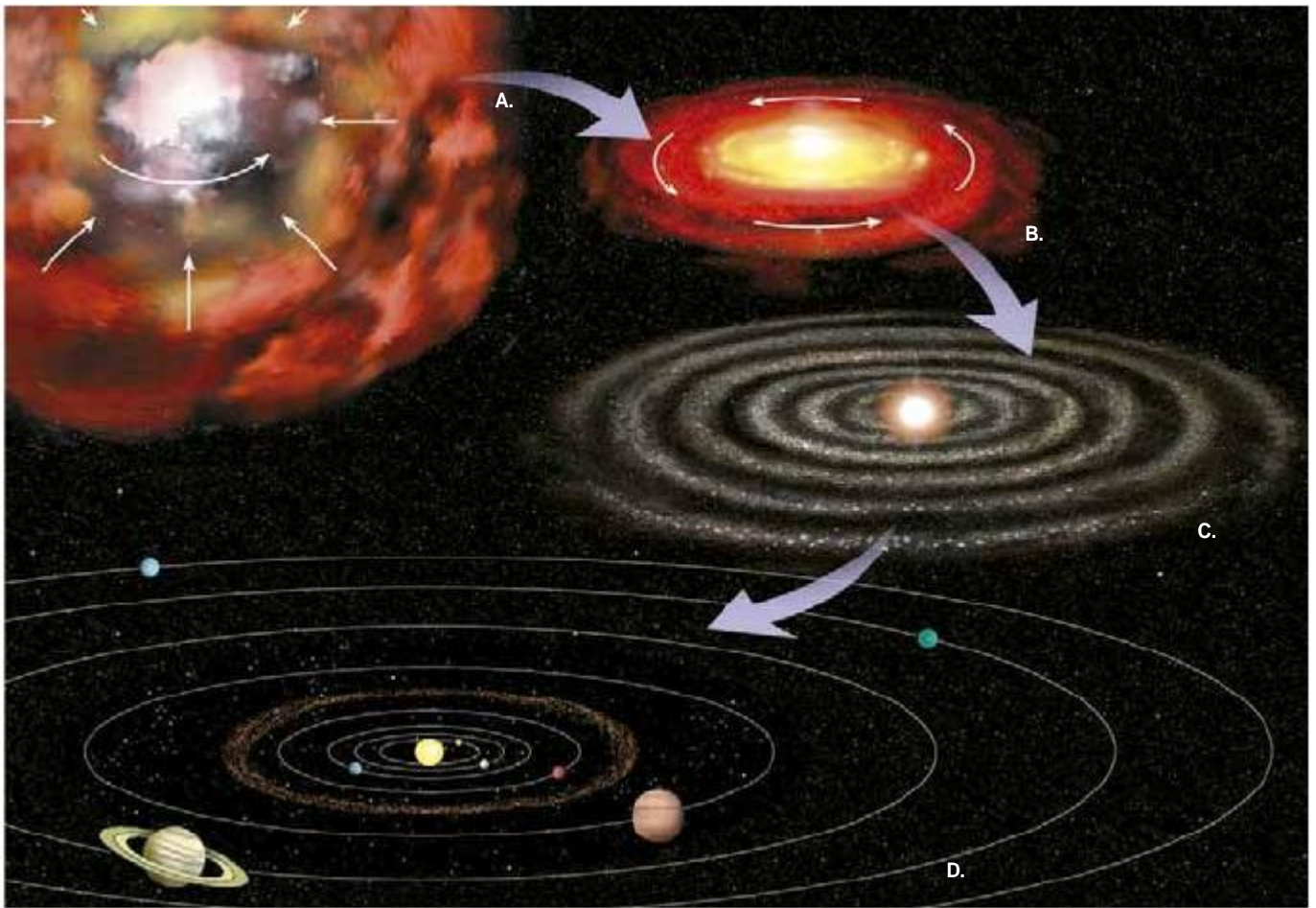
En esta sección se describen las opiniones más ampliamente aceptadas sobre el origen de nuestro Sistema Solar. La teoría descrita aquí representa el conjunto de ideas más coherente que tenemos para explicar lo que sabemos sobre el Sistema Solar en la actualidad. Nuestro escenario empieza hace unos 14.000 millones de años con el *Big Bang*, una explosión incomprensiblemente grande que lanzó hacia el exterior toda la materia del universo a velocidades increíbles. En ese momento, los restos de la explosión, que consistían casi por completo en hidrógeno y helio, empezaron a enfriarse y condensarse en las primeras estrellas y galaxias. En una de estas galaxias, la Vía Láctea, fue donde nuestro Sistema Solar y el planeta Tierra tomaron forma.

La Tierra es uno de los nueve planetas que, junto varias docenas de lunas y numerosos cuerpos más pequeños, gira alrededor del Sol. La naturaleza ordenada de nuestro Sistema Solar lleva a la mayoría de los investigadores a concluir que la Tierra y los otros planetas se formaron esencialmente al mismo tiempo, y de la misma materia primordial, que el Sol. La **teoría de la nebulosa primitiva** propone que los cuerpos de nuestro Sistema Solar se formaron a partir de una enorme nube en rotación denominada **nebulosa solar** (Figura 1.17).

Además de los átomos de hidrógeno y helio generados durante el *Big Bang*, granos de polvo microscópicos y la materia expulsada de estrellas muertas desde hacía tiempo formaban la nebulosa solar. (La fusión nuclear en las estrellas convierte el hidrógeno y el helio en los otros elementos que se hallan en el universo.)

Hace cerca de 5.000 millones de años, esta inmensa nube de gases y granos diminutos de elementos más pesados empezó a contraerse lentamente debido a las interacciones gravitacionales entre sus partículas (Figura 1.18). Una influencia externa, como una onda de choque procedente de una explosión catastrófica (*supernova*), pudo haber provocado el colapso. Al contraerse, esta nube que giraba lentamente en espiral rotaba cada vez más deprisa por el mismo motivo por el que lo hace un patinador sobre hielo cuando repliega los brazos sobre sí mismo. Al final, la atracción gravitacional se equilibró con la fuerza centrífuga causada por el movimiento rotacional de la nebulosa (Figura 1.17). Pero esta vez, la nube, antes extensa, había adoptado la forma de un disco plano con una gran concentración de material en el centro denominada *protosol* (Sol en formación). (Los astrónomos están bastante seguros de que la nebulosa formó un disco porque se han detectado estructuras similares alrededor de otras estrellas.)

Durante el colapso, la energía gravitacional se convirtió en energía térmica (calor), lo cual hizo que la temperatura del interior de la nebulosa aumentara espectacularmente. A estas temperaturas elevadas, los granos de polvo se descomposieron en moléculas y en partículas atómicas extremadamente energéticas. Sin embargo, a distancias posteriores a la órbita de Marte, las temperaturas probablemente se mantuvieron bastante bajas.



**FIGURA 1.17.** Formación del Sistema Solar de acuerdo con la hipótesis de la nebulosa primitiva. **A.** El nacimiento de nuestro Sistema Solar empezó cuando una nube de polvo y gases (nebulosa) empezó a colapsarse gravitacionalmente. **B.** La nebulosa se contrajo en un disco en rotación que se calentaba gracias a la conversión de la energía gravitacional en energía térmica. **C.** El enfriamiento de la nebulosa provocó la condensación de material rocoso y metálico en pequeñas partículas sólidas. **D.** Colisiones repetidas hicieron que las partículas del tamaño del polvo se unieran de una manera gradual hasta formar cuerpos del tamaño de un asteroide. En un periodo de unos pocos millones de años estos cuerpos formaron los planetas.

A  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es posible que las pequeñas partículas de la parte exterior de la nebulosa estuvieran cubiertas por una capa gruesa de hielo constituido por agua, dióxido de carbono, amoníaco y metano congelados. (Algo de este material todavía reside en los confines del Sistema Solar, en la región llamada la *nube de Oort*.) La nube con forma de disco también contenía cantidades considerables de gases más ligeros: hidrógeno y helio.

La formación del Sol marcó el fin del periodo de contracción y, por tanto, el fin del calentamiento gravitacional. Las temperaturas de la región en la que ahora se encuentran los planetas interiores empezaron a disminuir. Esta disminución de la temperatura hizo que las sustancias con puntos de fusión elevados se condensaran en pequeñas partículas que empezaron a unirse (acreción). Materiales como el hierro y el níquel y los elementos que componen los minerales que forman las rocas (silicio, calcio, sodio, etc.) formaron masas metálicas

y rocosas que orbitaban alrededor del Sol (Figura 1.17). Colisiones repetidas provocaron la unión de estas masas en cuerpos más grandes, del tamaño de un asteroide, denominadas *planetesimales*, que en unas pocas decenas de millones de años crecieron hasta convertirse en los cuatro planetas interiores que llamamos Mercurio, Venus, Tierra y Marte. No todas estas masas de materia se incorporaron en los protoplanetas. Las piezas rocosas y metálicas que permanecieron en órbita se denominan *meteoritos* cuando sobreviven a un impacto con la Tierra.

A medida que los protoplanetas atraían cada vez más material, el impacto de gran velocidad de los restos de la nebulosa provocó el aumento de temperatura de estos cuerpos. A causa de sus temperaturas relativamente elevadas y sus campos gravitacionales débiles, los planetas interiores no podían acumular muchos de los componentes más ligeros de la nebulosa. Los más ligeros de estos componentes, el hidrógeno y



**FIGURA 1.18.** Nebulosa de la Laguna. Es en nubes resplandecientes como esta donde los gases y las partículas de polvo se concentran para formar estrellas (Cortesía de los *National Optical Astronomy Observatories*).

el helio, fueron finalmente barridos de la parte interna del Sistema Solar por los vientos solares.

Al mismo tiempo que se formaban los planetas interiores también se estaban desarrollando los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), más grandes, junto con sus extensos sistemas de satélites. A causa de las bajas temperaturas debido a la larga distancia del Sol, el material con el que estos planetas se formaron contenía un alto porcentaje de hielos (agua, dióxido de carbono, amoníaco y metano) y detritos rocosos y metálicos. La acumulación de hielos explica en parte las grandes dimensiones y la baja densidad de los planetas exteriores. Los dos planetas con mayor masa, Júpiter y Saturno, tenían una gravedad superficial suficiente como para atraer y sostener grandes cantidades incluso de los elementos más ligeros, el hidrógeno y el helio.

## Formación de la estructura en capas de la Tierra

A medida que se acumulaba el material para formar la Tierra (y poco después), el impacto a gran velocidad de los restos de la nebulosa y la desintegración de los elementos radiactivos provocó un aumento constante de la temperatura de nuestro planeta. Durante este periodo de calentamiento intenso, la Tierra alcanzó la temperatura suficiente para que el hierro y el níquel empezaran a fundirse. La fusión produjo gotas de metal pesado que penetraron hacia el centro del planeta. Este proceso sucedió rápidamente en la escala de tiempo geológico y formó el núcleo denso rico en hierro de la Tierra.

El primer periodo de calentamiento provocó otro proceso de diferenciación química, por medio del cual la fusión formó masas flotantes de roca fundida que

ascendieron hacia la superficie, donde se solidificaron y formaron la corteza primitiva. Estos materiales rocosos estaban enriquecidos en oxígeno y elementos «litófilos», en especial silicio y aluminio, con cantidades menores de calcio, sodio, potasio, hierro y magnesio. Además, algunos metales pesados como el oro, el plomo y el uranio, que tienen puntos de fusión bajos o eran muy solubles en las masas fundidas ascendentes, fueron retirados del interior de la Tierra y se concentraron en la corteza en desarrollo. Este primer periodo de segregación química estableció las tres divisiones básicas del interior de la Tierra: el *núcleo* rico en hierro; la *corteza primitiva*, muy delgada; y la capa más gruesa de la Tierra, denominada *manto*, que se encuentra entre el núcleo y la corteza.

Una consecuencia importante de este periodo de diferenciación química es que permitió que grandes cantidades de compuestos gaseosos se escaparan del interior de la Tierra, como ocurre en la actualidad durante las erupciones volcánicas. Gracias a este proceso fue evolucionando de manera gradual la atmósfera primitiva. Fue en este planeta, con esa atmósfera, donde apareció la vida como la conocemos.

Después de los acontecimientos que establecieron la estructura básica de la Tierra, la corteza primitiva se perdió a causa de la erosión y otros procesos geológicos, de manera que no disponemos de ningún registro directo de su composición. Cuándo y cómo exactamente apareció la corteza continental (y con ella las primeras masas continentales terrestres) es una cuestión que todavía es objeto de investigación. Sin embargo, existe un acuerdo general en que la corteza continental se formó de una manera gradual durante los últimos 4.000 millones de años. (Las rocas más antiguas descubiertas hasta hoy son fragmentos aislados, encontrados en el noroeste de Canadá, que tienen unas edades radiométricas de unos 4.000 millones de años.) Además, como se verá en el Capítulo 2, la Tierra es un planeta en evolución cuyos continentes y cuencas oceánicas han cambiado constantemente de forma e incluso de situación durante una gran parte de este periodo.

## ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA

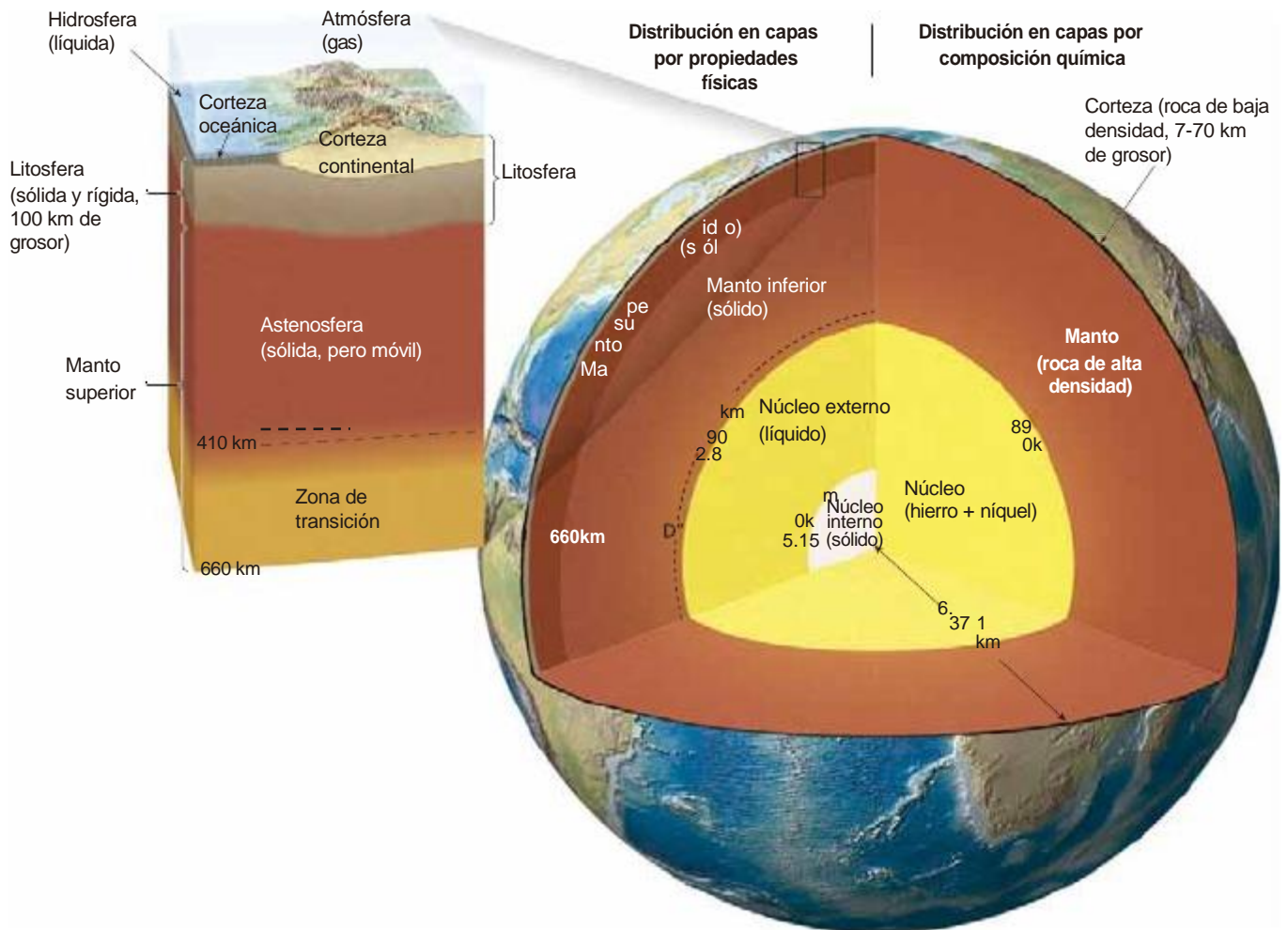


AN INTRODUCTION TO GEOLOGY

Earth's Layered Structure

En la sección anterior, ha aprendido que la segregación de material que empezó muy temprano en la historia de la Tierra tuvo como resultado la formación de tres capas principales definidas por su composición química: la corteza, el manto y el núcleo. Además de estas tres capas distintas por su composición, la Tierra puede dividirse en capas en función de sus propiedades físicas, la litosfera y la astenosfera. Las propiedades físicas





**FIGURA 1.19.** Perspectivas de la estructura en capas de la Tierra. El lado derecho de la gran sección transversal muestra que el interior de la Tierra se divide en tres capas distintas según sus diferencias composicionales: la corteza, el manto y el núcleo. El lado izquierdo de la gran sección transversal ilustra las capas del interior de la Tierra según sus propiedades físicas, la litosfera, la astenosfera, la zona de transición, el manto inferior, la «capa D''», el núcleo externo y el núcleo interno. Los diagramas de bloque situados a la izquierda de la gran sección transversal muestran una perspectiva aumentada de la porción superior del interior de la Tierra.

utilizadas para definir estas zonas son su carácter sólido o líquido y cuán dúctil o resistentes son. El conocimiento de ambos tipos de estructuras en capas es esencial para nuestra comprensión de los procesos geológicos básicos, como el vulcanismo, los terremotos y la formación de montañas (Figura 1.19).

## La corteza de la Tierra

La **corteza**, capa rocosa externa, comparativamente fina de la Tierra, es de dos tipos diferentes, corteza oceánica y corteza continental. Ambas comparten la palabra «corteza», pero la semejanza acaba ahí. La corteza oceánica tiene alrededor de 7 km de grosor y está compuesta por *basaltos*, rocas ígneas oscuras. Por el contrario, la corteza continental tiene un grosor medio de entre 35 y 40 km, pero puede superar los 70 km en algunas regiones montañosas, como las Montañas Rocosas y el Himalaya. A

diferencia de la corteza oceánica, que tiene una composición química relativamente homogénea, la corteza continental consta de muchos tipos de rocas. El nivel superior de la corteza continental tiene una composición media de una *roca granítica* denominada *granodiorita*, pero varía considerablemente de un lugar a otro.

Las rocas continentales tienen una densidad media de unos 2,7 g/cm<sup>3</sup> y se han descubierto algunas cuya edad supera los 4.000 millones de años. Las rocas de la corteza oceánica son más jóvenes (180 millones de años o menos) y más densas (aproximadamente 3,0 g/cm<sup>3</sup>) que las rocas continentales.

## El manto de la Tierra

Más del 82 por ciento del volumen de la Tierra está contenido en el **manto**, una envoltura rocosa sólida que se extiende hasta una profundidad de unos 2.900 km. El límite

entre la corteza y el manto representa un notable cambio de composición química. El tipo de roca dominante en la parte superior del manto es la peridotita, que es más rica en los metales magnesio y hierro que los minerales encontrados en la corteza, continental u oceánica.

### El manto superior

El manto superior se extiende desde el límite corteza-manto hacia abajo hasta una profundidad de unos 660 km. El manto superior puede dividirse en tres partes diferentes. La porción superior del manto superior es parte de la litosfera rígida; debajo de ella está la astenosfera, más débil. La parte inferior del manto superior se denomina zona de transición.

La **litosfera** (esfera de roca) comprende la corteza entera y el manto superior y forma la capa relativamente fría y rígida de la Tierra (Figura 1.19). Con un grosor medio de unos 100 km, la litosfera alcanza más de 250 km de grosor debajo de las porciones más antiguas de los continentes. Debajo de esta capa rígida, hasta una profundidad de unos 410 km, se encuentra una capa blanda, comparativamente plástica, que se conoce como **astenosfera** («esfera débil»). La porción superior de la astenosfera tiene unas condiciones de temperatura y presión que provocan una pequeña cantidad de fusión. Dentro de esta zona muy dúctil, la litosfera está mecánicamente separada de la capa inferior. La consecuencia es que la litosfera es capaz de moverse con independencia de la astenosfera, un hecho que se considerará en el siguiente capítulo.

Es importante destacar que la resistencia a la deformación de los diversos materiales de la Tierra es función, a la vez, de su composición y de la temperatura y la presión a que estén sometidos. No debería sacarse la idea de que toda la litosfera se comporta como un sólido quebradizo similar a las rocas encontradas en la superficie. Antes bien, las rocas de la litosfera se vuelven progresivamente más calientes y dúctiles (se deforman con más facilidad) conforme aumenta la profundidad. A la profundidad de la astenosfera superior, las rocas están lo suficientemente cerca de sus temperaturas de fusión (de hecho, puede producirse algo de fusión) que son fáciles de deformar. Por tanto, la astenosfera superior es blanda porque se aproxima a su punto de fusión, exactamente igual a como la cera caliente es más blanda que la cera fría.

La parte del manto que va desde una profundidad de unos 410 km hasta unos 610 km se denomina **zona de transición**. La parte superior de la zona de transición se identifica por un aumento súbito de densidad desde 3,5 hasta 3,7 g/cm<sup>3</sup>. Este cambio se produce porque los minerales de la roca peridotita responden al aumento de la presión formando minerales nuevos con estructuras atómicas estrechamente empaquetadas.

### El manto inferior

Desde una profundidad de 660 km hasta la parte superior del núcleo, a una profundidad de 2.900 km, se encuentra el manto inferior. Debido a un aumento de la presión (causada por el peso de la roca superior) el manto se consolida gradualmente con la profundidad. Pese a su fuerza, sin embargo, las rocas del interior del manto inferior son muy calientes y capaces de un flujo muy gradual. En los pocos centenares de kilómetros inferiores del manto se encuentra una capa muy variable e inusual denominada «**capa D''**» (pronunciada «de doble prima»). La naturaleza de esta capa limítrofe entre el manto rocoso y el núcleo exterior de hierro líquido se examinará en el Capítulo 12.

## El núcleo de la Tierra

Se cree que la composición del **núcleo** es una aleación de hierro y níquel con cantidades menores de oxígeno, silicio y azufre, elementos que forman fácilmente compuestos con hierro. A la presión extrema del núcleo, este material rico en hierro tiene una densidad media de cerca de 11 g/cm<sup>3</sup> y se aproxima a 14 veces la densidad del agua en el centro de la Tierra.

El núcleo, compuesto principalmente por una aleación de hierro y níquel, se divide en dos regiones que muestran resistencias mecánicas muy distintas. El **núcleo externo** es una *capa líquida* de 2.270 km de grosor. Es el movimiento del hierro metálico en esta zona lo que genera el campo magnético de la Tierra. El **núcleo interno** es una esfera con un radio de 1.216 km. A pesar de su temperatura más elevada, el hierro del núcleo interno es sólido debido a las inmensas presiones que existen en el centro del planeta.

## ¿CÓMO SABEMOS LO QUE SABEMOS?

Llegados a este punto quizá se pregunte: «¿Cómo conocimos la composición y la estructura del interior de la Tierra?» Puede suponer que se han extraído muestras del interior de la Tierra directamente. Sin embargo, la mina más profunda del mundo (la mina Western Deep Levels, en Sudáfrica) tiene una profundidad de tan solo 4 km, y la perforación más profunda del mundo (terminada en la península de Kola, en Rusia, en 1992) solo penetra aproximadamente 12 km. En esencia, los seres humanos nunca han perforado un agujero en el manto (y nunca lo harán en el núcleo) con el fin de sacar muestras directas de estos materiales.

A pesar de estas limitaciones, se han desarrollado teorías que describen la naturaleza del interior de la Tierra y que coinciden con la mayoría de los datos procedentes de las observaciones. Así, nuestro modelo

del interior de la Tierra representa las mejores deducciones que podemos hacer según los datos disponibles. Por ejemplo, la estructura en capas de la Tierra se ha establecido mediante observaciones indirectas. Cada vez que se produce un terremoto, unas ondas de energía (denominadas *ondas sísmicas*) penetran en el interior de la Tierra, de una manera parecida a como los rayos X penetran en el cuerpo humano. Las ondas sísmicas cambian de velocidad y se desvían y reflejan al atravesar zonas con propiedades distintas. Un amplio conjunto de estaciones de control en todo el mundo detecta y registra esta energía. Con la ayuda de ordenadores, se analizan estos datos, que luego se utilizan para determinar la estructura del interior de la Tierra. En el Capítulo 12, «El interior de la Tierra», encontrará más información de cómo se lleva esto a cabo.

¿Qué pruebas tenemos que respalden la supuesta composición del interior de nuestro planeta? Puede resultar sorprendente conocer que rocas que se originaron en el manto se han recogido en la superficie de la Tierra, entre ellas, muestras que contienen diamantes, que, según los estudios de laboratorio, pueden formarse solo en ambientes con una presión elevada. Dado que estas rocas deben de haberse cristalizado a profundidades superiores a los 200 km, se deduce que son muestras del manto que sufrieron muy pocas alteraciones durante su ascenso a la superficie. Además, hemos podido examinar láminas del manto superior y de la corteza oceánica que lo recubre que han sido empujadas por encima del nivel del mar en lugares como Chipre, Terranova y Omán.

Establecer la composición del núcleo es otra cuestión completamente diferente. Debido a su gran profundidad y su densidad elevada, ninguna muestra del núcleo ha llegado a la superficie. Sin embargo, disponemos de pruebas significativas que sugieren que esta capa consta principalmente de hierro.

Sorprendentemente los meteoritos proporcionan importantes pistas sobre la composición del núcleo y el manto. (Los meteoritos son objetos extraterrestres sólidos que chocan contra la superficie de la Tierra.) La mayoría de los meteoritos son fragmentos derivados de colisiones de cuerpos más grandes, principalmente del cinturón de asteroides situado entre las órbitas de Marte y Júpiter. Son importantes porque representan muestras del material (*planetesimales*) del que se formaron los planetas interiores, incluida la Tierra (Figura 1.20). Los meteoritos están compuestos principalmente por una aleación de hierro y níquel (*metálicos*), minerales silicatados (*rocosos*) o una combinación de ambos materiales (*mixtos*). La composición media de los meteoritos rocosos es muy parecida a la que se supone que tiene el manto. Por otro lado, los meteoritos metálicos contienen un porcentaje mucho más elevado de este material metálico del que se encuentra en la corteza terrestre o en el manto. Si, de



**FIGURA 1.20.** Meteorito de hierro encontrado en Namibia, un país del sudoeste africano. Los meteoritos son importantes porque representan muestras del material a partir del cual se formaron los planetas interiores (Foto de Neil Setchfield/Alamy).

hecho, la Tierra se formó a partir del mismo material en la nebulosa solar que generó los meteoritos y los demás planetas terrestres, debe contener un porcentaje mucho más elevado de hierro del que se encuentra en las rocas de la corteza. Por consiguiente, podemos concluir que el núcleo es enormemente rico en este metal pesado.

Este punto de vista también está respaldado por los estudios de la composición del Sol, que indican que el hierro es la sustancia más abundante hallada en el Sistema Solar que posee la densidad calculada para el núcleo. Además, el campo magnético de la Tierra requiere que el núcleo esté hecho de un material conductor de la electricidad, como el hierro. Puesto que todas las pruebas disponibles apuntan a que una gran parte del núcleo está compuesta de hierro, tomamos esto como un hecho, al menos hasta que nuevas pruebas nos indiquen lo contrario.

## LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Las dos principales divisiones de la superficie de la Tierra son los continentes y las cuencas oceánicas (Figura 1.21). Una diferencia significativa entre estas

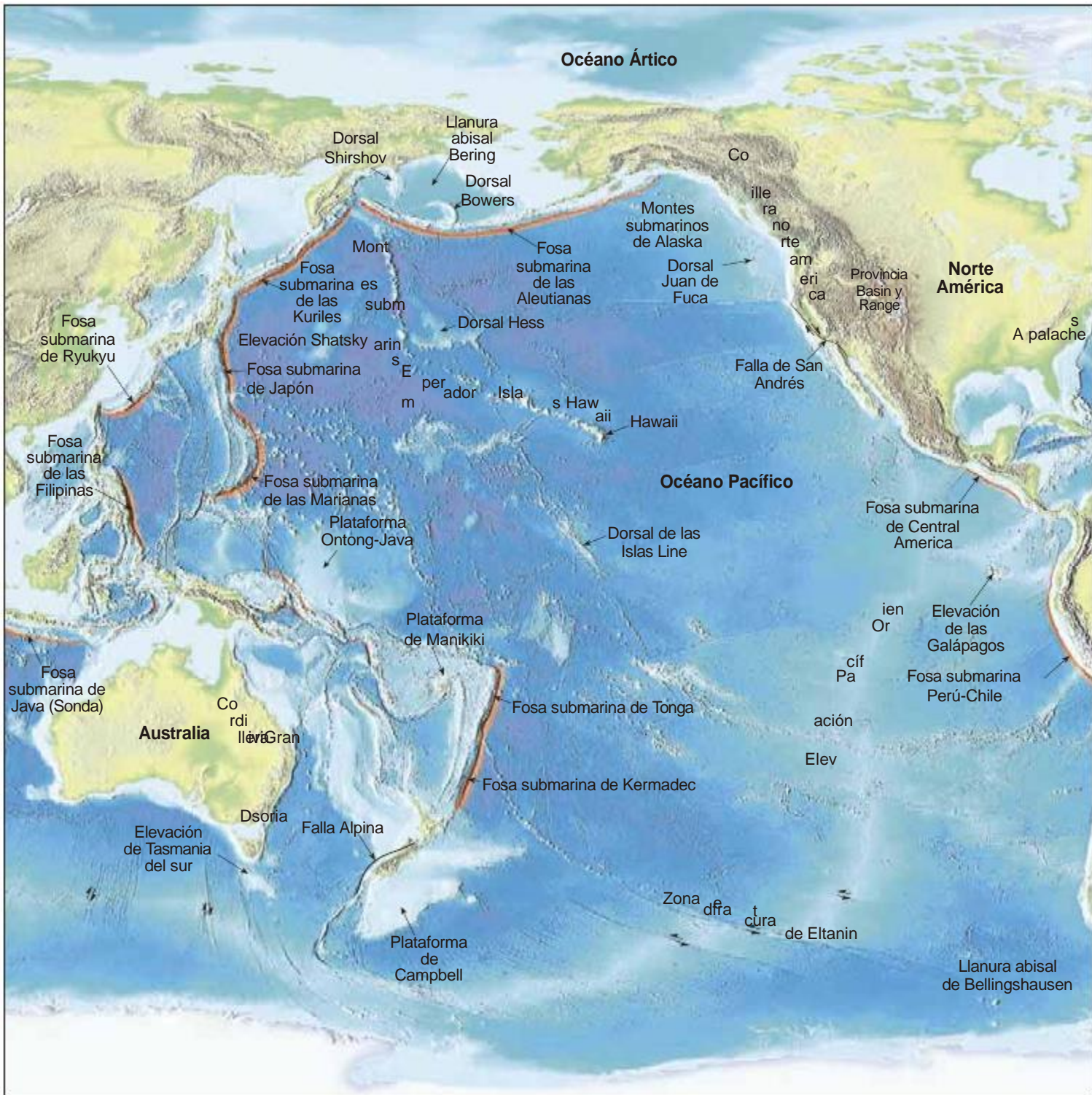
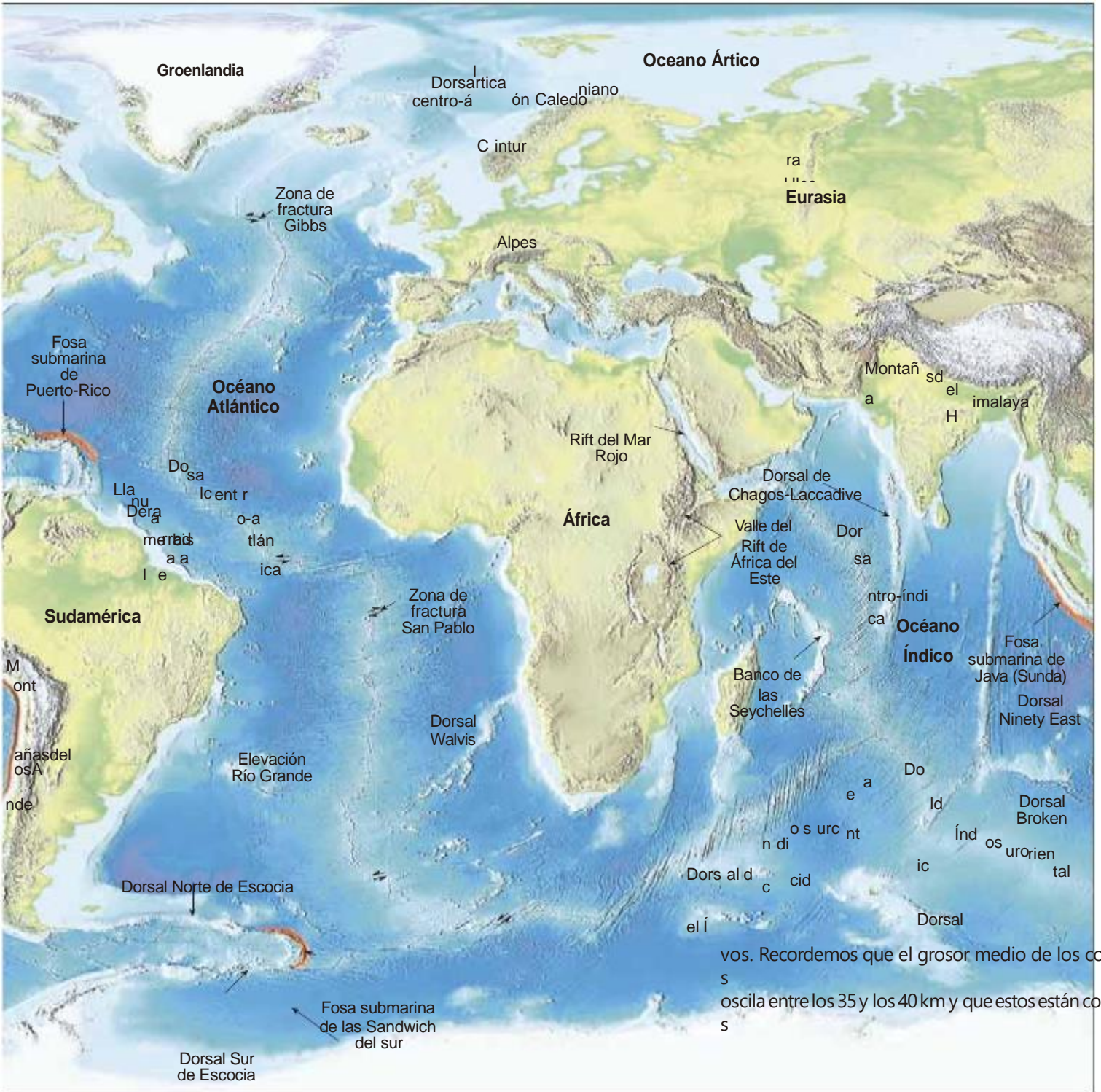


FIGURA 1.21. En estas dos páginas se muestra la topografía de la superficie sólida de la Tierra.

dos áreas son sus niveles relativos. Los continentes son superficies notablemente planas con el aspecto de llanuras que sobresalen por encima del nivel del mar. Con una elevación media de alrededor de 0,8 km, los bloques continentales se encuentran cerca del nivel del

mar, con excepción de unas áreas algo limitadas de terreno montañoso. Por el contrario, la profundidad media del fondo oceánico es de unos 3,8 km por debajo del nivel del mar o unos 4,5 km inferior a la elevación media de los continentes.



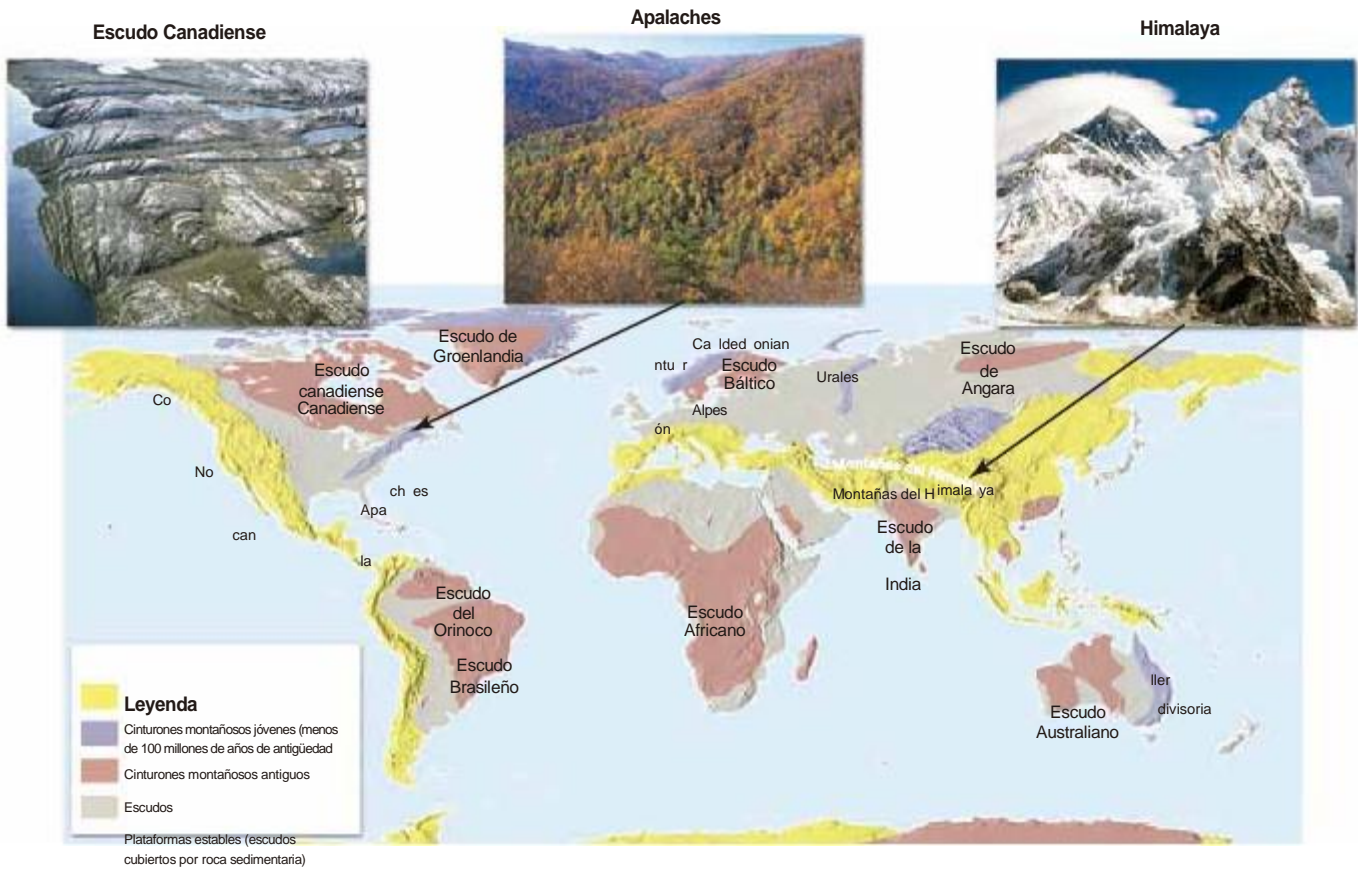
vos. Recordemos que el grosor medio de los continentes oscila entre los 35 y los 40 km y que estos están compuestos

La diferencia de elevación entre los continentes y las cuencas oceánicas es consecuencia principalmente de las diferencias entre sus densidades y sus grosores respecti-

Kerguelen

## **Antártida**

de rocas graníticas con una densidad de alrededor de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Las rocas basálticas que conforman la corteza oceánica tienen un grosor medio de tan solo 7 km y una densidad media de aproximadamente  $3,0 \text{ g/cm}^3$ . Por tanto, la corteza continental, más gruesa y menos densa, es



**FIGURA 1.22.** Este mapa muestra la distribución general de los cinturones montañosos, las plataformas estables y los escudos de la Tierra. [Foto de Robert Hildebrand Photography (izquierda); CORBIS (medio); Image Source Pink/ Alamy (Derecho)].

más flotante que la corteza oceánica. Como consecuencia, la corteza continental flota sobre la parte superior de las rocas deformables del manto a un nivel más elevado que la corteza oceánica por el mismo motivo por el que un barco de carga grande y vacío (menos denso) navega a mayor altura que un barco pequeño y cargado (más denso).

tinentes son los cinturones montañosos lineales. La

## Principales características de los continentes

Las principales características de los continentes pueden agruparse en dos categorías diferenciadas: áreas extensas, planas y estables que se han erosionado hasta casi el nivel del mar, y regiones elevadas de rocas deformadas que en la actualidad forman los cinturones montañosos. Véase en la Figura 1.22 que los cinturones montañosos jóvenes tienden a ser rasgos topográficos largos y estrechos situados en los márgenes continentales, mientras que las áreas llanas y estables se sitúan por regla general en el interior de los continentes.

### Cinturones montañosos

Los rasgos topográficos más prominentes de los con-

distribución de las montañas parece ser aleatoria, pero no lo es. Al considerar las montañas más jóvenes (de menos de 100 millones de años), encontramos que están situadas principalmente en dos zonas. El cinturón del Pacífico (la región que rodea el océano Pacífico) incluye las montañas del oeste del continente americano y continúa en el Pacífico occidental en forma de arcos de islas volcánicas (Figura 1.21). Los arcos de islas son regiones montañosas activas compuestas en gran parte de rocas volcánicas y rocas sedimentarias deformadas. Las islas Aleutianas, Japón, Filipinas y Nueva Guinea son ejemplos de arcos de islas.

El otro cinturón montañoso importante se extiende hacia el este desde los Alpes a través de Irán y el Himalaya y luego baja al sur y entra en Indonesia. Una exploración atenta de los terrenos montañosos revela que la mayoría de ellos son lugares donde se han comprimido secuencias gruesas de rocas que han experimentado una gran deformación, como si estuvieran en un torno gigantesco. También se encuentran montañas más antiguas en los continentes. Son ejemplos de ello los Apalaches, al este de los Estados Unidos, y los Urales, en Rusia. Sus picos, antes elevados, son ahora bajos, producto de millones de años de meteorización y de erosión.



## El interior estable

A diferencia de los cinturones montañosos jóvenes, que se han formado durante los últimos 100 millones de años, las zonas interiores de los continentes, denominadas **cratones**, han permanecido relativamente estables (sin cambios) durante los últimos 600 millones de años, o incluso más. Normalmente estas regiones intervinieron en un episodio de formación de montañas muy anterior en la historia de la Tierra.

Dentro de estos interiores estables existen zonas conocidas como **escudos**, que son regiones extensas y llanas compuestas por rocas cristalinas deformadas. Obsérvese en la Figura 1.22 que el Escudo Canadiense aflora en gran parte del noreste de Norteamérica. La datación radiométrica de varios escudos ha revelado que se trata de regiones verdaderamente antiguas. Todas ellas contienen rocas del Precámbrico con una edad superior a los 1.000 millones de años y algunas muestras se aproximan a los 4.000 millones de años. Incluso estas rocas, las más antiguas que se conocen, exhiben muestras de las fuerzas enormes que las han plegado, fallado y metamorfozadas. Así, concluimos que estas rocas una vez formaron parte de un sistema montañoso antiguo que desde entonces se ha erosionado hasta producir estas regiones extensas y llanas.

Existen otras zonas cratónicas en las que rocas muy deformadas, como las que se encuentran en los escudos, están cubiertas por una capa relativamente fina de rocas sedimentarias. Estas áreas se denominan **plataformas estables**. Las rocas sedimentarias de las plataformas estables son casi horizontales, excepto en los puntos en los que se han combado y han formado grandes cuencas o domos. En Norteamérica, una gran porción de las plataformas estables se sitúa entre el Escudo Canadiense y las Montañas Rocosas.

## Principales características del fondo oceánico

Si se drenara todo el agua de las cuencas oceánicas, se observaría una gran variedad de rasgos, incluidas cadenas de volcanes, cañones profundos, llanuras y largas extensiones de altiplanicies monótonamente llanas. De hecho, el paisaje sería casi tan diverso como en los continentes (véase Figura 1.21).

Durante los últimos 60 años, los oceanógrafos han cartografiado lentamente gran parte del fondo oceánico utilizando modernos equipos de sónar. A partir de estos estudios se han establecido tres regiones principales: los *márgenes continentales*, las *cuencas oceánicas profundas* y las *dorsales oceánicas (centro oceánicas)*.

### Márgenes continentales

El **margen continental** es la porción de fondo oceánico adyacente a las principales masas continentales. Puede incluir la *plataforma continental*, el *talud continental* y el *pie de talud*.

Aunque la tierra y el mar entran en contacto en la línea de costa, esta no es el límite entre los continentes y las cuencas oceánicas. Antes bien, a lo largo de la mayoría de las costas una plataforma suavemente inclinada de material, denominada **plataforma continental**, se extiende en dirección al mar desde la costa. Dado que está sobre la corteza continental, se trata claramente de una extensión inundada de los continentes. Un vistazo a la Figura 1.21 demuestra que la anchura de la plataforma continental es variable. Por ejemplo, es ancha a lo largo de las costas oriental y del Golfo de Estados Unidos, pero relativamente estrecha a lo largo del margen Pacífico del continente.

El límite entre los continentes y las cuencas oceánicas profundas se encuentra a lo largo del **talud continental**, una estructura relativamente empinada que se extiende desde la superficie exterior de la plataforma continental hasta el fondo oceánico profundo (Figura 1.21). Utilizando el talud como línea divisoria, encontramos que las cuencas oceánicas representan el 60 por ciento de la superficie terrestre y que el 40 por ciento restante corresponde a los continentes.

En regiones donde no existen fosas, el empinado talud continental pasa a tener una inclinación más gradual, conocida como **pie de talud**. El pie de talud está formado por un grueso cúmulo de sedimentos que se movieron pendiente abajo desde la plataforma continental hacia los fondos oceánicos profundos.

### Cuencas oceánicas profundas

Entre los márgenes continentales y las dorsales oceánicas se encuentran las **cuencas oceánicas profundas**. Partes de estas regiones consisten en estructuras increíblemente llanas denominadas **llanuras abisales**. El fondo oceánico también contiene depresiones extremadamente profundas, que llegan en ocasiones a los 11.000 m de profundidad. Aunque estas **fosas submarinas** son relativamente estrechas y representan tan solo una pequeña fracción del fondo oceánico, son sin embargo estructuras muy importantes. Algunas fosas se encuentran adyacentes a montañas jóvenes que flanquean los continentes. Por ejemplo, en la Figura 1.21, la fosa Perú-Chile que recorre la costa occidental sudamericana es paralela a los Andes. Otras fosas son paralelas a cadenas de islas lineales denominadas *arcos de islas volcánicas*.

Los fondos oceánicos están salpicados de estructuras volcánicas sumergidas llamadas **montes submarinos**, que a veces forman cadenas estrechas y largas. La actividad volcánica también ha producido varias *llanuras de lava* extensas, como la llanura Ontong Java, situada al noreste de Nueva Guinea. Además, algunas llanuras sumergidas están compuestas de corteza de tipo continental. Algunos ejemplos son la llanura Campbell, al sureste de Nueva Zelanda, y la llanura Seychelles, al noreste de Madagascar.

## Dorsales oceánicas

La estructura más prominente del fondo oceánico es la **dorsal oceánica** o **centro oceánica**. Como se muestra en la Figura 1.21, la dorsal Centro-atlántica y la dorsal del Pacífico oriental son partes de este sistema. Esta estructura ancha y larga forma un cinturón continuo que serpentea a lo largo de más de 70.000 km alrededor del planeta de una manera similar a la costura de una pelota de béisbol. Lejos de estar constituido por rocas muy deformadas, como la mayoría de las montañas de los continentes, el sistema de dorsales oceánicas consta de capas superpuestas de rocas ígneas fracturadas y elevadas.

La comprensión de las estructuras topográficas que forman la superficie de la Tierra es esencial para entender los mecanismos que han dado forma a nuestro planeta. ¿Qué importancia tiene el enorme sistema de dorsales que se extiende a través de los océanos de todo el mundo? ¿Cuál es la conexión, si la hay, entre los cinturones montañosos jóvenes y activos y las fosas oceánicas? ¿Qué fuerzas deforman las rocas para producir cadenas de montañas majestuosas? Estas son algunas de las cuestiones que se tratarán más adelante, cuando empecemos a investigar los procesos dinámicos que dieron forma a nuestro planeta en el pasado geológico y continuarán haciéndolo en el futuro.

## LAS ROCAS Y EL CICLO DE LAS ROCAS



### AN INTRODUCTION TO GEOLOGY

Rock Cycle

Las rocas son el material más común y abundante de la Tierra. Para un viajero curioso, la variedad parece casi infinita. Al examinar una roca con atención, encontramos que consta de cristales o granos pequeños de minerales. Los *minerales* son compuestos químicos (o en algunas ocasiones elementos únicos), cristalinos, cada uno de ellos con su propia composición y sus propiedades físicas. Los granos o cristales pueden ser microscópicos o fácilmente visibles sin ayuda de un microscopio.

La naturaleza y el aspecto de una roca están fuertemente influidos por los minerales que la componen. Además, la *textura* de una roca, es decir, el tamaño, la forma o la disposición de los minerales que la constituyen, también tiene un efecto significativo en su aspecto. La composición mineral y la textura de una roca, a su vez, son el reflejo de los procesos geológicos que la crearon.

Las características de las rocas proporcionan a los geólogos las pistas que necesitan para determinar los procesos que las formaron. Estos análisis son esenciales para la comprensión de nuestro planeta y su historia. Esta

comprensión tiene también muchas aplicaciones prácticas, como en la búsqueda de recursos minerales y energéticos básicos y la solución de problemas ambientales.

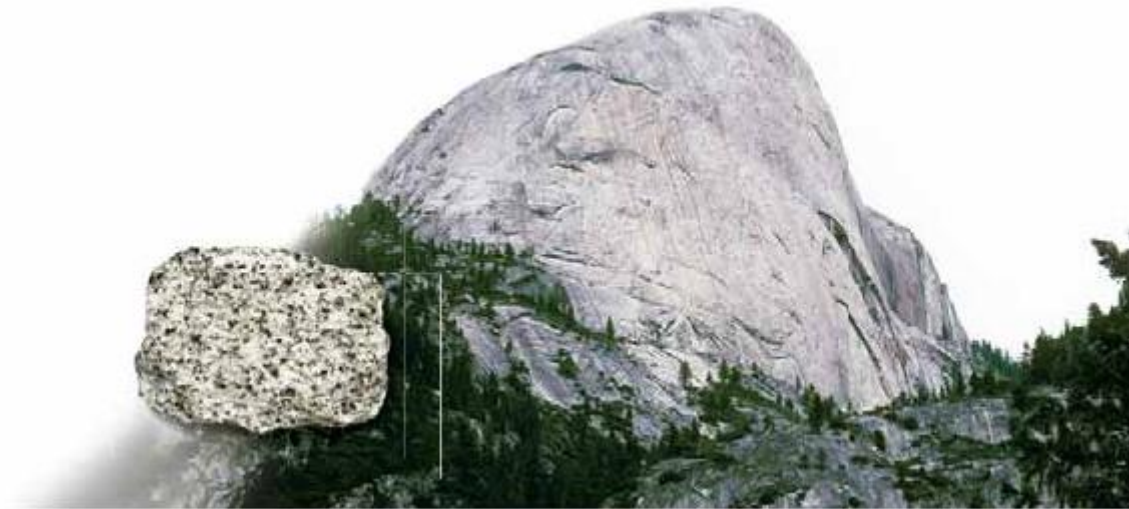
## Tipos básicos de rocas

Los geólogos dividen las rocas en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. A continuación, damos un breve vistazo a estos tres grupos básicos. Como iremos aprendiendo, cada grupo está relacionado con los demás por los procesos que actúan sobre el planeta y dentro de él.

### Rocas ígneas

Las **rocas ígneas** (*ignis* = fuego) se forman cuando la roca fundida, denominada *magma*, se enfría y se solidifica. El magma es roca fundida que se puede formar a varios niveles de profundidad en el interior de la corteza y el manto superior de la Tierra. A medida que se enfría el magma, van formándose y creciendo los cristales de varios minerales. Cuando el magma permanece en el interior profundo de la corteza, se enfría lentamente durante miles de años. Esta pérdida gradual de calor permite el desarrollo de cristales relativamente grandes antes de que toda la masa se solidifique por completo. Las rocas ígneas de grano grueso que se forman muy por debajo de la superficie se denominan *intrusivas*. Los núcleos de muchas montañas están constituidos por rocas ígneas formadas de esta manera. Solo la elevación y la erosión posteriores dejan expuestas estas rocas en la superficie. Un ejemplo común e importante es el *granito* (Figura 1.23). Esta roca intrusiva de grano grueso es rica en los minerales silicatados de color claro, cuarzo y feldespato. El granito y las rocas relacionadas son constituyentes principales de la corteza continental.

A veces, el magma se abre paso hacia la superficie de la Tierra, como durante una erupción volcánica. Dado que se enfría con rapidez en un ambiente de superficie, la roca fundida se solidifica muy deprisa y no hay tiempo suficiente para que crezcan cristales grandes. Antes bien, se produce la formación simultánea de muchos cristales pequeños. Las rocas ígneas que se forman en la superficie terrestre se describen como *extrusivas* y suelen ser de grano fino. Un ejemplo abundante e importante es el *basalto* (Figura 1.24). Esta roca de color verde oscuro a negro es rica en minerales silicatados que contienen una cantidad significativa de hierro y magnesio. Debido a su mayor contenido de hierro, el basalto es más denso que el granito. El basalto y las rocas relacionadas constituyen la corteza oceánica así como muchos volcanes, tanto en el océano como en los continentes.



**FIGURA 1.23.** El granito es una roca intrusiva ígnea especialmente abundante en la corteza continental de la Tierra. La erosión ha descubierto esta masa de granito en el Parque Nacional Yosemite de California. La muestra de granito exhibe su textura de grano grueso (Foto: E. J. Tarbuck).



**FIGURA 1.24.** Esta colada de lava del Monumento Nacional del Cráter Sunset cerca de Flagstaff, Arizona, está compuesta de la roca ígnea negra de grano fino denominada basalto (Foto de Dennis Tasa). La muestra de basalto exhibe su textura de grano fino. Los agujeros, denominados vesículas, son comunes en la zona superior de una colada de lava (Foto de E. J. Tarbuck).

### Rocas sedimentarias

Los *sedimentos*, la materia prima de las **rocas sedimentarias**, se acumulan en capas en la superficie de la Tierra. Son materiales que se forman a partir de rocas preexistentes por los procesos de *meteorización*. Algunos de estos procesos fragmentan físicamente la roca en piezas más pequeñas sin modificar su composición. Otros

procesos de meteorización descomponen la roca, es decir, modifican químicamente los minerales en otros nuevos y en sustancias fácilmente solubles en agua.

El agua, el viento o el hielo glacial suelen transportar los productos de la meteorización a lugares de sedimentación donde forman láminas relativamente planas, capas. Normalmente los sedimentos se convierten en roca, se *litifican*, por uno de los dos procesos siguientes. La *compactación* tiene lugar a medida que el peso de los materiales suprayacentes comprime los sedimentos en masas más densas. La *cementación* se produce conforme el agua que contiene sustancias disueltas se filtra a través de los espacios intergranulares del sedimento. Con el tiempo, el material disuelto en agua precipita entre los granos y los cementa en una masa sólida.

Los sedimentos que se originan y son transportados como partículas sólidas se denominan *sedimentos detríticos* y las rocas que ellos forman son las llamadas *rocas sedimentarias detríticas*. Las dimensiones de las partículas son la principal base para clasificar los miembros de esta categoría. Dos ejemplos comunes son la *lutita* y la *arenisca*. La lutita es una roca de grano fino compuesta por partículas del tamaño del limo (entre 1/256 y 1/16 mm) y de la arcilla (menos de 1/256 mm). La sedimentación de estos diminutos granos está asociada a ambientes «tranquilos» como ciénagas, llanuras fluviales expuestas a inundaciones y porciones de las cuencas oceánicas profundas. *Arenisca* es el nombre dado a las rocas sedimentarias en las que predominan granos del tamaño de la arena (entre 1/16 y 2 mm). Las areniscas se asocian con una gran variedad de ambientes, entre ellos las playas y las dunas.

Las *rocas sedimentarias químicas* se forman cuando el material disuelto en el agua precipita. A diferencia de las rocas sedimentarias detríticas, que se subdividen según el tamaño de las partículas, la principal base para



**FIGURA 1.25.** Esta gruesa capa de roca sedimentaria queda expuesta en las paredes del Parque Nacional Zion de Utah. Conocida como la Arenisca del Navajo, consiste en resistentes granos de mineral cuarzo que en una época pasada cubrió esta región con kilómetros de dunas de arena acumulada (Foto de Jamie & Judy Wild/www.DanitaDelimont). La muestra proporciona una vista más próxima de la arenisca (Foto de E. J. Tarbuck).

distinguir las rocas sedimentarias químicas es su composición mineral. La caliza, la roca sedimentaria química más común, está compuesta principalmente por el mineral calcita (carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ ). Existen muchas variedades de caliza. Los tipos más abundantes tienen un origen bioquímico, lo que significa que los organismos que viven en el agua extraen la materia mineral disuelta y crean partes duras, como los caparazones. Después, estas partes duras se acumulan como sedimento.

Los geólogos calculan que las rocas sedimentarias representan solo alrededor del 5 por ciento (en volumen) de los 16 km externos de la Tierra. Sin embargo, su importancia es bastante mayor de lo que podría indicar este porcentaje. Si tomara muestras de las rocas expuestas en la superficie, encontraría que la gran mayoría son sedimentarias. De hecho, en torno al 75 por ciento de todas las rocas expuestas en los continentes son sedimentarias. Por consiguiente, podemos considerar las rocas

sedimentarias como una capa algo discontinua y relativamente delgada de la porción más externa de la corteza, lo cual tiene sentido, ya que el sedimento se acumula en la superficie.

A partir de las rocas sedimentarias, los geólogos reconstruyen muchos detalles de la historia de la Tierra. Dado que los sedimentos son depositados en muchos puntos diferentes de la superficie, las capas rocosas que acaban formando contienen muchas pistas sobre los ambientes de la superficie en el pasado. También pueden exhibir características que permiten a los geólogos descifrar información sobre cómo y desde dónde se transportó el sedimento. Además, son las rocas sedimentarias las que contienen fósiles, que son pruebas vitales en el estudio del pasado geológico.

### Rocas metamórficas

Las **rocas metamórficas** se producen a partir de rocas ígneas, sedimentarias o incluso otras rocas metamórficas. Así, cada roca metamórfica tiene una roca madre, la roca a partir de la que se ha formado. *Metamórfico* es un adjetivo adecuado porque su significado literal es «cambiar la forma». La mayoría de cambios tienen lugar a temperaturas y presiones elevadas que se dan en la profundidad de la corteza terrestre y el manto superior (Figura 1.26).

Los procesos que crean las rocas metamórficas a menudo progresan de una manera gradual, desde cambios ligeros (metamorfismo de bajo grado) hasta cambios sustanciales (metamorfismo de alto grado). Por ejemplo, durante el metamorfismo de bajo grado, la roca sedimentaria común lutita se convierte en una roca metamórfica más compacta denominada *pizarra*. En cambio, el metamorfismo de alto grado provoca una transformación tan completa que no se puede determinar la identidad de la roca madre. Además, cuando las rocas situadas a una profundidad (a la que las temperaturas son elevadas) están sujetas a una presión dirigida, se deforman de una manera gradual y generan pliegues complicados. En los ambientes metamórficos más extremos, las temperaturas se aproximan a las temperaturas de fusión de las rocas. No obstante, *durante el metamorfismo la roca debe permanecer esencialmente sólida*, ya que, si se funde por completo, entramos en el ámbito de la actividad ígnea.

La mayor parte del metamorfismo sucede en uno de estos tres ambientes:

1. Cuando un cuerpo magmático intruye en la roca, tiene lugar el *metamorfismo térmico o de contacto*. En este caso, el cambio está controlado por un aumento de la temperatura dentro de la roca que rodea una intrusión ígnea.
2. El *metamorfismo hidrotermal* implica alteraciones químicas que se producen cuando el agua caliente rica



**FIGURA 1.26.** La roca oscura mostrada aquí es metamórfica. Conocida como esquisto de Vishnu, aflora en la garganta interna del Gran Cañón. Su formación se asocia con los entornos que existen muy por debajo de la corteza terrestre donde las temperaturas y las presiones son elevadas y con los procesos formadores de montañas antiguas que se produjeron en la época precámbrica (Foto de Dennis Tasa).

en iones circula a través de las fracturas de la roca. Este tipo de metamorfismo suele asociarse con la actividad ígnea que proporciona el calor necesario para provocar reacciones químicas y hacer que estos fluidos circulen a través de la roca.

3. Durante la formación de las montañas, grandes cantidades de roca enterradas a una gran profundidad están sujetas a presiones dirigidas y a temperaturas elevadas asociadas con la deformación a gran escala denominada *metamorfismo regional*.

El grado de metamorfismo se refleja en la textura y la composición mineral de la roca. Durante el metamorfismo regional, los cristales de algunos minerales recrystalizarán con una orientación perpendicular a la dirección de la fuerza compresiva. La alineación mineral resultante a menudo da a la roca una textura en láminas o en bandas llamada *foliación*. El *esquisto* y el *gneis* son dos ejemplos de rocas foliadas (Figura 1.27A).

No todas las rocas metamórficas presentan una textura foliada. Se dice que estas rocas son *no foliadas*. Las rocas metamórficas compuestas por un solo mineral que forma cristales equidimensionales no son, por regla general, visiblemente foliadas. Por ejemplo, la caliza, si es pura, está compuesta por un solo mineral, la calcita. Cuando una caliza de grano fino experimenta metamorfismo, los pequeños cristales de calcita se combinan y forman cristales entrelazados más grandes. La roca resultante es similar a una roca ígnea de grano grueso. Este equivalente metamórfico no foliado de la caliza se denomina *mármol* (Figura 1.27B).

En todos los continentes afloran áreas extensas de rocas metamórficas. Estas rocas son un componente importante de muchos cinturones montañosos, donde constituyen una gran porción del núcleo cristalino de las montañas. Incluso debajo de los interiores continentales estables, que en general están cubiertos por rocas sedimentarias, hay basamentos de rocas metamórficas.



A.



B.

**FIGURA 1.27.** Rocas metamórficas comunes. A. La roca foliada gneis a menudo presenta bandas y con frecuencia tiene una composición mineral similar a la de la roca ígnea granito. B. El mármol es una roca gruesa, cristalina, no foliada, cuya roca madre es la caliza (Fotos: E. J. Tarbuck).

En todos estos ambientes, las rocas metamórficas suelen estar muy deformadas y contienen grandes intrusiones de masas ígneas. De hecho, partes importantes de la corteza continental de la Tierra están compuestas por rocas metamórficas y rocas ígneas asociadas.

## El ciclo de las rocas: uno de los subsistemas de la Tierra

La Tierra es un sistema. Esto significa que nuestro planeta está formado por muchas partes interactuantes que forman un todo complejo. En ningún otro lugar se ilustra mejor esta idea que al examinar el ciclo de las rocas (Figura 1.28). El **ciclo de las rocas** nos permite examinar muchas de las interrelaciones entre las diferentes partes del sistema Tierra. Nos ayuda a entender el origen de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, y a ver que cada tipo está vinculado a los otros por los procesos que actúan sobre y dentro del planeta. Aprenda bien el ciclo de las rocas; examinará sus interrelaciones con mayor detalle a lo largo de este libro.

### Ciclo básico

Empecemos en la parte superior de la Figura 1.28. El **magma**, la roca fundida que se forma a una gran profundidad por debajo de la superficie de la Tierra, con el tiempo se enfría y se solidifica. Este proceso, denominado *crystalización*, puede ocurrir debajo de la superficie terrestre o, después de una erupción volcánica, en la superficie. En cualquiera de las dos situaciones, las rocas resultantes se denominan *rocas ígneas*.

Si las rocas ígneas afloran en la superficie experimentarán *meteorización*, en la cual la acción de la atmósfera desintegra y descompone lentamente las rocas. Los materiales resultantes suelen ser desplazados pendiente abajo por la gravedad antes de ser captados y transportados por algún agente erosivo como las aguas superficiales, los glaciares, el viento o las olas. Por fin, estas partículas y sustancias disueltas, denominadas *sedimentos*, son depositadas. Aunque la mayoría de los sedimentos acaba llegando al océano, otras zonas de acumulación son las llanuras de inundación de los ríos, los desiertos, los pantanos y las dunas.

A continuación, los sedimentos experimentan *litificación*, un término que significa «conversión en roca». El sedimento suele litificarse dando lugar a una *roca sedimentaria* cuando es compactado por el peso de las capas suprayacentes o cuando es cementado conforme el agua subterránea de infiltración llena los poros con materia mineral.

Si la roca sedimentaria resultante se entierra profundamente dentro de la tierra e interviene en la dinámica de formación de montañas, o si es intruida por una masa de magma, estará sometida a grandes presiones o a un calor intenso, o a ambas cosas. La roca sedimentaria reaccionará ante el ambiente cambiante y se convertirá en un tercer tipo de roca, una *roca metamórfica*. Cuando la roca metamórfica es sometida a cambios de presión adicionales o a temperaturas aún mayores, se fundirá, creando un magma, que acabará cristalizando en rocas ígneas, volviendo a empezar de nuevo el ciclo.

¿De dónde procede la energía que impulsa el ciclo de las rocas de la Tierra? Los procesos impulsados por el calor desde el interior de la Tierra son responsables de la creación de las rocas ígneas y metamórficas. La meteorización y la erosión, procesos externos alimentados por la energía procedente del Sol, producen el sedimento a partir del cual se forman las rocas sedimentarias.

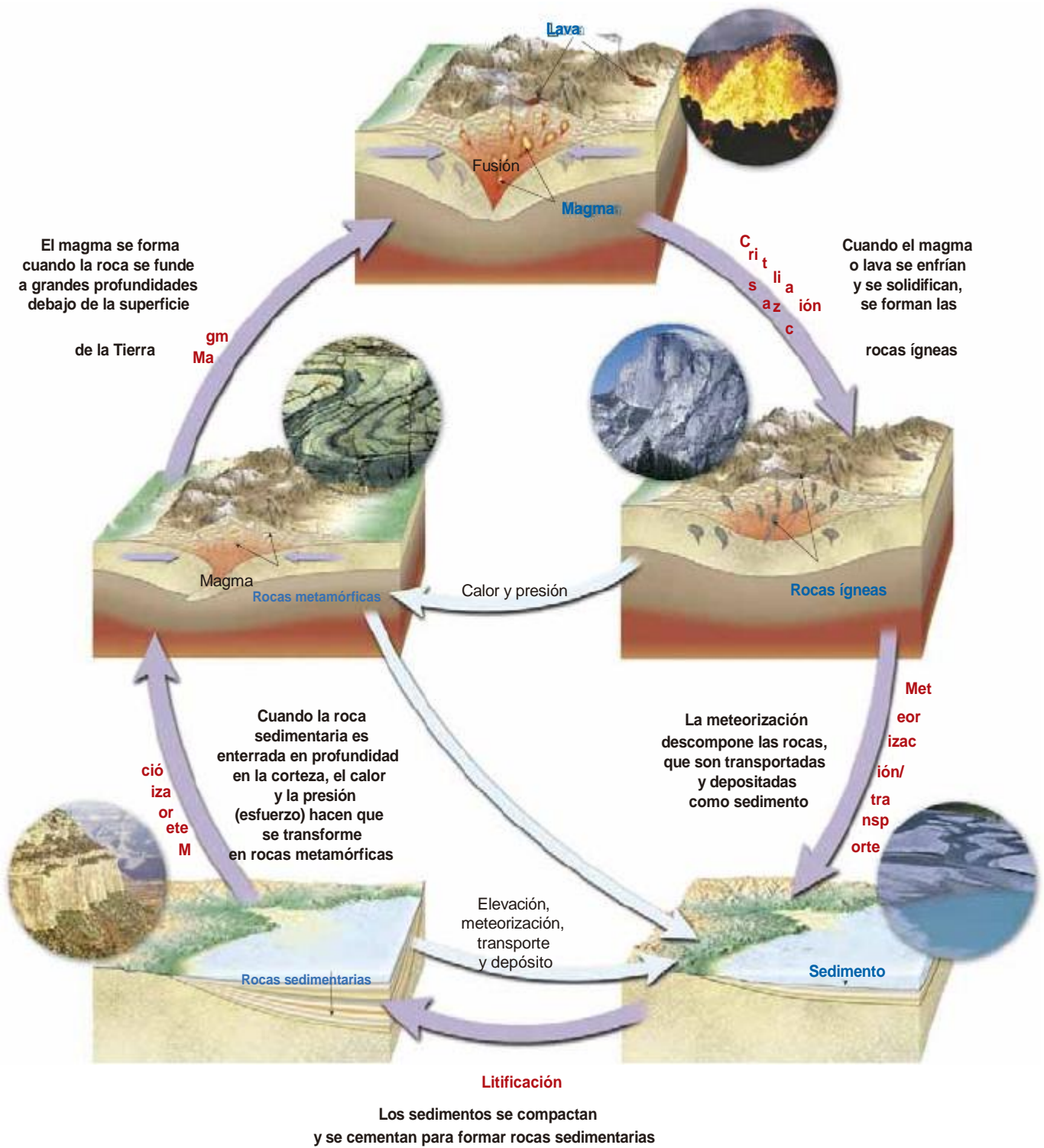
### Caminos alternativos

Las vías mostradas en el ciclo básico no son las únicas posibles. Al contrario, es exactamente igual de probable que puedan seguirse otras vías distintas de las descritas en la sección precedente. Esas alternativas se indican mediante las líneas azules en la Figura 1.28.

Las rocas ígneas, en vez de ser expuestas a la meteorización y a la erosión en la superficie terrestre, pueden permanecer enterradas profundamente. Esas masas pueden acabar siendo sometidas a fuertes fuerzas de compresión y a temperaturas elevadas asociadas con la formación de montañas. Cuando esto ocurre, se transforman directamente en rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas y sedimentarias, así como los sedimentos, no siempre permanecen enterrados. Antes bien, las capas superiores pueden ser eliminadas, dejando expuestas las rocas que antes estaban enterradas. Cuando esto ocurre, los materiales son meteorizados y convertidos en nueva materia prima para las rocas sedimentarias.

Las rocas pueden parecer masas invariables, pero el ciclo de las rocas demuestra que no es así. Los cambios, sin embargo, requieren tiempo; grandes cantidades de tiempo. Podemos observar las diferentes partes del ciclo funcionando por todo el mundo. En la actualidad se está formando nuevo magma debajo de la isla de Hawái. Cuando hace erupción en la superficie, los flujos de lava aumentan el tamaño de la isla. Mientras tanto, la meteorización y la erosión van reduciendo las Montañas Rocosas. Algunos de estos restos meteorizados serán transportados finalmente al Golfo de México, donde se añadirán a la masa ya sustancial de sedimento que se ha acumulado ahí.



**FIGURA 1.28.** Consideradas a lo largo de espacios temporales muy prolongados, las rocas están en constante formación, cambio y transformación. El ciclo de las rocas nos ayuda a entender el origen de los tres grupos básicos de rocas. Las flechas representan los procesos que enlazan cada grupo con los demás

## CAPÍTULO 1

## Introducción a la geología

## RESUMEN

*Geología* significa «el estudio de la Tierra». Las dos amplias ramas de la geología son: (1) la *Geología física*, que examina los materiales que componen la Tierra y los procesos que actúan debajo y encima de su superficie; y (2) la *Geología histórica*, que intenta comprender el origen de la Tierra y su desarrollo a lo largo del tiempo.

La relación entre las personas y el medio natural es un objetivo importante de la Geología y abarca los riesgos naturales, los recursos y la influencia humana en los procesos geológicos.

Durante los siglos XVII y XVIII, el *catastrofismo* influyó en la formulación de explicaciones sobre la Tierra. El catastrofismo establece que los paisajes terrestres se han desarrollado fundamentalmente debido a grandes catástrofes. Por el contrario, el *uniformismo*, uno de los principios fundamentales de la Geología moderna, avanzado por *James Hutton* a finales del siglo XVIII, establece que las leyes físicas, químicas y biológicas que actúan hoy en día, lo han hecho también en el pasado geológico. Esta idea suele resumirse como «el presente es la clave para el pasado». Hutton sostenía que los procesos que parecen ser lentos, podrían, a lo largo de lapsos prolongados de tiempo, producir efectos que fueran exactamente tan grandes como los resultantes de acontecimientos catastróficos súbitos.

Utilizando los principios de la *datación relativa*, la ordenación de los acontecimientos en su secuencia u orden apropiados sin conocer su edad en años, los científicos desarrollaron una escala de tiempo geológico durante el siglo XIX. Pueden establecerse fechas relativas aplicando principios como los de la *ley de superposición* y el *principio de sucesión biótica*.

Toda ciencia se basa en la suposición de que el mundo natural se comporta de una manera constante y predecible. El proceso mediante el cual los científicos recogen datos y formulan *hipótesis* y *teorías* científicas se denomina *método científico*. Para determinar lo que ocurre en el mundo natural, los científicos suelen: (1) recoger datos, (2) plantear preguntas y desarrollar hipótesis que puedan responder a esas preguntas, (3) realizar observaciones y elaborar experimentos para probar las hipótesis, y (4) aceptar, modificar o rechazar en función de pruebas extensas. Otros descubrimientos representan ideas puramente teóricas que han soportado un examen exhaustivo. Algunos avances científicos se han realizado incluso cuando

se produjo un acontecimiento totalmente inesperado durante un experimento.

El medio físico de la Tierra se divide tradicionalmente en tres partes principales: la Tierra sólida o *geosfera*; la porción de agua de nuestro planeta, la *hidrosfera*; y la envuelta gaseosa de la Tierra, la *atmósfera*. Además, la *biosfera*, la totalidad de vida sobre la Tierra, interactúa con cada uno de los tres reinos físicos y es igualmente una parte integrante de la Tierra.

Aunque cada una de las cuatro esferas de la Tierra puede estudiarse por separado, todas ellas están relacionadas en un todo complejo y continuamente interactuante que denominamos *sistema Tierra*. La *ciencia del sistema Tierra* utiliza una aproximación interdisciplinaria para integrar el conocimiento de varios ámbitos académicos en el estudio de nuestro planeta y sus problemas ambientales globales.

Un *sistema* es un grupo de partes interactuantes que forman un todo complejo. Los *sistemas cerrados* son aquellos en los que la energía entra y sale libremente, mientras que la materia no entra ni sale del sistema. En un sistema abierto, tanto la energía como la materia entran y salen del sistema.

La mayoría de sistemas naturales tiene mecanismos que tienden a intensificar el cambio, llamados *mecanismos de realimentación positiva*, y otros mecanismos, denominados *mecanismos de realimentación negativa*, que tienden a resistir el cambio y, así, a estabilizar el sistema.

Las dos fuentes de energía que alimentan el sistema Tierra son: (1) el Sol, que impulsa los procesos externos que tienen lugar en la atmósfera, la hidrosfera y la superficie de la Tierra; y (2) el calor del interior de la Tierra, que alimenta los procesos internos que producen los volcanes, los terremotos y las montañas.

La *hipótesis de la nebulosa* describe la formación del Sistema Solar. Los planetas y el Sol empezaron a formarse hace unos 5.000 millones de años a partir de una gran nube de polvo y gases. Conforme la nube se contraía, empezó a rotar y a adoptar forma de disco. El material que era lanzado gravitacionalmente hacia el centro se convirtió en el *protosol*. Dentro del disco en rotación, pequeños centros, denominados *planetesimales*, absorbían cada vez más cantidad de los restos de la nube. Debido a las elevadas temperaturas cerca del Sol, los planetas interiores fueron incapaces de acumular muchos de los elementos que se evaporan a temperaturas bajas. Debido a las temperaturas muy



frías existentes en la lejanía del Sol, los planetas exteriores, grandes están formados de enormes cantidades de hielo y materiales más ligeros. Esas sustancias gaseosas explican los tamaños comparativamente grandes y las bajas densidades de los planetas externos.

La estructura interna de la Tierra se divide en capas basadas en diferencias de composición química y en los cambios de las propiedades físicas. En cuanto a la composición, la Tierra se divide en una corteza externa delgada, un manto rocoso sólido y un núcleo denso. Otras capas, según sus propiedades físicas, son la litosfera, la astenosfera, la zona de transición, el manto inferior, la «capa D», el núcleo externo y el núcleo.

Las dos divisiones principales de la superficie terrestre son los continentes y las cuencas oceánicas. Una diferencia significativa son sus altitudes relativas. Las diferencias de elevación entre los continentes y las cuencas oceánicas son consecuencia principalmente de diferencias entre sus densidades y grosores respectivos.

Las estructuras más grandes de los continentes pueden dividirse en dos categorías: los *cinturones montañosos* y el *interior estable*. El fondo oceánico se divide en tres grandes unidades topográficas: los *márgenes continentales*, las *cuencas oceánicas profundas* y las *dorsales oceánicas*.

Las rocas están formadas de granos o cristales más pequeños denominados *minerales*. La composición mineral y la *textura* de las rocas (tamaño, forma o disposición de los minerales que las componen) reflejan los procesos geológicos que las crearon. Los tres tipos básicos de rocas son *ígneas*, *sedimentarias* y *metamórficas*. El *ciclo de las rocas* es uno de los muchos ciclos o bucles del sistema Tierra en los que la materia se recicla. El ciclo de las rocas es una forma importante de observar muchas de las interrelaciones de la Geología. Ilustra el origen de los tres tipos de rocas básicas y el papel de varios procesos geológicos en la transformación de un tipo de roca en otro.

## TÉRMINOS FUNDAMENTALES

astenosfera, 28	hidrosfera, 18	plataforma continental, 33
atmósfera, 19	hipótesis, 12	plataforma estable, 33
biosfera, 19	interfaz, 22	roca ígnea, 34
«capa D», 28	litosfera, 28	roca metamórfica, 36
catastrofismo, 7	llanura abisal, 33	roca sedimentaria, 35
ciencia del sistema Tierra, 20	manto, 27	sistema, 21
ciclo de las rocas, 38	manto inferior, 28	sistema abierto, 21
corteza, 27	margen continental, 33	sistema cerrado, 21
cratón, 33	mecanismo de realimentación	sucesión de fósiles, principio de, 11
cuena oceánica profunda, 33	negativa, 21	superposición, ley de, 11
datación relativa, 10	mecanismo de realimentación	talud continental, 33
dorsal oceánica (centro oceánica), 34	positiva, 21	teoría, 15
escudo, 33	monte submarino, 33	teoría de la nebulosa
fosa submarina, 33	nebulosa solar, 24	primitiva, 24
Geología, 4	núcleo, 28	uniformismo, 9
Geología física, 4	núcleo externo, 28	zona de transición, 28
Geología histórica, 4	núcleo interno, 28	
geosfera, 20	pie de talud, 33	

## PREGUNTAS DE REPASO

1. La Geología se divide tradicionalmente en dos amplias áreas. Nombre y describa esas dos subdivisiones.
2. Describa brevemente la influencia de Aristóteles en las ciencias geológicas.
3. ¿Cómo percibían la edad de la Tierra quienes proponían el catastrofismo?
4. Describa la doctrina del uniformismo. ¿Cómo consideraban los defensores de esta idea la edad de la Tierra?
5. ¿Cuál es la edad aproximada de la Tierra?
6. La escala de tiempo geológico se estableció sin la ayuda de la datación radiométrica. ¿Qué principios se utilizaron para desarrollar esta escala temporal?

7. ¿En qué se diferencia una hipótesis científica de una teoría científica?
8. Enumere y describa brevemente las cuatro «esferas» que constituyen nuestro medio ambiente.
9. ¿En qué se diferencia un sistema abierto de un sistema cerrado?
10. Compare los mecanismos de realimentación positiva y los mecanismos de realimentación negativa.
11. El suelo es un ejemplo de una *interfaz* en el sistema Tierra. ¿Qué es una interfaz? ¿Con cuál de las cuatro esferas de la Tierra está asociado el suelo?
12. ¿Cuáles son las dos fuentes de energía del sistema Tierra?
13. Enumere y describa brevemente los acontecimientos que llevaron a la formación del Sistema Solar.
14. Enumere y describa brevemente las capas composicionales en las que se divide la Tierra.
15. Compare la astenosfera y la litosfera.
16. Describa la distribución general de las montañas más jóvenes de la Tierra.
17. Distinga entre escudos y plataformas estables.
18. Enumere las tres principales unidades topográficas del fondo oceánico.
19. Diga el nombre de cada una de las rocas que se describen a continuación:
  - Roca intrusiva de grano grueso y color claro.
  - Roca detrítica rica en partículas del tamaño limo.
  - Roca negra de grano fino que compone la corteza oceánica.
  - Roca no foliada cuya roca madre es la caliza.
20. Para cada una de las siguientes características, indique si está asociada con las rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas:
  - Puede ser intrusiva o extrusiva.
  - Litificada por compactación y cementación.
  - La arenisca es un ejemplo.
  - Algunos miembros de este grupo son foliados.
  - Este grupo se divide en las categorías detrítica y química.
  - El gneis forma parte de este grupo.
21. Utilizando el ciclo de las rocas, explique la afirmación: «una roca es la materia prima para otra».

## MasteringGeology

La plataforma Mastering es el tutorial (en inglés) más eficaz y ampliamente utilizado para la evaluación de Ciencias.

Con MasteringGeology el profesor puede: personalizar el contenido, asignar distintas tareas, exportar las calificaciones, comparar el rendimiento del alumno, comunicarse con los estudiantes... Mientras que el alumno puede disfrutar de un Study Area diferente por cada uno de los capítulos.

En MasteringGeology, además, podrá encontrar los siguientes contenidos y materiales interactivos extra:

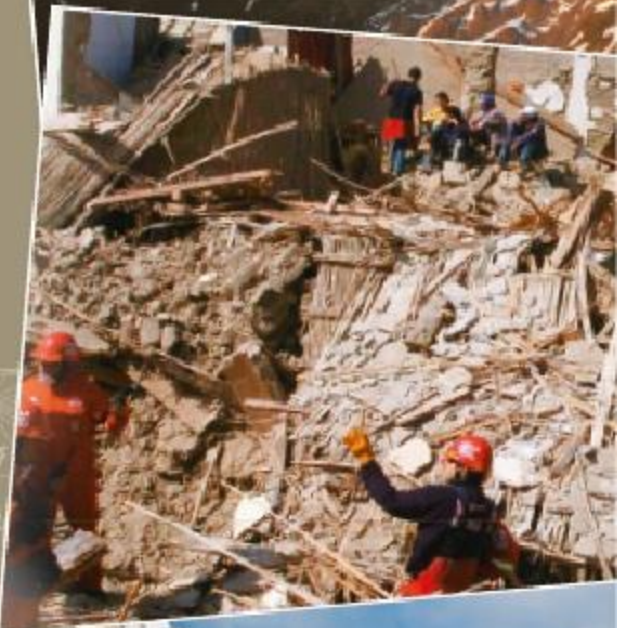
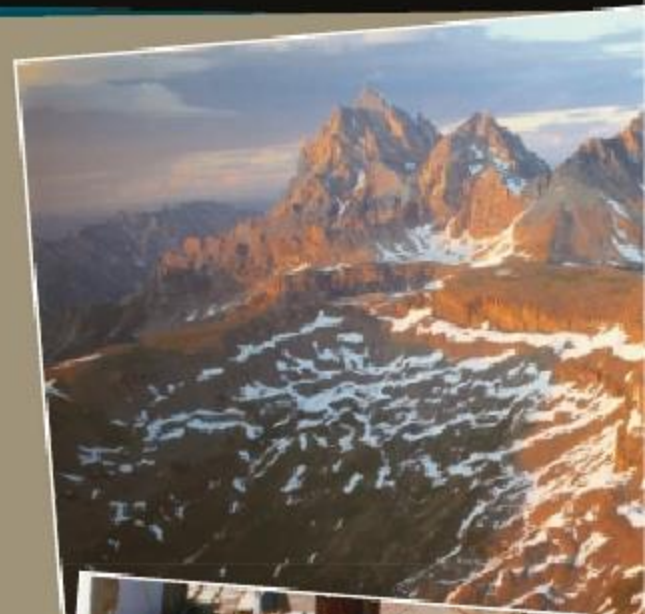
- Encounter Earth
- Geoscience Animations
- GEODe
- Pearson eText

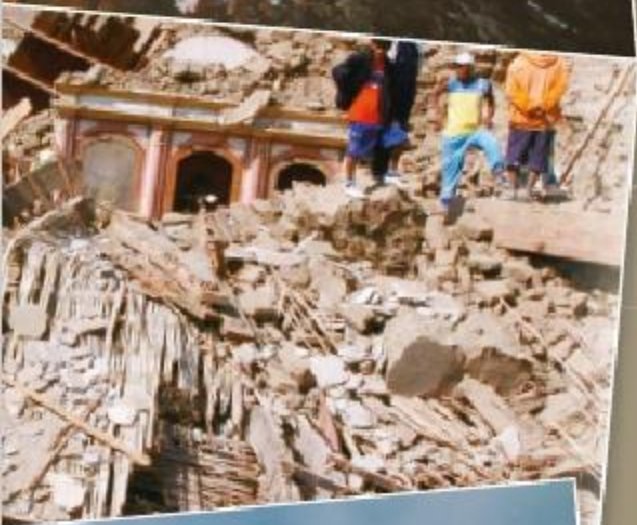
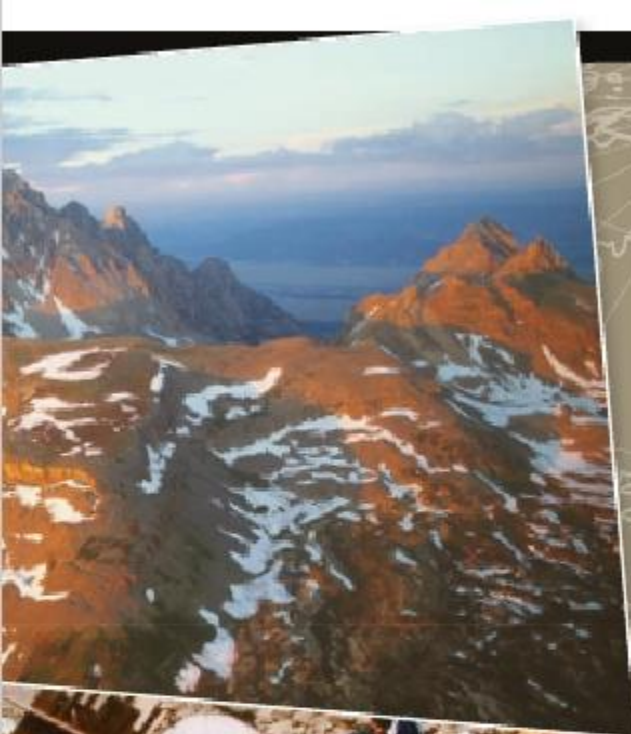
Para acceder a todos estos contenidos adicionales solo se necesita el código de acceso de las tarjetas que podrás adquirir con la compra del libro o por separado.



# CAPÍTULO 2

## Tectónica de placas: el desarrollo de una revolución científica





Antes de la década de 1960 la mayoría de los geólogos sostenía la opinión de que las cuencas oceánicas y los continentes tenían posiciones fijas y eran de gran antigüedad. Menos de una década después los investigadores se dieron cuenta de que los continentes de la Tierra no eran estáticos, sino que migraban gradualmente por el planeta. Debido a esos movimientos, los bloques de material continental colisionan, deforman la corteza y crean así las grandes cadenas de la Tierra (Figura 2.1). Además, las masas de tierra a veces se separan. Conforme los bloques continentales se distancian, emerge una nueva cuenca oceánica entre ellos. Mientras tanto, otras porciones del fondo oceánico se sumergen en el manto. En resumen, surgió un modelo completamente diferente de los procesos tectónicos de la Tierra\*.

Este cambio profundo en el pensamiento científico se ha descrito apropiadamente como una revolución científica. La revolución empezó a principios del siglo XX con una propuesta relativamente directa denominada «deriva continental». Durante más de cincuenta años los científicos consagrados rechazaron categóricamente la idea de que los continentes eran capaces de moverse\*\*. Después de la Segunda Guerra Mundial, los instrumentos modernos sustituyeron a los martillos como las herramientas elegidas por muchos investigadores. Armados con esos equipos más avanzados, los geólogos y una nueva raza de investigadores, entre ellos geofísicos y geoquímicos, hicieron varios descubrimientos sorprendentes que empezaron a reavivar el interés por la hipótesis de la deriva. En 1968 estos avances condujeron al despliegue de una explicación más completa que se conoce como la «teoría de la tectónica de placas».

\* Los procesos tectónicos son los que deforman la corteza de la Tierra para crear los principales rasgos estructurales, como montañas, continentes y cuencas oceánicas.

\*\* Unos pocos geólogos, entre ellos Alexander du Toit de Sudáfrica y Arthur Holmes, de Inglaterra, respaldaron la hipótesis de la deriva continental. Pero estaban claramente en minoría.

En este capítulo, examinaremos los acontecimientos que llevaron a este gran cambio de la opinión científica en un intento de proporcionar una visión de cómo funciona la ciencia. También describiremos brevemente el desarrollo de la hipótesis de la deriva continental, examinaremos los motivos por los que se rechazó al principio y consideraremos las pruebas que finalmente condujeron a la aceptación de su descendiente directa, la teoría de la tectónica de placas.

## DERIVA CONTINENTAL: UNA IDEA QUE SE ADELANTÓ A SU ÉPOCA

La idea de que los continentes, sobre todo Sudamérica y África, encajan como las piezas de un rompecabezas, se originó durante el siglo XVII, a medida que se dispuso de mejores mapas mundiales. Sin embargo, se dio poca importancia a esta noción hasta 1915, cuando Alfred Wegener (1880-1930), meteorólogo y geofísico alemán, publicó *El origen de los continentes y los océanos*. En este libro, que se publicó en varias ediciones, se estableció

el esbozo básico de la hipótesis de Wegener, denominada **deriva continental**, que se atrevió a cuestionar la suposición largo tiempo sostenida de que los continentes y las cuencas oceánicas tenían posiciones geográficas fijas.

Wegener sugirió que en una ocasión había existido un **supercontinente** único, consistente en todas las masas continentales de la Tierra<sup>1</sup>. Denominó **Pangaea** a esta masa continental gigante (que significa «todas las tierras») (Figura 2.2). Además planteó la hipótesis de que, hace unos 200 millones de años, en la era Mesozoica, este supercontinente empezó a fragmentarse en continentes más pequeños. Estos bloques continentales «se desviaron» a sus posiciones presentes a lo largo de millones de años. Se cree que la idea de Wegener de que los continentes pudieran separarse se le pudo ocurrir al observar la fragmentación del hielo oceánico durante una expedición danesa a Groenlandia.

<sup>1</sup> Wegener no fue el primero en concebir un supercontinente desaparecido hace mucho tiempo. Edward Suess (1831-1914), un distinguido geólogo del siglo XIX, reunió evidencias de una masa de tierra gigante compuesta por los continentes de Sudamérica, África, India y Australia.



**FIGURA 2.1.** Escaladores acampando en la pared rocosa escarpada de una montaña conocida como K7 en el Karakoram de Pakistán, una parte del Himalaya. Estas montañas se formaron cuando la India chocó con Eurasia. (Foto de Jimmy Chir/National Geographic/Getty).



**FIGURA 2.2.** Reconstrucción de Pangea como se piensa que era hace 200 millones de años. **A.** Reconstrucción actual. **B.** Reconstrucción realizada por Wegener en 1915.

Wegener y quienes defendían la hipótesis de la deriva continental recogieron pruebas sustanciales que respaldaban sus opiniones. El ajuste de Sudamérica y África y la distribución geográfica de los fósiles y los climas antiguos parecían apoyar la idea de que esas masas de tierra, ahora separadas, estuvieron juntas en alguna ocasión. Examinemos algunas de esas pruebas.

### Evidencias: el rompecabezas continental

Como algunos antes que él, Wegener sospechó que los continentes podrían haber estado unidos en alguna ocasión al observar las notables semejanzas existentes entre las líneas de costa situadas a los dos lados del Atlántico. Sin embargo, la utilización que él hizo de las

líneas de costa actuales para hacer encajar los continentes fue inmediatamente cuestionada por otros geólogos. Estos últimos sostenían, correctamente, que las líneas de costa están siendo continuamente modificadas por procesos erosivos y sedimentarios. Aun cuando hubiera tenido lugar el desplazamiento de los continentes, sería improbable un buen ajuste en la actualidad. Wegener parecía consciente de este problema, ya que su ajuste original de los continentes era muy aproximado (Figura 2.2B).

Más adelante los científicos determinaron que una aproximación mucho mejor del límite externo de un continente es el borde de su plataforma continental que se dirige al mar que se encuentra sumergido unos cuantos centenares de metros por debajo del nivel del mar. A principios de la década de los sesenta Sir Edward Bullard y dos de sus colaboradores construyeron un

mapa en el que se ajustaban los bordes de las plataformas continentales sudamericana y africana a profundidades de unos 900 m (Figura 2.3). El notable ajuste que se obtuvo era mejor incluso que el esperado por esos investigadores. Como se muestra en la Figura 2.3, hay unos pocos lugares donde los continentes se solapan. Algunos de esos solapamientos están relacionados con el proceso de ensanchamiento y adelgazamiento de los márgenes continentales a medida que se separaban. Otros pueden explicarse por el trabajo de los principales sistemas fluviales. Por ejemplo, desde la ruptura de Pangea, el río Níger ha ido formando un extenso delta que agrandó la plataforma continental de África.

### Evidencia: los fósiles coinciden en costas opuestas de los mares

Aunque la semilla de la hipótesis de Wegener procedía de las notables semejanzas de los márgenes continentales a ambos lados del Atlántico, fue cuando supo que se habían encontrado organismos fósiles idénticos en rocas de Sudamérica y de África cuando se concentró más en la deriva continental. A través de una revisión de la literatura científica, Wegener descubrió que la mayoría de los paleontólogos (científicos que estudian los restos fosilizados de organismos antiguos) estaban de acuerdo en que era necesario algún tipo de conexión



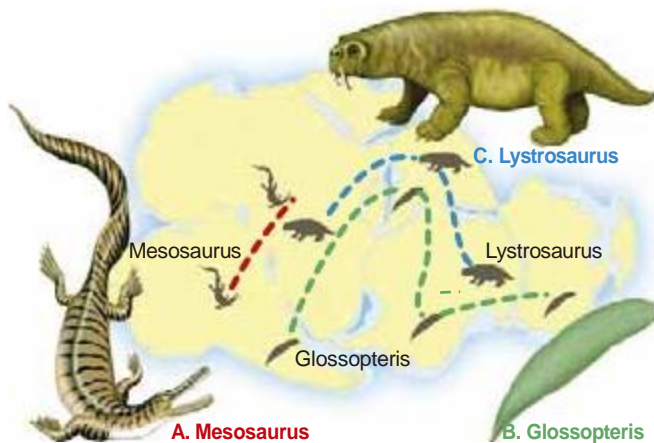
**FIGURA 2.3.** Aquí se muestra el mejor ajuste entre Sudamérica y África a lo largo del talud continental a una profundidad de unos 900 m. Las áreas de solapamiento entre los bloques continentales están coloreadas en marrón. (Tomado de A. G. Smith, «Continental Drift», en *Understanding the Earth*, editado por I. G. Gass)

continental para explicar la existencia de formas de vida mesozoicas similares en masas de tierra enormemente separadas. Igual que las formas de vida autóctonas de Norteamérica son muy distintas de las africanas y las australianas, cabría esperar que durante la era Mesozoica los organismos de continentes muy separados serían también bastante diferentes.

### Mesosaurus

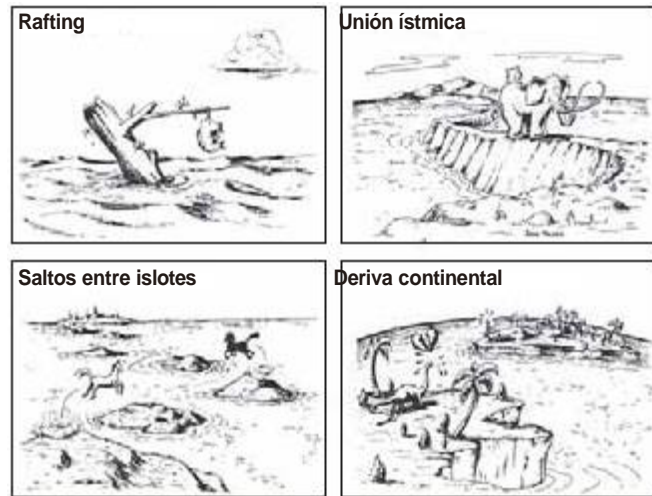
Para añadir credibilidad a su argumento, Wegener documentó casos de varios organismos fósiles que se habían encontrado en diferentes masas continentales, pese a las escasas posibilidades de que sus formas vivas pudieran haber cruzado el vasto océano que ahora las separa (Figura 2.4). El ejemplo clásico es el del *Mesosaurus*, un reptil acuático depredador de peces cuyos restos fósiles se limitan a lutitas negras del Pérmico (hace unos 260 millones de años) en el este de Sudamérica y en el sudoeste de África (Figura 2.4). Si el *Mesosaurus* hubiera sido capaz de realizar el largo viaje a través del enorme océano atlántico meridional, sus restos deberían tener una distribución más amplia. Como esto no era así, Wegener afirmó que Sudamérica y África debieron haber estado juntas durante este periodo de la historia de la Tierra.

¿Cómo explicaban los opositores a la deriva continental la existencia de organismos fósiles idénticos en lugares separados por miles de kilómetros de mar abierto? Rafting, puentes de tierra transoceánicos (conexiones



**FIGURA 2.4.** Evidencia fósil que respalda la deriva continental.

**A.** Se han encontrado fósiles del *Mesosaurus* solo en depósitos no marinos del este de Sudamérica y el oeste de África. *Mesosaurus* era un reptil de agua fresca incapaz de nadar los 5.000 km de océano abierto que separa ahora esos continentes. **B.** Se encontraron restos de *Glossopteris* y flora relacionada en Australia, África, Sudamérica, la Antártida e India, masas continentales que en la actualidad tienen climas bastante variados. Sin embargo, cuando *Glossopteris* habitaba esas regiones durante el Paleozoico superior, sus climas eran todos subpolares. **C.** Se han encontrado fósiles de *Lystrosaurus*, un reptil que vive en tierra, en tres de esas masas continentales.



**FIGURA 2.5.** Estos esquemas de John Holden ilustran varias explicaciones para la aparición de especies similares en masas de tierra que en la actualidad están separadas por un enorme océano (Reimpreso con el permiso de John Holden).

ístmicas) y saltos entre islotes eran las explicaciones más invocadas para esas migraciones (Figura 2.5). Sabemos, por ejemplo, que durante la Edad de Hielo, que acabó hace unos 8.000 años, la bajada del nivel del mar permitió a los mamíferos (entre ellos el ser humano) atravesar el corto estrecho de Bering que separa Rusia de Alaska. ¿Era posible que puentes de Tierra hubieran conectado en alguna ocasión África y Sudamérica y luego se hubieran sumergido por debajo del nivel del mar? Los mapas actuales del fondo oceánico confirman la opinión de Wegener de que, si hubieran existido puentes de tierra de esta magnitud, sus restos estarían todavía debajo del nivel del mar.

### Glossopteris

Wegener citó también la distribución del «helecho con semilla» fósil *Glossopteris* como una prueba de la existencia de Pangea (véase Figura 2.4). Se sabía que esta planta, identificada por sus hojas y semillas en forma de lengua que eran demasiado grandes para ser transportadas por el viento, estaba muy dispersa entre África, Australia, India y Sudamérica. Más tarde, se descubrieron también restos fósiles de *Glossopteris* en la Antártida<sup>2</sup>. Wegener también sabía que esos helechos con semilla y la flora asociada con ellos crecían solo en un clima subpolar. Por consiguiente, llegó a la conclusión de que cuando las masas de tierra estuvieron unidas se encontraban mucho más cerca del Polo Sur.

<sup>2</sup> En 1912, el Capitán Robert Scott y dos compañeros murieron congelados cayendo al lado de 89 cm de roca en su regreso de un intento fallido de ser el primero en llegar al Polo Sur. Estas muestras, recogidas en las morrenas del glaciar Beardmore, contenían restos fósiles de *Glossopteris*.





**FIGURA 2.6.** Unión de cordilleras montañosas a través del Atlántico Norte. **A.** Los Apalaches se sitúan a lo largo del flanco oriental de América del Norte y desaparecen de la costa de Terranova. Montañas de edad y estructuras comparables se encuentran en las Islas Británicas y Escandinavia. **B.** Cuando esas masas de tierra se colocan en sus posiciones previas a la separación, esas cadenas montañosas antiguas forman un cinturón casi continuo.

## Evidencia: tipos de roca y características geológicas

Cualquiera que haya intentado hacer un rompecabezas sabe que, además de que las piezas encajen, la imagen debe ser también continua. La imagen que debe encajar en el «rompecabezas de la deriva continental» es la de los tipos de roca y las características geológicas como los cinturones montañosos. Si los continentes estuvieron juntos en el pasado, las rocas situadas en una región concreta de un continente, deben parecerse estrechamente en cuanto a edad y tipo con las encontradas en posiciones adyacentes del continente al que estuvieron unidas una vez. Wegener encontró pruebas de rocas ígneas de 2.200 millones de años de antigüedad en Brasil que se parecían mucho a rocas de antigüedad semejante encontradas en África.

Evidencias similares pueden encontrarse en cinturones montañosos que terminan en la línea de costa, solo para reaparecer en las masas continentales situadas al otro lado del océano. Por ejemplo, el cinturón montañoso que comprende los Apalaches tiene una orientación noreste en el este de Estados Unidos y desaparece en la costa de Terranova (Figura 2.6). Montañas de edad y estructuras comparables se encuentran en las Islas Británicas y Escandinavia. Cuando se reúnen esas masas de tierra, como en la Figura 2.6B, las cadenas montañosas forman un cinturón casi continuo.

Wegener describió cómo las semejanzas en los rasgos geológicos a ambos lados del Atlántico conectaban esas masas de tierra cuando dijo: «Es como si fuéramos a recolocar los trozos rotos de un periódico juntando sus bordes y comprobando después si las líneas impresas coinciden. Si lo hacen, no queda más que concluir que los trozos estaban realmente unidos de esta manera»<sup>3</sup>.

## Evidencias paleoclimáticas

Dado que Wegener era un estudioso de los climas mundiales, sospechaba que los datos paleoclimáticos (*paleo* = antiguo, *climatic* = clima) podían también apoyar la idea de continentes móviles. Sus sospechas se reafirmaron cuando supo que se habían descubierto en África, Sudamérica, Australia e India pruebas de un periodo glaciario datado al final del Paleozoico (Figura 2.7A). Esto significaba que hace unos 300 millones de años, vastas láminas de hielo cubrían porciones extensas del hemisferio meridional, así como la India (Figura 2.7B). Gran parte de las zonas continentales de este periodo de glaciación paleozoica se encuentra en la actualidad en una franja de 30 grados en torno al Ecuador en un clima subtropical o tropical.

<sup>3</sup> Alfred Wegener, *The Origin of Continents and Oceans*, traducido de la cuarta edición alemana revisada de 1929 por J. Birman (Londres: Methuen, 1966).

A.



B.



C.



**FIGURA 2.7.** Pruebas paleoclimáticas de la deriva continental. **A.** Estriaciones glaciares (arañazos) y surcos como estos son producidos cuando los glaciares arrastran los derrubios de roca por el lecho de roca subyacente. La dirección del movimiento glacial puede deducirse de los patrones distintivos de los arañazos y los surcos alineados. (Foto de Gregory S. Springer). **B.** Casi al final del Paleozoico (hace unos 300 millones de años) los casquetes de hielo cubrían áreas extensas del hemisferio sur y la India. Las flechas indican la dirección del movimiento del hielo que puede deducirse del patrón de estriaciones glaciares y surcos encontrados en la roca subyacente. **C.** Se muestran los continentes recolocados en su posición anterior a la deriva cuando formaban parte de Pangea. Esta configuración explica las condiciones necesarias para generar un casquete glacial extenso y también explica las direcciones del movimiento glacial alejándose desde un área próxima a la posición actual del polo Sur.

¿Cómo pudieron formarse extensas láminas de hielo cerca del Ecuador? Una propuesta sugería que nuestro planeta experimentó un periodo de enfriamiento global extremo. Wegener rechazó esta explicación, porque durante el mismo lapso de tiempo geológico existieron grandes pantanos tropicales en el hemisferio norte. Estas ciénagas, con su extraordinaria vegetación, fueron finalmente enterradas y se convirtieron en carbón. En la actualidad estos depósitos comprenden los principales campos de carbón del este de Estados Unidos, el norte de Europa y Asia. Muchos de los fósiles encontrados en estas rocas carbonosas pertenecían a helechos arbóreos que poseían grandes frondas; un hecho compatible con un clima cálido y húmedo. Además, estos helechos arbóreos carecían de anillos de crecimiento, una característica de las plantas tropicales que crecen en regiones con fluctuaciones mínimas de la temperatura. Por el contrario, los árboles que habitan en latitudes medias, como los encontrados en la mayor parte de Estados Unidos, desarrollan múltiples anillos, uno por cada sesión de crecimiento.

Wegener sugirió que el supercontinente Pangea proporcionaba una explicación más plausible para la glaciación del final del Paleozoico. En esta configuración los continentes meridionales están unidos y se sitúan cerca del Polo Sur (Figura 2.7C). Esto explicaría las condiciones necesarias para generar extensiones enormes de hielo glacial sobre gran parte de esas masas de tierra. Al mismo tiempo, esta geografía colocaría las masas septentrionales actuales más cerca del Ecuador y explicaría los pantanos tropicales que generaron los enormes depósitos de carbón. Wegener estaba tan convencido de que su explicación era correcta que escribió: «Esta prueba es tan convincente que, por comparación, todos los demás criterios deben ocupar una posición secundaria».

¿Cómo se desarrolló un glaciar en el centro de la caliente y árida Australia? ¿Cómo migran los animales terrestres a través de amplias extensiones del océano? Por muy convincente que esta evidencia pudiera haber sido, pasaron 50 años antes de que la mayoría de la comunidad científica aceptara el concepto de la deriva continental y las conclusiones lógicas que de él se derivan.

## EL GRAN DEBATE

La propuesta de Wegener no fue muy discutida hasta 1924, cuando su libro fue traducido al inglés, francés, español y ruso. Desde ese momento hasta su muerte, en 1930, su hipótesis de la deriva tuvo muchas críticas hostiles. El respetado geólogo norteamericano R. T. Chamberlain afirmó: «La hipótesis de Wegener es en general del tipo de las hipótesis poco fundadas, en las que se toman considerables libertades con nuestro planeta,

y está menos ligada por restricciones o atada por hechos desagradables e inconvenientes que la mayoría de sus teorías rivales. Su atractivo parece radicar en el hecho de que se desarrolla un juego en el cual hay pocas reglas restrictivas y un código de conducta poco estipulado».

W. B. Scott, antiguo presidente de la Sociedad Filosófica Norteamericana, expresó la opinión que predominaba en Norteamérica sobre la deriva continental en menos palabras al describir la hipótesis como «un completo disparate».

## Rechazo de la hipótesis de la deriva continental

Una de las principales objeciones a la hipótesis de Wegener procedía de su incapacidad para identificar un mecanismo creíble para la deriva continental. Wegener propuso que las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol que producen las mareas de la Tierra eran también capaces de mover gradualmente los continentes por el planeta. Sin embargo, el destacado físico Harold Jeffrys contestó correctamente con el argumento de que las fuerzas mareales de la magnitud necesaria para desplazar los continentes habrían frenado la rotación de la Tierra en cuestión de unos pocos años.

Wegener sugirió también, de manera incorrecta, que los continentes más grandes y pesados se abrieron paso por la corteza oceánica más delgada de manera muy parecida a como los rompehielos atraviesan el hielo. Sin embargo, no existían pruebas que sugirieran que el fondo oceánico era lo bastante débil como para permitir el paso de los continentes sin deformarse él mismo de manera apreciable en el proceso.

En 1930, hizo su cuarto y último viaje a la zona glaciaria de Groenlandia (Recuadro 2.1). Aunque el objetivo fundamental de esta expedición era estudiar el duro clima polar de invierno en esta isla cubierta de hielo, Wegener continuó comprobando su hipótesis de la deriva continental. Como en las expediciones anteriores, utilizó métodos astronómicos en un intento por verificar que Groenlandia había derivado hacia el oeste con respecto a Europa.

En noviembre de 1930, mientras volvía de Eismitte (una estación experimental localizada en el centro de Groenlandia), Wegener murió junto con su compañero. Su intrigante idea, sin embargo, no murió. Tras la muerte de Wegener, trabajadores daneses siguieron tomando medidas de la posición de Groenlandia (1936, 1938 y 1948), pero no encontraron evidencias de la deriva. Así pues, la prueba final de Wegener fue un fracaso. En la actualidad el sistema de posicionamiento global (GPS) permite a los científicos medir el desplazamiento extremadamente gradual de los continentes que Wegener había intentado tan diligente, pero insatisfactoriamente, detectar.

## La deriva continental y el método científico

¿Qué fue mal? ¿Por qué no fue capaz Wegener de modificar el punto de vista científico establecido de su época? En primer lugar estaba el hecho de que, aunque el núcleo de su hipótesis era correcto, contenía algunos detalles incorrectos. Por ejemplo, los continentes no se abren paso a través del fondo oceánico, y la energía de las mareas es demasiado débil para impulsar el movimiento de los continentes. Además, para que cualquier teoría científica exhaustiva gane aceptación general, debe hacer frente al examen crítico desde todas las áreas de la ciencia. A pesar de la gran contribución de Wegener a nuestro conocimiento de la Tierra, no *todas* las pruebas apoyaban la hipótesis de la deriva continental como él la había formulado.

Aunque muchos de los contemporáneos de Wegener se oponían a sus puntos de vista, incluso hasta considerarlo claramente ridículo, algunos consideraron plausibles sus ideas. Entre los más notables de este último grupo se encontraba el eminente geólogo sudafricano Alexander du Toit y el bien conocido geólogo escocés Arthur Holmes. En 1928 Holmes propuso el primer mecanismo impulsor plausible para la deriva continental. En su libro *Geología física*, Holmes elaboraba esta idea sugiriendo que el flujo del material caliente dentro del manto era responsable de la propulsión de los continentes a través del planeta. En 1937, du Toit publicó *Our Wandering Continents*, donde eliminó algunos de los argumentos más débiles de Wegener y añadió una gran cantidad de nuevas pruebas en apoyo de su revolucionaria idea.

Para los geólogos que continuaron la búsqueda, el apasionante concepto del movimiento de los continentes atraía su interés. Otros consideraban la deriva continental como una solución a observaciones previamente inexplicables (Figura 2.8). Sin embargo, la mayor parte de la comunidad científica, en especial en Norteamérica, rechazó abiertamente la deriva continental o al menos la trató con un escepticismo considerable.

## DERIVA CONTINENTAL Y PALEOMAGNETISMO

En las dos décadas siguientes al fallecimiento de Wegener se arrojó poca luz sobre la hipótesis de la deriva continental. Sin embargo, a mediados de la década de los años cincuenta, empezaron a surgir dos nuevas líneas de evidencia, que cuestionaban seriamente la comprensión científica básica de cómo funciona la Tierra. Una línea procedía de las exploraciones del fondo oceánico y se tratará más adelante. La otra línea de pruebas procedía de un campo comparativamente nuevo: el *paleomagnetismo*.



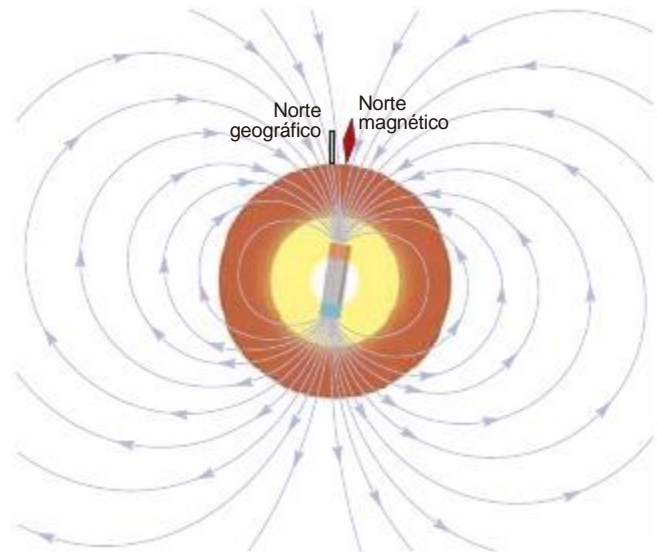
**FIGURA 2.8.** La tectónica de placas, el descendiente directo de la deriva continental, explica la distribución global de los terremotos más destructivos de la Tierra. Estas ruinas en Pisco, Perú, fueron consecuencia de un potente terremoto del 16 de agosto de 2007 que se generó a lo largo de la zona de subducción Perú-Chile (Foto de Sergio Erday/epa/Corbis).

## El campo magnético de la Tierra y el paleomagnetismo

Cualquiera que haya utilizado una brújula para orientarse sabe que el campo magnético de la Tierra tiene un polo norte y un polo sur magnéticos. En la actualidad estos polos magnéticos se alinean estrechamente, pero no exactamente, con los polos geográficos. (Los polos geográficos son los puntos en los que el eje de rotación terrestre hace intersección con la superficie.) El campo magnético de la Tierra es similar al generado por una barra imantada. Líneas de fuerza invisibles atraviesan el planeta y se extienden de un polo magnético al otro (Figura 2.9). La aguja de una brújula, un pequeño imán con libertad para rotar sobre un eje, se alinea con las líneas magnéticas de fuerza y apunta hacia los polos magnéticos.

A diferencia de la fuerza de la gravedad, no podemos sentir el campo magnético de la Tierra; su existencia se revela porque desvía la aguja de una brújula. Además, algunos minerales que aparecen de forma natural son magnéticos y están influidos por el campo magnético de la Tierra. Uno de los más comunes es la magnetita, que es abundante en las coladas de lava de composición basáltica<sup>4</sup>. Las lavas basálticas hacen erupción en la superficie a temperaturas superiores a los 1.000 °C, superando una temperatura umbral para el magnetismo conocido como **Punto de Curie** (unos 585 °C). Por

<sup>4</sup> Algunos sedimentos y rocas sedimentarias contienen suficientes granos de mineral que contiene hierro que adquieren una cantidad medible de magnetización.



**FIGURA 2.9.** El campo magnético de la Tierra consiste en líneas de fuerza muy parecidas a las que produciría una barra imantada gigante si se colocara en el centro de la Tierra.

consiguiente, los granos de magnetita de la lava fundida no son magnéticos. Sin embargo, a medida que la lava se enfría, esos granos ricos en hierro se magnetizan y alinean en la dirección paralela a las líneas de fuerza magnéticas existentes en ese momento. Una vez que los minerales solidifican, el magnetismo que poseen permanecerá normalmente «congelado» en esa posición. Por tanto, se comportan como la aguja de una brújula: «apuntan» hacia la posición de los polos magnéticos existentes cuando se enfriaron. Las rocas que se formaron hace miles o millones de años y que contienen un «registro» de la dirección de los polos magnéticos en el momento de su formación se dice que poseen **magnetismo remanente** o **paleomagnetismo**. Durante la década de 1950 se recogieron datos paleomagnéticos de las coladas de lava por todo el mundo.

## Deriva polar aparente

Un estudio del magnetismo de las rocas llevado a cabo en Europa por S. K. Runcorn y su equipo llevó a un descubrimiento interesante. El alineamiento magnético de los minerales ricos en hierro de las coladas de lava de diferentes épocas indicaba que la posición de los polos paleomagnéticos había cambiado con el tiempo. Una representación de la posición del polo norte magnético con respecto a Europa reveló que, durante los últimos 500 millones de años, la posición del polo había migrado de manera gradual desde una posición próxima a Hawái hacia el norte a su localización actual, cerca del Polo Norte (Figura 2.10A). Esta era una prueba sólida a favor de que o bien los polos magnéticos habían migrado a lo largo del tiempo, una idea conocida como

## ENTENDER LA TIERRA

Alfred Wegener (1880-1930): explorador polar y visionario

RECUADRO 2.1

Alfred Wegener, explorador polar y visionario, nació en Berlín en 1889. Completó sus estudios universitarios en Heidelberg e Innsbruck. Aunque obtuvo su doctorado en astronomía (1905), también desarrolló un gran interés por la meteorología. En 1906, él y su hermano Kurt establecieron un récord de duración de vuelo en globo al permanecer en el aire durante 52 h, batiendo el récord anterior, de 17 h. Ese mismo año, se incorporó a una expedición danesa al noreste de Groenlandia, donde es posible que se planteara por primera vez la posibilidad de la deriva continental. Ese viaje marcó el inicio de una vida dedicada a la exploración de esta isla cubierta por hielo donde moriría unos 25 años después.

Tras su primera expedición a Groenlandia, Wegener regresó a Alemania en 1908 y obtuvo un puesto académico como profesor de meteorología y astronomía. Durante esta época, firmó un artículo sobre la deriva continental y escribió un libro sobre meteorología. Wegener volvió a Groenlandia entre 1912 y 1913 con su colega J. P. Koch para una expedición que distinguió a Wegener como la primera persona que hizo una travesía científica del núcleo glaciar de 1.200 km de la isla (Figura 2.A).

Poco después de su regreso de Groenlandia, Wegener se casó con Else Köppen, hija de Wladimir Köppen, un eminente climatólogo que desarrolló una clasificación de los climas del mundo que todavía hoy se utiliza. Poco después de su boda, Wegener combatió en la Primera Guerra Mundial, durante la que fue herido dos veces, pero permaneció en el ejército hasta el fin de la guerra. Durante su periodo de convalecencia, Wegener escribió su controvertido libro sobre la deriva continental titulado *The Origin of Continents and Oceans*. Wegener firmó las ediciones revisadas de 1920, 1922 y 1929.

Además de su pasión por encontrar pruebas que respaldaran la deriva continental, Wegener también escribió numerosos artículos científicos sobre meteorología y geofísica. En 1924 colaboró con su suegro, Köppen, en un libro sobre los cambios climáticos antiguos (paleoclimas).

En la primavera de 1930, Wegener partió a su cuarta y última expedición a su querida Groenlandia. Uno de los objetivos del viaje era establecer un campo centroglaciar (estación Eismitte) situado a 400 km de la costa occidental de Groenlandia, a una elevación de casi 3.000 m. Dado que el inusual mal tiempo entorpeció los intentos de establecer

este puesto, solo llegó al campo una parte de los suministros necesarios para los dos científicos allí emplazados.

Como jefe de la expedición, Wegener dirigió un grupo de auxilio formado por el meteorólogo Fritz Lowe y trece groenlandeses para reabastecer la estación Eismitte. La abundante nieve y unas temperaturas inferiores a los  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  hicieron que todos los groenlandeses salvo uno regresaran al campo base. Wegener, Lowe y Rasmus Villumsen continuaron caminando.

Cuarenta días después, el 30 de octubre de 1930, Wegener y sus dos compañeros llegaron a la estación Eismitte. Incapaces de establecer comunicación con el campo base, los investigadores a quienes se creía desesperadamente necesitados de suministros, habían conseguido excavar una cueva en el hielo a modo de refugio e intentado alargar sus suministros durante todo el invierno. La heroica carrera para transportar suministros había sido innecesaria.

Lowe decidió pasar el invierno en Eismitte debido a su agotamiento y que tenía los miembros congelados. Sin embargo, se dijo que Wegener «parecía tan fresco, feliz y en forma como si se hubiera ido a dar un paseo». Dos días después, el 1 de noviembre de 1930, celebraron el 50<sup>o</sup> cumpleaños de Wegener

y él y su compañero groenlandés, Rasmus Villumsen, empezaron su camino cuesta abajo, de regreso a la costa. Nunca llegaron.

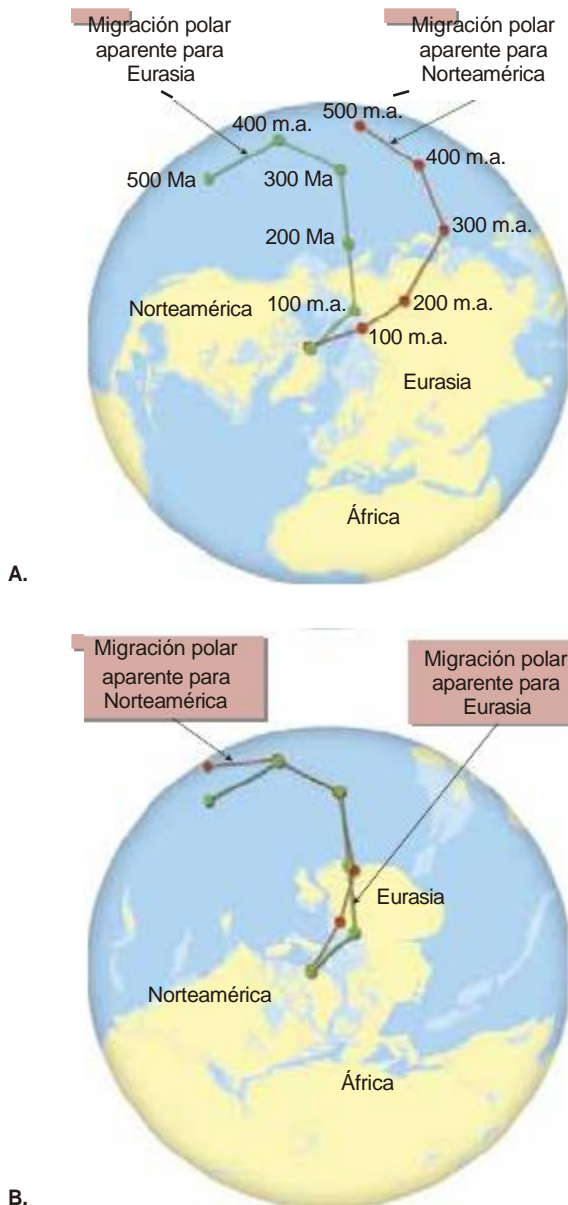
Debido a la imposibilidad de mantener contacto entre las estaciones durante los meses de invierno, se creyó que ambos habían pasado el invierno en Eismitte. Si bien se desconocen la fecha y la causa exactas de la muerte de Wegener, un equipo de búsqueda encontró su cuerpo debajo de la nieve, aproximadamente a medio camino entre Eismitte y la costa. Como se sabía que Wegener estaba en buena forma física y en su cuerpo no había señales de traumatismos, inanición o exposición a la intemperie, se cree que pudo sufrir un ataque cardíaco mortal<sup>1</sup>. Se supone que Villumsen, el compañero groenlandés de Wegener, murió también durante el viaje, aunque nunca se encontraron sus restos.

El equipo de búsqueda enterró a Wegener en la posición en la que le habían encontrado y, con mucho respeto, construyeron un monumento de nieve. Después, en el mismo lugar se erigió una cruz de hierro de 6 m. Desde hace tiempo todo ello ha desaparecido bajo la nieve y se ha acabado convirtiendo en una parte de este casquete glacial.

<sup>1</sup> Wegener era un gran fumador, lo que algunos han sugerido que contribuyó a su muerte.



**FIGURA 2.A.** Alfred Wegener esperando que pase el invierno ártico de 1912-1913 durante una expedición a Groenlandia, donde hizo una travesía de 1.200 km por la parte más amplia del casquete glacial de la isla (Foto cortesía de Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz, Berlín).



**FIGURA 2.10.** Recorridos simplificados de migración aparente de los polos según se ha deducido de los datos paleomagnéticos de Norteamérica y Eurasia. **A.** El recorrido más occidental, determinado a partir de los datos procedentes de Norteamérica, se produjo por el movimiento hacia el oeste de Norteamérica desde Eurasia durante la ruptura de Pangea. **B.** Las posiciones de las trayectorias de migración cuando se reúnen las masas continentales.

*deriva polar*, o bien que las coladas de lava se movían: en otras palabras, Europa se había desplazado con respecto a los polos.

Aunque se sabe que los polos magnéticos se mueven en una trayectoria errática en torno a los polos geográficos, los estudios de paleomagnetismo de numerosos puntos demuestran que las posiciones de los polos magnéticos, cuya media se ha calculado durante miles de años, se corresponden estrechamente con las posiciones de los polos geográficos. Por consiguiente, una

explicación más aceptable para las trayectorias de la aparente migración de los polos era la proporcionada por la hipótesis de Wegener. Si los polos magnéticos se mantienen estacionarios, su *movimiento aparente* es producido por la deriva de los continentes.

Unos pocos años después se obtuvo otra prueba a favor de la deriva continental cuando se representó una trayectoria de las migraciones polares para Norteamérica (véase Figura 2.10A). Se encontró que durante los 300 primeros años más o menos las trayectorias de Norteamérica y Europa eran similares en dirección, pero que estaban separadas por unos 5.000 km. Luego, durante la mitad de la era Mesozoica (hace 180 millones de años), empezaron a converger en el actual Polo Norte. Dado que el Océano Atlántico del norte tiene unos 5.000 km de ancho, la explicación a estas curvas fue que Norteamérica y Europa estuvieron juntas hasta el Mesozoico, cuando el Atlántico empezó a abrirse. A partir de ese momento, estos continentes se fueron separando continuamente. Cuando se vuelven a colocar Norteamérica y Europa en sus posiciones previas a la deriva, como se muestra en la Figura 2.10B, estas trayectorias de aparente migración coinciden.

Aunque los datos paleomagnéticos (medidas de campo magnético encerrado en las rocas antiguas) respaldaban con fuerza la hipótesis de la deriva continental, las técnicas utilizadas para extraerlos eran relativamente nuevas y no aceptadas por todos. Además, la mayoría de geólogos no estaban familiarizados con los resultados proporcionados por esos estudios. Pese a esos problemas, las pruebas paleomagnéticas restituyeron la deriva continental como un tema respetable de la investigación científica. ¡Había empezado una nueva era!

## COMIENZO DE UNA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

Después de la Segunda Guerra Mundial, geólogos marinos equipados con sónar y financiados por la Oficina Norteamericana de Investigación Naval se embarcaron en un periodo de exploración oceanográfica sin precedentes. Durante las dos décadas siguientes, empezó a surgir una imagen mucho mejor del fondo oceánico. De estos estudios llegaría el descubrimiento de un **sistema de elevadas dorsales oceánicas** que serpentea por todos los principales océanos de una manera similar a las costuras de una pelota de béisbol. Uno de los segmentos de esta estructura interconectada se extiende por el centro del océano Atlántico y por ese motivo se la denomina *dorsal centroatlántica*.

En otras partes del océano se estaban haciendo también nuevos descubrimientos. Los estudios llevados a cabo en el Pacífico occidental demostraron que se producía

actividad sísmica a profundidades mucho mayores por debajo de las fosas submarinas que en otros ámbitos tectónicos. De igual importancia fue el hecho de que los dragados del fondo oceánico no descubrieron corteza oceánica con una edad superior a los 180 millones de años. Además, las acumulaciones de sedimentos en las cuencas oceánicas profundas eran sorprendentemente delgadas y no de miles de metros, tal como se había predicho. ¿Era la velocidad de sedimentación en el pasado geológico mucho menor de lo que es en la actualidad o era el fondo oceánico más joven de lo que se pensaba?

## La hipótesis de la expansión del fondo oceánico

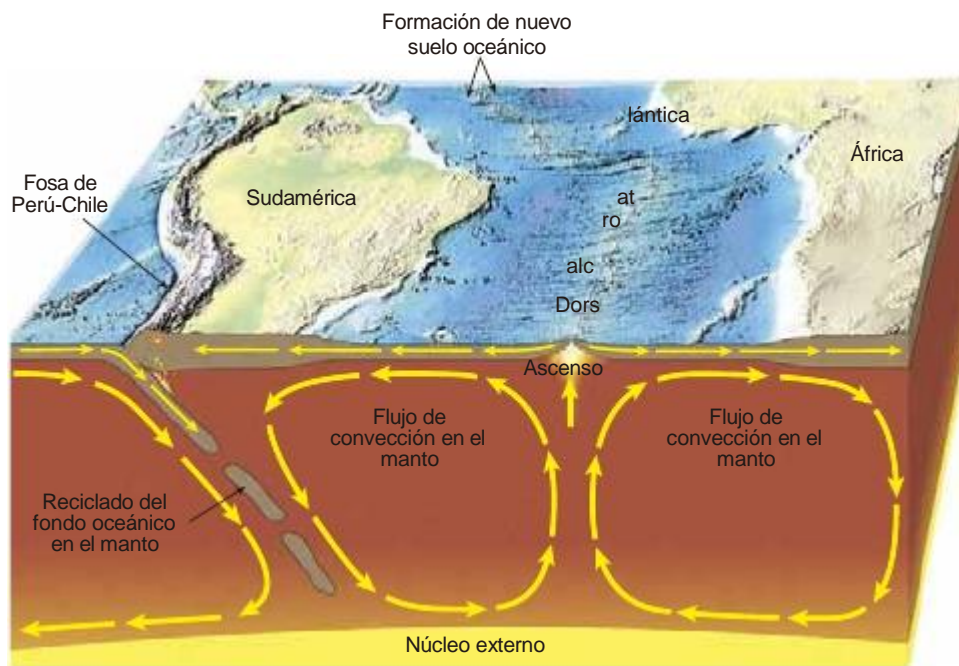
A principios de los años sesenta, Harry Hess, de la Universidad de Princeton, incorporó estos hechos recién descubiertos a una hipótesis que se denominó **expansión del fondo oceánico**. En el clásico artículo de Hess, el autor proponía que las dorsales oceánicas estaban localizadas sobre zonas de ascenso convectivo en el manto (Figura 2.11)<sup>5</sup>. A medida que el material que asciende alcanza la base de la litosfera, se expande lateralmente,

<sup>5</sup> Aunque Hess propuso que la convección en la Tierra consiste en corrientes ascendentes procedentes del manto profundo de debajo de las dorsales oceánicas, ahora es evidente que estas corrientes ascendentes son estructuras someras no relacionadas con la convección profunda del manto. Trataremos este tema en el Capítulo 13.

transportando el fondo oceánico de una manera parecida a como se mueve una cinta transportadora alejándose de la cresta de la dorsal. En estos puntos, las fuerzas tensionales fracturan la corteza y proporcionan vías de intrusión magmática para generar nuevos fragmentos de corteza oceánica. Por tanto, a medida que el fondo oceánico se aleja de la cresta de la dorsal, va siendo sustituido por corteza recién formada. Hess propuso, además, que las ramas descendentes de estas corrientes de convección se producen en la proximidad de las fosas submarinas. Hess sugirió que estas son sitios donde la corteza oceánica es empujada de nuevo hacia el interior de la tierra. Como consecuencia, las porciones más antiguas del fondo oceánico se van consumiendo de manera gradual a medida que descienden hacia el manto. Como resumió un investigador, «¡no sorprende que el fondo oceánico sea joven, está siendo renovado constantemente!».

Hess presentó su artículo como un «ensayo en geopoésía», lo que reflejaba su consideración sobre la naturaleza especulativa de su idea. O, como otros han sugerido, quizás quería desviar la crítica de quienes seguían siendo hostiles a la deriva continental. En cualquier caso, su hipótesis proporcionó ideas específicas demostrables, lo que constituye la marca distintiva de la buena ciencia.

Con el establecimiento de la hipótesis de la expansión del fondo oceánico, Harry Hess había iniciado otra fase de esta revolución científica. Las pruebas



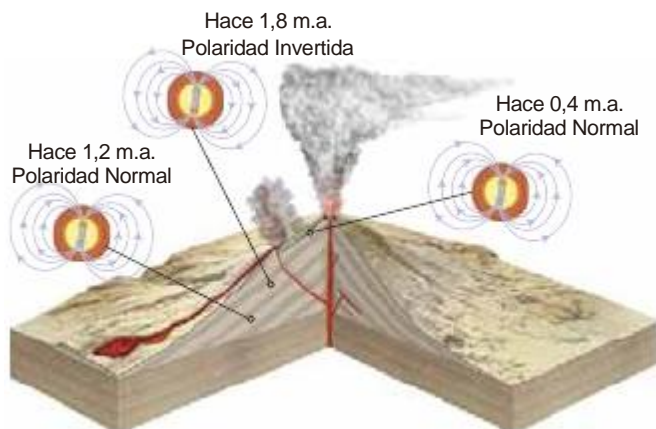
**FIGURA 2.11.** Expansión del fondo oceánico. Harry Hess propuso que la ascensión del material del manto a lo largo del sistema de dorsales centro oceánicas creaba nuevos fondos oceánicos. Hess también sugirió que el movimiento de convección del material del manto transporta el fondo oceánico de una manera parecida a como se mueve una cinta transportadora hasta las fosas submarinas, donde el fondo oceánico desciende al manto.

concluyentes que apoyaron esta idea procedieron unos pocos años después del trabajo de un joven estudiante de la Universidad de Cambridge, Fred Vine, y su supervisor, D. H. Matthews (véase Recuadro 2.2). La importancia de la hipótesis de Vine-Matthews radicaba en que conectó dos ideas que antes se consideraban no relacionadas: la hipótesis de la expansión del fondo oceánico y las inversiones magnéticas recién descubiertas.

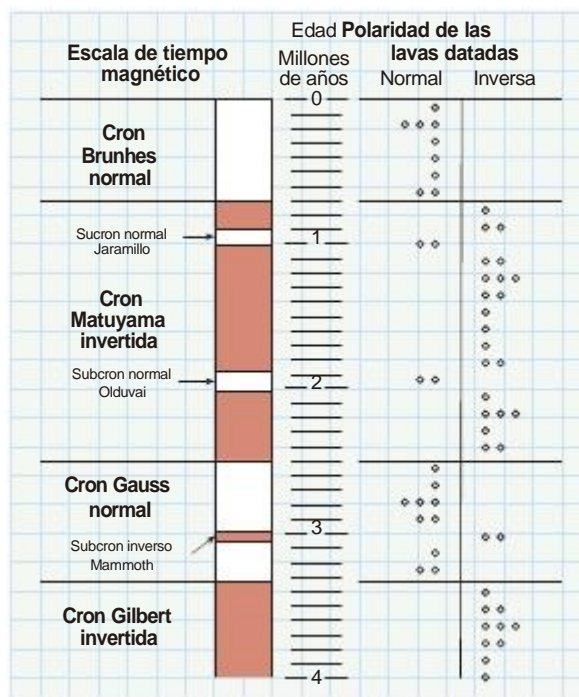
## Inversiones magnéticas: pruebas de la expansión del fondo oceánico

Aproximadamente en la misma época en que Hess formuló el concepto de la expansión del fondo oceánico, los geofísicos descubrieron que, durante periodos de centenares de millares de años, el campo magnético de la Tierra cambia periódicamente de polaridad. Durante una **inversión geomagnética**, el polo norte magnético se convierte en el polo sur magnético, y viceversa. La lava que se solidifica durante uno de los periodos de polaridad inversa se magnetizará con la polaridad opuesta a la de las rocas que se están formando en la actualidad. Cuando las rocas muestran el mismo magnetismo que el campo magnético terrestre actual, se dice que tiene **polaridad normal**, mientras que las rocas que muestran el magnetismo opuesto se dice que tienen **polaridad invertida**.

Una vez confirmado el concepto de las inversiones magnéticas, los investigadores empezaron a establecer una escala temporal para esos sucesos. La tarea consistía en medir la polaridad magnética de numerosas coladas de lava y utilizar técnicas de datación radiométrica para establecer sus edades (Figura 2.12). En la Figura 2.13 se muestra la **escala de tiempo magnético** establecida para los últimos millones de años. Las



**FIGURA 2.12.** Ilustración esquemática del paleomagnetismo conservado en coladas de lava de varias edades. Se utilizaron datos paleomagnéticos procedentes de varios puntos del planeta para establecer la escala temporal de inversiones de polaridad mostrada en la Figura 2.13.



**FIGURA 2.13.** Escala temporal del campo magnético de la Tierra en el pasado reciente. Esta escala temporal se desarrolló estableciendo la polaridad magnética para coladas de lava de edad conocida (Datos de Allen Cox y G. B. Dalrymple).

divisiones principales de la escala de tiempo magnético se denominan *crones* y duran aproximadamente un millón de años. A medida que se dispuso de más mediciones, los investigadores se dieron cuenta de que se producen varias inversiones de corta duración (menos de 200.000 años) durante un cron.

Mientras, los oceanógrafos habían empezado a realizar estudios magnéticos del fondo oceánico junto con sus esfuerzos por cartografiar con detalle la topografía del fondo. Estos estudios magnéticos se consiguieron remolcando instrumentos muy sensibles, denominados **magnetómetros**, detrás de barcos de investigación. El objetivo de estos estudios geofísicos era cartografiar las variaciones de la intensidad del campo magnético de la Tierra provocadas por diferencias de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes de la corteza.

El primer estudio exhaustivo de este tipo fue llevado a cabo en la costa Pacífica de Norteamérica y se obtuvo un resultado inesperado. Los investigadores descubrieron bandas alternas de magnetismo de alta y baja intensidad, como se muestra en la Figura 2.14. Este modelo relativamente simple de variación magnética desafió cualquier explicación hasta 1963, cuando Fred Vine y D. H. Matthews demostraron que las bandas de alta y baja intensidad respaldaban el concepto de Hess de expansión del fondo oceánico. Vine y Matthews sugirieron que las franjas de magnetismo de alta intensidad son regiones donde el paleomagnetismo de la corteza

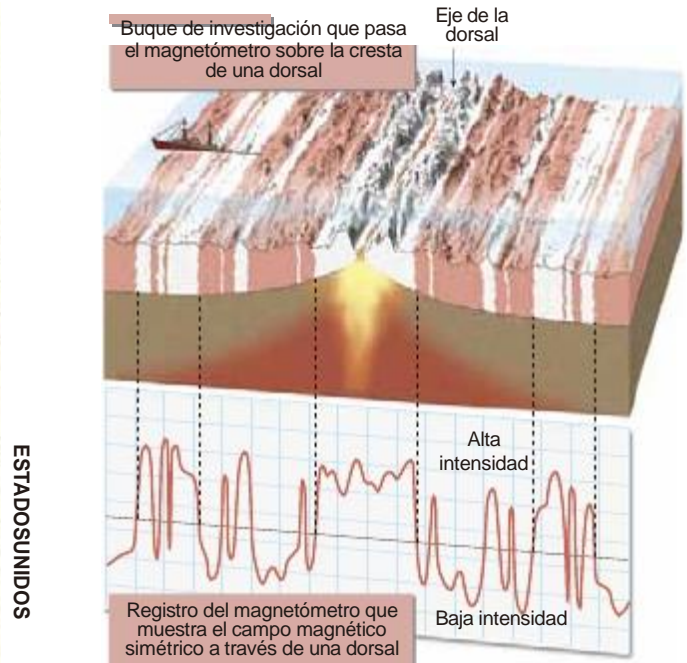




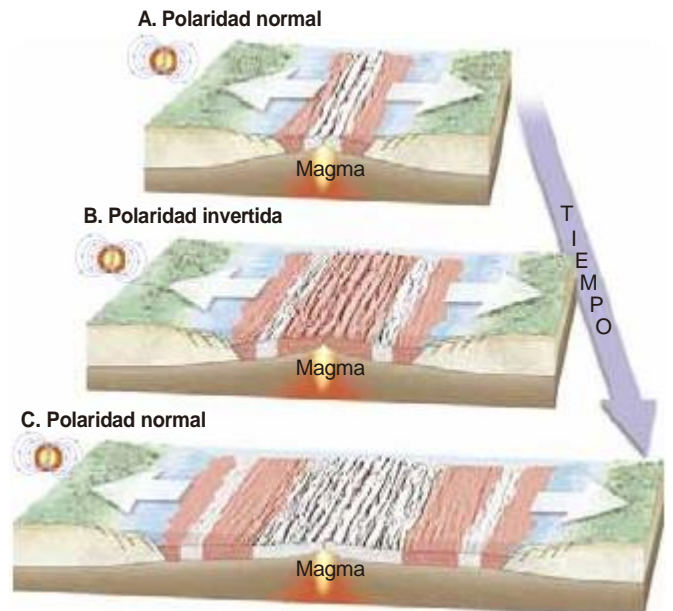
**FIGURA 2.14.** Modelo de franjas alternas de magnetismo de alta y baja intensidad descubierto en la costa del Pacífico de Norteamérica.

oceánica tiene polaridad normal (Figura 2.15). Por consiguiente, esas rocas *potencian* (refuerzan) el campo magnético de la Tierra. A la inversa, las franjas de baja intensidad son regiones donde la corteza oceánica está polarizada en la dirección inversa y, por consiguiente, *debilita* el campo magnético existente. Pero, ¿cómo se distribuyen franjas paralelas de roca con magnetización normal e invertida por todo el fondo oceánico?

Vine y Matthews razonaron que, conforme el magma se solidifica a lo largo de los estrechos rifts de la cresta de las dorsales oceánicas, se magnetiza con la polaridad del campo magnético existente (Figura 2.16). A causa de la expansión del fondo oceánico, la anchura de esta franja de corteza magnetizada aumentaría de una manera gradual. Cuando se produce una inversión de la polaridad del campo magnético de la Tierra, el fondo oceánico recién formado (con una polaridad inversa) se formaría en medio de la franja antigua. Gradualmente las dos partes de la franja antigua son transportadas en direcciones opuestas lejos de la cresta de la dorsal. Las inversiones posteriores construirían un modelo de franjas magnéticas normales e inversas como se muestra en la Figura 2.16. Dado que se van añadiendo nuevas rocas en cantidades iguales en los dos lados del fondo oceánico en expansión, cabe esperar que el modelo de franjas (tamaño y polaridad) encontrado en



**FIGURA 2.15.** El fondo oceánico como una cinta registradora magnética. Las intensidades magnéticas se registran cuando se hace atravesar un magnetómetro sobre un segmento de la dorsal Centroatlántica. Nótese las bandas simétricas de magnetismo de alta y baja intensidad que corren paralelas a la cresta de la dorsal. Vine y Matthews sugirieron que las bandas de magnetismo de alta intensidad se producen donde las rocas oceánicas de magnetismo de magnetismo normal potencian el campo magnético existente. A la inversa, las bandas de baja intensidad son regiones donde la corteza está polarizada en la dirección inversa, lo que debilita el campo magnético existente.



**FIGURA 2.16.** A medida que se añade nuevo basalto al fondo oceánico en las dorsales centro oceánicas, se magnetiza de acuerdo con el campo magnético existente en la Tierra. Por consiguiente, se comporta de forma parecida a una grabadora a medida que registra cada inversión del campo magnético de nuestro planeta.

un lado de la dorsal oceánica sea una imagen especular del otro lado. Unos pocos años después, un estudio a través de la dorsal centroatlántica justo al sur de Islandia reveló un modelo de franjas magnéticas que mostraban un grado considerable de simetría con respecto al eje de la dorsal.

A finales de los años sesenta la marea de la opinión científica había cambiado de rumbo. Sin embargo, siguió habiendo algo de oposición a la tectónica de placas durante al menos un decenio. No obstante, se había hecho justicia a Wegener y la revolución de la Geología se estaba aproximando a su final.

## TECTÓNICA DE PLACAS: EL NUEVO PARADIGMA



### PLATE TECTONICS

Introduction

En 1968 se unieron los conceptos de deriva continental y expansión del fondo oceánico en una teoría mucho más completa conocida como **tectónica de placas**

(*tekton* = construir). Según el modelo de la tectónica de placas, el manto superior, junto con la corteza suprayacente, se comporta como una capa fuerte y rígida, conocida como la **litosfera** (*lithos* = piedra, *sphere* = esfera), rota en segmentos, a los que se suele denominar *placas* (Figura 2.17). La litosfera es más delgada en los océanos, donde su grosor puede variar entre unos pocos kilómetros a lo largo del eje del sistema de dorsales oceánicas y unos 100 km en las cuencas oceánicas profundas. Por el contrario, la litosfera continental, por regla general, tiene un grosor superior a 100 km y puede extenderse a una profundidad de 200 a 300 km debajo de los cratones continentales estables.

La litosfera, a su vez, se encuentra por encima de una región más dúctil del manto, conocida como la **astenosfera** (*asthenos* = débil, *sphere* = esfera). Las temperaturas y presiones de la astenosfera superior (a una profundidad de 100 a 200 km) son tales que las rocas que allí se encuentran se aproximan mucho a sus temperaturas de fusión y, por consiguiente, responden al esfuerzo fluyendo. Como consecuencia, la capa exterior rígida de la Tierra se separa efectivamente de las capas inferiores, lo que le permite moverse con independencia.



**FIGURA 2.17.** Ilustración de las principales placas litosféricas de la Tierra.

## ENTENDER LA TIERRA

### La prioridad de las ciencias

### RECUADRO 2.2

Suele darse la prioridad, o crédito, de una idea o descubrimiento científico al investigador, o grupo de investigadores, que publica primero sus descubrimientos en una publicación científica. Sin embargo, no es infrecuente que dos investigadores diferentes alcancen conclusiones parecidas casi a la vez. Dos ejemplos bien conocidos son los descubrimientos independientes de la evolución orgánica de Charles Darwin y Alfred Wallace, y el desarrollo del cálculo de Isaac Newton y Gottfried W. Leibniz. Del mismo modo, algunas de las ideas principales que condujeron a la revolución de la tectónica en las ciencias de la Tierra también fueron descubiertas independientemente por más de un grupo de investigadores.

Aunque la hipótesis de la deriva continental se asocia, correctamente, con el nombre de Alfred Wegener, no fue el primero que sugirió la movilidad continental. De hecho, Francis Bacon, en 1620, apuntaba las similitudes de los contornos de África y Sudamérica; sin embargo, no desarrolló más esta idea. Casi tres siglos más tarde, en 1910, dos años antes de que Wegener presentara sus ideas de una manera formal, el geólogo estadounidense F. B. Taylor publicó el primer artículo que esbozaba el concepto que ahora llamamos deriva continental.

Entonces, ¿por qué se atribuye esta idea a Wegener? Porque los artículos firmados por Taylor tuvieron un impacto relativamente pequeño entre la comunidad científica; Wegener no conocía el trabajo de Taylor. Por consiguiente, se cree que Wegener llegó a la misma conclusión simultáneamente y de una manera independiente. No obstante,

es todavía más importante el hecho de que Wegener hizo grandes esfuerzos durante su vida profesional para proporcionar una gran cantidad de pruebas que respaldaran su hipótesis. Por el contrario, parece que Taylor se contentó con afirmar: «Existen muchos enlaces de unión que muestran que África y Sudamérica estuvieron unidas alguna vez». Además, mientras Taylor veía la deriva continental como una idea algo especulativa, Wegener estaba *seguro* de que los continentes habían ido a la deriva. De acuerdo con H. W. Menard en su libro *The Ocean of Truth*, a Taylor le incomodaba que sus ideas se asociaran con la hipótesis de Wegener. Menard cita a Taylor, que escribió: «Wegener era un joven profesor de meteorología. Algunas de sus ideas son muy distintas de las mías y fue demasiado lejos con su especulación».

Otra controversia relacionada con la prioridad apareció con el desarrollo de la hipótesis de la expansión del fondo oceánico. En 1960, Harry Hess, de la Universidad de Princeton, escribió un artículo que resumía sus ideas sobre la expansión del fondo oceánico. En vez de darse prisa para publicarlo, envió copias del manuscrito a numerosos colegas, una práctica habitual entre los investigadores. Mientras tanto, y aparentemente de una manera independiente, Robert Dietz, de la Institución de Oceanografía Scripps, publicó un artículo similar en la respetada revista *Nature* (1961), titulado «Evolución de los continentes y la cuenca oceánica por expansión del fondo oceánico». Cuando Dietz conoció el artículo anterior no publicado de Hess, reconoció que la prioridad para la idea de la expansión del fondo oceánico era de Hess. Es

interesante destacar que las ideas básicas del artículo de Hess aparecían, de hecho, en un libro de texto que Arthur Holmes escribió en 1944. Por tanto, la prioridad para la expansión del fondo oceánico debería pertenecer a Holmes. Sin embargo, tanto Dietz como Hess presentaron nuevas ideas que influyeron en el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas. Así, los historiadores asocian los nombres de Hess y Dietz con el descubrimiento de la expansión del fondo oceánico con menciones ocasionales a las contribuciones de Holmes.

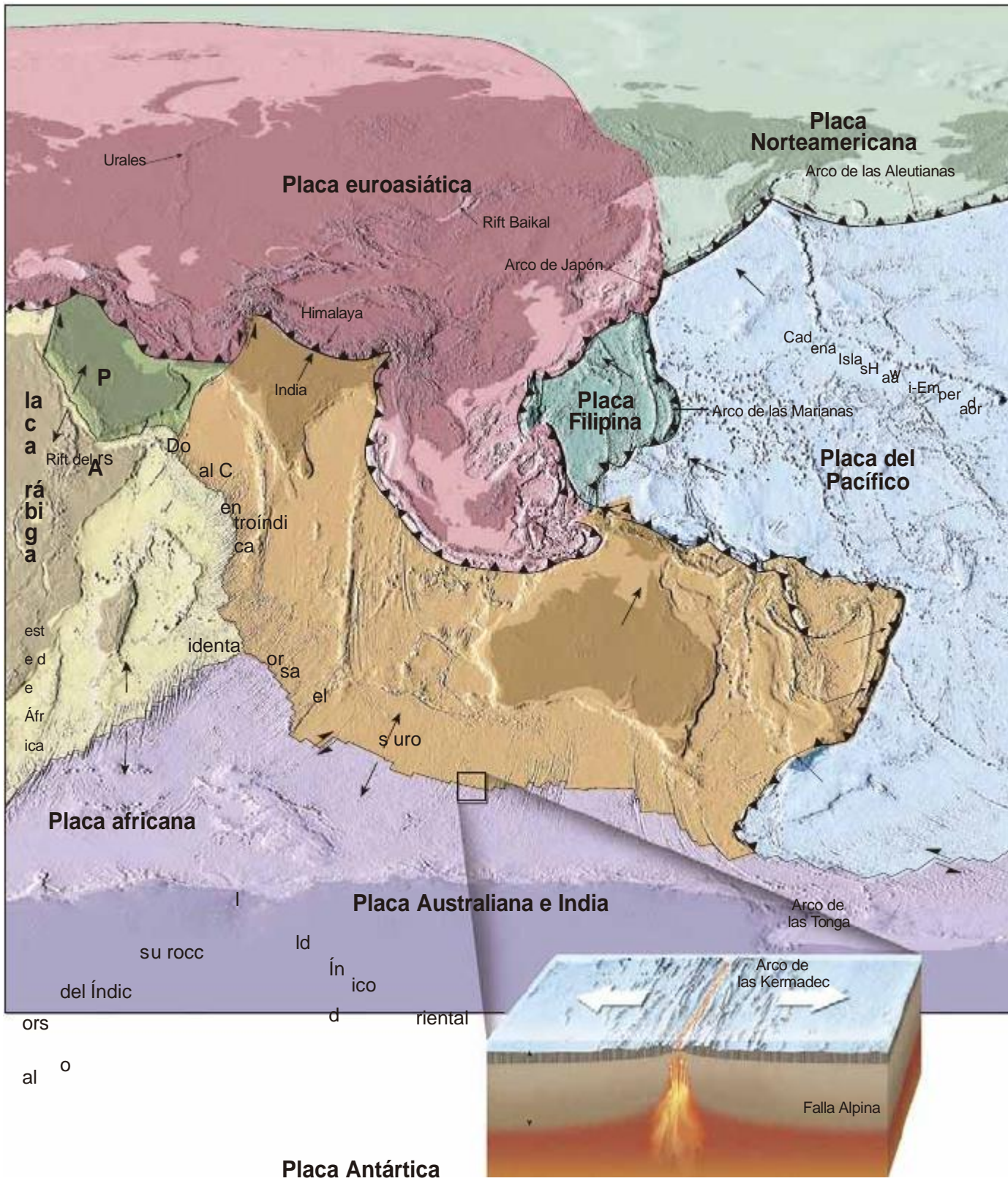
Quizás el aspecto más controvertido de la prioridad científica relacionada con la tectónica de placas se produjo en 1963, cuando Fred Vine y D. H. Matthews publicaron su artículo que relacionaba la hipótesis de la expansión del fondo oceánico con los datos recién descubiertos sobre las inversiones magnéticas. No obstante, nueve meses antes, un artículo similar del geofísico canadiense L. W. Morley no fue aceptado para su publicación. Un revisor del artículo de Morley comentó: «Una especulación como esta es un tema de conversación interesante en una fiesta, pero no es el tipo de tema que debería publicarse bajo la protección científica seria». Al final, el artículo de Morley se publicó en 1964, pero ya se había establecido la prioridad y la idea se conoció como la hipótesis de Vine y Matthews. En 1971, N. D. Watkins escribió, acerca del artículo de Morley: «El manuscrito tenía desde luego un interés histórico sustancial, situándose como el artículo probablemente más significativo entre los artículos de Geología a los que se ha negado la publicación».

## Las principales placas de la Tierra

La litosfera está compuesta por unos 20 segmentos de tamaños y formas irregulares, llamadas **placas litosféricas o tectónicas**, que están en constante movimiento unas con respecto a las otras. Como se muestra en la Figura 2.18, se reconocen siete placas principales. Estas placas, que representan el 94 por ciento del área de superficie de la Tierra, son la placa *Norteamericana*, la *Sudamericana*, la *del Pacífico*, la *Africana*, la *Euroasiática*, la *Australiana-India* y la *Antártica*. La mayor es la placa del Pacífico, que abarca una porción significativa de la cuenca del océano Pacífico. Las otras seis placas grandes incluyen un continente entero más una cantidad significativa de fondo oceánico. Obsérvese, en la Figura 2.18,

que la placa Sudamericana abarca casi toda Sudamérica y aproximadamente la mitad del suelo del Atlántico sur. Esto constituye una importante diferencia con la hipótesis de la deriva continental de Wegener, quien propuso que los continentes se movían a través del fondo oceánico, no con él. Obsérvese también que ninguna de las placas está definida completamente por los márgenes de un único continente.

Las placas de tamaño mediano son la *Caribeña*, la de *Nazca*, la *Filipina*, la *Arábiga*, la de *Cocos*, la *Escocesa* y la de *Juan de Fuca*. Estas placas, con excepción de la placa Arábiga, están compuestas fundamentalmente por litosfera oceánica. Además, se han identificado diversas placas más pequeñas (*microplacas*), que no se muestran en la Figura 2.18.



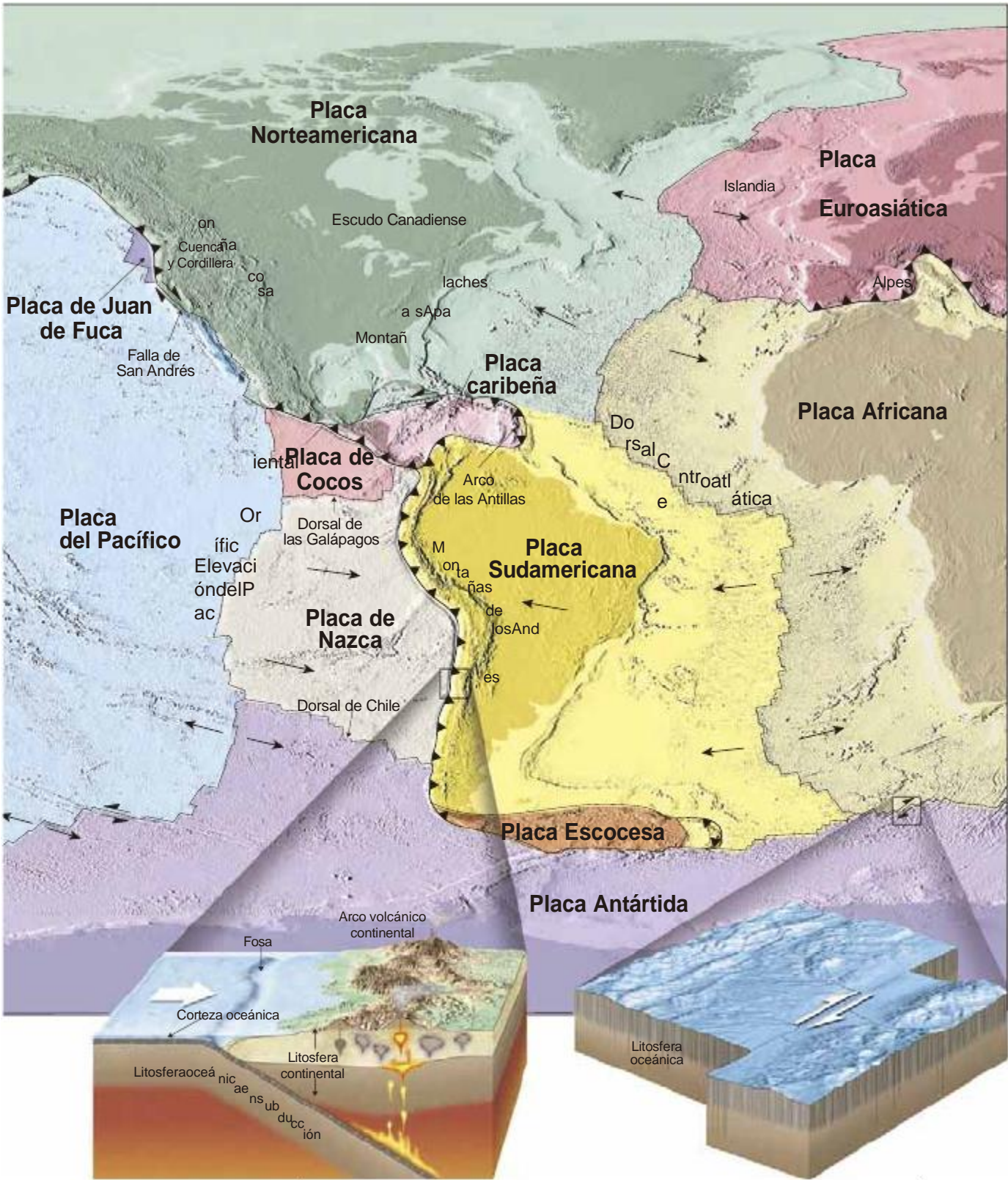
Litosfera  
Oceánica

Fusión

Astenosfera

### A. Borde divergente

**FIGURA 2.18.** Un mosaico de las placas rígidas que constituyen la superficie externa de la Tierra (Tomado de W. B. Hamilton, U.S. Geological Survey).



B. Borde convergente

C. Borde transformante

## Bordes de placa

Uno de los principales fundamentos de la teoría de la tectónica de placas es que las placas se mueven como unidades semi-coherentes en relación con todas las demás placas. A medida que se mueven las placas, la distancia entre dos puntos situados sobre placas diferentes, como Nueva York y Londres, cambia de manera gradual mientras que la distancia entre puntos situados sobre la misma placa (Nueva York y Denver, por ejemplo) se mantiene relativamente constante.

Dado que las placas están en constante movimiento en relación con las demás, la mayoría de las principales interacciones entre ellas (y, por consiguiente, la mayor deformación) se produce a lo largo de sus *bordes*. De hecho, los bordes de placa se establecieron por primera vez representando las localizaciones de los terremotos y los volcanes. Las placas tienen tres tipos distintos de bordes, que se diferencian en función del tipo de movimiento que exhiben. Esos bordes se muestran en la parte inferior de la Figura 2.18 y se describen brevemente aquí:

1. **Bordes divergentes** (*bordes constructivos*): donde dos placas se separan, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo fondo oceánico (Figura 2.18A).
2. **Bordes convergentes** (*bordes destructivos*): donde dos placas se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, para ser finalmente reabsorbida en el manto, o posiblemente la colisión de dos bloques continentales para crear un sistema montañoso (Figura 2.18B).
3. **Bordes de falla transformante** (*bordes pasivos*): donde dos placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción ni la destrucción de litosfera (Figura 2.18C).

Los bordes de placa divergentes y convergentes representan cada uno alrededor del 40 por ciento de todos los bordes de placa. Las fallas transformantes representan el 20 por ciento restante. En las siguientes secciones se resumirá la naturaleza de los tres tipos de límites de placa.

## BORDES DIVERGENTES



**PLATE TECTONICS**  
Divergent Boundaries

La mayoría de los **bordes divergentes** (*di* = aparte; *vergere* = moverse) se sitúa a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas y puede considerarse *bordes de placa constructivos*, dado que es donde se genera nuevo fondo oceánico (Figura 2.19). Los bordes divergentes también se denominan **centros de expansión**, porque la

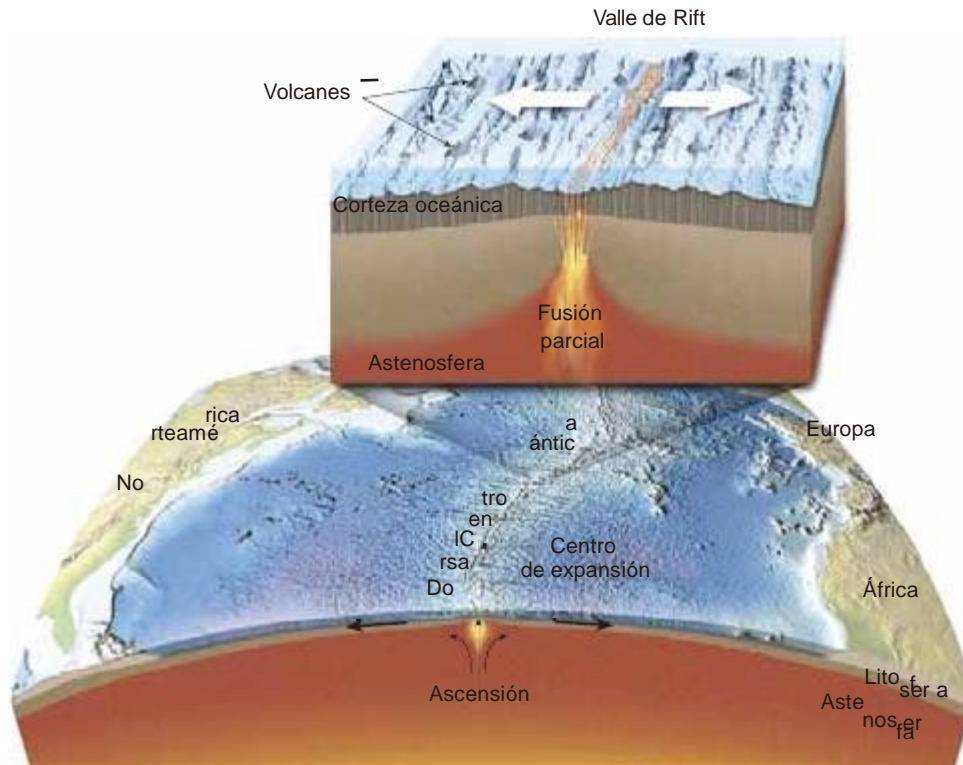
expansión del fondo oceánico se produce en estos bordes. Aquí, dos placas adyacentes se separan una de la otra, produciendo fracturas largas y estrechas en la corteza oceánica. Como resultado, la roca caliente del manto inferior migra hacia arriba y rellena los vacíos dejados a medida que la corteza se va separando. Este material fundido se va enfriando gradualmente para producir nuevas lonchas de fondo oceánico. De una manera lenta, aunque continua, las placas adyacentes se separan y se forma nueva litosfera oceánica entre ellas.

## Las dorsales oceánicas y la expansión del fondo oceánico

La mayoría de los bordes de placa divergentes está asociada con las *dorsales oceánicas*: áreas elevadas del fondo oceánico que se caracterizan por gran flujo caliente y vulcanismo. El sistema de dorsales global es la característica topográfica más larga sobre la superficie de la Tierra, superando los 70.000 km de longitud. Como se muestra en la Figura 2.18, se han nombrado varios segmentos del sistema de dorsales global: Dorsal Centroatlántica, Dorsal del Pacífico Oriental y Dorsal Centroíndica.

Representando el 20 por ciento de la superficie de la Tierra, el sistema de dorsales oceánicas serpentea a través de todas las principales cuencas oceánicas como la costura de una pelota de béisbol. Aunque la cresta de la dorsal oceánica suele ser de 2 a 3 km más alta que las cuencas oceánicas adyacentes, el término «dorsal» puede confundir, dado que esta estructura no es estrecha, al contrario, tiene anchuras que van desde 1.000 hasta más de 4.000 km. Además, a lo largo del eje de algunos segmentos de la dorsal hay una profunda estructura fallada denominada **valle de rift**. Esta estructura es una evidencia de que fuerzas tensionales están empujando activamente la corteza oceánica separándola de la cresta de la dorsal.

El mecanismo que actúa a lo largo del sistema de dorsales oceánicas para crear nuevo fondo oceánico se denomina, con toda propiedad, *expansión del fondo oceánico*. Las velocidades típicas de expansión del fondo oceánico son de un promedio de unos 5 cm al año. Esta es aproximadamente la velocidad a la que crecen las uñas de los dedos de los seres humanos. A lo largo de la dorsal centroatlántica se encuentran velocidades de expansión comparativamente lentas de 2 cm al año, mientras que en secciones de la dorsal del Pacífico oriental se han medido velocidades de expansión superiores a los 15 cm. Aunque estas velocidades de producción de fondo oceánico son lentas en una escala temporal humana, son, sin embargo, lo suficientemente rápidas como para haber generado todas las cuencas oceánicas de la Tierra durante los últimos 200 millones de años. De hecho, ningún fragmento del fondo oceánico que ha sido datado supera los 180 millones de años de antigüedad.



**FIGURA 2.19.** La mayoría de bordes de placa divergentes están situados a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas.

La razón principal de la posición elevada de la dorsal oceánica es que la corteza oceánica recién creada está caliente, lo cual la hace menos densa que las rocas más frías encontradas lejos del eje de la dorsal. En cuanto se forma nueva litosfera a lo largo de la dorsal oceánica, esta se separa de una manera lenta pero continua de la zona de afloramiento. Deben pasar unos 80 millones de años antes de que la temperatura se estabilice y la contracción cese. En este momento, la roca que había formado parte del sistema de dorsales oceánicas elevadas se sitúa en la cuenca oceánica profunda, donde queda enterrada por acumulaciones sustanciales de sedimentos.

Además, el enfriamiento provoca el fortalecimiento del material caliente situado directamente por debajo de la corteza oceánica, añadiéndose así al grosor de la placa. En otras palabras, el grosor de la litosfera oceánica depende de su antigüedad. Cuanto más antigua (más fría) es, mayor es su grosor. La litosfera oceánica que excede una edad de 80 millones de años es de unos 100 km: aproximadamente su grosor máximo.

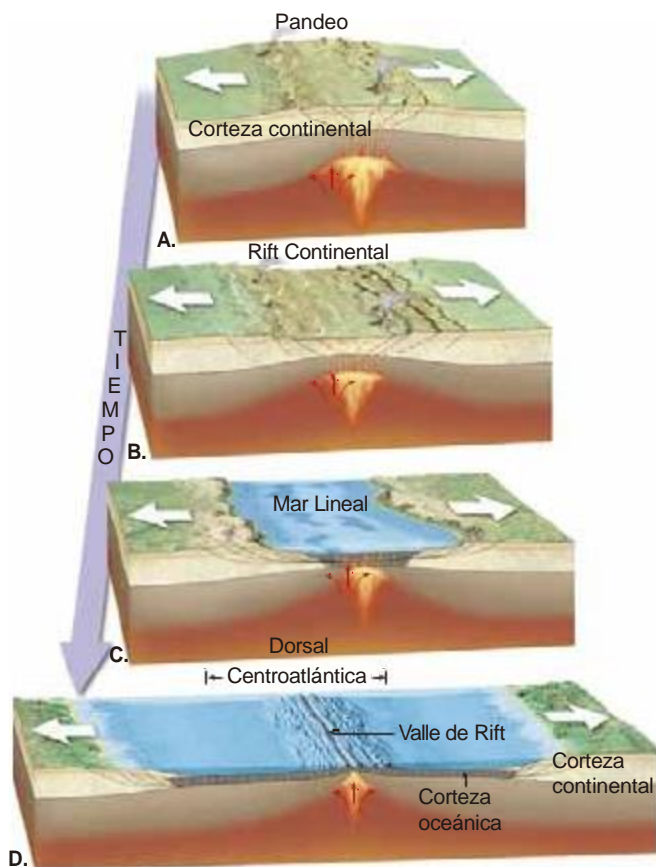
## La fragmentación continental

También pueden desarrollarse bordes de placa divergentes dentro de un continente, en cuyo caso, la masa continental puede escindirse en dos o más segmentos más pequeños separados por una cuenca oceánica.

La fragmentación continental se produce donde fuerzas tectónicas opuestas actúan tirando de la litosfera para separarla. La etapa inicial de la fragmentación tiende a incluir el ascenso del manto que se asocia con un amplio abombamiento de la litosfera situada encima (Figura 2.20A). Como consecuencia, la litosfera se estira haciendo que las frágiles rocas de la corteza se rompan en bloques grandes. A medida que las fuerzas tectónicas siguen separando la corteza, estos fragmentos de la corteza se hunden, generando una depresión alargada denominada **rift continental** (Figura 2.20B).

Un ejemplo moderno de rift continental es el rift del África oriental (véase Figura 2.18, izquierda). Si este rift acabara tendría finalmente como consecuencia la ruptura de África lo cual es un tema de investigación continua. No obstante, el rift del África oriental es un excelente modelo del estadio inicial de la ruptura de un continente. Allí, las fuerzas tensionales han estirado y adelgazado la corteza, permitiendo que la roca fundida ascienda desde el manto. La evidencia de actividad volcánica reciente abarca varias grandes montañas volcánicas como el Kilimanjaro y el Monte Kenia, los picos más elevados de África. Las investigaciones sugieren que, si continúa la fragmentación, el valle del rift se alargará y aumentará de profundidad, extendiéndose al final fuera del margen de la masa de tierra (Figura 2.20C). Llegados a este punto, el valle se convertirá en un mar somero con una desembocadura al océano. El mar Rojo,





**FIGURA 2.20.** Fragmentación continental y formación de una nueva cuenca oceánica. **A.** La etapa inicial de la fragmentación continental suele incluir el ascenso en el manto que se asocia con la formación de un amplio domo en la litosfera. Las fuerzas tensionales y el ascenso de la litosfera caliente provocan la ruptura de la corteza en grandes láminas. **B.** Conforme la corteza se va separando, estos grandes bloques se hunden, generando un valle de rift continental. **C.** La posterior expansión genera un mar somero similar al actual Mar Rojo. **D.** Por fin, se crean una cuenca oceánica en expansión y un sistema de dorsales.

que se formó cuando la península Arábiga se escindió de África, es un ejemplo moderno de esta característica. Por consiguiente, el mar Rojo nos proporciona una perspectiva de cuál era el aspecto del océano Atlántico en su infancia (Figura 2.20D).

## BORDES CONVERGENTES



### PLATE TECTONICS

#### Convergent Boundaries

Constantemente se está produciendo nueva litosfera en las dorsales oceánicas; sin embargo, el tamaño de nuestro planeta no aumenta: su superficie total permanece constante. Se mantiene un equilibrio, porque las porciones más densas y antiguas de la litosfera oceánica

descienden al manto a una velocidad igual a la de producción del fondo oceánico. Esta actividad ocurre a lo largo de los **bordes convergentes** (*con* = junto; *vergere* = moverse), donde dos placas se mueven una hacia la otra y el borde frontal de una de ellas se dobla hacia abajo, a medida que se desliza por debajo de la otra.

Los bordes convergentes también se denominan **zonas de subducción** porque son lugares donde la litosfera desciende (es subducida) hacia el manto. La subducción se produce porque la densidad de la placa tectónica descendente es mayor que la de la astenosfera subyacente. En general, la litosfera oceánica es más densa que la astenosfera, mientras que la litosfera continental es menos densa y resiste la subducción. Por consiguiente, solo la litosfera oceánica será subducida a grandes profundidades.

Las **fosas submarinas** son las manifestaciones superficiales producidas a medida que la litosfera oceánica desciende hacia el manto. Estas grandes depresiones lineales son notablemente largas y profundas. La fosa Perú-Chile a lo largo de la costa occidental de Sudamérica tiene una longitud superior a los 4.500 km y su base se encuentra hasta 8 km por debajo del nivel del mar. Las fosas del Pacífico occidental, entre ellas la fosa de las Marianas y la de Tonga, tienden a ser incluso más profundas que la del Pacífico oriental.

Las capas de litosfera oceánica descienden en el manto a ángulos que van desde unos pocos grados a casi la vertical (90 grados). El ángulo al que la litosfera oceánica desciende depende en gran medida de su densidad. Por ejemplo, cuando un centro de expansión está localizado cerca de la zona de subducción, como ocurre a lo largo de la fosa Perú-Chile, la litosfera subducente es joven y, por consiguiente, caliente y con alta flotación. Debido a ello, el ángulo de descenso es pequeño, lo que genera una interacción considerable entre la placa descendente y la placa superior. Por consiguiente, la región situada en torno a la fosa Perú-Chile experimenta grandes terremotos, entre ellos el terremoto chileno de 1960, el mayor registrado.

A medida que la litosfera envejece (se aleja del centro de expansión) se va enfriando gradualmente, aumentando su grosor y su densidad. En lugares del Pacífico occidental, alguna parte de la litosfera oceánica tiene 180 millones de años de antigüedad. Se trata de la más gruesa y la más densa de los océanos actuales. Las láminas muy densas de esta región descienden normalmente en el manto en ángulos de casi 90 grados. Esto explica en gran medida el hecho de que la mayoría de las fosas del Pacífico occidental sean más profundas que las fosas del Pacífico oriental.

Aunque todas las zonas convergentes tienen las mismas características básicas, poseen rasgos muy variables. Cada una está controlada por el tipo de material de la corteza que interviene y por el ambiente tectónico. Los bordes convergentes pueden formarse entre *dos placas oceánicas*, *una placa oceánica y una continental* o *dos placas continentales*.

## Convergencia oceánica-continental

Dondequiera que el borde frontal de una placa con corteza continental converja con una capa de litosfera oceánica, el bloque continental flotante seguirá «flotando», mientras que la placa oceánica más densa se hundirá en el manto (Figura 2.21A). Cuando una placa oceánica descendente alcanza una profundidad de unos 100 km, se desencadena la fusión dentro de la cuña de la astenosfera caliente suprayacente. Pero ¿cómo la subducción de una capa fría de litosfera oceánica provoca la fusión de la roca del manto? La respuesta reside en el hecho de que los componentes volátiles actúan igual que sal en la fusión del hielo. Es decir, la roca «húmeda», en un ambiente de alta presión, se funde a temperaturas sustancialmente inferiores que la roca «seca» de la misma composición.

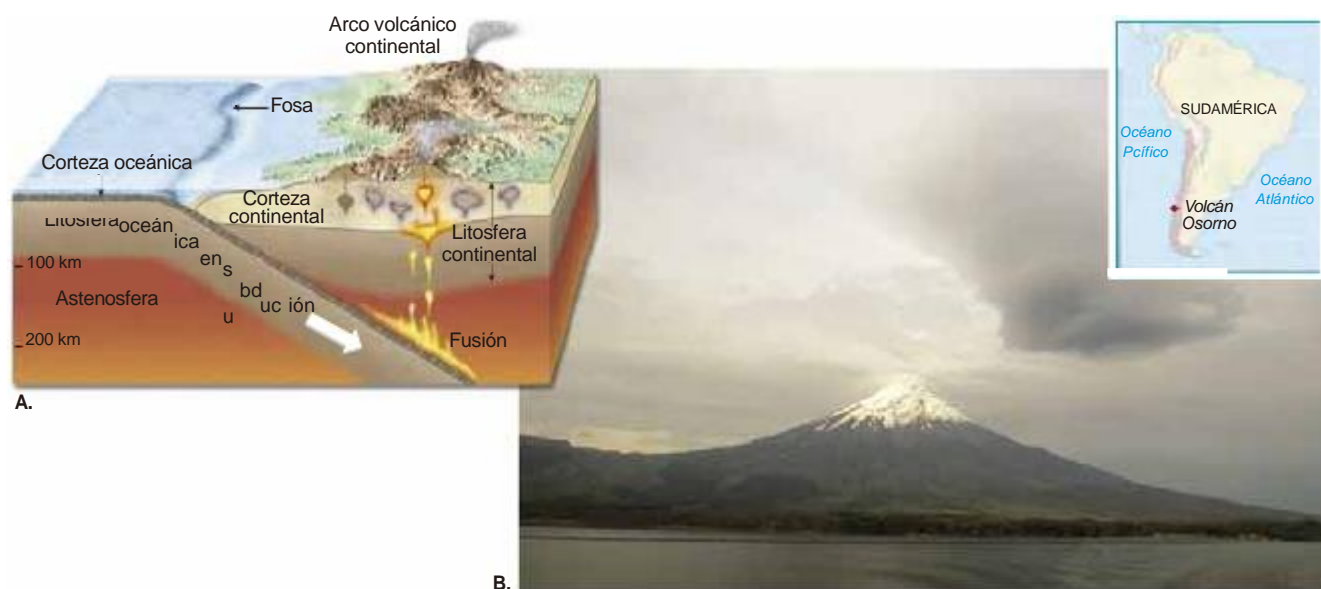
Los sedimentos y la corteza oceánica contienen una gran cantidad de agua que es transportada a grandes profundidades por una placa en subducción. A medida que la placa se hunde, el calor y la presión expulsan el agua de los espacios porosos de la roca. A una profundidad aproximada de 100 km, la cuña de roca del manto está lo suficientemente caliente como para que la introducción de agua provoque algo de fusión. Se cree que este proceso, denominado **fusión parcial**, genera alrededor del 10 por ciento del material fundido, que se entremezcla con la roca del manto no fundida. Al ser menos denso que el manto que la rodea, este material móvil y caliente asciende de una manera gradual hacia

la superficie. Según el entorno, estas masas de roca fundida derivadas del manto pueden ascender a través de la corteza y provocar una erupción volcánica. Sin embargo, mucho de este material nunca alcanza la superficie; antes bien, se solidifica en profundidad, un proceso que aumenta el grosor de la corteza.

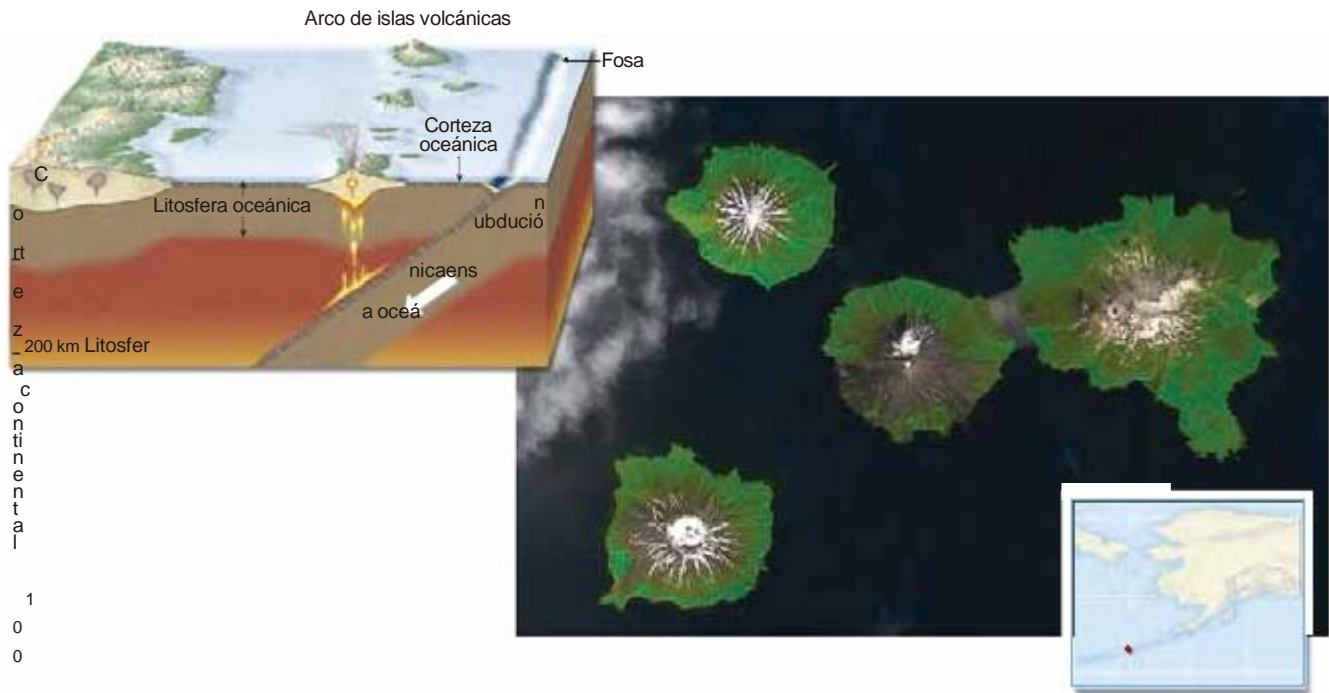
Los volcanes de los imponentes Andes son el producto de roca fundida generada por la subducción de la placa de Nazca por debajo del continente sudamericano (Figura 2.21B). Sistemas montañosos, como los Andes, que se producen en parte por la actividad volcánica asociada con la subducción de la litosfera oceánica, se denominan **arcos volcánicos continentales**. La cordillera Cascade de Washington, Oregón y California es otro ejemplo que consiste en varias montañas volcánicas bien conocidas, entre ellas el monte Rainier, el monte Shasta y el monte Santa Helena. Este arco volcánico activo también se extiende hasta Canadá, donde incluye el monte Garibaldi y el monte Silverthron, entre otros.

## Convergencia oceánica-oceánica

Un borde convergente oceánico-oceánico tiene muchos rasgos en común con los bordes de placa oceánico-continental. Cuando convergen dos placas oceánicas, una desciende por debajo de la otra, iniciando la actividad volcánica por el mismo mecanismo que actúa en todas las zonas de subducción (Figura 2.22A). El agua expulsada de la capa de litosfera oceánica subducente provoca la fusión en la cuña caliente de roca de manto



**FIGURA 2.21.** Borde de placas convergente oceánico-continental. **A.** Ilustración de litosfera oceánica densa que subduce debajo de un bloque continental flotante. La fusión en la astenosfera provoca que la roca fundida ascienda hacia la superficie. Esta actividad produce una cadena de estructuras volcánicas que se acumulan en la masa continental suprayacente, denominado arco volcánico continental. **B.** El volcán Osorno es uno de los más activos del sur de los Andes chilenos, que ha hecho erupción 11 veces entre 1575 y 1869. Localizado en la costa del Lago Llanquihue, Osorno es de aspecto similar al Monte Fuji, Japón (Foto de Michael Collier).



o  
rt  
e  
z  
a  
c  
o  
n  
t  
i  
n  
e  
n  
t  
a  
l  
  
1  
0  
0  
  
k  
m  
  
s  
t  
e  
n  
o  
s  
f  
e  
r  
a  
  
A  
.

Fusión

A

B.

ALASKA  
Océano  
Volcán  
Cleveland  
Pacífico

**FIGURA 2.22.** Bordes de placa convergentes océano-océano. **A.** Cuando las placas oceánicas convergen, una descende debajo de la otra, iniciando actividad volcánica en la placa suprayacente. En esta situación se crea un arco de islas volcánicas. **B.** Estas cuatro estructuras volcánicas son parte de las islas Aleutianas, una cadena de volcanes activos y durmientes alimentados por magma creado por subducción de la placa del Pacífico. Recientemente se han observado plumas de vapor emanando del volcán Cleveland (centro), evidencia de actividad reciente (Foto por cortesía de la NASA).

suprayacente. En este marco, los volcanes crecen desde el fondo oceánico antes que sobre una plataforma continental. Cuando la subducción se mantiene, acabará por construir cadenas de estructuras volcánicas lo suficientemente grandes como para emerger como islas. Las islas volcánicas suelen estar separadas aproximadamente 80 km. Esta tierra recién formada que consiste en una cadena en forma de arco de islas volcánicas se denomina **arco de islas volcánicas**, o simplemente **arco de islas** (Figura 2.22B).

Las islas Aleutianas, las Marianas y las Tonga, son ejemplos de arcos de islas volcánicas relativamente jóvenes. Los arcos de islas están localizados generalmente a 100-300 km de una fosa submarina. Adyacentes a los arcos de islas antes mencionados se encuentran la fosa de las Aleutianas, la fosa de las Marianas y la fosa de las Tonga.

La mayoría de los arcos de islas volcánicas está localizada en el Pacífico occidental. Solo dos están localizados en el Atlántico: el arco de las Antillas Menores, en el margen oriental del mar Caribe, y las Islas Sandwich, ubicadas en la punta de Sudamérica. Las Antillas Menores son el producto de la subducción del fondo oceánico atlántico debajo de la placa Caribeña. Localizados dentro de este arco se encuentran los Estados Unidos y las Islas Vírgenes Británicas, así como la Isla de La Martinica, donde la montaña Pelée hizo

erupción en 1902 destruyendo la ciudad de San Pedro y cobrándose una cantidad estimada en 28.000 vidas humanas. Esta cadena de islas incluye también la Isla de Montserrat, donde se ha producido actividad volcánica reciente<sup>6</sup>.

Los arcos de islas volcánicas relativamente jóvenes son estructuras bastante simples constituidas por numerosos conos volcánicos que se extienden sobre corteza oceánica, en general, con un grosor inferior a los 20 km. Por el contrario, los arcos de islas más antiguos son más complejos y tienen por debajo corteza muy deformada que puede alcanzar 35 km de grosor. Son ejemplos las islas que constituyen los países de Japón, Indonesia y las Filipinas. Estos arcos de islas se formaron sobre el material generado por episodios de subducción anteriores o sobre pequeños fragmentos de corteza continental.

## Convergencia continental-continental

El tercer tipo de borde convergente se produce cuando una masa de tierra se mueve hacia el margen de

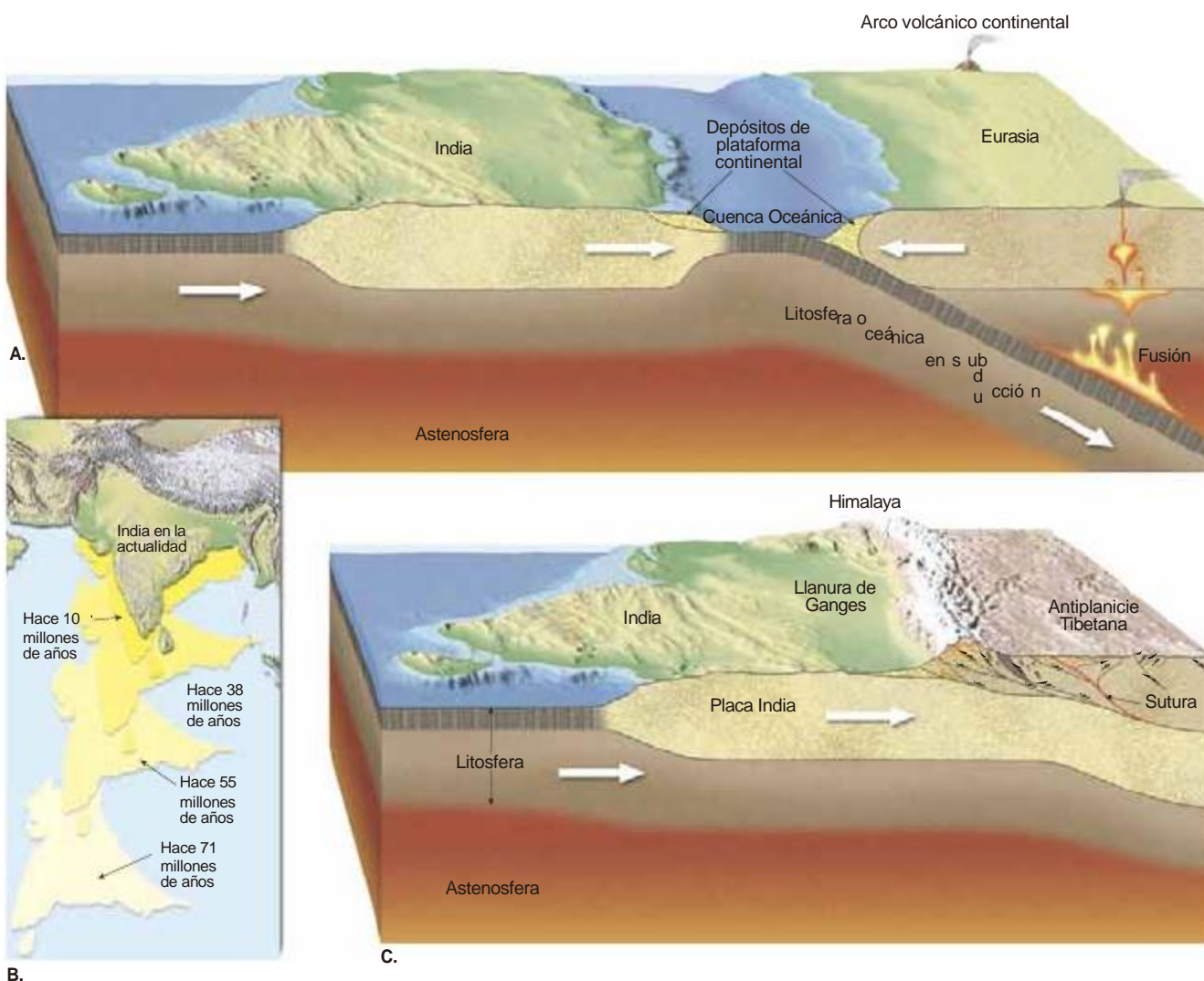
<sup>6</sup> En el Capítulo 5 encontrará más información sobre estos acontecimientos volcánicos.

otra por la subducción del fondo oceánico que interviene (Figura 2.23A). Mientras la litosfera oceánica tiende a ser densa y se hunde en el manto, la flotabilidad de la litosfera continental impide que sea subducida. Por consiguiente, se produce una colisión entre dos fragmentos continentales convergentes (Figura 2.23C). Este acontecimiento pliega y deforma la acumulación de sedimentos y las rocas sedimentarias a lo largo de los márgenes continentales como si estuvieran colocados en un torno gigantesco. El resultado es la formación de una nueva cordillera montañosa compuesta por rocas sedimentarias y metamórficas deformadas que a menudo contienen láminas de corteza oceánica.

### A veces los alumnos preguntan...

¿Los continentes volverán a unirse y formarán una sola masa continental algún día?

Sí, es muy probable que los continentes acaben uniéndose otra vez, pero no será pronto. Dado que todos los continentes se encuentran en el mismo cuerpo planetario, hasta ahora existe un solo continente que pueda viajar antes de colisionar con otra masa continental. Las investigaciones recientes sugieren que puede formarse un supercontinente una vez cada 500 millones de años aproximadamente. Puesto que han pasado unos 200 millones de años desde la fragmentación de Pangea, nos quedan solo unos 300 millones de años hasta que se forme el próximo supercontinente.



**FIGURA 2.23.** La colisión en curso de India y Asia, que empezó hace unos 45 millones de años, produjo el majestuoso Himalaya. **A.** A medida que la India migraba hacia el norte, el océano intermedio se cerró cuando el fondo oceánico subducía debajo de Eurasia. **B.** Posición de la India en relación con Eurasia en varios momentos (modificado según Peter Molnar). **C.** Al final, las dos masas continentales colisionaron, deformando y elevando los sedimentos que habían sido depositados a lo largo de sus bordes continentales. Además, fragmentos de rocas de la corteza se superpusieron a las placas que colisionaban.

Una colisión como esta empezó hace unos 50 millones de años cuando el subcontinente de India «embistió» Asia y produjo el Himalaya: la cordillera montañosa más espectacular de la Tierra (Figura 2.23C). Durante esta colisión, la corteza continental se abombó y se fracturó y, en general, se acortó y engrosó. Además del Himalaya, otros diversos sistemas montañosos importantes, entre ellos los Alpes, los Apalaches y los Urales, se formaron cuando colisionaron fragmentos continentales. (Este tema se considerará con más detalle en el Capítulo 14).

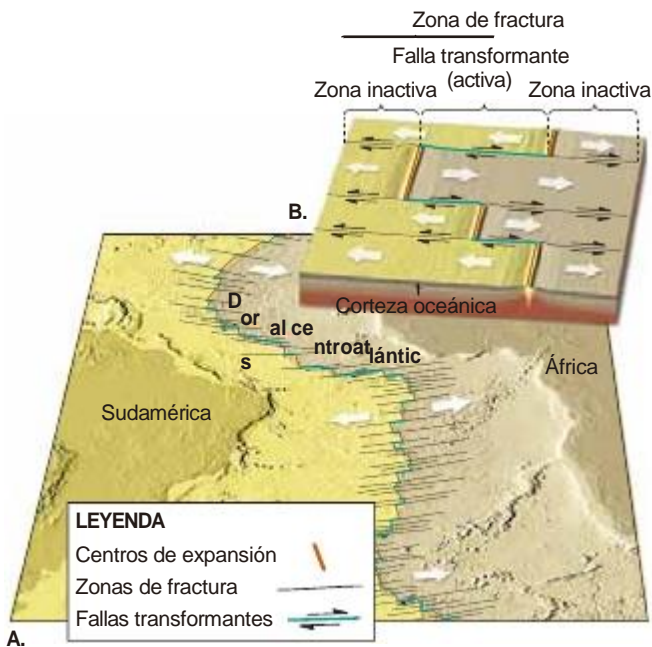
## BORDES DE FALLA TRANSFORMANTE



### PLATE TECTONICS

#### Transform Fault Boundaries

A lo largo de una **falla transformante** (*trans* = a través de; *forma* = forma) las placas se deslizan horizontalmente una al lado de la otra sin producir ni destruir litosfera (*bordes de placa pasivos*). La naturaleza de las fallas transformantes la descubrió el geólogo canadiense H. Tuzo Wilson (1965), quien propuso que esas grandes



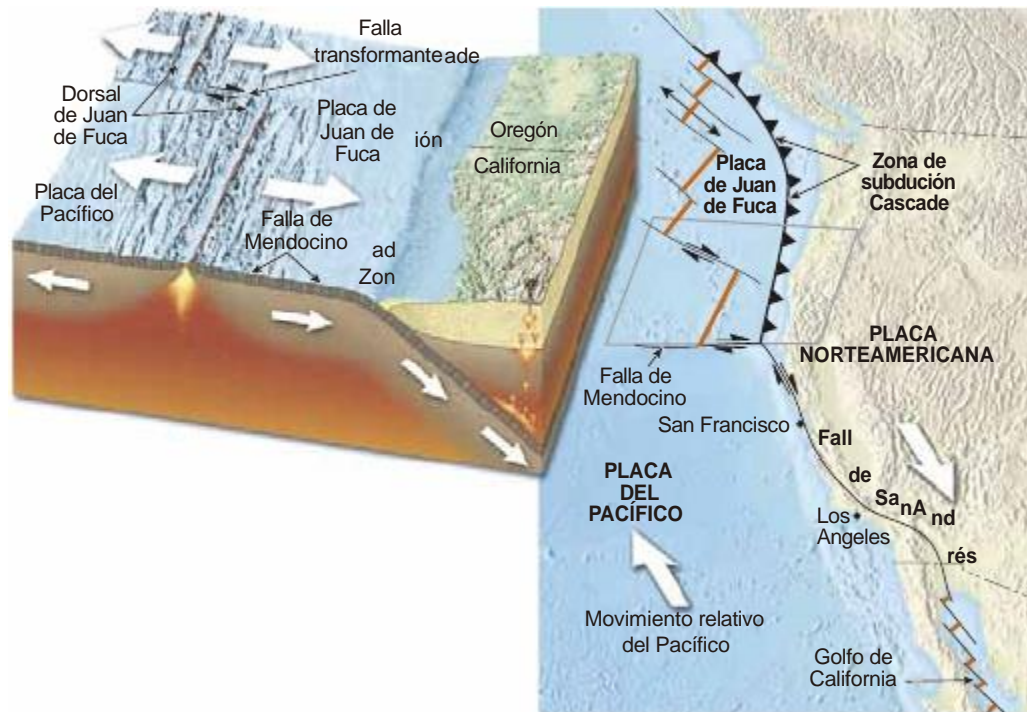
**FIGURA 2.24.** Bordes de falla transformante. **A.** La mayoría de las fallas transformantes desplazan segmentos de un centro de expansión, produciendo un margen de placa en escalones. La forma zigzagueante de la dorsal Centroatlántica refleja aproximadamente la forma de la zona de fragmentación que produjo la ruptura de Pangea. **B.** Las zonas de fractura son fracturas largas y estrechas en el fondo oceánico que son casi perpendiculares a los segmentos de la dorsal desplazados. Incluyen la falla transformante activa y su rastro «fossilizado», donde se yuxtaponen edades diferentes. Los desplazamientos entre los segmentos de la dorsal (fallas transformantes) no cambian de longitud con el tiempo.

fallas conectan dos centros de expansión (bordes divergentes) o, con menos frecuencia, dos fosas (bordes convergentes). La mayoría de las fallas transformantes se encuentran en el fondo oceánico (Figura 2.24). Aquí, «desplazan» segmentos del sistema de dorsales oceánicas, produciendo un margen de placa escalonado. Nótese que la forma en zigzag de la dorsal Centroatlántica en la Figura 2.18 refleja aproximadamente la forma de la fragmentación original que provocó la ruptura del supercontinente de Pangea. (Compare las formas de los márgenes continentales de las masas de tierra a ambos lados del Atlántico con la forma de la dorsal Centroatlántica.)

Normalmente las fallas transformantes son parte de unas líneas prominentes de rotura en el fondo oceánico conocidas como **zonas de fractura**, que abarcan las fallas transformantes activas y sus extensiones inactivas en el interior de las placas (Figura 2.24B). Las fallas transformantes activas se encuentran *solo entre* los dos segmentos desplazados de la dorsal y son definidas generalmente por terremotos débiles y someros. Aquí, el fondo oceánico producido en un eje de la dorsal se desplaza en la dirección opuesta al fondo oceánico generado en un segmento opuesto de la dorsal. Entonces, entre los segmentos de la dorsal estas placas adyacentes de corteza oceánica se rozan conforme se desplazan a lo largo de la falla. Más allá de las crestas de la dorsal hay zonas inactivas, donde las fracturas se conservan como depresiones topográficas lineales. La tendencia de estas zonas de fractura es aproximadamente paralela a la dirección del movimiento de la placa en el momento de su formación. Por tanto, estas estructuras pueden utilizarse para cartografiar la dirección del movimiento de las placas en el pasado geológico.

Otro papel de las fallas transformantes es proporcionar el medio mediante el cual la corteza oceánica creada en las crestas de la dorsal puede ser transportada a una zona de destrucción, las fosas submarinas. En la Figura 2.25 se ilustra esta situación. Obsérvese que la placa de Juan de Fuca se mueve en dirección sureste, y es finalmente subducida bajo la costa occidental de Estados Unidos. El extremo sur de esta placa está limitado por una falla transformante denominada falla de Mendocino. Este borde transformante conecta la dorsal de Juan de Fuca con la zona de subducción de Cascade. Por consiguiente, facilita el movimiento del material de la corteza creado en la dorsal Juan de Fuca hasta su destino, debajo del continente norteamericano.

Como la falla de Mendocino, la mayoría de los bordes de falla transformantes está localizada dentro de las cuencas oceánicas; sin embargo, unas pocas atraviesan la corteza continental. Dos ejemplos son la falla de San Andrés, en California, con tendencia a los terremotos, y la falla Alpina, en Nueva Zelanda. Obsérvese en la Figura 2.25 que la falla de San Andrés conecta un centro



**FIGURA 2.25.** La falla transformante Mendocino permite el movimiento hacia el sur del fondo oceánico generado en la dorsal de Juan de Fuca sobrepasando la placa Pacífica y por debajo de la placa Norteamericana. Por tanto, esta falla transformante conecta un centro de expansión (borde divergente) con una zona de subducción (borde convergente). Además, la falla de San Andrés, también una falla transformante, conecta dos centros de expansión: la dorsal de Juan de Fuca y una zona divergente localizada en el Golfo de California.

de expansión localizado en el golfo de California con la zona de subducción Cascade y la falla de Mendocino, localizada a lo largo de la costa noroccidental de Estados Unidos. A lo largo de la falla de San Andrés, la placa del Pacífico se mueve hacia el noroeste, pasada la placa de Norteamérica (Figura 2.26). Si este movimiento continúa, esta parte de California al oeste de la zona de falla, que abarca la península de la Baja California de México, se convertirá en una isla separada de la costa occidental de Estados Unidos y Canadá. Podrá finalmente alcanzar Alaska. Sin embargo, una preocupación más inmediata es la actividad sísmica desencadenada por los movimientos ocurridos a lo largo de este sistema de fallas.

## ¿CÓMO CAMBIAN LAS PLACAS Y LOS BORDES DE PLACA?

Aunque la superficie total de la Tierra no cambia, el tamaño y la forma de las placas individuales están cambiando constantemente. Por ejemplo, las placas Antártica y Africana están casi por completo rodeadas por bordes divergentes, sitios de producción de fondo oceánico. Por tanto, estas placas están aumentando de tamaño a medida que se añade nueva litosfera a sus bordes. Por el contrario, la placa del Pacífico está siendo

consumida hacia el manto a lo largo de sus flancos septentrional y occidental mucho más deprisa de lo que crece a lo largo de la dorsal del Pacífico este y, por consiguiente, su tamaño se está reduciendo.

Otra consecuencia del movimiento de las placas es que los bordes también migran. Por ejemplo, la posición de la fosa Perú-Chile, que es consecuencia de que la placa Nazca está siendo inclinada hacia abajo conforme desciende por debajo de la placa Sudamericana, ha cambiado con el tiempo (véase Figura 2.18). Debido a la deriva hacia occidente de la placa Sudamericana con respecto a la de Nazca, la posición de la fosa Perú-Chile ha migrado también en dirección hacia occidente.

También pueden crearse o destruirse bordes de placa en respuesta a cambios en las fuerzas que actúan sobre la litosfera. Recordemos que el Mar Rojo se localiza en un centro de expansión relativamente nuevo. Empezó a formarse hace menos de 20 millones de años cuando la península Arábiga empezó a separarse de África. En otras localizaciones, placas que transportan corteza continental están moviéndose en la actualidad unas hacia otras. Es posible que, finalmente, esos fragmentos continentales colisionen y se junten. Esto podría ocurrir, por ejemplo, en el Pacífico sur, donde Australia está desplazándose al norte hacia el sur de Asia. Si Australia continuara su migración hacia el norte, el borde que la separa de Asia desaparecería al convertirse estas placas en una sola (Recuadro 2.3).



Esquema del geólogo

**FIGURA 2.26.** A lo largo de la falla de San Andrés, la placa del Pacífico se mueve hacia el noroeste en relación con la placa Norteamericana. Esta vista aérea muestra el desplazamiento del canal seco de Wallace Creek cerca de Taft, California (Foto de Michael Collier).

## COMPROBACIÓN DEL MODELO DE LA TECTÓNICA DE PLACAS

Algunas de las pruebas que respaldan la deriva continental y la expansión del fondo oceánico se han presentado ya. Con el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas, los investigadores empezaron a comprobar este nuevo modelo de cómo funciona la Tierra. Pese a que se obtuvieron nuevos datos que la apoyaban, eran las

nuevas interpretaciones de los datos ya existentes las que, a menudo, inclinaron la corriente de opinión.

### Pruebas procedentes de sondeos oceánicos

Algunas de las pruebas más convincentes para la expansión del fondo oceánico procedieron del Deep Sea Drilling Project, que duró desde 1968 hasta 1983. Uno de los primeros objetivos era recoger muestras



# ENTENDER LA TIERRA

## Fragmentación de Pangea

### RECUADRO 2.3

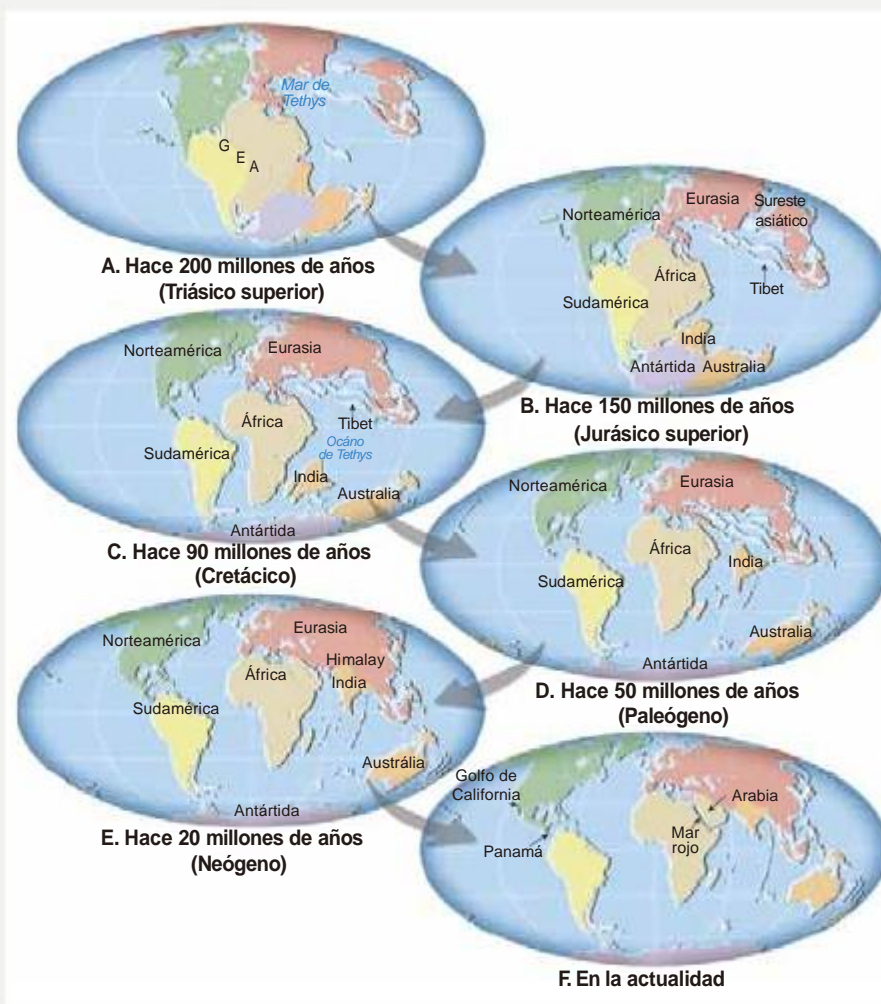
Wegener utilizó las pruebas procedentes de fósiles, tipos de rocas y climas antiguos para crear un ajuste de los continentes en forma de rompecabezas, creando así su supercontinente, Pangea. De una manera similar, pero utilizando herramientas modernas de las que carecía Wegener, los geólogos han recreado las etapas de la fractura de este supercontinente, un acontecimiento que empezó hace cerca de 180 millones de años. A partir de este trabajo, se han establecido bien las fechas en las que fragmentos individuales de corteza se separaron unos de otros y también sus movimientos relativos (Figura 2.B).

Una consecuencia importante de la fractura de Pangea fue la creación de una «nueva» cuenca oceánica: el Atlántico. Como se puede ver en la parte B de la Figura 2.B, la separación del supercontinente no fue simultánea a lo largo de los bordes del Atlántico. Lo primero que se separó fueron Norteamérica y África.

Allí, la corteza continental estaba muy fracturada, lo que proporcionaba vías para que grandes cantidades de lava fluida alcanzaran la superficie. Restos de esas lavas se encuentran a lo largo del borde litoral oriental de los Estados Unidos, principalmente enterradas debajo de las rocas sedimentarias que forman la plataforma continental. La datación radiométrica de estas lavas solidificadas indica que la separación empezó en varios estadios hace entre 180 y 165 millones de años. Este lapso de tiempo puede utilizarse como la «fecha de nacimiento» de esta sección del Atlántico norte.

Hace 130 millones de años, el Atlántico sur empezó a abrirse cerca de la punta de lo que ahora es Sudáfrica. Conforme esta zona de separación migraba hacia el norte, el Atlántico sur se abría de manera gradual (compárense las partes B y C de la Figura 2.B). La fragmentación continua de la masa continental meridional condujo a la separación de África y la Antártida y empujó a India a un viaje hacia el norte. Al principio del Cenozoico, hace unos 50 millones de años, Australia se había separado de la Antártida y el Atlántico sur había emergido como un océano completamente desarrollado (Figura 2.B, parte D).

Un mapa actual (Figura 2.B, parte F) muestra que la India acabó colisionando con



**FIGURA 2.B.** Varias vistas de la fragmentación de Pangea a lo largo de un periodo de 200 millones de años.

Asia, un acontecimiento que empezó hace unos 50 millones de años y creó la cordillera del Himalaya, junto con la meseta tibetana. Aproximadamente al mismo tiempo, la separación de Groenlandia de Eurasia completó la fragmentación de la masa continental septentrional. Durante los últimos 20 millones de años, aproximadamente, de la historia de

la Tierra, Arabia se separó de África y se formó el Mar Rojo, y la baja California se separó de México, formando el golfo de California (Figura 2.B, parte E). Mientras, una franja de tierra (conocida ahora como Centroamérica) quedó atrapada entre Norteamérica y Sudamérica, produciéndose así el aspecto actual que conocemos de nuestro planeta.

del fondo oceánico para establecer su edad. Para conseguirlo, se construyó el *Glomar Challenger*, un buque para realizar sondeos capaz de trabajar a miles de metros de profundidad. Se perforaron cientos de agujeros

a través de las capas de sedimentos que recubren la corteza oceánica, así como en las rocas basálticas inferiores. En vez de la datación radiométrica de las rocas de la corteza, los investigadores utilizaron los restos fósiles

de microorganismos encontrados en los sedimentos que reposaban directamente sobre la corteza para datar el fondo oceánico en cada sitio<sup>7</sup>.

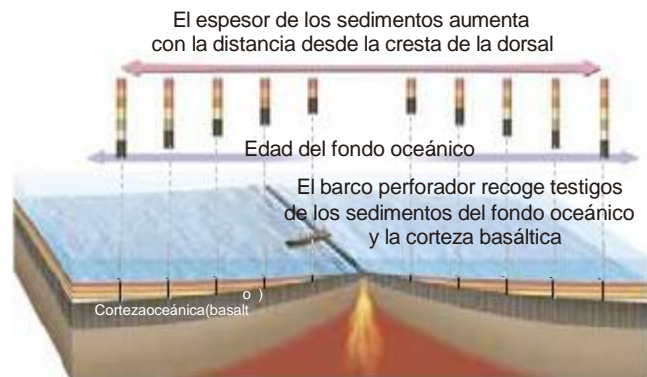
Cuando se representó el sedimento más antiguo de cada punto de perforación frente a su distancia con respecto a la cresta de la dorsal, se demostró que la edad de los sedimentos aumentaba a medida que lo hacía la distancia desde la dorsal (Figura 2.27). Este hallazgo respaldaba la hipótesis de expansión del fondo oceánico, que predecía que la corteza oceánica más joven se encontraría en la cresta de la dorsal, el sitio de producción del fondo oceánico, y que la corteza oceánica más antigua estaría localizada adyacente a los márgenes continentales.

Los datos recogidos por el Deep Sea Drilling Project reforzaron también la idea de que las cuencas oceánicas son geológicamente jóvenes, porque no se encontró fondo oceánico de edades superiores a los 180 millones de años. Por comparación, la mayor parte de la corteza continental tiene más de varios centenares de millones de años y se ha localizado alguna que supera los 4.000 millones de años.

El espesor de los sedimentos del fondo oceánico proporcionó una verificación adicional de su expansión. Las muestras de perforación del *Glomar Challenger* revelaron que los sedimentos están casi por completo ausentes en la cresta de la dorsal y que el grosor de los sedimentos aumenta con la distancia a la dorsal (véase Figura 2.27). Cabría esperar este modelo de distribución de los sedimentos si la hipótesis de expansión del fondo oceánico fuera correcta.

En el Ocean Drilling Program, el sucesor del Deep Sea Drilling Project, se utilizó un buque perforador más avanzado desde el punto de vista tecnológico, el *JOIDES Resolution* para continuar el trabajo del *Glomar Challenger* (Figura 2.28). Si bien el Deep Sea Drilling Project validó muchos de los supuestos de la teoría de la tectónica de placa, el *JOIDES Resolution* podía obtener sondas más profundas en la corteza oceánica. Esto permitió el estudio de las zonas generadoras de terremotos en los márgenes de placas convergentes y la exploración directa de las llanuras y montes submarinos. Las muestras de sedimentos perforadas en el Ocean Drilling Program han aumentado también nuestro conocimiento de los cambios climáticos a largo y corto plazo.

En octubre de 2003, el *JOIDES Resolution* entró a formar parte de un nuevo programa, el Integrated Ocean Drilling Program (IODP). En este nuevo esfuerzo internacional se utilizan muchos buques de exploración, entre ellos el enorme *Chikyū* (que significa «planeta Tierra» en japonés), de 210 metros de longitud, que empezó sus operaciones en 2007. Uno de los objetivos del IODP es perforar una sección completa de la corteza oceánica.



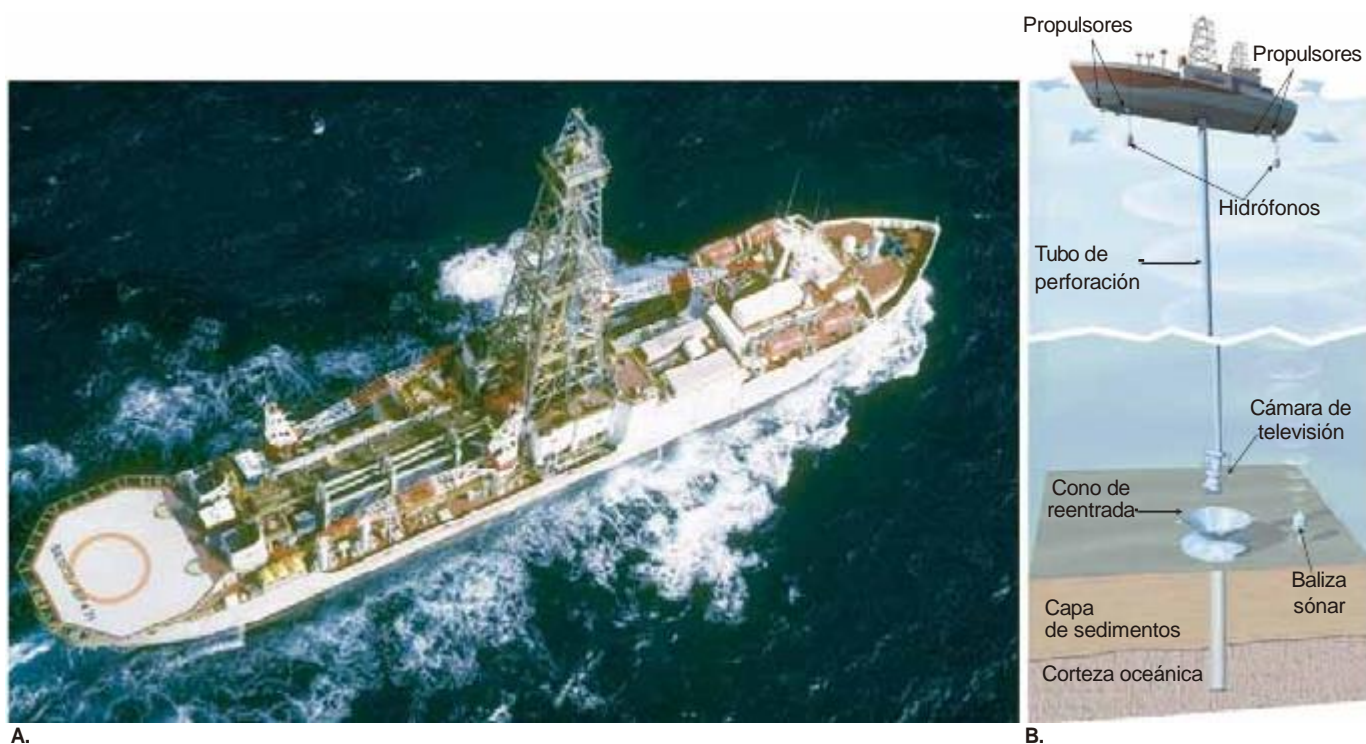
**FIGURA 2.27.** Desde 1968 los barcos perforadores han recogido muestras del sedimento del fondo oceánico y de rocas de la corteza en centenares de sitios. Los resultados de esos esfuerzos demostraron que el fondo oceánico es, en realidad, más joven en el eje de la dorsal. Esta fue la primera evidencia directa que respaldaba la hipótesis de la expansión del fondo oceánico y la teoría más amplia de la tectónica de placas.

## Puntos calientes y plumas del manto

La cartografía de las islas volcánicas y los montes submarinos (volcanes submarinos) del océano Pacífico reveló varias cadenas lineales de estructuras volcánicas. Una de las cadenas más estudiadas consta de, por lo menos, 129 volcanes que se extiende desde las Islas Hawái a la Isla Midway y continúa hacia el norte, hacia la fosa de las Aleutianas (Figura 2.29). La datación radiométrica de esta estructura, denominada *cadena Islas Hawái-Monte Submarino Emperador*, demostró que la edad de los volcanes aumenta a medida que aumenta la distancia de la «gran isla» de Hawái. La isla volcánica más joven de la cadena (Hawái), se elevó del fondo oceánico hace menos de un millón de años, mientras que la Isla Midway tiene 27 millones de años y el monte submarino Suiko, cerca de la fosa de las Aleutianas, tiene 65 millones de años (véase Figura 2.29).

La mayoría de los investigadores están de acuerdo en la existencia de un ascenso conectivo de forma cilíndrica de roca caliente, denominada **pluma de manto**, debajo de la isla de Hawái. A medida que la pluma rocosa caliente asciende por el manto, desciende la presión de confinamiento, lo que desencadena la fusión parcial. (Este proceso, denominado *fusión por descompresión*, se comenta en el Capítulo 5). La manifestación superficial de esa actividad es un **punto caliente**, un área volcánica, con un flujo térmico elevado y un abombamiento de la corteza que tiene unos pocos centenares de anchura. A medida que la placa del Pacífico se movía sobre el punto caliente, se fue formando una cadena de estructuras volcánicas sucesivas conocida como **huella de punto caliente**. Como se muestra en la Figura 2.29, la

<sup>7</sup> Las dataciones radiométricas de la corteza oceánica en sí mismas no son fiables debido a la alteración del basalto por el agua del mar.



**FIGURA 2.28.** El JOIDES Resolution A. JOIDES Resolution, uno de los buques perforadores del Integrated Ocean Drilling Program (Foto por cortesía de Ocean Drilling Program). B. El JOIDES Resolution tiene una grúa metálica alta que se utiliza para dirigir el sondeo rotatorio, mientras los propulsores del barco lo mantienen en una posición fija en el mar. Las secciones individuales del cañón de perforación se unen para construir una sola columna de tubería de hasta 8.200 m de longitud. La broca de la tubería, situada al final de la columna de tuberías, rota conforme es presionada contra el fondo oceánico y puede perforar hasta 2.100 m en el fondo oceánico. Como sucede al girar una caña de refresco en un pastel de capas, la perforación corta a través de los sedimentos y las rocas y retiene un cilindro de material (un testigo) en el interior de la tubería hueca, que puede entonces subirse a bordo del barco y analizarse en las instalaciones de un laboratorio de vanguardia.

edad de cada volcán indica el tiempo que ha transcurrido desde que se situó sobre la pluma del manto.

Si nos acercamos a las cinco islas Hawái, observamos un patrón similar de edades desde la isla volcánicamente activa de Hawái hasta los volcanes inactivos que componen la isla más antigua, Kauai (véase Figura 2.29). Hace 5 millones de años, cuando Kauai estaba colocada sobre el punto caliente, era la *única* isla hawaiana que existía. Examinando sus volcanes extintos, que han sido erosionados en picos dentados y enormes cañones, pueden verse las pruebas de la edad de Kauai. Por el contrario, la Isla de Hawái, comparativamente joven, exhibe coladas de lava fresca, y dos de los volcanes de Hawái, el Mauna Loa y el Kialuea, siguen activos (Figura 2.30).

La investigación sugiere que, al menos, algunas plumas del manto se originan a gran profundidad, quizás en el límite manto-núcleo. Otras, en cambio, pueden tener un origen mucho menos profundo. De los aproximadamente 40 puntos calientes identificados en todo el mundo, más de una docena están localizados cerca de centros de expansión. Por ejemplo, la pluma del manto situada debajo de Islandia es responsable de la gran acumulación de rocas volcánicas que se encuentra a lo largo de la sección septentrional de la dorsal Centroatlántica.

## MEDICIÓN DEL MOVIMIENTO DE PLACAS



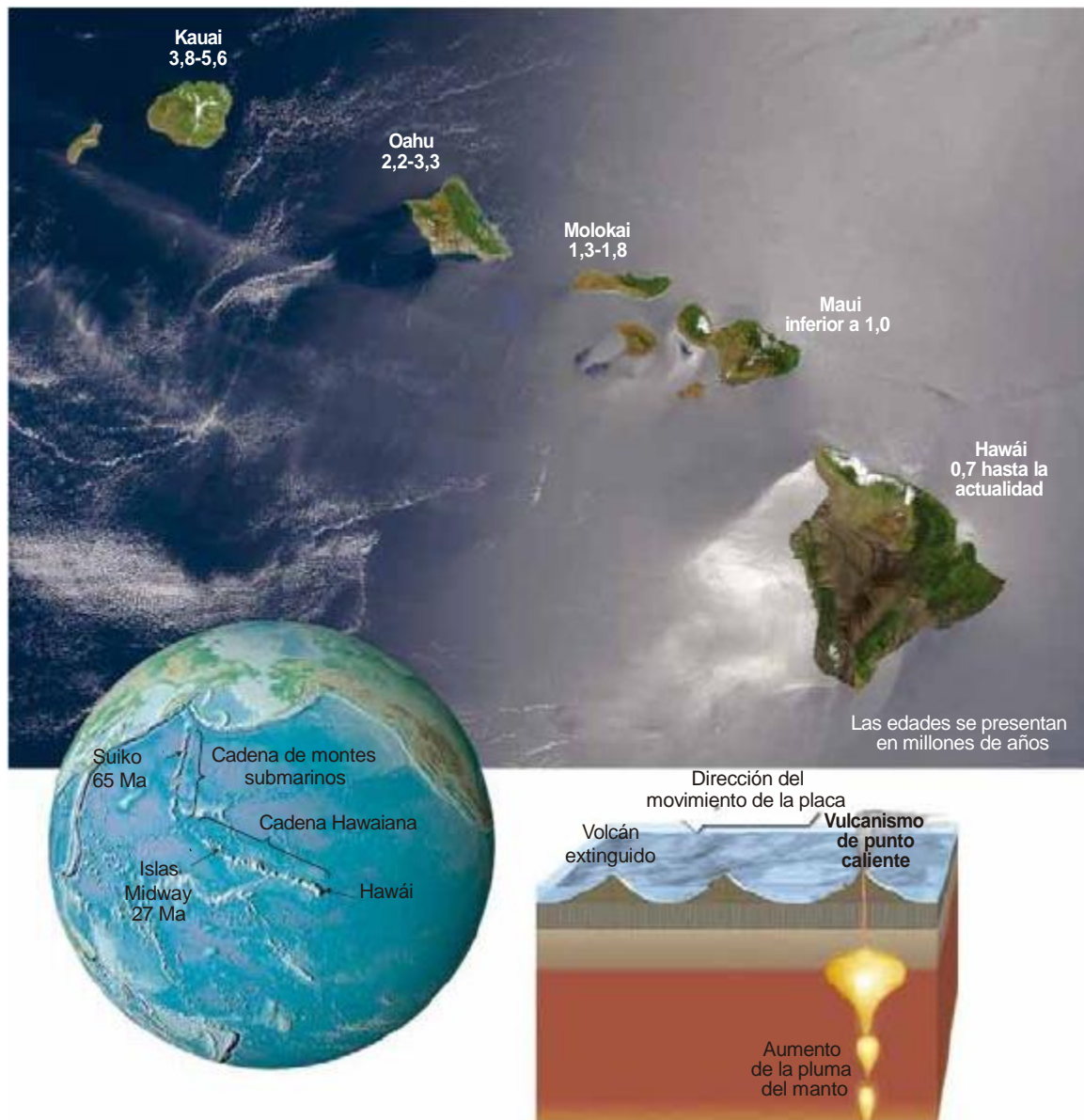
### PLATE TECTONICS

Formation and Breakup of Pangaea

Se han utilizado algunos métodos para establecer la dirección y la velocidad del movimiento de las placas. El paleomagnetismo almacenado en las rocas del fondo oceánico es un método utilizado para determinar las velocidades a las cuales las placas se van separando de los ejes de la dorsal cuando son generados. Además, las huellas de los puntos calientes como los de la cadena de islas Hawái-Emperador marcan la velocidad y la dirección del movimiento relativo con la pluma caliente incrustada en el manto de abajo.

## Plumas del manto y movimientos de las placas

Midiendo la longitud de una huella de puntos calientes y el intervalo de tiempo entre la formación de sus



**FIGURA 2.29.** La cadena de islas y de montañas sumergidas que se extiende desde Hawái a la fosa de las Aleutianas se produce por el movimiento de la placa del Pacífico sobre una pluma del manto (punto caliente). La datación radiométrica de las Islas Hawái muestra que la edad de la actividad volcánica aumenta al alejarnos de la «gran isla» de Hawái.

estructuras volcánicas más antiguas y la más joven (Hawái), puede calcularse una velocidad media del movimiento de la placa. Por ejemplo, esta porción de la cadena Isla Hawái-Monte Submarino Emperador mide unos 6.000 km de longitud y se formó durante los últimos 65 millones de años. Por tanto, la velocidad media de movimiento de la placa del Pacífico, en relación a la pluma del manto, era de unos 9 cm al año

Las huellas del punto caliente pueden ser útiles también cuando se establece la dirección en la que se mueve una placa. Obsérvese en la Figura 2.29 que la cadena de islas Hawái-Emperador se dobla. Esta flexión particular de la traza se produjo hace unos 50 millones de años,

cuando el movimiento de la placa del Pacífico cambió desde una dirección casi norte a una dirección noroeste. De igual forma, los puntos calientes localizados en el fondo del Atlántico han aumentado nuestro conocimiento sobre la migración de las masas de tierra después de la fragmentación de Pangea.

La existencia de las plumas del manto y su relación con los puntos calientes están bien documentadas. La mayoría de las plumas del manto son estructuras muy antiguas que parecen mantener posiciones relativamente fijas dentro del manto. Sin embargo, la evidencia reciente ha demostrado que algunos puntos calientes pueden migrar lentamente. Los resultados preliminares



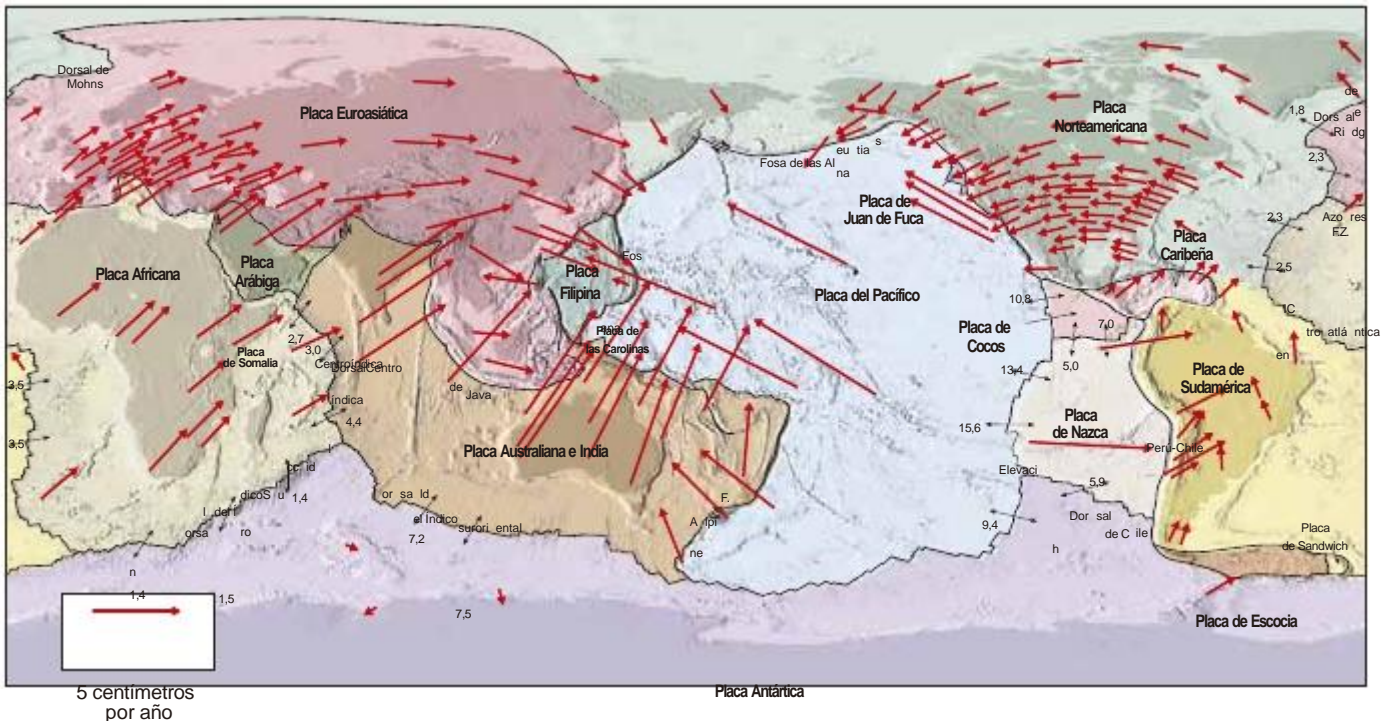
**FIGURA 2.30.** Vulcanismo de punto caliente, volcán Kilauea, Hawái (Foto por cortesía de la U.S. Geological Survey).

sugieren que el punto caliente hawaiano puede haber migrado hacia el sur en hasta 20 grados de latitud. Si es así, habría que reevaluar los modelos antiguos de movimiento de las placas que estaban basados en el marco de referencia de «puntos calientes fijos».

## El paleomagnetismo y los movimientos de placas

Los investigadores han elaborado una escala de tiempo para las inversiones magnéticas yendo hacia atrás casi 200 millones de años; por consiguiente, puede determinarse con precisión la velocidad a la que se produce la expansión del fondo oceánico a lo largo de los diversos segmentos de la dorsal. En el océano Pacífico, por ejemplo, las franjas magnéticas son mucho más anchas para los intervalos de tiempo correspondientes que las del océano Atlántico. Por ende, concluimos que los centros de expansión encontrados en el Pacífico tenían velocidades de expansión más rápidas que los generados en la cuenca atlántica.

Al aplicar fechas radiométricas a esos acontecimientos magnéticos, se encontró que la velocidad de expansión en el Atlántico norte es de unos 2 cm al año (Figura 2.31). La velocidad es solo ligeramente más rápida en el Atlántico sur. Por el contrario, las velocidades de expansión a lo largo de la dorsal del Pacífico oriental oscilan fundamentalmente entre 6 y 12 cm al año,



**FIGURA 2.31.** Este mapa ilustra las direcciones y las velocidades del movimiento de las placas en centímetros al año. Las velocidades de la expansión del fondo oceánico (mostradas con flechas y marcas negras) se basan en el espaciado de las franjas magnéticas datadas (anomalías). Las flechas rojas muestran el movimiento de placas en localizaciones seleccionadas basado en datos de GPS (Datos del fondo

oceánico de DeMets y colaboradores, Datos de la GPS del Jet Propulsion Laboratory).

con una velocidad máxima de 20 cm al año en un lugar. Por tanto, el fondo oceánico actúa como una grabadora magnética, grabando los cambios en el campo magnético de la Tierra que pueden utilizarse para calcular las velocidades de expansión del fondo oceánico.

### A veces los alumnos preguntan...

**Si los continentes se mueven, ¿también se mueven otras estructuras, como los segmentos de la dorsal centro oceánica?**

Ésa es una buena observación, y sí, lo hacen. Es interesante apuntar que hay muy pocas cosas realmente fijas sobre la superficie de la Tierra. Cuando hablamos de movimiento de estructuras sobre la Tierra, debemos tener en cuenta la siguiente cuestión: «¿Moverse en relación con qué?» Sin duda, la dorsal centro oceánica se mueve en relación con los continentes (lo cual a veces provoca la subducción de segmentos de las dorsales centro oceánicas debajo de los continentes). Además, la dorsal centro oceánica se mueve en relación con un punto fijo situado fuera de la Tierra. Eso significa que un observador que orbite por encima de la Tierra vería, tras solo unos pocos millones de años, que todas las estructuras continentales y del fondo oceánico, así como los bordes de placa, realmente se mueven.

En resumen, los datos de estudio de las huellas de puntos calientes, el paleomagnetismo y otras técnicas indirectas, han sido útiles para medir las velocidades relativas a las que dos placas se juntan, se separan o se deslizan una con respecto a la otra, al menos como un promedio a lo largo de millones de años.

## Medición de las velocidades de las placas desde el espacio

Las placas no son superficies planas sino que son secciones curvadas de una esfera, lo que complica en gran medida la descripción del movimiento de placas. Además, las placas suelen exhibir algún grado de movimiento de rotación, lo que puede provocar que dos localizaciones de la misma placa se muevan a diferentes velocidades y en diferentes direcciones. Este último hecho puede darse haciendo girar el plato de la cena en el sentido de las agujas del reloj. Al hacer esto, se repara que lo que haya en el lado izquierdo del plato se alejarán de usted (divergencia) y lo que está al lado derecho se acercará a usted (convergencia). Lo que esté en el centro girará, pero su posición relativa con respecto a usted no cambiará. La naturaleza compleja del movimiento de placas hace que la tarea de describirlo sea más difícil que establecer simplemente el movimiento relativo entre dos placas a lo largo del borde que las separa. Por fortuna, utilizando tecnología de la era espacial, los investigadores han podido recientemente hacer cálculos exactos del movimiento absoluto de centenares de lugares en todo el mundo.

Quizá esté familiarizado con el Sistema de Posicionamiento Global, que es parte del sistema de navegación utilizado en los automóviles para localizar la posición propia y dar direcciones hacia otra localización. En el Sistema de Posicionamiento Global se utilizan dos docenas de satélites que envían señales de radio, las cuales son interceptadas por los receptores de GPS localizados en la superficie de la Tierra. La posición exacta del receptor se determina estableciendo simultáneamente la distancia desde el receptor a cuatro o más satélites. Los investigadores utilizan un equipo específicamente diseñado que es capaz de localizar la posición de un punto sobre la tierra dentro de unos pocos milímetros (un diámetro aproximado como el de un guisante pequeño). Para establecer el movimiento de las placas, un sitio concreto es investigado repetidamente durante una serie de años.

Los datos obtenidos de estas y otras técnicas similares se muestran en la Figura 2.31. Los cálculos demuestran que Hawái se mueve hacia el noroeste y se aproxima a Japón a 8,3 cm al año. Un lugar de Maryland se está alejando de uno en Inglaterra a una velocidad de aproximadamente 1,7 cm al año (una velocidad próxima a la velocidad de expansión de 2,0 cm al año que se estableció a partir de las pruebas paleomagnéticas). Las técnicas en las que se utilizan dispositivos GPS han sido útiles también para establecer movimientos de la corteza a pequeña escala, como los que se producen a lo largo de las fallas en regiones de actividad tectónica conocida.

## ¿QUÉ IMPULSA LOS MOVIMIENTOS DE LAS PLACAS?

La teoría de la tectónica de placas *describe* el movimiento de las placas y el papel que este movimiento representa en la generación y la modificación de las principales estructuras de la corteza terrestre. Por consiguiente, la aceptación de la tectónica de placas no depende del conocimiento exacto de qué impulsa los movimientos de las placas. Afortunadamente es así, porque ninguno de los modelos propuestos hasta ahora puede explicar todos los principales aspectos de la tectónica de placas.

### Convección placa-manto

A partir de los datos geofísicos, hemos aprendido que aunque el manto está constituido casi por completo de roca sólida, es lo suficientemente caliente como para exhibir flujo convectivo como un fluido. El tipo más sencillo de convección es análogo al calentamiento de una cacerola de agua en el fuego (Figura 2.32). El calentamiento de la base hace que el material ascienda en láminas relativamente finas o en gotas que se expanden a la superficie



**FIGURA 2.32.** La convección es un tipo de transferencia de calor que implica el movimiento real de una sustancia. Aquí el fuego calienta el agua en el fondo de una cazuela. El agua caliente se expande, se vuelve menos denso (más flotante) y asciende. A la vez, el agua más fría y más densa cerca de la superficie, se hunde.

y se enfrían. Por último, la capa superficial se hace más gruesa (aumenta en densidad) y se vuelve a hundir hacia el fondo donde vuelve a ser calentada hasta que alcanza suficiente flotabilidad para poder ascender.

La convección del manto es considerablemente más compleja que el modelo que se acaba de describir. La forma del manto no se parece a la de una cazuela. Antes bien, es una zona con forma esférica que tiene un borde superior mucho más grande (superficie de la tierra) que el borde inferior (borde núcleo -manto). Además, la convección del manto es impulsada por una combinación de tres procesos térmicos: calentamiento en la base por pérdida de calor desde el núcleo de la Tierra; calentamiento desde el interior por la desintegración de los isótopos radiactivos; y enfriamiento desde arriba, que crea láminas litosféricas gruesas y frías que se hunden en el manto.

Cuando se introdujo por primera vez la expansión del fondo oceánico, los geólogos propusieron que la principal fuerza impulsora para el movimiento de las placas era el ascenso que procedía de zonas profundas del manto. Se pensaba que, al alcanzar la base de la litosfera, este grupo se expandía lateralmente y arrastraba las placas. Por tanto, se consideraba que estas últimas eran transportadas pasivamente por el flujo convectivo del manto. Según las evidencias físicas, sin embargo, resultó claro que el ascenso por debajo de las dorsales oceánicas es bastante superficial y no está relacionado con la circulación profunda en el manto inferior. Es el movimiento horizontal de las placas litosféricas alejándose de la dorsal lo que causa el ascenso del manto, no al contrario. Por tanto, en los modelos actuales, las placas constituyen una parte integral de la convección del manto, quizá incluso su componente más activo.

La convección del manto se entiende todavía poco, pero los investigadores en general están de acuerdo en lo siguiente:

1. El flujo **convectivo** del manto rocoso de 2.900 km de espesor (donde las rocas calientes y flotantes ascienden y el material más frío y denso se hunde) es la fuerza impulsora subyacente que provoca el movimiento de las placas.
2. La convección del manto y la tectónica de placas forman parte del mismo sistema. Las placas oceánicas en subducción conducen la porción fría de la corriente de convección que se mueve hacia abajo, mientras el afloramiento somero de roca caliente a lo largo de la dorsal oceánica y las plumas ascendentes del manto son el brazo de flujo ascendente del mecanismo convectivo.
3. El flujo convectivo en el manto es el principal mecanismo que transporta el calor desde el interior de la tierra hasta la superficie, donde finalmente es irradiado al espacio.

Lo que no se conoce con ningún grado de certeza es la naturaleza precisa de este flujo convectivo.

Primero observaremos algunas de las fuerzas que contribuyen al movimiento de las placas y luego examinaremos dos de los modelos que se han propuesto para describir la convección placa-manto.

## Fuerzas que impulsan el movimiento de las placas

Existe acuerdo general en que la subducción de las capas frías y densas de la litosfera oceánica es la principal fuerza impulsora del movimiento de las placas (Figura 2.33). A medida que estas capas se hunden en la astenosfera, «empujan» la placa a remolque. Este fenómeno, denominado **fuerza de arrastre de la placa**, se produce porque las capas antiguas de la litosfera oceánica son más densas que la astenosfera subyacente y, por tanto, se «hunden como una roca».

Otra fuerza impulsora importante se denomina **fuerza de empuje de dorsal** (Figura 2.33). Este mecanismo accionado por la gravedad es consecuencia de la posición elevada de la dorsal oceánica, que hace que las capas de la litosfera se «deslicen» hacia abajo por los flancos de la dorsal. La fuerza de empuje de dorsal parece contribuir mucho menos a los movimientos de las placas que la fuerza de arrastre de la placa. Las principales pruebas de esto proceden de la comparación de las velocidades de expansión del fondo oceánico a lo largo de los segmentos que tienen elevaciones diferentes. A pesar de su mayor altura media sobre el fondo oceánico, las velocidades de expansión a lo largo de la dorsal Centroatlántica son considerablemente inferiores que



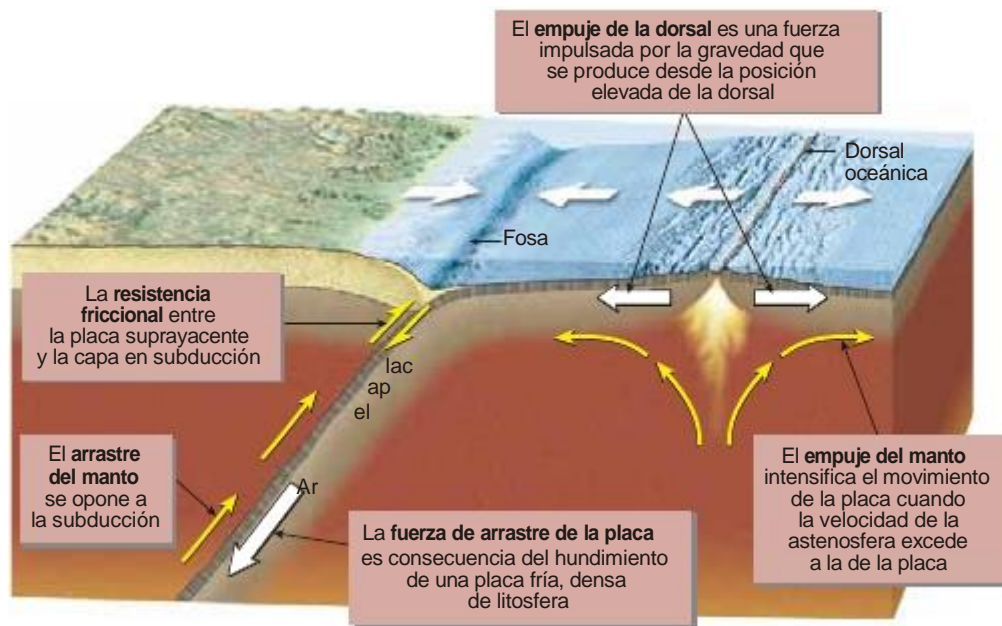


FIGURA 2.33. Ilustración de algunas de las fuerzas que actúan sobre las placas tectónicas.

las velocidades de expansión a lo largo de la dorsal del Pacífico oriental, que es menos empinada (Figura 2.31). Además, las placas en movimiento rápido experimentan subducción a lo largo de un porcentaje mayor de sus márgenes que las placas de movimiento lento. Este hecho respalda la noción de que la fuerza de arrastre de la placa es más importante que la fuerza de empuje de dorsal. Son ejemplos de placas de movimiento rápido que tienen zonas de subducción extensas a lo largo de sus márgenes las placas del Pacífico, de Nazca y de Cocos.

Las fuerzas de empuje de la placa y de arrastre del manto parecen ser las fuerzas dominantes que actúan sobre las placas, pero no son las únicas fuerzas que influyen en el movimiento de las placas. Debajo de las placas, el flujo convectivo en el manto ejerce una fuerza, quizá mejor descrita como «arrastre del manto» (véase Figura 2.33). Cuando el flujo en la astenosfera se mueve a una velocidad que supera a la de la placa, el arrastre del manto potencia el movimiento de la misma. Sin embargo, si la astenosfera se mueve más despacio que la placa, o en dirección opuesta, esta fuerza tiende a resistirse al movimiento de la placa. Otro tipo de resistencia al movimiento de la placa se produce a lo largo de las zonas de subducción. Aquí, la fricción entre la placa supra yacente y la descendente genera actividad sísmica significativa.

## Modelos de convección placa-manto

Cualquier modelo aceptable de convección placa-manto debe explicar las variaciones de composición que se sabe que existen en el manto. Por ejemplo, las lavas basálticas que hacen erupción a lo largo de las dorsales oceánicas,

así como las que son generadas por el vulcanismo de puntos calientes, como las encontradas en Hawái, tienen origen en el manto. Sin embargo, los basaltos de las dorsales oceánicas son muy homogéneos en composición y carecen de ciertos elementos. Las erupciones de puntos calientes, por otro lado, tienen concentraciones elevadas de esos elementos y suelen tener composiciones variadas. Dado que las lavas basálticas que surgen de diferentes ámbitos tectónicos tienen diferentes composiciones, se supone que proceden de fuentes de manto químicamente distintas.

## Estratificación a 660 km

Algunos investigadores sostienen que el manto se parece a un «pastel de capas gigante» dividido a una profundidad de 660 km. Como se muestra en la Figura 2.34A, este modelo estratificado tiene dos zonas de convección: una capa dinámica delgada en el manto superior y otra gruesa y lenta situada debajo. Este modelo ofrece una explicación satisfactoria de por qué las lavas basálticas que entran en erupción a lo largo de las dorsales oceánicas tienen una composición diferente de las lavas que entran en erupción en Hawái como consecuencia de la actividad de los puntos calientes. Los basaltos de la dorsal centro oceánica proceden de la capa convectiva superior, que está bien mezclada, mientras que la pluma del manto que alimenta los volcanes hawaianos utiliza una fuente de magma más profunda, más primitiva, que reside en la capa convectiva inferior.

Sin embargo, los datos recogidos del estudio de ondas sísmicas han demostrado que, al menos, algunas placas oceánicas en subducción penetran en el límite de los 660 km y profundizan en el manto. La litosfera en

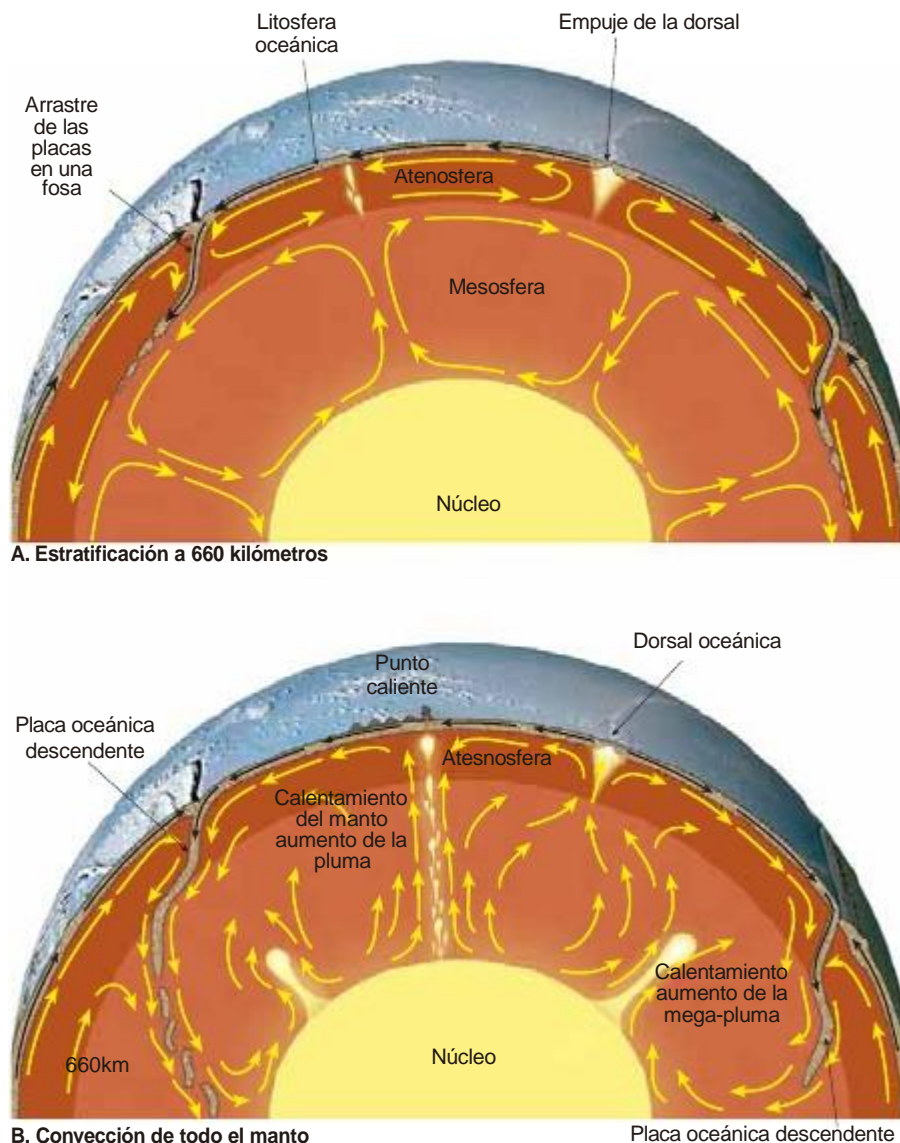
subducción debería servir para mezclar ambas capas, la superior y la inferior, destruyendo así la estructura estratificada propuesta por este modelo.

### Convección de todo el manto

Otros investigadores están a favor de algún tipo de convección de todo el manto, en la que la litosfera oceánica fría se hunde a grandes profundidades y agita todo el manto (Figura 2.34B). Un modelo de todo el manto sugiere que el fondo oceánico arrastrado en profundidad por las placas en subducción constituye el límite núcleo-manto. Con el tiempo, este material se funde y asciende por flotabilidad hacia la superficie como una pluma del manto, transportando así material caliente hacia la superficie (véase Figura 2.34B).

Estudios recientes predicen que la convección de todo el manto causaría la mezcla completa del manto completo en cuestión de unos pocos centenares de millones de años. Esto eliminaría las fuentes de magma químicamente diferentes, observadas en el vulcanismo de puntos calientes y aquel asociado con la actividad volcánica en dorsales oceánicas. Por tanto, el modelo de convección de todo el manto también tiene inconvenientes.

Aunque todavía hay mucho que aprender sobre los mecanismos que provocan la migración de las placas tectónicas de la Tierra por todo el planeta, una cosa está clara. La distribución desigual del calor en el interior de la Tierra genera algún tipo de convección térmica que acaba produciendo el movimiento de las placas y el manto.



**FIGURA 2.34.** Modelos propuestos para la convección del manto. **A.** El modelo de «tarta en capas» consiste en dos placas de convección: una capa de convección delgada por encima de los 660 km y otra gruesa por debajo. **B.** En este modelo de convección de todo el manto, la litosfera oceánica fría desciende al manto más inferior mientras las plumas calientes del manto transportan el calor hacia la superficie.

## LA IMPORTANCIA DE LA TEORÍA DE LA TECTÓNICA DE PLACAS

La tectónica de placas es la primera teoría que proporciona una visión exhaustiva de los procesos que produjeron las principales estructuras de la superficie terrestre, incluidos los continentes y las cuencas oceánicas. Como tal, ha proporcionado un mejor conocimiento del funcionamiento de nuestro planeta dinámico relacionando muchos aspectos de la Geología que antes se consideraban no relacionados. Dentro del marco de la tectónica de placas, los geólogos han encontrado explicaciones para la distribución geológica de los terremotos, los volcanes y los cinturones montañosos. Además, ahora podemos explicar mejor las distribuciones de plantas y animales

en el pasado geológico, así como comprender por qué se forman yacimientos de minerales económicamente importantes en ciertos ambientes tectónicos.

Pese a su utilidad para explicar muchos de los procesos geológicos a gran escala que operan en la Tierra, la tectónica de placas no se comprende por completo. El modelo que se presentó en 1968 era simplemente un marco básico que dejaba muchos detalles para la investigación posterior. Mediante pruebas fundamentales, el modelo inicial se ha ido modificando y ampliando para convertirse en la teoría que hoy conocemos. Sin duda, la teoría actual se perfeccionará conforme se obtengan más datos y observaciones. La teoría de la tectónica de placas, pese a ser una herramienta poderosa, es, sin embargo, un modelo evolutivo de los procesos dinámicos de la Tierra.

### CAPÍTULO 2

## Tectónica de placas: el desarrollo de una revolución científica

### RESUMEN

A principios del siglo xx *Alfred Wegener* estableció la hipótesis de la *deriva continental*. Uno de sus principales principios era que un supercontinente denominado *Pangea* empezó a separarse en continentes más pequeños hace unos 200 millones de años. Los fragmentos continentales separados «migraron» entonces a sus posiciones actuales. Para apoyar su hipótesis, *Wegener* utilizó el *ajuste entre Sudamérica y África*, la *evidencia fósil*, los *tipos y estructuras rocosas* y los *climas antiguos*. Una de las principales objeciones a la hipótesis de la deriva continental fue su incapacidad para proporcionar un mecanismo aceptable para el movimiento de los continentes. Del estudio del *paleomagnetismo* los investigadores aprendieron que los continentes habían migrado, como proponía *Wegener*.

En 1962, *Harry Hess* formuló la idea de la *expansión del fondo oceánico*, que establece que se está generando continuamente nuevo fondo oceánico en las dorsales centro oceánicas y que el fondo oceánico antiguo y denso se consume en las fosas submarinas. El descubrimiento de franjas alternas de magnetismo de intensidad alta y baja, que son paralelas a las crestas de las dorsales, proporcionaron apoyo a la teoría de la expansión del fondo oceánico.

En 1968, la deriva continental y la expansión del fondo oceánico se unieron en una teoría mucho más

completa conocida como *tectónica de placas*. Según la tectónica de placas, la capa externa rígida de la Tierra (*litosfera*) se encuentra por encima de una región más débil, denominada *astenosfera*. Además, la litosfera está dividida en varios fragmentos grandes y numerosos más pequeños, denominados *placas*, que están en movimiento y cambiando continuamente de forma y tamaño. Las placas se mueven como unidades relativamente coherentes y se deforman fundamentalmente a lo largo de sus bordes.

Los *bordes de placa divergentes* aparecen donde las placas se separan, provocando el ascenso de material desde el manto para crear nuevo fondo oceánico. La mayoría de los bordes divergentes se localiza a lo largo del eje del sistema de dorsales oceánicas y está asociada con la expansión del fondo oceánico. Dentro de un continente pueden formarse nuevos bordes divergentes (por ejemplo, los valles de rift del este de África), donde pueden fragmentar las masas de tierra y desarrollar una nueva cuenca oceánica.

Los *bordes de placa convergentes* aparecen donde las placas se juntan, provocando la subducción de la litosfera oceánica en el manto a lo largo de una fosa submarina. La convergencia de un bloque oceánico y uno continental provoca la subducción de la placa oceánica y la formación de un *arco volcánico continental* como

el de los Andes de Sudamérica. La convergencia océano-océano produce una cadena en forma de arco de islas volcánicas denominada *arco de islas volcánicas*. Cuando dos placas que transportan corteza continental convergen, las placas continentales flotantes colisionan, lo que provoca la formación de una cadena montañosa como la del Himalaya.

Los *bordes de falla transformante* se producen donde las placas se desplazan una con respecto a la otra sin producción ni destrucción de litosfera. La mayoría de las fallas transformantes une dos segmentos de dorsal centro oceánica donde proporcionan el medio por el cual la corteza oceánica creada en la cresta de la dorsal puede ser transportada a su lugar de destrucción, a una fosa submarina. Aun otras, como la Falla de San Andrés, atraviesan la corteza continental.

La teoría de la tectónica de placas se ve apoyada por: (1) la distribución global de los *terremotos* y su estrecha asociación con los bordes de placa; (2) la edad y

el espesor de los *sedimentos* de los fondos de las cuencas submarinas, y (3) la existencia de cadenas de islas que se formaron sobre *puntos calientes* y proporcionaron un entramado de referencia para trazar la dirección del movimiento de las placas.

El flujo convectivo en el manto rocoso, en el que las rocas calientes flotantes ascienden y los materiales más densos y fríos se hunden, es la fuerza impulsora subyacente para la tectónica de placas. Los mecanismos que contribuyen al movimiento de las placas son la fuerza de arrastre de la placa, la fuerza de empuje de dorsal y la succión de las placas. La *fuerza de arrastre de la placa* se produce cuando la litosfera oceánica fría y densa es subducida y arrastra la litosfera. La *fuerza de empuje de dorsal* es impulsada por las fuerzas gravitacionales que ponen en movimiento las placas elevadas sobre las dorsales oceánicas. La *succión de las placas* es una fuerza que surge del arrastre de una placa en subducción sobre el manto adyacente.

## TÉRMINOS FUNDAMENTALES

arco de islas, 66	fuerza de arrastre de la placa, 77	polaridad invertida, 56
arco de islas volcánicas, 66	fuerza de empuje de dorsal, 77	polaridad normal, 56
arco volcánico continental, 65	fusión parcial, 65	punto caliente, 72
astenosfera, 58	huella de punto caliente, 72	punto de Curie, 52
borde convergente, 62	inversión geomagnética, 56	rift continental, 63
borde de falla transformante, 62	litosfera, 58	sistema de elevadas dorsales oceánicas, 54
borde divergente, 62	magnetismo remanente, 52	supercontinente, 46
centro de expansión, 62	magnetómetro, 56	tectónica de placas, 58
deriva continental, 46	paleomagnetismo, 52	valle de rift, 62
escala de tiempo magnético, 56	Pangaea, 46	zona de subducción, 64
expansión del fondo oceánico, 55	placa litosférica, 59	zona de fractura, 68
falla transformante, 68	placa tectónica, 59	
fosa submarina, 64	pluma de manto, 72	

## PREGUNTAS DE REPASO

1. ¿A quién se atribuye el desarrollo de la hipótesis de la deriva continental?
2. ¿Cuál fue la primera línea de evidencia que condujo a los investigadores a sospechar que los continentes habían estado conectados?
3. ¿Qué es Pangea?
4. Describa las clases de evidencias que Wegener y sus partidarios recogieron para apoyar la hipótesis de la deriva continental.
5. Explique por qué el descubrimiento de restos fósiles de *Mesosaurus* en Sudamérica y África, pero no en ningún otro lugar, respalda la hipótesis de la deriva continental.
6. A principios del siglo xx, ¿cuál era la opinión predominante sobre cómo migraban los animales terrestres a través de los enormes espacios oceánicos?
7. ¿Cómo explicó Wegener la existencia de glaciares en las masas continentales meridionales, mientras al mismo tiempo en algunas zonas de Norteamérica, Europa y Siberia se encontraban pantanos tropicales?
8. ¿A qué dos aspectos de la hipótesis de la deriva continental pusieron objeciones la mayoría de los geólogos?
9. ¿Qué se entiende por expansión del fondo oceánico? ¿A quién se atribuye la formulación de este

- importante concepto? ¿Dónde se está produciendo expansión activa del fondo oceánico en la actualidad?
10. Describa cómo Fred Vine y D. H. Matthews relacionaron la hipótesis de la expansión del fondo oceánico con las inversiones magnéticas.
  11. Compare y contraste la litosfera y la astenosfera.
  12. Enumere tres tipos de bordes de placa y describa el movimiento relativo en cada uno de ellos.
  13. ¿Dónde se forma nueva litosfera? ¿Dónde se consume? ¿Por qué la litosfera debe producirse aproximadamente a la misma velocidad que se destruye?
  14. Describa brevemente el proceso de la deriva continental. ¿Dónde se está produciendo en la actualidad?
  15. Compare un arco volcánico continental y un arco de islas volcánicas.
  16. ¿Por qué es subducida la porción oceánica de una placa litosférica, mientras que no lo es la porción continental?
  17. Describa brevemente cómo se forman sistemas montañosos como los del Himalaya.
  18. Distinga entre fallas transformantes y los otros dos tipos de bordes de placa.
  19. Algunas personas predicen que algún día California se hundirá en el océano. ¿Esta idea es compatible con el concepto de la tectónica de placas?
  20. ¿Con qué tipo de borde de placa están asociados los siguientes lugares o estructuras? Himalaya, Islas Aleutianas, Mar Rojo, Andes, falla de San Andrés, Islandia, Japón, monte de Santa Helena.
  21. ¿Qué edad tienen los sedimentos más antiguos recuperados mediante perforación submarina? ¿Cómo se comparan las edades de estos sedimentos con las edades de las rocas continentales más antiguas?
  22. Suponiendo que los puntos calientes permanecen fijos, ¿en qué dirección se estaba moviendo la placa del Pacífico mientras se estaban formando las islas Hawái? (Véase Figura 2.29, pág. 74) ¿Y mientras se formaba el monte submarino Suiko?
  23. Describa la fuerza de arrastre de la placa y la de empuje de la dorsal. ¿Cuál de estas fuerzas parece contribuir más al movimiento de las placas?
  24. ¿Qué papel se piensa que desempeñan las plumas del manto en el flujo convectivo del manto?
  25. Describa brevemente los dos modelos propuestos para la convección manto-placa. ¿Qué falta en cada uno de estos modelos?

## MasteringGeology

La plataforma Mastering es el tutorial (en inglés) más eficaz y ampliamente utilizado para la evaluación de Ciencias.

Con MasteringGeology el profesor puede: personalizar el contenido, asignar distintas tareas, exportar las calificaciones, comparar el rendimiento del alumno, comunicarse con los estudiantes... Mientras que el alumno puede disfrutar de un Study Area diferente por cada uno de los capítulos.

En MasteringGeology, además, podrá encontrar los siguientes contenidos y materiales interactivos extra:

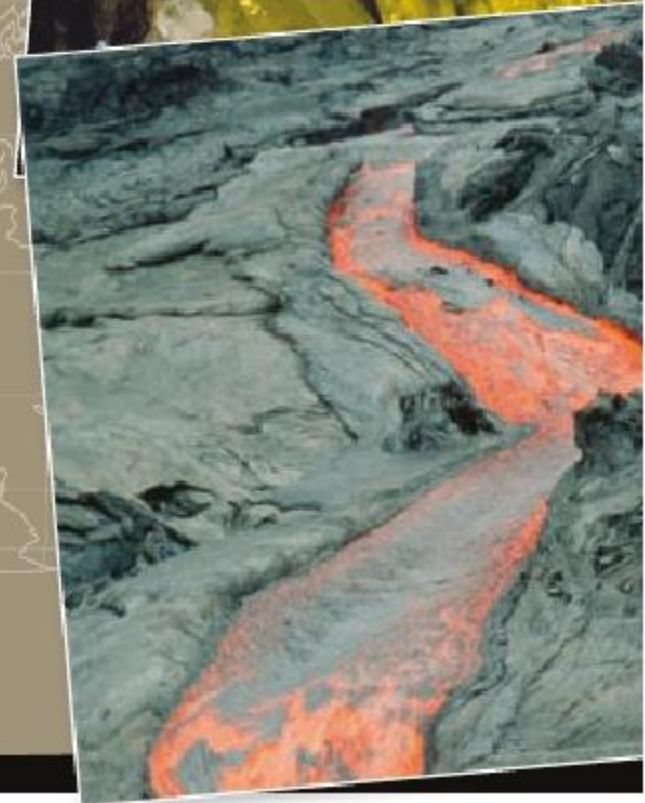
Encounter Earth  
 Geoscience Animations  
 GEODE  
 Pearson eText

Para acceder a todos estos contenidos adicionales solo se necesita el código de acceso de las tarjetas que podrás adquirir con la compra del libro o por separado.



# CAPÍTULO 3

## Materia y minerales\*



\* El profesor Mark Watry, Spring Hill College, contribuyó a la revisión de este capítulo.



La corteza terrestre y los océanos son la fuente de una amplia variedad de minerales útiles y esenciales. La mayoría de la gente está familiarizada con los usos comunes de muchos metales básicos, entre ellos el aluminio de las latas de bebida, el cobre de los cables eléctricos y el oro y la plata en joyería. Pero algunos no saben que la mina de un lapicero contiene el mineral de tacto grueso denominado grafito y que los polvos para el baño y muchos cosméticos contienen el mineral talco. Además, muchos no saben que las brocas utilizadas por los dentistas para taladrar el esmalte de los dientes están impregnadas de diamante, o que el mineral común cuarzo es la fuente de silicio para los chips de ordenador. De hecho, prácticamente todos los productos fabricados contienen materiales obtenidos de los minerales. Conforme crecen las exigencias de minerales de la sociedad moderna, lo hace también la necesidad para localizar más zonas de abastecimiento de minerales útiles, lo que se vuelve también más estimulante.

Además de los usos económicos de las rocas y los minerales, todos los procesos estudiados por los geólogos son en cierta manera dependientes de las propiedades de esos materiales básicos de la Tierra. Acontecimientos como las erupciones volcánicas, la formación de montañas, la meteorización y la erosión, e incluso los terremotos, implican rocas y minerales. Por consiguiente, es esencial un conocimiento básico de los materiales terrestres para comprender todos los fenómenos geológicos.



## MINERALES: COMPONENTES BÁSICOS DE LAS ROCAS



### MATTER AND MINERALS Introduction

Vamos a empezar nuestra discusión de los materiales terrestres con una visión panorámica de la **mineralogía** (*mineral* = mineral; *ología* = el estudio de), ya que los minerales son los componentes básicos de las rocas. Además desde hace miles de años los humanos han utilizado minerales con fines prácticos y decorativos (Figura 3.1).

Los primeros minerales que se extrajeron fueron el sílex y el perdernal, que fueron transformados por las personas en armas y herramientas para cortar. Ya en el año 3700 a.C. los egipcios empezaron a extraer oro, plata y cobre de las minas, y en el 2200 a.C. los humanos descubrieron cómo combinar el cobre con el estaño para hacer bronce, una aleación dura y resistente. La Edad de Bronce empezó su declive cuando se descubrió la habilidad para extraer hierro de los minerales como el hematites. Sobre el 800 d.C. la tecnología para trabajar el hierro había avanzado hasta tal punto que las armas y muchos objetos cotidianos estaban hechos de hierro

y no de cobre, bronce o madera. Durante la Edad Media la extracción de gran variedad de minerales era común por toda Europa y se instauró el ímpetu del estudio formal de los minerales.

El término *mineral* se emplea de diferentes formas. Por ejemplo, las personas preocupadas por la salud y el ejercicio ensalzan los beneficios de las vitaminas y los minerales. Normalmente la industria minera emplea el término para referirse a cualquier cosa que se extrae del terreno, como carbón, menas de hierro, o arena y grava. El juego de acertijos conocido como *Veinte preguntas* suele empezar con la cuestión: ¿es animal, vegetal o mineral? ¿Qué criterios siguen los geólogos para determinar lo que es un mineral?

Los geólogos definen los **minerales** como cualquier sólido inorgánico natural *que posea una estructura cristalina ordenada y una composición química bien definida*. Por tanto, para que se considere mineral cualquier material terrestre, debe presentar las siguientes características:

- 1. Aparece de forma natural.** Los minerales se forman mediante procesos geológicos naturales. Por tanto, los diamantes y rubíes sintéticos, además de otras sustancias producidas en un laboratorio no se consideran minerales.
- 2. Sustancia sólida.** Los minerales son sólidos dentro de los intervalos de las temperaturas que normalmente se experimentan en la corteza terrestre. Así el



**FIGURA 3.1.** Colección de cristales de cuarzo bien desarrollados encontrados cerca de Hot Springs, Arkansas (Foto de Jeff Scovil).

hielo (agua congelada) se considera un mineral, y el agua líquida y el vapor de agua no.

3. **Estructura cristalina ordenada.** Los minerales son sustancias cristalinas es decir, sus átomos deben estar dispuestos según un modelo ordenado y repetitivo, que se refleja en sólidos con formas regulares que denominamos cristales (Figura 3.1). Algunos sólidos naturales, como el vidrio volcánico, u obsidiana, carecen de una estructura atómica repetitiva y no se consideran minerales.
4. **Composición química definida.** La mayoría de los minerales son compuestos químicos cuyas composiciones vienen definidas por sus fórmulas químicas. El mineral pirita ( $\text{FeS}_2$ ), por ejemplo, está formado por un átomo de hierro (Fe) por cada dos átomos de azufre (S). En la naturaleza, sin embargo, es habitual que algún átomo dentro de la estructura cristalina sea sustituido por otros de tamaño similar sin que la estructura interna o las propiedades del mineral se vean afectadas. Por tanto, las composiciones químicas de los minerales pueden variar pero *dentro de unos límites bien definidos y específicos*.
5. **Normalmente son inorgánicos.** Los sólidos cristalinos inorgánicos, como ejemplifica la sal de mesa común o halita, que se encuentran en el terreno de forma natural se consideran minerales; por el contrario los compuestos orgánicos normalmente no lo son. El azúcar, un sólido cristalino como la sal pero que se extrae de la caña de azúcar o de la remolacha

azucarera, es un ejemplo común de uno de dichos compuestos orgánicos. Sin embargo muchos animales marinos excretan compuestos inorgánicos, como el carbonato de calcio, o calcita, en forma de conchas y arrecifes de coral. Si estos materiales están enterrados y pasan a formar parte del registro de rocas, son considerados minerales por los geólogos.

Las rocas, por otro lado, se definen de una manera menos precisa. Una **roca** es cualquier masa sólida de materia mineral, o parecida a mineral, que se presenta de forma natural como parte de nuestro planeta. Algunas rocas están compuestas casi por completo de un solo mineral. Un ejemplo común es la roca sedimentaria *caliza*, que está compuesta de masas del mineral calcita con impurezas. Sin embargo, la mayoría de las rocas, como el granito común mostrado en la Figura 3.2, aparece como agregados de varias clases de minerales. Aquí, el término *agregado* significa que los minerales están unidos de tal forma que se conservan las propiedades de cada uno. Obsérvese que pueden identificarse con facilidad los constituyentes minerales de la muestra de granito mostrada en la Figura 3.2.

Algunas otras rocas están compuestas de materia mineral. Entre ellas las rocas volcánicas *obsidiana* y *pumita*, que son sustancias vítreas, no cristalinas, y el *carbón*, que está formada por restos orgánicos sólidos (Recuadro 3.1).

Aunque en este capítulo se aborda fundamentalmente la naturaleza de los minerales, se tiene en cuenta que la mayor parte de las rocas son simplemente agregados de



**FIGURA 3.2.** La mayor parte de las rocas son agregados de dos o más minerales. Aquí se presenta una muestra de mano de la roca ígnea granito y tres de sus principales minerales constituyentes (Foto de E. J. Tarbuck).

minerales. Dado que las propiedades de las rocas vienen determinadas en gran medida por la composición química y la estructura interna de los minerales contenidos en

ellas, consideraremos primero esos materiales terrestres. Después, en los Capítulos 4, 7 y 8 abordaremos con más detenimiento los principales grupos de rocas de la Tierra.

## EL HOMBRE Y EL MEDIO AMBIENTE

### Hacer vidrio a partir de minerales

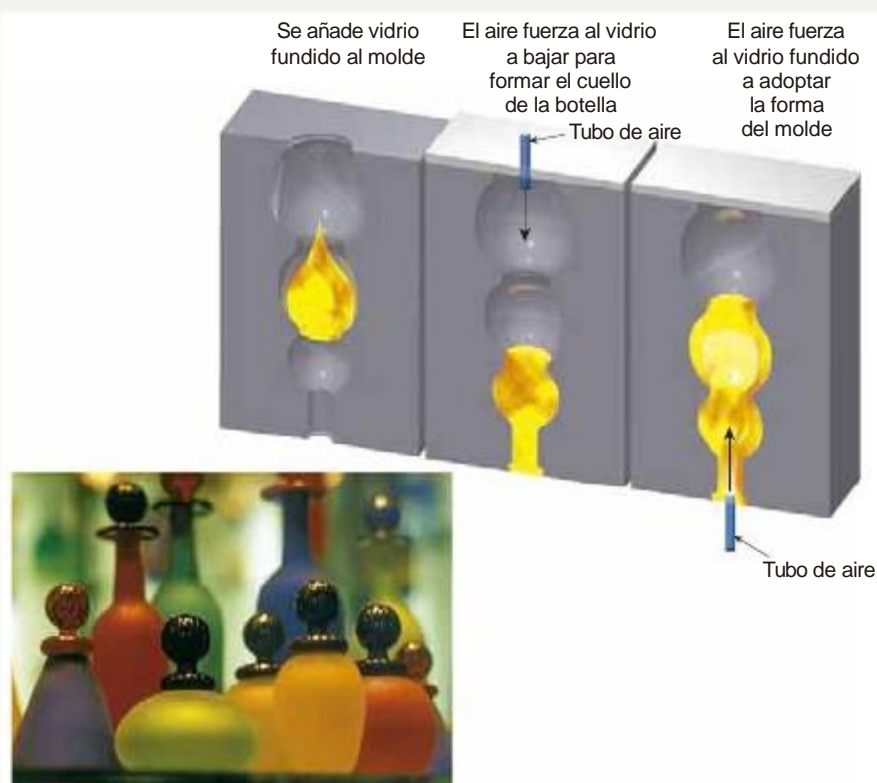
### RECUADRO 3.1

Muchos objetos cotidianos están fabricados con vidrio, entre ellos los mal denominados «cristales» de las ventanas, las jarras y las botellas, y las lentes de algunas gafas. El ser humano ha estado haciendo vidrio durante al menos 2.000 años. El vidrio se fabrica fundiendo materiales naturales y enfriando el líquido rápidamente, antes de que los átomos tengan tiempo de disponerse en una forma cristalina ordenada. (De esta misma manera se genera el vidrio natural, denominado *obsidiana*, a partir de la lava.)

Es posible producir vidrio a partir de varios materiales, pero el ingrediente principal (75 por ciento) de la mayor parte del vidrio producido comercialmente es el mineral cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). Se añaden cantidades menores de calcita (carbonato cálcico) y trona (carbonato sódico) a la mezcla. Estos materiales reducen la temperatura de fusión y mejoran la maniobrabilidad del vidrio fundido.

En Estados Unidos, el cuarzo de alta calidad (normalmente arenisca de cuarzo) y la calcita (caliza) son muy asequibles en muchas zonas. La trona, por otro lado, procede casi en exclusiva de la zona de Green River, al suroeste de Wyoming. Además de su uso en la fabricación de vidrio, la trona se utiliza para fabricar detergentes, papel e incluso bicarbonato sódico.

Los fabricantes pueden modificar las propiedades del vidrio añadiendo cantidades menores de otros diversos ingredientes (Figura 3.A). Los colorantes son el sulfuro de hierro (ámbar), el selenio (rosa), el óxido de cobalto (azul) y los óxidos de hierro (verde, amarillo, marrón). La adición de plomo da claridad y brillo al vidrio y, por tanto, se utiliza en



**FIGURA 3.A.** Los frascos de vidrio se hacen vertiendo vidrio fundido en un molde. Luego se hace pasar aire a través del vidrio fundido para que adopte la forma del molde. Se mezclan componentes metálicos con los ingredientes brutos para dar color al vidrio (Foto de Cosmo Condina/Stock Connection).

la fabricación de «cristalerías» finas. La vajilla refractaria, como Pyrex®, debe su resistencia

al calor al boro, mientras que el aluminio hace que el vidrio resista la meteorización.

### A veces los alumnos preguntan...

¿Los minerales de los que hemos hablado en clase son los mismos que los que se encuentran en los complementos alimenticios?

Normalmente no. Desde un punto de vista geológico, un mineral debe ser un sólido cristalino *presente en la naturaleza*. Los minerales que se encuentran en los complementos alimenticios son compuestos inorgánicos fabricados por el hombre que contienen *elementos* necesarios para sustentar la vida. Estos minerales alimenticios suelen contener elementos que son metales (calcio, potasio, fósforo, magnesio y hierro) y cantidades mínimas de una docena de otros elementos, como el cobre, el níquel y el vanadio. Aunque estos dos tipos de «minerales» son diferentes, están relacionados. La fuente de los elementos utilizados para hacer complementos alimenticios son, de hecho, los minerales presentes en la naturaleza en la corteza terrestre. También debe observarse que las vitaminas son *compuestos orgánicos* producidos por organismos vivos, no *compuestos inorgánicos*, como los minerales.

## ÁTOMOS: LAS UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MINERALES

Cuando se examinan cuidadosamente los minerales, aunque sea con un microscopio óptico, no son discernibles las innumerables partículas diminutas de sus estructuras internas. No obstante, los minerales, como ocurre con toda la materia, están compuestos por diminutas unidades de construcción denominados **átomos**, las partículas más pequeñas que no pueden ser químicamente divididas. Los átomos, a su vez, contienen partículas incluso más pequeñas, los *protones* y los *neutrones* localizadas en un **núcleo** central que está rodeado por *electrones* (Figura 3.3).

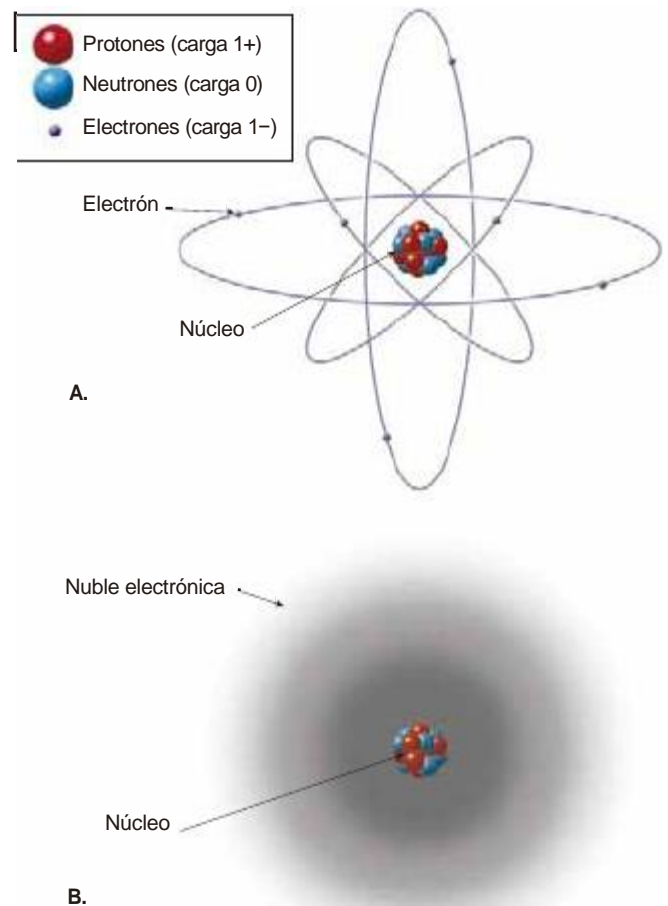
### Propiedades de los protones, neutrones y electrones

Los **protones** y los **neutrones** son partículas muy densas con masas casi idénticas. Por el contrario, los **electrones** tienen una masa despreciable, en torno a 1/2.000 veces la de un protón. Por comparación, si un protón tuviera la masa de una pelota de béisbol, un electrón tendría la masa de un solo grano de arroz.

Protones y electrones comparten una propiedad fundamental denominada *carga eléctrica*. Los protones tienen una carga eléctrica de +1 y los electrones tienen una carga de -1. Los neutrones, como sugiere su nombre, no tienen carga. La carga de los protones y los electrones son de igual magnitud, pero de polaridad opuesta, de forma que cuando estas dos partículas están emparejadas, las cargas se equilibran entre sí. Dado que la materia contiene normalmente números iguales de protones con carga positiva y electrones con carga negativa, la mayoría de las sustancias son eléctricamente neutras.

En las ilustraciones a menudo representamos los electrones orbitando alrededor del núcleo, como las órbitas de los planetas alrededor del Sol. Sin embargo, los electrones *no* se comportan de esta forma. Una representación más realista del átomo muestra los electrones a modo de nubes de carga negativa alrededor de un núcleo (Figura 3.3B). Los estudios sobre la disposición de los electrones muestran que se mueven en torno al núcleo en regiones denominadas **capas principales**, cada una de ellas con un nivel de energía asociado. Además cada capa puede acomodar un número específico de electrones, y la capa más externa contiene los **electrones de valencia**, que son los electrones que interactúan con otros átomos para formar los enlaces químicos.

La mayoría de los átomos del universo (excepto el hidrógeno y el helio) fueron creados en el interior de



**FIGURA 3.3.** Dos modelos del átomo. **A.** Una visión del átomo muy simplificada. El núcleo central, compuesto por protones y neutrones, rodeados por electrones de alta velocidad. **B.** Este modelo del átomo muestra nubes de electrones de forma esférica (capas principales) rodeando al núcleo. Obsérvese que estos modelos no están dibujados a escala. Los electrones son de tamaño minúsculo en comparación con los protones y los neutrones, y el espacio relativo entre el núcleo y las capas de electrones es mucho mayor que la mostrada.

estrellas masivas mediante fusión nuclear y liberados en el espacio interestelar durante las explosiones de supernovas calientes. A medida que este material se iba enfriando, los núcleos recién formados atrajeron electrones para completar sus estructuras atómicas. A temperaturas inferiores a 600 °C, todos los átomos libres tienen un complemento completo de electrones, uno para cada protón del núcleo.

### Los elementos definidos por su número de protones

Los átomos más sencillos tienen un solo protón en su núcleo mientras que otros tienen más de 100. El número de protones de un núcleo atómico, llamado el **número**

**atómico**, determina la naturaleza química de un átomo. Todos los átomos con el mismo número de protones comparten las mismas propiedades químicas y físicas. Un grupo del mismo tipo de átomos se denomina un **elemento**. Existen unos 90 elementos que aparecen de forma natural y 23 que han sido sintetizados.

Probablemente le resulten familiares los nombres de muchos elementos, como el cobre, el hierro, el oxígeno y el carbono. Dado que el número de protones identifica un elemento, todos los átomos de carbono tienen 6 protones y 6 electrones. Igualmente, cualquier átomo que tenga 8 protones es un átomo de oxígeno.

Los elementos pueden organizarse de tal forma que los que tienen propiedades similares se sitúen en columnas. Esta disposición, llamada la **tabla periódica**, se muestra en la Figura 3.4. A cada elemento se le otorga un símbolo de una o dos letras. También están incluidos los números atómicos y las masas para cada elemento.

Los átomos de los elementos que aparecen de forma natural son las unidades de construcción básicas de los minerales terrestres. Algunos minerales, como el cobre,

los diamantes y el oro nativos, están formados en su totalidad por átomos de un único elemento (Figura 3.5). Sin embargo, la mayoría de los elementos tienden a unirse a átomos de otros elementos para formar **compuestos químicos**. Como consecuencia, la mayoría de los minerales son compuestos químicos formados por átomos de uno o más elementos.

## ¿POR QUÉ SE UNEN LOS ÁTOMOS?

Excepto en lo que se refiere al grupo de elementos conocido como gases nobles, los átomos se unen unos a otros bajo las condiciones (de temperatura y de presión) reinantes en la Tierra. Algunos átomos se enlazan para formar *compuestos iónicos*, otros forman *moléculas* y otros forman *sustancias metálicas*. ¿Por qué sucede esto?

<sup>1</sup> El helio, el neón y el argón son ejemplos de gases nobles. En cada caso, se considera que la capa externa de los electrones de valencia está llena y por tanto tienen poca tendencia a participar en reacciones químicas.

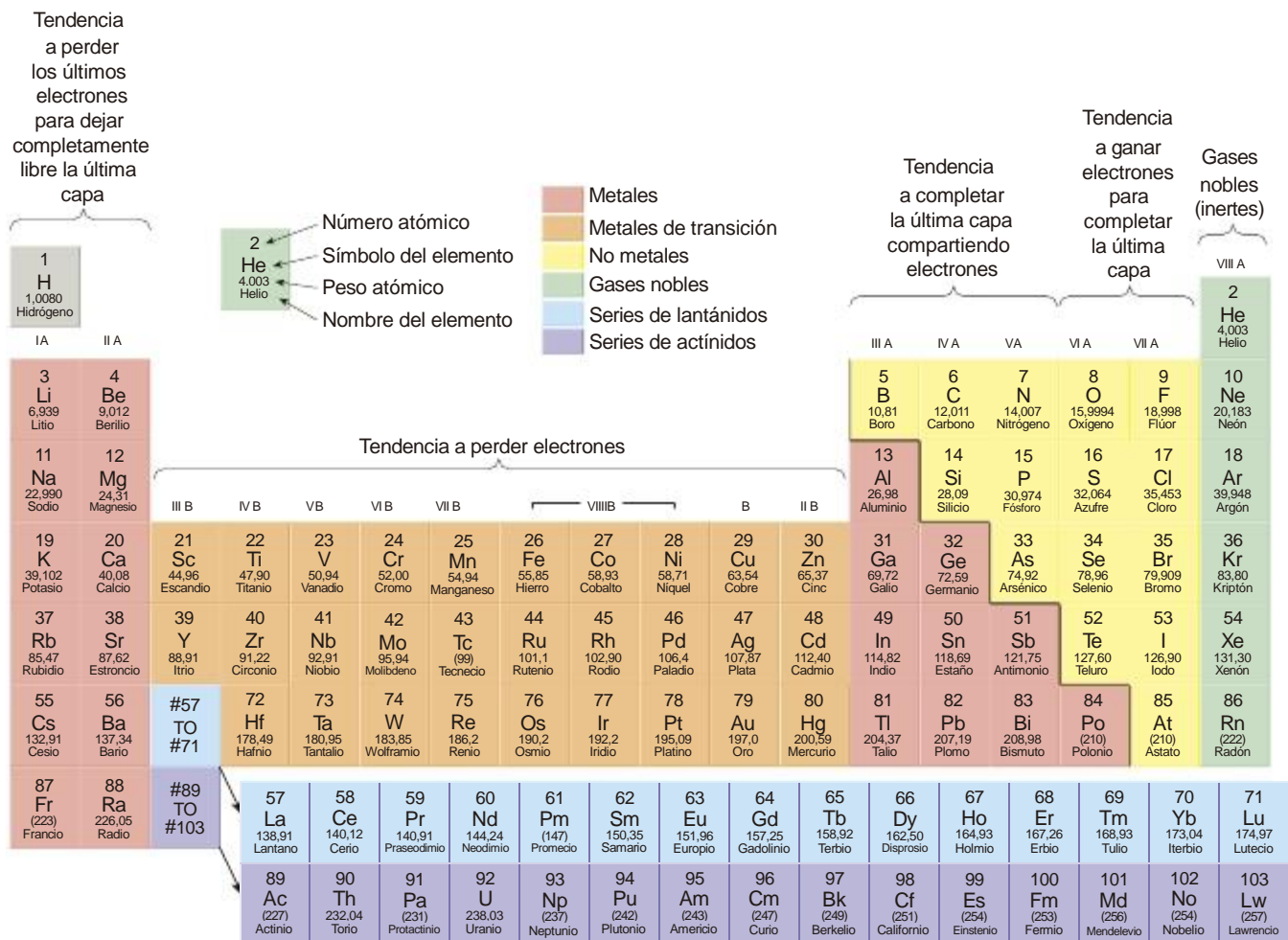


FIGURA 3.4. Tabla periódica de los elementos.



**FIGURA 3.5.** Oro con cuarzo. El oro, la plata, el cobre y los diamantes son minerales naturales compuestos por completo por átomos de un único elemento (Foto de Dennis Tasa).

Los experimentos demuestran que las fuerzas que mantienen unido el átomo y las fuerzas que enlazan unos átomos a otros son eléctricas. Además, estas atracciones eléctricas disminuyen la energía total de los átomos unidos, y los estados de menor energía son en general más estables. Por consiguiente, estos compuestos tienden a estar en un estado más estable que los átomos que están libres.

Como se ha indicado antes, los electrones de valencia son los que intervienen generalmente en la formación del enlace químico. En la Figura 3.6 se muestra una forma abreviada de representar el número de electrones de valencia (capa externa). Nótese que los elementos del

Diagramas de puntos de electrones para algunos de los elementos más representativos							
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
H •							He ••
Li •	•Be•	•B•	•C•	•N•	•O•	•F•	•Ne•
Na •	•Mg•	•Al•	•Si•	•P•	•S•	•Cl•	•Ar•
K •	•Ca•	•Ga•	•Ge•	•As•	•Se•	•Br•	•Kr•

**FIGURA 3.6.** Diagrama de puntos para algunos elementos representativos. Cada punto representa un electrón de valencia encontrado en la capa principal más externa.

Grupo I tienen un electrón de valencia, los del Grupo II tienen dos electrones de valencia y así sucesivamente hasta los ocho electrones de valencia del Grupo VIII.

La primera capa solo puede contener dos electrones. En la segunda capa y en las superiores, se alcanza una configuración estable cuando la capa de valencia contiene ocho electrones. Los gases nobles como el neón y el argón tienen ocho electrones en su capa externa y tienden a no reaccionar. Siguen siendo gases atómicos a temperaturas muy por debajo de la temperatura ambiente.

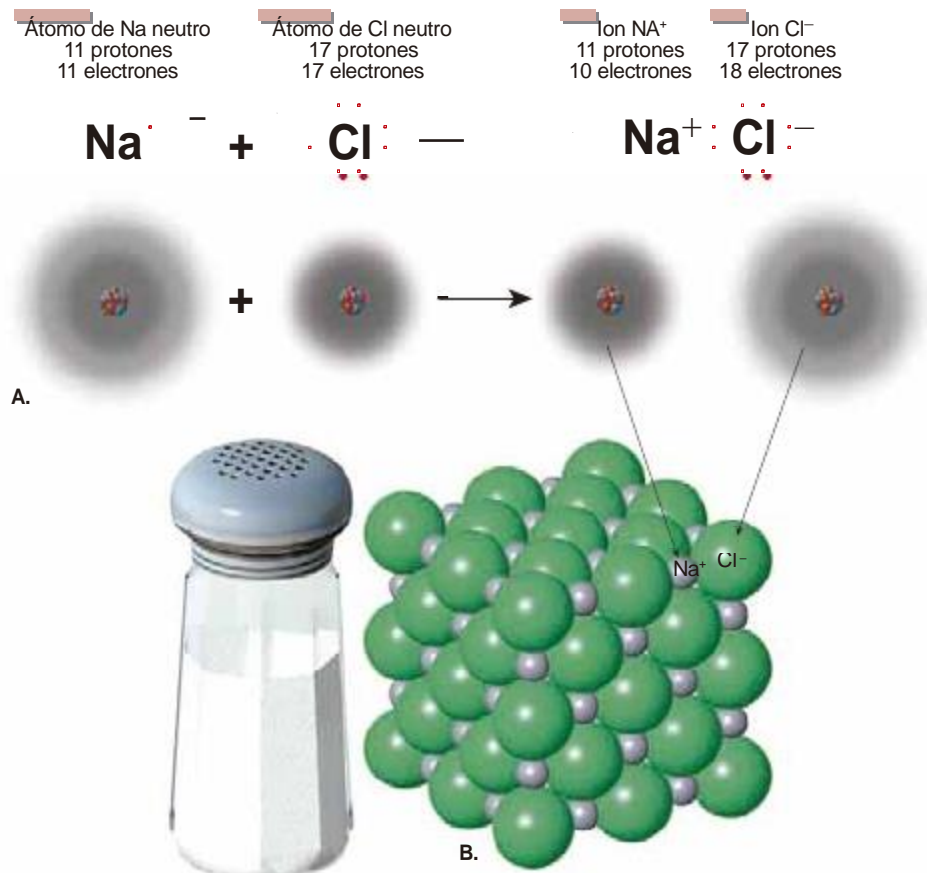
Cuando la capa externa de un átomo no contiene ocho electrones, es probable que se una químicamente a otros átomos para rellenar su capa. Un **enlace químico** consiste en transferir o compartir los electrones que permiten a cada átomo obtener una capa de electrones de valencia completa. Algunos átomos hacen esto transfiriendo toda la capa de electrones de valencia a otros átomos, de modo que una capa más interna se convierte en la capa de valencia completa.

Cuando se transfieren electrones de valencia entre elementos para formar iones, el enlace es un *enlace iónico*. Si los electrones son compartidos por los átomos, el enlace es un *enlace covalente*. Cuando los electrones de valencia son compartidos por todos los átomos de una sustancia, el enlace es *metálico*. En todos los casos, los átomos que constituyen el enlace consiguen configuraciones electrónicas estables que normalmente consisten en ocho electrones en sus capas más externas.

## Enlaces iónicos: la transferencia de electrones

Quizá el tipo de enlace más fácil de visualizar sea el *enlace iónico*, en el que un átomo cede uno o más de sus electrones de valencia a otro para formar **iones** (*átomos con carga positiva, catión, y negativa, anión*). El átomo que pierde electrones se transforma en un ion positivo y el átomo que gana electrones en uno negativo. Los iones con carga opuesta se atraen mutuamente con gran intensidad y se unen para formar compuestos iónicos.

Consideremos el enlace iónico que se forma entre el sodio (Na) y el cloro (Cl) para producir cloruro sódico, el mineral halita (la sal de mesa común). Nótese en la Figura 3.7A que el sodio cede su único electrón de valencia al cloro. Como consecuencia, el sodio alcanza una configuración estable que tiene ocho electrones en su capa más externa. Al adquirir el electrón que pierde el sodio, el cloro, que tiene siete electrones de valencia, gana el octavo electrón necesario para completar su capa más externa. Por tanto, a través de la transferencia de un solo electrón, los átomos de sodio y de cloro han adquirido una configuración electrónica estable.



**FIGURA 3.7.** Enlace químico del cloruro sódico (sal de mesa). **A.** Mediante la transferencia de un electrón de la capa externa de un átomo de sodio a uno de cloro, el sodio se convierte en un ion positivo (catión) y el cloro en uno negativo (anión). **B.** Diagramas esquemáticos que ilustran la disposición (empaquetado) de los iones cloro y sodio en la sal de mesa.

Una vez ocurrida la transferencia electrónica, los átomos ya no son eléctricamente neutros. Al ceder un electrón, un átomo de sodio neutro se convierte en un átomo con carga positiva (con 11 protones y 10 electrones). De igual modo, al adquirir un electrón, el átomo de cloro neutro se convierte en un átomo con carga negativa (con 17 protones y 18 electrones). Sabemos que los iones con cargas iguales se repelen y que los que tienen cargas opuestas se atraen. Por tanto, un **enlace iónico** es la atracción de iones con cargas opuestas entre sí produciendo un compuesto eléctricamente neutro.

En la Figura 3.7B se ilustra la disposición de los iones de sodio y de cloro en la sal de mesa ordinaria. Obsérvese que la sal consta de iones sodio y cloro alternativos, colocados de tal manera que cada ion positivo es atraído, y rodeado por todas partes, por iones negativos y viceversa. Esta disposición aumenta al máximo la atracción entre iones con cargas opuestas a la vez que reduce al máximo la repulsión entre iones con cargas idénticas. Por tanto, los compuestos iónicos son una disposición ordenada de iones con cargas opuestas reunidos según una proporción

definida que suministra una neutralidad eléctrica global.

Las propiedades de un compuesto químico son completamente diferentes de las propiedades de los elementos que los componen. Por ejemplo, el sodio es un metal plateado blando extremadamente reactivo y tóxico. Si se consumiera una cantidad muy pequeña de sodio elemental se necesitaría atención médica inmediata. El cloro es un gas verde venenoso, tan tóxico que se utilizó como arma química durante la Primera Guerra Mundial. Juntos, sin embargo, esos átomos producen el compuesto cloruro sódico, el inocuo potenciador del sabor que denominamos sal de mesa. Cuando los elementos se combinan para formar compuestos sus propiedades cambian totalmente.

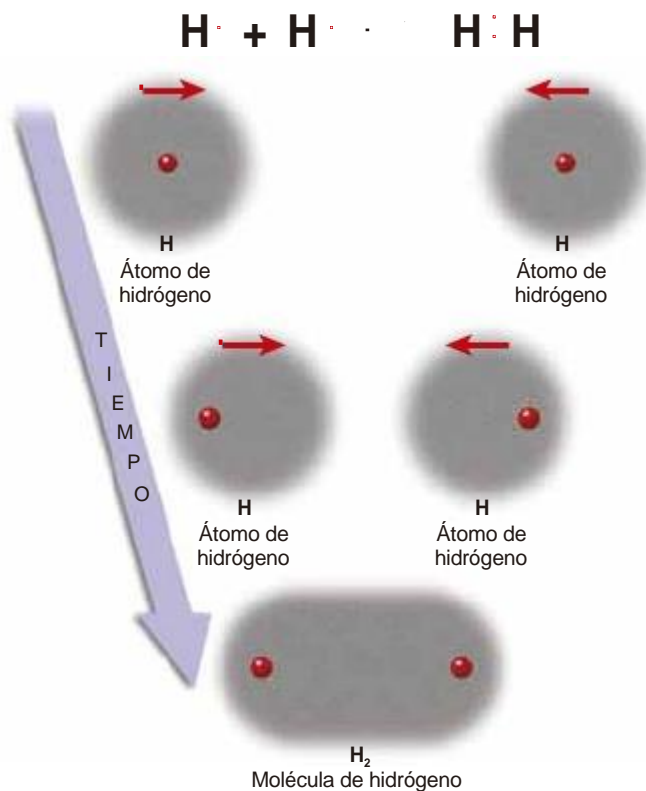
## Enlaces covalentes: compartiendo electrones

A veces las fuerzas que mantienen juntos los átomos no pueden explicarse por la atracción de iones con cargas opuestas. Un ejemplo es la molécula de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ),

en la que dos átomos de hidrógeno permanecen fuertemente unidos sin presencia de iones. La tremenda fuerza de atracción que mantiene unidos a dos átomos de hidrógeno es el resultado de un **enlace covalente**, un *enlace químico que se forma cuando los átomos comparten un par de electrones*.

Imaginemos dos átomos de hidrógeno, cada uno con un protón y un electrón, que se aproximan uno al otro hasta que sus órbitas se solapan (Figura 3.8). Al encontrarse cambiará la configuración electrónica para que ambos electrones ocupen el espacio entre los átomos. Dicho de otra forma, los dos electrones son compartidos por ambos átomos de hidrógeno y atraídos al mismo tiempo por la carga positiva del protón del núcleo de cada átomo (Figura 3.8). La atracción entre los dos electrones y ambos núcleos es la fuerza que mantiene unidos a estos átomos. Aunque no existen iones en las moléculas de hidrógeno, la fuerza que mantiene unidos estos átomos proviene de la atracción de partículas con cargas opuestas: los protones de los núcleos y los electrones compartidos por los átomos.

Otros gases que están compuestos de moléculas diatómicas son el oxígeno ( $O_2$ ), el nitrógeno ( $N_2$ ) y el cloro



**FIGURA 3.8.** Formación de un enlace covalente entre dos átomos de hidrógeno (H) para formar una molécula de hidrógeno ( $H_2$ ). Cuando los átomos de hidrógeno se enlazan, los electrones son compartidos por los dos átomos de hidrógeno y atraídos simultáneamente por la carga positiva del protón en el núcleo de cada átomo. La fuerza que mantiene unidos (enlaza) estos átomos es la atracción entre los electrones y ambos núcleos.

( $Cl_2$ ). Además, el grupo mineral más común, los silicatos, contiene átomos de silicio unidos covalentemente a átomos de oxígeno.

## Enlaces metálicos: los electrones tienen libertad de movimiento

En los enlaces metálicos, los electrones de valencia tienen libertad para moverse de un átomo a otro, de manera que todos los átomos comparten los electrones de valencia disponibles. Este tipo de enlace se encuentra en metales como el cobre, el oro, el aluminio y la plata, y en aleaciones como el bronce y el latón. El enlace metálico es el responsable de la elevada conductividad eléctrica de los metales, de la facilidad con que son moldeados y de las otras numerosas propiedades especiales de los metales.

## Otros enlaces: enlaces híbridos

Hemos descrito los extremos dentro de las posibilidades del enlace químico, la transferencia completa de electrones y el compartir perfectamente los electrones. Como cabe suponer, muchos enlaces químicos son en realidad híbridos que consisten en cierto grado en compartir electrones y, en cierta medida, en la transferencia de electrones. Pueden encontrarse enlaces con tasas y cualquier posible combinación de carácter covalentemente iónico. Por ejemplo, los minerales de silicato están compuestos por átomos de silicio y de oxígeno que se unen con otros elementos mediante enlaces que exhiben características de enlaces químicos y covalentes.

En resumen, un *enlace químico* es una gran fuerza de atracción existente entre los átomos de una sustancia.

### A veces los alumnos preguntan...

**¿Cuál es el término utilizado para indicar la pureza tanto del oro como de las piedras preciosas?**

El *quilate* es el término utilizado para indicar la pureza del oro. 24 quilates representan el oro puro. El oro de menos de 24 quilates es una aleación (mezcla) de oro y otro metal, normalmente cobre o plata. Por ejemplo, el oro de 14 quilates contiene 14 partes de oro (por peso) mezcladas con diez partes de otros metales.

El *quilate* es una unidad de peso utilizada para las piedras preciosas como los diamantes, las esmeraldas y los rubíes. El tamaño de un quilate ha variado durante el curso de la historia, pero a principios del siglo xx se estandarizó en 200 mg (0,2 g). Por ejemplo, un diamante típico en un anillo de compromiso podría oscilar entre medio y un quilate, y el famoso diamante Hope, en la Smithsonian Institution, pesa 45,52 quilates.