

Evidencia de la evolución

IMPACTOS Y PROBLEMAS

Medición del tiempo

¿Cómo se mide el tiempo? ¿Se limita tu nivel de conocimientos a tu propia generación? Probablemente puedas relacionarte con algunos cientos de años de eventos humanos, ¿pero qué podrías decir acerca de algunos millones? Para entender el pasado distante se requiere un salto intelectual de lo familiar a lo desconocido. Quizá el concepto de que un asteroide pueda chocar contra la Tierra te ayude a hacer el salto. Los asteroides son planetas menores que viajan por el espacio y pueden medir de 1 a 1,500 km de ancho (0.6 millas a 930 millas). Millones de ellos se encuentran en órbita en torno al Sol y a Júpiter: son restos fríos y pedregosos de la formación de nuestro sistema solar.

Los asteroides son difíciles de detectar aun con los mejores telescopios, porque no emiten luz. Muchos atraviesan la órbita terrestre, pero la mayoría pasa sin que nos enteremos de su existencia. Algunos han pasado demasiado cerca para nuestra comodidad.

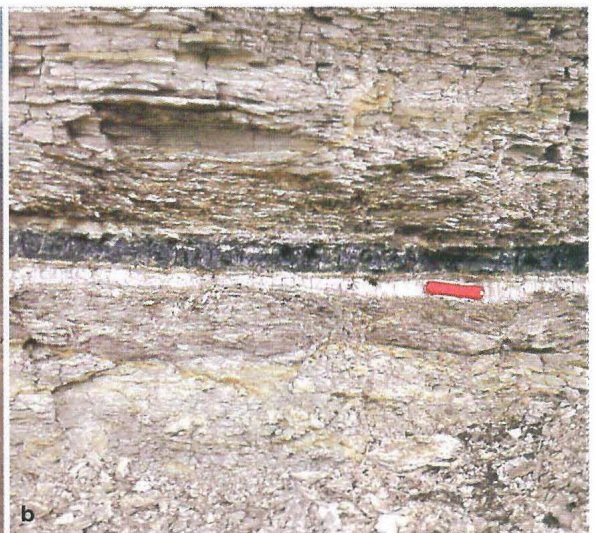
El cráter Barringer de 1.6 km (una milla) de ancho en Arizona es difícil de pasar por alto (figura 17.1a). Un asteroide de 300,000 toneladas formó este hoyo impresionante en la piedra arenisca al chocar contra la Tierra hace 50,000 años. Ese impacto fue 150 veces más poderoso que la bomba que arrasó Hiroshima.

Ningún humano fue testigo del impacto, entonces ¿cómo sabemos lo que ocurrió? En ocasiones contamos con evidencia física de eventos ocurridos antes de que el hombre estuviera sobre la Tierra para atestiguarlos. En este caso, los geólogos infirieron la causa más probable de formación del cráter Barringer analizando

toneladas de meteoritos, arena fundida y otras claves rocosas en el sitio.

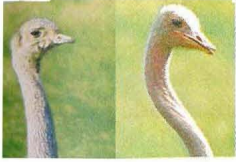
Evidencia similar señala a un asteroide incluso más grande que chocó contra la Tierra en el pasado más distante. Por ejemplo, ocurrió una extinción masiva (con una pérdida de grupos de organismos importantes) hace 65.5 millones de años, en lo que se conoce como el límite K-T (Cretácico-Terciario, por sus siglas en inglés). Una capa poco común de rocas señala este límite (figura 17.1b). Hay bastantes fósiles de dinosaurios por debajo de esa capa, pero por encima de ella, en las capas de roca más recientes, no hay ningún fósil de dinosaurio. El cráter formado por el impacto cerca de lo que actualmente es la Península de Yucatán data de alrededor de 65.5 millones de años. ¿Será una coincidencia? Muchos científicos dicen que no. Infieren por la evidencia que el impacto de un asteroide de 10 a 20 km (6 a 12 millas) de ancho provocó una catástrofe global que ocasionó la extinción de los dinosaurios.

Estamos a punto de realizar un salto intelectual a través del tiempo a sitios que ni siquiera se conocían hace algunos siglos. Te invitamos a comenzar por la siguiente premisa: los fenómenos naturales ocurridos en el pasado pueden ser explicados por los mismos procesos químicos y biológicos que operan en la actualidad. Esta premisa es el fundamento de las investigaciones científicas acerca de la historia de la vida. La investigación representa un cambio de la experiencia a la inferencia: de lo conocido a lo que sólo puede suponerse. Nos da un sorprendente vislumbre del pasado.



¡Mira el video! Figura 17.1 De la evidencia a la inferencia. **(a)** ¿Cómo se formó el cráter Barringer? La evidencia rocosa señala a un asteroide de 300,000 toneladas que chocó contra la Tierra hace 50,000 años. **(b)** Bandas que constituyen una capa singular de roca formada hace 65.5 millones de años a nivel mundial. Dicha capa marca una transición abrupta en el registro fósil que implica una extinción masiva. La navaja roja nos da una idea de la escala.

Conceptos básicos



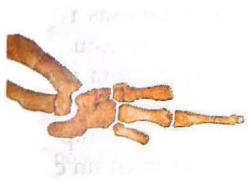
Surgimiento del pensamiento evolutivo

Hace mucho tiempo, los naturalistas comenzaron a catalogar las especies previamente desconocidas, y al pensar en la distribución global de todas las especies, descubrieron semejanzas y diferencias entre los grupos principales, incluyendo los representados como fósiles en las capas de roca sedimentaria. **Secciones 17.1, 17.2**



Una teoría toma forma

La evidencia de la evolución o cambios en los linajes se acumuló gradualmente. Charles Darwin y Alfred Wallace desarrollaron en forma independiente una teoría de la selección natural para explicar cómo evolucionan los caracteres hereditarios que definen a cada especie. **Secciones 17.3, 17.4**



Evidencia de los fósiles

El registro fósil ofrece evidencia física de cambios pasados en muchos linajes distintos. La propiedad de decaimiento de los radioisótopos permite determinar la antigüedad de rocas y fósiles. **Secciones 17.5-17.7**



Evidencia de la biogeografía

La correlación de las teorías evolutivas con la historia geológica ayuda a explicar la distribución de las especies en el pasado y en la actualidad. **Secciones 17.8, 17.9**

Conexiones a conceptos anteriores

- En la sección 1.4 se delinearon las principales premisas de la teoría de la selección natural. A continuación consideramos la evidencia que condujo a su formulación. Los conocimientos sobre los alelos y la herencia (11.1) te ayudarán a entender cómo funciona la selección natural.
- En este capítulo exploraremos uno de los choques ocurridos entre los sistemas tradicionales de creencia y el pensamiento científico. Sería conveniente que repases tus conocimientos acerca de pensamiento crítico (1.5) antes de iniciarlo. Recuerda que la ciencia sólo estudia lo que se puede observar (1.6).
- Determinar la edad de rocas y fósiles antiguos depende de las propiedades de decaimiento de radioisótopos (2.2) y compuestos (2.3).

¿Por qué opción votarías? Muchas teorías e hipótesis acerca de eventos en el pasado antiguo necesariamente se basan en rastros dejados por dichos acontecimientos y no en datos recopilados por observación directa. ¿Será suficiente alguna vez la evidencia indirecta para probar una teoría acerca de un evento pasado? Ve más detalles en CengageNOW y después vota en línea. Sólo disponible en inglés.

■ Los sistemas de creencias se ven influenciados por los nuevos conocimientos. Los que son incongruentes con las observaciones sistemáticas del mundo natural tienden a modificarse con el transcurso del tiempo.

Las semillas de la investigación biológica comenzaron a brotar en el mundo occidental hace más de dos mil años. Aristóteles, filósofo griego, carecía de libros o instrumentos que lo guiaran, y sin embargo fue más que un recopilador de observaciones aleatorias. De sus escritos podemos inferir que realizó conexiones entre sus observaciones en un intento de explicar el orden del mundo natural. Como pocos de su época, Aristóteles consideró la naturaleza como un continuo de organización, desde la materia inanimada hasta plantas y animales complejos. De hecho, fue uno de los primeros **naturalistas**: personas que observan la vida desde una perspectiva científica.

Llegado el siglo xiv, los conceptos primitivos de Aristóteles acerca de la naturaleza se habían transformado en una opinión rígida acerca de la vida. Según esta opinión, una "gran cadena del ser" se extendía desde su forma más baja (las serpientes) hasta los humanos, los seres espirituales. Cada eslabón individual de la cadena era un tipo de ser o especie, y se decía que cada uno había sido diseñado y forjado de manera simultánea en un estado perfecto. Una vez que se lograran descubrir y describir todos los enlaces, se comprendería el significado de la vida.

Los naturalistas europeos se embarcaron en expediciones de investigación y de regreso trajeron consigo decenas de miles de plantas y animales de Asia, África, América del

Norte y del Sur, y las Islas del Pacífico. Las especies recién descubiertas fueron catalogadas cuidadosamente como más eslabones en la cadena.

A finales del siglo xix, Alfred Wallace y algunos otros naturalistas habían rebasado el concepto de estudiar especies simplemente con el fin de catalogarlas. Observaron patrones de los sitios donde las especies habitaban y se preguntaron cómo estarían relacionadas; de hecho, comenzaron a presentar hipótesis acerca de las fuerzas ecológicas y evolutivas que dan forma a la distribución de seres vivos en la Tierra. Fueron pioneros en **biogeografía**, el estudio de patrones en la distribución geográfica de las especies.

Algunos de los patrones que percibieron dieron lugar a preguntas que no pudieron responderse en el marco de los sistemas de creencias predominantes. Por ejemplo, los exploradores trotamundos descubrieron plantas o animales que vivían en sitios aislados en extremo. Estas especies aisladas tenían apariencia sospechosamente semejante a la de plantas o animales que vivían a gran distancia más allá de océanos o al otro lado de cordilleras montañosas infranqueables. ¿Sería posible que diferentes especies estuviesen relacionadas? En caso afirmativo, ¿de qué manera experimentaron aislamiento geográfico unas de otras?

Las aves de la figura 17.2a-c, por ejemplo, comparten rasgos muy similares, aunque cada una habita en un continente distinto. Estas tres aves que no pueden volar corren sobre patas musculares largas en praderas que son planicies abiertas y se encuentran aproximadamente a la misma distancia del ecuador. Todas elevan su largo cuello para observar la presencia de depredadores. Wallace consideró que quizás estas aves descendían de un ancestro antiguo



Figura 17.2 Especies parecidas entre sí, pero nativas de sitios geográficamente distantes.

(a) Ñandú de América del Sur, (b) Emu australiano y (c) Avestruz africana. Los tres tipos de aves viven en hábitats similares. Estas aves emparentadas son diferentes a otras en varios caracteres, incluyendo sus musculosas patas largas y su incapacidad para volar.

Plantas no emparentadas de apariencia similar: cacto espinoso nativo de los desiertos cálidos del suroeste americano, (d) y tártago espinoso nativo del suroeste de África (e).

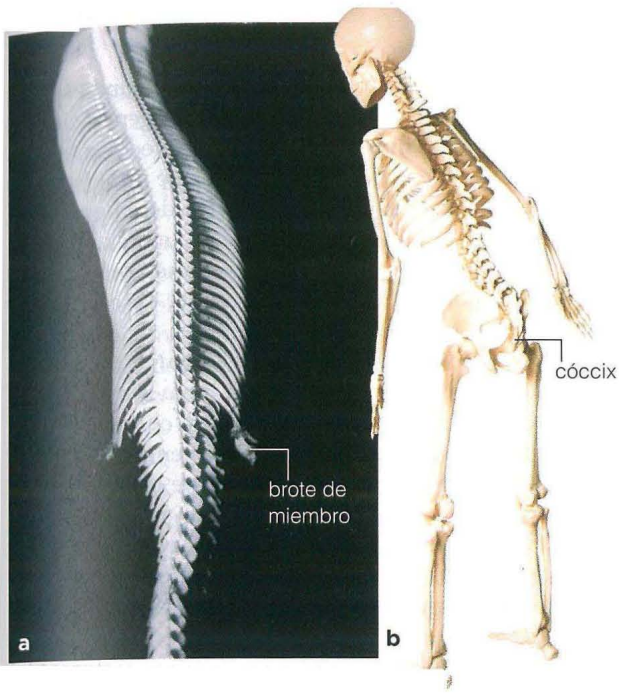


Figura 17.3 Partes vestigiales del cuerpo. (a) Los pitones y las boas constrictoras tienen huesos diminutos en las patas, aunque las serpientes no caminan. (b) Los humanos usamos las piernas, pero no los huesos del cóccix.

común (y estuvo en lo correcto), aunque no tenía idea de cómo terminaron en continentes tan distantes.

Los naturalistas de esa época también tuvieron problemas para clasificar organismos muy semejantes en ciertos rasgos, aunque diferentes en otros. Por ejemplo, las dos plantas de la figura 17.2*d,e* son nativas de distintos continentes. Cada una habita aproximadamente a la misma distancia del ecuador y en el mismo tipo de entorno: desiertos cálidos donde el agua escasea por estaciones. Ambas presentan filas de espinas aguzadas para protegerse de los herbívoros, y ambas almacenan agua en sus tallos carnosos y gruesos. Sin embargo, sus partes reproductivas son muy distintas, de modo que es imposible que estas plantas estén emparentadas de manera tan cercana como indicaría su apariencia externa.

Las comparaciones de este tipo forman parte de la morfología comparada, el estudio de la organización y estructuras del cuerpo entre grupos de organismos. Los que en el exterior son muy semejantes, pueden ser bastante distintos en el interior; por ejemplo, los peces y los delfines. Otros que difieren considerablemente en su apariencia externa pueden ser muy semejantes en la estructura subyacente. Por ejemplo, un brazo humano, una aleta de delfín, una pata de elefante y un ala de murciélago, tienen huesos internos comparables, como se explica en la sección 19.2.

La morfología comparada reveló partes del cuerpo que parecen carecer de función aparente, lo cual se sumó a la confusión. Según las creencias predominantes, el plan de organización corporal de cada organismo fue creado en un estado perfecto. En caso de ser así, entonces ¿por qué las serpientes tienen partes que no utilizan, como huesos de patas (ya que ellas no caminan), o los vestigios de una cola en los humanos (figura 17.3)?

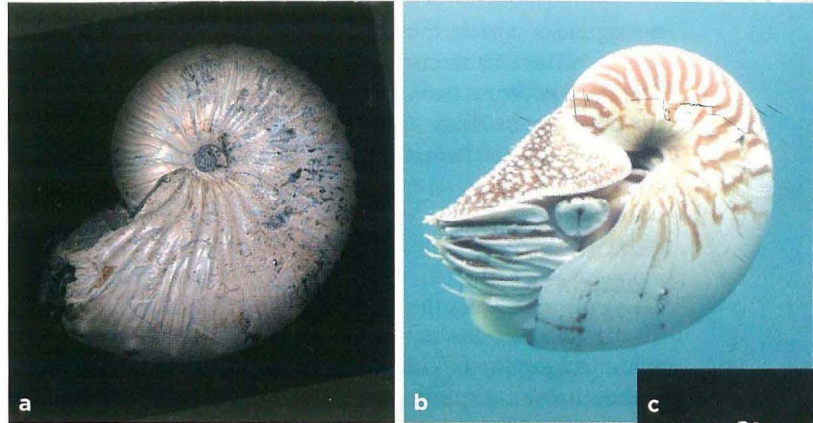


Figura 17.4 Acertijos fósiles. (a) Amonita fosilizada que vivió hace 65 a 100 millones de años. Este depredador marino se asemeja al nautilo con cámara moderno (b).

(c) Conchas fosilizadas de foraminíferos, cada una proveniente de capas distintas de roca sedimentaria en una secuencia vertical, y cada una un poco distinta de las que se encontraron en capas adyacentes.

Los geólogos que estudiaron las formaciones rocosas expuestas por la erosión o las actividades de minería descubrieron secuencias idénticas de capas de roca en distintas partes del mundo. Los fósiles en las capas fueron reconocidos como evidencia contundente de formas antiguas de vida, pero algunos resultaron intrigantes. Por ejemplo, en las capas profundas de roca se encontraron fósiles de vida marina simple. En las capas por encima de éstas se encontraron fósiles más complejos, aunque similares. En capas superiores se encontraron fósiles similares, pero más complejos de apariencia semejante a las especies modernas (figura 17.4). ¿Cuál sería el significado de esas secuencias en complejidad? Los fósiles de animales gigantes sin representantes vivos en la actualidad también se descubrieron en excavaciones. Si los animales fueron perfectos en el momento de su creación, ¿por qué están extintos en la actualidad?

Consideradas como un todo, las observaciones de la biogeografía, la morfología comparada y la geología no concordaban con las creencias predominantes en el siglo XIX. Si las especies no fueron creadas en estado perfecto (como implicaban las secuencias de fósiles y las partes “no utilizables” del cuerpo), quizás habían cambiado con el transcurso del tiempo.

Para repasar en casa

¿Cómo han modificado nuestra manera de pensar las observaciones del mundo natural?

- Observaciones cada vez más extensas de la naturaleza en el siglo XIX no concordaron con los sistemas de creencia predominantes.
- Las observaciones acumulativas de biogeografía, morfología comparada y geología condujeron a nuevas formas de pensar acerca del mundo natural.

17.2 Surgimiento de nuevas teorías

■ Llegado el siglo XIX, muchos estudiosos comprendieron que la vida en la Tierra había sufrido modificaciones con el transcurso del tiempo, y comenzaron a pensar en los factores que pudieron provocar esos cambios.

■ Conexiones con Pensamiento crítico 1.5, El funcionamiento de la ciencia 1.6.

Adaptación de nueva evidencia a antiguas creencias

En el siglo XIX, los naturalistas afrontaron el aumento de evidencia de que la vida sobre la Tierra, e incluso la propia Tierra, habían experimentado cambios con el transcurso del tiempo. Alrededor de 1800, Georges Cuvier, experto en zoología y paleontología, intentó ordenar toda esta nueva información. Él observó cambios abruptos en el registro fósil y que muchas especies fósiles aparentemente no tenían contrapartes vivas. Dada esta evidencia, propuso una idea sorprendente: que muchas especies que antes habían existido estaban extintas en la actualidad.

Cuvier también tenía evidencia de que la superficie de la Tierra se había modificado. Por ejemplo, había observado conchas marinas fosilizadas en las laderas de las montañas, muy lejos de los mares modernos. Como la mayoría de las personas de su tiempo, asumía que la antigüedad de la Tierra era de miles de años, no de millones. Razonó que las fuerzas geológicas distintas de las conocidas en la actualidad quizás hubiesen elevado el fondo del mar para formar cordilleras en este breve margen de tiempo. Que eventos geológicos catastróficos provocaron extinciones, después de lo cual las especies sobrevivientes repoblaron el planeta. Las ideas de Cuvier recibieron el nombre de **catastrofismo**. Hoy sabemos que son incorrectas; los procesos geológicos no han cambiado con el transcurso del tiempo.

Otro estudioso, Jean-Baptiste Lamarck, pensó en los procesos que impulsan la **evolución**: un cambio en la línea de

descendencia (linajes). Lamarck consideró que una especie mejoraba gradualmente con el transcurso de generaciones, debido a un impulso inherente hacia la perfección, a que había una ascensión en la cadena del ser. Este impulso dirigía un “fluido” desconocido en las partes del cuerpo que requerían cambio. Según la hipótesis de Lamarck, las presiones ambientales y las necesidades internas provocaban cambios en el cuerpo del individuo, y sus descendientes heredaban dichos cambios.

Intentamos emplear la hipótesis de Lamarck para explicar el motivo por el cual el cuello de la jirafa sea tan largo. Podríamos predecir que algún ancestro de cuello corto de la jirafa moderna estiró su cuello para alimentarse de hojas más allá del alcance de otros animales. Este estirón tal vez ocasionó que su cuello creciera más. Según la hipótesis de Lamarck, los hijos de ese animal sin duda heredaron un cuello más largo y, tras muchas generaciones, lograron alcanzar hojas aún más altas, y como resultado se originó la jirafa moderna.

Lamarck tenía razón al considerar que los factores del entorno afectan los caracteres de las especies, pero se equivocó sobre la herencia de caracteres adquiridos. El fenotipo de un individuo puede cambiar, por ejemplo, cuando una mujer aumenta sus músculos por someterse a entrenamiento de resistencia. Sin embargo, el hijo de una madre atlética no nace con músculos más grandes que el hijo de una madre que no practica atletismo. Los descendientes no heredan caracteres que los padres adquieren durante su vida; heredan su ADN. En la mayoría de las circunstancias, el ADN transmitido a los hijos no se ve afectado por las actividades de los padres.

El viaje del *Beagle*

En 1831, cuando Charles Darwin tenía 22 años, se preguntaba qué hacer con su vida. Desde los ocho años deseaba

Figura 17.5 (a) Charles Darwin.

(b) Una réplica del *Beagle* se hace a la mar desde una costa hostil en América del Sur. Durante el viaje, Darwin se aventuró a los Andes, donde encontró fósiles de organismos marinos en capas de roca a 3.6 km (2.2 millas) sobre el nivel del mar.

(c-e) Las Islas Gaxos se encuentran aisladas en el océano, bastante al oeste de Ecuador. Surgieron por acción volcánica sobre el fondo marino hace alrededor de cinco millones de años. Los vientos y corrientes transportaron organismos a esas islas carentes de seres vivos. Todas las especies nativas descienden de esos viajeros. Foto de la extrema derecha, piquero de patas azules, una de las muchas especies que Darwin observó en el curso de su viaje.



cazar, pescar, coleccionar conchas u observar insectos y aves, cualquier cosa, excepto asistir a la escuela. Posteriormente, a insistencia de su padre, intentó estudiar medicina en la universidad, pero los procedimientos crudos y dolorosos que se aplicaban a los pacientes en esa era lo asquearon. Su exasperado padre lo instó a convertirse en clérigo, de modo que Darwin empacó y se dirigió a Cambridge, donde se graduó en teología. No obstante, dedicó la mayor parte de su tiempo a frecuentar estudiantes de historia natural.

John Henslow, un botánico, percibió los verdaderos intereses de Darwin. Arregló que Darwin fungiera como naturalista a bordo del *Beagle*, un navío pronto a zarpar en una expedición de investigación a América del Sur. El joven, que odiaba la escuela y carecía de entrenamiento formal en ciencias, rápidamente se transformó en un naturalista entusiasta.

El *Beagle* zarpó rumbo a América del Sur en diciembre de 1831 (figura 17.5). Mientras el barco atravesaba el Atlántico, Darwin leyó el regalo de despedida de Henslow, el primer volumen de *Principios de Geología* (*Principles of Geology*) de Charles Lyell. Lo que aprendió le permitió tener una perspectiva de la historia geológica de las regiones que visitaría durante su viaje.

Durante el viaje de cinco años del *Beagle*, Darwin encontró muchos fósiles poco comunes. Observó diversas especies en entornos que abarcaban desde playas arenosas de islas remotas hasta planicies en las altitudes en los Andes.

También comenzó a formular una teoría radical. Durante años, los geólogos se habían dedicado a estudiar piedra caliza, arenisca y otro tipo de rocas que se forman después de que los sedimentos se acumulan lentamente en el lecho de los lagos, el fondo de ríos y la plataforma oceánica. Estas rocas contenían evidencia de que los procesos graduales de cambios geológicos que operan en la actualidad son los

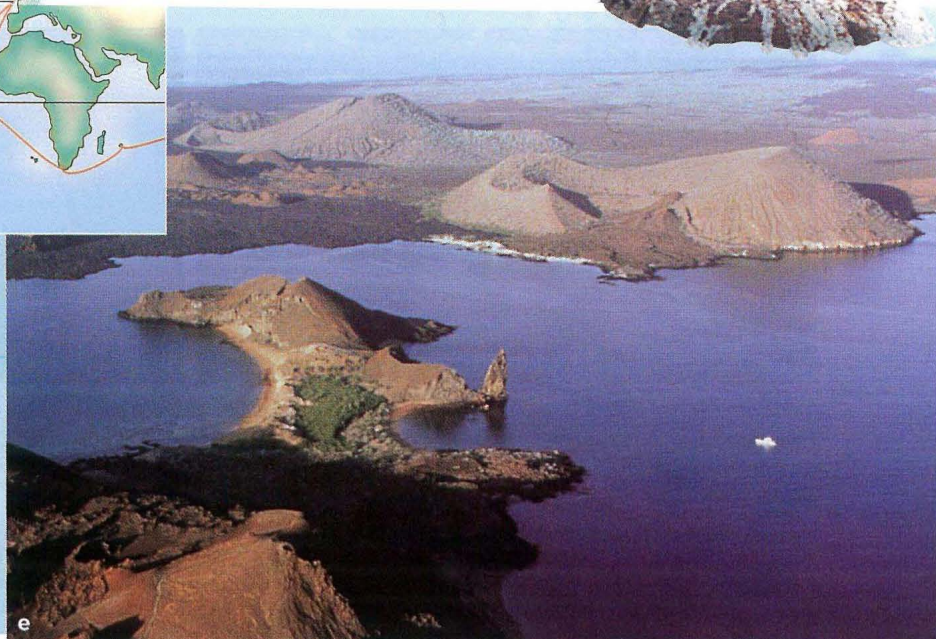
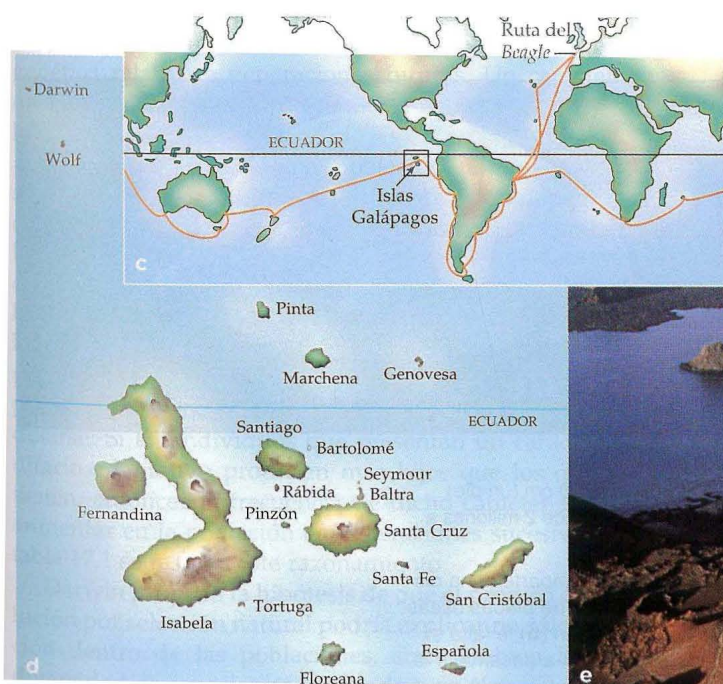
mismos que operaban en el pasado distante. Lyell proponía que no era necesario recurrir a catástrofes extrañas para explicar la superficie terrestre. Durante amplios márgenes de tiempo, los procesos geológicos cotidianos graduales, como la erosión, quizás esculpieron el paisaje actual de la Tierra.

El concepto de que los cambios repetitivos y graduales dieron forma a la Tierra llegó a conocerse como **teoría del uniformitarismo**. Puso en tela de juicio las creencias comunes de que la Tierra tenía seis mil años de antigüedad. Según estudios tradicionales, las personas habían registrado todo lo ocurrido en esos seis mil años y, no obstante, nadie había mencionado la evolución de especies. Sin embargo, por los cálculos de Lyell, sin duda se requirieron millones de años para esculpir la superficie de nuestro planeta. ¿No era eso el tiempo suficiente para que las especies evolucionaran? Darwin así lo consideró, pero ¿de qué manera evolucionaron? Él dedicó el resto de su vida a responder esa interesante pregunta.

Para repasar en casa

¿Cómo afectó la nueva evidencia a las antiguas creencias?

- En el siglo XIX, los fósiles y otra evidencia condujo a algún naturalista a proponer que la Tierra y las especies que en ella habitaban habían cambiado con el transcurso del tiempo. Además, los naturalistas comenzaron a reconsiderar la edad de la Tierra.
- Estos conceptos cambiaron el panorama para la teoría de la evolución propuesta más tarde por Darwin.



17.3 Darwin, Wallace y la selección natural

- Las observaciones realizadas a especies en diferentes partes del mundo ayudaron a Darwin a entender la fuerza impulsora de la evolución.
- Conexiones con Selección natural 1.4, Alelos y caracteres 11.1.

Huesos viejos y armadillos

Darwin envió a Inglaterra miles de muestras que recolectó durante su viaje. Entre las que se encontraban fósiles de gliptodontes de Argentina. Estos mamíferos con armadura se encuentran extintos, pero tienen muchos rasgos en común con los armadillos modernos (figura 17.6). Por ejemplo, los armadillos sólo habitan en los sitios donde antes vivían los gliptodontes, e igual que éstos, tienen cascos y conchas protectoras que constan de escamas óseas poco comunes.

¿Sería posible que estos extraños caracteres compartidos indicaran que los gliptodontes eran antiguos parientes de los armadillos? De ser así, quizá los rasgos de su ancestro común se modificaron en la línea de descendencia que condujo a los armadillos. Pero, ¿qué produjo estos cambios?

Una comprensión fundamental: la variación de caracteres

Al regresar a Inglaterra, Darwin estudió sus notas y los fósiles. También leyó un ensayo de sus contemporáneos, el economista Thomas Malthus, quien correlacionó el aumento en la población humana con la hambruna, la enfermedad y la guerra. Propuso que los humanos agotaban los alimentos, el espacio para vivir y otros recursos, pues tendían a reproducirse sobrepasando la capacidad de carga de su entorno. Cuando eso ocurría, los individuos de la población competían entre sí por los escasos recursos o desarrollaban tecnologías para aumentar su productivi-

dad. Darwin comprendió que las ideas de Malthus tenían aplicación más amplia: todas las poblaciones, no sólo las humanas, tenían la capacidad de producir más individuos de lo que podía soportar su entorno.

Además, Darwin reflexionó acerca de especies que observó en el curso de su viaje. Él sabía que los individuos de una especie no siempre eran idénticos. Tenían muchos caracteres en común, aunque variaban en tamaño, color u otras características. Darwin comprendió que poseer determinado estado de carácter quizá impartiera al individuo una ventaja respecto a miembros de su especie con un estado distinto. Este carácter tal vez mejorara la capacidad del individuo para obtener recursos limitados (y así sobrevivir y reproducirse) en su entorno específico.

Darwin pensó en algunas de las especies de aves que observó en las Islas Galápagos (figura 17.7). Esta cadena de islas está separada de América del Sur por 900 km (550 millas) de mar abierto, de modo que asumió que la mayoría de las especies de aves que poblaban las islas habían estado aisladas allí durante mucho tiempo. Diferentes tipos de pinzones pueblan las costas, las tierras bajas secas y los bosques de las montañas de esas islas; y cada especie tiene caracteres que ayudan a sus miembros a adaptarse a ese hábitat en especial.

Además, Darwin sabía acerca de la selección artificial, proceso por el cual los humanos seleccionan caracteres que favorecen una especie doméstica. Por ejemplo, estaba familiarizado con una variación drástica en los caracteres producidos por criadores de pichones a través de la reproducción selectiva (sección 1.4). Reconoció que el entorno podía seleccionar de manera similar caracteres que permitían que los individuos de una población mejor adaptada sobrevivieran. Por ejemplo, supongamos que un grupo de aves que se alimenta de semillas habita en un entorno seco, donde escasean las semillas suaves. Al nacer un ave

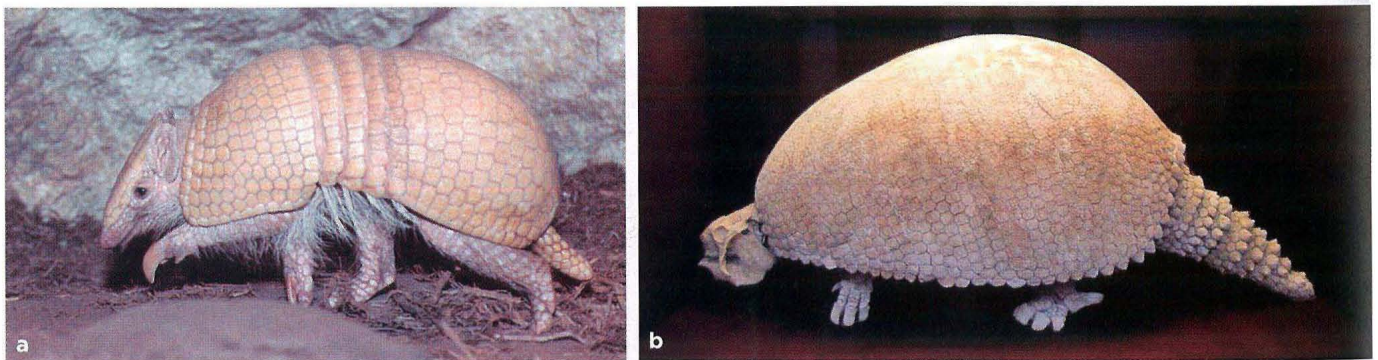


Figura 17.6 ¿Antiguos parientes? (a) Un armadillo moderno de aproximadamente 30 cm (un pie) de largo. (b) Fósil de un gliptodonte, mamífero del tamaño de un automóvil que vivió hace 2 millones a 15,000 años.

Los gliptodontes y los armadillos se encuentran muy distantes en el tiempo, pero comparten una distribución restringida y caracteres poco comunes, incluyendo una coraza y un casco de placas óseas cubiertas de queratina, un material similar a la piel de cocodrilo y lagartija. [Al fósil en (b) le falta el casco]. Sus singulares caracteres compartidos fueron un indicio que ayudó a Darwin a desarrollar la teoría de la evolución por selección natural.



Figura 17.7 Tres de las 13 especies de pinzones nativos de las Islas Galápagos.

- (a) Pinzón de pico fuerte *Geospiza magnirostris*.
 (b) *G. scandens* se alimenta de frutos de cactus e insectos en las flores de cactus.
 (c) *Camarhynchus pallidus* emplea las espinas de cactus y sus ramas para sondear la madera y extraer insectos.

con pico extrafuerte, eso le permitiría abrir semillas duras que otros miembros de la población no pudieran comer. De este modo, el ave de pico fuerte tendría acceso a una fuente adicional de alimentos. Si todos los demás factores fueran iguales, dicha ave tendría mejores probabilidades de sobrevivir y reproducirse en este entorno particular que otros individuos de la población. Además, si la dureza del pico tiene base hereditaria, por lo menos algunos de los descendientes del ave heredarían esa ventaja. Transcurridas muchas generaciones, sin duda los pájaros de pico fuerte predominarían en esta población. Así, con el transcurso de muchas generaciones, el entorno de la población influiría en los caracteres que sus individuos compartieran.

La selección natural

Estos conceptos condujeron a Darwin a comprender que la variación en los caracteres (estados de carácter) compartidos hace que los individuos de una población tengan adaptación variable en su entorno. En otras palabras, los individuos de una población natural varían en **aptitud**, adaptación a su entorno medida por su contribución genética relativa a generaciones futuras. Un carácter que aumenta la aptitud del individuo se llama **adaptación evolutiva** o **rasgo adaptativo**.

Los individuos de una población natural tienden a sobrevivir y reproducirse con diferente éxito, dependiendo de los detalles de los estados de carácter que comparten. Darwin entendió que este proceso, al cual dio el nombre de **selección natural**, podría ser la fuerza que impulsara la evolución. Cuando el individuo tiene un carácter que lo hace más apto para el entorno, es más capaz de competir por los recursos. Si ocurre esto último, entonces tiene más probabilidades de sobrevivir suficiente tiempo para reproducirse. Si los individuos que presentan un carácter hereditario adaptativo producen más hijos que los que no lo tienen, entonces la frecuencia de dicho carácter tenderá a aumentar en la población en generaciones sucesivas. En la tabla 17.1 se resume este razonamiento.

Darwin propuso la hipótesis de que el proceso de la evolución por selección natural podría explicar no sólo la variación dentro de las poblaciones, sino también la amplia diversidad de especies en el mundo y en el registro fósil.

Tabla 17.1 Principios de la selección natural

Observaciones acerca de las poblaciones

- Las poblaciones naturales tienen una capacidad reproductiva inherente para aumentar de tamaño con el transcurso del tiempo.
- Conforme la población se expande, los recursos que los individuos utilizan (como alimentos y espacio para vivir) se hacen cada vez más limitados.
- Cuando los recursos escasean, los individuos de la población compiten por ellos.

Observaciones sobre genética

- Los individuos de una especie comparten ciertos caracteres.
- Los individuos de una población natural varían los estados de carácter compartidos.
- Los caracteres tienen una base hereditaria en los genes. Los alelos (forma alternativa de un mismo gen) surgen por mutación.

Inferencias

- Cierta forma de un rasgo compartido, tal vez permita que su portador sea más competitivo para obtener un recurso limitado.
- Los individuos más aptos para obtener un recurso limitado tienden a procrear más crías que otros de la población.
- De este modo, un alelo asociado con un carácter adaptativo tiende a hacerse más común en una población con el transcurso de generaciones.

Para repasar en casa

¿Qué es la selección natural?

- La selección natural es la supervivencia y reproducción diferencial entre individuos de una población que difiere en los caracteres hereditarios compartidos.
- Se dice que los caracteres favorecidos por selección natural son adaptativos. Un carácter adaptativo aumenta la probabilidad de que el individuo que lo presenta sobreviva y se reproduzca.

17.4 Las grandes mentes piensan de manera similar

- La teoría de Darwin respecto a la evolución fue posible gracias a contribuciones de científicos que le precedieron.
- Alfred Wallace desarrolló en forma independiente el concepto de evolución por medio de la selección natural.

Darwin escribió sus ideas acerca de la selección natural, pero dejó pasar 10 años sin publicarlas. Mientras tanto, Alfred Wallace, un naturalista que había estudiado la vida salvaje en la cuenca del Amazonas y el Archipiélago Malayo, escribió un ensayo y lo envió a Darwin para recibir sus comentarios. ¡El ensayo de Wallace delineaba la teoría de Darwin! Wallace ya había escrito con anterioridad cartas a Lyell y Darwin acerca de patrones en la distribución geográfica de las especies; y también había conectado los puntos. Actualmente Wallace es conocido como padre de la biogeografía (figura 17.8).

En 1858, unas semanas después de que Darwin recibió el ensayo de Wallace, sus teorías similares fueron presentadas de manera conjunta ante una reunión científica. Wallace continuaba aún en el campo y no sabía acerca de esta junta, a la cual Darwin tampoco asistió. Al año siguiente, Darwin publicó *El origen de las especies* (*On the Origin of Species*), donde describió evidencia detallada en apoyo de su teoría.

Muchos estudiosos aceptaron fácilmente el concepto de descendencia con modificaciones o evolución. Sin embargo, surgió un feroz debate acerca del concepto de que la evolución se realiza a través de la selección natural. Transcurrirían décadas para que la evidencia experimental del campo de la genética condujera a su amplia aceptación en la comunidad científica.



Figura 17.8 Alfred Wallace, codescubridor del proceso de evolución por medio de la selección natural.

Para repasar en casa

¿Qué papel desempeñó Alfred Wallace en el desarrollo de la teoría de la evolución por medio de la selección natural?

- Wallace se basó en sus propias observaciones acerca de especies de plantas y animales, y propuso, igual que Darwin, que la selección natural es una fuerza que impulsa la evolución.

17.5 Acerca de los fósiles

- Los fósiles son restos o trazas de organismos que vivieron en el pasado. Nos proporcionan indicios de las relaciones evolutivas.
- El registro fósil siempre estará incompleto.

¿Cómo se forman los fósiles?

La mayoría de los fósiles son huesos, dientes, conchas, semillas, esporas u otras partes duras del cuerpo que se encuentran mineralizadas (figura 17.9a,b). Las trazas de fósiles como impresiones de huellas y de otros tipos, nidos, madrigueras, senderos, huecos, cascarones o heces constituyen evidencia de las actividades de un organismo (figura 17.9c).

El proceso de fosilización se inicia cuando el organismo o sus trazas quedan recubiertos de sedimentos o cenizas volcánicas. El agua se filtra con lentitud a los residuos, y los iones metálicos y otros compuestos inorgánicos disueltos en el agua gradualmente reemplazan los minerales de huesos y otros tejidos duros. Se acumulan sedimentos en la parte superior de los restos, ejerciendo cada vez mayor presión sobre ellos. Transcurrido mucho tiempo, la presión y la mineralización transforman los residuos en roca.

La mayoría de los fósiles se encuentran en capas de roca sedimentaria, como roca lodosa, roca caliza y esquistos (figura 17.10). La roca sedimentaria se forma a medida que los ríos deslavan limo, arena, cenizas volcánicas y otras partículas de la tierra al mar. Las partículas precipitan en el fondo del mar en capas horizontales que varían en espesor y composición. Después de cientos de millones de años, las capas de sedimentos se compactan formando capas de roca.

Estudiamos las capas de roca sedimentaria para entender el contexto histórico de los fósiles que encontramos en ellas. Por lo común, las capas más profundas de la pila son las primeras en formarse, y las más cercanas a la superficie se formaron más recientemente. Por tanto, la capa más profunda de roca sedimentaria contiene los fósiles más antiguos. La composición de la capa también nos da indicios acerca de los eventos locales o globales que ocurrieron durante su formación; la capa del límite K-T discutida en la introducción al capítulo es un ejemplo. El espesor relativo de las diferentes capas suministra otros indicios. Por ejemplo, esas capas eran delgadas durante la era de hielo, cuando enormes volúmenes de agua se congelaron y quedaron atrapados en glaciares. La sedimentación se hizo más lenta a medida que los ríos se secaron. Cuando los glaciares se fundieron, la sedimentación se reanudó y las capas se hicieron más gruesas.

El registro fósil

Contamos con fósiles de más de 250,000 especies conocidas. Considerando la gama actual de biodiversidad, sin duda existieron muchos millones más, pero nunca los conoceremos a todos. ¿Por qué no?

Las probabilidades de hallar evidencia de una especie extinta son pocas, pues los fósiles son relativamente poco comunes. La mayor parte del tiempo los restos de un organismo son eliminados con rapidez por depredadores

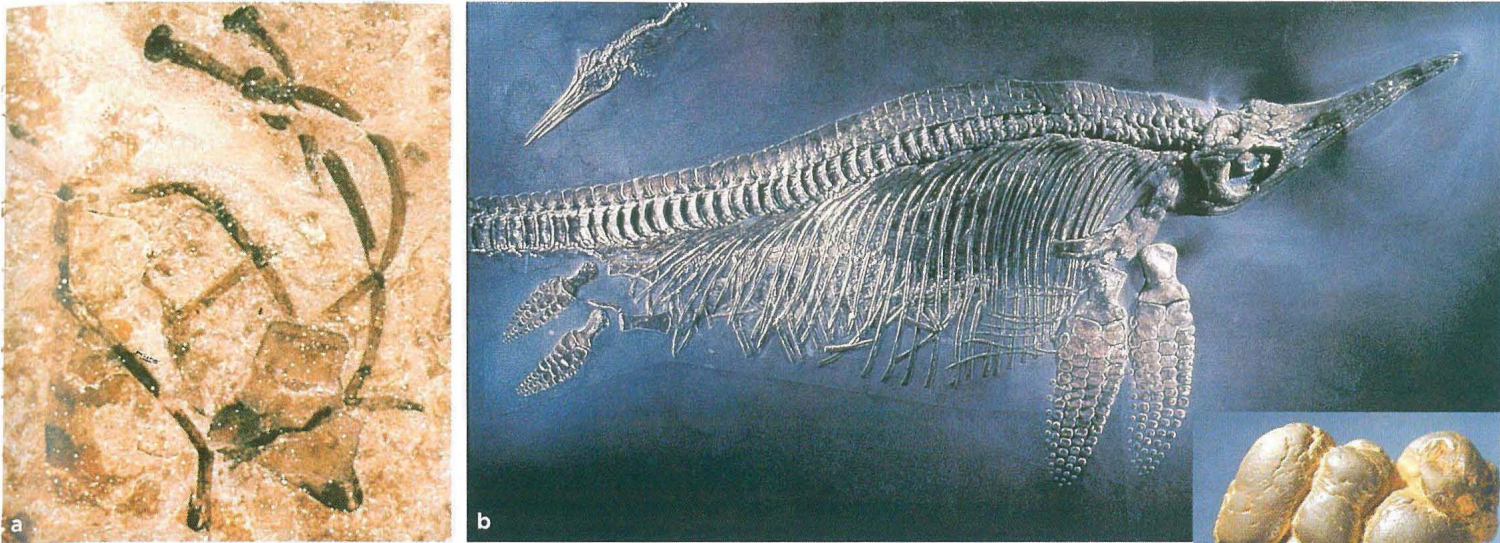


Figura 17.9 Fósiles. **(a)** Fósil de una de las plantas terrestres más antiguas que se conocen (*Cooksonia*). Sus tallos medían lo mismo que un palillo de dientes. **(b)** Esqueleto fosilizado de un ictiosaurio. Este reptil marino vivió hace alrededor de 200 millones de años. **(c)** Coprolita. Restos de alimento fosilizado y lombrices parásitas en el interior de heces fosilizadas nos hablan de la dieta y la salud de las especies extintas. Este resto fue excretado por un animal similar al zorro.

o descomposición. La materia orgánica se descompone en presencia de oxígeno, de modo que los restos sólo duran cuando están protegidos por un material que excluya el aire, como savia, alquitrán, hielo o lodo. Los restos que se fosilizan a menudo sufren deformaciones, son aplastados o dispersados por la erosión y otros movimientos geológicos.

Para obtener datos acerca de especies extintas que vivieron hace mucho tiempo, es necesario encontrar un fósil de las mismas. Por lo menos un espécimen debió haber quedado enterrado antes de experimentar descomposición o ser consumido por otro. El sitio de enterramiento tuvo que escapar a los eventos geológicos y terminar en un lugar donde pudiéramos encontrarlo.

La mayoría de las especies antiguas carecían de partes duras para fosilizarse, de modo que no encontramos mucha evidencia de ellas. A diferencia de los peces óseos o los moluscos de concha dura, por ejemplo, las medusas y los gusanos blandos no aparecen con frecuencia en el registro fósil, aunque probablemente eran mucho más comunes.

Consideremos también el número relativo de organismos. Quizá cierta planta liberaba millones de esporas en una sola estación. Los primeros humanos vivían en pequeñas bandas y pocos de sus descendientes sobrevivían. ¿Cuál es la probabilidad de encontrar siquiera un hueso humano fosilizado en comparación con la probabilidad de encontrar la espora fosilizada de una planta?

Por último, imagina un linaje, desaparecido cuando su hábitat en una isla volcánica remota se hundió en el mar. O imagina dos linajes, uno que duró muy poco y el otro que perduró miles de millones de años. ¿Cuál tiene más probabilidades de estar representado en el registro de fósiles?

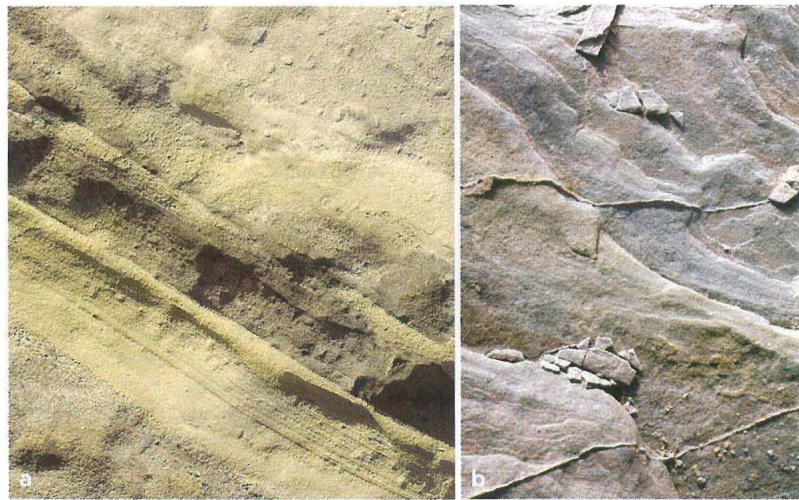


Figura 17.10 Los dos tipos más comunes de roca sedimentaria que contiene fósiles. **(a)** Piedra arenisca que consta principalmente de granos de arena compactados o minerales, y **(b)** esquisto, que es barro o cieno compactado. Ambos forman capas.

Para repasar en casa

¿Qué son los fósiles?

- Los fósiles son evidencia de organismos que vivieron en el pasado remoto, un registro histórico de la vida labrado en piedra. Los más antiguos suelen encontrarse en las rocas sedimentarias más profundas.
- El registro fósil nunca estará completo. Los eventos geológicos borraron gran parte del mismo. El resto del registro se inclina hacia especies que tenían partes duras, poblaciones densas de amplia distribución y que persistieron durante mucho tiempo.
- Incluso así, el registro fósil es suficientemente sustancial para ayudarnos a reconstruir patrones y tendencias en la historia de la vida.

17.6 Fechado de piezas del crucigrama

- La datación radiométrica revela la antigüedad de rocas y fósiles.
- Conexiones con Radioisótopos 2.2, Compuestos 2.3.

Un radioisótopo es la forma de un elemento con núcleo inestable (sección 2.2). Los átomos del radioisótopo se transforman en átomos de otros elementos a medida que su núcleo se desintegra. Dicha desintegración no depende de la temperatura, la presión, el estado de enlace químico o la mezcla; sino únicamente del tiempo. Como el tic tac de un reloj perfecto, cada tipo de radioisótopo se desintegra a velocidad constante hasta formar productos predecibles llamados elementos hijos.

Por ejemplo, el uranio 238 radiactivo se desintegra a torio 234, que a su vez se desintegra a otra sustancia y así sucesivamente hasta transformarse en plomo 206. El tiempo que tarda la mitad de los átomos del radioisótopo en desintegrarse a un producto se llama **vida media** (figura 17.11). La vida media del uranio 238 al plomo 206 son 4.5 miles de millones de años.

El carácter predecible del decaimiento radiactivo puede emplearse para determinar la antigüedad de una roca volcá-

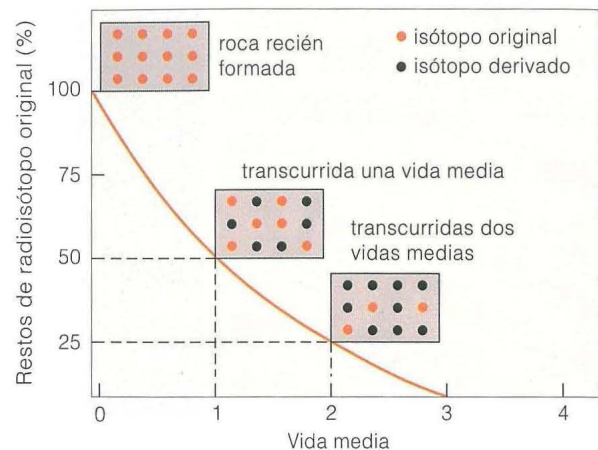


Figura 17.11 Animada Vida media: el tiempo necesario para que la mitad de los átomos de una muestra de radioisótopo se desintegre. **Investiga:** ¿Qué parte del radioisótopo original permanece después de que transcurren dos de sus vidas medias? *Respuesta: 25 por ciento*

nica y la fecha en que se enfrió. La roca de las profundidades de la Tierra está caliente y fundida; los átomos giran y se mezclan en ella. La roca que alcanza la superficie se enfría y se endurece, y al hacerlo cristaliza minerales en su interior. Cada tipo de mineral tiene una estructura y composición característica. Por ejemplo, el mineral zirconio (*derecha*) consta principalmente de arreglos ordenados de moléculas de silicato de zirconio ($ZrSiO_4$). Algunas moléculas del cristal de zirconio tienen átomos de uranio en vez de átomos de zirconio, pero nunca átomos de plomo, de modo que el nuevo zirconio que cristaliza a partir de roca fundida que se enfría no contiene plomo. Sin embargo, el uranio se desintegra a plomo a una tasa predecible. Por tanto, con el transcurso del tiempo los átomos de uranio desaparecen del cristal de zirconio y se acumulan átomos de plomo en él. La proporción de átomos de uranio respecto a átomos de plomo en un cristal de zirconio puede medirse con precisión y emplearse para calcular cuánto tiempo hace que el cristal se formó, o sea, su antigüedad.



zirconio

Acabamos de describir la **datación radiométrica**, método que revela la antigüedad de un material al determinar su contenido de radioisótopos y elementos derivados. La roca terrestre más antigua que se conoce es un diminuto cristal de zirconio de Jack Hills, Australia, el cual tiene 4,404 millones de años de antigüedad.

Los fósiles recientes que aún contienen carbono pueden ser fechados al medir su contenido de carbono 14 (figura 17.12). La mayor parte del carbono 14 de un fósil se desintegra transcurridos unos 60 mil años. La antigüedad de fósiles de mayor edad sólo puede estimarse por fechado de rocas volcánicas en flujos de lava por encima y por debajo del sitio donde se encontró el fósil.

Para repasar en casa

¿Cómo determinamos la antigüedad de rocas y fósiles?

- Los investigadores emplean el carácter predecible del decaimiento de radioisótopos para estimar la antigüedad de rocas y fósiles.



A Hace mucho tiempo, trazas de ^{14}C y mayores cantidades de ^{12}C se incorporaron a los tejidos de un nautilo. Los átomos de carbono eran parte de moléculas orgánicas del alimento del nautilo. Mientras estuvo vivo, el nautilo repuso sus propios tejidos con el carbono obtenido de los alimentos. Así, la proporción de ^{14}C respecto a ^{12}C en sus tejidos fue constante.



B Al morir el nautilo, dejó de comer, de modo que su cuerpo ya no asimiló más carbono. El ^{14}C del cuerpo continuó desintegrándose, de modo que la cantidad de ^{14}C disminuyó en relación con la de ^{12}C . La mitad de ^{14}C se desintegró en 5,370 años, la mitad de lo restante desapareció transcurridos otros 5,370 años, y así sucesivamente.



C Los buscadores de fósiles descubrieron este fósil. Midió su proporción de ^{14}C respecto a ^{12}C y lo emplearon para calcular la cantidad de reducciones de vida media desde su muerte. En este ejemplo, la proporción es de 1/8 de ^{14}C respecto a ^{12}C en los organismos vivos. Por tanto, se deduce que este nautilo vivió hace aproximadamente 16,000 años.

Figura 17.12 Animada Mediante datación radiométrica se determina la antigüedad de un fósil. El carbono 14 (^{14}C) se forma en la atmósfera, y al combinarse con el oxígeno se transforma en dióxido de carbono. Junto con grandes cantidades del isótopo estable del carbono ^{12}C , trazas de ^{14}C entran a las cadenas alimenticias mediante la fotosíntesis. Todos los organismos vivos incorporan carbono.

17.7 Historia de una ballena

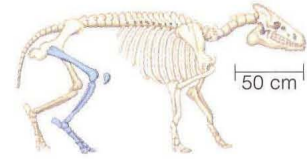
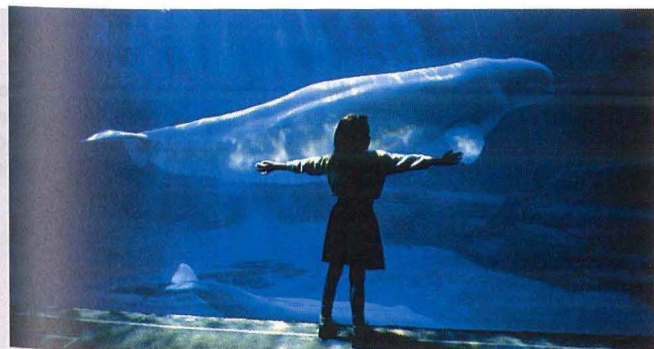
■ Nuevos descubrimientos de fósiles completan de manera continua las brechas en nuestra comprensión acerca de la historia antigua de muchos linajes.

Durante algún tiempo, los científicos creyeron que los ancestros de las ballenas probablemente caminaban sobre la tierra, pero que después volvieron a vivir en el agua. Sin embargo, la evidencia a favor de esta opinión fue escasa. El cráneo y la quijada inferior de los cetáceos —que incluyen ballenas, delfines y marsopas— tienen características distintivas de algunos tipos de antiguos animales terrestres carnívoros. Las comparaciones moleculares sugieren que estos animales tal vez eran artiodáctilos, animales con pezuñas y un número par de dedos en las patas (de dos a cuatro); representantes modernos de este linaje incluyen hipopótamos, camellos, cerdos, venados, ovejas y vacas.

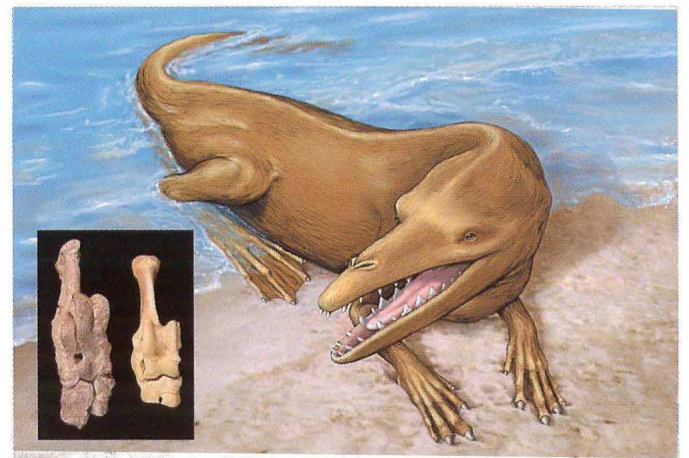
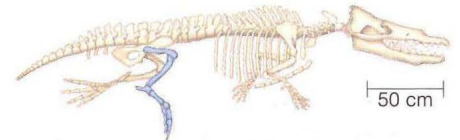
Hasta hace poco, los cambios graduales en características óseas que demostraran la transición de los linajes de ballenas de la vida terrestre a la acuática faltaban en el registro fósil. Los investigadores sabían de la existencia de formas intermedias porque encontraron un representante fósil de un esqueleto de ballena, pero sin un esqueleto completo, el resto de la historia constituía una especulación. Entonces, en el año 2000, Philip Gingerich y colaboradores encontraron dos de los eslabones faltantes en Paquistán, al recuperar esqueletos fósiles completos de las antiguas ballenas *Rodhocetus* y *Dorudon* (figura 17.13).

Los investigadores sabían que estas nuevas muestras fósiles representaban formas intermedias del linaje de las ballenas, porque tenían huesos intactos de los tobillos, similares a los de las ovejas y huesos antiguos del cráneo similar al de las ballenas en los mismos esqueletos.

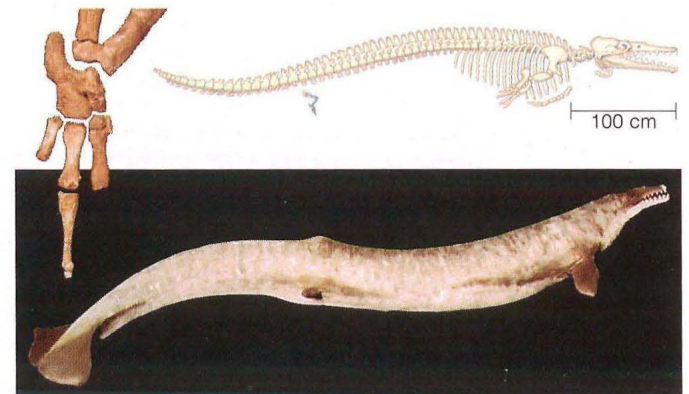
Los fósiles recién descubiertos cubren muchos detalles de la historia antigua de las ballenas. Por ejemplo, los huesos de los tobillos tanto de *Rodhocetus* y *Dorudon* como de artiodáctilos extintos y modernos tienen características distintivas en común. Los cetáceos modernos carecen de restos de huesos de los tobillos. Por presentar huesos intermedios de los tobillos, *Rodhocetus* y *Dorudon* probablemente fueron derivados del antiguo linaje de transición de artiodáctilos a ballenas modernas que regresaron a la vida en el agua. Las proporciones de las extremidades, el cráneo, el cuello y el tórax de *Rodhocetus* indican que nadaba con sus pies, no con su cola. Igual que las ballenas modernas, el *Dorudon* de 5 m era evidentemente un nadador acuático que se impulsaba con la cola: toda la extremidad posterior medía alrededor de 12 cm de largo y era demasiado pequeña para haber mantenido al animal fuera del agua.



A Fósil de 30 millones de años de antigüedad de *Elomeryx*. Este pequeño mamífero terrestre era miembro del mismo grupo de artiodáctilos que dio lugar a los hipopótamos, cerdos, venados, ovejas, vacas y ballenas.



B *Rodhocetus*, una antigua ballena, vivió hace alrededor de 47 millones de años. Sus huesos distintivos de los tobillos señalan una conexión evolutiva cercana con los artiodáctilos. Inserto: comparación de un hueso de rodilla de *Rodhocetus* (izquierda) con el de un artiodáctilo moderno, un berrendo (derecha).



C *Dorudon atrox*, una antigua ballena que vivió hace unos 37 millones de años. Sus huesos del tobillo similares a los de los artiodáctilos (izquierda) eran demasiado pequeños para soportar el enorme peso de su cuerpo en la tierra, de modo que este mamífero sin duda era totalmente acuático.

Figura 17.13 Nuevos eslabones en el antiguo linaje de las ballenas.

17.8 Poniendo el tiempo en perspectiva

Puedes considerar cada capa de roca sedimentaria como una rebanada de tiempo geológico; cada una contiene indicios de la vida en la Tierra durante el periodo en que se formó. La datación radiométrica y los fósiles de las capas nos permiten reconocer frecuencias similares de capas de roca

sedimentaria a nivel mundial. Las transiciones entre capas marcan los límites de grandes intervalos de tiempo en la **escala de tiempo geológico**, o cronología de historia de la Tierra (figura 17.14).

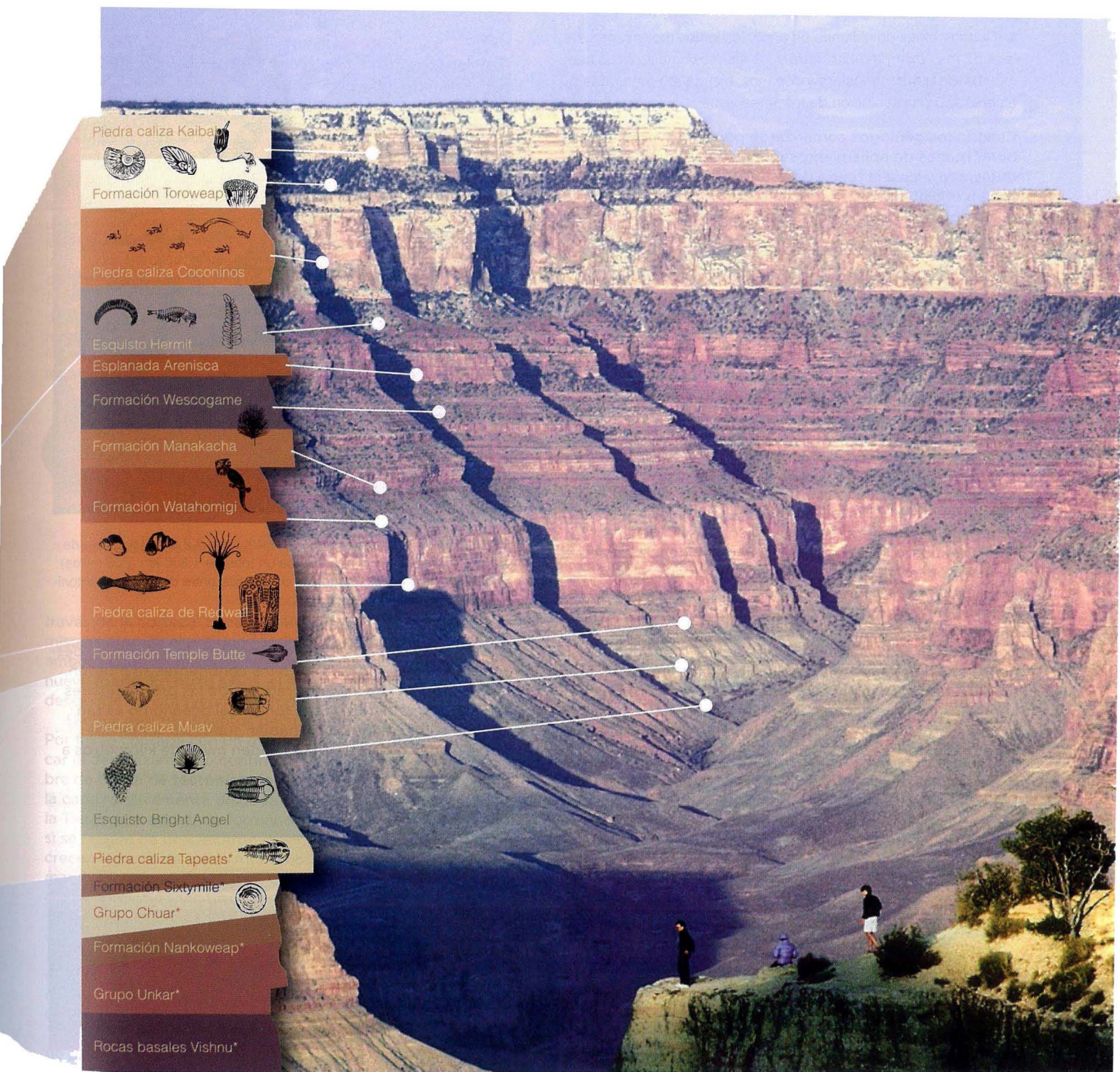
Eon	Era	Periodo	Época	ma	Principales eventos geológicos y biológicos	
FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	Reciente	0.01	Evolución de humanos modernos. El principal evento de extinción mayor tiene lugar ahora.	
			Pleistoceno	1.8		
		TERCIARIO	Plioceno	5.3	Los trópicos y las regiones subtropicales se extendieron hacia los polos. El clima se enfrió; surgieron bosques secos y pastizales. Radiaciones adaptativas de mamíferos, insectos y aves.	
			Mioceno	23.0		
			Oligoceno	33.9		
			Eoceno	55.8		
	MESOZOICO	CRETACEO	Tardío	65.5	Principal evento de extinción, quizá precipitado por impacto de un asteroide. Extinción masiva de todos los dinosaurios y muchos organismos marinos.	
			Temprano	99.6	Clima muy cálido. Los dinosaurios continuaron predominando. Aparecieron grupos importantes de insectos modernos (abejas, mariposas, termitas, hormigas e insectos herbívoros, incluyendo áfidos y grillos). Se originaron las plantas con flores y se transformaron en las plantas terrestres.	
		JURÁSICO		145.5	Era de los dinosaurios. Vegetación abundante, de gimnospermas y helechos. Aparecieron las aves. Pangea se rompió.	
				199.6		
		TRIÁSICO		251	Evento de extinción mayor	
				299	Recuperación de la extinción mayor al final del periodo Pérmico. Aparecieron muchos grupos, incluyendo tortugas, dinosaurios, pterosaurios y mamíferos.	
		PALEOZOICO	PÉRMICO		251	Evento de extinción mayor
					299	Formación del supercontinente Pangea y el océano del mundo. Radiación adaptativa a las coníferas. Aparecieron las cicadas y los ginkgos. El clima relativamente seco condujo a gimnospermas e insectos adaptados a las sequías, como escarabajos y moscas.
CARBONÍFERO			299	El alto nivel de oxígeno en la atmósfera alentó la existencia de artrópodos gigantes. Predominaron las plantas liberadoras de esporas. Era de grandes árboles licofitas. Se formaron amplios bosques de carbón. Evolucionaron los oídos en los anfibios; los penes en los reptiles tempranos (la vagina evolucionó después, únicamente en mamíferos).		
			359			
DEVÓNICO			359	Evento de extinción mayor		
			416	Aparecieron tetrápodos terrestres. La explosión de diversidad de las plantas condujo a árboles de diferentes formas, bosques y muchos nuevos grupos de plantas, incluyendo las licofitas, los helechos con hojas complejas y las plantas con semillas.		
SILÚRICO		416	Radiaciones de invertebrados marinos. Primera aparición de hongos terrestres, plantas vasculares, peces óseos y quizás animales terrestres (milpiés, arañas).			
		443				
ORDOVÍCICO		443	Evento de extinción mayor			
		488	Periodo mayor de primeras apariciones. Aparecieron las primeras plantas terrestres, peces y corales formadores de arrecifes. Gondwana se desplazó hacia el Polo Sur y se congeló.			
CÁMBRICO		488	La Tierra se descongeló y hubo una explosión de diversidad entre los animales. Aparecieron los principales grupos de animales (en los océanos). Evolucionaron los trilobites y los organismos con concha.			
		542				
PROTEROZOICO				542	Se acumuló oxígeno en la atmósfera. Se originó el metabolismo aerobio. Se originaron las células eucariotas y a continuación los protistas, hongos, las plantas y los animales. Se tiene evidencia de que la Tierra se congeló en su mayor parte a través de una serie de eras polares entre 750 y 600 ma.	
ARQUEANO Y ANTERIOR				2,500	3,800–2,500 ma. Origen de los procariontes.	
					4,600–3,800 ma. Origen de la corteza de la Tierra, la primera atmósfera y los primeros mares. La evolución química y molecular condujo al origen de la vida (de las protocélulas a las células procariontes aerobias).	

Las transiciones en las capas de roca sedimentaria marcan grandes intervalos de tiempo en la historia de la Tierra (no están a la misma escala). Millones de años.

de la Comisión Internacional de datos de Estratigrafía, 2007

B Podemos reconstruir algunos eventos en la historia de los seres vivos al estudiar indicios en las rocas de las capas. Aquí, los triángulos azules marcan los tiempos en que se produjeron grandes extinciones masivas. "Primera aparición" se refiere a la aparición en el registro fósil, no necesariamente a la primera sobre la Tierra; a menudo descubrimos fósiles significativamente más antiguos que especímenes antes descubiertos.

Figura 17.14 Animada La escala de tiempo geológico.



C Capas de rocas sedimentarias expuestas por la erosión en el Gran Cañón. Cada capa tiene una composición característica y determina un conjunto de fósiles (se muestran algunos) que reflejan eventos durante su formación. Por ejemplo, la capa de caliza *Coconino Sandstone*, que se extiende desde California hasta Montana, consta principalmente de arena muy intemperizada. Las marcas onduladas y los rastros de reptiles son los únicos fósiles en ella. Muchos consideran que se trata de los restos de un vasto desierto arenoso como el Sahara en la actualidad. * Capas no visibles en esta foto del Gran Cañón.

17.9 Continentes que se separan, mares que cambian

■ Durante miles de millones de años, los lentos movimientos de la capa más externa de la Tierra y los eventos catastróficos han modificado tierra, atmósfera y océanos, ejerciendo profundos efectos sobre la evolución de los seres vivos.

Cuando los geólogos comenzaron por primera vez a elaborar mapas de apilamientos verticales de rocas sedimentarias, prevalecía la teoría de la uniformidad. Los geólogos sabían que el agua, el viento, el fuego y otros factores naturales modificaban en forma continua la superficie terrestre. Más tarde les quedó claro que dichos factores eran parte del gran cuadro de cambios geológicos. Igual que los seres vivos, la Tierra también cambia drásticamente. Por ejemplo, las costas del Atlántico de América del Sur y las de África parecen encajar como si fueran piezas de un rompecabezas. Cierta modelo sugirió que todos los continentes alguna vez formaron parte de un supercontinente mayor: **Pangea**, el cual se dividió en fragmentos que se separaron. El modelo explicaba por qué se encuentra el mismo tipo de fósiles en la roca sedimentaria a ambos lados del amplio océano Atlántico.

De primera instancia, la mayoría de los científicos no aceptó el modelo, al cual se le denominó "deriva continental". El hecho de que los continentes se desplazaran en la superficie de la Tierra les pareció escandaloso, y nadie sabía qué impulsaría dicho movimiento.

Sin embargo, continuó apareciendo evidencia en apoyo de ese modelo. Por ejemplo, la roca fundida en el interior de los pozos de la Tierra asciende y se solidifica en la superficie. Algunos minerales ricos en hierro se magnetizan al solidificarse y sus polos magnéticos se alinean con los polos terrestres cuando éstos lo hacen. Si los continentes nunca se hubieran desplazado, todas esas antiguas rocas magnéticas estarían alineadas de norte a sur, como agujas de una brújula. De hecho, los polos magnéticos de las formaciones rocosas en distintos continentes están alineados, pero no de norte a sur. Señalan en muchos sentidos

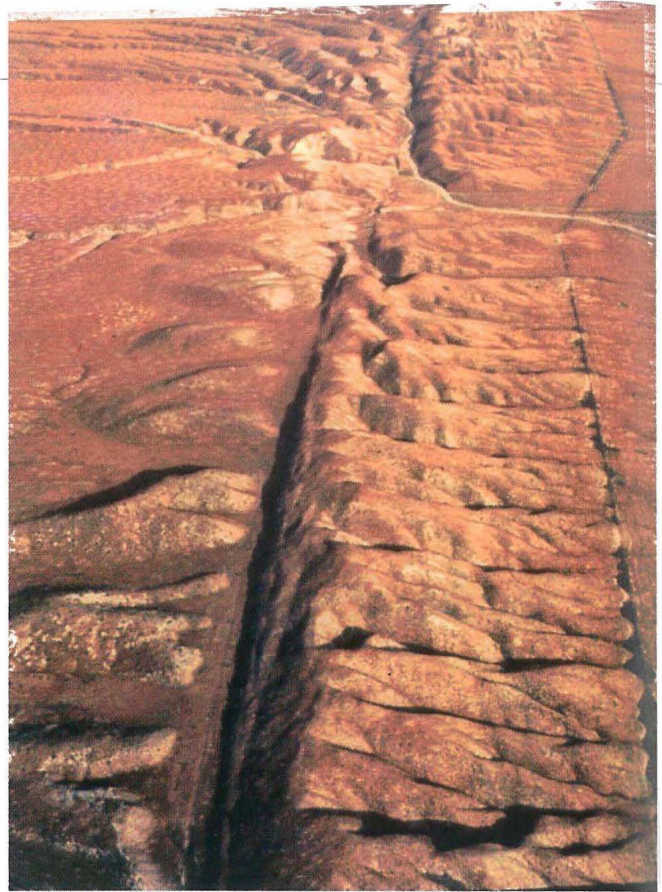
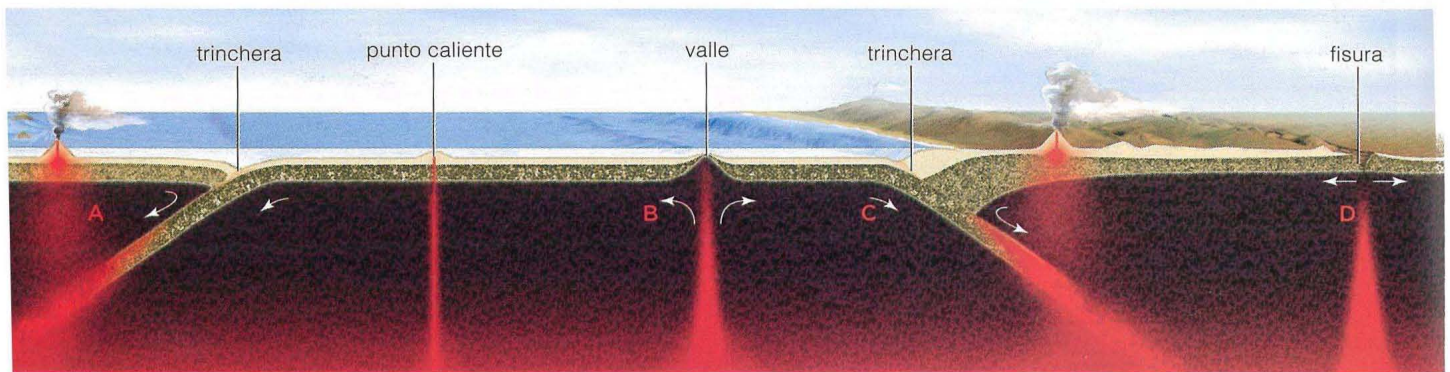


Figura 17.16 Esta foto aérea muestra unos 4.2 km (2.6 millas) de la Falla de San Andrés, que abarca un total de 1,300 km (806 millas) a través de California. Dicha falla es el límite entre dos placas tectónicas que se deslizan en sentido opuesto

diferentes. O bien, los polos magnéticos de la Tierra se desvían de su eje de norte a sur o los continentes se mueven.

Posteriormente, los exploradores de las profundidades del mar descubrieron que el fondo del océano no es tan estático e inanimado como habían supuesto. Inmensos rebordes de cordilleras se extienden miles de kilómetros a



Roca fundida en una acción a través de las placas tectónicas causando puntos calientes". El archipiélago de Hawai se ha estado formando de este modo.

B En los valles oceánicos, enormes expulsiones de roca fundida que salen del interior de la Tierra impulsan el desplazamiento de placas tectónicas. La nueva corteza se esparce lateralmente al transformarse en la superficie, esto obliga a las placas tectónicas adyacentes a alejarse del valle y entrar a trincheras de otros sitios.

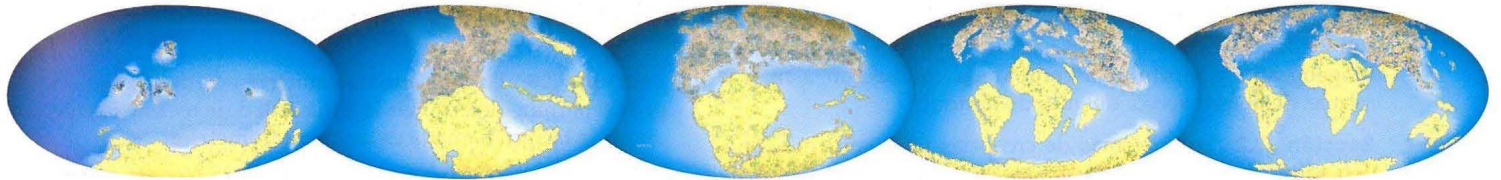
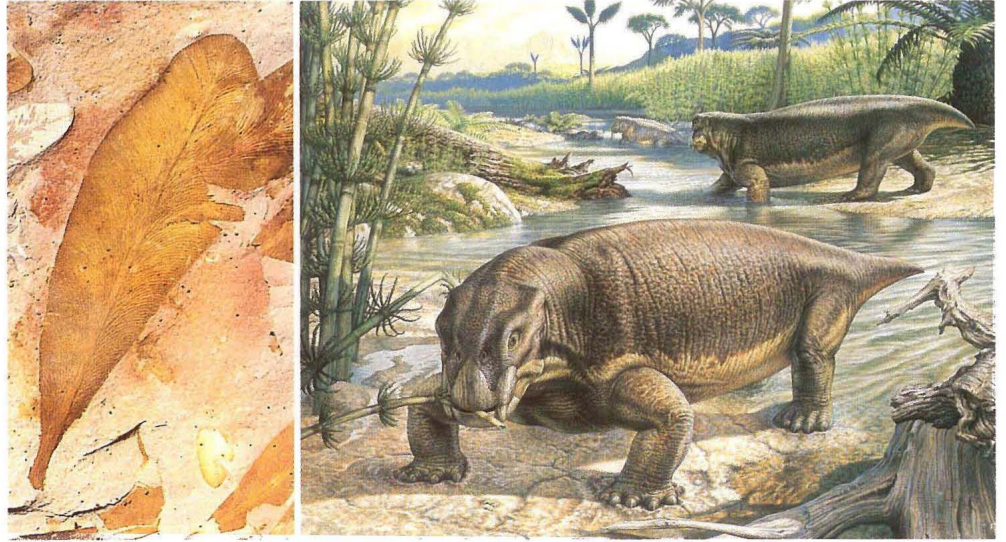
C En las trincheras, el borde de una placa que avanza se sumerge bajo la placa adyacente y la levanta. Las montañas Cascadas, los Andes y otras grandes cordilleras montañosas costeras se formaron de este modo.

D En las fisuras, los continentes se rompen desde el interior a medida que las placas se separan una de otra

Figura 17.15 Tectónica de placas. Porciones inmensas y rígidas de la capa de roca más externa de la Tierra se dividen, se desplazan y chocan entre sí, todas a una velocidad inferior a 10 cm (3.9 pulgadas) al año. A medida que las placas se mueven, arrastran a los continentes a nivel mundial. La configuración actual de tectónica de placas de nuestro planeta se muestra en el apéndice VIII.

Figura 17.17 Animada Una serie de reconstrucciones de los continentes en desplazamiento. **(a)** El supercontinente Gondwana (amarillo) comenzó a separarse en el Silúrico. **(b)** El supercontinente Pangea se formó durante el Triásico, y después **(c)** comenzó a separarse en el Jurásico. **(d)** Límite K-T. **(e)** Los continentes alcanzaron su configuración moderna en el Mioceno.

Hace aproximadamente 260 millones de años, los helechos con semillas y otras plantas sólo vivían en el área de Pangea, que una vez fue Gondwana. Igual sucedió con los reptiles similares a mamíferos llamados terápsidos. *Derecha*, hoja fosilizada de uno de los helechos con semillas (*Glossopteris*). *Extrema derecha*, un terápsido (*Lystrosaurus*) de cerca de 1 m (3.2 pies) de longitud. Este herbívoro colmillado se alimentaba de plantas fibrosas en planicies secas que antes estuvieron inundadas.



A 420 millones de años (ma)

B 237 ma

C 152 ma

D 65.5 ma

E 14 ma

través de la corteza oceánica. Roca fundida que sale de las mismas empuja el antiguo fondo del océano hacia fuera en ambos sentidos, después se enfría y se endurece formando nuevo fondo. En otros sitios, el fondo antiguo del océano desciende constituyendo profundas trincheras.

Dichos descubrimientos persuadieron a los escépticos. Por fin se contaba con un mecanismo plausible para explicar el desplazamiento continental, al cual se le dio el nombre de teoría de **tectónica de placas**. Según esta teoría, la capa relativamente delgada y más externa de rocas de la Tierra está agrietada formando placas inmensas como si se tratara de un cascarón gigante agrietado. Las placas crecen a partir de valles montañosos y se hunden para formar trincheras (figura 17.15). Al hacerlo, se desplazan como colosales cinturones transportadores, llevando en su parte superior continentes a nuevas ubicaciones. El desplazamiento no es mayor a 10 cm (3.9 pulgadas) al año, pero es suficiente para transportar a un continente alrededor del mundo en un periodo de 40 millones de años. La evidencia de este desplazamiento nos rodea en diversas características geológicas del paisaje (figura 17.16).

Los investigadores pronto aplicaron la teoría tectónica de placas a algunas cosas que les intrigaban. Por ejemplo, los fósiles de un helecho con semillas, *Glossopteris*, y un antiguo reptil, *Lystrosaurus*, se encuentran en formaciones geológicas similares en África, India, Sudamérica y Australia (figura 17.17). ¿Por qué estos organismos se presentan en muchos continentes, separados por grandes extensiones de océanos? Las semillas de *Glossopteris* eran demasiado pesadas para flotar o ser llevadas por el viento hasta otro continente, y el *Lystrosaurus* era demasiado pesado para nadar de un continente a otro. Los investigadores sospecharon que ambos evolucionaron en un supercontinente aun más antiguo que Pangea. Dieron el nombre de

Gondwana a este supercontinente, y se calcula que debió haber existido hace unos 300 millones de años. Los investigadores realizaron la siguiente predicción: si la Antártida fue en algún momento parte de Gondwana, entonces debería tener las mismas formaciones geológicas y presentar fósiles como *Glossopteris* y *Lystrosaurus*.

En esa época, la Antártida era una región casi inexplorada. Varias expediciones posteriores encontraron las formaciones y los fósiles, lo cual apoyó la predicción y la teoría de tectónica de placas. Muchas especies modernas, incluyendo las aves estrucioniformes de la figura 17.2a-c, sólo habitan en sitios que una vez formaron parte de Gondwana.

En la actualidad se sabe que Gondwana se desplazó hacia el Sur, a través del Polo Sur, y después hacia el Norte, hasta fusionarse con las otras masas de tierra para formar Pangea. Sabemos que los continentes siempre están en movimiento. Chocan entre sí y se dividen para formar nuevos continentes y después chocan de nuevo. La capa más externa de roca de la Tierra se solidificó hace unos 4,550 millones de años. Por lo menos cinco veces desde entonces, se formó un supercontinente de gran tamaño, con un solo océano en sus costas. Todo el tiempo, las fuerzas de erosión del agua y viento modificaron la apariencia de la tierra, igual que los impactos de los asteroides y su resultado.

Dichos cambios en la tierra, el océano y la atmósfera influyeron en la evolución de los seres vivos. Imagina los primeros seres vivos, en aguas tibias y poco profundas a lo largo de los continentes. Las playas desaparecían a medida que los continentes chocaban entre sí, provocando la extinción de muchos linajes. No obstante, a medida que los antiguos hábitats desaparecían, otros nuevos se iniciaban para los sobrevivientes, y de este modo la evolución se realizó en nuevas direcciones.

La capa limitante K-T consta de un barro poco común que se formó hace 65 millones de años a nivel mundial (*derecha*). Este barro es rico en iridio, elemento escaso en la superficie terrestre, pero común en los asteroides. Tras encontrar el iridio, los investigadores buscaron evidencia de un asteroide suficientemente grande para cubrir toda la Tierra con sus residuos, y encontraron un cráter de aproximadamente 65 millones de antigüedad enterrado bajo sedimentos cerca de la costa de la Península de Yucatán en México. Aunque es tan grande (273.6 km de ancho por 1 km de hondo) nadie lo había notado antes. Este cráter es evidencia del impacto de un asteroide 40 millones de veces más poderoso que el que formó el cráter Barringer; en verdad lo suficientemente grande para influir sobre la vida de la



¿Por qué opción votarías?

Muchas teorías e hipótesis sobre eventos del pasado antiguo necesariamente se basan en huellas dejadas por dichos eventos, no en datos obtenidos mediante observación directa. ¿Será suficiente la evidencia indirecta alguna vez para comprobar alguna teoría acerca de un evento del pasado? Ve más detalles en CengageNOW y después vota en línea.

Tierra en forma importante. Las investigaciones de ese entonces estimaron que el tamaño del asteroide que efectuó tal impacto tenía entre 10 y 20 kilómetros (6 y 12.5 millas) de diámetro.

Resumen

Sección 17.1 En el siglo XIX, los **naturalistas** realizaron expediciones e investigaciones a nivel mundial efectuando observaciones cada vez más detalladas del mundo natural. Los **fósiles** son evidencia de la vida en el pasado distante. Los estudios de **biogeografía** y **morfología comparada** condujeron a nuevas formas de pensar acerca del mundo natural.

Sección 17.2 Los sistemas de creencias predominantes pueden influir en la interpretación de la causa subyacente a un evento natural. Los naturalistas del siglo XIX intentaron reconciliar sus creencias tradicionales con la evidencia física de la **evolución**. En esa época surgieron dos teorías: la del **catastrofismo** y la de la **uniformitarismo**.

■ Lee el artículo de InfoTrac "Encasillando un papel secundario" ("Typecasting a Bit Part"), Stephen J. Gould, *The Sciences*, marzo del 2000.

Secciones 17.3, 17.4 Las observaciones del naturalista Alfred Wallace y Charles Darwin condujeron a una teoría acerca de la evolución de las especies. Éstos son los principales postulados de la teoría:

Una población tiende a crecer hasta que comienza a agotar los recursos del entorno. Los individuos deben competir entonces por los alimentos, guaridas contra los depredadores y otros factores similares.

Los individuos que presentan caracteres que los hacen más competitivos tienden a producir más descendientes.

Los **rasgos adaptativos (adaptaciones)** que imparten mayor **aptitud** al individuo se hacen más comunes en una población con el transcurso de generaciones, en comparación con los estados de carácter que las hacen menos competitivas.

La supervivencia y reproducción diferencial de individuos de una población que varían en sus estados de caracteres compartidos se llama **selección natural**. Es uno de los procesos que impulsa la evolución.

■ Lee el artículo de InfoTrac "Lo que los pinzones de Darwin pueden enseñarnos acerca del origen evolutivo y la regulación de la biodiversidad" (*What Darwin's Finches Can Teach Us About the Evolutionary Origin and Regulation of Biodiversity*). B. Rosemary Grant y Peter Grant, *Bioscience*, marzo de 2003.

Sección 17.5 Se encuentran muchos fósiles en las capas de rocas sedimentarias apiladas. Los fósiles más jóvenes suelen estar en capas depositadas más recientemente y por encima de los fósiles más antiguos que están en capas más antiguas. Algunos **linajes** están representados como series de fósiles en capas secuenciales. Los fósiles son relativamente escasos, de

modo que es posible que el registro fósil siempre esté incompleto. Aun así, nos revela mucho acerca de la vida del pasado antiguo.

■ Usa las animaciones de CengageNOW para aprender más acerca de la formación de fósiles.

Sección 17.6 La **vida media** característica de un radioisótopo nos permite determinar la antigüedad de rocas y fósiles mediante la técnica llamada **datación radiométrica**.

■ Usa la interacción animada de CengageNOW para aprender más acerca de la vida media.

Sección 17.7 Las brechas en el registro de fósiles a menudo se llenan con el descubrimiento de otros nuevos. Estos últimos agregan detalles a nuestra comprensión de la historia evolutiva.

Sección 17.8 Las transiciones en el registro de fósiles constituyen límites para grandes intervalos en la **escala de tiempo geológico**. Dicha escala se correlaciona con eventos evolutivos e incluye fechas obtenidas por métodos de datación radiométrica.

■ Usa la interacción animada de CengageNOW para investigar la escala de tiempo geológico.

Sección 17.9 El descubrimiento de la distribución global de masas de tierra y fósiles, rocas magnéticas y el fondo del océano que se forma a partir de rebordes de cordilleras en medio del océano, condujo a la teoría de **tectónica de placas**. Según ésta, los movimientos de las placas tectónicas en la Tierra arrastran las masas continentales a nuevas posiciones. En varias ocasiones en el curso de la historia de la Tierra, todas las masas terrestres han convergido formando supercontinentes. Por ejemplo, **Gondwana** y **Pangea**. Este tipo de movimientos ha ejercido impacto profundo sobre la evolución.

■ Usa la interacción de CengageNOW para aprender más acerca de los continentes en movimiento.

Autoevaluación Respuestas en el apéndice III

1. Los biogeógrafos estudian _____
 - a. el desplazamiento continental
 - b. los patrones de distribución mundial de especies
 - c. la biodiversidad en los continentes e islas
 - d. tanto b como c son correctos
 - e. todos son correctos

Ejercicio de análisis de datos

A fines de la década de 1970, el geólogo Walter Álvarez investigaba la composición de una capa de barro de 1 cm (0.4 pulgadas) de grueso que marca el límite K-T a nivel mundial. Pidió a su padre, el físico ganador del premio Nobel Luis Álvarez, que lo ayudara a analizar la composición elemental de esa capa. Los Álvarez y sus colaboradores, los químicos Frank Asaro y Helen Michel, examinaron la capa en Italia y Dinamarca y descubrieron que la capa limitante K-T tenía un contenido más alto de iridio que las capas de roca circundantes (figura 17.18).

El iridio pertenece a un grupo de elementos (apéndice IV) mucho más abundantes en los asteroides y en otros materiales del sistema solar que en la corteza de la Tierra. El grupo de Álvarez concluyó que la capa limitante K-T debe haberse originado a partir de material extraterrestre. Calculó que un asteroide de 14 km (8.7 millas) de diámetro contendría suficiente iridio para explicar el nivel de este elemento en la capa limitante K-T.

- ¿Cuál fue el contenido de iridio en la capa limitante K-T?
- ¿Por qué cantidad fue más alto el contenido de iridio de la capa limitante que el de la muestra que se tomó a 0.7 m (2.3 pulgadas) por encima de la capa?

Profundidad de muestreo	Abundancia promedio de iridio (ppb)
+ 2.7 m	< 0.3
+ 1.2 m	< 0.3
+ 0.7 m	0.36
capa limitante	41.6
- 0.5 m	0.25
- 5.4 m	0.30

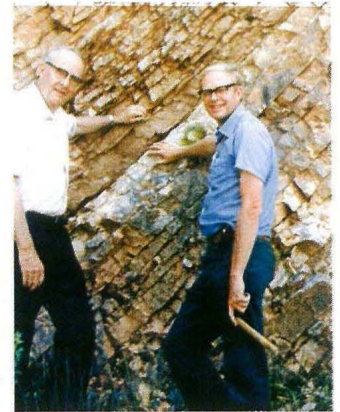


Figura 17.18 Abundancia de iridio en y cerca de la capa limitante K-T en Stevns Klint, Dinamarca. Muchas muestras de roca tomadas por encima o por debajo y en la capa limitante fueron probadas para determinar su contenido de iridio. Las profundidades se indican en metros por encima o por debajo de la capa limitante.

El contenido de iridio de una roca terrestre promedio es de 0.4 partes por mil millones (ppb) de iridio. Un meteorito promedio contiene alrededor de 550 ppb de iridio. En la foto (arriba a la derecha): Luis y Walter Álvarez frente a un corte de la capa de iridio.

- Los huesos del ala de un pájaro son similares a los huesos del ala de un murciélago. Esta observación es un ejemplo de _____.

- uniformitarismo
- evolución
- morfología comparada
- un linaje

- La cantidad de especies que habitan en una isla depende del tamaño de la misma y de su distancia del continente. Es muy probable que esta afirmación sea realizada por _____.

- un explorador
- un biogeógrafo
- un geólogo
- un filósofo

- La evolución es _____.

- selección natural
- cambio hereditario en un linaje de descendencia
- impulsada por la sección natural
- b y c son correctas

- Si la vida media de un radioisótopo es de 20,000 años, entonces una muestra donde las tres cuartas partes de ese radioisótopo se haya desintegrado tendrá _____ años de antigüedad.

- 15,000
- 26,667
- 30,000
- 40,000

- _____ ha(n) influenciado al registro fósil.

- La sedimentación y la compactación
- Los movimientos de la tectónica de placas
- El decaimiento radiactivo
- Todos los anteriores

- La evidencia sugiere que la vida se originó en _____.

- el Arqueano
- el Proterozoico
- el Fanerozoico
- el Cámbrico

- El Cretácico terminó hace _____ millones de años.

- Las fuerzas del cambio geológico incluyen _____ (elige todas las opciones correctas).

- la erosión
- la fosilización
- los volcanes
- la evolución
- los movimientos de la tectónica de placas
- los cambios climáticos
- los impactos de asteroides
- los puntos calientes

- ¿Se formó primero Pangea o Gondwana?

- Correlaciona los términos de la columna de la izquierda con su descripción más adecuada.

- | | |
|-------------------------|--|
| _____ aptitud | a. se mide por el éxito reproductivo |
| _____ fósiles | b. los cambios geológicos se traducen de manera continua |
| _____ selección natural | c. los cambios geológicos ocurren por repentinos eventos mayores |
| _____ vida media | d. es buena para encontrar fósiles |
| _____ catastrofismo | e. supervivencia del más apto |
| _____ uniformitarismo | f. característica de un radioisótopo |
| _____ roca sedimentaria | g. evidencia de vida en el pasado distante |

□ Visita CengageNOW para preguntas adicionales.

Pensamiento crítico

- Si consideramos que los márgenes de tiempo geológico son minutos, la historia de los seres vivos podría indicarse sobre una carátula de reloj, como la que se muestra a la derecha. Según este reloj, la época más reciente se inició después del último décimo de segundo antes del mediodía. ¿Dónde te encontrarías tú en esta carátula?

