

mueve, o si cambia la posición del polo magnético, el magnetismo de la roca conservará, en la mayoría de los casos, su alineamiento original. Las rocas que se formaron hace miles o millones de años y que "registraron" la localización de los polos magnéticos en el momento de su formación se dice que poseen magnetismo fósil o **paleomagnetismo**.

Otro aspecto importante del magnetismo de las rocas es que los minerales magnetizados no sólo señalan la dirección hacia los polos (como una brújula), sino que también proporcionan un medio para determinar la latitud de su origen. Para comprender cómo puede establecerse la latitud a partir del paleomagnetismo, imagine una aguja de brújula montada en un plano vertical, en vez de en posición horizontal como en las brújulas ordinarias. Como se muestra en la Figura 19.8, cuando esta brújula modificada (*aguja de inclinación*) se sitúa sobre el polo magnético norte, se alinea con las líneas de fuerza magnéticas y apunta hacia abajo. Sin embargo, a medida que esta aguja de inclinación se aproxima al Ecuador, el ángulo de inclinación se reduce hasta que la aguja queda horizontal al alinearse paralela con las líneas de fuerza

horizontales en el Ecuador. Por tanto, a partir del ángulo de inclinación de esta aguja, puede determinarse la latitud. De una manera similar, la orientación del paleomagnetismo en las rocas indica la latitud de la roca cuando se magnetizó.

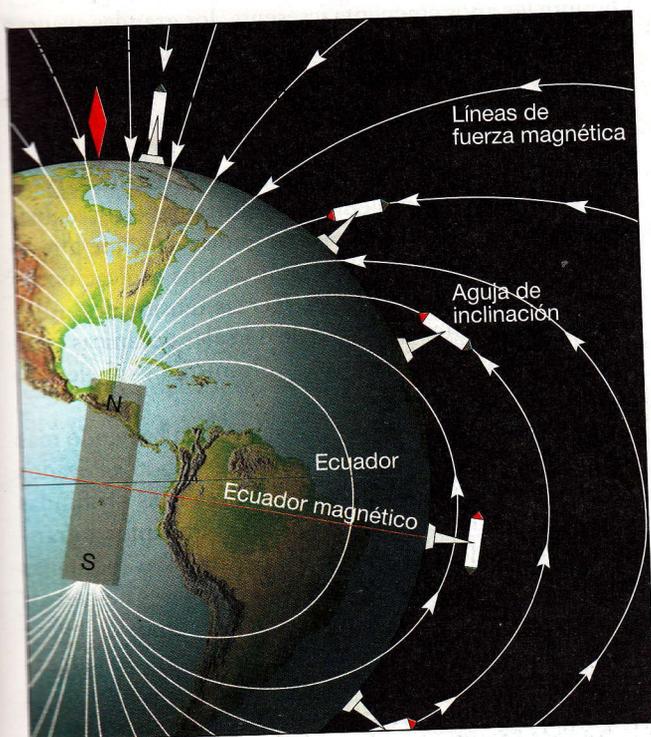
### Deriva polar

Un estudio llevado a cabo en Europa por S. K. Runcorn y su equipo durante los años cincuenta llevó a un descubrimiento inesperado. Se observó que el alineamiento magnético en los minerales ricos en hierro de las coladas de lava de diferentes épocas variaba mucho. Una representación de la posición aparente del polo norte magnético reveló que, durante los últimos 500 millones de años, la posición del polo había migrado de manera gradual desde una posición próxima a Hawaii, hacia el norte a través de Siberia oriental y, por fin, a su localización actual (Figura 19.9). Ésta era una prueba sólida a favor de que o bien los polos magnéticos se han desplazado a lo largo del tiempo, una idea conocida como *deriva polar*, o bien que las coladas de lava se movían: en otras palabras, los continentes se habían desplazado.

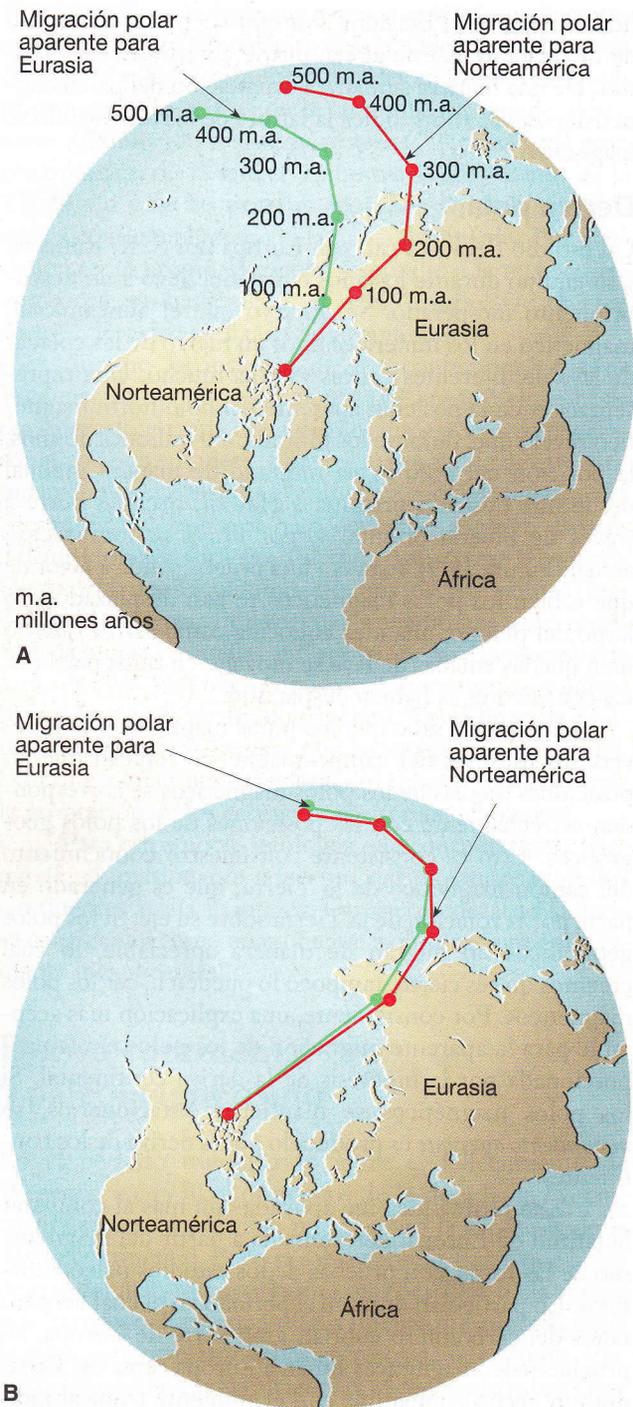
Aunque se sabe que los polos magnéticos se mueven, los estudios del campo magnético indican que las posiciones medias de los polos magnéticos se corresponden estrechamente con las posiciones de los polos geográficos. Esto es consistente con nuestro conocimiento del campo magnético de la Tierra, que es generado en parte por la rotación de la Tierra sobre su eje. Si los polos geográficos no migran de manera apreciable, lo cual creemos que es cierto, tampoco lo pueden hacer los polos magnéticos. Por consiguiente, una explicación más aceptable para la aparente migración de los polos era la proporcionada por la hipótesis de la deriva continental. Si los polos magnéticos se mantienen estacionarios, su *movimiento aparente* es producido por la deriva de los continentes.

Esta última idea fue apoyada aún más al comparar la latitud de Europa, determinada a partir del magnetismo de las rocas, con pruebas de los estudios paleoclimáticos. En particular, durante el periodo en el cual los pantanos del carbonífero cubrían gran parte de Europa, las pruebas paleomagnéticas sitúan a Europa cerca del Ecuador, un hecho compatible con el ambiente tropical indicado por esos depósitos de carbón.

Unos pocos años antes se obtuvo otra prueba a favor de la deriva continental cuando se representó una curva con las migraciones de los polos que se han producido en Norteamérica y Europa (Figura 19.9A). Para sorpresa de casi todos, las curvas norteamericana y europea tenían trayectorias similares, excepto en que estaban separadas por unos 24 grados de longitud. ¿Es posible que, cuando se solidificaron esas rocas, hubiera dos polos



**Figura 19.8** El campo magnético de la Tierra hace que una aguja de inclinación (brújula orientada en un plano vertical) se alinee con las líneas de fuerza magnética. El ángulo de inclinación disminuye de manera uniforme desde 90 grados en los polos magnéticos hasta 0 grados en el ecuador magnético. Por consiguiente, puede determinarse la distancia a los polos magnéticos desde el ángulo de inclinación.



**Figura 19.9** 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 siguiendo una trayectoria de unos 24 grados con respecto a Eurasia. B. Las dos trayectorias cuando se reúnen las masas de tierra.

nortes magnéticos que migraron paralelos uno con respecto al otro? Esto es muy improbable. Sin embargo, las diferencias en esas trayectorias de deriva, pueden reconciliarse si se colocan los dos continentes que en la actualidad están separados uno al lado del otro, como ahora creemos que se encontraron antes de que se abriera el océano Atlántico (Figura 19.9B). Al hacer eso, las dos curvas de migración polar casi se solaparon entre sí.

Aunque estos nuevos datos reavivaron el interés por la deriva continental, no produjeron en modo alguno un cambio importante de opinión. Por una razón, las técnicas utilizadas para obtener los datos paleomagnéticos eran relativamente nuevas y poco comprobadas. Además, el magnetismo de las rocas tiende a debilitarse con el tiempo. Pese a esos problemas y a otras pruebas conflictivas, algunos investigadores estaban convencidos de que la deriva continental había ocurrido realmente. Había empezado una nueva era.

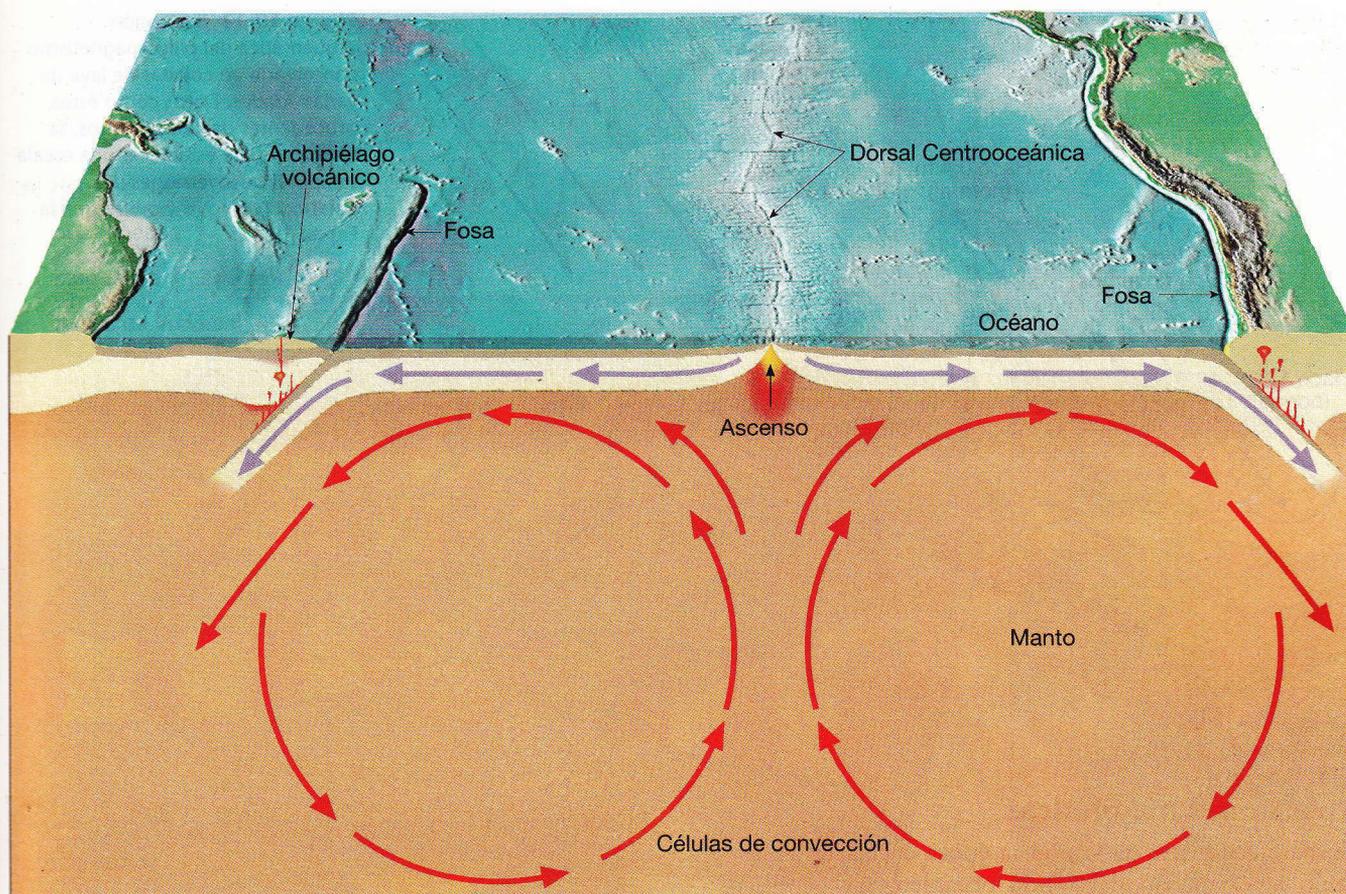
### Comienzo de una revolución científica

Durante los años cincuenta y sesenta, los grandes avances tecnológicos permitieron cartografiar ampliamente el suelo oceánico. De estos estudios llegaría el descubrimiento del sistema global de dorsales oceánicas. Además, se observó que la dorsal Centroatlántica era paralela a los márgenes continentales a ambos lados del Atlántico (véase Figura 18.9). También fue importante el descubrimiento de un valle de rift central que se extiende a todo lo largo de la dorsal Centroatlántica, una indicación de que estaban actuando grandes fuerzas tensionales. Además, se observó que el sistema de dorsales oceánicas estaba caracterizado por un intenso volcanismo y un elevado flujo térmico.

En otras partes del océano se estaban haciendo más descubrimientos. Los estudios sobre terremotos llevados a cabo en la proximidad de las fosas oceánicas profundas demostraron que se producía actividad tectónica a grandes profundidades por debajo del océano. Las montañas submarinas de cima plana, situadas centenares de metros por debajo del nivel del mar, mostraban signos de haber sido previamente islas que de alguna manera se sumergieron. Igual de importantes fueron los dragados de la corteza oceánica que dieron rocas cuya antigüedad no era superior a 160 millones de años. ¿Puede ser el suelo oceánico realmente una característica geológica muy joven?

### Expansión del fondo oceánico

A principios de los años sesenta, Harry Hess, de la Universidad de Princeton, reunió estos hechos recién descu-



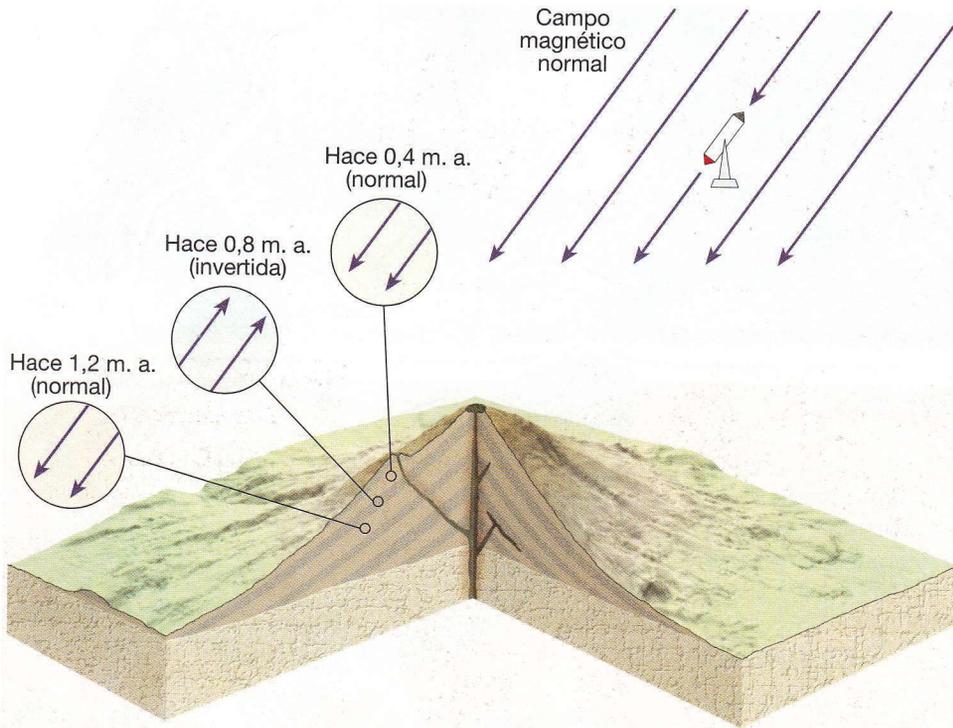
**Figura 19.10** Expansión del fondo oceánico. Harry Hess propuso que la ascensión del material del manto a lo largo del sistema de dorsales centrooceánicas creaba nuevos fondos oceánicos. El movimiento de convección del material del manto transporta el fondo oceánico de una manera parecida a como se mueve una cinta transportadora hasta las fosas submarinas, donde el fondo oceánico desciende al manto.

biertos en una hipótesis que más tarde se denominaría **expansión del fondo oceánico**. Hess, que era un hombre modesto, presentó su artículo como un “ensayo en geopoesía.” A diferencia de su precursora, la deriva continental, que, esencialmente, despreciaba las cuencas oceánicas, la expansión del fondo oceánico se centraba en la actividad que había más allá de nuestra visión directa.

En el artículo, ahora clásico, de Hess, proponía que las dorsales oceánicas estaban localizadas sobre zonas de ascenso en el manto (Figura 19.10). A medida que el material que asciende desde el manto se expande lateralmente, el suelo oceánico es transportado 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 suelo oceánico se aleja de la cresta de la dorsal, va siendo sustituido por corteza recién formada. Hess propuso, además,

que las fosas oceánicas profundas, como la fosa Perú-Chile, son lugares donde la corteza oceánica vuelve hacia el interior del planeta. Según él, en esos lugares las porciones antiguas del suelo oceánico se van consumiendo de manera gradual a medida que descienden hacia el manto. Como resumió un investigador, “no sorprende que el suelo oceánico sea joven, está siendo renovado constantemente!”

Con el establecimiento de la hipótesis de la expansión del fondo oceánico, Harry Hess había iniciado otra fase de esta revolución científica. Las pruebas concluyentes que apoyaron esta idea procedieron, unos pocos años después, del trabajo del joven estudiante inglés, Fred Vine, y su supervisor, D. H. Matthews. La grandeza del trabajo de Vine y de Matthews radicaba en que fueron capaces de conectar dos ideas que antes se pensaba que no estaban relacionadas: la hipótesis de la expansión del fondo oceánico y las inversiones magnéticas recién descubiertas.

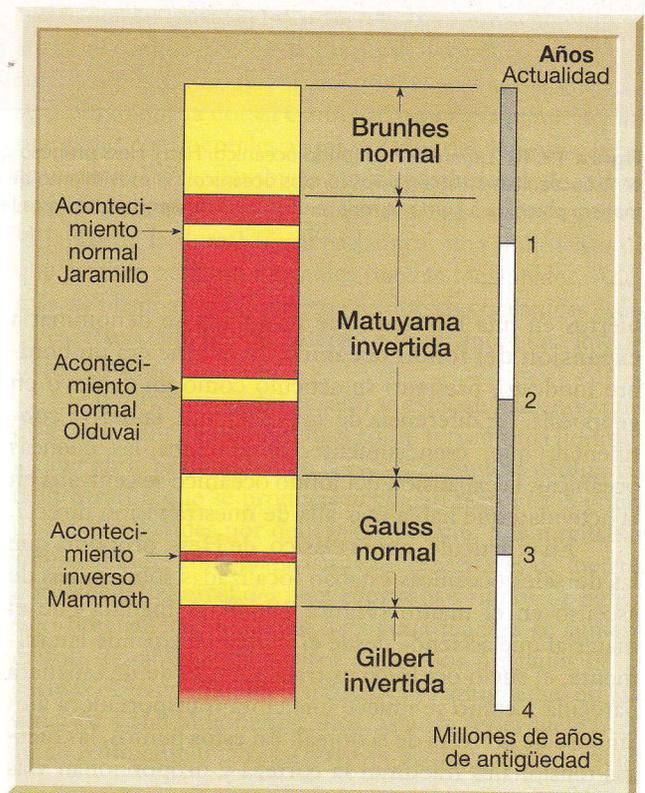


**Figura 19.11** Ilustración esquemática del paleomagnetismo conservado en coladas de lava de varias edades. Datos como estos, procedentes de varios puntos, se utilizaron para establecer una escala temporal de inversiones de polaridad como la mostrada en la Figura 19.12.

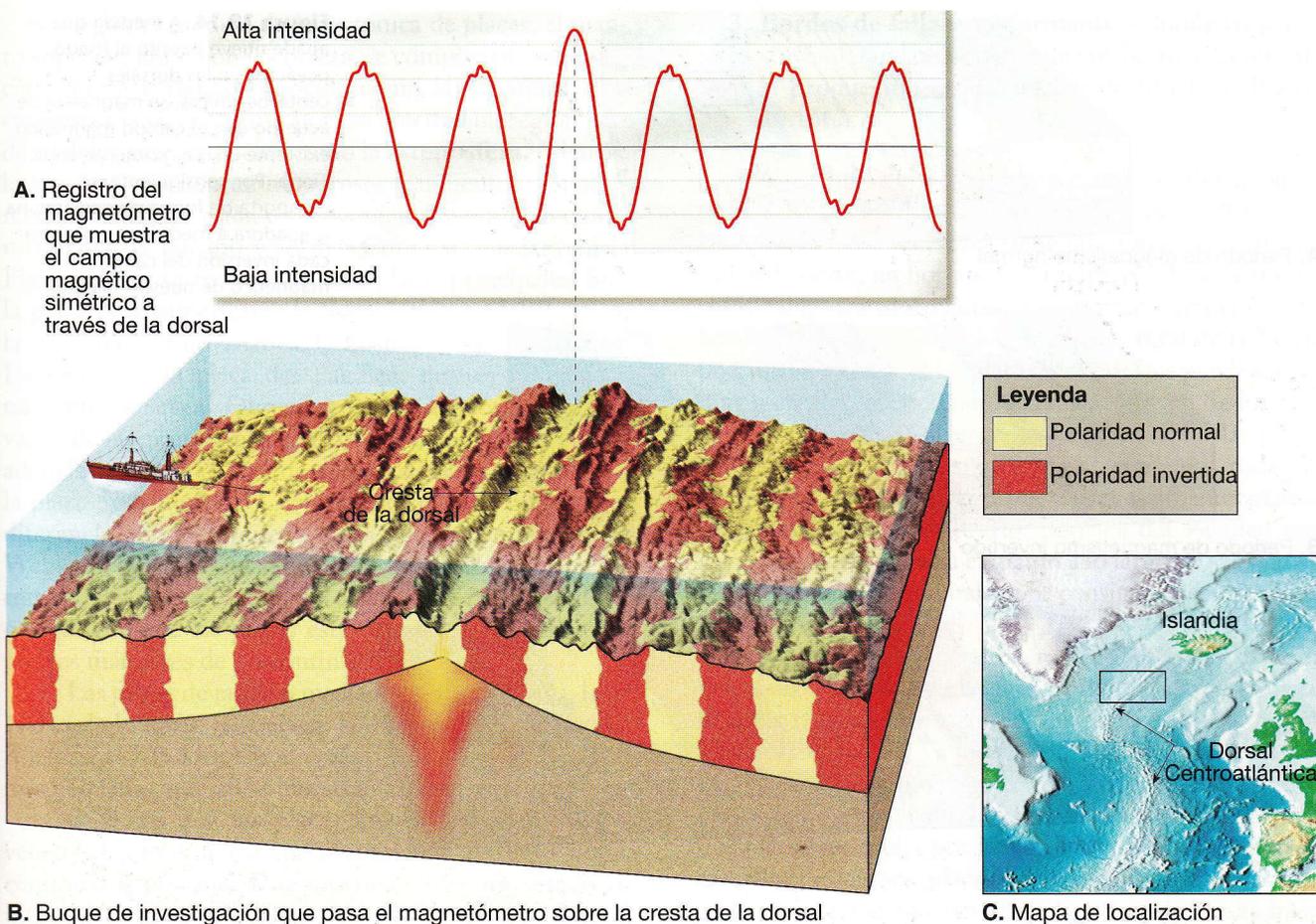
### Inversiones magnéticas

Aproximadamente en la misma época en que Hess formuló la expansión del fondo oceánico, los geofísicos habían empezado a aceptar el hecho de que el campo magnético de la Tierra cambia periódicamente de polaridad, es decir, el polo magnético norte se convierte en el polo magnético sur, y viceversa. Una roca que se solidifica durante uno de los periodos de polaridad inversa se magnetizará con la polaridad opuesta a la de las rocas que 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**.

Las evidencias de las inversiones magnéticas se obtuvieron a partir de lavas y sedimentos de todo el mundo. Una vez confirmado el concepto de las inversiones magnéticas, los investigadores empezaron a establecer una escala temporal para las inversiones de polaridad. Hay muchas áreas donde se ha producido esporádicamente actividad volcánica durante periodos de varios millones de años. La tarea consistía en medir la polaridad magnética en numerosas coladas de lava de diversas edades (Figura 19.11). Estos datos, que se recogieron por todo el planeta, se utilizaron para determinar las fechas de cambio de la polaridad del campo magnético terrestre. En la Figura 19.12 se muestra la escala temporal de inversiones de polaridad establecida para los últimos millones de años.



**Figura 19.12** 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).



**Figura 19.13** El fondo oceánico como una cinta registradora magnética. **A.** Representación esquemática de las intensidades magnéticas registradas cuando se hace atravesar un magnetómetro sobre un segmento de la dorsal Centroatlántica. **B.** 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 los basaltos oceánicos de magnetismo normal potencian el campo magnético actual. 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 actual.

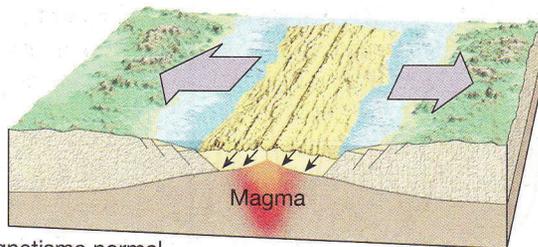
Se descubrió una relación muy significativa entre las inversiones magnéticas y la hipótesis de la expansión del fondo oceánico. Los investigadores descubrieron franjas alternas de magnetismo de alta y baja intensidad que discurrían aproximadamente paralelas a las crestas de las dorsales. Esto se consiguió utilizando instrumentos muy sensibles denominados **magnetómetros**, que fueron remolcados por barcos de investigación a través de zonas del suelo oceánico como se muestra en la Figura 19.13.

Este modelo relativamente simple de variación magnética desafió cualquier explicación hasta 1963, cuando Fred Vine y D. H. Matthews relacionaron el descubrimiento de las bandas de alta y baja intensidad con el concepto de Hess de expansión del suelo oceánico\*. Vine

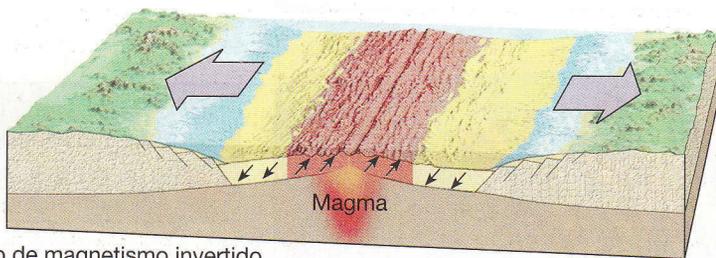
y Matthews sugirieron que las franjas de magnetismo de alta intensidad son regiones donde el paleomagnetismo de la corteza oceánica tiene polaridad normal. Por consiguiente, esas rocas *potencian* (refuerzan) el campo magnético actual. A la inversa, las franjas de baja intensidad son regiones donde la corteza oceánica está polarizada en la dirección inversa y, por consiguiente, *debilita* el campo magnético actual. Pero, ¿cómo llegan a formarse en el suelo oceánico las franjas paralelas de roca con magnetización normal e invertida?

Vine y Matthews razonaron que, conforme el magma intruye y se solidifica a lo largo de las dorsales, sus componentes magnéticos adoptan la polaridad del campo magnético existente. Durante los últimos 700.000 años, se formó corteza magnetizada normalmente a lo largo del sistema global de dorsales. Sin embargo, como se muestra en la Figura 19.12, la corteza oceánica que se

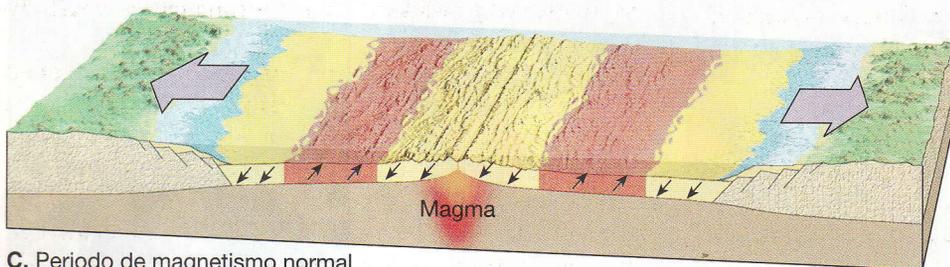
\*Esta idea fue avanzada también unos pocos meses antes por L. W. Morely, pero su artículo fue rechazado para publicación por su naturaleza altamente especulativa.



A. Periodo de magnetismo normal



B. Periodo de magnetismo invertido



C. Periodo de magnetismo normal

**Figura 19.14** A medida que se añade nuevo basalto al fondo oceánico en las dorsales centrooceánicas, se magnetiza de acuerdo con el campo magnético existente en ese momento 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.

formó hace 1,5 millones de años muestra polaridad invertida. A medida que se van añadiendo nuevas rocas en cantidades iguales en los dos bordes del suelo oceánico en expansión, cabe esperar que el modelo de franjas (tamaño y polaridad) existente en un lado de la dorsal oceánica fuera una imagen especular del otro lado (Figura 19.14). El descubrimiento de franjas alternantes de polaridad normal e invertida fue la prueba más sólida presentada hasta el momento en apoyo del concepto de la expansión del fondo oceánico.

Una vez establecidas las fechas de las inversiones magnéticas más recientes, pudo determinarse con precisión la velocidad a la cual se produce la expansión en las diversas dorsales. En el océano Pacífico, por ejemplo, las franjas magnéticas son mucho más anchas que las del océano Atlántico para intervalos temporales comparables. Podemos concluir que existe una mayor velocidad de expansión en el centro del Pacífico, en comparación con la del Atlántico.

Hay un acuerdo general en que el paleomagnetismo dio lugar al conjunto de pruebas más convincentes para apoyar los conceptos de deriva continental y expansión del fondo oceánico. En 1968, los geólogos empeza-

ron a modificar su posición sobre esta cuestión de una manera que no difiere mucho de una inversión magnética. La marea de la opinión científica ha cambiado, de hecho, a favor de una Tierra móvil.



### Tectónica de placas: una versión moderna de una idea antigua

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**. La tectónica de placas puede definirse como una teoría compuesta por una variedad de ideas que explican el movimiento observado de la litosfera terrestre por medio de los mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico, que, a su vez, generan los principales rasgos geológicos de la Tierra, entre ellos los continentes y las cuencas oceánicas. Las implicaciones de la tectónica de placas son de tanto alcance que esta teoría se ha convertido en la base sobre la que se consideran la mayoría de los procesos geológicos.

Según el modelo de la tectónica de placas, el manto superior, junto con la corteza, se comportan como una capa fuerte y rígida, conocida como la **litosfera**. Esta capa externa se encuentra por encima de una región más débil del manto, conocida como la **astenosfera**. Además, la litosfera está rota en numerosos fragmentos, denominados **placas** que están en movimiento y cambian continuamente de tamaño y forma. Como se muestra en la Figura 19.15, se reconocen siete placas principales. Son la placa Norteamericana, la Sudamericana, del Pacífico, la Africana, la Euroasiática, la Australiana y la Antártica. La mayor es la placa del Pacífico, que es fundamentalmente oceánica. Obsérvese, en la Figura 19.15, que varias de las grandes placas abarcan un continente entero además de una gran área de suelo oceánico (por ejemplo, la placa Sudamericana). Esto constituye una importante diferencia con la hipótesis de la deriva continental de Wegener, quien propuso que los continentes se movían a través del suelo oceánico, no con él. Obsérvese también que ninguna de las placas está definida completamente por los márgenes de un continente.

Las placas de tamaño mediano son la Caribeña, la de Nazca, la Filipina, la Arábiga, la de Cocos y la de Scotia. Además, se han identificado más de una docena de placas más pequeñas, que no se muestran en la Figura 19.15.

Sabemos que las placas litosféricas se mueven a velocidades muy lentas, pero continuas, de unos pocos centímetros por año. Este movimiento es impulsado en último extremo por la distribución desigual del calor en el interior de la Tierra. Los titánicos roces entre las placas litosféricas de la Tierra generan terremotos, crean volcanes y deforman grandes masas de roca en las montañas.

### Bordes de placa

Las placas se mueven como unidades coherentes en relación con las otras placas. Aunque el interior de las placas puede deformarse, las principales interacciones entre las placas individuales (y, por consiguiente, la mayor deformación) se produce a lo largo de sus *bordes*. De hecho, los primeros intentos para delinear los bordes de placa se hicieron utilizando las localizaciones de los terremotos. Más tarde, la investigación demostró que 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 Figura 19.16 y se describen brevemente a continuación:

1. **Bordes divergentes** – donde las placas se separan, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo oceánico (Figura 9.16A).
2. **Bordes convergentes** – donde las placas se juntan, lo que provoca la subducción (consumo) de litosfera oceánica en el manto (Figura 19.16B).

3. **Bordes de falla transformante** – donde las placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción o destrucción de litosfera (Figura 19.16C).

Cada placa está rodeada por una combinación de estas zonas, como puede verse en la Figura 19.15. Por ejemplo, la placa de Nazca tiene una zona divergente en su borde oeste, un borde convergente en el este y numerosas fallas transformantes, que cortan segmentos del borde divergente. Aunque la superficie total de la Tierra no cambia, el área de las placas individuales puede disminuir o crecer dependiendo de la distribución de los bordes convergentes y divergentes. Por ejemplo, las placas Antártica y Africana están casi por completo rodeadas por centros de expansión y, por tanto, están aumentando de tamaño. Por el contrario, la placa del Pacífico está siendo consumida hacia el manto a lo largo de sus flancos septentrional y occidental y, por consiguiente, su tamaño se está reduciendo.

Además, pueden crearse nuevos bordes de placa en respuesta a cambios en las fuerzas que actúan sobre estas láminas rígidas. Por ejemplo, en África, en una región conocida como los Valles de Rift del África oriental, se localiza un borde divergente relativamente nuevo. Si la expansión continúa allí, la placa Africana se escindirá en dos placas separadas por una nueva cuenca oceánica. En otras localizaciones, placas que transportan corteza continental se están moviendo en la actualidad unas hacia otras. Por fin, esos continentes quizá colisionen y se junten. Por tanto, el borde que una vez separó dos placas desaparecerá cuando las placas se conviertan en una. El resultado de una colisión continental de este tipo es una majestuosa cordillera montañosa como la del Himalaya.

En las siguientes secciones resumiremos brevemente la naturaleza de los tres tipos de bordes de placa.



### Bordes divergentes

La mayoría de los bordes divergentes donde se produce la expansión de las placas, se sitúa a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas (Figura 19.17). Allí, a medida que las placas se separan del eje de la dorsal, las fracturas creadas se llenan inmediatamente con roca fundida que asciende desde la astenosfera caliente situada debajo. Este material caliente se enfría generando una roca dura, produciendo así nuevos fragmentos de fondo oceánico. De una manera continua, la expansión de las placas y la ascensión del magma añaden nueva corteza oceánica (litosfera) entre las placas divergentes.

Como se indicó antes, este mecanismo ha creado el fondo del océano Atlántico durante los últimos 160