

Desiertos y vientos

Distribución y causas de las regiones secas

- Desiertos de latitudes bajas
- Desiertos de latitudes medias

Procesos geológicos en climas áridos

- Meteorización
- Papel del agua

«Basin and Range»: la evolución de un paisaje desértico

Transporte de sedimentos por el viento

- Carga de fondo
- Carga en suspensión

Erosión eólica

- Deflación, depresiones de deflación y pavimento desértico
- Ventifactos y yardangs

Depósitos eólicos

- Depósitos de arena
- Tipos de dunas de arena
- Depósitos de loess (limo)

El clima tiene una gran influencia en la naturaleza y la intensidad de los procesos externos de la Tierra, lo que se demostró de manera clara en el capítulo anterior sobre los glaciares. Otro ejemplo excelente de la estrecha relación entre el clima y la geología se ve al examinar el desarrollo de los paisajes áridos. La palabra desierto significa literalmente desocupado. Para muchas regiones secas, ésta es una descripción muy apropiada, aunque, en las regiones de los desiertos en las que se dispone de agua, las plantas y los animales medran. No obstante, las regiones secas del mundo son probablemente las áreas menos familiares de la Tierra, con excepción del ámbito polar.

Los paisajes desérticos aparecen frecuentemente desolados. Sus perfiles no están suavizados por una alfombra de suelo y abundante vida vegetal. En cambio, son frecuentes los afloramientos rocosos desnudos con pendientes empinadas y angulosas. En algunos lugares, las rocas tienen un tinte naranja y rojo. En otros son grises y marrones, con bandas negras. Para muchos visitantes, el paisaje desértico exhibe una belleza impresionante; para otros, el terreno parece sombrío. Con independencia del sentimiento que provoquen, está claro que los desiertos son muy diferentes de los lugares más húmedos donde vive la mayoría de la gente.

Como veremos, las regiones áridas no están dominadas por un solo proceso geológico. Antes bien, se ponen de manifiesto los efectos de las fuerzas tectónicas, las corrientes de agua y el viento. Dado que estos procesos se combinan de formas diferentes de un lugar a otro, el aspecto de los paisajes desérticos varía también mucho.

Distribución y causas de las regiones secas

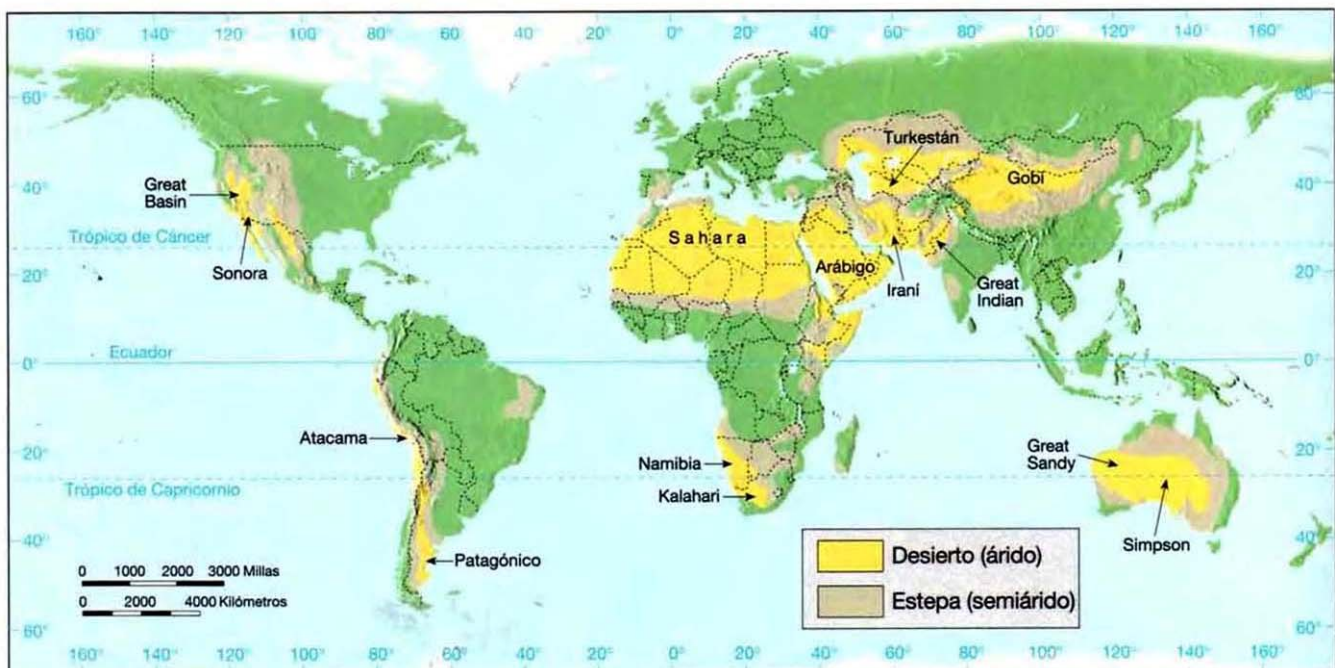


Desiertos y vientos ▼ Distribución y causas de las regiones secas

Las regiones secas del mundo abarcan alrededor de 42 millones de kilómetros cuadrados, un sorprendente 30 por ciento de la superficie terrestre. Ningún otro grupo climático ocupa un área de tierra tan grande. Dentro de estas regiones con déficit de agua, se reconocen normalmente dos tipos climáticos: el **desierto**, o árido, y la **estepa**, o semiárido. Los dos comparten muchas características. Sus diferencias son fundamentalmente una cuestión de grado (véase Recuadro 19.1). La estepa es una variante marginal y más húmeda del desierto y es una zona de transición que rodea el desierto y lo separa de los climas húmedos que lo bordean. El mapa mundial que muestra la distribución de las regiones desérticas y de estepa revela que las tierras secas están concentradas en los subtrópicos y en las latitudes medias (Figura 19.1).

Desiertos de latitudes bajas

El corazón de los climas secos de latitudes bajas se encuentra en las proximidades de los trópicos de Cáncer y de Capricornio. En la Figura 19.1 se muestra un ambiente



▲ **Figura 19.1** Los climas áridos y semiáridos abarcan alrededor del 30 por ciento de la superficie terrestre. Ningún otro grupo climático se extiende en un área tan grande.



Recuadro 19.1 ► Entender la Tierra

¿Qué se entiende por «seco»?

Albuquerque, Nuevo México, al suroeste de Estados Unidos, recibe una media de 20,7 centímetros de precipitación anual. Como cabe esperar, dado que la precipitación total de Albuquerque es modesta, el lugar se clasifica como desierto cuando se aplica la clasificación climática de Köppen, habitualmente utilizada. La ciudad rusa de Verkhoyansk es un lugar remoto situado cerca del círculo Ártico, en Siberia. La media del total de precipitación anual en este punto es de 15,5 centímetros, unos 5 centímetros menos que la de Albuquerque. Aunque Verkhoyansk recibe menos precipitación que Albuquerque, su clasificación es de clima húmedo. ¿Cómo puede ser?

Todos reconocemos que los desiertos son lugares secos, pero ¿qué se entiende exactamente por el término *seco*? Es decir, ¿qué cantidad de lluvia define el límite entre las regiones secas y las húmedas? A veces se define de manera arbitraria utilizando una sola cifra de precipitación, por ejemplo, 25 centímetros anuales de precipitación. Sin embargo, el concepto de sequedad es un concepto relativo que se refiere a cualquier situación en la que hay carencia de agua. Por tanto, los climatólogos definen el *clima seco* como un clima en el que la precipitación anual no es tan grande como la posible pérdida de agua a través de la evaporación. Por consiguiente, la sequedad no sólo está relacionada con los totales anuales de precipitación sino que también es una función de la evaporación, que a su vez depende en gran parte de la temperatura.

A medida que las temperaturas aumentan, también crece la posible evaporación. De 15 a 25 centímetros de precipitación pueden bastar para sustentar bosques de coníferas en el norte de Escandinavia o Siberia, donde la evaporación hacia el aire frío y húmedo es escasa y un excedente de agua permanece en el suelo. Sin embargo, la misma cantidad de precipitación sobre Nuevo México o Irán sustenta sólo una escasa cubierta vegetal, ya que la evaporación hacia el aire caliente y seco es grande. Por tanto, está claro que ninguna cantidad determinada de precipitación puede servir de límite universal para los climas secos.

Para establecer el límite entre climas secos y húmedos, el sistema de clasificación de Köppen, muy utilizado, emplea fórmulas en las que intervienen tres variables: precipitación anual media, temperatura anual media y distribución estacional de la precipitación. El uso de la temperatura anual media refleja su importancia como un índice de la evapora-

ción. La cantidad de precipitación que define el límite húmedo-seco será mayor cuando las temperaturas anuales medias sean elevadas, y menor cuando las temperaturas sean bajas. El uso de la distribución estacional de la precipitación también está relacionado con esta idea. Si la precipitación se concentra en los meses más cálidos, la pérdida de la evaporación es mayor que si la precipitación se concentra en los meses más fríos.

En la Tabla 19.A se resumen las cantidades de precipitación que dividen los climas secos y húmedos. Obsérvese que un lugar con una media anual de 20 °C y una precipitación máxima de 68 centímetros en verano se clasifica como seco. Si la precipitación se produce principalmente en invierno, sin embargo, el lugar sólo debe recibir 40 centímetros o más para ser considerada húmeda. Si la precipitación se distribuye de una manera más regular, la cifra que define el límite húmedo-seco se encuentra entre las dos anteriores.

Tabla 19.A Precipitación media anual que define el límite entre climas secos y húmedos

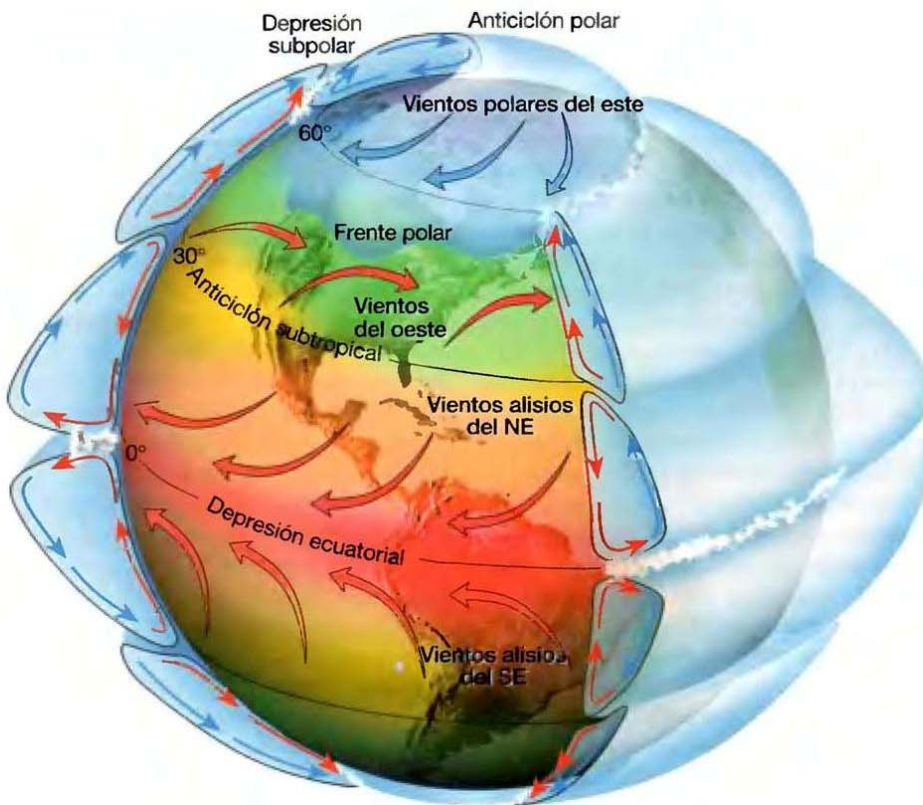
Precipitación media temperatura anual (°C)	Precipitación en invierno máximo (centímetros)	Distribución regular (centímetros)	Verano máximo (centímetros)
5	10	24	38
10	20	34	48
15	30	44	58
20	40	54	68
25	50	64	78
30	60	74	88

desértico prácticamente continuo que se extiende a lo largo de más de 9.300 kilómetros, desde la costa atlántica del norte de África a las regiones secas del noroeste de la India. Además de esta gran extensión, el hemisferio septentrional contiene otra área mucho más pequeña de desierto tropical y de estepa en el norte de México y en el suroeste de Estados Unidos.

En el hemisferio meridional, los climas secos dominan Australia. Casi el 40 por ciento del continente es un desierto, y mucho del resto, una estepa. Además, hay zo-

nas áridas y semiáridas en el sur de África y tienen una limitada aparición en las costas chilena y peruana.

¿Qué produce estas bandas de desierto de latitud baja? La respuesta es la distribución global de la presión del aire y de los vientos. El diagrama idealizado de la circulación general atmosférica de la Tierra de la Figura 19.2 ayuda a visualizar la relación. El aire calentado en el cinturón de presión conocido como *depresión ecuatorial* se eleva a grandes altitudes (normalmente entre 15 y 20 kilómetros) y luego se expande. A medida que el flujo de las



◀ **Figura 19.2** Diagrama idealizado de la circulación general atmosférica de la Tierra. Los desiertos y las estepas que están concentrados entre los 20° y los 30° de latitud norte y sur coinciden con los cinturones anticiclónicos subtropicales. Aquí, el descenso del aire seco inhibe la formación de nubes y la precipitación. Por el contrario, el cinturón de presiones conocido como depresión ecuatorial está asociado con áreas que se cuentan entre las más lluviosas de la Tierra.

capas superiores alcanza los 20°-30° de latitud, norte o sur, desciende hacia la superficie. El aire que se eleva por la atmósfera se expande y se enfría, un proceso que induce el desarrollo de nubes y precipitaciones. Por esta razón, las áreas que están bajo la influencia de la depresión ecuatorial se cuentan entre las más lluviosas de la Tierra. Ocurre exactamente lo contrario en las regiones próximas a los 30° de latitud norte y sur, donde predominan las altas presiones. Aquí, en las zonas conocidas como *anticiclones (altas presiones) subtropicales*, el aire se hunde. Cuando el aire se hunde, se comprime y se calienta. Estas condiciones son exactamente las opuestas a lo que se necesita para producir nubes y precipitación. Por consiguiente, esas regiones se conocen por sus cielos claros, su luz solar y la sequía progresiva.

Desiertos de latitudes medias

A diferencia de sus equivalentes de latitudes bajas, los desiertos y las estepas de latitudes medias no están controlados por masas de aire en descenso asociadas con presiones elevadas. En cambio, estas regiones secas existen principalmente porque están resguardadas en el interior de grandes masas continentales. Se encuentran muy separadas del océano, que es la fuente última de humedad para la formación de nubes y la precipitación. Un ejem-

plo bien conocido es el desierto de Gobi en Asia central, mostrado en el mapa al norte de la India.

La presencia de montañas elevadas que se cruzan en el camino de los vientos predominantes separa aún más esas zonas de las masas de aire marítimas cargadas de agua; además, las montañas obligan al aire a perder mucha de su agua. El mecanismo es sencillo: a medida que los vientos predominantes se encuentran con las barreras montañosas, el aire se ve forzado a ascender. Cuando el aire se eleva, se expande y se enfría, un proceso que puede producir nubes y precipitación. Las laderas de las montañas expuestas al viento (barlovento), tienen a menudo abundante precipitación. Por el contrario, las laderas de las montañas que están a sotavento suelen ser mucho más secas (Figura 19.3). Esta situación existe porque el aire que alcanza la ladera de sotavento ha perdido mucha de su humedad y, si el aire desciende, se comprime y se calienta, con lo cual la formación de nubes es incluso menos probable. A menudo se denomina **desierto de sombra pluviométrica** a la región seca que se produce. Dado que muchos desiertos de latitud media se encuentran en las laderas de sotavento de las montañas, también pueden clasificarse como desiertos de sombra pluviométrica. En Norteamérica, las barreras montañosas principales que se oponen a la llegada de humedad desde el Pacífico son las Sierras Costeras, Sierra Nevada y las Cascadas (Figura 19.3). En



▲ **Figura 19.3** Muchos desiertos de las latitudes medias son desiertos de sombra pluviométrica. Cuando el aire en movimiento se encuentra con una barrera montañosa, se ve forzado a ascender. Como consecuencia a menudo se producen nubes y precipitación en la ladera de barlovento. El aire que desciende por la ladera de sotavento es mucho más seco. Las montañas separan eficazmente el lado de barlovento de las fuentes de humedad, produciendo un desierto de sombra pluviométrica. El desierto Great Basin es un desierto de sombra pluviométrica que cubre casi toda Nevada y porciones de los estados adyacentes.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

Creía que, en general, los desiertos son lugares carentes de vida. ¿Es cierto?

Aunque es un concepto erróneo habitual, los desiertos tienen vida dispersa (y, en algunos casos, abundante). Las plantas y los animales que habitan en los desiertos tienen adaptaciones especiales para sobrevivir en estos ambientes áridos, entre las que destacan una tolerancia muy desarrollada a la sequía. Por ejemplo, muchas plantas del desierto tienen hojas céreas o una cutícula (capa protectora externa) engrosada para reducir la pérdida de agua. Otras tienen hojas muy pequeñas o no tienen ninguna hoja.

Además, las raíces de algunas especies suelen extenderse a grandes profundidades con el fin de extraer el agua de esos puntos, mientras que otras producen un sistema somero pero extenso de raíces que les permite absorber con rapidez grandes cantidades de agua procedente de las precipitaciones poco frecuentes en el desierto. Los tallos de estas plantas suelen estar engrosados por un tejido esponjoso que puede almacenar el agua suficiente para sustentar la planta hasta la próxima precipitación. Por consiguiente, aunque están muy dispersas y proporcionan muy poca cubierta vegetal, en el desierto crecen plantas de muchos tipos.

Los animales también se adaptan estupendamente a la vida en el desierto. Muchos son nocturnos y sólo salen durante el frío de la noche. Algunos, como la rata canguro, no necesitan beber agua. Por el contrario, obtienen el agua que necesitan de los alimentos. Otros pueden hibernar durante muchos meses y sólo son activos una vez que ha caído suficiente precipitación. En los desiertos habita una amplia variedad de organismos.

Asia, la gran cadena del Himalaya impide que llegue al interior el flujo de humedad del océano Índico de los monzones de verano (véase Recuadro 19.2).

Dado que el hemisferio meridional carece de extensas zonas de terreno en las latitudes medias, en esta latitud hay sólo una pequeña zona de desierto y estepa, que se encuentra fundamentalmente cerca del extremo meridional de América del Sur en la sombra pluviométrica de los imponentes Andes.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿En todos los desiertos hace calor?

No, pero muchos desiertos experimentan temperaturas muy elevadas. Por ejemplo, la temperatura fielmente registrada más elevada de Estados Unidos (y de todo el hemisferio norte) es 57 °C, tomada en el valle de la Muerte, California, el 10 de julio de 1913. La temperatura más elevada del mundo, de casi 59 °C, se registró en Azizia, Libia, en el desierto del Sahara, al norte de África, el 13 de septiembre de 1922.

A pesar de estas cifras notablemente elevadas, en las regiones desérticas también se experimentan temperaturas frías. Por ejemplo, la temperatura mínima diurna media de enero en Phoenix, Arizona, es 1,7 °C, sólo ligeramente por encima de la temperatura de congelación. En Ulan Bator, en el desierto de Gobi, Mongolia, la temperatura alta media en enero es sólo -19 °C! Los climas secos se encuentran desde los trópicos hasta las latitudes medias altas en dirección a los polos. Aunque los desiertos tropicales carecen de estación fría, los desiertos en las latitudes medias experimentan cambios estacionales de temperatura, lo cual hace que en algunos haga bastante frío.



Recuadro 19.2 ► El hombre y el medio ambiente

La desaparición del mar de Aral

El mar de Aral se encuentra en la frontera entre Uzbekistán y Kazajistán, en Asia central (Figura 19.A). El lugar es el desierto de Turkestán, un desierto de latitud media en la sombra pluviométrica de las elevadas montañas de Afganistán. En esta región de drenaje interior, dos grandes ríos, el Amu Darya y el Syr Darya, transportan agua desde las montañas del norte de Afganistán a través del desierto hasta el mar de Aral. El agua sale del mar por evaporación. Por tanto, el tamaño del cuerpo hídrico depende del equilibrio entre la aportación del río y la evaporación.

En 1960 el mar de Aral era uno de los cuerpos hídricos interiores más grandes del mundo, con un área de unos 67.000 kilómetros cuadrados. Sólo el mar Caspio, el lago Superior y el lago Victoria eran más grandes. Alrededor del año 2000 el área del mar de Aral era inferior al 50 por ciento de su tamaño en 1960, y su volumen se había reducido en un 80 por ciento. El encogimiento de este cuerpo hídrico se representa en la Figura 19.B. Aproximadamente en 2010 todo lo que habrá serán tres restos someros.

¿Qué ha provocado que el mar de Aral se seque durante los últimos 40 años? La respuesta es que el suministro de agua procedente de las montañas se redujo de

manera significativa y luego fue eliminado. En 1965, el mar de Aral recibía unos 50 kilómetros cúbicos de agua dulce cada año. A principios de 1980, esta cifra cayó casi hasta cero. El motivo fue que las aguas del Amu Darya y el Syr Darya se desviaron para aportar agua a una gran extensión de cultivos irrigados en esta zona seca.

La irrigación intensiva provocó un gran aumento de la productividad agrícola, pero no sin costes significativos. Los deltas de los dos ríos principales han perdido sus tierras húmedas y la fauna ha desaparecido. La industria pesquera, que había sido próspera, está muerta, y las 24

especies de peces que habían poblado el mar de Aral ya no están allí. En la actualidad la orilla se encuentra a decenas de kilómetros de las localidades que antes eran centros pesqueros.

El mar en retroceso ha expuesto al sol y al viento millones de acres que antes conformaban el fondo submarino. La sal y las sustancias agroquímicas transportadas por los ríos se incrustan en la superficie. Los fuertes vientos recogen y depositan de manera rutinaria millares de toneladas de material recién expuesto cada año. Este proceso no sólo ha contribuido a una reducción significativa de la calidad del aire para las personas que viven en la región, sino que también ha afectado de manera apreciable los campos de cultivo debido al depósito de sedimentos ricos en sal sobre tierra cultivable.

El mar de Aral en retroceso ha tenido un impacto notable en el clima de la región. Sin el efecto moderador de un gran cuerpo hídrico, los extremos de temperatura son mayores, la época de cultivo es más corta y la precipitación local se reduce. Estos cambios han hecho que muchas explotaciones agrarias hayan sustituido el cultivo del algodón por el del arroz, que demanda todavía más agua desviada.

Los expertos ambientales están de acuerdo en que la situación actual no puede sostenerse. ¿Podría esta situación cambiar por completo si suficiente agua dulce fluyera de nuevo en el mar de Aral?

Las perspectivas parecen desalentadoras. Los expertos estiman que restaurar el mar de Aral a aproximadamente el doble de su tamaño actual requeriría parar toda la irrigación de los dos ríos principales durante 50 años, lo que no podría realizarse sin arruinar las economías de los países que utilizan esa agua*.

La reducción del mar de Aral es un gran desastre ambiental tristemente provocado por la actividad humana.



▲ **Figura 19.A** El mar de Aral se sitúa al este del mar Caspio, en el desierto de Turkestán. Dos ríos, el Amu Darya y el Syr Darya, transportan agua desde las montañas hacia el sur.



▲ **Figura 19.B** El mar de Aral en retroceso. Aproximadamente en 2010 todo lo que habrá serán tres remanentes someros.

* En «Coming to Grips with the Aral Sea's Grim Legacy», en *Science*, vol. 284, 2 de abril de 1999, págs. 30-31 se amplía este tema.

Los desiertos de latitud media proporcionan un ejemplo de cómo los procesos tectónicos afectan al clima. Los desiertos de sombra pluviométrica existen en virtud de las montañas producidas tras la colisión de las placas. Sin esos episodios de formación de montañas, predominarían climas más húmedos en las zonas donde existen hoy muchas regiones secas.

Procesos geológicos en climas áridos



Desiertos y vientos

▼ Conceptos erróneos habituales sobre los desiertos

Las colinas angulosas, las escarpadas paredes de los cañones y la superficie de grava y arena del desierto contrastan notablemente con las colinas redondeadas y las pendientes curvilíneas de los lugares más húmedos. De hecho, para un visitante de una región húmeda, puede parecer que un paisaje desértico ha sido formado por fuerzas diferentes de las que actúan en las áreas bien abastecidas de agua. Sin embargo, aunque el contraste puede ser notable, no reflejan procesos diferentes; tan sólo revelan los diferentes efectos que pueden tener los mismos procesos cuando actúan bajo condiciones climáticas opuestas.

Meteorización

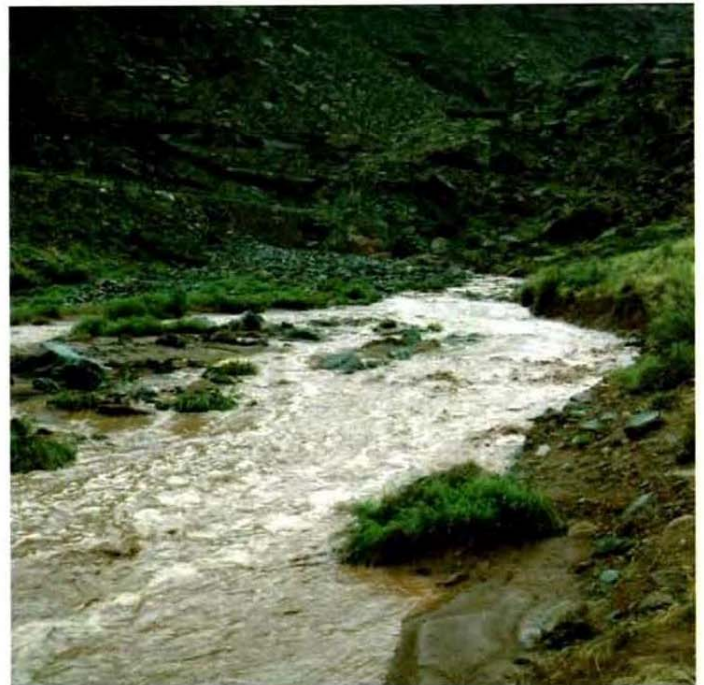
En las regiones húmedas, suelos de textura relativamente fina sustentan una cubierta casi continua de vegetación que cubre la superficie. Aquí, las pendientes y los bordes rocosos están redondeados, lo que refleja la fuerte influencia de la meteorización química en un clima húmedo. Por el contrario, muchos de los derrubios meteorizados en los desiertos consisten en roca y fragmentos minerales inalterados: es el resultado de los procesos de meteorización mecánica. En las tierras secas, la meteorización de la roca de cualquier tipo se ve muy reducida debido a la falta de humedad y a la escasez de ácidos orgánicos procedentes de las plantas en descomposición. Sin embargo, en los desiertos no falta por completo la meteorización química. A lo largo de grandes espacios de tiempo, se forman suelos poco potentes y arcillas, y se oxidan muchos silicatos que contienen hierro, produciendo el color ocre que tiñe los paisajes desérticos.

Papel del agua

Las corrientes de agua permanentes son normales en las regiones húmedas, pero prácticamente todos los cauces de corrientes de agua en los desiertos están secos la mayor parte del tiempo (Figura 19.4A). Los desiertos tienen **corrientes de agua efímeras** (*ephemero* = de vida corta), lo



A.



B.

▲ **Figura 19.4** A. La mayor parte del tiempo, los cauces de las corrientes de agua en los desiertos están secos. B. Corriente efímera poco después de una densa lluvia. Aunque estas inundaciones son breves, producen grandes cantidades de erosión. (Fotos de E. J. Tarbuck.)

que significa que transportan agua sólo en respuesta a episodios específicos de precipitación. Una corriente efímera típica podría fluir sólo unos pocos días o quizá tan sólo unas horas al año. Algunos años, el cauce puede no transportar agua en absoluto.

Este hecho resulta obvio incluso para el viajante casual que observa numerosos puentes por debajo de los cuales no atraviesa corriente de agua alguna o numerosas depresiones en la carretera atravesadas por cauces secos. Sin embargo, cuando se producen chaparrones densos y esporádicos, cae tanta lluvia en un tiempo tan corto que no se puede absorber toda ella. Dado que la cobertura vegetal del desierto es escasa, no se pone prácticamente obstáculo alguno al agua de escorrentía, la cual es, por consiguiente, rápida y crea a menudo inundaciones súbitas a lo largo de los suelos del valle (Figura 19.4B). Estas inundaciones son muy diferentes de las observadas en las regiones húmedas. Una inundación del río Mississippi puede tardar varios días en alcanzar su cresta y luego disminuir. Pero las inundaciones del desierto se producen de repente y desaparecen con rapidez. Dado que la mayor parte del material de superficie de un desierto no está fijado por vegetación, la cantidad de fuerza erosiva ejercida durante una breve precipitación es impresionante.

En la región seca del occidente de Estados Unidos se utilizan diferentes nombres para las corrientes efímeras, entre ellas *wash* y *arroyo*. En otras partes del mundo, una corriente de desierto seca puede ser un *uadi* (Arabia y África del Norte), un *donga* (América del Sur) o un *nullah* (India).

Las regiones húmedas son notables por sus sistemas de drenaje integrados. Pero en las regiones áridas, las corrientes suelen carecer de un sistema extenso de afluentes. De hecho, una característica básica de las corrientes de agua en el desierto es que son pequeñas y mueren antes de alcanzar el mar. Dado que el nivel freático suele estar muy por debajo de la superficie, pocas corrientes de agua pueden recurrir a él para abastecerse como hacen las corrientes de las regiones húmedas (véase Figura 17.3). Sin un suministro estable de agua, la combinación de evaporación e infiltración pronto agota la corriente.

Las pocas corrientes permanentes que atraviesan las regiones áridas, como los ríos Colorado y Nilo, se originan *fuera* del desierto, a menudo en montañas bien abastecidas de agua. En estos casos, el suministro de agua debe ser grande para compensar las pérdidas que se producen cuando la corriente atraviesa el desierto. Por ejemplo, después de que el Nilo abandona su cabecera en los lagos y las montañas de África central, atraviesa casi 3.000 kilómetros del Sahara sin un solo afluente. Por el contrario, en las regiones húmedas, el caudal de un río crece a medida que fluye corriente abajo porque los afluentes y el agua subterránea aportan más agua a lo largo del camino.

Debe destacarse que *las corrientes de agua, aunque esporádicas, realizan la mayor parte del trabajo erosivo en los desiertos*. Esto está en contraposición con la creencia habitual de que el viento es el principal agente erosivo que esculpe los paisajes desérticos. Aunque la erosión eólica es de hecho, más significativa en las áreas secas que en ningún otro lugar, la mayoría de las formas del desierto son esculpidas por las corrientes de agua. Como veremos enseguida, el papel principal del viento consiste en el transporte y el depósito de sedimentos, que crean y dan forma a los cúmulos y montículos que denominamos dunas.

«Basin and Range»: la evolución de un paisaje desértico



Desiertos y vientos

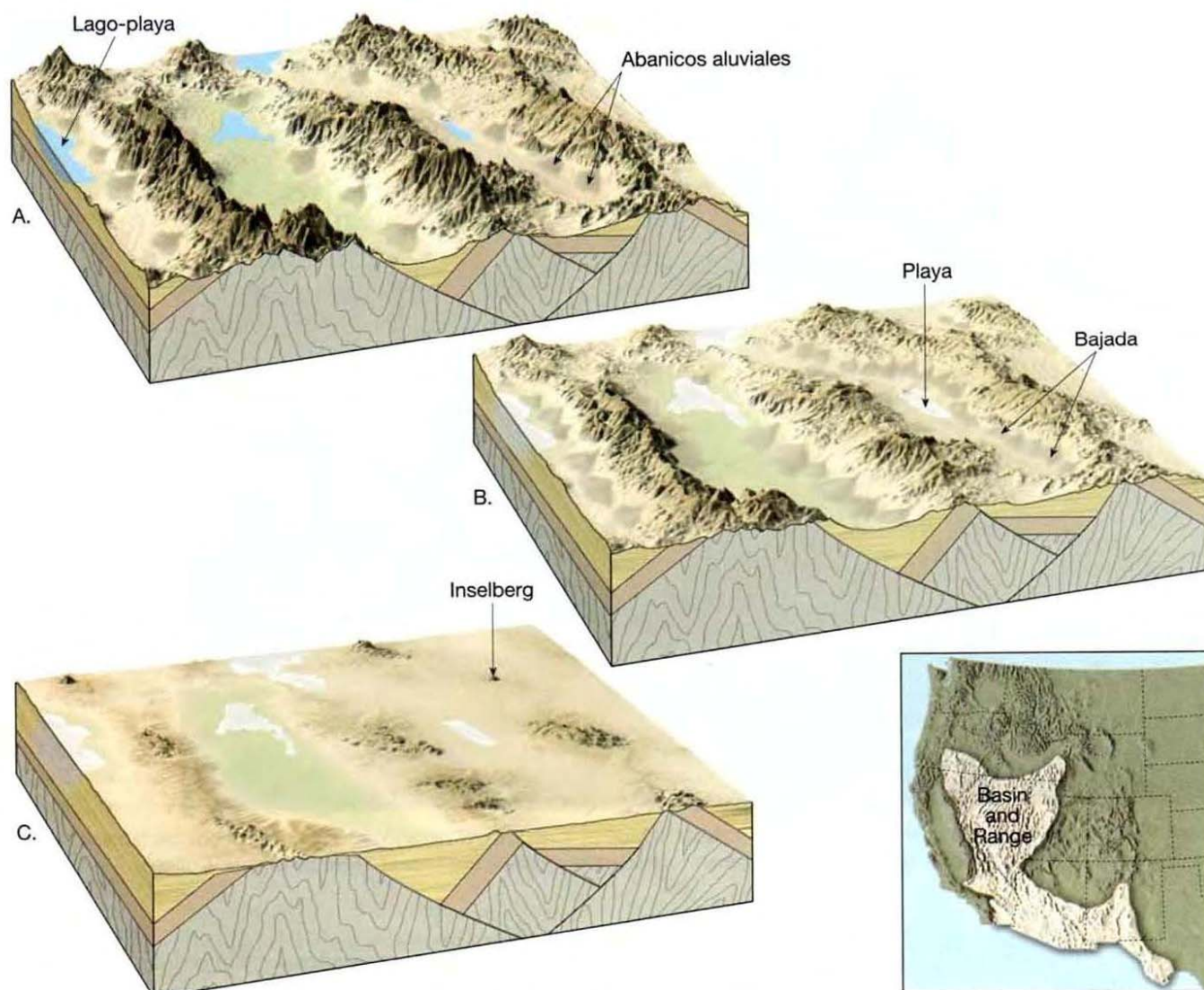
▼ Repaso de las formas y los paisajes

Dado que las regiones áridas suelen carecer de corrientes permanentes, se caracterizan por tener **drenaje interior**. Esto significa que tienen un modelo discontinuo de corrientes intermitentes que no fluyen fuera del desierto, hacia los océanos. En Estados Unidos, la región «Basin and Range» proporciona un ejemplo excelente. La región abarca el sur de Oregón, toda Nevada, el oeste de Utah, el sureste de California, el sur de Arizona y el sur de Nuevo México. Su nombre es una buena descripción de esta región de casi 800.000 kilómetros cuadrados, porque se caracteriza por más de 200 montañas relativamente pequeñas cuya altura oscila entre 900 y 1.500 metros por encima de las cuencas que las separan.

En esta región, como en otras parecidas que hay por el mundo, la erosión ocurre fundamentalmente sin referencia al océano (nivel de base absoluto), porque el drenaje interior nunca alcanza el mar. Incluso allí donde las corrientes permanentes fluyen al océano, existen pocos afluentes y, por tanto, sólo una estrecha franja de tierra adyacente a la corriente tiene el nivel del mar como su nivel absoluto de reducción del terreno.

Los bloques de diagramas de la Figura 19.5 muestran cómo ha evolucionado el paisaje en la región de Estados Unidos a la que nos referimos. Durante y después del levantamiento de las montañas, las corrientes de agua empiezan a esculpir la masa elevada y a depositar grandes cantidades de derrubios en la cuenca. Durante esta primera etapa se produce la mayor compensación, porque, a medida que la erosión reduce las montañas y llena de sedimentos las cuencas, las diferencias de elevación disminuyen de manera gradual.

Cuando torrentes ocasionales de agua producidos por lluvias esporádicas se desplazan hacia abajo por los

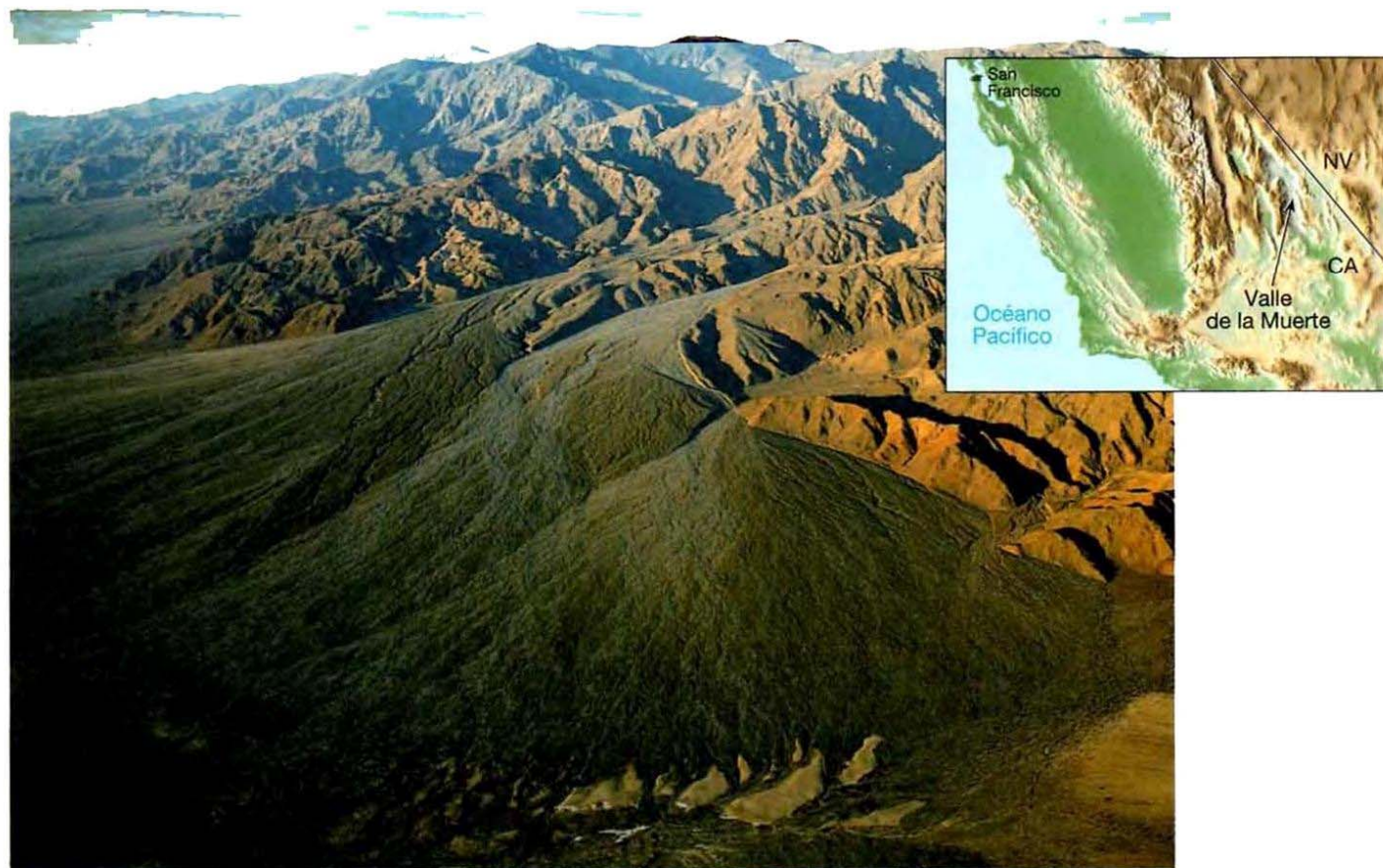


▲ **Figura 19.5** Etapas de evolución del paisaje de un desierto montañoso como el de la región «Basin and Range» del oeste norteamericano. A medida que continúa la erosión de las montañas y la deposición en las cuencas, los relieves disminuyen. A. Etapa inicial. B. Etapa intermedia. C. Etapa final.

cañones montañosos, están densamente cargados de sedimentos. Al salir de los confines del cañón, el agua de escorrentía se expande sobre las suaves pendientes de la base de las montañas y pierde rápidamente velocidad. Por consiguiente, mucha de su carga se abandona en una corta distancia. El resultado es un cono de derrubios en la boca del cañón conocido como **abanico aluvial** (Figura 19.6). Dado que el material más grueso se deposita primero, la cabecera del abanico es más empinada, con una pendiente de casi 10 a 15 grados. Más adelante, el tamaño del sedimento y la inclinación de la pendiente disminuyen y se mezclan de manera imperceptible con el suelo de la cuenca. Un examen de la superficie del abanico revelaría probablemente un modelo de cauce anastomosado debido a que el agua desvía su curso a medida que los cauces sucesivos se van atascando con sedimento. Con el paso de los años, el abanico aumen-

ta de tamaño y acaba por unirse con los abanicos de los cañones adyacentes produciendo una falda de sedimento denominada **bajada** a lo largo del frente de montaña.

En las raras ocasiones en las que se producen precipitaciones abundantes, las corrientes pueden fluir a través de la bajada hasta el centro de la cuenca, convirtiendo el suelo de la cuenca en un **lago-playa** somero. Estos lagos-playa son estructuras transitorias que duran sólo unos pocos días o, a lo sumo, unas pocas semanas antes de que la evaporación y la infiltración eliminen el agua. El lecho seco y plano que queda de un lago se denomina **playa**. Las playas están compuestas típicamente por limos finos y arcillas, y en ocasiones encostradas con las sales precipitadas durante la evaporación. Estas sales precipitadas pueden ser inusuales. Un ejemplo es el borato sódico (mejor conocido como bórax) que se obtiene en minas



▲ **Figura 19.6** Vista aérea de los abanicos aluviales del valle de la Muerte, California. El tamaño del abanico depende del tamaño de la cuenca de drenaje. A medida que los abanicos crecen, acaban coalesciendo y forman una bajada. (Foto de Michael Collier.)

de los antiguos depósitos del lago-playa del valle de la Muerte, California.

Con la erosión progresiva de la masa montañosa y la sedimentación que le sigue, el relieve local sigue disminuyendo. Por último, habrá desaparecido casi del todo la masa montañosa. Por tanto, en las etapas finales de la

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Dónde se encuentra el desierto más seco de la Tierra?

El desierto de Atacama, Chile, se distingue por ser el desierto más seco del mundo. Este cinturón relativamente estrecho de tierra árida se extiende a lo largo de unos 1.200 kilómetros a lo largo de la costa del Pacífico de Suramérica (véase Figura 19.1). Se dice que algunas partes del Atacama no han recibido precipitación ¡durante más de 400 años! Deben mirarse estas afirmaciones con escepticismo. Sin embargo, para lugares donde se han conservado los registros, en Arica, Chile, en la parte septentrional del Atacama, se ha experimentado un intervalo de 14 años sin precipitación medible.

erosión, las áreas montañosas están reducidas a unas grandes prominencias rocosas proyectándose sobre la cuenca rellena de sedimentos de su entorno. Estos restos erosivos aislados de un paisaje de desierto en sus últimas etapas se denominan **inselbergs**, palabra alemana que significa «montañas aisladas» (véase Recuadro 19.3).

Cada una de estas etapas de la evolución del paisaje en un clima árido mostradas en la Figura 19.5 puede observarse en la región «Basin and Range». En el sur de Oregón y el norte de Nevada se encuentran montañas recién levantadas en una etapa inicial de erosión. El valle de la Muerte, California, y el sur de Nevada encajan en la etapa media más avanzada, mientras que en el sur de Arizona puede verse la etapa final, con sus inselbergs.

Transporte de sedimentos por el viento

El aire en movimiento, como el agua en movimiento, es turbulento y capaz de elevar derrubios sueltos y transportarlos a otros lugares. Exactamente igual que ocurre en



Recuadro 19.3 ► Entender la Tierra

El monte Uluru de Australia

Cuando los viajeros que se plantean un viaje a Australia consultan guías y otros libros turísticos, seguro que ven una fotografía o leen una descripción del monte Uluru (antes Ayers Rock). Esta famosa atracción es una impresionante estructura que se eleva abruptamente de la llanura circundante. Situado en el Parque Nacional Uluru-Kata Tjuta, al suroeste de Alice Springs, en el centro seco del continente, el monolito más o menos circular mide más de 350 metros de altura y su base tiene una circunferencia de más de 9,5 kilómetros. Su cima es plana y sus lados, arrugados. El tipo de roca es arenisca, y los matices rojos y naranjas cambian con la luz del día. Además de ser una atracción geológica impresionante, el monte Uluru es interesante porque es un lugar sagrado para las tribus aborígenes de la región.

El monte Uluru es un ejemplo espectacular de una estructura conocida con el nombre de *inselberg*. *Inselberg* es una pa-

labra alemana que significa «montaña aislada» y parece adecuada porque estas masas se parecen mucho a unas islas rocosas que permanecieran sobre la superficie de un gran mar. Estructuras similares salpican muchas otras regiones áridas y semiáridas del mundo. El monte Uluru es un tipo especial de *inselberg* formado por una masa rocosa muy resistente que exhibe una forma redondeada o abovedada. Las masas de este tipo se denominan *bornhardts* en homenaje al explorador alemán del siglo XIX, Wilhelm Bornhardt, que describió estructuras similares en algunas partes de África.

Los *bornhardts* se forman en regiones donde la roca masiva o resistente como el granito o la arenisca está rodeada de una roca más susceptible a la meteorización. La mayor susceptibilidad de la roca adyacente suele ser consecuencia del hecho de que está más fracturada. Las diaclasas permiten que el agua y, por tanto, los procesos de meteorización penetren a mayor

profundidad. Cuando la roca adyacente muy meteorizada es retirada por la erosión, la masa rocosa mucho menos meteorizada permanece elevada. Tras la formación del *bornhardt*, éste tiende a liberar agua. Por el contrario, las llanuras circundantes cubiertas de derrubios absorben el agua y se meteorizan con mayor rapidez. Por consiguiente, una vez formado, un *bornhardt* ayuda a perpetuar su existencia reforzando los procesos que lo crearon. De hecho, las masas como el monte Uluru pueden continuar formando parte del paisaje durante decenas de millones de años.

Los *bornhardts* son más habituales en las latitudes más bajas, ya que la meteorización responsable de su formación actúa de manera más rápida en los climas más cálidos. En las regiones que en la actualidad son áridas o semiáridas, los *bornhardts* pueden reflejar épocas en las que el clima era más húmedo que en la actualidad.

una corriente, la velocidad del viento aumenta con la altura por encima de la superficie. También igual que en una corriente, el viento transporta partículas finas en suspensión, mientras que las más pesadas son transportadas como carga de fondo. Sin embargo, el transporte del sedimento por el viento difiere del realizado por las corrientes de agua de dos maneras significativas. En primer lugar, la menor densidad del viento, en comparación con la del agua, le hace menos capaz de elevar y transportar materiales gruesos. En segundo lugar, dado que el viento no está confinado en cauces, puede extender el sedimento a lo largo de grandes áreas, así como hacia arriba a la atmósfera.

Carga de fondo

La **carga de fondo** transportada por el viento consiste en granos de arena. Las observaciones realizadas en el campo y en experimentos en los que se utilizan túneles de viento, indican que la arena movida por el viento se mueve saltando y rebotando a lo largo de la superficie: proceso denominado **saltación**. El término deriva de la palabra que significa «saltar» en latín.

El movimiento de los granos de arena empieza cuando el viento alcanza una velocidad suficiente para superar la inercia de las partículas en reposo. Al principio, la arena gira a lo largo de la superficie. Cuando un grano de arena en movimiento golpea otro grano, uno o los dos pueden saltar en el aire. Una vez en el aire, los granos son transportados hacia delante por el viento hasta que la gravedad los arrastra de nuevo hacia la superficie. Cuando la arena golpea la superficie, o bien rebota de nuevo al aire o bien desaloja otros granos, que entonces saltan hacia arriba. De esta manera, se establece una reacción en cadena, que llena el aire cercano a la superficie de granos de arena en saltación en un tiempo muy corto (Figura 19.7).

Los granos de arena que rebotan nunca viajan muy lejos de la superficie. Aun cuando los vientos sean muy fuertes, la altura alcanzada por la arena rara vez excede un metro y normalmente no supera el medio metro. Algunos granos de arena son demasiado grandes para ser lanzados en el aire por el impacto de otras partículas. Cuando esto ocurre, la energía proporcionada por el impacto de los granos saltantes más pequeños impulsa el movimiento hacia delante de los granos más grandes. Los cálculos indican que entre el 20 y el 25 por ciento de los

► **Figura 19.7** Una nube de granos de arena asciende mediante saltación por la pendiente suave de una duna. (Foto de Stephen Trimble.)



granos transportados en una tormenta de arena se mueve de esta manera.

Carga en suspensión

A diferencia de la arena, las partículas más finas de polvo pueden ser elevadas hacia la atmósfera por el viento. Dado que el polvo suele estar compuesto de partículas bastante planas que tienen áreas superficiales grandes en comparación con su peso, es relativamente fácil para el aire turbulento contrarrestar el empuje de la gravedad y mantener esas partículas finas transportadas por el aire durante horas o incluso días. Aunque el limo y la arcilla pueden ser transportados en suspensión, el limo constituye normalmente la mayor parte de la **carga suspendida**, porque el reducido grado de meteorización química de los desiertos proporciona sólo pequeñas cantidades de arcilla.

Las partículas finas son fácilmente transportadas por el viento, pero no son fácilmente recogidas para empezar su transporte. La razón es que la velocidad del viento es prácticamente cero dentro de una capa muy fina situada cerca del suelo. Por tanto, el viento no puede elevar el sedimento por sí mismo. En cambio, debe ser arrojado o dispersado en el aire en movimiento por los granos de arena que rebotan u otros procesos. Esta idea está bien ilustrada por una carretera seca no pavimentada en un día de viento. El viento levanta poco polvo si antes no se le mueve. Sin embargo, como pase un coche o un camión por la carretera, se levanta una capa de limo que crea una gruesa nube de polvo.

Aunque la carga suspendida suele depositarse relativamente cerca de su origen, los vientos altos son capaces de transportar grandes cantidades de polvo a grandes distancias (Figura 19.8). En los años 30, se transportó polvo levantado en Kansas hasta Nueva Inglaterra y más allá, hasta el Atlántico norte. De igual manera, se ha seguido la pista de polvo del Sahara hasta las Indias occidentales (Figura 19.9).

Erosión eólica



Desiertos y vientos

▼ Conceptos erróneos habituales sobre los desiertos

En comparación con las corrientes de agua y los glaciares, el viento es un agente erosivo relativamente insignificante. Recordemos que incluso en los desiertos, la mayor parte de la erosión la realizan las corrientes de agua intermitentes, no el viento. La erosión eólica es más eficaz en las regiones áridas que en las áreas húmedas, porque en los lugares húmedos la humedad mantiene juntas las partículas, y la vegetación las sujeta al suelo. Para que el viento sea una fuerza erosiva eficaz, la sequedad y la escasez de vegetación son requisitos previos importantes. Cuando existen dichas circunstancias, el viento puede levantar, transportar y depositar grandes cantidades de sedimento fino. Durante los años treinta, parte de las grandes llanuras experimentaron enormes tormentas de polvo: la tierra quedó expuesta a la erosión eólica tras ser arada bajo la cubierta vegetal natural para el cultivo y la posterior e intensa sequía. Este lugar se conoce desde entonces como Dust Bowl (véase Recuadro 19.4)*.

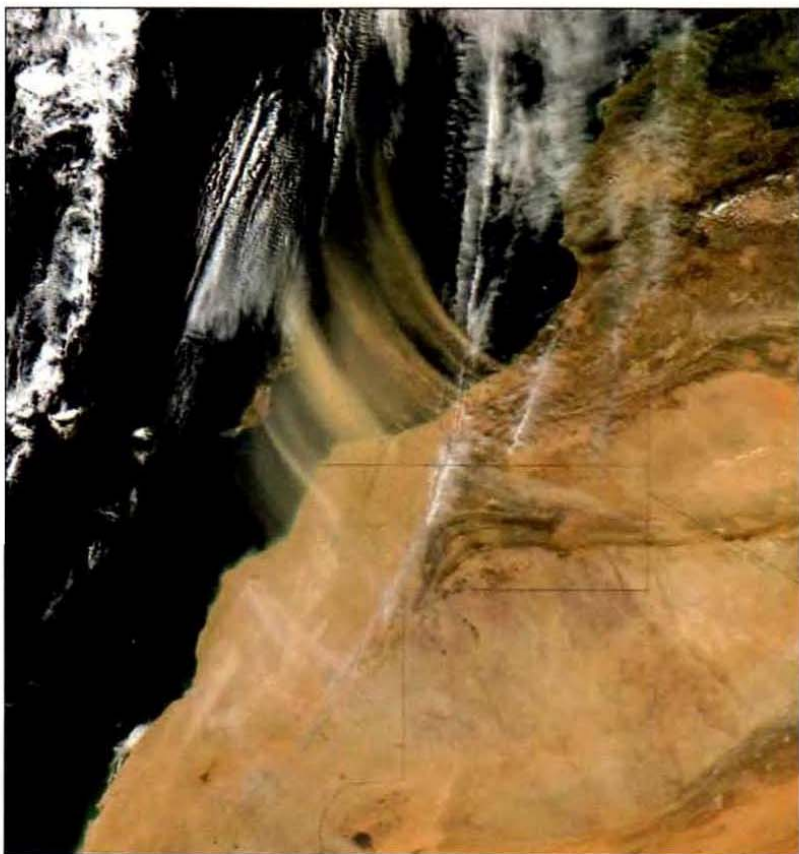
Deflación, depresiones de deflación y pavimento desértico

Una forma mediante la cual el viento produce erosión es la **deflación** (*de* = fuera; *flat* = soplar), el levantamiento y removilización del material suelto. A veces, la deflación es difícil de observar porque toda la superficie está siendo reducida al mismo tiempo, pero puede ser significativa. En

* Para más información, véase el Recuadro 6.4 de este libro, «Dust Bowl: la erosión del suelo en las grandes llanuras».



▲ **Figura 19.8** El polvo ennegrece el cielo el 21 de mayo de 1937 cerca de Elkhart, Kansas. Debido a tormentas como ésta algunas partes de las grandes llanuras se denominaron «Dust Bowl» durante los años 30. (Foto reproducida de la colección de la Biblioteca del Congreso.)



◀ **Figura 19.9** Esta imagen de satélite muestra gruesos penachos de polvo del desierto del Sahara que se desplazan en dirección noroeste sobre las islas Canarias el 12 de marzo de 2003. Estas tormentas de polvo son habituales en el árido norte de África. De hecho, esta región es la mayor fuente de polvo del mundo. Los satélites son una herramienta excelente para estudiar el transporte de polvo a escala mundial. Muestran que las tormentas de polvo pueden cubrir áreas enormes y que el polvo puede ser transportado a lo largo de grandes distancias. (Imagen cortesía de la NASA.)



Recuadro 19.4 ► El hombre y el medio ambiente

Los desiertos se están expandiendo

Las zonas de transición que rodean los desiertos tienen ecosistemas muy frágiles, con un equilibrio delicado. En estas zonas marginales, las actividades humanas pueden cargar el ecosistema más allá de su límite de tolerancia, lo cual provoca la degradación de la tierra. Si esa degradación es grave, se denomina *desertización*. Desertización significa la expansión de las condiciones desérticas en áreas no desérticas. Aunque dicha transformación puede producirse por procesos naturales que actúan de manera gradual a lo largo de decenios, siglos y milenios, en los últimos años, la desertización ha venido a significar la alteración rápida del terreno a condiciones desérticas como consecuencia de las actividades humanas.

Las Naciones Unidas han reconocido la desertización como uno de los desafíos ambientales más graves del siglo XXI. Según el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola de las Naciones Unidas, cada año la desertización reivindica otros 10 millones de acres de tierras secas de cultivo. Como respuesta, más de 170 países (incluidos Estados Unidos) han ratificado un tratado conocido como la Convención para Combatir la Desertización.

El avance de las condiciones de tipo desierto en áreas que fueron previamente útiles para la agricultura no es una modificación clara y uniforme de los bordes de los desiertos. Más bien, la degeneración de una transformación parcheada de tierra seca, pero habitable, en tierra seca e inhabitable. Se produce fundamentalmente a partir del uso inadecuado de la tierra y es ayudada y acelerada por la sequía. Por desgracia, una zona afectada por la desertización sólo nos llama la atención una vez que el proceso ya está en curso.

La desertización comienza cuando la tierra próxima al borde del desierto empieza a utilizarse para el crecimiento de cosechas o para el pasto de ganado. De cualquiera de las dos formas, se elimina la vegetación natural por el arado o el pasto.

Si se plantan cosechas, y se produce sequía, el suelo desprotegido queda expuesto a las fuerzas de la erosión. La formación de badenes en las pendientes y las acumulaciones de sedimento en los cauces de las corrientes son signos visibles en el paisaje, así como las nubes de polvo que se crean cuando la capa de suelo superior es eliminada por el viento.

Donde se cría ganado, la tierra también se degrada. Aunque la vegetación natural modesta de las tierras marginales puede mantener la vida salvaje local, no puede sustentar el pastoreo intensivo de los grandes rebaños domésticos. El sobrepastoreo reduce o elimina la cubierta vegetal. Cuando la cubierta vegetal se destruye más allá del mínimo necesario para proteger el suelo contra la erosión, la destrucción se vuelve irreversible. Además, al pisar el suelo con sus pezuñas, el ganado compacta el suelo, lo cual reduce la cantidad de agua que la tierra puede absorber cuando llueve. Las pisadas de las pezuñas también pulverizan el suelo, aumentando la proporción de material fino, que entonces se retira con mayor facilidad cuando los vientos son fuertes.

La desertización recibió por primera vez atención mundial cuando la sequía golpeó una región africana denominada el *Sahel* a finales de los años sesenta (Figura 19.C). Durante ese período, y en muchos episodios posteriores, los habitantes de esta enorme extensión al sur del desierto del Sahara han sufrido desnutrición y muerte por inanición. Los rebaños de ganado se han diezmado y la pérdida de terreno productivo ha sido grande. Centenares de miles de personas se han visto forzadas a migrar. A medida que disminuye la tierra de cultivo, las personas deben depender de áreas más pequeñas para la producción de alimentos. Esto, a su vez, afecta más al medio ambiente y acelera el proceso de desertización.

Aunque el sufrimiento por la desertización es mucho más serio en el Sahel, el problema no está, en absoluto, confinado a esta región. Existe desertización en otras partes de África y en cualquier otro continente, con excepción de la Antártida. Las sequías recurrentes quizá parezcan la razón más obvia de la desertización, pero la causa fundamental es el esfuerzo que los humanos exigimos al tenue medio ambiente, con suelos frágiles.

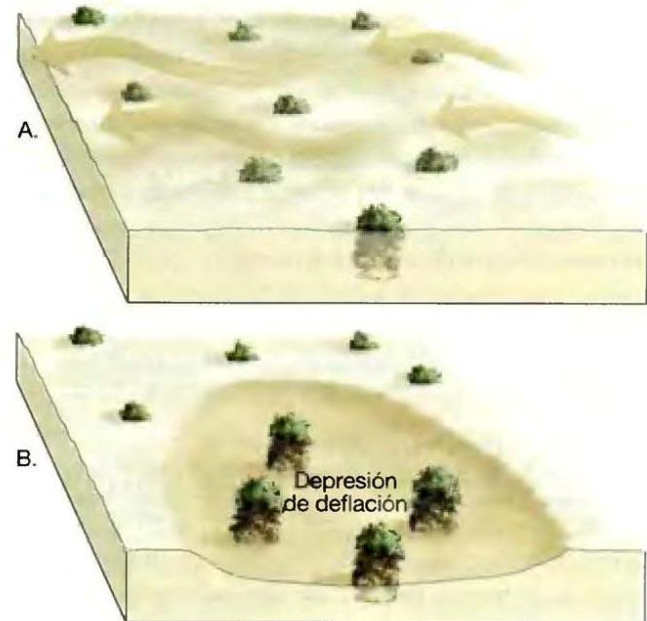


▲ **Figura 19.C** La desertización es más grave en el margen meridional del Sahara, en una región conocida como el Sahel. Las líneas que definen los límites cercanos al Sahel representan la precipitación anual media en milímetros.

algunas zonas del Dust Bowl de los años treinta, enormes áreas de terreno experimentaron una reducción de hasta un metro tan sólo en unos años.

El resultado más destacable de la deflación en algunos lugares es la aparición de depresiones superficiales denominadas **depresiones de deflación** (Figura 19.10). En la región de las grandes llanuras, del norte de Texas a Montana, son visibles miles de depresiones de deflación en el paisaje. Oscilan entre pequeños agujeros menores de 1 metro de profundidad y 3 metros de ancho a depresiones que se aproximan a 50 metros de profundidad y varios kilómetros de diámetro. El factor que controla las profundidades de estas cuencas (es decir, que actúa como nivel de base) es el nivel freático local. Cuando las depresiones de deflación descienden hasta el nivel freático, la tierra húmeda y la vegetación impiden la deflación posterior.

En determinadas zonas de muchos desiertos, la superficie es una capa muy empaquetada de cantos gruesos demasiado grandes para ser movidos por el viento. Este revestimiento rocoso, denominado **pavimento desértico**, se crea a medida que la deflación reduce la superficie eliminando la arena y el limo hasta que prácticamente sólo queda una capa continua de granos gruesos (Figura 19.11). Una vez que se ha establecido el pavimento desértico, un proceso que puede durar centenares de años, la superficie queda protegida de la ulterior deflación si no se perturba. Sin embargo, dado que la capa tiene un grosor de tan sólo uno o dos granos, los vehículos o los animales pueden desalojar el pavimento y exponer de nuevo a la deflación el material de grano fino situado por debajo.



▲ **Figura 19.10** Formación de una depresión de deflación. A. Antes de la deflación. B. Después de la deflación se ha creado una depresión superficial.

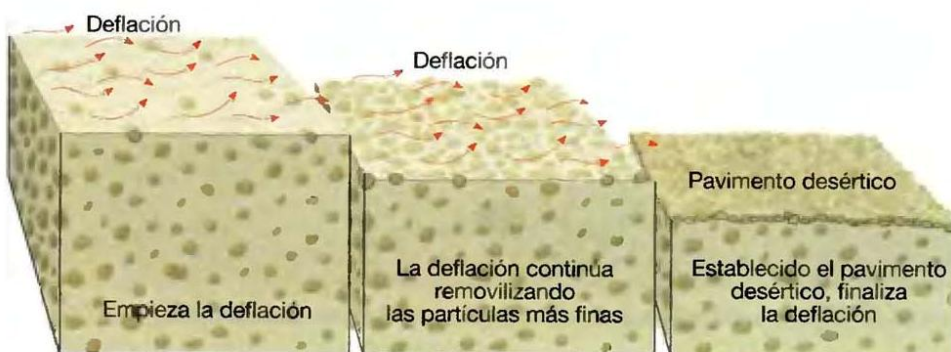
bordes angulosos. Si el viento no sopla constantemente de la misma dirección, o si el canto se reorienta, puede tener varias superficies facetadas.

Por desgracia, a menudo se atribuyen a la abrasión obras que van más allá de sus capacidades. Estructuras como rocas en equilibrio de pie en la parte superior de pedestales estrechos y con intrincados detalles en altos pináculos, no son consecuencia de la abrasión. Rara vez la arena viaja más de un metro por encima de la superficie, de manera que el efecto de limpieza con chorro de arena del viento está obviamente limitado en la vertical.

Además de los ventifactos, la erosión eólica es responsable de la creación de estructuras mucho mayores, denominadas yardangs (de la palabra turca *yar*, que significa «loma empinada»). Un **yardang** es una cresta aerodinámica esculpida por el viento con una orientación

Ventifactos y yardangs

Como los glaciares y las corrientes de agua, el viento también erosiona mediante **abrasión** (*ab* = fuera; *ardere* = raspar). En las regiones secas, así como a lo largo de las playas, la arena transportada por el viento corta y pule las superficies rocosas expuestas. A veces, la abrasión crea rocas de formas muy interesantes conocidas como **ventifactos**. La cara de la roca expuesta al viento predominante es sometida a abrasión, dejándola pulida, picada y con



◀ **Figura 19.11** Formación del pavimento desértico. Como ilustran estas secciones transversales, los granos gruesos se concentran gradualmente en una capa fuertemente empaquetada a medida que la deflación reduce la superficie eliminando la arena y el limo. Si no experimenta alteración, el pavimento desértico protegerá la superficie de una ulterior deflación.

paralela a la del viento predominante. Suele tener el aspecto de un casco de barco al revés. Cada yardang suele medir menos de 10 metros de altura y unos 100 metros de longitud, pero los hay mucho mayores que pueden medir hasta 90 metros de altura y más de 100 kilómetros de longitud. Suelen aparecer en grupos y parecen limitados a zonas desérticas especialmente secas con una cubierta vegetal mínima y fuertes vientos que soplan predominantemente desde una dirección.

Depósitos eólicos



Desiertos y vientos

▼ Repaso de las formas y los paisajes

Aunque el viento carece relativamente de importancia en la génesis de formas *erosivas*, en algunas regiones crea significativas estructuras *deposicionales*. Las acumulaciones de sedimento transportado por el viento son particularmente notables en las regiones secas de todo el mundo y a lo largo de muchas costas arenosas. Los depósitos eólicos son

de dos tipos distintos: (1) montículos y colinas de arena formados a partir de la carga de fondo del viento, que denominamos dunas, y (2) extensas alfombras de limo, denominados loess, que una vez fueron transportadas en suspensión.

Depósitos de arena

Como ocurre con las corrientes de agua, el viento deja caer su carga de sedimento cuando la velocidad descendiente y la energía disponible para el transporte disminuye. Por tanto, la arena empieza a acumularse en cualquier lugar en el que una obstrucción situada en el camino del viento ralentice su movimiento. A diferencia de muchos depósitos de limo, que forman capas a modo de alfombra a lo largo de grandes áreas, los vientos depositan normalmente la arena en montículos o crestas denominados **dunas** (Figura 19.12).

Cuando el aire en movimiento encuentra un objeto, como una mata de vegetación o una roca, barre a su alrededor y por encima de él, dejando una sombra de aire con movimiento más lento por detrás del obstáculo, así como una zona más pequeña de aire más tranquilo



▲ **Figura 19.12** Arena descendiendo por la cara de deslizamiento empinada de una duna, en el Monumento Nacional White Sands, Nuevo México. (Foto de Michael Collier.)

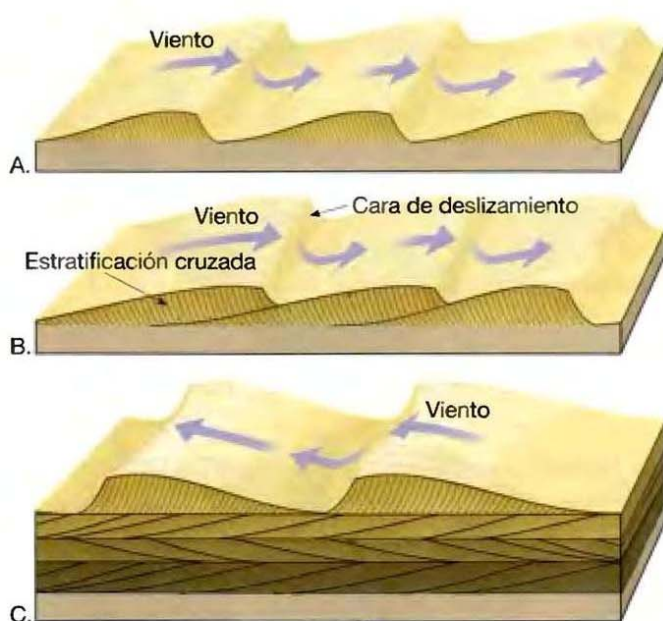
justo enfrente del obstáculo. Algunos de los granos de arena que se mueven por saltación con el viento vienen a descansar a esas sombras de viento. A medida que continúa la acumulación de arena, se convierte en una barrera cada vez más imponente para el viento y, por tanto, en una trampa cada vez más eficaz para la acumulación de arena. Si hay suficiente abastecimiento de arena y el viento sopla de manera uniforme durante un tiempo lo bastante largo, el montículo de arena crece y se transforma en una duna.

Muchas dunas tienen un perfil asimétrico, con la pendiente de sotavento (protegida) más empinada y la pendiente de barlovento con una inclinación más suave (Figura 19.13). La arena asciende por la pendiente más suave, en la ladera de barlovento, por saltación. Justo detrás de la cresta de la duna, donde la velocidad del viento es menor, se acumula la arena. Conforme se acumula más arena, la pendiente se inclina y algo acaba por deslizarse bajo el empuje de la gravedad. De esta manera, la pendiente de sotavento de la duna, denominada **cara de deslizamiento**, mantiene un ángulo de unos 34 grados, el ángulo de reposo para la arena seca suelta (recordemos del Capítulo 15 que el ángulo de reposo es el ángulo más empinado al cual el material suelto permanece estable). La acumulación continua de arena, junto con los desplaza-

mientos periódicos que tienen lugar por la cara de deslizamiento, provocan una migración lenta de la duna en la dirección del movimiento del aire.

A medida que la arena se deposita en la cara de deslizamiento, se forman estratos inclinados en la dirección en la que sopla el viento. Estas capas en pendiente se denominan **estratos cruzados** (Figura 19.13). Cuando las dunas son finalmente enterradas bajo otras capas de sedimento y entran a formar parte del registro de rocas sedimentarias, se destruye su forma asimétrica, pero permanecen los estratos cruzados como testimonio de su origen. Ningún lugar tiene una estratificación cruzada más notable que el de las paredes de arenisca de Zion Canyon, en el sur de Utah.

En algunas áreas, el movimiento de la arena constituye un problema. En zonas de Oriente Medio, las valiosas instalaciones petrolíferas deben ser protegidas de la invasión de las dunas. En algunos casos, las cercas se construyen lo bastante de cara al viento de las dunas como para detener su migración. A medida que la arena sigue acumulándose, sin embargo, debe aumentarse la altura de las cercas. En Kuwait, las cercas protectoras se extienden durante casi 10 kilómetros alrededor de un importante *pozo* petrolífero. La migración de las dunas puede plantear también un problema para la construcción y el mantenimiento de carreteras y vías férreas que atraviesen regiones desérticas arenosas. Por ejemplo, para mantener abierta al tráfico una porción de la autopista 95 cerca de Winnemucca, Nevada, debe retirarse la arena unas tres veces al año. Cada vez, se extraen entre 1.500 y 4.000 metros cúbicos de arena. Los intentos de estabilizar las dunas plantando diferentes variedades de hierba han sido insatisfactorios, porque la escasa precipitación hace imposible que se mantengan las plantas.



▲ **Figura 19.13** Como se ilustra en las partes A y B, las dunas tienen normalmente una forma asimétrica. El lado de sotavento, más empinado, se denomina cara de deslizamiento. Los granos de arena depositados en la cara de deslizamiento en la dirección del ángulo de reposo crean la estratificación cruzada de las dunas. C. Se desarrolla un modelo complejo en respuesta a cambios en la dirección del viento. Obsérvese también que cuando las dunas son enterradas y se convierten en una parte del registro sedimentario, la estructura de estratificación cruzada se conserva.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿No están cubiertos los desiertos fundamentalmente por dunas de arena?

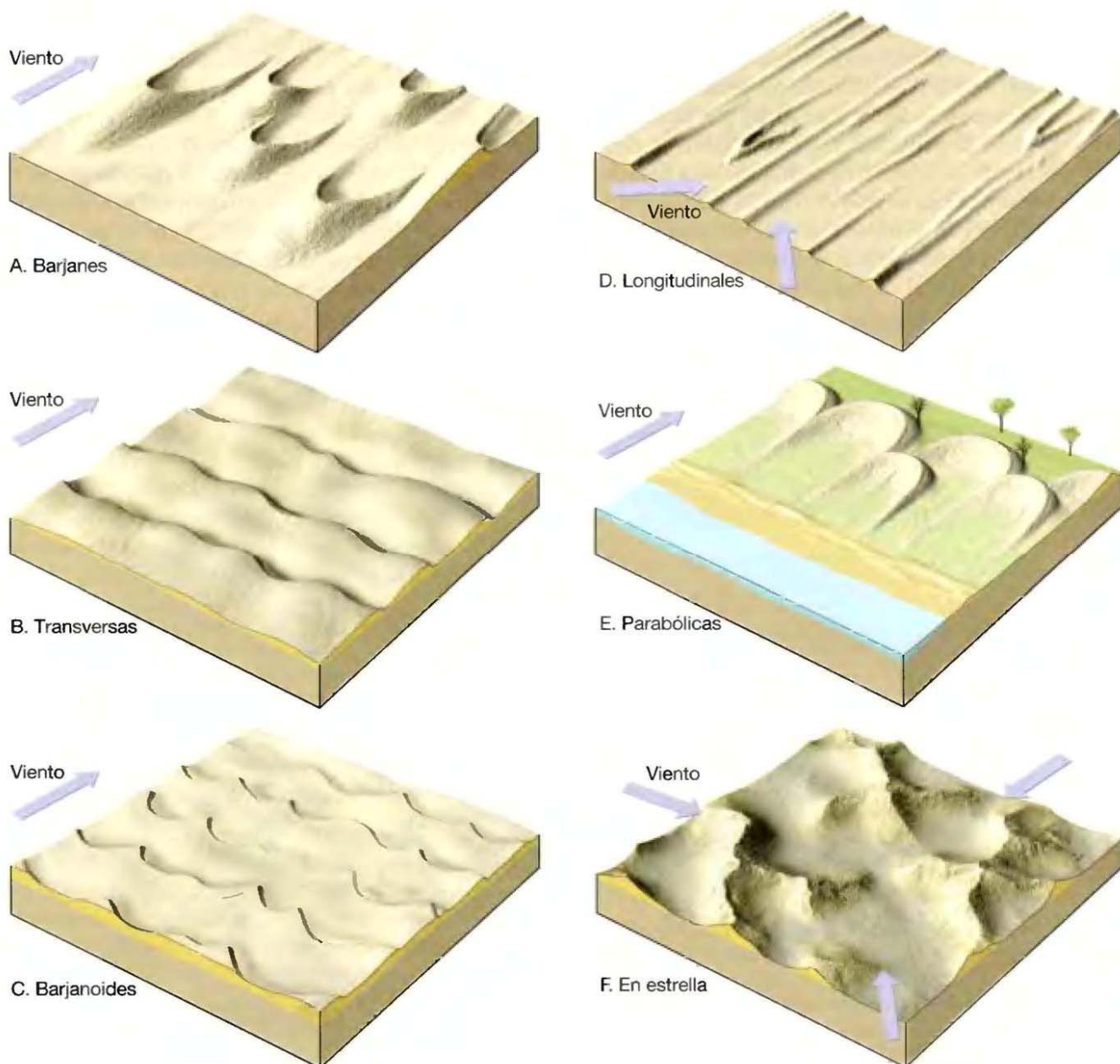
Un concepto erróneo habitual sobre los desiertos es que están formados por kilómetros y kilómetros de dunas de arena acumulada. Es cierto que hay acumulaciones de arena en algunas zonas y pueden ser estructuras impresionantes. Pero, aunque quizá sorprenda, las acumulaciones de arena en todo el mundo representan sólo un pequeño porcentaje del total de zonas desérticas. Por ejemplo, en el Sahara, el desierto más grande del mundo, las acumulaciones de arena cubren sólo *una décima parte* de su área. El desierto con más arena es el Árabe, un tercio del cual está formado por arena.

Tipos de dunas de arena

Las dunas no son simples montículos aleatorios de sedimento transportado por el viento. Más bien, son acumulaciones que suelen adoptar modelos sorprendentemente constantes (Figura 19.14). Al abordar este punto, uno de los primeros investigadores pioneros sobre las dunas, el ingeniero británico R. A. Bagnold, observaba: «En vez de encontrar caos y desorden, el observador nunca deja de asombrarse de la simplicidad de forma, la exactitud de la repetición y el orden geométrico...». Existe una amplia selección de formas de dunas, que generalmente se

simplifican en unos pocos tipos principales para su discusión.

Por supuesto, existen gradaciones entre las diferentes formas, así como dunas de formas irregulares que no encajan fácilmente en una categoría. Varios factores influyen en la forma y el tamaño que las dunas acaban por adoptar. Esos factores son la dirección y la velocidad del viento, la disponibilidad de arena y la cantidad de vegetación presente. En la Figura 19.14 se muestran seis tipos básicos de dunas, y las flechas indican las direcciones del viento.



▲ **Figura 19.14** Tipos de dunas de arena. A. Barjanes. B. Dunas transversas. C. Dunas barjanoides. D. Dunas longitudinales. E. Dunas parabólicas. F. Dunas en estrella.

Barjanes Las dunas solitarias de arena en forma de media luna y con sus extremos apuntando en la dirección del viento se denominan **barjanes** (Figura 19.14A). Esas dunas se forman cuando los suministros de arena son limitados y la superficie es relativamente plana, dura y carente de vegetación. Migran lentamente con el viento a una velocidad de hasta 15 metros por año. Su tamaño suele ser modesto, alcanzando, las más grandes, alturas de unos 30 metros, mientras que la expansión máxima entre las puntas se aproxima a 300 metros. Cuando la dirección del viento es casi constante, la forma de media luna de estas dunas es casi simétrica. Sin embargo, cuando la dirección del viento no es perfectamente fija, una punta se hace mayor que la otra.

Dunas transversas En regiones donde los vientos predominantes son uniformes, hay abundancia de arena y la vegetación es dispersa o no existe, las dunas forman una serie de largas crestas separadas por depresiones y orientadas según ángulos rectos con respecto al viento predominante. Debido a esta orientación, se denominan **dunas transversas** (Figura 19.14B). Normalmente, muchas de las dunas costeras son de este tipo. Además, las dunas transversas son comunes en muchas regiones áridas donde la extensa superficie de arena ondulada se denomina a veces *mar de arena*. En algunas partes de los desiertos del Sahara y el Arábigo, las dunas transversas alcanzan alturas de 200 metros, ocupan una superficie transversal de 1 a 3 kilómetros y pueden extenderse a lo largo de distancias de 100 kilómetros o más.

Hay una forma de duna relativamente común, que es intermedia entre los barjanes aislados y las extensas ondulaciones de las dunas transversas. Esas dunas, denominadas **dunas barjanoides**, forman hileras festoneadas de arena orientadas según ángulos rectos con respecto al viento (Figura 19.14C). Las hileras recuerdan una serie de barjanes que hayan sido colocados unos al lado de otros. Los visitantes que exploren las dunas de yeso en el monumento nacional White Sands, Nuevo México, reconocerán esta forma.

Dunas longitudinales Las **dunas longitudinales** son largas crestas de arena que se forman más o menos en paralelo al viento predominante y donde el suministro de arena es limitado (Figura 19.14D). Aparentemente la dirección del viento predominante debe variar algo, pero sigue permaneciendo en el mismo cuadrante de la brújula. Aunque los tipos más pequeños tienen sólo 3 o 4 metros de altura y varias docenas de metros de longitud, en algunos desiertos grandes las dunas longitudinales pueden alcanzar grandes tamaños. Por ejemplo, en partes del norte de África, Arabia y Australia central esas dunas pueden alcanzar una altura de 100 metros y extenderse a lo largo de distancias de más de 100 kilómetros.

Dunas parabólicas A diferencia de las otras dunas que se han descrito hasta ahora, las **dunas parabólicas** se forman donde la vegetación cubre parcialmente la tierra. La forma de estas dunas recuerda la forma de los barjanes, excepto en que sus extremos apuntan en dirección contraria al viento en vez de en su misma dirección (Figura 19.14E). Las dunas parabólicas se forman a menudo a lo largo de las costas donde hay fuertes vientos que soplan hacia el interior y abundante arena. Si la cubierta vegetal dispersa de la arena se interrumpe en algún punto, la deflación crea una depresión. Entonces la arena es transportada fuera de la depresión y depositada como un reborde curvo, que se hace más alto a medida que la deflación aumenta el tamaño de la depresión.

Dunas en estrella Confinadas en gran medida a zonas de los desiertos sahariano y arábigo, las **dunas en estrella** son colinas aisladas de arena que exhiben una forma compleja (Figura 19.14F). Su nombre deriva del hecho de que la base de estas dunas se parece a estrellas de puntas múltiples. Normalmente lomas, de 3 o 4 crestas divergen de un punto alto central, que en algunos casos puede aproximarse a los 90 metros de altura. Como sugiere su forma, las dunas en estrella se desarrollan cuando las direcciones del viento son variables.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Dónde se encuentran las dunas de arena más grandes y cuánto miden?

Las dunas más elevadas del mundo se encuentran a lo largo de la costa suroccidental de África, en el desierto de Namibia. En algunos lugares, estas enormes dunas alcanzan alturas de 300 a 350 metros. Las dunas del Parque Nacional Great Sand Dunes al sur de Colorado son las más elevadas de Norteamérica, elevándose más de 210 metros por encima del terreno circundante.

Depósitos de loess (limo)

En algunas partes del mundo la topografía superficial está cubierta por depósitos de limo transportado por el viento, denominado **loess**. Durante períodos de quizás miles de años, las tormentas de polvo depositaron este material. Cuando el loess es atravesado por corrientes de agua o cortado para hacer carreteras, tiende a mantener una estructura vertical y carece de estratos visibles.

La distribución del loess en el mundo indica que hay dos fuentes principales de este sedimento: los depósitos desérticos y las llanuras de aluvión glaciares. Los depósitos de loess más gruesos y más extensos de la Tierra se

encuentran en el oeste y el norte de China. Fueron transportados por el viento aquí desde las extensas cuencas desérticas de Asia central. Acumulaciones de 30 metros son comunes y se han medido grosores de más de 100 metros. Es este sedimento fino de color de ante el que proporciona al río Amarillo (Huang Ho) su nombre.

En estados Unidos, los depósitos de loess son significativos en muchas áreas, entre ellas Dakota del Sur, Nebraska, Iowa, Missouri e Illinois, así como en zonas de la llanura de Columbia en el Pacífico noroccidental. La correlación entre la distribución del loess y las regiones agrícolas importantes del medio oeste y del estado oriental de Washington no es una mera coincidencia, porque los suelos derivados de este sedimento depositado por el viento se cuentan entre los más fértiles del mundo.

A diferencia de los depósitos de China, que se originaron en los desiertos, el loess de Estados Unidos (y de Eu-

ropa) es un producto indirecto de las glaciaciones. Su origen se encuentra en los depósitos de derrubios glaciares estratificados. Durante la retirada de los glaciares de casquete, muchos valles de los ríos fueron bloqueados con sedimento depositado por el agua de fusión. Fuertes vientos que soplaban en dirección oeste barriendo a través de las desnudas llanuras de inundación, levantaron el sedimento más fino y lo dejaron caer como una manta sobre las laderas orientales de los valles. Este origen es confirmado por el hecho de que los depósitos de loess son los más potentes y groseros en el lado de sotavento de desbordamientos de drenaje glaciar principal, como los de los ríos Mississippi e Illinois y rápidamente se hacen más finos al aumentar la distancia de los valles. Además, los granos angulosos mecánicamente meteorizados que componen el loess son esencialmente los mismos que los del suelo de roca producidos por la acción de molienda de los glaciares.

Resumen

- El concepto de *sequedad es relativo*; se refiere a cualquier situación en la que existe déficit de agua. Las regiones secas abarcan alrededor del 30 por ciento de la superficie terrestre. Se reconocen normalmente dos tipos climáticos: *desierto*, que es árido, y *estepa* (una variante marginal y más húmeda del desierto), que es semiárido. Los *desiertos de latitudes bajas* coinciden con las zonas de anticiclones subtropicales en las latitudes más bajas. Por otro lado, los *desiertos de latitudes medias* existen principalmente debido a su posición en zonas continentales interiores donde grandes masas de terreno están bastante alejadas del océano.
- Los mismos procesos geológicos que actúan en las regiones húmedas lo hacen también en los desiertos, pero bajo condiciones climáticas restringidas. En las tierras secas la *meteorización de las rocas, de cualquier tipo, está muy reducida* debido a la falta de humedad y a la escasez de ácidos orgánicos procedentes de las plantas en descomposición. Gran parte del derrubio meteorizado en los desiertos es consecuencia de la *meteorización mecánica*. Prácticamente todas las corrientes fluviales del desierto están secas la mayor parte del tiempo y se dice que son *efímeras*. Los cursos de corrientes de agua de los desiertos rara vez están bien integrados y carecen de un sistema extenso de afluentes. No obstante, *las corrientes de agua son responsables de la mayor parte del trabajo erosivo en un desierto*. Aunque la erosión eólica es más significativa en las áreas secas que en cualquier otro lugar, el papel principal del viento en un desierto es el de transporte y depósito de sedimentos.
- Debido a que las regiones áridas normalmente carecen de corrientes de agua permanentes, se caracterizan por tener *drenaje interior*. Muchos de los paisajes de la región «Basin and Range» del oeste y el suroeste de Estados Unidos son consecuencia de corrientes de agua que erosionan bloques de montaña levantados y depositan el sedimento en las cuencas interiores. Los *abanicos aluviales*, las *playas* y los *lagos-playa* son rasgos morfológicos a menudo asociados con esos paisajes. En las etapas tardías de la erosión, las áreas de montaña se reducen a unas pocas protuberancias rocosas, denominadas *inselbergs*, que se proyectan por encima de las cuencas rellenas de sedimento.
- El transporte del sedimento por el viento difiere del realizado por las corrientes de agua de dos maneras. En primer lugar, en comparación con el agua, el viento tiene baja densidad; por tanto, no es capaz de levantar ni transportar materiales gruesos. En segundo lugar, debido a que el viento no está confinado a cauces, puede extender el sedimento sobre grandes áreas. La *carga de fondo* del viento consiste en granos de arena que saltan y rebotan a lo largo de la superficie en un proceso denominado *saltación*. Las finas partículas de polvo pueden ser transportadas por el viento a grandes distancias en forma de *carga en suspensión*.
- En comparación con las corrientes de agua y los glaciares, el viento es un agente erosivo relativamente insignificante. La *deflación*, el levantamiento y la removilización de material suelto, a menudo producen

depresiones superficiales denominadas *depresiones de deflación*. En zonas de muchos desiertos la superficie es una capa de cantos gruesos, denominada *pavimento desértico*, demasiado grandes para ser movidos por el viento. El viento también erosiona por *abrasión*, creando a menudo piedras de formas interesantes conocidas como *ventifactos*. Los *yardangs* son crestas estrechas y dinámicas esculpidas por el viento que pueden medir hasta 90 metros de altura y 100 kilómetros de longitud.

- Los depósitos eólicos son de dos tipos distintos: (1) *montículos y crestas de arena*, denominados *dunas*, que se forman a partir del sedimento que es trans-

portado como parte de la carga de fondo del viento, y (2) extensos *mantos de limo*, denominados *loess*, que una vez fueron transportados *en suspensión* por el viento. El perfil de una duna muestra una forma asimétrica con la pendiente de sotavento (protegida) empinada y la de barlovento con una inclinación más suave. Los *tipos de dunas de arena* son: (1) *barjanes*; (2) *dunas transversas*; (3) *dunas barjanoides*; (4) *dunas longitudinales*; (5) *dunas parabólicas*, y (6) *dunas en estrella*. Los depósitos más gruesos y más extensos de loess se encuentran en el oeste y el norte de China. A diferencia de los depósitos chinos, que se originaron en los desiertos, el loess de Estados Unidos y de Europa es un producto indirecto de las glaciaciones.

Preguntas de repaso

1. ¿Qué extensión ocupan los desiertos y las regiones de estepa de la Tierra?
2. ¿Cuál es la causa principal de los desiertos subtropicales? ¿De los desiertos de latitudes medias?
3. ¿En qué hemisferio (norte o sur) son más comunes los desiertos de latitudes medias?
4. ¿Por qué la cantidad de precipitación, que se utiliza para determinar si un lugar tiene un clima seco o un clima húmedo, es una cifra variable? (véase Recuadro 19.1)
5. *Los desiertos son paisajes calientes cubiertos de arena y carentes de vida conformados en su mayor parte por la fuerza del viento.* La afirmación precedente resume la imagen de regiones áridas que tienen muchas personas, en especial las que viven en lugares más húmedos. ¿Es una visión precisa?
6. ¿Por qué está reducida la meteorización de las rocas en el desierto?
7. Cuando una corriente permanente, como la del río Nilo, atraviesa un desierto, ¿aumenta o disminuye su caudal? ¿Cómo se compara esto con un río de una región húmeda?
8. ¿Cuál es el agente erosivo más importante en los desiertos?
9. ¿Por qué el nivel del mar (nivel de base absoluto) no es un factor que influya de manera significativa en la erosión de las regiones desérticas?
10. ¿Por qué el mar Aral se está encogiendo (véase Recuadro 19.2)?
11. Describa los rasgos y las características asociados con cada una de las etapas de la evolución de un desierto montañoso. ¿En qué lugares de Estados Unidos pueden observarse estas etapas?
12. Describa cómo el viento transporta la arena. Cuando soplan vientos muy fuertes, ¿hasta qué altura por encima de la superficie puede transportarse la arena?
13. ¿Por qué la erosión eólica es relativamente más importante en las regiones áridas que en las áreas húmedas?
14. ¿De qué maneras contribuyen las actividades humanas a la desertificación (véase Recuadro 19.4)?
15. ¿Qué factor limita las profundidades de las depresiones de deflación?
16. ¿Cómo migran las dunas de arena?
17. Enumere tres factores que influyan en la forma y el tamaño de una duna.
18. Se reconocen seis tipos principales de dunas. Indique qué tipo de duna está asociado con cada una de las siguientes afirmaciones.
 - a) Dunas cuyos extremos apuntan en la dirección del viento.
 - b) Largas crestas de arena orientadas en ángulos rectos según la dirección del viento.
 - c) Dunas que a menudo se forman a lo largo de las costas, donde fuertes vientos crean una depresión de deflación.

- d) Dunas solitarias cuyos extremos apuntan a favor del viento.
- e) Largas crestas arenosas que están orientadas más o menos en paralelo al viento predominante.
- f) Una duna aislada que consiste en lomos de tres o cuatro crestas que divergen de un punto elevado central.

- g) Filas festoneadas de arena orientadas en ángulos rectos según la dirección del viento.

19. Aunque las dunas de arena son los depósitos eólicos mejor conocidos, las acumulaciones de loess son muy significativas en algunas partes del mundo. ¿Qué es el loess? ¿Dónde se encuentran estos depósitos? ¿Cuáles son los orígenes de este sedimento?

Términos fundamentales

abanico aluvial
abrasión
bajada
barján
cara de deslizamiento
carga de fondo
carga suspendida
corriente efímera

deflación
depresión de deflación
desierto
desierto de sombra
pluviométrica
drenaje interior
duna
duna barjanoide

duna en estrella
duna longitudinal
duna parabólica
duna transversa
estepa
estrato cruzado
inselberg

lago-playa
loess
pavimento desértico
playa
saltación
ventifacto
yardang

Recursos de la web



La página Web *Earth* utiliza los recursos y la flexibilidad de Internet para ayudarle en su estudio de los temas de este capítulo. Escrito y desarrollado por profesores de Geología, este sitio le ayudará a comprender mejor esta ciencia. Visite <http://www.librosite.net/tarbuck> y haga clic sobre la cubierta de *Ciencias de la Tierra*, octava edición. Encontrará:

- Cuestionarios de repaso en línea.
- Reflexión crítica y ejercicios escritos basados en la web.
- Enlaces a recursos web específicos para el capítulo.
- Búsquedas de términos clave en toda la red.

<http://www.librosite.net/tarbuck>