

## CAPÍTULO 20

---

# Líneas de costa

### La línea litoral: una interfase dinámica

### La zona costera

### Olas

- Características de las olas
- Movimiento orbital circular
- Olas en la zona de rompiente

### Erosión causada por las olas

### Movimiento de la arena de la playa

- Movimiento perpendicular a la línea de costa
- Refracción de las olas
- Deriva y corrientes litorales

### Características de la línea de costa

- Formas de erosión

- Formas deposicionales
- El litoral en desarrollo

### Estabilización de la costa

- Estabilización firme
- Alternativas a la estabilización firme
- Problemas de erosión a lo largo de las costas estadounidenses

### Clasificación de las costas

- Costas de emersión
- Costas de inmersión

### Mareas

- Causas de las mareas
- Ciclo mensual de las mareas
- Modelos mareales
- Corrientes mareales
- Mareas y rotación de la Tierra

Las incansables aguas del océano están constantemente en movimiento. Los vientos generan corrientes superficiales, la gravedad de la Luna y del Sol produce mareas y las diferencias de densidad crean circulación en el océano profundo. Además, las olas transportan la energía de las tormentas a costas distantes, donde su efecto erosiona el terreno.

Las líneas de litorales son ambientes dinámicos. Su topografía, su composición geológica y su clima varían enormemente de un lugar a otro. Los procesos continentales y oceánicos convergen a lo largo de las costas y crean paisajes que con frecuencia experimentan cambios rápidos. Cuando se trata del depósito de sedimentos, constituyen zonas de transición entre los ambientes marino y continental.

## La línea litoral: una interfase dinámica

En ningún otro lugar es más perceptible la naturaleza incansable del agua oceánica que a lo largo del litoral: la superficie de contacto dinámico entre el aire, la tierra y el mar. Una *interfase* es un límite común en el que diferentes partes de un sistema interactúan. Ésta es sin duda una designación adecuada para la zona costera. En este lugar podemos observar la elevación y el descenso rítmicos de las mareas, así como la constante ondulación y ruptura de las olas. A veces, las olas son bajas y suaves. En otras ocasiones sobrepasan la costa con una furia pavorosa.

Aunque puede no resultar obvio, la línea litoral está siendo modificada constantemente por las olas. Por ejemplo, a lo largo de Cape Cod, Massachusetts, la actividad de las olas está erosionando los acantilados de sedimento glaciario poco consolidado con tanta agresividad que aquellos están retrocediendo tierra adentro a un ritmo de hasta 1 metro al año (Figura 20.1A). Por el contrario, en Point Reyes, California, los acantilados de lecho de roca mucho más resistente son menos sensibles al ataque de las olas y, por consiguiente, están retrocediendo mucho más despacio (Figura 20.1B). En los dos litorales, la actividad de las olas está moviendo sedimento a lo largo de la costa y construyendo estrechas barras de arena que sobresalen y atraviesan algunas bahías.

La naturaleza de las líneas litorales actuales no es el mero resultado del ataque incansable al terreno por parte del mar. De hecho, la costa tiene un carácter complejo que es la consecuencia de procesos geológicos múltiples. Por ejemplo, prácticamente todas las áreas de costa estuvieron afectadas por la elevación global del nivel del mar que acompañó la fusión de los glaciares al final del Pleistoceno. Cuando el mar se introdujo tierra adentro, la línea litoral retrocedió, superponiéndose a paisajes existentes que se habían producido como consecuencia de procesos tan diversos como la erosión por corrientes de

agua, la glaciación, la actividad volcánica y las fuerzas de formación de las montañas.

La zona costera actual está experimentando una intensa actividad humana. Por desgracia, las personas a menudo tratamos la línea litoral como si fuera una plataforma estable sobre la cual las estructuras pueden edificarse con toda seguridad. Esta actitud lleva inevitablemente a conflictos entre las personas y la naturaleza. Como veremos, muchas formas costeras, en especial las playas y las islas barrera, son características relativamente frágiles y de vida efímera que constituyen lugares inapropiados para la urbanización.

## La zona costera

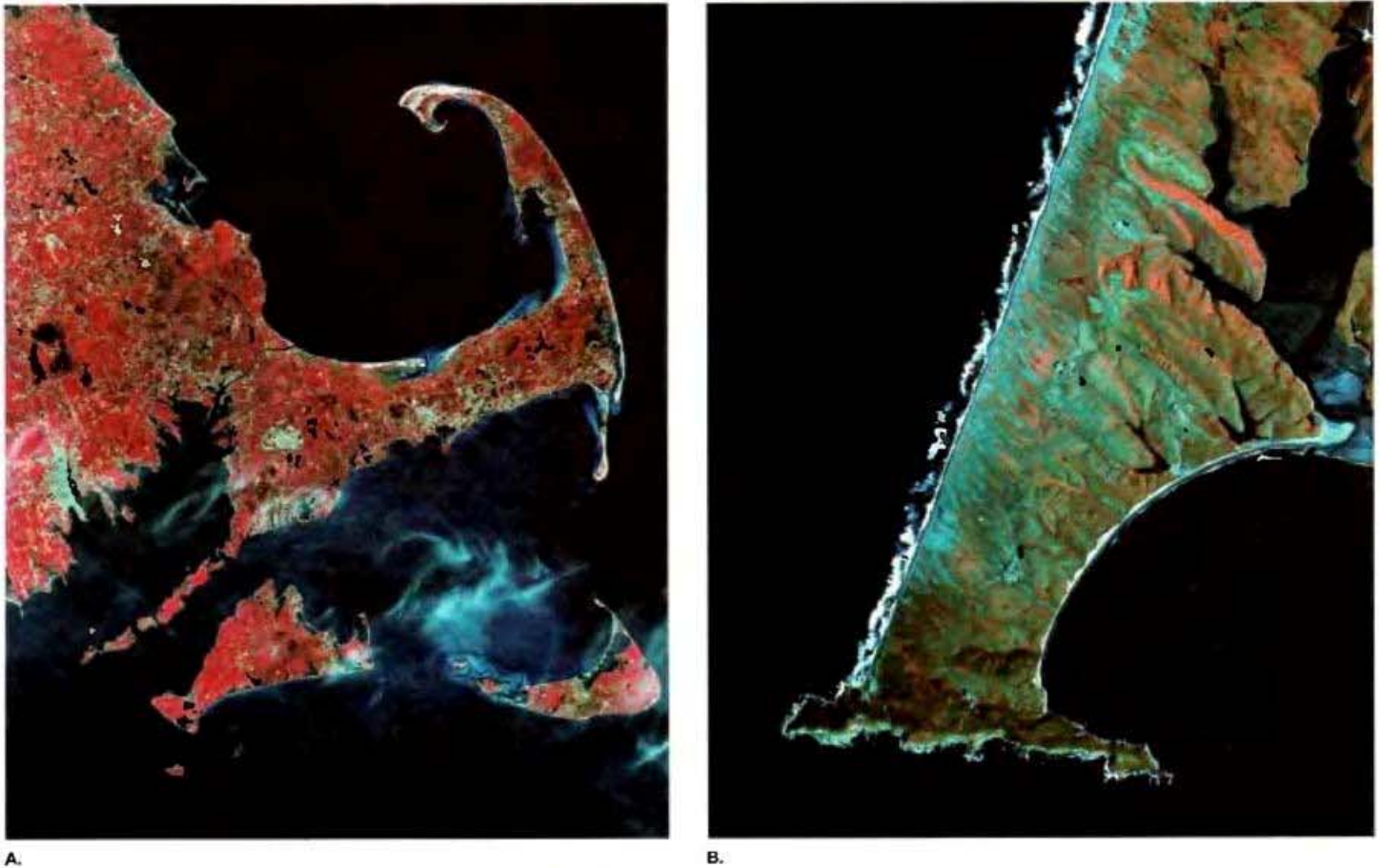
En el lenguaje general se utiliza una serie de términos para referirse al límite entre la tierra y el mar. En la sección anterior, se han utilizado los términos *litoral*, *línea litoral*, *zona costera* y *costa*. Además, al pensar en la interfase tierra-mar, a muchos les viene a la cabeza la palabra *playa*. Dedicemos un momento a aclarar estos términos e introducir otra terminología utilizada por quienes estudian la zona limítrofe entre la tierra y el mar. Le resultará útil observar la Figura 20.2, en la que se representa un perfil idealizado de la zona costera.

La **línea de costa** es la línea que marca el contacto entre la tierra y el mar. Cada día, conforme las mareas suben y bajan, la posición de la línea de costa migra. Durante períodos más prolongados, la posición media de la línea de costa cambia de manera gradual.

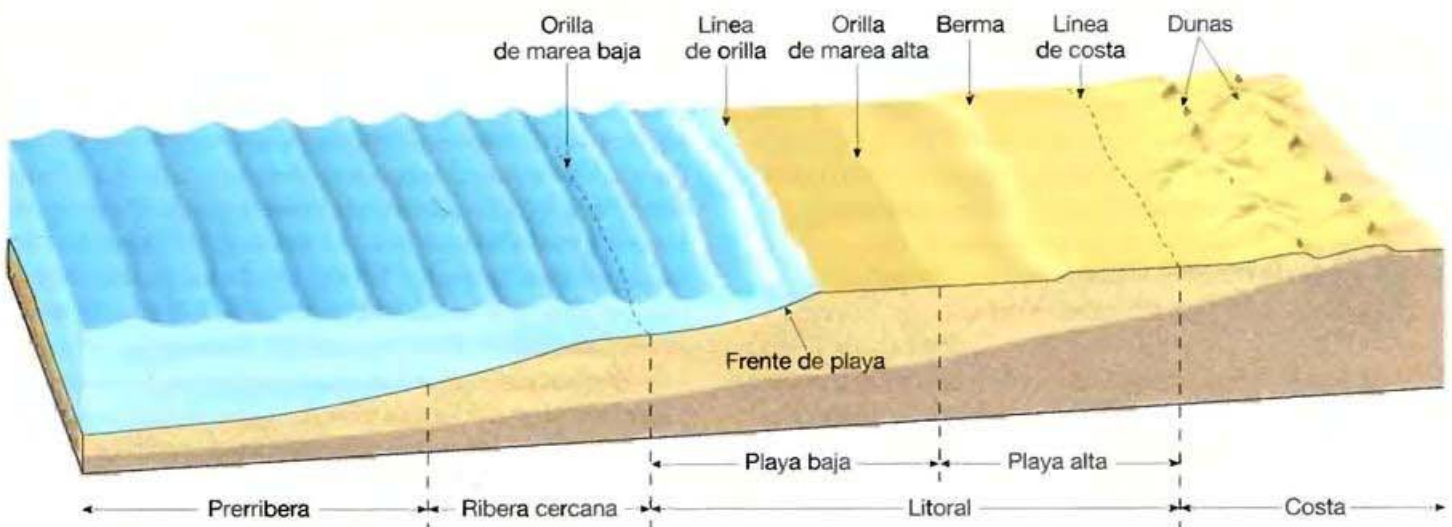
El **litoral** es la zona que se extiende entre el nivel de marea más bajo y la mayor elevación de la tierra afectada por las olas de temporal. Por el contrario, la **costa** se extiende tierra adentro desde el litoral hasta donde haya estructuras relacionadas con el océano. La **línea de costa** marca el límite en el lado del mar del litoral, mientras que el límite interior no es siempre evidente ni fácil de determinar.

Como se ilustra en la Figura 20.2, el litoral se divide en *playa baja* y *playa alta*. La **playa baja** es la zona que queda expuesta cuando no hay marea (marea baja) y sumergida cuando hay marea (marea alta). La **playa alta** se sitúa en el lado continental de la línea litoral de marea alta. Suele estar seca y las olas la afectan sólo durante los temporales. Con frecuencia se identifican otras dos zonas. La **zona de ribera cercana** yace entre la línea litoral de marea baja y la línea en la que las olas rompen en marea baja. En el lado del mar de la zona de ribera cercana se encuentra la **zona prerribera**.

Para muchos, una playa es la zona de arena donde las personas se tumban para tomar el sol y andan a lo largo de la orilla del agua. Desde el punto de vista técnico, una



**▲ Figura 20.1** A. En esta imagen por satélite aparece el perfil familiar de Cape Cod. Boston se sitúa en la parte superior izquierda. Las dos grandes islas frente a la costa meridional de Cape Cod son Martha's Vineyard (izquierda) y Nantucket (derecha). Aunque el trabajo de las olas modifica constantemente este paisaje litoral, los procesos de la línea de costa no son los principales responsables de su creación. Antes bien, el tamaño y la forma actuales de Cape Cod son el resultado del posicionamiento de morrenas y otros materiales glaciales depositados durante el Pleistoceno. (Imagen por satélite cortesía de Earth Satellite Corporation/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.) B. Imagen de gran altitud de la zona de Point Reyes al norte de San Francisco, California. Los acantilados orientados al sur de 5,5 kilómetros de longitud en Point Reyes (en la parte inferior de la imagen) están expuestos a toda la fuerza de las olas del océano Pacífico. No obstante, este promontorio retrocede lentamente porque el lecho de rocas del que se formó es muy resistente. (Imagen cortesía de USDA-ASCS.)



**▲ Figura 20.2** La zona litoral está formada por varias partes. La playa es una acumulación de sedimento en el borde continental del océano o de un lago. Puede considerarse un material de tránsito a lo largo de la costa.

**playa** es una acumulación de sedimento que se encuentra a lo largo del margen continental del océano o un lago. En las costas rectas, las playas pueden extenderse a lo largo de decenas o centenares de kilómetros. Cuando las costas son irregulares, la formación de la playa puede quedar confinada a las aguas relativamente tranquilas de las bahías.

Las playas consisten en una o más **bermas**, que son plataformas relativamente planas que suelen estar compuestas por arena y son adyacentes a las dunas costeras o los acantilados y están marcadas por un cambio de pendiente en el límite del lado del mar. Otra parte de la playa es el **frente de playa**, que es la superficie inclinada húmeda que se extiende desde la berma hasta la línea litoral. Cuando las playas tienen arena, quienes toman el sol suelen preferir la berma, mientras que quienes andan prefieren la arena húmeda compacta del fondo de playa.

Las playas están compuestas por cualquier material abundante en la zona. El sedimento de algunas playas se deriva de la erosión de los acantilados adyacentes o las montañas costeras próximas. Otras playas se forman a partir de sedimentos que los ríos depositan en la costa.

Aunque la composición mineral de muchas playas está dominada por granos resistentes de cuarzo, pueden dominar otros minerales. Por ejemplo, en zonas como el sur de Florida, donde no hay montañas ni otras fuentes próximas de minerales que formen rocas, la mayoría de playas está compuesta por fragmentos de caparzones y restos de organismos que habitan en las aguas litorales. Algunas playas de islas volcánicas en el mar abierto están compuestas por granos meteorizados de lava basáltica que conforman las islas o por derrubios gruesos erosionados de los arrecifes de coral que se desarrollan alrededor de las islas en latitudes bajas.

Con independencia de la composición, el material que conforma la playa no permanece en un lugar. Por el contrario, las olas rompientes lo mueven constantemente. Por consiguiente, puede considerarse que las playas son material en tránsito a lo largo del litoral.

## Olas



### Líneas de costa ▼ Olas y playas

Las *olas oceánicas* son energía que se desplaza a lo largo de la interfase entre el océano y la atmósfera, y a menudo transfieren energía de un temporal en alta mar a distancias de varios miles de kilómetros. Por ese motivo, incluso en los días de calma el océano todavía tiene olas que se desplazan por su superficie. Al observar las olas, recordemos siempre que estamos viendo el movimiento de la

*energía* a través de un medio (agua). Si fabricamos olas tirando una piedra a un estanque, tirándonos a una piscina o soplando en la superficie de una taza de café, estamos transmitiendo *energía* al agua, y las olas que vemos no son sino la evidencia visible de la energía que estamos transmitiendo.

Las olas generadas por el viento proporcionan la mayor parte de la energía que conforma y modifica las líneas litorales. Allí donde se encuentran el mar y la tierra, las olas, que quizá hayan viajado durante centenares o miles de kilómetros sin impedimento, encuentran súbitamente una barrera que no les permitirá avanzar más y deben absorber su energía. Dicho de otra manera, el litoral es el lugar donde una fuerza prácticamente irresistible se enfrenta con un objeto casi inamovible. El conflicto que se produce es interminable y a veces espectacular.

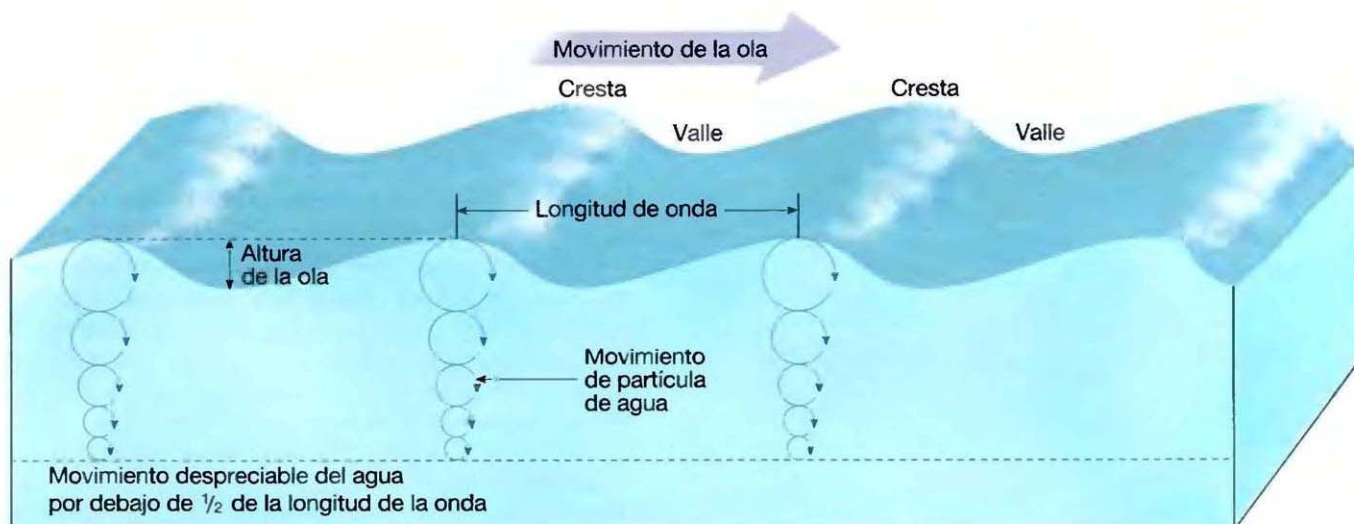
## Características de las olas

La energía y el movimiento de la mayoría de las olas derivan del viento. Cuando una brisa es inferior a 3 kilómetros por hora, sólo aparecen pequeñas ondulaciones. Cuando el viento sopla a velocidades superiores, se van formando de manera gradual olas más estables, que avanzan con el viento.

En la Figura 20.3, en la que aparece una forma ondulada simple que no rompe, se ilustran las características de las olas oceánicas. La parte superior de las olas son las *crestas*, que están separadas por *valles*. A medio camino entre las crestas y los valles se encuentra el *nivel de aguas tranquilas*, que es el nivel que ocuparía el agua si no hubiera olas. La distancia vertical entre el valle y la cresta es la **altura de ola** y la distancia horizontal entre crestas sucesivas es la **longitud de onda**. El tiempo que tarda una ola entera (una longitud de onda) en pasar una posición fija se denomina **período de ola**.

La altura, la longitud y el período que una onda acaba por alcanzar dependen de tres factores: (1) la velocidad del viento; (2) el tiempo durante el cual el viento ha soplado, y (3) el **fetch**, o distancia que el viento ha recorrido a través de mar abierto. A medida que aumenta la cantidad de energía transferida desde el viento al agua, aumenta también la altura y la pendiente de las olas. Por fin, se alcanza un punto crítico, en el cual las olas se hacen tan altas que se vuelcan, formando lo que se conoce como *palomillas*.

Para una velocidad de viento concreta, hay un fetch y una duración del viento máximos más allá de los cuales las olas ya no aumentarían de tamaño. Cuando se alcanzan el fetch y la duración máximos para una velocidad de viento determinada, se dice que las olas están «completamente desarrolladas». La razón de que las olas no puedan crecer más es que pierden tanta energía mediante la



▲ **Figura 20.3** Diagrama idealizado de una ola oceánica no rompiente que muestra las partes básicas de una ola, así como el movimiento de las partículas de agua en la profundidad. Debajo de una profundidad igual a la mitad de la longitud de onda (el nivel de la línea punteada) se produce un movimiento despreciable del agua.

formación de palomillas como la que están recibiendo del viento.

Cuando el viento cesa o cambia de dirección, o si las olas dejan el área tormentosa donde se crearon, continúan sin relación con los vientos locales. Las olas experimentan también un cambio gradual a *marejadas* que son más bajas y largas, y pueden transportar la energía de la tormenta a costas lejanas. Dado que existen muchos sistemas de olas independientes al mismo tiempo, la superficie del mar adquiere un modelo complejo e irregular. Por consiguiente, las olas del mar que vemos desde la costa son a menudo una mezcla de marejadas de tormentas distantes y olas creadas por los vientos locales.

### Movimiento orbital circular

Las olas pueden recorrer grandes distancias a través de las cuencas oceánicas. En un estudio, se siguió el movimiento de las olas generadas cerca de la Antártida durante su desplazamiento a través de la cuenca del océano Pacífico. Tras más de 10.000 kilómetros, las olas acabaron disipando su energía una semana después en la línea de costa de las islas Aleutianas de Alaska. El agua en sí misma no recorre toda la distancia, pero sí lo hace la forma de onda. A medida que la ola se desplaza, el agua transfiere la energía moviéndose en círculo. Este movimiento se denomina *movimiento orbital circular*.

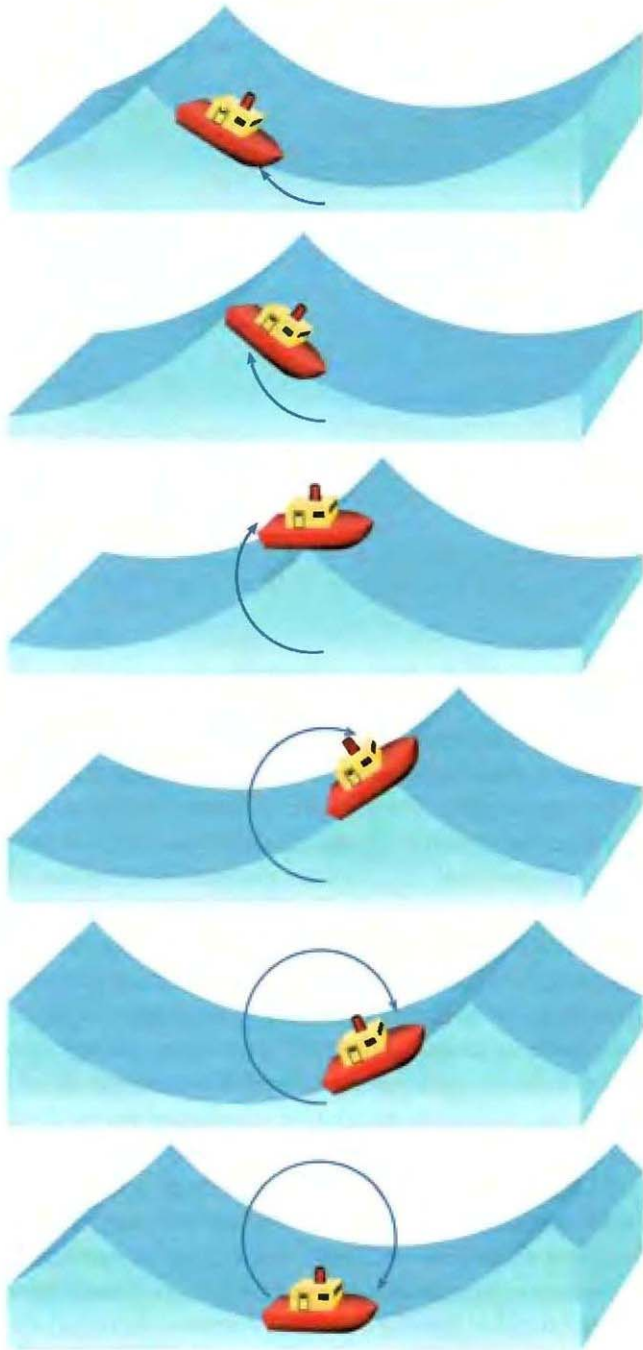
La observación de un objeto que flote sobre las olas revela que no sólo se mueve arriba y abajo, sino que también tiene un ligero movimiento adelante y atrás con cada ola sucesiva. En la Figura 20.4 se muestra que un objeto flotante se mueve hacia delante y hacia atrás a medida que

se aproxima la cresta, arriba y adelante cuando la cresta pasa, abajo y adelante después de la cresta, abajo y atrás cuando se aproxima el valle, y de nuevo arriba y atrás cuando avanza la próxima cresta. Cuando se traza el movimiento del barco de juguete que aparece en la Figura 20.4 al pasar la cresta, puede observarse que el barco se mueve en círculo y regresa esencialmente al mismo lugar. El movimiento orbital circular permite que la forma ondulada (la forma de la ola) avance *a través del agua* mientras que cada partícula de agua que transmite la ola se mueve en círculo. El viento que se mueve a través de un campo de trigo provoca un fenómeno similar: el trigo en sí no se desplaza a través del campo, pero sí lo hacen las ondas.

La energía aportada por el viento al agua es transmitida no sólo a lo largo de la superficie del mar, sino también hacia abajo. Sin embargo, debajo de la superficie, el movimiento circular disminuye rápidamente hasta que, a una profundidad igual a aproximadamente la mitad de la longitud de ola medida desde el nivel de aguas tranquilas, el movimiento de las partículas de agua resulta despreciable. Esta profundidad es conocida como *base del oleaje*. La espectacular disminución de la energía de la ola con la profundidad se muestra en la Figura 20.3 mediante los diámetros rápidamente decrecientes de las órbitas de la partícula de agua.

### Olas en la zona de rompiente

Cuando una ola está en zona de aguas profundas no se ve afectada por la profundidad del agua (Figura 20.5, izquierda). Sin embargo, cuando se aproxima al litoral, el agua se hace más somera e influye en el comportamiento



▲ **Figura 20.4** Los movimientos de un barco de juguete demuestran que la forma de la ola avanza, pero que el agua no avanza de manera perceptible desde su posición original. En esta secuencia, la ola se mueve de izquierda a derecha cuando el barco (y el agua en la cual está flotando) gira en un círculo imaginario.

de la ola. La ola empieza a «sentir el fondo» a una profundidad del agua igual al de la base del oleaje. Esas profundidades interfieren en el movimiento del agua en la base de la ola y ralentizan su avance (Figura 20.5, *centro*).

A medida que la ola avanza hacia el litoral, las olas ligeramente más rápidas se lanzan hacia delante, reduciendo la longitud de la ola. A medida que la velocidad y

## A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

### ¿Qué son las olas mareales?

Las olas mareales, más conocidas como *tsunami* (*tsu* = puerto; *nami* = ola), no tienen nada que ver con las mareas. Son olas de gran longitud de onda, que se mueven rápido, suelen ser grandes y a veces destructivas; se originan a partir de cambios súbitos en la topografía del fondo oceánico. Son provocadas por un desplazamiento de falla submarina, avalanchas submarinas o erupciones volcánicas submarinas. Puesto que los mecanismos que provocan tsunamis suelen ser acontecimientos sísmicos, los tsunamis se denominan acertadamente *olas marinas sísmicas*. En el Capítulo 11, «Los terremotos», se tratan con mayor profundidad las características de los tsunamis y sus efectos destructivos.

la longitud de la ola disminuyen, esta última aumenta su altura. Por último, alcanza un punto crucial cuando la ola es demasiado empinada para mantenerse y el frente de la ola se desploma o *rompe* (Figura 20.5, *derecha*), haciendo que el agua avance encima de la costa.

El agua turbulenta creada por las olas rompientes se denomina *arrastre*. En el margen tierra adentro de la zona de rompiente, la lámina turbulenta del agua creada por las rompientes que asciende por la pendiente de la playa se denomina *batida*. Cuando la energía de la batida se ha disipado, el agua vuelve desde la playa hacia la zona de rompiente, en lo que se conoce como *resaca*.

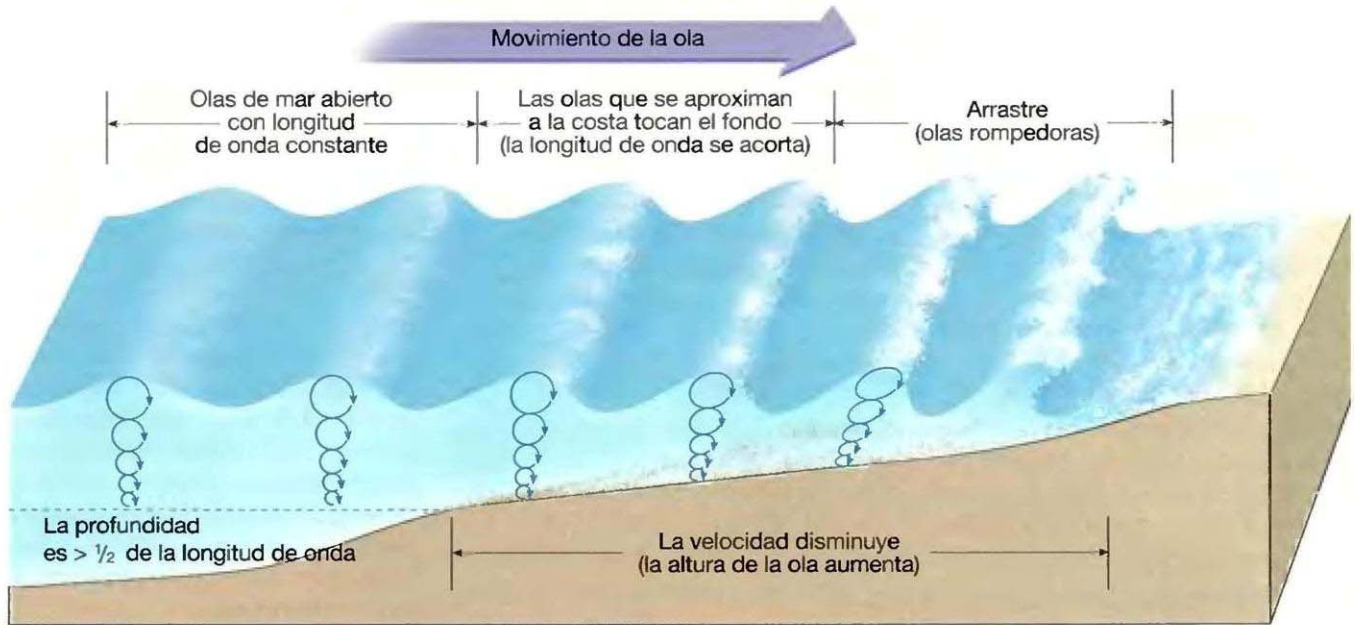
## Erosión causada por las olas



### Líneas de costa

#### ▼ Erosión causada por las olas

Cuando el tiempo es tranquilo la acción de las olas es mínima. Sin embargo, igual que las corrientes de agua realizan la mayor parte de su trabajo durante las inundaciones, las olas llevan a cabo la mayor parte del suyo durante las tormentas (véase Recuadro 20.1). El impacto de las elevadas olas de tormenta contra la costa puede ser pavoroso por su violencia. Cada ola rompiente puede lanzar miles de toneladas de agua contra la tierra, haciendo a veces, literalmente, que el terreno tiemble. Por ejemplo, las presiones ejercidas por las olas atlánticas en invierno alcanzan una media de casi 10.000 kilogramos por metro cuadrado. Durante las tormentas, la fuerza es incluso mayor. Durante una de esas tormentas, una porción de acero y cemento de 1.350 toneladas de un rompeolas fue



▲ **Figura 20.5** Cambios que se producen cuando una ola se mueve sobre el litoral. Las olas tocan el fondo cuando topan con profundidades de agua inferiores a la mitad de la longitud de onda. La velocidad de la ola disminuye y las olas se amontonan contra el litoral, haciendo que la longitud de onda disminuya, lo cual resulta en un aumento de la altura de la ola hasta el punto en el que las olas caen adelante y rompen en la zona de arrastre.

desgarrada del resto de la estructura y desplazada a una posición inútil hacia la costa en Wick Bay, Escocia. Cinco años después la unidad de 2.600 toneladas que sustituyó a la primera siguió un destino similar.

Hay muchas historias de este tipo que demuestran la gran fuerza de las olas rompientes. No sorprende que se abran rápidamente grietas y hendiduras en los acantilados, los diques, los rompeolas y cualquier otra cosa que esté sometida a esos enormes impactos. El agua es forzada al interior de cualquier abertura, lo que hace que el aire de las grietas se comprima mucho por el empuje de las olas. Cuando la ola baja, el aire se expande rápidamente, desalojando fragmentos de roca, aumentando de tamaño y extendiendo las fracturas.

Además de la erosión causada por el impacto y la presión de la ola, la **abrasión** (la acción de sierra y molienda del agua armada con fragmentos de roca) es también importante. De hecho, la abrasión es probablemente más intensa en la zona de rompiente que en cualquier otro entorno. Las piedras lisas y redondas, y los cantos rodados a lo largo de las costas son recordatorios obvios de la incesante acción de molienda de roca contra roca en la zona de rompiente. Además, las olas utilizan esos fragmentos como «herramientas» cuando cortan horizontalmente el terreno.

A lo largo de las líneas litorales compuestas por material no consolidado más que por roca dura, la velocidad de erosión por las olas rompientes puede ser extraordinaria. En zonas de Gran Bretaña, donde las olas tienen la

fácil tarea de erosionar depósitos glaciares de arena, grava y arcilla, la costa ha retrocedido de 3 a 5 kilómetros desde la época de los romanos (hace 2.000 años), barriendo muchos pueblos y lugares antiguos de gran notoriedad.

## Movimiento de la arena de la playa

A veces las playas se denominan «ríos de arena». El motivo es que la energía de las olas rompientes suele hacer que grandes cantidades de arena se muevan a lo largo del fondo de playa y en la zona de arrastre casi en paralelo a la línea de costa. La energía de las olas también hace que la arena se mueva perpendicularmente a la línea litoral (acercándose y alejándose de ella).

### Movimiento perpendicular a la línea de costa

Si alguien permanece de pie en la playa con el agua por los tobillos, observará que la batida y la resaca mueven arena hacia la línea de costa y lejos de ésta. El que se produzca pérdida neta o adición de arena depende del nivel de actividad de las olas. Cuando la actividad de las olas es relativamente suave (olas menos activas), gran parte de la batida penetra en la playa, lo cual reduce la resaca. Por consiguiente, la batida domina y provoca un movimiento neto de arena en el fondo de playa hacia la berma.



### Recuadro 20.1 ▶ El hombre y el medio ambiente

## Los huracanes: el máximo peligro en la costa

Los ciclones tropicales en espiral que en ocasiones tienen velocidades eólicas superiores a los 300 kilómetros por hora se conocen en Estados Unidos como *huracanes*: las mayores tormentas de la Tierra (Figura 20.A). En el Pacífico occidental son denominados *tifones*, y en el océano Índico se llaman simplemente *ciclones*. No importa qué nombre se utilice, estas tormentas se cuentan entre los desastres naturales más destructivos. Cuando un huracán llega a tierra, es capaz de aniquilar las zonas costeras y causar la muerte a decenas de miles de personas.

La gran mayoría de muertes y daños relacionados con los huracanes son provocados por tormentas relativamente infrecuentes aunque potentes. Una tormenta que azotó la confiada población de Galveston, Texas, en 1900, no sólo fue el huracán más mortal que nunca se haya producido en Estados Unidos, sino que es el desastre natural *de cualquier tipo* más mortífero que ha afectado a Estados Unidos en el siglo XX. Más de 8.000 personas murieron. La tragedia de Galveston sucedió mucho antes del desarrollo del radar meteorológico, los satélites y los avio-

nes de reconocimiento. Es muy poco probable que vuelva a producirse una pérdida tan grande de vidas. Sin embargo, las costas estadounidenses son vulnerables. La población se está mudando en masa a zonas cercanas al océano. Se prevé que la proporción de población estadounidense que resida dentro de los 75 kilómetros de costa en 2010 superará el 50 por ciento. La concentración de cantidades tan grandes de habitantes cerca de la línea de costa significa que los huracanes ponen a millones de personas en peligro. Además, los posibles costes de los daños a la propiedad son increíbles.

La cantidad de daños causados por un huracán depende de varios factores, como el tamaño y la densidad de población de la zona afectada y la forma del fondo oceánico cerca de la costa. Por supuesto, el factor más significativo es la fuerza de la propia tormenta. Mediante el estudio de tormentas en el pasado, se ha establecido una escala para clasificar las intensidades relativas de los huracanes. Como se indica en la Tabla 20.A, una tormenta de *categoría 5* es la peor posible, mientras que un huracán de *categoría 1* es el menos grave.

Durante la estación de los huracanes es habitual oír a los científicos, así como a los reporteros, utilizar las cifras de la *escala de huracanes Saffir-Simpson*. El famoso huracán de Galveston que acabamos de mencionar, con vientos que superaban los 209 kilómetros por hora y una presión de 931 milibares, se situaría en la categoría 4. Las tormentas incluidas en la categoría 5 son raras. El huracán Camille, una tormenta que se produjo en 1969 y provocó daños catastróficos a lo largo de la costa del Mississippi, es un ejemplo bien conocido (véase Figura 20.B).

Los daños provocados por los huracanes pueden dividirse en tres categorías: (1) oleada de temporal, (2) daños eólicos e (3) inundación de agua dulce tierra adentro.

### Oleaje de temporal

Sin duda, los daños más devastadores de la zona costera son provocados por el oleaje de temporal (Figura 20.B). No sólo representa una gran parte de las pérdidas



▲ **Figura 20.A** Imagen de satélite del huracán Andrew aproximándose a la costa de Louisiana el 25 de agosto de 1992. El huracán Andrew arrasó el sur de Florida y luego, tras cruzar el golfo de México, azotó Louisiana. A lo largo de su recorrido, la tormenta dio origen a oleadas de temporal de 5,5 metros y a vientos sostenidos máximos de 266 kilómetros por hora. El Andrew provocó daños por el valor de 25.000 millones de dólares y se cobró más de 60 vidas. (Imagen de la NASA.)



**Tabla 20.A** Escala de huracanes Saffir-Simpson

Número de escala (categoría)	Presión central (milibares)	Velocidad del viento (KPH)	Oleada de temporal (metros)	Daños
1	≥980	119-153	1,2-1,5	Mínimos
2	965-979	154-177	1,6-2,4	Moderados
3	945-964	178-209	2,5-3,6	Extensos
4	920-944	210-250	3,7-5,4	Extremos
5	<920	>250	>5,4	Catastróficos

de propiedad en la costa, sino que también es responsable del 90 por ciento del total de muertes causadas por los huracanes. Un *oleaje de temporal* es una bóveda de agua de 65 a 80 kilómetros de ancho que barre la costa cerca del punto donde

el centro (ojo) del huracán recalca. El principal proceso responsable de la creación del oleaje de temporal es la «acumulación» de agua oceánica por parte de las brisas marinas. Los vientos del huracán empujan el agua hacia la costa, lo cual

provoca la elevación del nivel del mar y, a la vez, produce una actividad violenta de las olas.

### Daños eólicos

La destrucción provocada por el viento es quizá el tipo más evidente de daños causados por los huracanes. Para algunas estructuras, la fuerza del viento basta para provocar la ruina total. Las caravanas son particularmente vulnerables. Además, los fuertes vientos pueden crear una peligrosa cortina de derrubios voladores. En las regiones con buenos códigos de construcción, los daños eólicos no suelen ser tan catastróficos como los daños causados por el oleaje de temporal. Sin embargo, los vientos huracanados afectan a una zona mucho mayor que el oleaje de temporal y pueden provocar pérdidas económicas enormes. Por ejemplo, en agosto de 1992, cuando el huracán Andrew azotó el sur de Florida y la costa de Louisiana, los daños (en especial eólicos) superaron los 25.000 millones de dólares. Fue el desastre natural más costoso de la historia de Estados Unidos.

A veces los huracanes producen tornados que contribuyen al poder destructivo de la tormenta. Alrededor de la mitad de los huracanes que recalcan en Estados Unidos producen al menos un tornado. En 1967, el huracán Beulah produjo 141 tornados, ¡el segundo mayor brote jamás registrado!

### Inundación tierra adentro

Las lluvias torrenciales que acompañan a la mayoría de huracanes representan una tercera amenaza significativa: la inundación. Si bien los efectos del oleaje de temporal y los fuertes vientos se concentran en las zonas litorales, las fuertes lluvias pueden afectar a lugares situados a centenares



A.



B.

▲ **Figura 20.B** En 1969 el huracán Camille azotó la costa del Mississippi. Se trató de una infrecuente tormenta de categoría 5. Estas fotografías clásicas documentan la fuerza devastadora de un oleaje de temporal de 7,5 metros del temporal en Pass Christian. A. Los apartamentos Richelieu antes del huracán. Este edificio de tres plantas de aspecto sólido se encontraba justo al otro lado de la carretera de la playa. B. Los mismos apartamentos después del huracán. (Propiedad de Chauncey T. Hinman.)

de kilómetros del litoral durante varios días después de que la tormenta haya perdido sus vientos huracanados.

En septiembre de 1999 el huracán Floyd trajo lluvias torrenciales, fuertes vientos y mar gruesa a una gran parte de la costa atlántica. Más de 2,5 millones de personas fueron evacuadas de sus casas de Florida en dirección al norte hacia las dos Carolinas y más allá. Fue la mayor evacuación en tiempos de paz de la historia de Estados Unidos. Las lluvias torrenciales que cayeron en el suelo ya saturado crearon una inundación tierra adentro devastadora. En total, el Floyd descargó

más de 48 centímetros de lluvia en Wilmington, Carolina del Norte, 33,98 cm en un solo intervalo de 24 horas.

En resumen, los enormes daños y muertes de la zona litoral pueden ser consecuencia del oleaje de temporal, los fuertes vientos y las lluvias torrenciales. Cuando se producen muertes, éstas suelen ser provocadas por los oleajes de temporal, que pueden devastar por completo islas de barrera o zonas en el interior de unos pocos bloques de la costa. Aunque los daños eólicos no suelen ser tan catastróficos como los oleajes de temporal, afectan a una zona mucho mayor.

Cuando las normas de construcción no son adecuados, las pérdidas económicas pueden ser especialmente graves. Dado que los huracanes se debilitan a medida que avanzan tierra adentro, la mayor parte de los daños eólicos se produce en los primeros 200 kilómetros del litoral. Lejos de la costa, una tormenta debilitada puede producir inundaciones extensas mucho después de que los vientos hayan disminuido por debajo de los niveles huracanados. Algunas veces, los daños provocados por inundaciones tierra adentro superan la destrucción causada por los oleajes de temporal.

Cuando predominan las olas muy activas, la playa está saturada por las olas anteriores y, por tanto, una parte mucho menor de la batida penetra. Como consecuencia, la berma se erosiona porque la resaca es fuerte y provoca un movimiento neto de arena que desciende por el fondo de playa.

A lo largo de muchas playas, la actividad de las olas suaves es la norma durante el verano. Por tanto, se desarrolla de manera gradual una amplia berma de arena. Durante el invierno, cuando las tormentas son frecuentes y más potentes, la fuerte actividad de las olas erosiona y reduce la berma. Una berma amplia, que puede haber tardado meses en formarse, puede reducirse espectacularmente en sólo unas pocas horas por las olas muy activas creadas por una fuerte tormenta de invierno.

## A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

*Durante una fuerte actividad de las olas, ¿adónde va la arena de la berma?*

El movimiento orbital de las olas es demasiado somero para alejar mucho la arena del fondo de playa. Por consiguiente, la arena se acumula justo detrás del final de la zona de arrastre y forma una o más barras de arena de prerribera denominadas barras de arena litorales.

## Refracción de las olas

La flexura de las olas, denominada **refracción de las olas**, desempeña un papel importante en los procesos de la línea litoral (Figura 20.6). Afecta a la distribución de la energía a lo largo de la costa y, por tanto, influye mucho



▲ **Figura 20.6** Flexura de ola alrededor del límite de una playa en Stinson Beach, California. (Foto de James E. Patterson.)

sobre dónde y en qué medida tendrán lugar la erosión, el transporte de sedimento y su depósito.

Las olas rara vez se aproximan directamente a la costa. Antes bien, la mayoría de las olas se mueve hacia la costa siguiendo un determinado ángulo. Sin embargo, cuando alcanzan el agua somera de un fondo suavemente inclinado, se doblan y tienden a colocarse en paralelo al litoral. Esta flexura se produce porque la parte de la ola que está más cerca de la costa alcanza el agua superficial y disminuye de velocidad primero, mientras que el extremo que está todavía en aguas profundas continúa moviéndose hacia delante con toda su velocidad. El resultado neto es un frente de ola que puede acercarse casi en paralelo a la costa con independencia de la dirección original de la ola.

Debido a la refracción, el impacto de la ola se concentra contra los laterales y los extremos de los frentes de tierra que se proyectan en el agua, mientras que, en las bahías, el ataque de la ola es más débil. Este ataque

diferencial de las olas a lo largo de líneas de costa irregulares se ilustra en la Figura 20.7. Dado que las olas alcanzan el agua superficial situada delante del cabo antes que en las bahías adyacentes, se arquean en una posición más paralela a la tierra que sobresale y la golpean por los tres costados. Por el contrario, en las bahías, la refracción hace que las olas diverjan y gasten menos energía. En esas zonas de actividad debilitada de las olas, los sedimentos pueden acumularse y formarse playas de arena. Durante largos períodos, la erosión de los cabos y la sedimentación en las bahías producirá una línea de costa irregular.

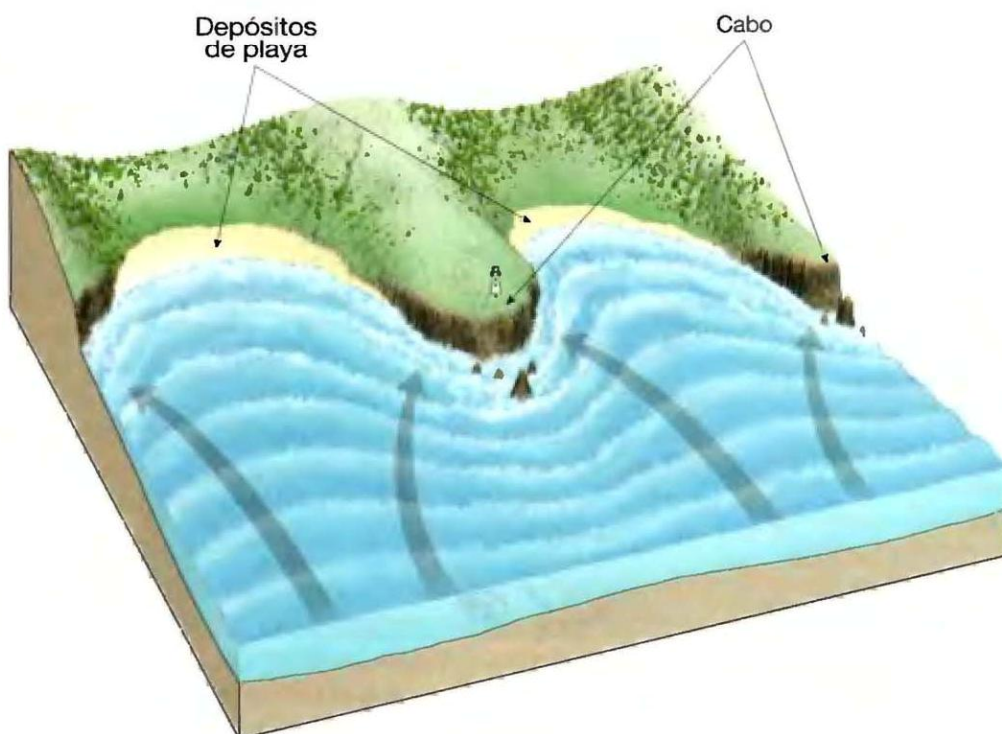
### Deriva y corrientes litorales

Aunque las olas se refractan, la mayoría sigue alcanzando la orilla con un cierto ángulo, aunque ligero. Por consiguiente, la subida precipitada del agua desde cada ola rompe a un ángulo oblicuo a la línea litoral. Sin embargo, la resaca desciende recta por la pendiente de la playa. El efecto de este modelo de movimiento del agua es el transporte de sedimento según un modelo en zigzag a lo largo del fondo de playa (Figura 20.8). Este movimiento se denomina **deriva litoral o de playa**, y puede transportar arena y cantos rodados centenares o incluso miles de metros cada día. No obstante, una velocidad más típica es de 5 a 10 metros por día.

Las olas oblicuas producen también corrientes dentro de la zona de rompiente que fluyen en paralelo a la

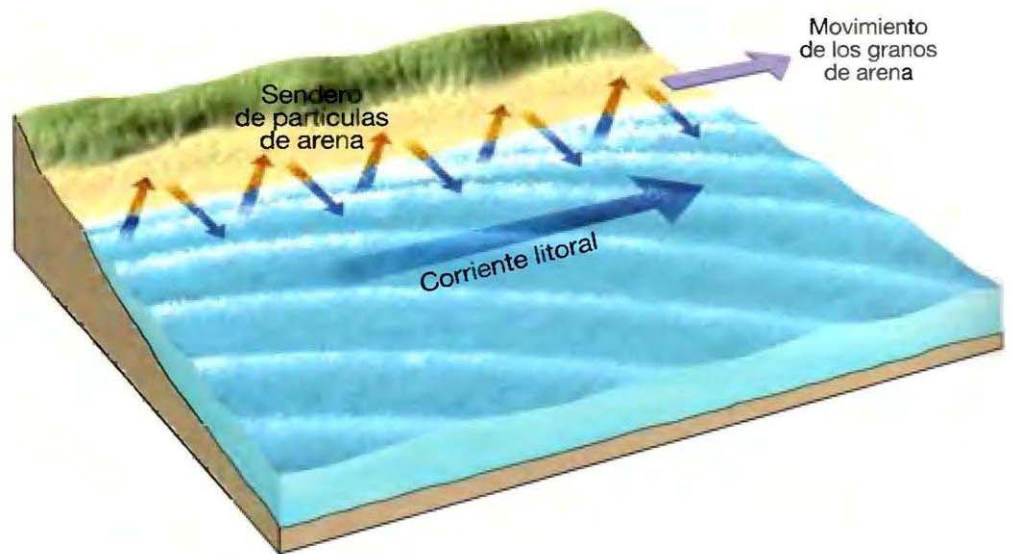
línea de costa y mueven sustancialmente más sedimento que la deriva litoral. Dado que el agua aquí es turbulenta, estas **corrientes litorales** mueven con facilidad la fina arena suspendida y remueven la grava y la arena más grande a lo largo del fondo. Cuando el sedimento transportado por las corrientes litorales se añade a la cantidad movida por la deriva litoral, la cantidad total puede ser muy grande. En Sandy Hook, Nueva Jersey, por ejemplo, la cantidad de arena transportada a lo largo de la costa durante un período de 48 años ha sido de una media de casi 750.000 toneladas al año. Durante un período de 10 años, en Oxnard, California, se movieron más de 1,5 millones de toneladas de sedimento a lo largo de la costa cada año.

Tanto los ríos como las zonas costeras mueven agua y sedimento de una zona (*corriente arriba*) a otra (*corriente abajo*). Por consiguiente, la playa se ha caracterizado a menudo como un «río de arena». La deriva y las corrientes litorales, sin embargo, se mueven en zigzag, mientras que los ríos fluyen en gran parte de una manera turbulenta, arremolinada. Además, la dirección de flujo de las corrientes litorales a lo largo de la línea de costa puede cambiar, mientras que los ríos fluyen en la misma dirección (descendente). La dirección de las corrientes litorales cambia porque la dirección en la que las olas se aproximan a la playa cambia según la estación. Sin embargo, las corrientes litorales fluyen, en general, hacia el sur a lo largo de las costas atlántica y pacífica de Estados Unidos.



◀ **Figura 20.7** Refracción de las olas a lo largo de una línea de costa irregular. Dado que las olas tocan primero el fondo en la parte somera de los cabos, su velocidad disminuye, lo cual hace que las olas se refracten y se alineen casi en paralelo a la línea de costa. Eso hace que la energía de las olas se concentre en los cabos (lo que provoca erosión) y se disperse en las bahías (lo que provoca la sedimentación).

► **Figura 20.8** La deriva litoral y las corrientes litorales se crean por olas que rompen en sentido oblicuo. La deriva litoral se produce cuando las olas entrantes transportan arena en sentido oblicuo y ascendente hacia la playa, mientras que el agua procedente de las olas exhaustas la lleva directamente pendiente abajo de la playa. Movimientos similares se producen a lo largo de la prrribera en la zona de arrastre para crear la corriente litoral. Estos procesos transportan grandes cantidades de material a lo largo de la playa y en la zona de arrastre.



## A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

*¿Las corrientes de resaca son lo mismo que las corrientes litorales?*

No. Las corrientes litorales tienen lugar en la zona de arrastre y se mueven casi en paralelo a la costa. Por el contrario, las corrientes de resaca se producen en perpendicular al litoral y se mueven en la dirección opuesta a la de las olas rompientes. La mayor parte de la resaca de las olas gastadas se abre camino de vuelta al océano abierto como un flujo ilimitado a través del fondo oceánico denominado *flujo en copa*. Sin embargo, una parte del agua que regresa se mueve en dirección al mar en *corrientes de resaca* superficiales más concentradas. Las corrientes de resaca no se desplazan más allá de la zona de arrastre antes de romperse y pueden reconocerse por la manera en la que afectan a las olas que vienen o por el sedimento que suele estar suspendido en la corriente de resaca. También pueden constituir un peligro para los nadadores, que, si se quedan atrapados en ellas, pueden ser alejados de la costa.

## Características de la línea de costa

Puede observarse una fascinante variedad de estructuras de la línea litoral a lo largo de las regiones costeras del mundo. Estas estructuras de la línea litoral varían según el tipo de rocas expuestas a lo largo de la costa, la intensidad de la actividad de las olas, la naturaleza de las corrientes litorales y si la costa es estable, se hunde o se eleva. Los rasgos que deben su origen principalmente al trabajo de la erosión se denominan *formas de erosión*, mien-

tras que las acumulaciones de sedimento producen *formas deposicionales*.

## Formas de erosión

Muchas morfologías costeras deben su origen a procesos erosivos. Estas formas de erosión son habituales a lo largo de la costa accidentada e irregular de Nueva Inglaterra y en las líneas de costa empinadas del litoral occidental de Estados Unidos.

**Acantilados litorales, plataformas de abrasión y rasas** Los **acantilados litorales** se originan mediante la acción erosiva del oleaje contra la base del terreno costero. A medida que progresa la erosión, las rocas que sobresalen por la socavación de la base del acantilado se desmoronan con el oleaje, y el acantilado retrocede. El acantilado en recesión deja detrás una superficie relativamente plana en forma de banco, denominada **plataforma de abrasión**. La plataforma se amplía a medida que las olas continúan su ataque. Algunos de los derrubios producidos por las olas rompientes quedan a lo largo del agua como sedimento en la playa, mientras que el resto es transportado mar adentro. Si una plataforma de abrasión se eleva por encima del nivel del mar debido a las fuerzas tectónicas, se convierte en una **rasa**. Las rasas se reconocen con facilidad por su forma ligeramente inclinada hacia el mar y suelen ser lugares ideales para construir carreteras y edificios en la costa o para la agricultura.

**Arcos y chimeneas litorales** Los frentes de tierra que se extienden en el mar son vigorosamente atacados por las olas como consecuencia de la refracción. El oleaje erosiona selectivamente la roca, gastando a mayor velocidad la roca fracturada más blanda y más elevada. Al principio, se

pueden formar cuevas marinas. Cuando cuevas de lados opuestos de una unidad se unen, se produce un **arco litoral**. Al final, el arco se hunde dejando un resto aislado, o **chimenea litoral**, en la plataforma de abrasión. Con el tiempo, también será consumida por la acción de las olas.

## Formas deposicionales

El sedimento erosionado de la playa es transportado a lo largo de la costa y depositado en zonas donde la energía de las olas es baja. Esos procesos producen una variedad de formas deposicionales.

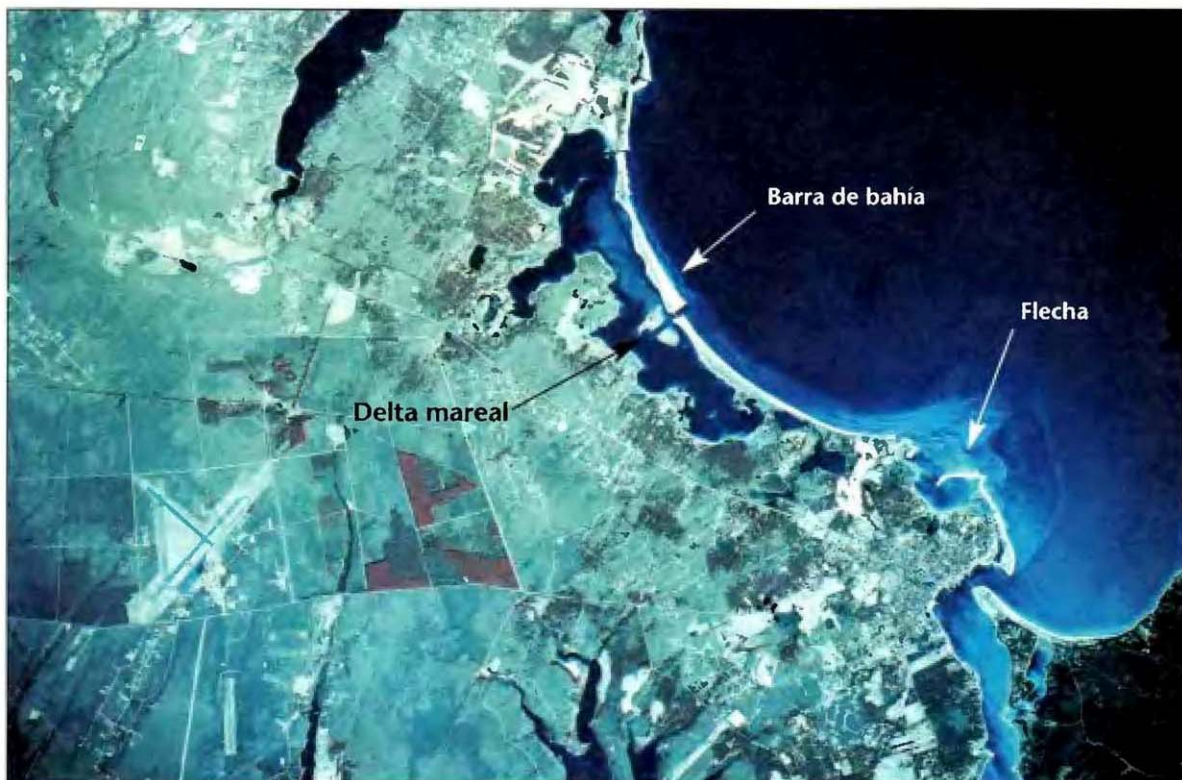
**Flechas, barras y tómbolos** Donde la deriva y las corrientes litorales son activas pueden desarrollarse varias estructuras relacionadas con el movimiento de los sedimentos a lo largo del litoral. Una **flecha** es una acumulación alargada de arena que se proyecta desde la tierra a la desembocadura de una bahía adyacente. A menudo, el extremo situado en el agua se curva hacia la tierra en respuesta a la dirección dominante de la corriente litoral (Figura 20.9). Se aplica la expresión **barra de bahía** a una barra de arena que atraviesa por completo una bahía, cerrándola al mar abierto (Figura 20.9). Estas estructuras tienden a formarse a través de bahías donde las corrientes son débiles, lo que permite que una flecha se extienda de un lado a otro.

Un **tómbolo** (*tombolo* = montón), acumulación de arena que conecta una isla con tierra firme o con otra isla, se forma de una manera muy parecida a una flecha.

**Islas barrera** Las llanuras atlánticas y de la costa del Golfo son relativamente planas y con suave pendiente hacia el mar. La zona litoral se caracteriza por las **islas barrera**. Estas crestas de arena transcurren en paralelo a la costa a distancias comprendidas entre 3 y 30 kilómetros del litoral. Desde Cape Cod, Massachussets, hasta Padre Island, Texas, casi 300 islas barrera bordean la costa (Figura 20.10).

La mayor parte de las islas barrera tiene una anchura comprendida entre 1 y 5 kilómetros y una longitud de 15 a 30 kilómetros. Los elementos más elevados son las dunas de arena, que normalmente alcanzan altitudes de 5 a 10 metros; en unas pocas zonas, las dunas no cubiertas de vegetación tienen altitudes de más de 30 metros. Las lagunas que separan estas estrechas islas de la costa representan zonas de agua relativamente tranquila que permite a la pequeña embarcación que va de Nueva York al norte de Florida evitar las agitadas aguas del Atlántico norte.

Las islas barrera se forman probablemente de varias maneras. Algunas se originan como flechas que, posteriormente, se van separando del continente por la erosión de las olas o por la elevación general del nivel del mar después del último episodio glaciar. Otras se crean cuando las aguas



▲ **Figura 20.9** Imagen desde gran altitud de una flecha bien desarrollada y una barra de bahía a lo largo de la costa de Martha's Vineyard, Massachussets. Nótese también el delta mareal en la laguna adyacente a la ensenada a través de la barra de bahía. (Imagen cortesía de USDA-ASCS.)



▲ **Figura 20.10** Casi 300 islas barrera bordean las costas atlántica y del Golfo. Las islas situadas a lo largo de la costa sur de Texas y a lo largo de la costa de Carolina del Norte son ejemplos excelentes.

turbulentas de la línea de olas rompientes acumulan la arena levantada del fondo. Dado que estas barreras de arena se elevan por encima del nivel del mar, el apilamiento de arena es probablemente consecuencia del trabajo del oleaje de tormenta durante la marea alta. Por último, algunas islas barrera pudieron ser antes crestas de dunas de arena que se originaron a lo largo de la costa durante el último período glacial, cuando el nivel del mar era más bajo. Cuando los glaciares de casquete se derritieron, el nivel del mar se elevó e inundó el área situada detrás del complejo playa-duna.

### El litoral en desarrollo

Una línea litoral experimenta continuas modificaciones con independencia de su configuración inicial. Al principio, las líneas litorales son, en su mayoría, irregulares, aunque el grado de irregularidad y su motivo puedan variar considerablemente de un lugar a otro. A lo largo de una línea litoral caracterizada por una geología variada, el oleaje, de movimientos violentos, puede aumentar al principio su irregularidad porque las olas erosionarán con más facilidad

las rocas más débiles que las más fuertes. Sin embargo, si la línea litoral se mantiene estable, la erosión y la sedimentación marinas acabarán por producir una costa más recta y regular. En la Figura 20.11 se ilustra la evolución de una costa inicialmente irregular. A medida que las olas erosionan los entrantes, creando acantilados y plataformas de abrasión, el sedimento se transporta a lo largo de la costa. Algo del material se deposita en la bahía, mientras que otros derrubios van a formar flechas y barras de bahía. Al mismo tiempo, los ríos llenan las bahías con sedimentos. Por último, resulta una costa generalmente recta y suave.

### Estabilización de la costa



Líneas de costa  
▼ Olas y playas

En la actualidad, la zona costera es un hervidero de actividad humana. Por desgracia, las personas a menudo tratan la línea litoral como si se tratara de una plataforma

estable sobre la cual pueden edificarse estructuras con total seguridad. Esta actitud significa un riesgo tanto para las personas como para la línea litoral porque muchas formas costeras son componentes relativamente frágiles, de vida corta, que resultan dañadas con facilidad por el desarrollo. Y, como sabe cualquiera que haya soportado una tormenta tropical, la línea de costa no es siempre un lugar seguro para vivir (véase Recuadro 20.1).

En comparación con los peligros naturales, como los terremotos, las erupciones volcánicas y los corrimientos de tierra, la erosión de la línea litoral suele percibirse como un proceso más continuo y predecible que parece causar daños relativamente modestos en zonas limitadas. En realidad, la línea litoral es un lugar dinámico que puede cambiar rápidamente en respuesta a las fuerzas naturales. Tormentas excepcionales son capaces de erosionar las playas y los acantilados a velocidades que exceden con mucho la media a largo plazo. Estos estallidos de erosión acelerada pueden tener un efecto significativo sobre la evolución natural de una costa; también pueden tener un profundo impacto sobre las personas que residen en la zona costera. La erosión a lo largo de nuestras costas causa daños significativos a las propiedades. Anualmente se gastan grandes cantidades de dinero no sólo en reparar los daños, sino también en evitar o controlar la erosión. Sin lugar a dudas, la erosión de la línea litoral, que es ya un problema en muchos sitios, se convierte en un problema cada vez más grave a medida que continúa el desarrollo costero extensivo.

Aunque los mismos procesos producen cambios a lo largo de todas las costas, no todas las costas responden de la misma manera. Las interacciones entre los diferentes procesos y la importancia relativa de cada proceso dependen de factores locales. Estos factores son: (1) proximidad de una costa a ríos cargados de sedimentos; (2) grado de actividad tectónica; (3) topografía y composición del terreno; (4) vientos y condiciones meteorológicas predominantes, y (5) configuración de la línea de costa y de las áreas próximas al litoral.

Durante los últimos cien años, la creciente afluencia y demanda de ocio han acarreado un desarrollo sin precedentes en muchas áreas costeras. A medida que ha aumentado el número y el valor de las edificaciones, de la misma manera lo han hecho los esfuerzos para proteger la propiedad del oleaje de tormenta. También, el control de la migración natural de la arena es una lucha constante en muchas áreas costeras mediante la estabilización de la costa. Dicha interferencia puede traducirse en cambios no deseados difíciles y caros de corregir.

## Estabilización firme

Las estructuras construidas para proteger una costa de la erosión o para impedir el movimiento de arena a lo largo

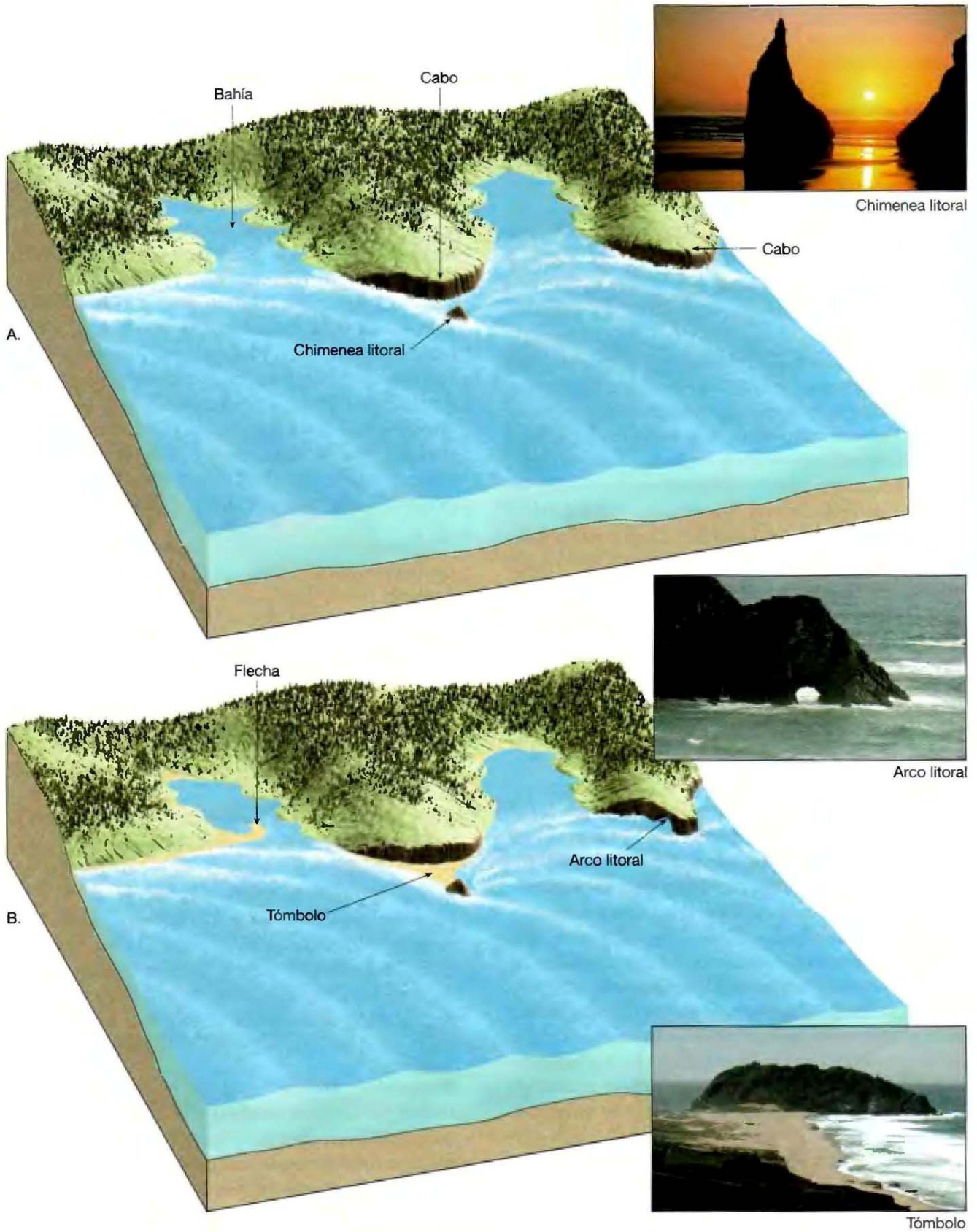
de una playa se denominan **estabilización firme**. La estabilización firme puede adoptar muchas formas y suele provocar resultados predecibles aunque no deseados. La estabilización firme incluye, entre otros, los malecones, los espigones, los rompeolas y los diques.

**Malecones** Tempranamente, en la historia estadounidense, un objetivo principal en las áreas de costa fue el desarrollo y el mantenimiento de los puertos. En muchos casos, esto implicaba la construcción de sistemas de malecones. Los **malecones** suelen construirse en parejas y extenderse en el océano en los lugares de entrada de ríos y puertos. Al confinar el flujo de agua a una zona estrecha, el flujo y el refluo causados por la subida y bajada de las mareas mantienen la arena en movimiento e impiden la sedimentación en el cauce. Sin embargo, como se ilustra en la Figura 20.12, el malecón puede actuar como una presa contra la cual la corriente y la deriva litorales depositan la arena. Al mismo tiempo, la actividad de las olas extrae arena del otro lado. Dado que el otro lado no está recibiendo arena nueva, pronto dejará de haber playa.

**Espigones** Para mantener o ensanchar las playas que están perdiendo arena, a veces se construyen espigones. Un **espigón** es una barrera construida en ángulo recto a la playa para atrapar la arena que se mueve en paralelo a la costa. Los espigones suelen construirse con rocas grandes, pero también pueden estar formados por madera. Estas estructuras, a menudo, realizan su trabajo con tanta eficacia que la corriente litoral más allá del espigón carece en absoluto de arena. Como consecuencia, la corriente erosiona la arena de la playa en el lado a favor de la corriente del espigón.

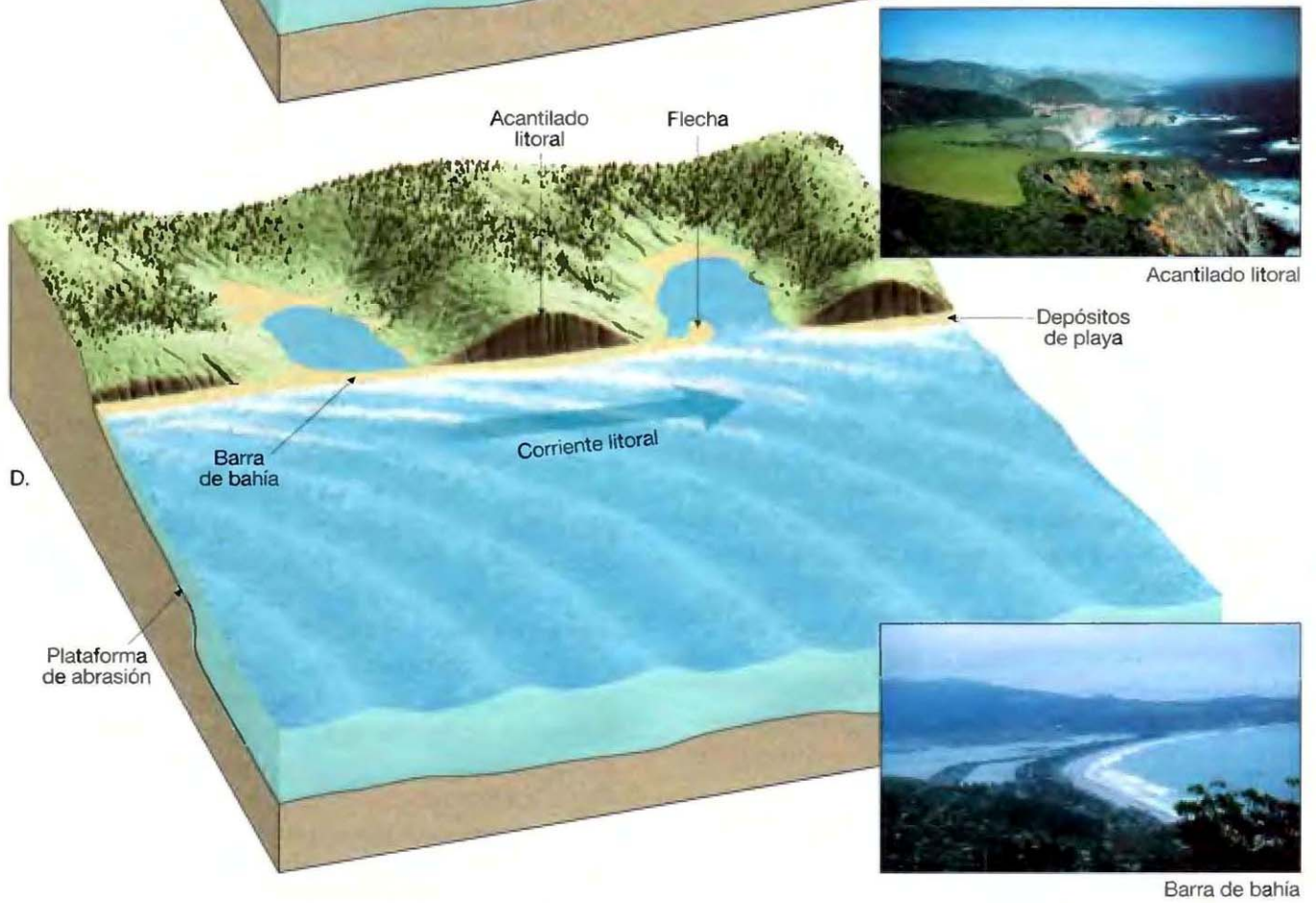
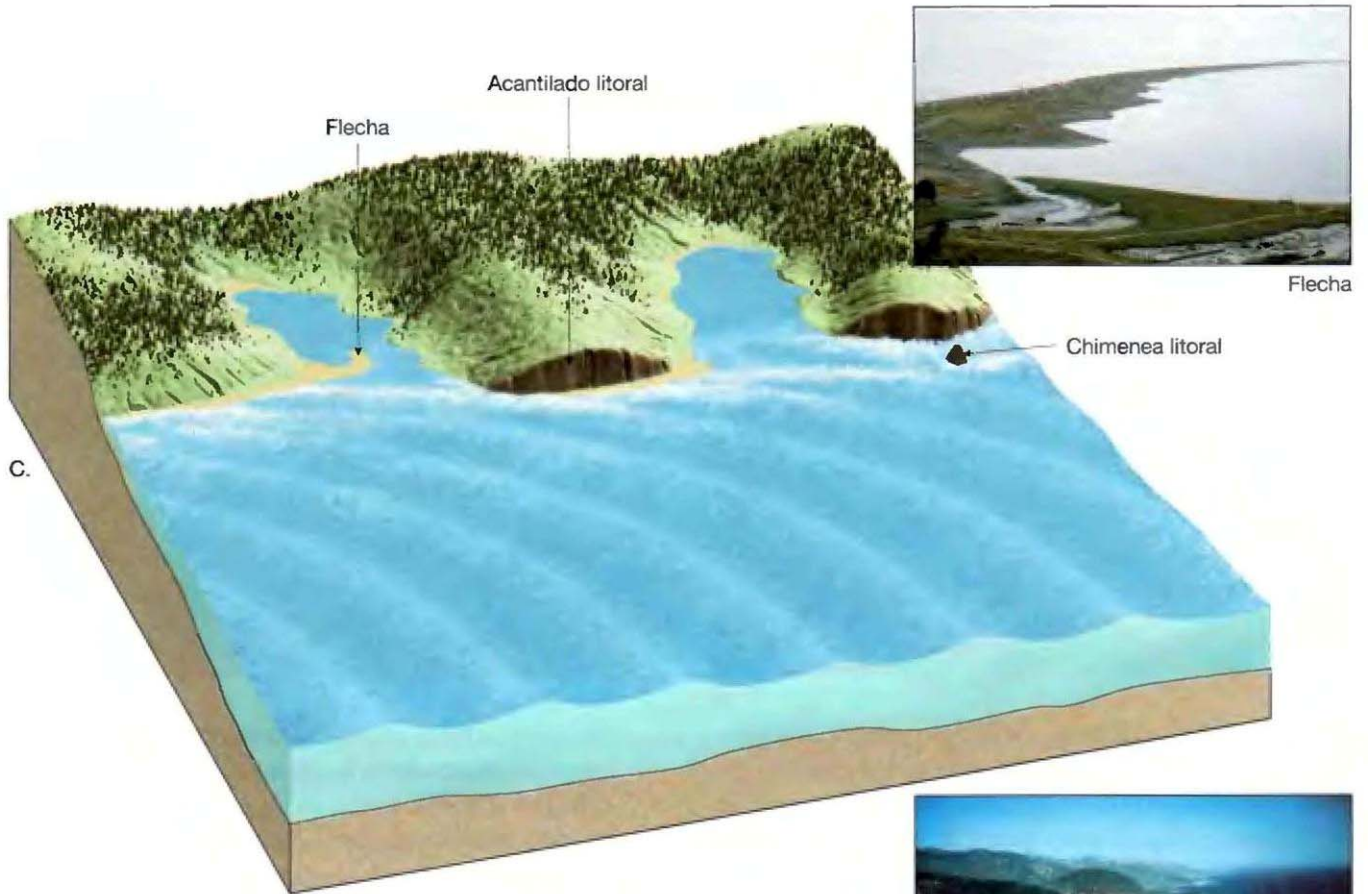
Para compensar este efecto, los propietarios de construcciones situadas corriente abajo de la estructura pueden levantar espigones en su propiedad. De esta manera, se multiplica el número de espigones, lo que da lugar a un *campo de espigones*. Un ejemplo de esta proliferación es la línea de costa de Nueva Jersey, donde se han edificado centenares de estas estructuras. Como se ha demostrado que los espigones no proporcionan a menudo una solución satisfactoria, ya no son el método preferido para mantener a raya la erosión de las playas.

**Rompeolas y diques** La estabilización firme puede construirse también en paralelo a la línea de costa. Una estructura de este tipo es un **rompeolas**, cuyo propósito es proteger los barcos de la fuerza de las grandes olas rompiendo creando una zona de agua tranquila cerca de la línea de costa. Sin embargo, cuando se hace esto, la reducción de la actividad de las olas a lo largo de la costa por detrás de la estructura puede permitir la acumulación de arena. Si esto ocurre, la dársena acabará llenándose de arena mientras que la playa corriente abajo se erosiona y

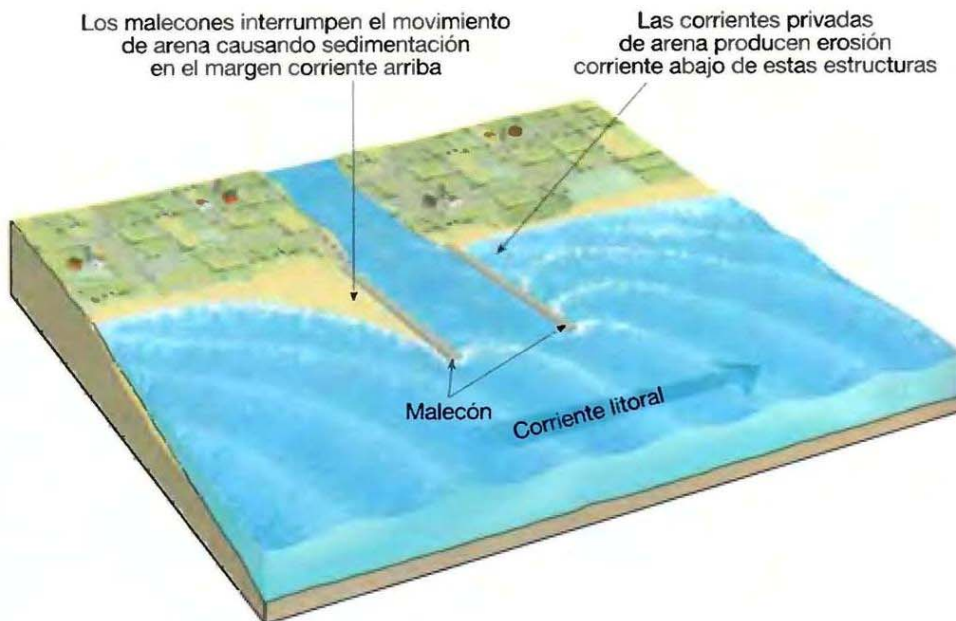


▲ **Figura 20.11** Estos diagramas ilustran los cambios que pueden tener lugar con el tiempo a lo largo de una línea de costa inicialmente irregular que se mantiene relativamente estable. La línea de costa mostrada en la parte A evoluciona gradualmente a B, luego a C y luego a D. El diagrama sirve también para ilustrar muchas de las formas descritas en la sección sobre características de la línea litoral. (Fotos de E. J. Tarbuck, excepto la foto de un acantilado litoral, de A. P. Trujillo/APT Photos.)





► **Figura 20.12** Se construyen malecones en las entradas a los ríos y los puertos, y están pensados para evitar la sedimentación en el cauce de navegación. Los malecones interrumpen el movimiento de la arena realizado por la deriva de la playa y las corrientes litorales. Se produce erosión de la playa corriente abajo del lugar donde se encuentra la estructura.



retrocede. En Santa Mónica, California, donde la construcción de un rompeolas originó este problema, la ciudad tuvo que instalar una draga para eliminar la arena de la zona de agua tranquila protegida y depositarla hacia debajo de la playa, donde las corrientes litorales y la deriva de playa podrían volver a poner en circulación la arena.

Otro tipo de estabilización firme construida paralela a la línea de costa es un **dique**, que se diseña para acorazar la costa y defender la propiedad de la fuerza de las olas rompientes. Las olas dispersan mucha de su energía atravesando la playa abierta. Los diques acortan este proceso reflejando la fuerza de las olas no gastadas en dirección al mar. Como consecuencia, la playa del lado situado en la dirección del mar del dique experimenta una significativa erosión y puede, en algunos casos, ser eliminada del todo. Una vez reducida la anchura de la playa, el dique es sometido a un bombardeo incluso mayor por parte de las olas. Finalmente este bombardeo hará que se caiga el muro y deberá construirse uno más grande y caro para reemplazarlo.

Se cuestiona cada vez más la cordura de construir estructuras protectoras transitorias a lo largo de las líneas de costa. Las opiniones de muchos científicos e ingenieros especializados en este tema se expresan en el siguiente extracto de un artículo que se presentó en una conferencia sobre la erosión de la línea de costa estadounidense:

Resulta ahora evidente que la interrupción del retroceso de la línea litoral con estructuras protectoras beneficia sólo un poco y degrada gravemente o destruye la playa natural y el valor que tiene para la mayoría. Las estructuras protectoras desvían de manera transitoria la energía del océano de las propiedades priva-

das, pero normalmente concentran esa energía sobre las playas naturales adyacentes. Muchas interrumpen el flujo natural de arena en las corrientes costeras, robando a muchas playas la arena de sustitución que les es vital\*.

### Alternativas a la estabilización dura

Blindar la costa con estabilización firme tiene varios inconvenientes posibles, como el coste de la estructura y la pérdida de arena en la playa. Entre las alternativas a la estabilización firme se cuentan la alimentación de playa y el traslado.

**Alimentación de playa** La **alimentación de playa** representa una aproximación para estabilizar las arenas de la línea de costa sin estabilización firme. Como indica la propia expresión, esta práctica significa simplemente la adición de grandes cantidades de arena al sistema de playas (Figura 20.13). Al crear playas en dirección al mar, se mejoran a la vez la calidad de la playa y su protección contra las tormentas. La alimentación de playa, sin embargo, no es una solución permanente al problema de la reducción de las playas. Los mismos procesos que eliminaron la arena la primera vez acabarán eliminando la arena de sustitución también. Además, la alimentación de playa es muy cara porque deben transportarse enormes volúmenes de arena a la playa desde las zonas litorales, próximas a los ríos o de otras fuentes.

\* «Strategy for Beach Preservation Proposed», *Geotimes* 30 (núm. 12, diciembre de 1985), 15.



A.



B.

▲ **Figura 20.13** Miami Beach. A. Antes de la alimentación de playa y B. Después de la alimentación de playa. (Cortesía del Cuerpo de Ingenieros del Ejército estadounidense, distrito de Vicksburg.)

En algunos casos, la alimentación de playa puede inducir efectos ambientales no deseados. Por ejemplo, el volver a llenar la playa Waikiki, Hawai, precisó la sustitución de arena calcárea gruesa por arena calcárea más blanda y fangosa (lodosa). La destrucción de la arena blanda por las olas rompientes aumentó la turbidez del agua y destruyó los arrecifes de coral situados a corta distancia de la costa. En Miami Beach, el aumento de la turbidez dañó también las comunidades coralinas locales.

La alimentación de playa parece ser una solución viable desde el punto de vista económico a largo plazo para el problema de conservación de la playa sólo en áreas donde exista un desarrollo denso, grandes suministros de arena, energía de las olas relativamente baja y preocupaciones ambientales reconciliables. Por desgracia, pocas áreas poseen todos estos atributos.

**Traslado** En lugar de construir estructuras como espigones y diques para mantener la playa en su lugar, o añadir arena para rellenar las playas erosionadas, existe otra opción. Muchos científicos y planificadores de la costa están reclamando una política que pase de proteger y reconstruir las playas y las propiedades costeras en áreas de gran riesgo a *trasladar* los edificios dañados por la tormenta en esos lugares y dejar que la naturaleza recupere la playa (véase Recuadro 20.2). Este enfoque es similar al adoptado por el gobierno federal para las llanuras de inundación de los ríos después de las devastadoras inundaciones del

río Mississippi de 1993 en las cuales se abandonaron las estructuras vulnerables y se situaron en un terreno más alto y más seguro.

Estas propuestas, por supuesto, son controvertidas. La gente con inversiones importantes cerca de la costa se estremece ante la idea de no volver a edificar y defender las estructuras costeras de la furia erosiva del mar. Otros, sin embargo, sostienen que, con la elevación del nivel del mar, el impacto de las tormentas costeras no hará más que empeorar en las décadas venideras. Este grupo defiende el abandono y traslado de las estructuras dañadas a menudo para mejorar la seguridad personal y reducir los costes. No cabe duda de que estas ideas concentrarán mucho del estudio y los debates cuando los estados y las comunidades evalúen y revisen las políticas de uso del terreno costero.

## Problemas de erosión a lo largo de las costas estadounidenses

La línea litoral a lo largo de la costa pacífica de Estados Unidos es notablemente diferente de la que caracteriza las regiones costeras atlánticas y de la costa del Golfo. Algunas de las diferencias están relacionadas con la tectónica de placas. La costa occidental representa el borde guía de la placa norteamericana y, debido a ello, experimenta levantamiento y deformación activa. Por el contrario, la costa este es una región tectónicamente tranquila que está



### Recuadro 20.2 ▶ El hombre y el medio ambiente

## La mudanza del siglo: la recolocación del faro del cabo Hatteras\*

A pesar de los esfuerzos por proteger las estructuras demasiado próximas a la costa, todavía pueden estar en peligro de ser destruidas por las líneas de costa en retroceso y el poder destructivo de las olas. Éste fue el caso de uno de los puntos de referencia más prominentes de Estados Unidos: el faro rayado del cabo Hatteras, en Carolina del Norte, que tiene 21 plantas de altura y es el faro más alto del país.

El faro se construyó en 1870 en la isla barrera del cabo Hatteras a 457 metros de la línea de costa para guiar a los marineros a través de los peligrosos bajíos litorales conocidos como el «Cementerio del Atlántico». Conforme la isla barrera empezó a migrar hacia el continente, su playa se redujo. Cuando las olas empezaron a chocar a sólo 37 metros de su base de ladrillo y granito, preocupó el hecho de que incluso un huracán de fuerza moderada podría provocar la suficiente erosión de la playa como para derribar el faro.

En 1970 la Marina estadounidense construyó tres espigones delante del faro en un esfuerzo por proteger la playa de la erosión ulterior. Al principio, los espigones ralentizaron la erosión, pero interrumpieron el flujo de arena en la zona de rompiente, lo cual provocó el allanamiento de las dunas próximas y la formación de una bahía al sur del faro. Los intentos de aumentar la anchura de la playa delante del faro fueron, entre otros, la alimentación de playa y los lechos litorales artificiales de algas; ambos intentos de ensanchar la playa de manera sustancial fracasaron. En los años 80, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército propuso construir un dique masivo de piedra alrededor del faro, pero decidió que la costa erosionada acabaría retirándose por debajo de la estructura, dejándola des-

amparada en el mar en su propia isla. En 1988 la Academia Nacional de Ciencias determinó que la línea de costa que se extiende delante del faro se retiraría hasta destruir el faro y recomendó el traslado de la torre, de la misma manera que se había hecho con faros más pequeños. En 1999, el Servicio del Parque Nacional, que es propietario del faro, acabó autorizando el traslado de la estructura a un lugar más seguro.

El traslado del faro, que pesa 4.395 toneladas métricas, se llevó a cabo recortándolo desde su base y depositándolo con cuidado en una plataforma de vigas de acero colocadas en carretillas con ruedas. Una vez sobre la plataforma, fue transportado a lo largo de una vía de acero especialmente diseñada utilizando una serie de martillos hidráulicos. Se desbrozó un pasillo de vegetación para

formar una pista a lo largo de la cual el faro se desplazaba 1,5 metros cada vez; se desmontaba la vía dejada atrás y se montaba de nuevo delante de la torre a medida que esta avanzaba. En menos de un mes, el faro fue trasladado con cautela 884 metros desde su posición original, convirtiéndolo en una de las mayores estructuras trasladada satisfactoriamente.

Después de su traslado de 12 millones de dólares, ahora el faro se encuentra en un bosque de robles y pinos (Figura 20.C). Aunque ahora se sitúa más tierra adentro, la elevación ligeramente más alta de la luz lo hace visible desde el mar, donde continúa advirtiendo a los marineros de los peligrosos bajíos. A la velocidad actual de retroceso de la línea de costa, el faro debería estar a salvo de la amenaza de las olas durante al menos otro siglo.



▲ **Figura 20.C** Cuando el faro del cabo Hatteras de Carolina del Norte fue amenazado por la erosión de la línea de costa en 1999, fue trasladado a 488 metros de la línea de costa. (Foto de Drew Wilson © 1999, *Virginian-Pilot*.)

\* El profesor Alan P. Trujillo, de Palomar College, preparó este recuadro.

lejos de cualquier borde de placa activa. Debido a esta diferencia geológica básica, la naturaleza de los problemas de erosión a lo largo de la costa es diferente a los dos lados de Norteamérica.

**Costas atlántica y del Golfo** Gran parte del desarrollo costero a lo largo de las costas atlántica y del Golfo se ha producido en islas barrera. Normalmente, las islas barrera, también denominadas *playas barrera* o *barreras costeras*,

consisten en una playa amplia que está cubierta por dunas y separada del continente por lagunas pantanosas. Las amplias extensiones de arena y la exposición al océano han transformado las islas barrera en sitios extraordinariamente atractivos para el desarrollo. Por desgracia, el desarrollo ha tenido lugar más deprisa que nuestro conocimiento sobre la dinámica de las islas barrera.

Dado que las islas barrera miran al océano abierto, reciben toda la fuerza de las grandes tormentas que golpean la costa. Cuando se produce una tormenta, las barreras absorben la energía de las olas fundamentalmente a través del movimiento de la arena. Este proceso y el dilema que produce se han descrito como sigue:

Las olas pueden mover la arena desde la playa a áreas mar adentro o, por el contrario, a las dunas; pueden erosionar las dunas, depositando la arena en la playa o llevándola hacia el mar; o pueden transportar la arena desde la playa y las dunas a las ciénagas de detrás de la barrera, un proceso conocido como lavado superficial. El factor común es el movimiento. Exactamente igual a como una caña flexible puede sobrevivir a un viento que destruye un roble, las barreras sobreviven a huracanes no a través de una fuerza incommensurable, sino adelantándose a la tormenta.

Esta imagen cambia cuando se levanta una barrera para la construcción de hogares o a modo de recurso. Las olas de tormenta que previamente saltaban con furia y sin perjuicio a través de los huecos que quedaban entre las dunas ahora encuentran edificios y carreteras. Además, dado que la naturaleza dinámica de las barreras se percibe fácilmente sólo durante las tormentas, los propietarios de las casas tienden a atribuir el daño a una tormenta concreta, más que a una movilidad básica de las barreras costeras. Al estar en juego sus hogares o sus inversiones, es más probable que los residentes busquen mantener la arena en su lugar y las olas en la bahía que admitir que no fue adecuado iniciar el desarrollo urbanístico en ese lugar\*.

**Costa del Pacífico** Al contrario que las llanuras costeras atlánticas y del Golfo, amplias y de suave pendiente, gran parte de la costa del Pacífico se caracteriza por playas relativamente estrechas que están cubiertas por acantilados escarpados y cordilleras montañosas. Recordemos que el borde occidental norteamericano es una región más escarpada y tectónicamente activa que el borde oriental. Debido al levantamiento continuo, un ascenso del nivel del mar en el oeste no es tan fácilmente aparente. No

obstante, como los problemas de erosión de la línea litoral a los que se enfrentan las islas barrera del este, las dificultades de la costa oeste también derivan en gran medida de la alteración de un sistema natural por el ser humano.

Un problema importante con el que se enfrenta la costa del Pacífico, y especialmente porciones del sur de California, es un estrechamiento significativo de muchas playas. La mayor parte de la arena de muchas de esas playas es suministrada por ríos que la transportan de las montañas a la costa. Con los años, este flujo natural de material hasta la costa ha sido interrumpido por las presas construidas para el regadío y control de las inundaciones. Los embalses atrapan eficazmente la arena que, de lo contrario, alimentaría el entorno de la playa. Cuando las playas eran más anchas, servían para proteger los acantilados de la fuerza de las olas de tormenta. Ahora, sin embargo, las olas atraviesan las reducidas playas sin perder mucho de su energía y producen una erosión más rápida en los acantilados marinos.

Aunque el retroceso de los acantilados proporciona material para sustituir algo de la arena atrapada detrás de las presas, también pone en peligro las casas y las carreteras construidas en los farallones. Además, la construcción sobre los acantilados agrava el problema. La urbanización aumenta la escorrentía que, si no se controla con cuidado, puede provocar una grave erosión en los farallones. El césped y los jardines de riego añaden cantidades significativas de agua a la pendiente. Esta agua percola hacia la base del acantilado, donde puede surgir en pequeños rezumaderos. Esta acción reduce la estabilidad de la pendiente y facilita los procesos gravitacionales.

La erosión de la línea de costa a lo largo del Pacífico varía considerablemente de un año para otro, en gran medida debido al desarrollo esporádico de tormentas. Por consiguiente, cuando se producen los episodios infrecuentes, pero graves, de erosión, se atribuye el daño a las inusuales tormentas y no al desarrollo costero o a las situadas a grandes distancias. Si, como se predice, el nivel del mar se eleva a un ritmo creciente en los años venideros, cabe esperar un aumento de la erosión de las líneas de costa y de la retirada de los acantilados a lo largo de muchas partes de la costa del Pacífico (véase Recuadro 20.3).

## Clasificación de las costas

La gran variedad de líneas de costa demuestra su complejidad. De hecho, para entender cualquier área costera concreta, deben considerarse muchos factores, entre ellos los tipos de roca, el tamaño y la dirección de las olas, la frecuencia de las tormentas, las mareas y la topografía litoral. Además, prácticamente todas las zonas costeras se

\* Frank Lowenstein, «Beaches or bedrooms - The Choice as Sea Level Rises», *Oceanus* 28 (núm. 3, otoño 1985), 22.



### Recuadro 20.3 ► El hombre y el medio ambiente

## La vulnerabilidad de la costa a la elevación del nivel del mar

La actividad humana, en especial la combustión de los combustibles fósiles, ha ido añadiendo grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases a la atmósfera durante 200 años o más. La perspectiva es que las emisiones de estos gases continuarán aumentando durante el siglo XXI. Una consecuencia de este cambio en la composición de la atmósfera es un incremento del efecto invernadero de la Tierra, con el consiguiente aumento de las temperaturas mundiales. Durante el siglo XXI, las temperaturas mundiales medias aumentaron alrededor de 0,6 °C. Durante el siglo XXI, se prevé que el aumento será considerablemente mayor\*.

Un probable impacto del calentamiento global inducido por el ser humano es una elevación del nivel del mar. ¿Qué relación tiene la atmósfera más caliente con una elevación mundial del nivel del mar? La conexión más evidente (la fusión de los glaciares) es importante pero *no* el factor más significativo. Es más significativo el hecho de que una atmósfera más caliente provoca un aumento del volumen del océano debido a la expansión térmica. Las temperaturas del aire más elevadas calientan las capas superiores adyacentes del océano, lo que a su vez hace que el agua se expanda y el nivel del mar se eleve.

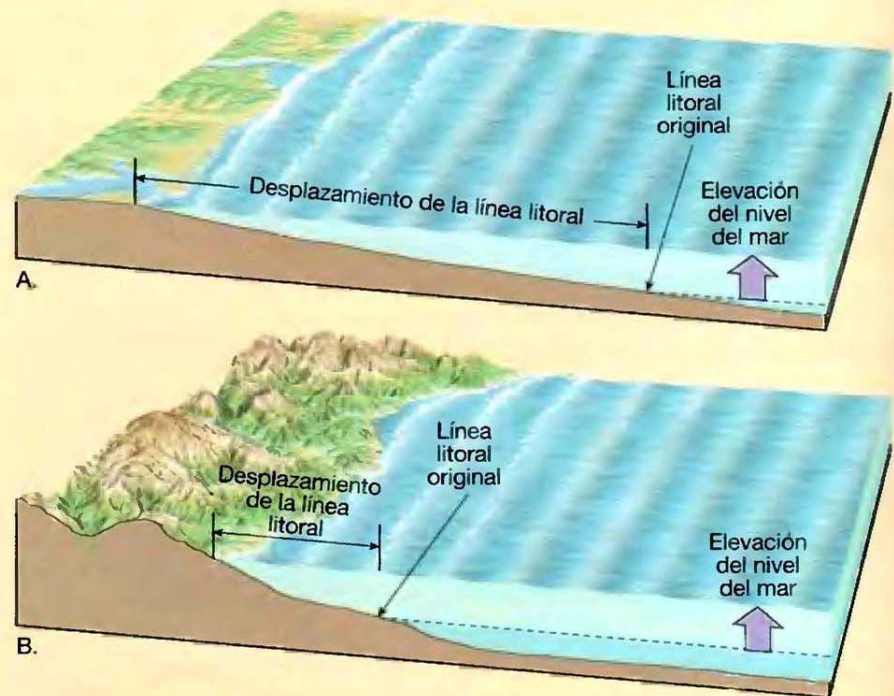
La investigación indica que el nivel del mar se ha elevado de 10 a 25 centímetros durante el siglo pasado y que la tendencia continuará a un ritmo acelerado. En algunos modelos se indica que el aumento puede aproximarse o incluso superar los 50 centímetros en 2100. Un cambio de este tipo puede parecer modesto, pero los científicos se dan cuenta de que cualquier elevación del nivel del mar a lo largo de una línea de costa *ligeramente* inclinada,

como las costas atlántica y del Golfo de Estados Unidos, llevará a una erosión significativa y a la inundación tierra adentro permanente y grave (Figura 20.D). Si eso sucede, muchas playas y tierras húmedas desaparecerán, y la civilización litoral quedará gravemente afectada.

Dado que la elevación del nivel del mar es un fenómeno gradual, puede pasar desapercibido a los habitantes de la costa como un factor importante que contribuye a los problemas de erosión de la línea litoral. Antes bien, se culpará a otras fuerzas, en especial a la actividad de los temporales. Aunque una tormenta determinada puede ser la causa inmediata, la magnitud de su destrucción puede ser consecuencia de la elevación relativa-

mente pequeña del nivel del mar que permitió que la potencia de la tormenta atravesara una zona de tierra mucho mayor.

Uno de los problemas actuales más desafiantes para los especialistas en costas es determinar la respuesta física de la línea de costa a la elevación del nivel del mar. La predicción del retroceso de la línea de costa y las velocidades de pérdida de tierra es esencial para formular estrategias de tratamiento del litoral. Hasta hoy, la planificación a largo plazo para las líneas de costa estadounidenses ha sido poco sistemática, si es que lo ha sido. Por consiguiente, el desarrollo continúa sin una consideración adecuada de los posibles costes de la erosión, la inundación y los daños causados por los temporales.



▲ **Figura 20.D** La inclinación de una línea de costa es esencial para determinar el grado en el que los cambios del nivel del mar la afectarán. A. Cuando la inclinación es ligera, los pequeños cambios del nivel del mar provocan un desplazamiento sustancial. B. La misma elevación del nivel del mar a lo largo de un litoral empinado provoca sólo un pequeño desplazamiento de la línea de costa.

\* En la sección «El dióxido de carbono y el calentamiento global» del Capítulo 21 se amplía este tema.

vieron afectadas por la elevación del nivel del mar en todo el mundo que acompañó la fusión de la Edad de Hielo que se produjo al final del Pleistoceno. Por último, deben tenerse en cuenta los acontecimientos tectónicos

que elevan o hacen descender el terreno o cambian el volumen de las cuencas oceánicas. El gran número de factores que influyen en las zonas costeras dificultan la clasificación de las líneas de costa.

Muchos geólogos clasifican las costas en función de los cambios que se han producido con respecto al nivel del mar. Esta clasificación, normalmente utilizada, divide las costas en dos categorías muy generales: de emersión y de inmersión. Las **costas de emersión** se desarrollan o bien porque un área experimenta levantamiento, o bien como consecuencia de un descenso del nivel del mar. A la inversa, las **costas de inmersión** se crean cuando el nivel del mar se eleva o cuando la tierra adyacente al mar se hunde.

## Costas de emersión

En algunas áreas, la costa es claramente de emersión porque la tierra que se eleva o el nivel del agua que desciende dejan expuestos los acantilados litorales y las plataformas de abrasión por encima del nivel del mar. Son ejemplos excelentes de ello porciones de la costa de California donde se ha producido levantamiento en el pasado geológico reciente. Las plataformas de abrasión elevada también ilustran esta situación. En el caso de Palos Verdes Hills, al sur de Los Ángeles, existen siete niveles diferentes de rasa, lo que indica siete episodios de levantamiento. El siempre persistente mar está cortando ahora una nueva plataforma de abrasión en la base del acantilado. Si continúa el levantamiento, también se convertirá en una rasa elevada.

Otros ejemplos de costas de emersión son las regiones que estuvieron una vez enterradas debajo de los grandes glaciares de casquete. Cuando los glaciares estaban presentes, su peso deprimía la corteza; cuando el hielo se derritió, la corteza empezó gradualmente a levantarse. Por consiguiente, ahora pueden encontrarse rasgos de líneas de costa prehistóricas por encima del nivel del mar. La región de la bahía Hudson de Canadá es un área de este tipo, porciones de la cual siguen elevándose a un ritmo de más de un centímetro al año.

## Costas de inmersión

En contraste con los ejemplos previos, otras áreas costeras muestran signos definitivos de inmersión. La línea de una costa que ha estado sumergida en el pasado relativamente reciente suele ser muy irregular porque el mar inunda normalmente los tramos inferiores de los valles fluviales, fluyendo en el océano. Sin embargo, las lomas que separan los valles permanecen por encima del nivel del mar y se proyectan en el mar como frentes de tierra. Estas desembocaduras fluviales inundadas, que se denominan **estuarios** (*aestus* = marea), caracterizan muchas costas actuales. A lo largo de la línea de costa atlántica, las bahías Chesapeake y Delaware son ejemplos de grandes estuarios creados por inmersión (Figura 20.14). La pintoresca



▲ **Figura 20.14** Grandes estuarios a lo largo de la costa este de Estados Unidos. Las porciones inferiores de muchos valles fluviales se sumergieron como consecuencia de la elevación del nivel del mar que siguió al final del período glacial cuaternario, creando grandes estuarios como la bahía Chesapeake y la bahía Delaware.

resca costa de Maine, particularmente en las cercanías del Parque Nacional Acadia, es otro excelente ejemplo de un área que fue inundada por el levantamiento posglaciar del nivel del mar y transformada en una línea de costa muy irregular.

Téngase en cuenta que la mayoría de las costas tiene historias geológicas complicadas. Con respecto al nivel del mar, muchas han emergido y luego se han hundido

varias veces. Cada vez pueden conservar algo de las características creadas durante la situación previa.

## Mareas

Las **mareas** son los cambios diarios de elevación de la superficie del océano. Su elevación y rítmica caída a lo largo de las líneas de costa se conoce desde la antigüedad. Además de las olas, son los movimientos oceánicos más fáciles de observar (Figura 20.15).

Aunque conocidas durante siglos, las mareas no fueron explicadas de manera satisfactoria hasta que Isaac Newton les aplicó la ley de la gravitación. Newton demostró que hay una fuerza de atracción mutua entre dos cuerpos, y que, dado que los océanos son libres para moverse, son deformados por esta fuerza. Por consiguiente, las mareas oceánicas resultan de la atracción gravitacional ejercida sobre la Tierra por la Luna y, en menor proporción, por el Sol.

## A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Dónde se producen las mareas más grandes del mundo?

El mayor *intervalo mareal* del mundo (la diferencia entre mareas altas y bajas sucesivas) se encuentra en la bahía de Fundy de 258 kilómetros de longitud en el límite septentrional de Nova Scotia. Durante las condiciones máximas de marea viva, el intervalo mareal en la desembocadura de la bahía (donde se abre al océano) es de sólo 2 metros, aproximadamente. Sin embargo, el intervalo mareal aumenta de manera progresiva desde la desembocadura de la bahía hacia el norte, ya que la geometría natural de la bahía concentra la energía mareal. En el límite septentrional de la cuenca Minas, el intervalo máximo de mareas vivas es de unos 17 metros. Este intervalo mareal extremo deja a los barcos elevados y secos durante la marea baja (véase Figura 20.15).



▲ **Figura 20.15** Marea alta y marea baja en la cuenca Minas de Nova Scotia en la bahía de Fundy. Las zonas expuestas durante la marea baja e inundadas durante la marea alta se denominan *llanuras mareales*. Las llanuras mareales son extensas. (Cortesía del Departamento de Turismo y Cultura de Nova Scotia.)



## Causas de las mareas

Es fácil ver cómo la fuerza gravitacional de la Luna puede hacer que el agua se abombe en el lado de la Tierra más próximo a la Luna. Además se produce también un pandeo mareal de igual magnitud en el lado de la Tierra directamente opuesto a la Luna (Figura 20.16).

Las dos protuberancias mareales están causadas, como descubrió Newton, por el empuje de la gravedad. La gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre dos objetos, lo que significa simplemente que se debilita rápidamente con la distancia. En este caso, los dos objetos son la Luna y la Tierra. Dado que la fuerza de la gravedad disminuye con la distancia, el empuje gravitacional de la Luna sobre la Tierra es ligeramente mayor en el lado próximo de la Tierra que en el lado distante. El resultado de este empuje diferencial es el estiramiento (alargamiento) muy ligero de la Tierra «sólida». Por el contrario, el océano global, que es móvil, se deforma de manera muy notable por este efecto y produce los dos pandeos mareales opuestos.

Debido a que la posición de la Luna cambia sólo moderadamente en un día, las protuberancias mareales se mantienen en posición mientras la Tierra gira «a través» de ellas. Por esta razón, si alguien permanece en la costa durante 24 horas, la Tierra le hará girar a través de áreas al-

ternativas de agua más profunda y más somera. A medida que le transporta a cada pandeo mareal, la marea se eleva, y a medida que le transporta al valle mareal, la marea baja. Por consiguiente, la mayor parte de lugares de la Tierra experimenta dos mareas altas y dos mareas bajas cada día.

Además, los pandeos mareales migran conforme la Luna gira alrededor de la Tierra, aproximadamente cada 29 días. Como consecuencia, las mareas, como la hora de salida de la Luna, ocurren aproximadamente 50 minutos más tarde cada día. Después de 29 días, el ciclo se ha completado y empieza uno nuevo.

Puede haber una desigualdad entre las mareas altas en un día determinado. Dependiendo de la posición de la Luna, los pandeos mareales pueden inclinarse hacia el Ecuador, como en la Figura 20.16. Esta figura ilustra que la primera marea alta experimentada por un observador en el hemisferio septentrional es considerablemente más alta que la marea alta medio día después. Por otro lado, un observador del hemisferio meridional experimentaría el efecto contrario.

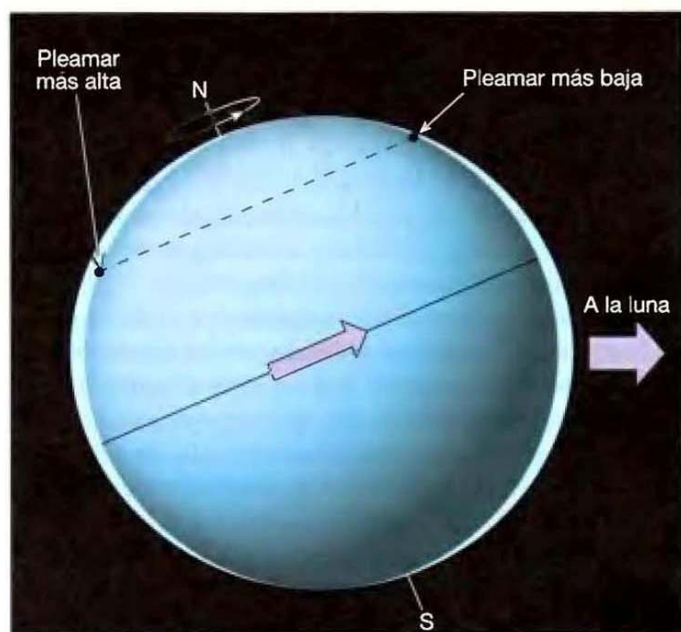
## Ciclo mensual de las mareas

El principal cuerpo que influye en las mareas es la Luna, que da una vuelta completa alrededor de la Tierra cada 29 días y medio. No obstante, el Sol también influye en las mareas. Es mucho mayor que la Luna, pero, debido a que está mucho más alejado, su efecto es considerablemente menor. De hecho, el potencial generador de mareas del Sol es aproximadamente sólo el 46 por ciento del de la Luna.

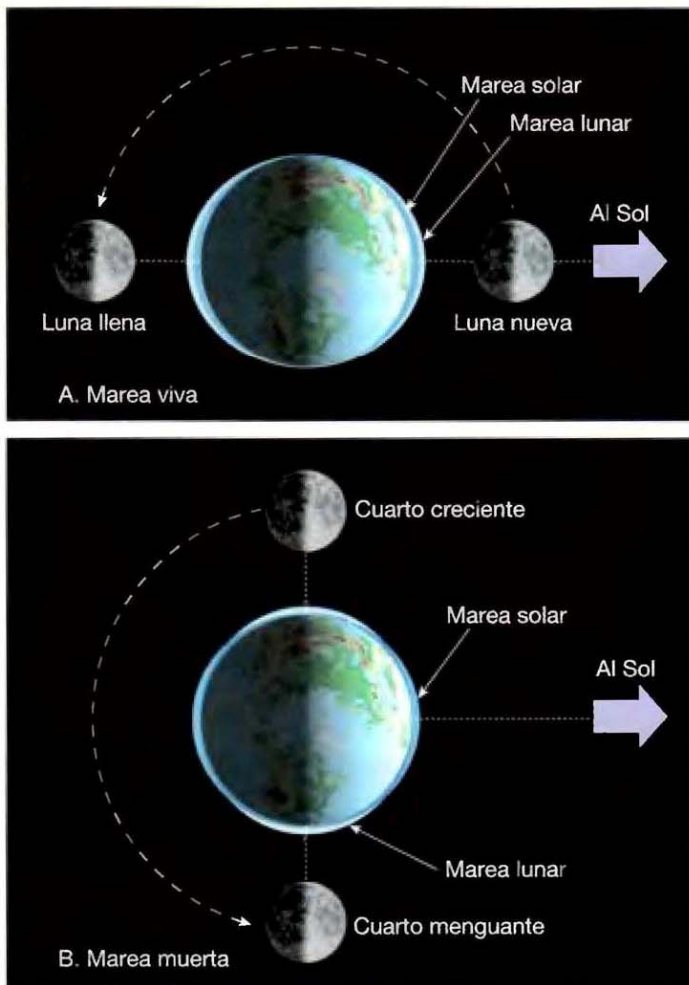
Cuando se acercan las Lunas nueva y llena, el Sol y la Luna están alineados y sus fuerzas se suman (Figura 20.17A). Por consiguiente, la gravedad combinada de esos dos cuerpos productores de mareas produce pandeos mareales más altos (mareas altas) y valles mareales más bajos (mareas bajas), lo que produce un gran intervalo mareal. A éstas se las denomina **mareas vivas**, que tienen lugar dos veces al mes, cuando el sistema Tierra-Luna-Sol está alineado. A la inversa, aproximadamente cuando la Luna está en cuarto creciente y cuarto menguante, las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol actúan sobre la Tierra según ángulos rectos, y cada una compensa parcialmente la influencia de la otra (Figura 20.17B). Como consecuencia, el espectro mareal diario es menor. Se denominan **mareas muertas** y también se producen dos veces al mes. Así, cada mes hay dos mareas vivas y dos mareas muertas, cada una con una separación aproximada de una semana.

## Modelos mareales

Hasta aquí, hemos explicado las causas y los modelos básicos de las mareas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estas consideraciones teóricas no pueden utilizarse



▲ **Figura 20.16** Pandeos mareales idealizados en la Tierra provocados por la Luna. Si la Tierra estuviera cubierta a una profundidad uniforme por agua, habría dos pandeos mareales: uno en el lado de la Tierra orientado a la Luna (derecha) y otro en el lado opuesto de la Tierra (izquierda). Dependiendo de la posición de la Luna, los pandeos mareales pueden inclinarse hacia el ecuador de la Tierra. En esta situación, la rotación de la Tierra hace que un observador experimente dos mareas altas desiguales durante un día.



▲ **Figura 20.17** Las posiciones de la Tierra, la Luna y el Sol y las mareas. A. Cuando la Luna está llena o nueva, los pandeos mareales creados por el Sol y la Luna están alineados, hay un gran intervalo mareal en la Tierra y se producen *mareas vivas*. B. Cuando la Luna está en cuarto creciente o menguante, los pandeos mareales producidos por la Luna se sitúan en ángulo recto en relación con los pandeos creados por el Sol. Los intervalos mareales son menores y se producen *mareas muertas*.

para predecir ni la altura ni el momento de las mareas reales en un lugar concreto. Eso se debe a que muchos factores, como la forma de las líneas costeras, la configuración de las cuencas oceánicas y la profundidad del agua, influyen mucho en las mareas. Por consiguiente, en localizaciones diversas, las mareas responden de diferente manera a las fuerzas que las producen. Al ser esto así, la naturaleza de la marea en cualquier lugar puede determinarse con más precisión mediante observación real. Las predicciones de las tablas mareales y los datos mareales en las cartas náuticas se basan en esas observaciones.

En el mundo existen tres modelos mareales principales. Un **modelo mareal diurno** (*diurno* = al día) se caracteriza por una sola marea alta y una sola marea baja cada día mareal (Figura 20.18). Las mareas de este tipo se pro-

ducen a lo largo de la orilla septentrional del golfo de México, entre otros lugares. Un **modelo mareal semidiurno** (*semi* = dos; *diurno* = al día) exhibe dos mareas altas y dos mareas bajas cada día mareal, teniendo las dos mareas altas la misma altura aproximada y las dos mareas bajas la misma altura aproximada (Figura 20.18). Este tipo de modelo mareal es común a lo largo de la costa atlántica de Estados Unidos. Un **modelo mareal mixto** es similar al modelo semidiurno, pero se caracteriza por una gran desigualdad en las alturas de las mareas altas, las de las mareas bajas, o ambas (Figura 20.18). En este caso, suele haber dos mareas altas y dos mareas bajas cada día, teniendo las dos mareas altas diferentes alturas y las dos mareas bajas diferentes alturas. Estas mareas predominan a lo largo de la costa pacífica de Estados Unidos y en muchas otras partes del mundo.

### Corrientes mareales

La expresión **corriente mareal** se utiliza para describir el flujo *horizontal* del agua que acompaña la elevación y el descenso de la marea. Estos movimientos de agua inducidos por las fuerzas mareales pueden ser importantes en algunas áreas costeras. Las corrientes mareales fluyen en una dirección durante una parte del ciclo mareal e invierten su flujo durante la otra parte. Las corrientes mareales que avanzan hacia la zona costera cuando la marea sube se denominan **flujo mareal**. A medida que la marea baja, el movimiento mar adentro del agua genera **reflujo de la marea**. Los períodos de poca o ninguna corriente, denominados *agua muerta*, separan el flujo y el reflujo de la marea. Las áreas afectadas por estas corrientes mareales alternas se denominan **llanuras mareales** (véase Figura 20.15). Dependiendo de la naturaleza de la zona costera, las llanuras mareales varían, en dirección al mar, desde estrechas franjas de la playa hasta zonas extensas que pueden prolongarse durante varios kilómetros.

Aunque las corrientes mareales no son importantes en mar abierto, pueden ser rápidas en las bahías, los estuarios fluviales, los istmos y otros lugares estrechos. En la costa de la Bretaña francesa, por ejemplo, las corrientes mareales que acompañan a la marea alta de 12 metros pueden alcanzar una velocidad de 20 kilómetros por hora. Si bien las corrientes mareales no son por lo general agentes de erosión ni de transporte de sedimentos importantes, se producen notables excepciones cuando las mareas se mueven a través de estrechas ensenadas. Aquí, remueven constantemente las pequeñas entradas a muchos buenos puertos que, de lo contrario, se bloquearían.

A veces, las corrientes mareales crean depósitos denominados **deltas mareales** (Figura 20.19). Pueden desarrollarse bien como *deltas de inundación* tierra adentro de una ensenada o como *deltas de reflujo* en el lado de una ensenada que se dirige al mar. Dado que la actividad de las



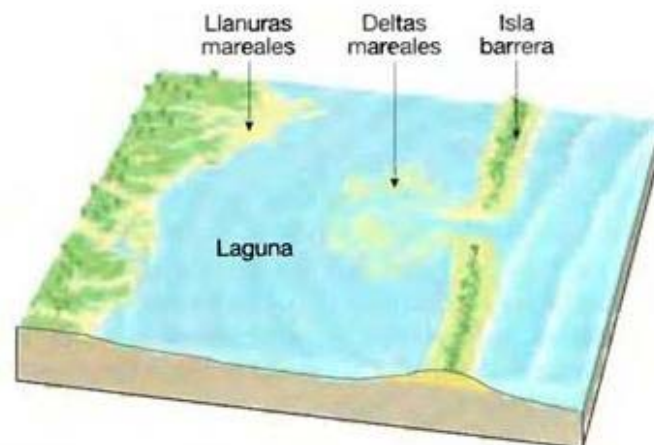
▲ **Figura 20.18** Modelos mareales y existencia a lo largo de partes de las líneas de costa del norte y el sur del continente americano. Un modelo mareal diurno (abajo a la derecha) exhibe una marea alta y una baja cada día mareal. Un modelo semidiurno (arriba a la derecha) exhibe dos mareas altas y dos mareas bajas de altura aproximadamente igual cada día mareal. Un modelo mareal mixto (izquierda) exhibe dos mareas altas y dos mareas bajas de alturas diferentes durante cada día mareal.

olas y las corrientes litorales está reducida en el lado protegido, tierra adentro, los deltas de inundación son más comunes y más destacados (véase Figura 20.9). Se forman después de que una corriente mareal se mueva rápidamente a través de una ensenada. A medida que la corriente emerge del estrecho pasillo hacia aguas más abiertas, se ralentiza y deposita su carga de sedimento.

## Mareas y rotación de la Tierra

Mediante fricción contra el suelo de las cuencas oceánicas, las mareas actúan como débiles frenos que ralentizan firmemente la rotación de la Tierra. El ritmo de esta disminución de la velocidad, sin embargo, no es grande. Los astrónomos, que han medido con precisión la longitud del día durante los últimos 300 años, han descubierto que está aumentando a razón de 0,002 segundos por siglo. Aunque esto pueda parecer insignificante, a lo largo de millones de años este pequeño efecto será muy grande. Por último, dentro de miles de millones de años, la rotación cesará y la Tierra ya no tendrá días y noches alternos.

Si la rotación de la Tierra está disminuyendo de velocidad, la longitud de cada día debe haber sido más corta y el número de días por año debe haber sido mayor en el pasado geológico. Un método utilizado para investigar este fenómeno es el del examen microscópico de los caparzones de ciertos invertebrados. Las almejas y los corales, así como otros organismos, desarrollan una delgada capa microscópica de nuevo material de caparazón cada día. Estudiando los anillos de crecimiento diario de algunos ejem-



▲ **Figura 20.19** Debido a que este delta mareal se está formando en las aguas relativamente tranquilas del lado tierra adentro de una isla barrera, se denomina delta de inundación. Cuando emerge una corriente mareal de movimiento rápido desde la ensenada, disminuye su velocidad y deposita sedimentos. Las formas de los deltas mareales son variables.

plares fósiles bien conservados, podemos determinar el número de días de un año. Estudios realizados utilizando esta ingeniosa técnica indican que al principio del Cámbrico, hace unos 540 millones de años, la longitud del día era sólo de 21 horas. Dado que la longitud del año, que viene determinada por el giro de la Tierra alrededor del Sol, no cambia, el año Cámbrico contenía 424 días de 21 horas. A finales del Devónico, hace unos 365 millones de años, un año constaba de unos 410 días, y cuando empezaba el Pérmico, hace unos 290 millones de años, había 390 días al año.

## Resumen

- El *litoral* es la zona que se extiende entre el nivel de marea más bajo y la elevación más alta de la tierra afectada por las olas de los temporales. La *costa* se extiende tierra adentro desde la costa hasta donde aún pueden encontrarse estructuras relacionadas con el océano. El litoral se divide en *playa baja* y *playa alta*. En dirección al mar desde la anteplaya se hallan la *ribera cercana* y la *prelitoral*.
- Una *playa* es una acumulación de sedimento situada a lo largo del borde continental del océano o de un lago. Entre sus partes, hay una o más *bermas* y el *frente de playa*. Las playas están compuestas del material que abunda en la zona y deben considerarse material en tránsito a lo largo de la costa.
- Las olas son energía en movimiento y el viento inicia la mayoría de olas oceánicas. Los tres factores que influyen en la altura, la longitud y el período de una ola son: (1) la velocidad del viento, (2) el tiempo durante el cual ha soplando el viento y (3) el fetch, la distancia que el viento ha recorrido a través de mar abierto. Una vez que las olas salen de la zona de tormenta, se denominan *mar de fondo* y constituyen olas simétricas con una mayor longitud de onda.
- A medida que las olas se desplazan, las partículas de agua transmiten energía mediante el movimiento orbital circular, que se extiende a una profundidad igual a la mitad de la longitud de onda. Cuando una ola se desplaza hacia el agua somera, experimenta cambios físicos que pueden hacer que la ola se desplome o rompa y forme *arrastré*.
- La erosión de las olas es causada por la presión de impacto de la ola y la abrasión (la acción de sierra y molienda del agua armada con fragmentos de roca). La flexura de las olas se denomina *refracción de la ola*. Debido a la refracción, el impacto de la ola se concentra contra los laterales y los extremos de los salientes de tierra.
- La mayoría de las olas alcanza la costa en ángulo. La batida y retroceso del agua de cada ola rompiente mueve el sedimento según un modelo en zigzag a lo largo de la playa. Este movimiento, denominado *deriva litoral* o *de playa*, puede transportar la arena centenares o incluso miles de metros cada día. Las olas oblicuas producen también *corrientes litorales* dentro de la zona de oleaje que fluye en paralelo a la costa.
- Las formas producidas por la erosión de la línea de costa son los *acantilados litorales* (que se originan debido a la acción cortante del oleaje contra la base del terreno costero), las *plataformas de abrasión* (superficies relativamente planas que quedan tras el retroceso de los acantilados), los *arcos* (formados cuando un cabo de tierra es erosionado y dos cuevas de los lados opuestos se unen) y las *chimeneas* (que se forman cuando se hunde el techo de un arco).
- Algunos de los rasgos deposicionales formados cuando el sedimento es movido por la deriva litoral y las corrientes litorales son las *flechas* (crestas alargadas de arena que se proyectan desde la tierra en la desembocadura de una bahía adyacente), las *barras de bahía* (barras de arena que atraviesan por completo una bahía) y los *tómbolos* (cúmulos de arena que conectan una isla con el continente o con otra isla). A lo largo de las llanuras de la costa atlántica y del Golfo, la zona litoral se caracteriza por *islas barrera*, crestas bajas de arena que discurren en paralelo a la costa a distancias comprendidas entre los 3 y los 30 kilómetros.
- Factores locales que influyen en la erosión de la línea de costa son: (1) la proximidad de una costa a ríos cargados de sedimento; (2) el grado de actividad tectónica; (3) la topografía y la composición del terreno; (4) los vientos y las condiciones meteorológicas predominantes, y (5) la configuración de la línea de costa y de las zonas próximas al litoral.
- La *estabilización firme* consiste en la construcción de estructuras masivas y duras para intentar proteger una costa de la erosión o impedir el movimiento de arena a lo largo de la playa. La estabilización firme incluye los *espigones* (paredes bajas construidas en ángulo recto a la costa para retener la arena en movimiento), los *rompeolas* (estructuras paralelas a la costa para protegerla de la fuerza de las grandes olas rompientes) y los *diques* (que acorazan la costa para impedir que las olas alcancen la zona situada detrás del muro). Entre las *alternativas a la estabilización firme* se cuentan la *alimentación de playa*, que supone la adición de arena para rellenar las playas erosionadas, y el *traslado* de los edificios dañados o amenazados.
- Debido a las diferencias geológicas básicas, la naturaleza de los problemas de erosión de la costa a lo largo de las costas atlántica y pacífica de Norteamérica es muy diferente. Gran parte del desarrollo ocurrido a lo largo de las costas atlántica y del Golfo se ha producido en islas barrera, que reciben toda la fuerza de las grandes tormentas. Gran parte de la costa del Pacífico se

caracteriza por estrechas playas respaldadas por escarpados acantilados y cordilleras montañosas. Un importante problema al que se enfrenta la línea de costa del Pacífico es un estrechamiento de las playas causado por la interrupción del flujo natural de los materiales a la costa debido a la construcción de presas para riego y para el control de inundaciones.

- Una clasificación habitualmente utilizada de las costas se basa en los cambios que han ocurrido con respecto al nivel del mar. Las *costas de emersión*, a menudo con acantilados litorales y plataformas de abrasión por encima del nivel del mar, se desarrollan o bien porque un área experimenta levantamiento o bien como consecuencia de un descenso del nivel del mar. A la inversa, las *costas de inmersión*, con sus desembocaduras fluviales inundadas, denominadas *estuarios*, se crean cuando el nivel del mar se eleva o la tierra adyacente al mar se hunde.
- Las *mareas*, el ascenso y descenso diarios en la elevación de la superficie del océano en lugares determinados, están causadas por la *atracción gravitacional* de la Luna y, en una menor proporción, por el Sol. La Luna y el Sol producen un par de *pandeos mareales* en la Tierra cada uno. Estos pandeos mareales permanecen en posiciones fijas en relación con los cuerpos que

se generan a medida que la Tierra rota a través de ellos, lo cual resulta en mareas altas y bajas alternas. Las *mareas vivas* tienen lugar cuando se aproximan los períodos de luna llena y luna nueva, cuando el Sol y la Luna están alineados y sus pandeos se suman y producen mareas especialmente altas y bajas (un *gran intervalo mareal diario*). A la inversa, las *mareas muertas* se producen alrededor de los períodos de cuarto creciente y cuarto menguante de la Luna, cuando los pandeos de la Luna y el Sol se sitúan en ángulo recto, lo cual produce un *intervalo mareal diario menor*.

- *En el mundo existen tres modelos mareales principales.* Un *modelo mareal diurno* exhibe una marea alta y una baja cada día; un *modelo mareal semidiurno* exhibe dos mareas altas y dos bajas aproximadamente de la misma altura cada día; y un *modelo mareal mixto* suele tener dos mareas altas y dos bajas de diferentes alturas cada día.
- Las *corrientes mareales* son movimientos horizontales del agua que acompañan a la subida y bajada de las mareas. Las *llanuras mareales* son las áreas que se ven afectadas por el avance y retroceso de las corrientes mareales. Cuando las corrientes mareales disminuyen de velocidad después de emerger de ensenadas estrechas, depositan el sedimento que finalmente crearán los *deltas mareales*.

## Preguntas de repaso

1. Distinga entre costa, línea de costa, litoral y línea litoral.
2. ¿Qué es una playa? Distinga brevemente entre fondo de playa y berma. ¿De dónde proceden los sedimentos de la playa?
3. Enumere tres factores que determinen la altura, la longitud de onda y el período de una ola.
4. Describa el movimiento de un objeto flotante cuando pasa una ola (véase Figura 20.4).
5. Describa los cambios físicos que se producen en la velocidad, la longitud de onda y la altura de una ola a medida que ésta avanza hacia el agua somera y rompe.
6. Describa dos maneras mediante las cuales las olas causan erosión.
7. ¿Qué es la refracción de las olas? ¿Cuál es el efecto de este proceso a lo largo de las líneas de costa irregulares? (véase Figura 20.7.)
8. ¿Por qué a menudo las playas se denominan «ríos de arena»?
9. Describa la formación de las siguientes características: acantilados litorales, plataformas de abrasión, rasas, flechas, barras de bahía y tómbolos.
10. Enumere tres maneras mediante las cuales se originan las islas barrera.
11. Los daños provocados por un huracán pueden dividirse en tres grandes categorías. Enumérelas. ¿Qué categoría es responsable del mayor número de muertes relacionadas con un huracán (véase Recuadro 20.1)?
12. Enumere algunos ejemplos de estabilización firme y describa para qué sirve cada uno. ¿Qué efecto tiene cada uno en la distribución de arena en la playa?
13. Enumere dos alternativas a la estabilización firme, indicando los posibles problemas con cada una.

14. Relacione la formación de presas en los ríos con el encogimiento de las playas en muchos lugares a lo largo de la costa oeste de Estados Unidos. ¿Por qué las playas más estrechas inducen una retirada acelerada de los acantilados marinos?
15. ¿Cuál es la relación entre la atmósfera más caliente y un aumento mundial del nivel del mar (véase Recuadro 20.3)?
16. ¿Qué rasgos observables le inducirían a clasificar un área costera como de emersión?
17. ¿Están los estuarios asociados con costas de inmersión o de emersión? Explíquelo.
18. Comente el origen de las mareas oceánicas. Explique por qué la influencia del Sol en las mareas terrestres es sólo aproximadamente la mitad de la correspondiente a la Luna, aunque el Sol es mucho mayor que la Luna.
19. Explique por qué un observador puede experimentar dos mareas altas distintas durante un mismo día (véase Figura 20.16).
20. ¿En qué se diferencian los modelos mareales diurno, semidiurno y mixto?
21. Distinga entre flujo y reflujo mareal.
22. ¿Cómo han afectado las mareas a la rotación de la Tierra? ¿Cómo demuestran los geólogos esta idea?

## Términos fundamentales

abrazión	chimenea litoral	línea litoral	período de ola
acantilado litoral	delta mareal	litoral	plataforma de abrasión
alimentación de playa	deriva litoral o de playa	longitud de onda	playa
altura de ola	dique	llanura mareal	playa alta
arco litoral	espigón	malecón	playa baja
arrastre	estabilización firme	marea	rasa
barra de bahía	estuario	marea muerta	reflujo de la marea
berma	fetch	marea viva	refracción de la ola
corriente litoral	flecha	modelo mareal diurno	ribera cercana
corriente mareal	flujo mareal	modelo mareal mixto	rompeolas
costa	frente de playa	modelo mareal	tómbolo
costa de emersión	isla barrera	semidiurno	zona litoral
costa de inmersión	línea de costa		

## 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>