

Aguas subterráneas

Importancia de las aguas subterráneas

Distribución de las aguas subterráneas

El nivel freático

Variaciones en el nivel freático
Interacción entre las aguas subterráneas y las aguas corrientes

Factores que influyen en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas

Porosidad
Permeabilidad, acucluidos y acuíferos

Circulación de las aguas subterráneas

Manantiales o fuentes

Fuentes termales y géiseres

Pozos

Pozos artesianos

Problemas relacionados con la extracción del agua subterránea

Tratamiento del agua subterránea como un recurso no renovable
Subsidencia
Contaminación salina

Contaminación del agua subterránea

El trabajo geológico del agua subterránea

Cavernas
Topografía kárstica

En todo el mundo, los pozos y manantiales o fuentes proporcionan agua para las ciudades, las cosechas, el ganado y la industria. En Estados Unidos, el agua subterránea es el origen de alrededor del 40 por ciento del agua utilizada para todos los fines (excepto la generación de energía hidroeléctrica y el enfriamiento de las centrales eléctricas). El agua subterránea es el agua potable para más del 50 por ciento de la población, el 40 por ciento del agua utilizada para la irrigación y proporciona más del 25 por ciento de las necesidades de la industria. En algunas áreas, sin embargo, el uso abusivo de este recurso básico se ha traducido en escasez de agua, agotamiento de las aguas de escorrentía, subsidencia del terreno, contaminación salina, aumento del coste de bombeo y contaminación del agua subterránea.

Importancia de las aguas subterráneas



Aguas subterráneas ▼ Importancia y distribución de las aguas subterráneas

El agua subterránea es uno de nuestros recursos más valiosos y asequibles, aunque nuestras percepciones con respecto al ambiente subsuperficial del que procede son a menudo poco claras e incorrectas. La razón para ello es que el ambiente de las aguas subterráneas está muy oculto a la vista, excepto en las cavernas y las minas, y las impresiones que tenemos de esas aperturas subsuperficiales son engañosas. La observación de la superficie de la Tierra da la impresión de que el planeta es «sólido». Esta opinión se mantiene cuando entramos en una caverna y vemos el agua fluir en un cauce que parece haber sido excavado en una roca sólida.

Debido a esas observaciones, muchas personas creen que el agua subterránea aparece sólo en «ríos» debajo de la tierra. En realidad, la mayor parte del ambiente subsuperficial no es «sólido» en absoluto. Consta de incontables poros diminutos entre los granos de suelo y de se-

dimento, así como de estrechas diaclasas y fracturas practicadas en el lecho de roca. En conjunto, todos estos espacios constituyen un volumen inmenso. Es en estas pequeñas aperturas donde se reúne y se mueve el agua subterránea.

Considerando la hidrosfera entera, o toda el agua de la Tierra, sólo alrededor de las seis décimas partes del uno por ciento aparece bajo tierra. No obstante, este pequeño porcentaje, almacenado en la roca y los sedimentos situados debajo de la superficie terrestre, constituye una enorme cantidad. Cuando se excluyen los océanos y se consideran sólo las fuentes de agua dulce, se pone más de manifiesto la importancia de las aguas subterráneas.

En la Tabla 17.1 se muestra la distribución de agua dulce calculada para la hidrosfera. Por supuesto, el mayor volumen aparece en forma de hielo glaciar. El segundo en la clasificación es el agua subterránea, que constituye más del 14 por ciento del total. Sin embargo, cuando se excluye el hielo y se considera sólo el agua líquida, más del 94 por ciento de toda el agua dulce es agua subterránea. No cabe duda de que *el agua subterránea representa el mayor depósito de agua dulce que resulta fácilmente asequible a los seres humanos*. Su valor en términos de economía y de bienestar humano es incalculable.

Desde un punto de vista geológico, el agua subterránea es importante como agente erosivo. La acción disolvente del agua subterránea va minando lentamente las rocas solubles como la caliza, permitiendo la formación de depresiones superficiales denominadas dolinas, así como la creación de cavernas subterráneas. El agua subterránea es también un compensador del flujo de escorrentía. Gran parte del agua que fluye en los ríos no procede directamente de la lluvia y de la fusión de la nieve. Más bien, un gran porcentaje de la precipitación se infiltra y luego se desplaza lentamente bajo tierra hasta las corrientes encauzadas. El agua subterránea es, pues, una forma de almacenamiento que mantiene las corrientes fluviales durante los períodos de ausencia de precipitaciones. La información de la Tabla 17.1 refuerza este dato. Vemos

Tabla 17.1 Agua dulce de la hidrosfera

Partes de la hidrosfera	Volumen de agua dulce (km ³)	Porción de volumen total de agua dulce (%)	Tasa de intercambio del agua
Casquetes polares y glaciares	24.000.000	84,945	8.000 años
Aguas subterráneas	4.000.000	14,158	280 años
Lagos y embalses	155.000	0,549	7 años
Humedad del suelo	83.000	0,294	1 año
Vapor de agua en la atmósfera	14.000	0,049	9,9 días
Agua de los ríos	1.200	0,004	11,3 días
Total	28.253.200	100,000	

que la tasa de intercambio del agua subterránea es de 280 años. Esta cifra representa el tiempo necesario para sustituir el agua ahora almacenada bajo tierra. Por el contrario, la tasa de intercambio para los ríos es tan sólo ligeramente superior a 11 días: si se cortara el suministro de agua subterránea a un río y no lloviera, aquél se secaría en tan sólo 11 días. Por tanto, el agua que fluye en un río durante un período seco constituye lluvia que cayó en algún momento anterior y se almacenó bajo tierra.

Distribución de las aguas subterráneas



Aguas subterráneas ▼ Importancia y distribución de las aguas subterráneas

Cuando llueve, parte del agua discurre por la superficie, parte se evapora y el resto se infiltra en el terreno. Esta última vía es la fuente primaria de prácticamente toda el agua subterránea. La cantidad de agua que sigue cada uno de esos caminos, sin embargo, varía mucho en función del tiempo y del espacio. Los factores que influyen en esta variación son lo fuerte de la pendiente, la naturaleza del material, la intensidad de la lluvia, y el tipo y cantidad de vegetación. Densas lluvias que caen sobre pendientes abruptas donde las capas suprayacentes están compuestas de materiales impermeables provocarán obviamente un elevado porcentaje de agua de escorrentía. A la inversa, si la lluvia cae de manera suave y uniforme sobre pendientes más graduales compuestas por materiales que son fácilmente penetrados por el agua, un porcentaje mucho mayor del agua se infiltrará en el suelo.

Algo del agua que se infiltra no viaja muy lejos, porque es retenida por atracción molecular como una capa superficial sobre las partículas sólidas. Esta zona cercana a la superficie se denomina **cinturón de humedad del suelo**. Está surcada por raíces, los vacíos que quedaron en el lugar de las raíces desintegradas y las madrigueras y los túneles de las lombrices, que aumentan la infiltración del agua de lluvia en el suelo. Las plantas utilizan el agua del suelo en las funciones vitales y la transpiración. Una parte de agua también se evapora directamente y regresa a la atmósfera.

El agua que no es retenida como humedad del suelo percola hacia abajo hasta que alcanza una zona donde todos los espacios libres del sedimento y la roca están completamente llenos de agua (Figura 17.1). Ésta es la **zona de saturación**. El agua situada en el interior se denomina **agua subterránea**. El límite superior de esta zona se conoce como el **nivel freático**. Extendiéndose

hacia arriba desde el nivel freático se encuentra la **franja capilar** (*capillus* = cabello), en la cual el agua subterránea es mantenida por la tensión superficial en diminutos conductos comprendidos entre los granos de suelo o de sedimento. El área situada por encima del nivel freático que abarca la franja capilar y el cinturón de humedad del suelo se denomina **zona de aireación**. Aunque puede haber una cantidad considerable de agua en la zona de aireación, esta agua no puede ser bombeada por los pozos porque está demasiado aferrada a la roca y las partículas sólidas. Por el contrario, por debajo del nivel freático, la presión del agua es lo bastante grande como para permitir que el agua entre en los pozos, permitiendo así que el agua subterránea pueda sacarse para su uso. Examinaremos con más detalle los pozos en otra sección del capítulo.

El nivel freático

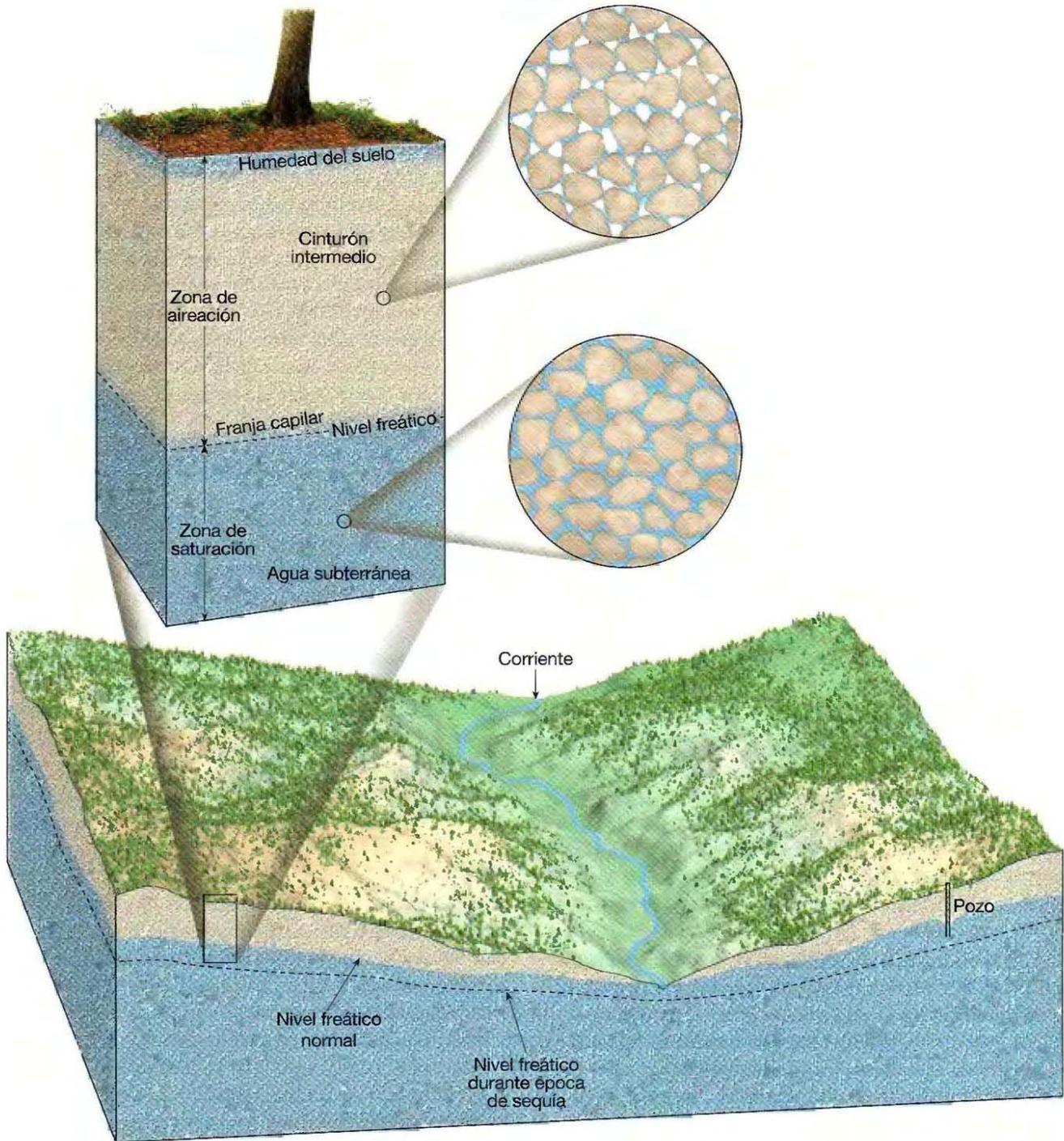


Aguas subterráneas ▼ Importancia y distribución de las aguas subterráneas

El nivel freático, el límite superior de la zona de saturación, es un elemento muy significativo del sistema de aguas subterráneas. El nivel freático es importante para predecir la productividad de los pozos y explicar los cambios de flujo de las corrientes y los manantiales, justificando las fluctuaciones del nivel de los lagos.

Variaciones en el nivel freático

La profundidad del nivel freático es muy variable y puede oscilar entre cero, cuando se sitúa en la superficie, y centenares de metros en algunos lugares. Una característica importante del nivel freático es que su configuración varía según las estaciones y de un año a otro, porque la adición de agua al sistema de aguas subterráneas está estrechamente relacionada con la cantidad, la distribución y la frecuencia de las precipitaciones. Excepto cuando el nivel freático se sitúa en la superficie, no podemos observarlo directamente. Sin embargo, su elevación puede cartografiarse y estudiarse en detalle allí donde los pozos son numerosos porque el nivel del agua en los pozos coincide con el nivel freático (Figura 17.2). Estos mapas revelan que el nivel freático raramente es horizontal, como cabría esperar. En cambio, su forma suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial, alcanzando sus mayores elevaciones debajo de las colinas y luego descendiendo hacia los valles (Figura 17.1). En las zonas pantanosas, el nivel freático coincide precisamente con la superficie. Lagos y corrientes de agua ocupan generalmente áreas lo

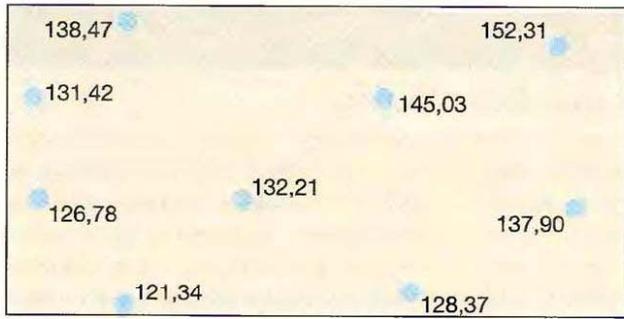


▲ **Figura 17.1** Distribución del agua subterránea. La forma del nivel freático suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial. Durante los períodos de sequía, el nivel freático desciende, reduciendo el flujo de corriente y secando algunos pozos.

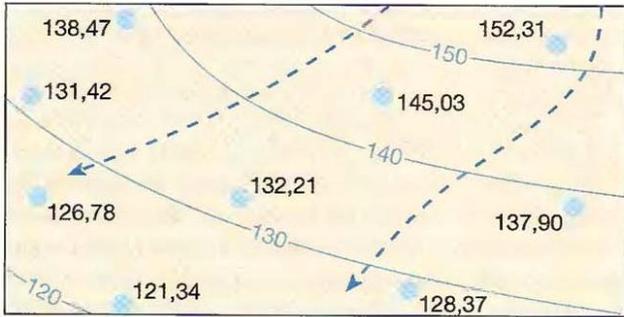
bastante bajas como para que el nivel freático esté por encima de la superficie del terreno.

Varios factores contribuyen a la irregularidad superficial del nivel freático. Una influencia importante es el hecho de que el agua subterránea se desplaza muy despacio y a velocidades variables bajo diferentes condiciones. De-

bido a ello, el agua tiende a «apilarse» debajo de las áreas altas entre valles de corrientes fluviales. Si la lluvia cesara por completo, estas «colinas» de agua freática se hundirían lentamente y se aproximarían de manera gradual al nivel de los valles. Sin embargo, se suele añadir nuevo suministro de agua de lluvia con la suficiente frecuencia



A.



B.

EXPLICACIÓN

- Localización de un pozo y altitud del nivel freático por encima del nivel del mar, en metros
- El contorno muestra la altitud del nivel freático, intervalo del contorno 3 metros
- Línea de flujo del agua subterránea

▲ **Figura 17.2** Preparación de un mapa del nivel freático. El nivel del agua de los pozos coincide con el nivel freático. **A.** En primer lugar, se sitúan en un mapa las localizaciones de los pozos y la elevación del nivel freático por encima del nivel del mar. **B.** Estos puntos se utilizan para trazar las líneas de contorno del nivel freático a intervalos regulares. En este mapa de muestra el intervalo es de 3 metros. Las líneas de flujo del agua subterránea pueden añadirse para mostrar el movimiento del agua en la parte superior de la zona de saturación. El agua subterránea tiende a moverse más o menos perpendicularmente a los contornos, descendiendo por la pendiente del nivel freático. (Tomado del U. S. Geological Survey.)

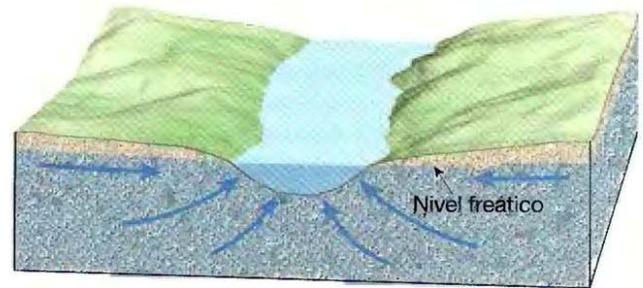
como para evitar esto. No obstante, en época de mucha sequía (véase Recuadro 17.1), el nivel freático puede descender lo suficiente como para secar los pozos poco profundos (Figura 17.1). Otras causas de la falta de uniformidad del nivel freático son las variaciones de precipitación y permeabilidad de un lugar a otro.

Interacción entre las aguas subterráneas y las aguas corrientes

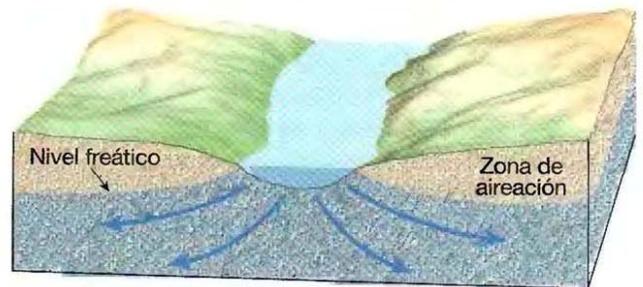
La interacción entre el sistema de aguas subterráneas y las aguas corrientes es un eslabón básico del ciclo hidrológico. Puede producirse de tres maneras. Las corrientes pueden recibir agua de la aportación de aguas subterráneas a

través del cauce de la corriente. Este tipo de corrientes se denominan **efluentes** (Figura 17.3A). Para que eso suceda, la elevación del nivel freático debe ser mayor que el nivel de la superficie de la corriente. Las corrientes pueden perder agua hacia el sistema de aguas subterráneas por la salida de agua a través del lecho de la corriente. En esta situación se emplea el término **influyente** (Figura 17.3B, C). Cuando eso sucede, la elevación del nivel freático debe ser inferior a la superficie de la corriente. La tercera posibilidad es una combinación de las dos primeras: una corriente recibe aportaciones de agua en algunas secciones y pierde agua en otras.

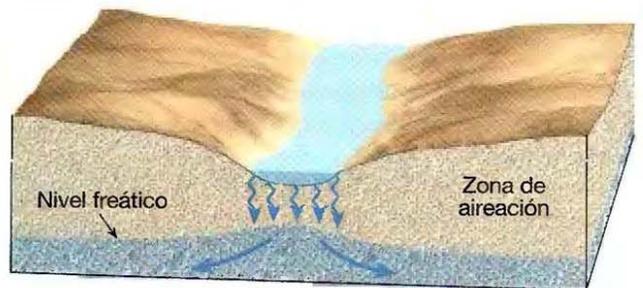
Las corrientes influentes pueden estar conectados al sistema de aguas subterráneas por una zona saturada continua o pueden estar desconectados de ese sistema por una



A. Efluente



B. Influyente (conectado)



C. Influyente (desconectado)

▲ **Figura 17.3** Interacción entre el sistema de aguas subterráneas y las corrientes de aguas superficiales. **A.** Las corrientes efluente reciben agua del sistema de aguas subterráneas. **B.** Las corrientes influentes pierden agua hacia el sistema de aguas subterráneas. **C.** Cuando una zona de aireación separa las corrientes influentes del sistema de aguas subterráneas, puede formarse una protuberancia en el nivel freático. (Tomado del U. S. Geological Survey.)



Recuadro 17.1 ▶ La Tierra como sistema

El impacto de la sequía en el sistema hidrológico*

La *sequía* es un período de tiempo anormalmente seco que persiste lo suficiente como para producir un desequilibrio hidrológico significativo, como daños en las cosechas o restricciones en el suministro de agua. La gravedad de la sequía depende del grado de carencia de humedad, su duración y el tamaño de la zona afectada.

Aunque los desastres naturales como las inundaciones y los huracanes suelen generar más atención, los períodos de sequía pueden ser igual de devastadores y tener un precio más alto. De media, los períodos de sequía cuestan a Estados Unidos entre 6.000 y 8.000 millones de dólares anuales, mientras que las inundaciones cuestan 2.400 millones de dólares y los huracanes, entre 1.200 y 4.800 millones de dólares. Se calculó que las pérdidas económicas directas causadas por un período de sequía en 1988 ascendieron a 40.000 millones de dólares.

La sequía se distingue de otros peligros naturales de manera diferente. En primer lugar, se produce de una manera gradual, «progresiva», lo cual dificulta la determinación del principio y el final del fenómeno. Los efectos de la sequía se acumulan lentamente durante un largo período de tiempo y a veces duran años hasta que la sequía termina. En segundo lugar, no existe una definición precisa y universalmente aceptada de sequía. Eso se añade a la confusión de si realmente se está produciendo sequía o no y, en caso afirmativo, cuál es su gravedad. En tercer lugar, la sequía raramente produce daños estructurales; por tanto, sus efectos sociales y económicos son menos evidentes que los daños provocados por otros desastres naturales.

Las definiciones reflejan cuatro aproximaciones básicas para medir la sequía: la meteorológica, la agrícola, la hidrológica y la socioeconómica. La *sequía meteorológica* está relacionada con el grado de sequedad según la desviación de las precipitaciones de los valores normales y la duración del período seco. La *sequía agrícola* suele enlazarse a un déficit de humedad del suelo. La necesidad hidrológica de una planta depende de las condiciones

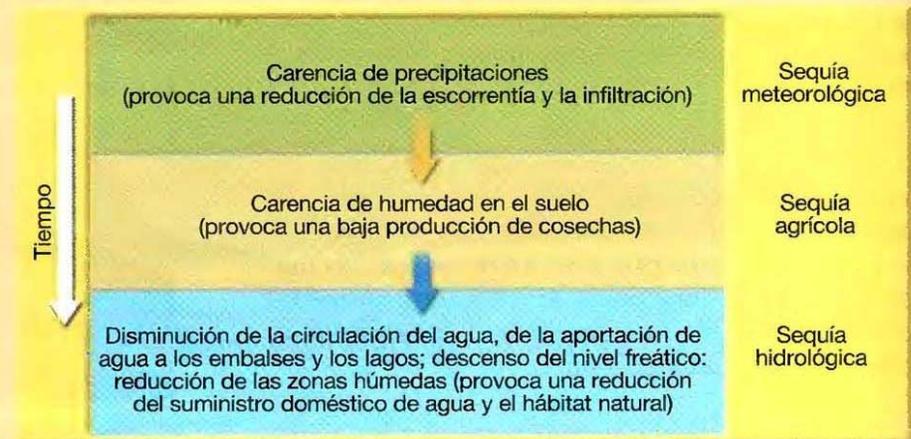
meteorológicas predominantes, las características biológicas de la planta en particular, su estadio de crecimiento y las diferentes propiedades del suelo. La *sequía hidrológica* se refiere a las carencias en el suministro de agua superficial y subsuperficial. Se mide como niveles de circulación del agua, de lagos, de embalses y de aguas subterráneas. Hay un vacío temporal entre el inicio de las condiciones secas y una caída del nivel de circulación del agua, o la disminución de los niveles de los lagos, los embalses y las aguas subterráneas. Por tanto, las mediciones hidrológicas no son los primeros indicadores de sequía. La *sequía socioeconómica* es un reflejo de lo que sucede cuando una restricción física de agua afecta a las personas. La sequía socioeconómica se produce cuando la demanda de un bien económico excede la oferta como consecuencia de una disminución del suministro de agua. Por ejemplo, la sequía puede provocar una disminución significativa de la producción de energía hidroeléctrica, que, a su vez, puede precisar de la transformación a combustibles fósiles más caros o recortes significativos de energía.

Hay una serie de impactos asociados con la sequía meteorológica, agrícola e

hidrológica (Figura 17.A). Cuando la sequía meteorológica empieza, el sector agrícola suele ser el primer afectado, debido a su gran dependencia de la humedad del suelo. La humedad del suelo se reduce rápidamente durante períodos largos de sequía. Si persiste la carencia de precipitaciones, quienes dependen de los ríos, los embalses, los lagos y las aguas subterráneas pueden quedar afectados.

Cuando la precipitación vuelve a los niveles normales, la sequía meteorológica llega a su fin. Primero se repone la humedad del suelo, luego la circulación del agua, los embalses y lagos, y, por último, las aguas subterráneas. Por tanto, los impactos de la sequía pueden disminuir rápidamente en el sector agrícola gracias a la dependencia de la humedad del suelo, pero pueden alargarse durante meses o años en otros sectores que dependen de los suministros almacenados de agua superficial o subsuperficial. Los usuarios de las aguas subterráneas, que suelen ser los últimos afectados tras el inicio de la sequía meteorológica, también pueden ser

* Basado en parte en el material preparado por el Centro Americano de Mitigación de la Sequía (<http://drought.unl.edu>).



▲ **Figura 17.A** Secuencia de los impactos de la sequía. Después del comienzo de la sequía meteorológica, la agricultura es la primera afectada, seguida de las reducciones de la circulación del agua y los niveles hidrológicos de los lagos, los embalses y las aguas subterráneas. Al terminar la sequía meteorológica, la sequía agrícola acaba cuando se repone la humedad del suelo. La sequía hidrológica tarda un tiempo considerablemente mayor en acabar.

los últimos en volver a los niveles hidrológicos normales. La duración del período de recuperación depende de la intensidad de la sequía meteorológica, su duración y la cantidad de precipitación recibida al finalizar la sequía.

Los impactos sufridos a causa de la sequía son producto del acontecimiento meteorológico, así como de la vulnerabilidad social a períodos de carencia de precipitaciones. Dado que la demanda de agua aumenta como consecuencia del

crecimiento de la población y las migraciones regionales, cabe esperar que en el futuro las sequías produzcan mayores impactos, haya o no un aumento de la frecuencia o la intensidad de la sequía meteorológica.

zona no saturada. Comparemos las partes B y C de la Figura 17.3. Cuando la corriente está desconectada, el nivel freático tiene un abultamiento apreciable por debajo de la corriente si la velocidad del movimiento del agua a través del cauce y la zona de aireación es mayor que la velocidad a la que las aguas subterráneas se apartan del abultamiento.

En algunos lugares, una corriente puede ser siempre efluente o influente. Sin embargo, en muchas situaciones la dirección del flujo puede variar mucho a lo largo de la corriente; algunas secciones reciben agua subterránea y otras secciones pierden agua hacia el sistema de aguas subterráneas. Además, la dirección de la corriente puede cambiar durante un intervalo corto de tiempo como consecuencia de tormentas, que añaden agua cerca de la orilla de la corriente o cuando inundaciones instantáneas temporales descienden por el canal.

Las aguas subterráneas contribuyen a las corrientes en la mayoría de los contextos geológicos y climáticos. Incluso cuando las corrientes principalmente pierden agua hacia el sistema de aguas subterráneas, determinadas secciones pueden recibir aportación de agua subterránea durante algunas estaciones. En un estudio de 54 corrientes de todas las partes de Estados Unidos, el análisis indicaba que el 52 por ciento del caudal era aportado por las aguas subterráneas. La aportación de las aguas subterráneas oscilaba entre un mínimo del 14 por ciento a un máximo del 90 por ciento.

Factores que influyen en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas

La naturaleza de los materiales subsuperficiales influye mucho en la velocidad del movimiento del agua subterránea y en la cantidad de agua subterránea que puede almacenarse. Dos factores son especialmente importantes: la porosidad y la permeabilidad.

Porosidad

El agua empapa el terreno porque el lecho de roca, el sedimento y el suelo contienen innumerables huecos o aperturas. Estas aperturas son similares a las de una esponja y

a menudo se denominan poros. La cantidad de agua subterránea que puede almacenarse depende de la **porosidad** del material, que se define como el porcentaje del volumen total de roca o de sedimento formado por poros. Los huecos son con frecuencia espacios que quedan entre las partículas sedimentarias, pero también son comunes las diaclasas, las fallas, las cavidades formadas por disolución de la roca soluble, como la caliza, y las vesículas (vacíos dejados por los gases que escapan de la lava).

Las variaciones de porosidad pueden ser grandes. El sedimento es a menudo bastante poroso y los espacios abiertos pueden ocupar entre el 10 y el 50 por ciento del volumen total del sedimento. El espacio poroso depende del tamaño y la forma de los granos, de cómo están empaquetados, del grado de selección y, en las rocas sedimentarias, de la cantidad de material cementante. Por ejemplo, la arcilla puede tener una porosidad de hasta un 50 por ciento, mientras que algunas gravas pueden tener sólo un 20 por ciento de huecos.

Cuando se mezclan sedimentos de diversos tamaños, la porosidad se reduce porque las partículas más finas tienden a llenar las aperturas entre los granos más grandes. La mayoría de las rocas ígneas y metamórficas, así como algunas rocas sedimentarias, están compuestas por cristales muy unidos, de manera que los huecos entre los granos pueden ser despreciables. En estas rocas, las fracturas proporcionan la porosidad.

Permeabilidad, acucluidos y acuíferos

La porosidad, por sí sola, no puede medir la capacidad de un material para suministrar agua subterránea. La roca o el sedimento pueden ser muy porosos, pero no permitir el movimiento del agua a través de ellos. Los poros deben estar *conectados* para permitir el flujo de agua, y deben ser lo *bastante grandes* para permitirlo. Por tanto, la **permeabilidad** (*permeare* = penetrar) de un material, su capacidad para *transmitir* un fluido, es también muy importante.

El agua subterránea se mueve serpenteando y girando a través de pequeñas aperturas interconectadas. Cuanto menores sean los espacios porosos más lento será el movimiento del agua. Esta idea queda claramente ilustrada al examinar la información sobre el potencial de suministro de agua de diferentes materiales que se muestran

Tabla 17.2 Valores seleccionados de porosidad, rendimiento específico y retención específica*

Material	Porosidad	Porosidad eficaz	Retención específica
Suelo	55	40	15
Arcilla	50	2	48
Arena	25	22	3
Grava	20	19	1
Caliza	20	18	2
Arenisca (semiconsolidada)	11	6	5
Granito	0,1	0,09	0,01
Basalto (fresco)	11	8	3

*Los valores se dan en porcentaje por volumen.

Fuente: U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2220, 1987.

en la Tabla 17.2, en la que el agua subterránea se divide en dos categorías: (1) la porción que drenará bajo la influencia de la gravedad (denominada *porosidad eficaz*), y (2) la parte que es retenida a modo de película sobre las superficies de las partículas y las rocas y en diminutas aperturas (denominada *retención específica*). La porosidad eficaz indica cuánta agua es realmente asequible para su uso, mientras que la retención específica indica cuánta agua permanece unida al material. Por ejemplo, la capacidad de la arcilla para almacenar agua es grande debido a su gran porosidad, pero sus espacios porosos son tan pequeños que el agua es incapaz de moverse a través de ellos. Por tanto, la porosidad de la arcilla es grande, pero, debido a su baja permeabilidad, la arcilla tiene un rendimiento específico muy bajo.

Los estratos impermeables que obstaculizan o impiden el movimiento del agua se denominan **acuicludos**. La arcilla es un buen ejemplo. Por otro lado, las partículas más grandes, como la arena o la grava, tienen espacios porosos mayores. Por consiguiente, el agua se mueve con relativa facilidad. Los estratos de roca o sedimentos permeables que transmiten libremente el agua subterránea se denominan **acuíferos** (*aqua* = agua; *fer* = transportar). Las arenas y las gravas son ejemplos comunes.

En resumen, hemos visto que la porosidad no siempre es una guía fiable de la cantidad de agua subterránea que puede producirse y que la permeabilidad es importante para determinar la velocidad de movimiento del agua subterránea y la cantidad de agua que podría bombearse desde un pozo.

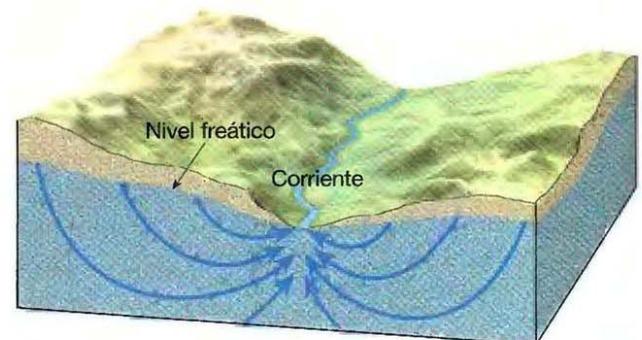
Circulación de las aguas subterráneas

Ya hemos comentado el concepto erróneo común de que el agua subterránea aparece en ríos subterráneos parecidos a las corrientes de agua superficiales. Aunque existen ríos subterráneos, no son frecuentes. En cambio, como aprendimos en las secciones precedentes, existe agua sub-

terránea en los espacios porosos y las fracturas que quedan en las rocas y sedimentos. Por tanto, al contrario de cualquier impresión de flujo rápido que un río subterráneo pueda evocar, el movimiento de la mayor parte del agua subterránea es extraordinariamente lento, de poro a poro. Por extraordinariamente lento entendemos velocidades típicas de unos pocos centímetros al día.

La energía que hace moverse el agua subterránea la proporciona la fuerza de la gravedad. En respuesta a la gravedad, el agua se mueve desde áreas donde el nivel freático es elevado a zonas donde éste es bajo. Esto significa que el agua tiende hacia un cauce de corriente, lago o manantial. Aunque algo del agua tome el camino más directo hacia debajo de la pendiente del nivel freático, gran parte sigue caminos curvos, largos, hacia la zona de descarga.

En la Figura 17.4 se muestra cómo percola el agua en una corriente desde todas las posibles direcciones. Algunas trayectorias retornan hacia arriba, según parece en contra de la fuerza de la gravedad, y entran por el fondo del cauce. Esto se explica fácilmente: cuanto mayor sea la profundidad en la zona de saturación, mayor será la presión del agua. Por tanto, los recovecos seguidos por el



▲ **Figura 17.4** Las flechas indican el movimiento del agua subterránea a través de material uniformemente permeable. Se puede pensar en los serpenteos que sigue el agua como el compromiso entre el empuje descendente de la gravedad y la tendencia del agua a moverse hacia zonas de presión reducida.

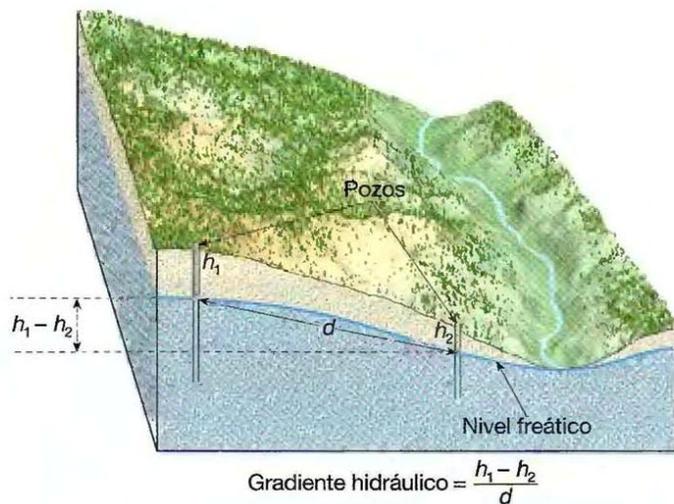
agua en la zona saturada pueden considerarse como un compromiso entre el empuje hacia abajo de la gravedad y la tendencia del agua a desplazarse hacia áreas de presión reducida. Como consecuencia, a cualquier altura dada, el agua está bajo una presión mayor debajo de una colina que debajo de un cauce de corriente, y el agua tiende a migrar hacia los puntos de menor presión.

Los conceptos modernos de la circulación del agua subterránea fueron formulados a mediados del siglo XIX con el trabajo del ingeniero francés Henri Darcy. Durante este período, Darcy realizó mediciones y llevó a cabo experimentos en un intento de determinar si las necesidades hídricas de la ciudad de Dijon, en el centro oriental de Francia, podían satisfacerse con la explotación de las aguas subterráneas de la zona. Entre los experimentos realizados por Darcy hubo uno en el que se demostró que la velocidad del flujo de las aguas subterráneas es proporcional a la pendiente del nivel freático: cuanto más inclinada es la pendiente, más rápido es el movimiento del agua (ya que, cuanto más inclinada es la pendiente, mayor es la diferencia de presión entre dos puntos). La pendiente del nivel freático es conocida como **gradiente hidráulico** y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Gradiente hidráulico} = \frac{h_1 - h_2}{d}$$

donde h_1 es la elevación de un punto sobre el nivel freático, h_2 la elevación de un segundo punto, y d es la distancia horizontal entre ambos puntos (Figura 17.5).

Darcy también experimentó con diferentes materiales como arena gruesa y arena fina, midiendo la veloci-



▲ **Figura 17.5** El gradiente hidráulico se determina midiendo la diferencia de elevación entre dos puntos del nivel freático ($h_1 - h_2$) dividida por la distancia entre ellos, d . Los pozos se utilizan para determinar la altura del nivel freático.

dad del flujo a través de tubos llenos de sedimentos inclinados a varios ángulos. Descubrió que la velocidad del flujo variaba con la permeabilidad del sedimento: las aguas subterráneas fluyen con mayor velocidad a través de los sedimentos con una mayor permeabilidad que a través de los materiales con una permeabilidad menor. Este factor es conocido como **conductividad hidráulica** y es un coeficiente que tiene en cuenta la permeabilidad del acuífero y la viscosidad del fluido.

Para determinar el caudal (Q), es decir, el volumen real de agua que fluye a través de un acuífero en un momento determinado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{KA(h_1 - h_2)}{d}$$

donde $\frac{h_1 - h_2}{d}$ es el gradiente hidráulico. K es el coeficiente que representa la conductividad hidráulica y A es el área transversal del acuífero. Esta expresión se ha denominado **ley de Darcy** en honor al científico pionero francés.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Hay alguna manera de medir directamente la velocidad de movimiento de las aguas subterráneas en un acuífero?

Sí. En un método muy sencillo, se introduce un colorante en un pozo y se mide el tiempo hasta que el agente colorante aparece en otro pozo a una distancia conocida del primero. Con experimentos de este tipo se ha demostrado que la velocidad del movimiento de las aguas subterráneas es muy variable. Una velocidad típica de muchos acuíferos es de alrededor de 15 metros anuales (unos 4 centímetros diarios), pero se han medido velocidades más de 15 veces superiores a esta cifra en materiales excepcionalmente permeables.

Manantiales o fuentes



Aguas subterráneas
▼ **Manantiales o fuentes y pozos**

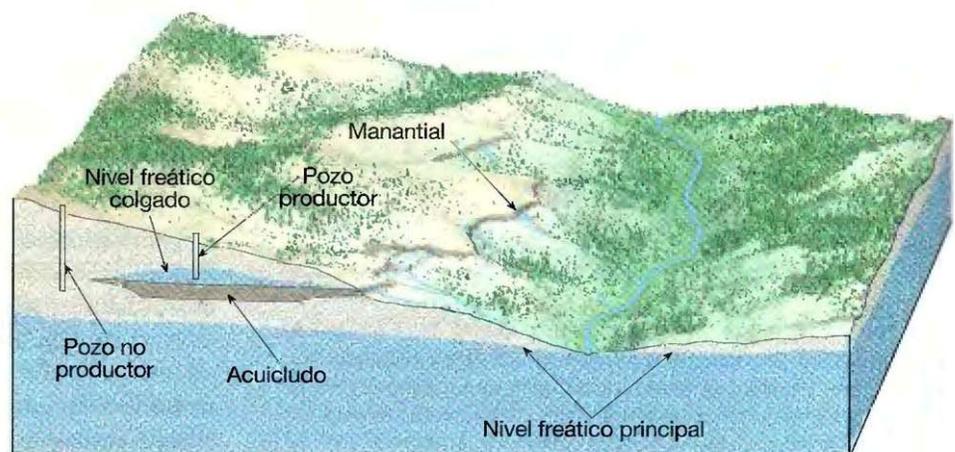
Los manantiales han despertado la curiosidad y maravillado a los seres humanos durante miles de años. El hecho de que los manantiales fueran, y para algunas personas todavía sean, fenómenos bastante misteriosos, no es difícil de entender, porque se trata de agua que fluye libremente desde el terreno en todo tipo de climas en una cantidad aparentemente inagotable, pero sin un origen obvio.

Sólo a mediados del siglo XVII, el físico francés Pierre Perrault, invalidó la antigua suposición de que la precipitación no podía explicar de manera adecuada la cantidad de agua que manaba de los manantiales y fluía a los ríos. Durante varios años, Perrault calculó la cantidad de agua que cayó en la cuenca del río Sena. Calculó luego la escorrentía anual media midiendo el caudal del río. Después de tener en cuenta la pérdida de agua por evaporación, demostró que quedaba suficiente agua para alimentar los manantiales. Gracias a los esfuerzos pioneros de Perrault y a las determinaciones realizadas por muchos después de él, sabemos ahora que el origen de los manantiales es el agua procedente de la zona de saturación y que el origen de esta agua son las precipitaciones.

Cuando el nivel freático intersecta la superficie terrestre, se produce un flujo natural de salida del agua subterránea, que se denomina **manantial** o **fuentes**. Los manantiales se forman cuando un acuícluido detiene la circulación descendente del agua subterránea y la obliga a moverse lateralmente. Allí donde aflora un estrato permeable, aparece un manantial. Otra situación que lleva a la formación de una fuente es la ilustrada en la Figura 17.6. Aquí, un acuícluido se sitúa por encima del nivel freático principal. Conforme el agua se filtra hacia abajo, una porción de ella es interceptada por el acuícluido, creando así una zona local de saturación y un **nivel freático colgado**.

Los manantiales, sin embargo, no están confinados a lugares donde un nivel freático colgado crea un flujo hacia la superficie. Muchas situaciones geológicas llevan a la formación de manantiales porque las condiciones subterráneas varían mucho de un lugar a otro. Incluso en áreas donde las capas subyacentes son rocas cristalinas impermeables, pueden existir zonas permeables en forma de fracturas o canales de disolución. Si estas aperturas se llenan con agua y hacen intersección con la superficie de terreno a lo largo de una pendiente, se producirá un manantial.

► **Figura 17.6** Cuando un acuícluido está situado por encima del nivel freático principal, puede producirse una zona de saturación localizada. Donde el nivel freático colgado hace intersección con la ladera del valle, fluye un manantial. El nivel freático colgado también hizo que el pozo de la derecha diera agua, mientras que el de la izquierda no producirá agua a menos que sea perforado a una mayor profundidad.

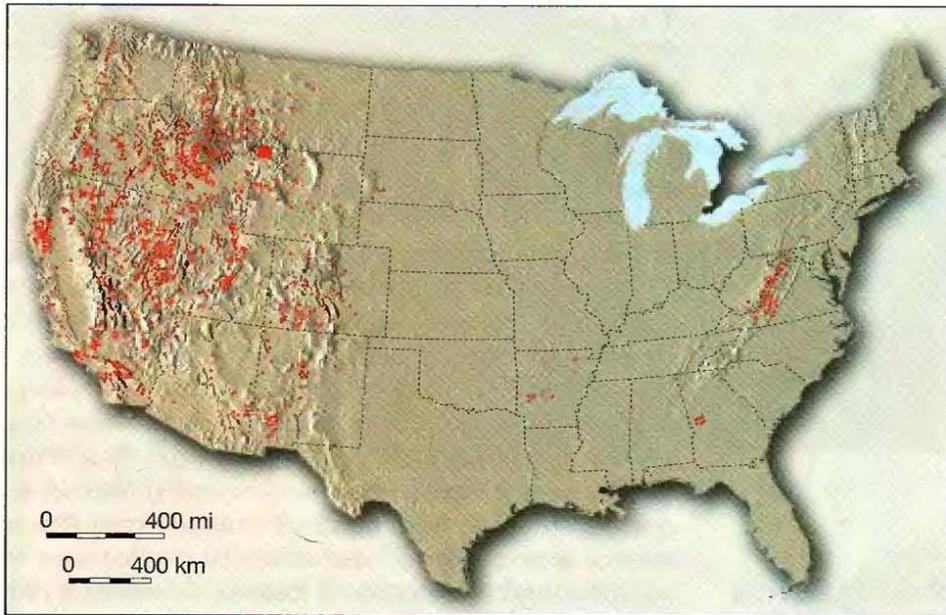


Fuentes termales y géiseres

Por definición, el agua de una **fuentes termal** está entre 6 y 9 °C más caliente que la temperatura media anual del aire para las localidades donde aparece. Sólo en Estados Unidos, hay más de 1.000 de estas fuentes (Figura 17.7).

Las temperaturas de las minas profundas y de los pozos petrolíferos normalmente se elevan, al aumentar la profundidad, una media de unos 2 °C cada 100 metros. Por consiguiente, cuando el agua subterránea circula a grandes profundidades, se calienta. Si se eleva a la superficie, el agua puede emerger como una fuente termal. El agua de algunas fuentes termales del este de Estados Unidos se calienta de esta manera. Sin embargo, la gran mayoría (más del 95 por ciento) de las fuentes termales (y géiseres) de Estados Unidos se encuentra en el oeste (Figura 17.7). La razón para esta distribución es que la fuente de calor de la mayoría de las fuentes termales es el enfriamiento de las rocas ígneas, y es en el oeste donde la actividad ígnea se produjo más recientemente.

Los **géiseres** son fuentes termales intermitentes en las cuales las columnas de agua son expulsadas con gran fuerza a diversos intervalos, alcanzando a menudo 30-60 metros en el aire. Después de cesar el chorro de agua, se lanza una columna de vapor normalmente con un rugido atronador. Quizá el géiser más famoso del mundo es el Old Faithful del Parque Nacional Yellowstone, que hace erupción aproximadamente una vez por hora. La gran abundancia, diversidad y naturaleza espectacular de los géiseres de Yellowstone y otras características térmicas fueron indudablemente la razón principal para que se convirtiera en el primer parque nacional de Estados Unidos. También se encuentran géiseres en otras partes del mundo, sobre todo en Nueva Zelanda e Islandia. De hecho, la palabra islandesa *geysa*, que significa salir a chorros, nos proporcionó el nombre de «géiser».



◀ **Figura 17.7** Distribución de las fuentes termales y de los géiseres en Estados Unidos. Obsérvese la concentración en el oeste, donde la actividad ígnea ha sido más reciente. (De G. A. Waring, U. S. Geological Survey Professional Paper 492, 1965.)

Los géiseres aparecen donde existen extensas cámaras subterráneas dentro de las rocas ígneas calientes. En la Figura 17.8 se muestra cómo funcionan. Cuando agua subterránea relativamente fría entra en las cámaras, se calienta gracias a la roca circundante. En el fondo de las cámaras, el agua está bajo una gran presión debido al peso del agua suprayacente. Esta gran presión evita que el agua hierva a la temperatura superficial normal de 100 °C. Por ejemplo, el agua del fondo de una cámara llena de agua situada a 300 metros debe alcanzar casi 230 °C antes de hervir. El calentamiento hace que el agua se expanda, con el resultado de que algo del agua se ve forzado a salir a la superficie. Esta pérdida de agua reduce la presión de la que queda en la cámara, lo que reduce el punto de ebullición. Una porción del agua que hay en profundidad dentro de la cámara se convierte rápidamente en vapor y el géiser entra en erupción (Figura 17.8). Después de la erupción, agua subterránea fría vuelve a entrar en la cámara y el ciclo vuelve a empezar.

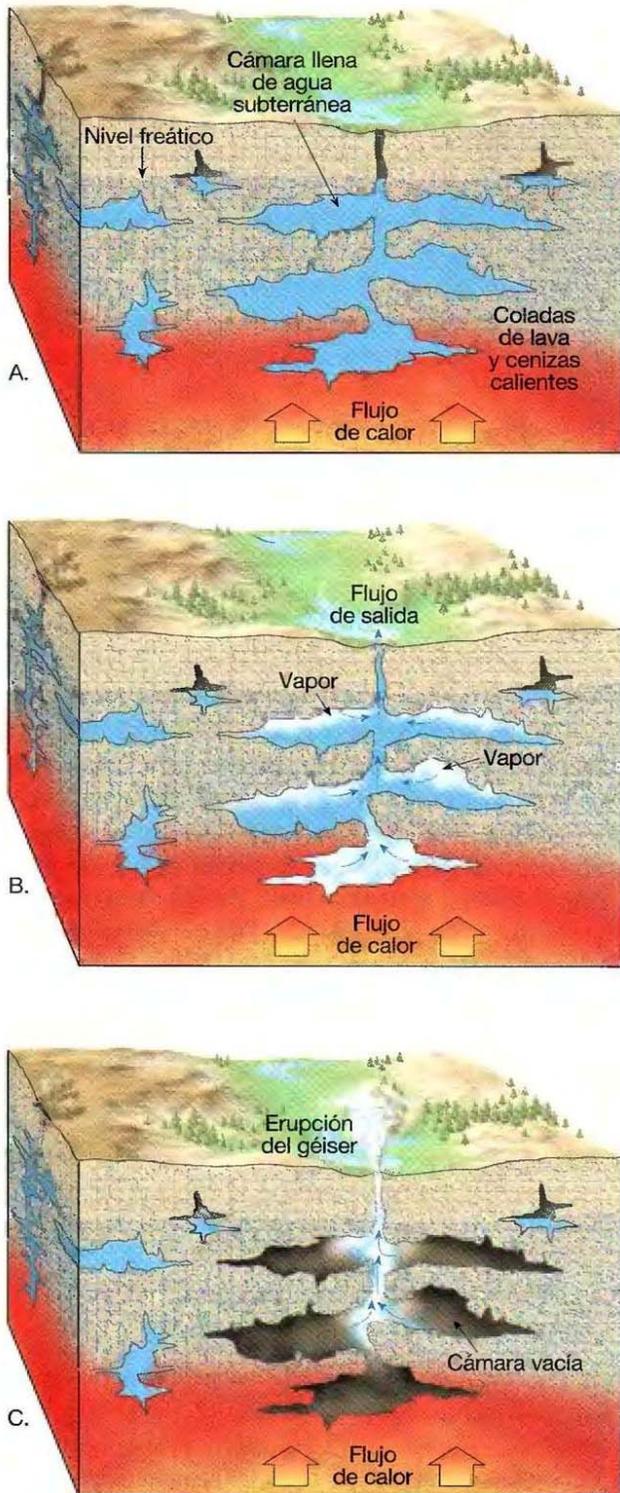
Cuando el agua subterránea de las fuentes termales y los géiseres fluye hacia fuera en la superficie, el material en solución suele precipitar, produciendo una acumulación de roca sedimentaria química. El material depositado en cualquier lugar determinado refleja habitualmente la composición química de la roca a través de la cual el agua circuló. Cuando el agua contiene sílice disuelta, se deposita alrededor de la fuente un material denominado *geiserita*. Cuando el agua contiene disuelto carbonato cálcico, se deposita una forma de caliza que se denomina *travertino* o *toba calcárea*. El último término se utiliza si el material es esponjoso y poroso.

Los depósitos de las fuentes termales Mammoth del Parque Nacional Yellowstone son más espectaculares que la mayoría. Conforme el agua caliente fluye hacia arriba a través de una serie de canales y luego a la superficie, la presión reducida permite que se separe el dióxido de carbono y escape del agua. La pérdida del dióxido de carbono hace que el agua se sobresature con carbonato cálcico, que entonces precipita. Además de contener sílice y carbonato cálcico disueltos, algunas fuentes termales contienen azufre, que proporciona al agua un mal sabor y un olor desagradable. Indudablemente la fuente Rotten Egg (huevo podrido) de Nevada es de este tipo.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

Sé que Old Faithful, en el Parque Nacional Yellowstone, es el géiser más famoso. ¿Es el más grande?

No. Parece que esa distinción pertenece al géiser Steamboat de Yellowstone, al menos si utilizamos la palabra «grande» con el significado de «alto». Durante una erupción grande, el géiser Steamboat puede expulsar chorros de agua de 90 metros de altura durante hasta 40 minutos. Después de esta fase de agua, en la fase de vapor se producen potentes expulsiones de nubes calientes que se elevan 150 metros en el cielo. Como la mayoría de géiseres de Yellowstone, el géiser Steamboat no es fiable como Old Faithful. Los intervalos entre erupciones pueden oscilar entre tres días y 50 años. El géiser, que permaneció en completo reposo de 1911 a 1961, ha entrado en erupción menos de 10 veces desde 1989.



▲ **Figura 17.8** Diagramas idealizados de un géiser. Un géiser puede formarse si el calor no se distribuye por convección. **A.** En esta figura, el agua situada cerca del fondo se calienta hasta casi su punto de ebullición. El punto de ebullición es más alto allí que en la superficie, porque el peso del agua que tiene por encima aumenta la presión. **B.** El agua situada por encima en el sistema del géiser también se calienta. Por consiguiente, se expande y fluye hacia arriba, reduciendo la presión del agua situada en el fondo. **C.** Al reducirse la presión en el fondo, se produce la ebullición. Algo del agua del fondo sale en forma de vapor expansivo y produce una erupción.

Pozos



Aguas subterráneas ▼ Manantiales o fuentes y pozos

El método más común para extraer agua subterránea es el **pozo**, un agujero taladrado en la zona de saturación. Los pozos sirven a modo de pequeños depósitos a los cuales migra el agua subterránea y de los cuales puede bombearse a la superficie. La utilización de pozos se remonta a muchos siglos y sigue siendo un método importante para la obtención de agua en la actualidad. Con mucho, la utilización mayor de esta agua en Estados Unidos es la irrigación para la agricultura. Más del 65 por ciento del agua subterránea utilizada cada año se emplea para este fin. El uso industrial se encuentra en segundo lugar, seguido de la cantidad utilizada en los sistemas de abastecimiento de agua de las ciudades y en las casas rurales.

El nivel freático puede fluctuar considerablemente a lo largo de un año, descendiendo durante las estaciones secas y elevándose tras los períodos de lluvia. Por consiguiente, para asegurar un abastecimiento continuo de agua, un pozo debe penetrar debajo del nivel freático. Cuando se extrae agua de un pozo, el nivel freático alrededor del pozo se reduce. Este efecto, denominado **descenso de nivel**, disminuye al aumentar la distancia desde el pozo. El resultado es una depresión en el nivel freático, de forma aproximadamente cónica, conocida

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

He oído decir que los suministros de agua subterránea pueden localizarse utilizando un palo bifurcado. ¿Realmente se puede hacer así?

Lo que describe es una práctica denominada «radiestesia». En el método clásico, una persona, sosteniendo un palo bifurcado, anda de un lado a otro sobre una zona. Cuando se detecta agua, se supone que la parte inferior de la «Y» percibe una atracción hacia abajo.

Los geólogos y los ingenieros, como poco, dudan. Las historias de casos y las demostraciones pueden parecer convincentes, pero cuando la radiestesia se somete al escrutinio científico, fracasa. Los ejemplos más «satisfactorios» de radiestesia se producen en lugares donde sería difícil que el agua pasara desapercibida. En una región con las lluvias adecuadas y una geología favorable, ¡es difícil perforar y no encontrar agua!



◀ **Figura 17.9** Suele formarse un cono de depresión en el nivel freático alrededor de un pozo de bombeo. Si un bombeo intenso reduce el nivel freático, pueden secarse los pozos someros.

como **cono de depresión** (Figura 17.9). Dado que el cono de depresión aumenta el gradiente hidráulico cerca del pozo, el agua subterránea fluirá más deprisa hacia la apertura. Para la mayoría de los pozos domésticos más pequeños, el cono de depresión es despreciable. Sin embargo, cuando los pozos están siendo bombeados con mucha intensidad para el regadío o con fines industriales, la extracción del agua puede ser lo bastante grande como para crear un cono de depresión muy ancho y empinado. Esto puede reducir sustancialmente el nivel freático de un área y secar los pozos poco profundos de los alrededores. En la Figura 17.9 se ilustra esta situación.

La excavación de un pozo satisfactorio es un problema familiar para las personas que viven en áreas donde el agua subterránea es la fuente principal de abastecimiento. Un pozo puede ser productivo a una profundidad de 10 metros, mientras que un vecino puede tener que profundizar dos veces más para encontrar un abastecimiento adecuado. Otros pueden verse obligados a llegar a mayor profundidad o a intentarlo en un sitio diferente. Cuando los materiales subsuperficiales son heterogéneos, la cantidad de agua que un pozo es capaz de proporcionar puede variar mucho en distancias cortas. Por ejemplo, cuando se perforan dos pozos próximos al mismo nivel y sólo uno produce agua, puede deberse a la presencia de un nivel freático colgado debajo de uno de ellos. Este caso se muestra en la Figura 17.6. Las rocas metamórficas e ígneas masivas proporcionan un segundo ejemplo. Estas rocas cristalinas no suelen ser muy permeables, excepto cuando son cortadas por muchas diaclasas y fracturas que intersectan entre sí. Por consiguiente, cuando un pozo perforado en una roca de este tipo no se encuentra con una red adecuada de fracturas, es probable que sea improductivo.

Pozos artesianos



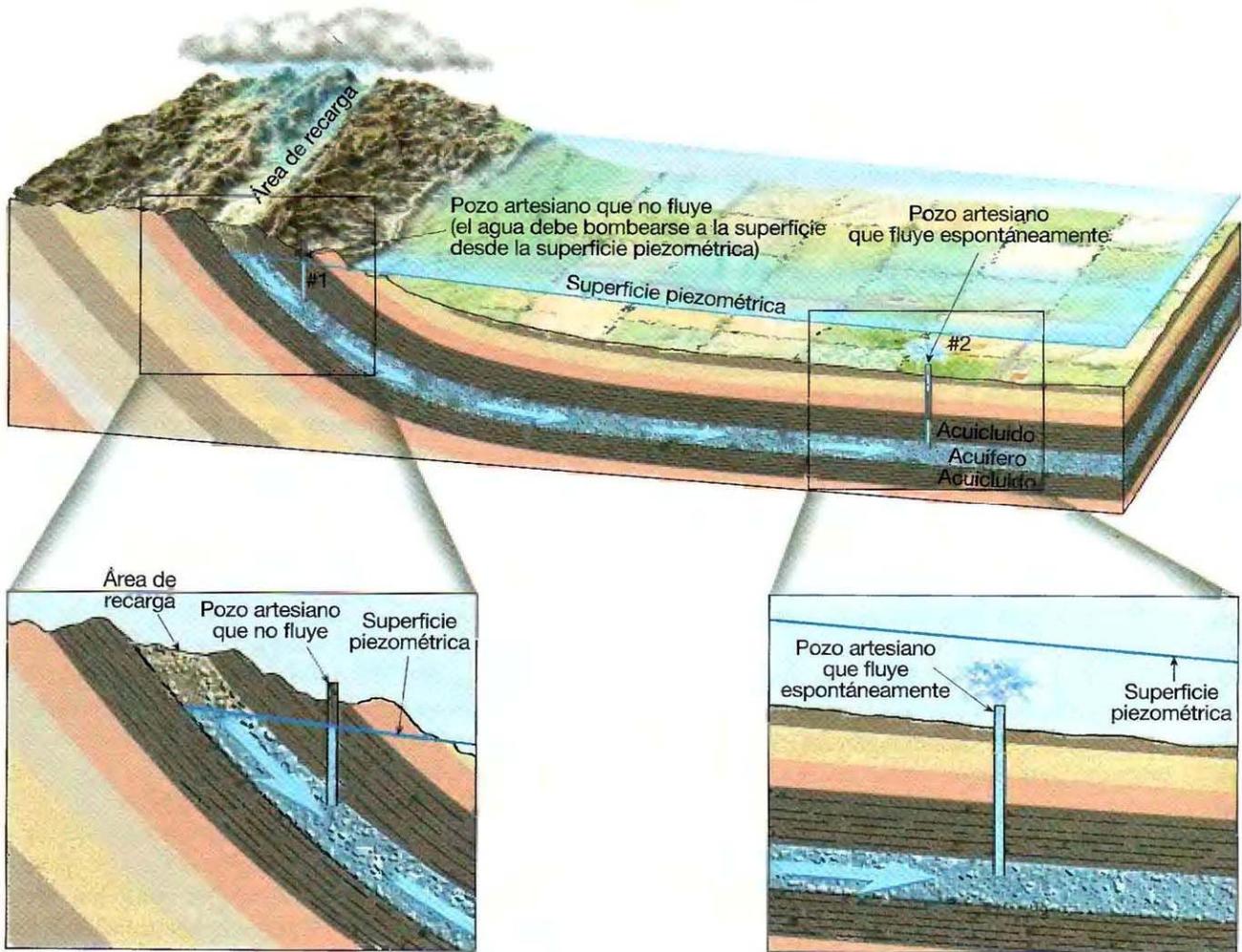
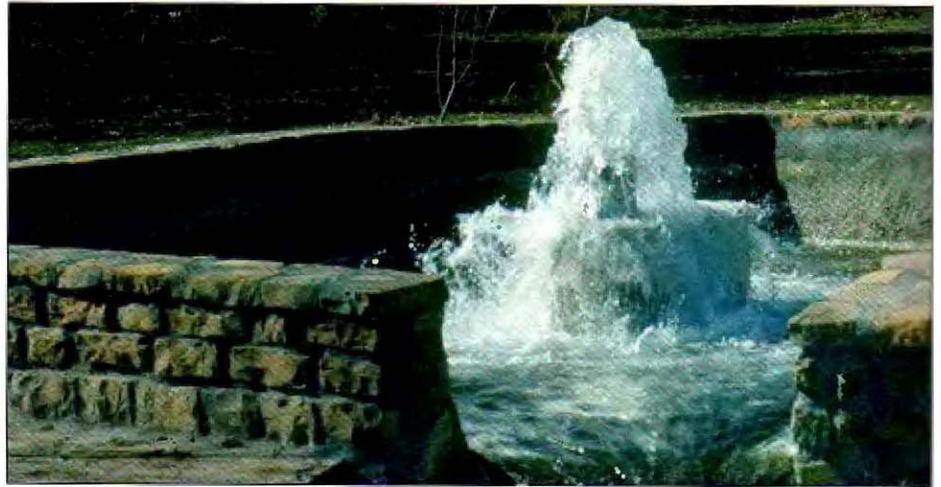
Aguas subterráneas ▼ Manantiales o fuentes y pozos

En la mayoría de los pozos, el agua no puede ascender por sí misma. Si el agua se encuentra por primera vez a 30 metros de profundidad, permanecerá a ese nivel, fluctuando quizá un metro o dos con los períodos estacionales de humedad y sequía. Sin embargo, en algunos pozos, el agua asciende, derramándose a veces por la superficie. Estos pozos son abundantes en la región *Artois* del norte de Francia y por eso denominamos a estos pozos autoascendentes *artesianos*.

Para muchas personas el término *artésiano* se aplica a cualquier pozo perforado a grandes profundidades. Este uso del término es incorrecto. Otros creen que un pozo artésiano debe fluir libremente a la superficie (Figura 17.10). Aunque ésta es una idea más correcta que la primera, constituye una definición muy restringida. El término *artésiano* se aplica a *cualquier* situación en la cual el agua subterránea bajo presión asciende por encima del nivel del acuífero. Como veremos, esto no significa siempre una salida de flujo libre a la superficie.

Para que exista un sistema artésiano, deben cumplirse dos condiciones (Figura 17.11): (1) el agua debe estar confinada a un acuífero inclinado, de modo que un extremo pueda recibir agua, y (2) debe haber acuicludos, encima y debajo del acuífero, para evitar que el agua escape. Cuando se pincha esta capa, la presión creada por el peso del agua situada encima obligará al agua a elevarse hasta un nivel denominado **piezométrico**. Si no hay fricción, el agua del pozo se elevará al nivel del agua situada encima del acuífero. Sin embargo, la fricción reduce la altura de la superficie piezométrica. Cuanto mayor sea la distancia desde el

► **Figura 17.10** A veces el agua fluye libremente a la superficie cuando se desarrolla un pozo artesiano. Sin embargo, en la mayoría de los pozos artesianos, el agua debe ser bombeada a la superficie. (Foto de James E. Patterson.)



▲ **Figura 17.11** Los sistemas artesianos se producen cuando un acuífero inclinado está confinado entre estratos impermeables.

área de recarga (donde el agua entra en el acuífero inclinado), mayor será la fricción y menor la elevación del agua.

En la Figura 17.11, el pozo 1 es un **pozo artesiano no surgente**, porque en esta situación la superficie pie-

zométrica está por debajo del nivel del suelo. Cuando la superficie piezométrica está por encima del terreno y el pozo se perfora en el acuífero, se crea un **pozo artesiano surgente** (pozo 2, Figura 17.11). No todos los sistemas

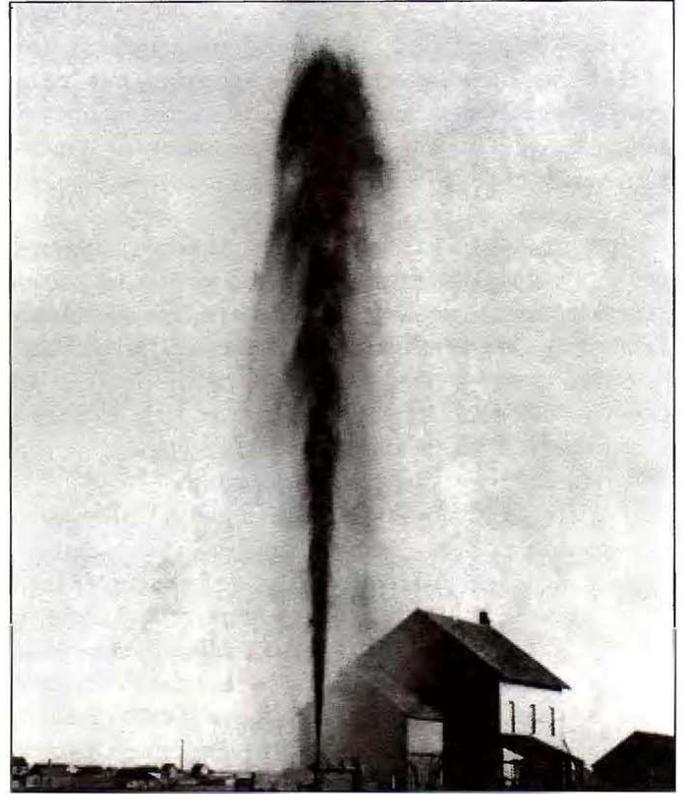
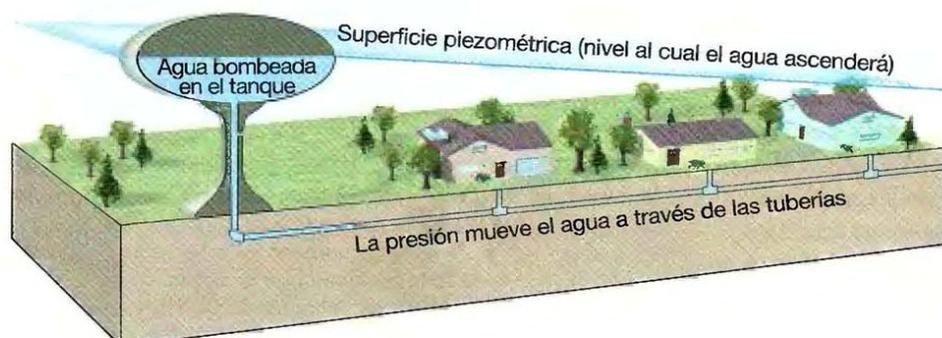
artesianos son pozos. También existen *fuentes artesianas*. En este caso, el agua subterránea alcanza la superficie elevándose a través de una fractura natural, en lugar de hacerlo a través de un agujero producido artificialmente.

Los sistemas artesianos actúan como conductos, transmitiendo a menudo el agua a grandes distancias desde áreas remotas de recarga hasta los puntos de descarga. Un sistema artesiano bien conocido en Dakota del Sur es un buen ejemplo de esto. En la parte occidental del estado, los bordes de una serie de capas sedimentarias se han doblado hacia la superficie a lo largo de los flancos de las Black Hills. Una de esas capas, la arenisca Dakota permeable, se encuentra entre capas impermeables y buza gradualmente en el terreno hacia el este. Cuando se pinchó el acuífero por primera vez, el agua brotó de la superficie del terreno, creando fuentes de muchos metros de altura (Figura 17.12). En algunos lugares, la fuerza del agua fue suficiente como para proporcionar energía a turbinas hidráulicas. Sin embargo, escenas como las de la imagen de la Figura 17.12 ya no pueden ocurrir, porque se han perforado miles de pozos adicionales en el mismo acuífero. Esto agotó el depósito, y descendió el nivel freático del área de recarga. Como consecuencia, la presión cayó hasta el punto de que muchos pozos dejaron de fluir y tuvieron que ser bombeados.

A una escala diferente, los sistemas de abastecimiento de las ciudades pueden ser considerados ejemplos de sistemas artesianos artificiales (Figura 17.13). El depósito de agua representaría el área de recarga; las tuberías, el acuífero confinado, y los grifos de las casas, los pozos artesianos surgentes.

Problemas relacionados con la extracción del agua subterránea

Como ocurre con muchos de nuestros valiosos recursos naturales, el agua subterránea está siendo explotada a un ritmo creciente. En algunas zonas, la sobreexplotación amenaza la existencia del abastecimiento de agua subterránea. En otros lugares, su extracción ha hecho que se



▲ **Figura 17.12** Pozo artesiano que fluye «en forma de surtidor» en Dakota del Sur a principios del siglo xx. En la actualidad se explota el mismo acuífero confinado a través de millares de pozos adicionales; por tanto, la presión ha descendido hasta el punto de que muchos pozos han dejado de fluir por completo y deben bombearse. (Foto de N. H. Darton, U. S. Geological Survey.)

hunda el terreno y todo lo que descansaba sobre él. En otros lugares hay preocupación por la posible contaminación del abastecimiento de las aguas subterráneas.

Tratamiento del agua subterránea como un recurso no renovable

Muchos sistemas naturales tienden a establecer un estado de equilibrio. El sistema de aguas subterráneas no es una excepción. La altura del nivel freático refleja un equilibrio

◀ **Figura 17.13** Los sistemas de abastecimiento de agua de las ciudades pueden considerarse sistemas artesianos artificiales.

entre la velocidad de infiltración y la velocidad de descarga y extracción. Cualquier desequilibrio elevará o reducirá el nivel freático. Desequilibrios a largo plazo pueden inducir una caída significativa del nivel freático si hay una reducción de la recarga debido a una sequía prolongada o a un aumento de la descarga o la extracción de las aguas subterráneas.

A muchas personas les parece que el agua subterránea es un recurso interminablemente renovable, porque es continuamente repuesta por el agua de la lluvia y el deshielo de la nieve. Pero en algunas regiones, el agua subterránea ha sido y continúa siendo tratada como un recurso *no renovable*. Donde esto ocurre, el agua disponible para recargar el acuífero se queda significativamente corta con respecto a la cantidad que se extrae.

La región de los High Plains (Estados Unidos) proporciona un ejemplo. Aquí la economía agrícola extensiva depende mucho del regadío. En algunas partes de la región, donde se ha practicado regadío intenso durante un período prolongado, el agotamiento del agua subterránea ha sido severo. Bajo esas circunstancias, cabe decir que el agua subterránea está siendo literalmente «explotada». Aun cuando el bombeo se interrumpiera inmediatamente, se tardarían centenares o miles de años hasta reponerla por completo. En el Recuadro 17.2 se analiza detenidamente esta cuestión.

Subsidencia

Como se verá más tarde en este mismo capítulo, la subsidencia superficial puede ser consecuencia de procesos naturales relacionados con el agua subterránea. Sin embargo, el terreno puede hundirse también cuando el agua se bombea desde los pozos más rápidamente de lo que pueden reemplazarla los procesos de recarga natural. Este efecto es particularmente pronunciado en áreas con estratos potentes de sedimentos no consolidados superpuestos. Conforme se extrae el agua, la presión del agua descende y el peso de la sobrecarga se transfiere al sedimento. La mayor presión compacta herméticamente los granos de sedimento y el terreno se hunde.

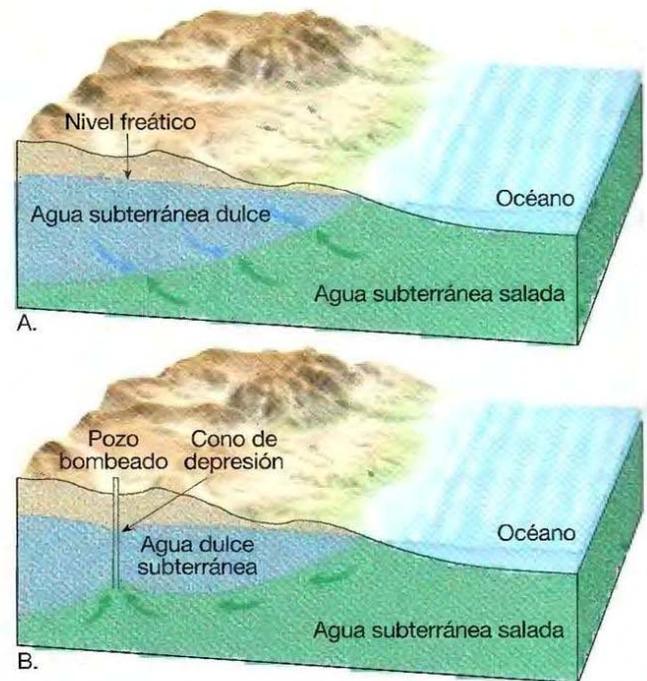
Pueden utilizarse muchas zonas para ilustrar la subsidencia del terreno causada por el bombeo excesivo del agua subterránea a partir de sedimento relativamente suelto. Un ejemplo clásico en Estados Unidos se produjo en el valle de San Joaquín, en California, y se comenta en el Recuadro 17.3. Existen muchos otros casos de subsidencia de terreno debido a bombeo del agua subterránea en Estados Unidos, entre ellos Las Vegas, Nevada; Nueva Orleans y Baton Rouge, Luisiana, y el área Houston-Galveston de Texas. En el área costera baja entre Houston y Galveston, la subsidencia del terreno oscila entre 1,5 metros y 3 metros. El resultado es que al-

rededor de 78 kilómetros cuadrados están permanentemente inundados.

Fuera de Estados Unidos, uno de los ejemplos más espectaculares de subsidencia se produjo en la ciudad de México, que está construida en lo que antes era el fondo de un lago. En la primera mitad del siglo XX se perforaron miles de pozos en los sedimentos saturados de agua de debajo de la ciudad. A medida que se iba extrayendo el agua, zonas de la ciudad se hundieron hasta 6 o 7 metros. En algunos lugares, los edificios se han hundido hasta tal punto que el acceso a ellos desde la calle se realiza por donde ¡antes era el segundo piso!

Contaminación salina

En muchas áreas costeras, el recurso de las aguas subterráneas está siendo amenazado por la intrusión de agua de mar. Para entender este problema, debemos examinar la relación entre el agua subterránea dulce y el agua subterránea salada. La Figura 17.14A es un diagrama de un corte que ilustra esta relación en un área costera situada encima de materiales homogéneos permeables. El agua dulce es menos densa que el agua salada, de manera que flota sobre ella y forma un cuerpo lenticular grande que



▲ **Figura 17.14** A. Dado que el agua dulce es menos densa que el agua salada, flota **sobre** esta última y forma un cuerpo lenticular que puede extenderse hasta profundidades considerables debajo del nivel del mar. B. Cuando un bombeo excesivo reduce el nivel freático, la base de la zona de agua dulce se elevará 40 veces esa cantidad. El resultado puede ser la contaminación de los pozos con agua salada.

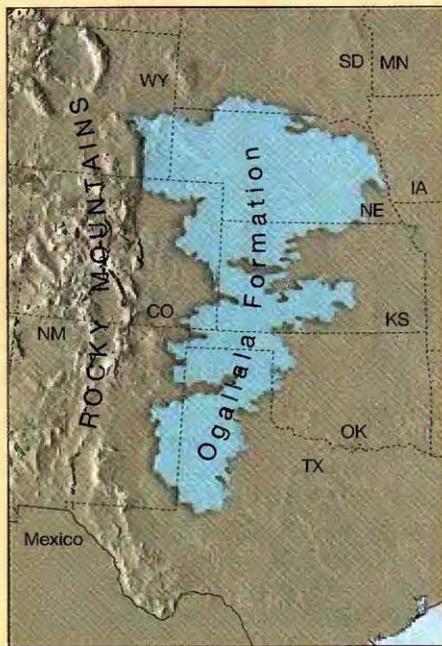


Recuadro 17.2 ▶ El hombre y el medio ambiente

El acuífero de Ogallala: ¿cuánto va a durar el agua?

La región High Plains se extiende desde el oeste de las dos Dakotas en dirección sur hasta Texas. A pesar de ser una zona con pocas lluvias, es una de las regiones agrícolas más importantes de Estados Unidos. El motivo es una gran dotación de aguas subterráneas que posibilita la de la mayor parte de los 450.000 kilómetros cuadrados que componen la región. El origen de la mayor parte de esta agua es la formación Ogallala, el acuífero más grande de Estados Unidos (Figura 17.B).

Desde el punto de vista geológico, la formación Ogallala es joven, está for-



▲ **Figure 17.B** La formación Ogallala yace bajo 450.000 km² de los High Plains convirtiéndose en el acuífero más grande de Estados Unidos.

mada por una serie de capas de arena y grava de finales del Terciario y el Cuaternario. Los sedimentos procedían de la erosión de las montañas Rocosas y fueron transportados hacia el este por corrientes lentas. La erosión ha retirado una gran parte de la formación desde el este de Colorado, rompiendo la conexión entre Ogallala y las montañas Rocosas.

La formación Ogallala tiene un grosor de 60 metros y en algunos lugares alcanza los 180 metros. Las aguas subterráneas del acuífero procedían de las corrientes descendentes de las Rocosas, así como de la precipitación superficial que se infiltró en el suelo durante millares de años. Debido a su porosidad elevada y su gran tamaño, Ogallala acumuló grandes cantidades de aguas subterráneas: ¡el agua dulce suficiente para llenar el lago Huron! En la actualidad, con la ruptura de la conexión entre el acuífero y las Rocosas, toda la recarga de Ogallala procede de las escasas lluvias de la región.

El acuífero de Ogallala fue el primero que se utilizó para la irrigación a finales del siglo XIX, pero su uso estaba limitado por la capacidad de las bombas disponibles en esa época. En la década de los 20, con el desarrollo de bombas de irrigación de gran capacidad, los agricultores de High Plains, en especial en Texas, empezaron a explotar la formación Ogallala para la irrigación. Luego, en los años 50, la tecnología mejorada trajo la explotación a gran escala del acuífero. En la actualidad se utilizan casi 170.000 pozos para irrigar más de 65.000 kilómetros cuadrados de tierra.

Con el aumento de la irrigación vino una caída drástica del nivel freático de Ogallala, en especial en la zona meridional de High Plains. Los descensos del nivel freático de 3 a 15 metros son habituales, y en algunos lugares el nivel freático actual se sitúa 60 metros por debajo de su nivel anterior a la irrigación.

Desde la década de los 80, ha disminuido el número de acres irrigados en High Plains. Un motivo importante ha sido el aumento de los costes energéticos. Puesto que los niveles de agua han descendido, los costes de bombear las aguas superficiales hasta la superficie han aumentado.

Aunque el descenso del nivel freático se ha ralentizado en algunas partes del sur de High Plains, se continúa realizando un bombeo sustancial, que a menudo supera la recarga. El futuro de la agricultura irrigada en esta región está claramente en peligro.

El sur de High Plains representa una zona de los Estados Unidos que volverá, tarde o temprano, a la agricultura de secano. La transición se producirá más pronto y con menos crisis económicas si la industria agrícola se aleja gradualmente de su dependencia de la irrigación con aguas subterráneas. Si no se hace nada hasta que se agote toda la reserva hídrica del acuífero de Ogallala, la transición será ecológicamente peligrosa y económicamente terrible*.

* National Research Council. *Solid-Earth Sciences and Society*. Washington, DC: National Academy Press, 1993, pág. 148.

puede extenderse a profundidades considerables por debajo del nivel del mar. En dicha situación, si el nivel freático se encuentra a un metro por encima del nivel del mar, la base del volumen de agua dulce se extenderá hasta una profundidad de unos 40 metros por debajo del nivel del mar. Dicho de otra manera, la profundidad del agua dulce por debajo del nivel del mar es unas 40 veces mayor que la elevación del nivel freático por encima del

nivel del mar. Por tanto, cuando el bombeo excesivo hace descender el nivel freático en una cierta cantidad, el fondo de la zona de agua dulce se elevará unas 40 veces esa cantidad. Por consiguiente, si continúa la extracción de agua dulce hasta exceder la recarga, llegará un momento en que la elevación del agua salada será suficiente como para ser extraída de los pozos, contaminando así el suministro de agua dulce (Figura 17.14B). Los pozos profundos y los



Recuadro 17.3 ▶ El hombre y el medio ambiente

Subsidencia del terreno en el valle de San Joaquín

El valle de San Joaquín es una amplia cubeta que contiene un potente relleno de sedimentos. Del tamaño de Maryland, constituye los dos tercios meridionales del valle central de California, una tierra plana que separa dos cordilleras montañosas, la cordillera Costera al oeste y la Sierra Nevada al este (Figura 17.C). El sistema de acuíferos del valle es una mezcla de materiales de aluvión procedentes de las montañas circundantes. La potencia de sedimentos tiene un valor medio de unos 870 metros. El clima del valle es entre árido y semiárido, con una precipitación anual media que oscila entre 120 y 350 milímetros.

El valle de San Joaquín tiene una fuerte economía agrícola que exige grandes cantidades de agua para el regadío. Durante muchos años, hasta el 50 por ciento de esta necesidad se satisfizo con el agua subterránea. Además, casi todas las ciudades de la región utilizan el agua subterránea para uso doméstico e industrial.

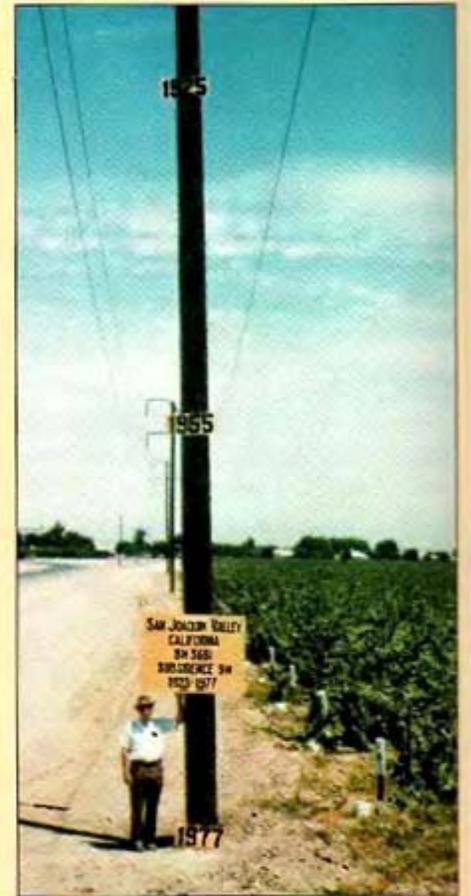
Aunque el desarrollo del agua subterránea del valle para regadío empezó a finales del siglo pasado, la subsidencia del

terreno no se inició hasta la mitad de la segunda década del siglo XX, cuando aumentó notablemente la extracción de agua. A principios de los setenta, los niveles de agua habían disminuido hasta 120 metros. La subsidencia resultante del terreno superó los 8,5 metros en un lugar de la región (Figura 17.D). En ese momento, había áreas del valle en las que se producía subsidencia a una velocidad superior a 0,3 metros al año.

Entonces, dado que el agua de superficie se estaba importando y el bombeo de agua subterránea se redujo, los niveles de agua de los acuíferos se recuperaron y la subsidencia se interrumpió. Sin embargo, durante la sequía de 1976-1977, el intenso bombeo de agua subterránea indujo una reactivación de la subsidencia. En esta época, los niveles de agua descendieron mucho más rápido debido a la menor capacidad de almacenamiento causada por la compactación previa de los sedimentos. En total, se vio afectada por la subsidencia la mitad del valle. Según el U. S. Geological Survey:

La subsidencia en el valle de San Joaquín representa probablemente una de las mayores alteraciones de la configuración de la superficie terrestre... Ha producido problemas graves y económicamente costosos en la construcción y en el mantenimiento de las estructuras de transporte del agua, carreteras y estructuras superficiales; también se han gastado muchos millones de dólares en la reparación y sustitución de pozos de agua subterránea. La subsidencia, además de cambiar el gradiente y el curso de las corrientes y los arroyos del valle, ha producido inundaciones inesperadas, que han costado a los granjeros muchos centenares de miles de dólares para nivelar el terreno*.

* R. L. Ireland, J. F. Poland y F. S. Riley, *Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1980*, U. S. Geological Survey Professional Paper 437-1 (Washington, DC: US. Government Printing Office, 1984), pág. 11.



▲ **Figure 17.D** Las marcas de este poste de luz indican el nivel de la tierra circundante en los años anteriores. Entre 1925 y 1975 esta parte del Valle de San Joaquín experimentó una subsidencia de casi 9 metros como consecuencia de la extracción de agua subterránea y la compactación consecutiva de los sedimentos. (Foto cortesía de U.S. Geological Survey.)

Se han documentado efectos similares en el área de San José del valle de Santa Clara, California, donde, entre 1916 y 1966, la subsidencia se acercó a los 4 metros. La inundación de las tierras que bordean la parte meridional de la bahía de San Francisco fue uno de los resultados. Como ocurrió en el valle de San Joaquín, la subsidencia se interrumpió cuando aumentó la importación del agua de superficie, permitiendo la disminución de la extracción del agua subterránea.



▲ **Figure 17.C** El área sombreada muestra el valle de San Joaquín, en California.

pozos próximos a la costa son normalmente los primeros en verse afectados.

En las zonas costeras urbanizadas, los problemas creados por bombeo excesivo están agravados por un descenso del ritmo de recarga natural. A medida que aumentan las calles, los aparcamientos y los edificios que cubren la superficie, disminuye la infiltración en el suelo.

Para intentar corregir el problema de la contaminación del agua subterránea con agua salada, puede utilizarse una red de pozos de recarga. Estos pozos permiten el bombeo de las aguas de nuevo al sistema de aguas subterráneas. Un segundo método de corrección se lleva a cabo mediante la construcción de grandes cuencas. Estas cuencas recogen el drenaje de superficie y permiten que se infiltre en el terreno. En Long Island, Nueva York, donde el problema de la contaminación salina se reconoció hace más de 40 años, se han utilizado estos dos métodos con considerable éxito.

La contaminación de los acuíferos de agua dulce por agua salada constituye fundamentalmente un problema en las zonas costeras, pero también puede amenazar a zonas no costeras. Muchas rocas sedimentarias antiguas de origen marino se depositaron cuando el océano cubría lugares que ahora se encuentran bastante en el interior. En algunos casos, cantidades significativas de agua de mar quedaron atrapadas y todavía permanecen en la roca. Estos estratos a veces contienen cantidades de agua dulce y pueden ser bombeadas para su uso. Sin embargo, si el agua dulce se elimina más deprisa de lo que puede reponerse, el agua salada puede introducirse y dejar inutilizables los pozos. Una situación como ésta amenazó a los usuarios de un profundo acuífero de arenisca (del Cámbrico) en la zona de Chicago. Para contrarrestarlo, se distribuyó agua del lago Michigan a las comunidades afectadas con objeto de compensar la velocidad de extracción del acuífero.

Contaminación del agua subterránea

La contaminación del agua subterránea es una cuestión seria, en particular en las áreas donde los acuíferos proporcionan una gran parte del suministro de agua. Un origen común de la contaminación del agua subterránea son las aguas fecales. Entre sus fuentes se cuenta un número creciente de fosas sépticas, así como sistemas de alcantarillado inadecuados o rotos y los desechos de las granjas.

Si las aguas residuales que están contaminadas con bacterias entran en el sistema de aguas subterráneas, pueden purificarse mediante procesos naturales. Las bacterias peligrosas pueden ser filtradas mecánicamente por el sedimento a través del cual el agua percola, destruidas por oxidación química o asimiladas por otros microorganismos.

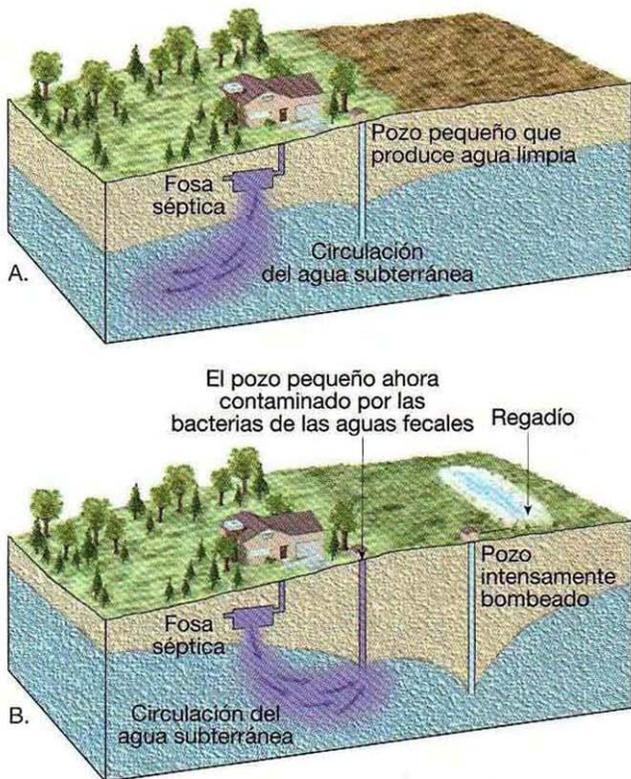
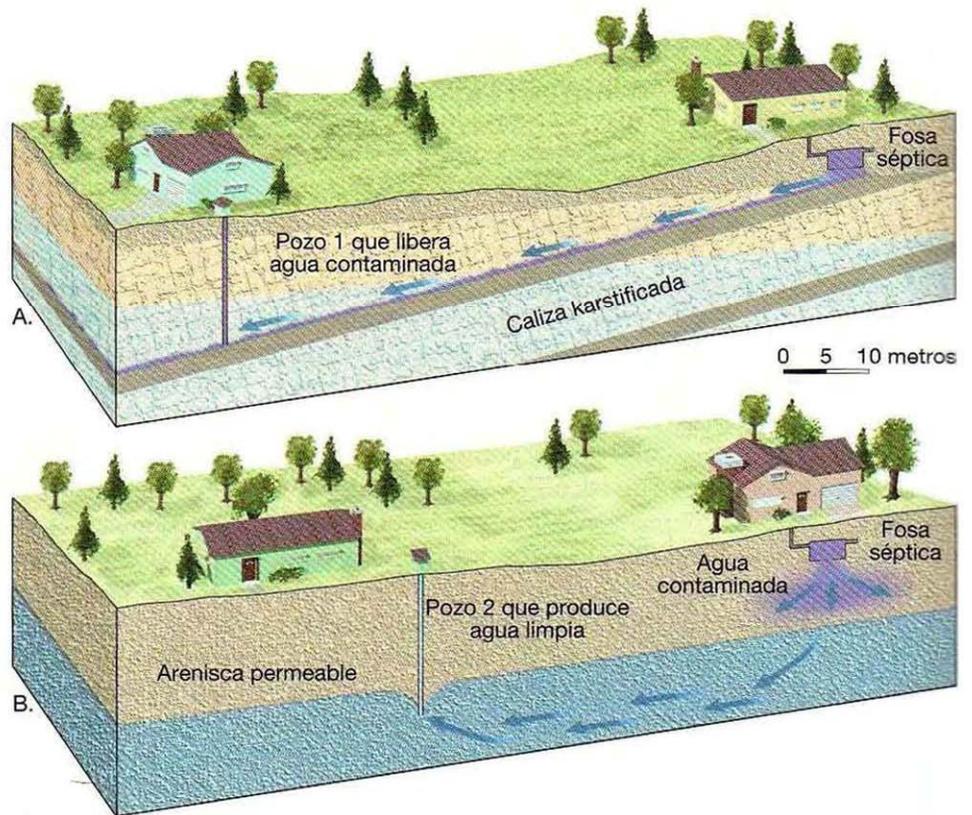
Para que se produzca purificación, sin embargo, el acuífero debe ser de la composición correcta. Por ejemplo, acuíferos extremadamente permeables (como rocas cristalinas muy fracturadas, grava gruesa o caliza karstificada) tienen aperturas tan grandes que el agua subterránea contaminada puede recorrer grandes distancias sin ser purificada. En este caso, el agua fluye con demasiada rapidez y no está en contacto con el material circundante el tiempo suficiente para que se produzca su purificación. Éste es el problema del pozo 1 de la Figura 17.15A.

Por otro lado, cuando el acuífero está compuesto por arena o arenisca permeable, a veces puede purificarse después de viajar por él sólo unas docenas de metros. Los huecos entre los granos de arena son lo bastante grandes como para permitir el movimiento del agua, pero este movimiento es, por otro lado, lo bastante lento como para permitir un tiempo prolongado de purificación (pozo 2, Figura 17.15B).

A veces, la perforación de un pozo puede inducir problemas de contaminación del agua subterránea. Si el pozo bombea una cantidad suficiente de agua, el cono de depresión incrementará localmente la pendiente del nivel freático. En algunos casos, la pendiente original puede incluso invertirse. Esto podría inducir contaminación de los pozos que producían agua no contaminada antes de que empezara el bombeo intenso (Figura 17.16). También recordemos que la velocidad de circulación del agua subterránea aumenta conforme lo hace la inclinación de la pendiente del nivel freático. Esto podría producir problemas porque una velocidad de circulación más rápida permite menos tiempo para la purificación del agua en el acuífero antes de ser bombeada a la superficie.

Otras fuentes y tipos de contaminación amenazan también los suministros de agua subterránea (Figura 17.17). Entre ellos se cuentan sustancias muy utilizadas como la sal de carretera, los fertilizantes que se extienden por toda la superficie del terreno y los pesticidas. Además, puede escaparse una amplia variedad de productos químicos y materiales industriales de las tuberías, los tanques de almacenamiento, los depósitos y los estanques de retención. Algunos de esos contaminantes se clasifican como *peligrosos*, lo que significa que son inflamables, corrosivos, explosivos o tóxicos. En los vertederos, los posibles contaminantes se amontonan en montículos o se expanden directamente sobre el terreno. Cuando el agua de la lluvia rebosa a través de las basuras, puede disolver una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos. Si el material lixiviado alcanza el nivel freático, se mezclará con el agua subterránea y contaminará el suministro. Problemas similares pueden producirse como consecuencia del escape de excavaciones superficiales, denominadas estanques de retención, en los que se acumulan desechos diversos de residuos líquidos.

► **Figura 17.15** A. Aunque el agua contaminada ha viajado más de 100 metros antes de alcanzar el pozo 1, se mueve demasiado deprisa a través de la caliza karstificada para ser purificada. B. Conforme la descarga desde el pozo séptico percola a través de la arenisca permeable, es purificada en una distancia relativamente corta.



▲ **Figura 17.16** A. Originalmente el flujo de salida de la fosa séptica se alejaba del pozo pequeño. B. El intenso bombeo del pozo cambió la pendiente del nivel freático, haciendo que el agua subterránea contaminada fluyera hacia el pozo pequeño.

Dado que el movimiento de las aguas subterráneas suele ser lento, el agua contaminada puede pasar desapercibida durante mucho tiempo. De hecho, la mayor parte de la contaminación se descubre sólo después de haberse visto afectada el agua potable y de que las personas enfermen. Llegados a este punto, el volumen de agua



▲ **Figura 17.17** A veces, las sustancias químicas agrícolas y los materiales lixiviados de los vertederos se abren camino hacia las aguas subterráneas. Éstas son dos de las posibles fuentes de la contaminación de las aguas subterráneas. (Foto de F. Rossotto/Corbis/The Stock Market.)

contaminada puede ser muy grande y, aun cuando se elimine inmediatamente la fuente de contaminación, no se resuelve el problema. Aunque las fuentes de contaminación del agua subterránea son numerosas, hay relativamente pocas soluciones.

Una vez identificado y eliminado el origen del problema, la práctica más común consiste simplemente en abandonar el suministro de agua y dejar que los contaminantes se vayan limpiando de manera gradual. Ésta es la solución menos costosa y más fácil, pero el acuífero debe permanecer sin utilizarse durante muchos años. Para acelerar este proceso, a veces se bombea el agua contaminada y se trata. Después de eliminar el agua infectada, se deja que el acuífero se recargue de forma natural o, en algunos casos, se bombea de vuelta al acuífero el agua tratada o agua limpia. Este proceso es costoso y largo, y puede ser arriesgado, pues no hay manera de asegurar que se ha eliminado toda la contaminación. Por supuesto, la solución más eficaz a la contaminación del agua subterránea es la prevención.

El trabajo geológico del agua subterránea

El agua subterránea disuelve la roca. Este hecho es clave para comprender cómo se forman cavernas y dolinas. Dado que las rocas solubles, especialmente las calizas, cubren millones de kilómetros cuadrados bajo la superficie terrestre, es aquí donde el agua subterránea realiza su importante papel como agente erosivo. La caliza es casi insoluble en el agua pura, pero se disuelve con bastante facilidad en el agua que contiene pequeñas cantidades de ácido carbónico, y la mayor parte del agua subterránea contiene este ácido. Se

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿El ácido carbónico es el único ácido que crea cavernas de caliza?

No. Parece que el ácido sulfúrico (H_2SO_4) crea algunas cuevas. Un ejemplo es la cueva Lechuquilla de las montañas de Guadalupe, cerca de Carlsbad, Nuevo México, donde las disoluciones bajo presión que contienen sulfuro de hidrógeno (H_2S) derivaron de sedimentos profundos ricos en petróleo que habían migrado hacia arriba a través de las fracturas de las rocas. Cuando estas disoluciones se mezclaron con las aguas subterráneas, que contienen oxígeno, formaron ácido sulfúrico y disolvieron la caliza. La cueva Lechuquilla es una de las cuevas más profundas que se conocen en Estados Unidos, con una extensión vertical de 478 metros, y es también una de las más grandes del país, con 170 kilómetros de galerías.

forma porque el agua de la lluvia disuelve fácilmente el dióxido de carbono del aire y el procedente de la descomposición de las plantas. Por consiguiente, cuando el agua subterránea entra en contacto con la caliza, el ácido carbónico reacciona con la calcita (carbonato cálcico) de las rocas para formar bicarbonato cálcico, un material soluble que es transportado luego en solución.

Cavernas

Los resultados más espectaculares del trabajo erosivo del agua subterránea son las **cavernas** de caliza. Sólo en Estados Unidos se han descubierto unas 17.000 y otras nuevas se descubren cada año. Aunque la mayoría son relativamente pequeñas, algunas tienen dimensiones espectaculares. La cueva de Mammoth en Kentucky y las cavernas Carlsbad en el sureste de Nuevo México son ejemplos famosos. El sistema de cuevas de Mammoth es el más extenso del mundo, con más de 540 kilómetros de galerías interconectadas. Las dimensiones de las cavernas Carlsbad son impresionantes, aunque de una manera distinta. Aquí encontramos la cámara única más grande y quizá más espectacular. La Big Room de las cavernas Carlsbad tiene un área equivalente a 14 campos de rugby y una altura suficiente para acomodar el edificio del Capitolio de Estados Unidos.

La mayoría de las cavernas se crea en el nivel freático, o inmediatamente debajo de él, en la zona de saturación. Aquí, el agua subterránea ácida sigue las líneas de debilidad de la roca, como diaclasas y planos de estratificación. Conforme pasa el tiempo, el proceso de disolución crea lentamente cavidades, que aumentan de tamaño de manera gradual hasta convertirse en cavernas. El material disuelto por el agua subterránea acaba siendo descargado en las corrientes y transportado al océano.

En muchas cuevas, se ha producido un desarrollo en varios niveles, correspondiendo la actividad actual a la menor elevación. Esta situación refleja la estrecha relación entre la formación de conductos subterráneos importantes y los valles de los ríos en los cuales drenan. A medida que las corrientes profundizan sus valles, el nivel freático disminuye al hacerlo la elevación del río. Por consiguiente, durante períodos en los que las corrientes superficiales están realizando una rápida erosión descendente, los niveles de agua subterránea circundante caen rápidamente y los conductos de las cuevas son abandonados por el agua mientras tienen una sección transversal todavía relativamente pequeña. A la inversa, cuando el encajamiento de las corrientes es lento o despreciable, hay tiempo para la formación de grandes conductos subterráneos.

Por supuesto, las características que despiertan mayor curiosidad a la mayoría de los visitantes de las cavernas son las formaciones pétreas que les proporcionan su

aspecto maravilloso. No son rasgos erosivos, como la propia caverna, sino deposicionales, creados por el goteo aparentemente interminable de agua a lo largo de grandes lapsos de tiempo. El carbonato cálcico que queda produce la calcita que denominamos travertino. Estos depósitos de cueva, sin embargo, se conocen también como *rocas de precipitación por goteo*, una referencia obvia a su modo de originarse. Aunque la formación de las cavernas tiene lugar en la zona de saturación, el depósito de las rocas por goteo no es posible hasta que las cavernas estén por encima del nivel freático en la zona de aireación. En cuanto la cámara se llena de aire, está ya dispuesto el escenario para que empiece la fase decorativa de la construcción de la caverna.

Las diversas rocas de precipitación encontradas en las grutas se denominan colectivamente **espeleotemas** (*spelaiion* = cueva; *them* = colocar); ninguna es exactamente igual a otra. Quizá los espeleotemas más familiares sean las **estalactitas** (*stalaktos* = escurrimiento). Estos colgantes en forma de carámbanos cuelgan del techo de las grutas y se forman allí donde el agua se filtra a través de las grietas situadas por encima. Cuando el agua alcanza el aire de la cueva, algo del dióxido de carbono disuelto se escapa de la gota y la calcita precipita. El depósito se produce en forma de anillo alrededor del borde de la gota de agua. A medida que una gota sigue a otra gota, cada una deja una huella infinitesimal de calcita detrás y se crea un tubo hueco de caliza. Entonces, el agua se mueve a través del tubo, permaneciendo suspendida transitoriamente al final del mismo, aportando un diminuto anillo de calcita y cayendo al suelo de la caverna. La estalactita que acaba de describirse se denomina *paja de sosa*. A menudo, el tubo hueco de la paja de sosa se obstruye o aumenta su suministro de agua. En cualquier caso, el agua se ve obligada a fluir y, por consiguiente, a depositarse, a lo largo del lado externo del tubo. A medida que continúa la precipitación, la estalactita adopta la forma cónica más común.

Los espeleotemas que se forman en el suelo de una caverna y se acumulan en sentido ascendente hacia el techo se denominan **estalagmitas** (*stalagmos* = goteo). El agua que suministra la calcita para el crecimiento de las estalagmitas cae del techo y salpica sobre la superficie. Como consecuencia, las estalagmitas no tienen un tubo central y suelen ser de aspecto más masivo y redondeado en sus extremos superiores que las estalactitas. Con tiempo suficiente, pueden juntarse una estalactita que crece hacia abajo y una estalagmita que crece hacia arriba para formar una *columna*.

Topografía kárstica

Muchas zonas del mundo tienen paisajes que, en gran medida, se han formado por la capacidad disolvente del agua

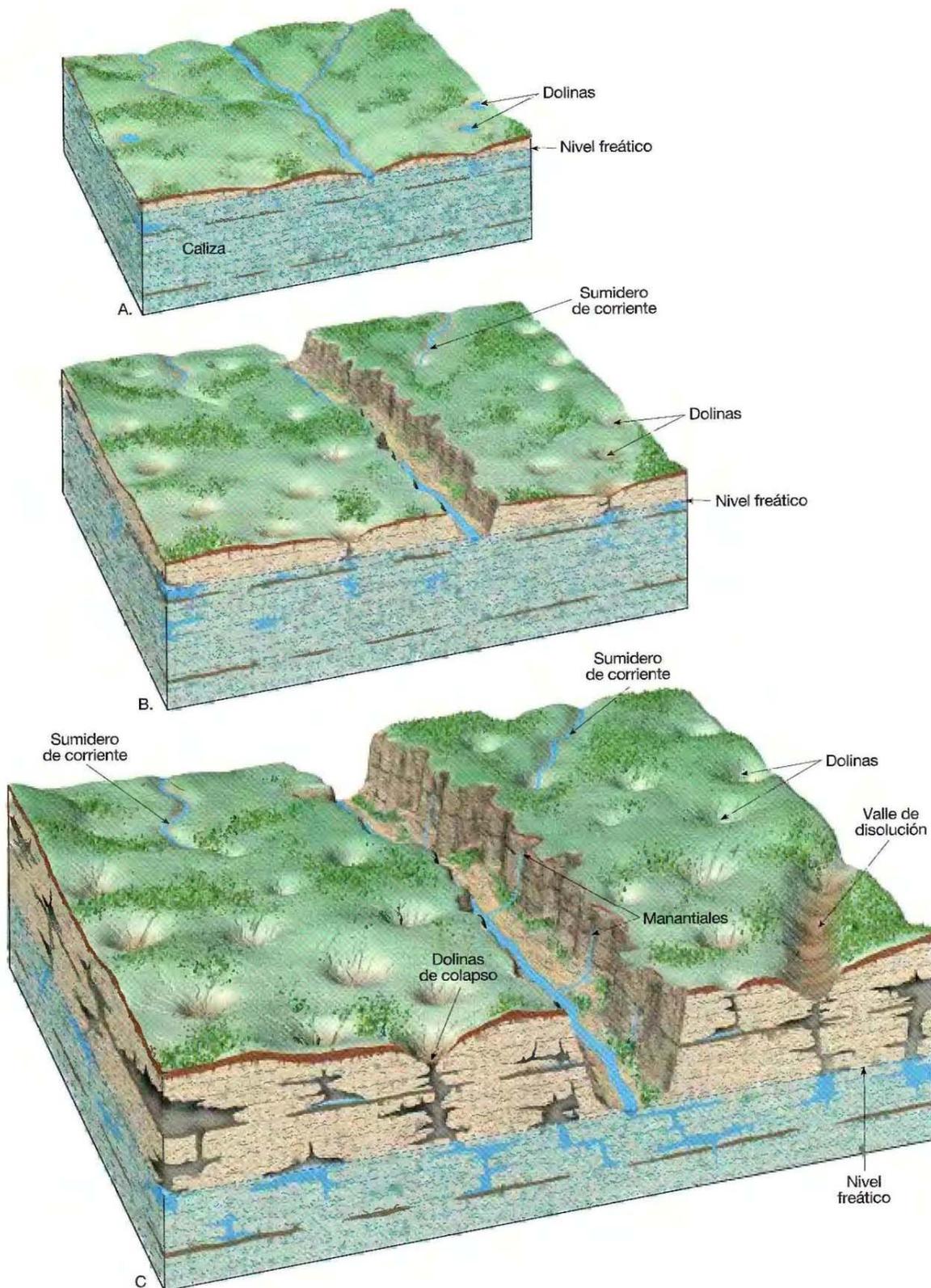
subterránea. Se dice que esas zonas muestran **topografía kárstica**, que debe su nombre a la llanura de Kras en Eslovenia (antigua parte de Yugoslavia), localizada a lo largo de la costa nororiental del mar Adriático, donde dicha topografía está extraordinariamente desarrollada. En Estados Unidos, los paisajes kársticos aparecen en muchas áreas situadas sobre calizas, entre ellas Kentucky, Tennessee, Alabama, el sur de Indiana y el centro y el norte de Florida. En general, las zonas áridas y semiáridas son demasiado secas para desarrollar topografía kárstica. Cuando existen en esas regiones, son probablemente restos de una época en la que predominaban condiciones más lluviosas.

Las zonas kársticas típicas están compuestas por un terreno irregular interrumpido por muchas depresiones denominadas **dolinas**. En las zonas calizas de Florida, Kentucky y el sur de Indiana, hay literalmente decenas de miles de esas depresiones, cuya profundidad oscila entre tan sólo 1 o 2 metros y un máximo de más de 50 metros.

Las dolinas se forman normalmente de dos maneras. Algunas se desarrollan de manera gradual a lo largo de muchos años sin alteración física de la roca. En esas situaciones, la caliza situada inmediatamente debajo del suelo se disuelve por el agua de la lluvia descendente, que está recién cargada de dióxido de carbono. Con el tiempo, la superficie rocosa se va reduciendo y las fracturas en las cuales entra el agua se van agrandando. A medida que las fracturas aumentan de tamaño, el suelo se hunde en las aperturas ensanchadas, de las que se ve desalojado por el agua subterránea que fluye hacia los conductos inferiores. Estas depresiones suelen ser superficiales y tienen pendientes suaves.

Por el contrario, las dolinas pueden formarse también de manera abrupta y sin advertencia cuando el techo de una gruta se desploma bajo su propio peso. Normalmente, las depresiones creadas de esta manera son profundas y de laderas empinadas. Cuando se forman en zonas muy pobladas, constituyen un riesgo geológico grave.

Además de una superficie con muchas cicatrices por las dolinas, las regiones kársticas muestran una falta notable de drenaje superficial (escorrentía). Después de una precipitación, el agua de escorrentía es rápidamente encauzada debajo del terreno a través de las depresiones. Fluye luego a través de las cavernas hasta que alcanza el nivel freático. En los lugares donde existen corrientes superficiales, sus trayectorias suelen ser cortas. Los nombres de dichas corrientes dan a menudo una pista de su destino. En la zona de la cueva de Mammoth de Kentucky, por ejemplo, hay un Sinking Creek, un Little Sinking Creek y un Sinking Branch. Algunas dolinas se obstruyen con arcilla y derrubios, creando pequeños lagos o lagunas. El desarrollo del paisaje kárstico se muestra en la Figura 17.18.



▲ **Figura 17.18** Desarrollo de un paisaje kárstico. **A.** Durante las primeras etapas, el agua subterránea percola a través de la caliza a lo largo de las diaclasas y los planos de estratificación. La actividad de la disolución crea cavernas en el nivel freático y por debajo, y las aumenta de tamaño. **B.** En esta vista, las colinas están bien desarrolladas y las corrientes de superficie son canalizadas por debajo del terreno. **C.** Con el paso del tiempo, las cavernas se hacen mayores y aumenta el número y tamaño de las dolinas. El hundimiento de las cavernas y la unión de dolinas forman depresiones de suelo plano más grandes. Finalmente la actividad de la disolución puede removilizar la mayor parte de la caliza de la zona, dejando sólo restos aislados.

Algunas zonas de desarrollo kárstico exhiben paisajes muy diferentes del terreno salpicado de dolinas descrito en la Figura 17.18. Un ejemplo notable es una región extensa del sur de China que se describe como una zona que exhibe *mogotes*. El término *mogote* es adecuado porque el paisaje está formado por un laberinto de colinas empinadas aisladas que se elevan de manera abrupta desde el suelo. Cada una está acribillada de cuevas y pasajes interconectados. Este tipo de topografía kárstica se forma en las regiones tropicales y subtropicales y tiene capas potentes de caliza altamente diaclada. Aquí el agua subterránea ha disuelto grandes volúmenes de caliza y deja sólo estas torres residuales. El desarrollo kárstico es más rápido en los climas tropicales debido a las precipitaciones abundantes y la mayor disponibilidad de dióxido de carbono procedente de la desintegración de la exuberante vegetación tropical. El dióxido de carbono adicional del suelo significa que hay

más ácido carbónico para la disolución de la caliza. Otras zonas tropicales de desarrollo kárstico avanzado son partes de Puerto Rico, el norte de Cuba y el norte de Vietnam.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿La caliza es el único tipo de roca que desarrolla estructuras kársticas?

No. Por ejemplo, se produce desarrollo kárstico en otras rocas carbonatadas como el mármol y la dolomía. Además, las evaporitas como el yeso y la sal (halita) son muy solubles y se disuelven con facilidad para formar estructuras kársticas como dolinas, cuevas y corrientes efímeras. Esta última situación se denomina *karst de evaporitas*.

Resumen

- Como recurso, el *agua subterránea* representa el máximo depósito de agua dulce asequible para los seres humanos. Desde el punto de vista geológico, la acción disolvente del agua subterránea produce *cavernas* y *dolinas*. El agua subterránea es también un equilibrador del flujo de corrientes fluviales.
- El agua subterránea es el agua que llena completamente los espacios porosos del sedimento y las rocas en la *zona de saturación* de la subsuperficie. El límite superior de esta zona es el *nivel freático*. La *zona de aireación* está por encima del nivel freático, donde el suelo, el sedimento y la roca no están saturados en agua.
- La interacción entre las corrientes superficiales y las aguas subterráneas se produce de tres maneras diferentes: las corrientes reciben agua de la aportación de agua subterránea (*efluente*); pierden agua a través del cauce hacia el sistema de aguas subterráneas (*influyente*); o ambas cosas, recibiendo agua en algunas partes y perdiéndola en otras.
- Los materiales con espacios porosos muy pequeños (como la arcilla) obstaculizan o impiden el movimiento del agua subterránea y se denominan *acuichudos*. Los *acuíferos* consisten en materiales con espacios porosos más grandes (como la arena) que son permeables y transmiten libremente el agua subterránea.
- El agua subterránea se mueve en curvas serpenteantes que son algo intermedio entre el empuje hacia abajo de la gravedad y la tendencia del agua a desplazarse hacia zonas de presión reducida.
- Los principales factores que influyen en la velocidad de la circulación de aguas subterráneas son la pendiente del nivel freático (*gradiente hidráulico*) y la permeabilidad del acuífero (*conductividad hidráulica*).
- Los *manantiales* aparecen en los puntos donde el nivel freático intersecta con la superficie del terreno, produciendo un flujo natural de agua subterránea. Los *pozos*, aperturas taladradas en la zona de saturación, extraen el agua subterránea y crean depresiones aproximadamente cónicas en el nivel freático conocidas como *conos de depresión*. Los *pozos artesianos* aparecen cuando el agua se eleva por encima del nivel en el que se encontró inicialmente.
- Cuando el agua subterránea circula a grandes profundidades, se calienta. Si asciende, el agua puede surgir como *fuentes termales*. Los *géiseres* aparecen cuando el agua subterránea se calienta en cámaras subterráneas, se expande y parte pasa rápidamente a vapor, haciendo que brote el géiser. La fuente de calor para la mayoría de las fuentes termales y los géiseres es la roca ígnea caliente.
- Algunos de los problemas ambientales actuales que afectan al agua subterránea son: (1) la *sobreexplotación* por el regadío intenso; (2) la *subsistencia del terreno* causada por la extracción de agua subterránea; (3) la

contaminación salina, y (4) la contaminación por contaminantes.

- La mayoría de las *cavernas* se forman en la caliza o por debajo del nivel freático cuando el agua subterránea ácida disuelve la roca a lo largo de líneas de debilidad, como las diaclasas y los planos de estrati-

ficación. Las diversas *rocas de precipitación por goteo* encontradas en las cavernas se denominan colectivamente *espeleotemas*. Los paisajes que se han formado en gran medida por el poder disolvente del agua subterránea exhiben una *topografía kárstica*, un terreno irregular, interrumpido por muchas depresiones denominadas *dolinas*.

Preguntas de repaso

1. ¿Qué porcentaje de agua dulce es agua subterránea? Si se excluye el hielo glacial y sólo se considera el agua dulce líquida, ¿aproximadamente qué porcentaje corresponde al agua subterránea?
2. Desde un punto de vista geológico, el agua subterránea es importante como agente erosivo. Nombre otro papel geológico significativo del agua subterránea.
3. Compare y contraste las zonas de aireación y de saturación. ¿Cuál de esas zonas contiene agua subterránea?
4. Explique por qué el nivel freático no suele ser plano.
5. Aunque la sequía meteorológica puede haber acabado, la sequía hidrológica puede continuar todavía. Explíquelo. (Véase Recuadro 17.1.)
6. Contraste un efluente y influente.
7. Distinga entre porosidad y permeabilidad.
8. ¿Cuál es la diferencia entre un acuicludo y un acuífero?
9. ¿Bajo qué circunstancias puede un material tener gran porosidad pero no ser un buen acuífero?
10. Como se muestra en la Figura 17.4, el agua subterránea se mueve de manera serpenteante. ¿Qué factores hacen que siga esos cursos?
11. Describa brevemente la importante contribución que Henri Darcy hizo a nuestro conocimiento de la circulación de las aguas subterráneas.
12. Cuando un acuicludo está situado por encima del nivel freático principal, puede crearse una zona saturada local. ¿Qué término se aplica a esta situación?
13. ¿Cuál es el origen del calor para la mayoría de las fuentes termales y los géiseres? ¿Cómo se refleja esto en la distribución de esas estructuras?
14. Dos vecinos excavan un pozo. Aunque los dos pozos penetran a la misma profundidad, el de un vecino produce agua y el del otro no. Describa una circunstancia que podría explicar lo que ocurrió.
15. ¿Qué se entiende por el término *artesiano*?
16. Para que existan los pozos artesianos, deben darse dos condiciones. Nómbrelas.
17. Cuando se pinchó por primera vez la arenisca Dakota, el agua brotó libremente de muchos pozos artesianos. En la actualidad esos pozos deben ser bombeados. Explíquelo.
18. ¿Cuál es el problema asociado con el bombeo del agua subterránea para riego que existe en la parte meridional de los High Plains (véase Recuadro 17.2)?
19. Explique brevemente lo que sucedió en el valle de San Joaquín como consecuencia de la extracción excesiva de agua subterránea. (Véase Recuadro 17.3.)
20. En una zona costera determinada el nivel freático es de 4 metros por encima del nivel del mar. ¿Aproximadamente a qué distancia por debajo del nivel del mar se encuentra el agua dulce?
21. ¿Por qué disminuye la descarga de agua subterránea natural conforme se desarrollan las áreas urbanas?
22. ¿Qué acuífero sería más eficaz para purificar el agua subterránea contaminada: de grava gruesa, de arena o de caliza karstificada?
23. ¿Qué se entiende cuando se clasifica como peligroso un contaminante del agua subterránea?
24. Indique dos espeleotemas comunes y distíngalos.
25. ¿Qué clase de topografía exhiben las zonas cuyos paisajes reflejan, en gran medida, el trabajo erosivo de las aguas subterráneas?
26. Describa dos formas de creación de las dolinas.

Términos fundamentales

acuicludo	descenso de nivel	géiser	permeabilidad
acuífero	dolina	gradiente hidráulico	porosidad
agua subterránea	efluente	influyente	pozo
artesiano	espeleotema	ley de Darcy	pozo artesiano no surgente
caverna	estalactita	manantial o fuente	pozo artesiano surgente
cinturón de humedad del suelo	estalagmita	nivel freático	topografía kárstica
conductividad hidráulica	franja capilar	nivel freático colgado	zona de aireación
cono de depresión	fuelle termal	nivel piezométrico	zona de saturación

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>