

## Actividad 5 Memorias de consulta

Los paisajes kársticos presentan diferencias muy marcadas con respecto a los paisajes no kársticos, en particular en la forma en que el agua se infiltra en el subsuelo y cómo se almacena y se transporta. Normalmente, en paisajes no kársticos, como los que se sustentan sobre un lecho de roca granítica, la lluvia, al llegar a la superficie, comienza a infiltrarse a través del suelo hacia el lecho rocoso. Una vez saturado el suelo, la infiltración se ralentiza y el flujo superficial se desarrolla en pequeños canales que finalmente se fusionan formando arroyos, transportando el agua desde lugares de mayor altitud a lugares de menor altitud. Parte del agua que se infiltra en el suelo también puede fluir pendiente abajo como interflujo, que se produce en la superficie del lecho rocoso o cerca de ella. Una parte del agua que se infiltra en el suelo y el lecho rocoso se convierte en agua subterránea, que puede almacenarse y transportarse en el subsuelo. Esta agua subterránea llena los espacios porosos disponibles entre las partículas del suelo o del lecho rocoso (porosidad de la matriz), pero se encuentra principalmente en la fractura del lecho rocoso (porosidad de fractura). Cualquier cuerpo rocoso o terrestre capaz de almacenar y transmitir cantidades significativas de agua se denomina acuífero. Lo contrario es un acuitardo: una barrera para el flujo de agua subterránea (por ejemplo, un lecho de esquisto). Sin embargo, en los paisajes kársticos, el agua no es lo que parece. (Figura 12.3.1)

Los procesos de infiltración y flujo de agua en paisajes kársticos difieren notablemente de los de otros paisajes. En resumen, cualquier precipitación que caiga sobre un paisaje kárstico se infiltrará a través del suelo hacia el contacto suelo-roca, y luego es probable que el agua continúe verticalmente hacia abajo a través de las numerosas y pequeñas fracturas o conductos en la roca madre kárstica (el epikarst) hacia una zona de saturación que forma un acuífero subterráneo (Figura 12.3.2). El flujo superficial en paisajes kársticos es limitado y solo ocurre cuando el karst está cubierto por suelos impermeables (p. ej., till) o en períodos de fuertes lluvias. En la superficie de un paisaje kárstico existen algunas diferencias hidrológicas obvias: una ausencia general de drenaje superficial o arroyos, sumideros discretos o valles donde los arroyos desaparecen y manantiales donde emerge el agua. Los arroyos superficiales solo fluyen sobre el karst cuando la precipitación excede la cantidad que se infiltra a través de la superficie kárstica. En muchos casos, los arroyos kársticos están inactivos durante los períodos de estiaje y fluyen solo durante las inundaciones. Algunas de las características más espectaculares asociadas con los arroyos kársticos son los cañones kársticos, donde el flujo agresivo de agua ha cortado activamente el lecho rocoso soluble creando paredes laterales empinadas y a veces salientes.

**Figura 12.3.2** Epikarst bien desarrollado disponible para infiltración difusa – Costa Oeste, Columbia Británica

## Componentes de un acuífero kárstico

Conceptualmente, un acuífero kárstico es un sistema relativamente simple que cuenta con uno o más puntos de recarga (por donde el agua entra en el acuífero), un medio que puede almacenar y movilizar agua, y uno o más puntos de descarga por donde el agua

sale del sistema (Figura 12.3.3). La recarga de un acuífero kárstico se realiza en puntos de entrada discretos (como una zanja) o por infiltración difusa a través del suelo hacia el epikarst, donde puede almacenarse y liberarse gradualmente al sistema de aguas subterráneas.

En la mayoría de los acuíferos kársticos (es decir, aquellos compuestos de caliza bien litificada y cristalina), el agua subterránea se almacena principalmente en fracturas y conductos. El almacenamiento de agua subterránea en los poros de la matriz es más común en unidades carbonatadas geológicas jóvenes o parcialmente litificadas (p. ej., arenas dunares calcáreas) y otros tipos específicos de carbonatos, como la creta.

La mayor parte del flujo subterráneo en los acuíferos kársticos se produce a lo largo de conductos que dominan el sistema freático y transportan el agua a manantiales en un nivel de base predeterminado. El nivel de base se considera generalmente el punto más bajo al que puede llegar el agua.

### **Figura 12.3.3** Esquema subterráneo de un acuífero kárstico típico

Varios términos importantes se utilizan para definir un acuífero kárstico en sentido vertical. La superficie superior del paisaje kárstico se conoce como epikarst, donde las aberturas agrandadas por la solución conducen gradualmente hacia aberturas y fracturas más confinadas. En algunos lugares, aberturas verticales/subverticales discretas (por ejemplo, surcos, pozos, entradas de cuevas) están presentes en la superficie kárstica y están conectadas directamente a conductos, cuevas y otras cavidades (Figura 12.3.4). El agua que se filtra a través del epikarst y las aberturas discretas finalmente alcanza el nivel freático, una superficie que define el límite entre la zona de aireación y la de saturación. La zona de aireación se conoce más comúnmente como la zona vadosa y es donde los espacios porosos contienen aire y agua, mientras que la zona de saturación se conoce como la zona freática y es donde todos los espacios porosos están llenos de agua. (Tenga en cuenta que, en muchos casos, una superficie freática plana y directa no define la parte superior de la zona freática de ningún paisaje kárstico. De hecho, es probable que haya cualquier cantidad de niveles freáticos suspendidos en varios niveles dependiendo de cómo se distribuyan y conecten los conductos y las cuevas).

En la zona vadosa la mayor parte del flujo de agua es vertical, mientras que en la zona freática la mayor parte del flujo es subhorizontal y a lo largo de conductos. (La parte más alta de la zona freática se conoce como zona epifreática (donde las aguas vadosas se encuentran con las freáticas) y generalmente se considera como el sitio de mayor disolución y desarrollo de conductos/cuevas.

La zona freática se divide en tres subzonas:

- El freático poco profundo (dominado por un flujo de agua subterránea subhorizontal moderado/rápido),
- El freático profundo o batifreático (caracterizado por un flujo de agua subterránea más lento), y
- Si la unidad kárstica es lo suficientemente profunda, se forma una subzona freática o no freática estancada inferior donde hay poco o ningún flujo.

### **Figura 12.3.4** Las zonas vadosa y freática de un acuífero kárstico

Ejercicio 12.1 Encontrar las zonas en el karst

(Steven Earle, [CC BY 4.0](#) )

En este diagrama de sección transversal de un acuífero kárstico, etiquete las áreas donde esperaría ver recarga difusa y donde habría recarga de fuente puntual.

Etiqueta la zona vadosa, la zona epifreática y la zona freática.

Las respuestas del ejercicio se proporcionan en [el Apéndice 2](#).

## Química de las aguas subterráneas kársticas

El agua subterránea kárstica es químicamente bastante distinta de otros tipos de agua subterránea, principalmente debido a los procesos de solución y las reacciones químicas que tienen lugar entre el agua y el lecho rocoso circundante. La química de las aguas kársticas está controlada por factores de disolución (p. ej., lluvia, temperatura, dióxido de carbono del suelo), los tipos de lecho rocoso (caliza, dolomita, yeso) y el tiempo de residencia del agua dentro del lecho rocoso. La naturaleza química del agua extraída de un manantial kárstico se puede utilizar junto con otros datos (p. ej., conductividad del agua, rastreo de tintes) para proporcionar información sobre el sistema de agua subterránea, incluida la fuente de recarga y si proviene de entradas puntuales o difusas. Los iones que se encuentran típicamente en las aguas kársticas incluyen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ . Estos iones son en su mayor parte subproductos de reacciones químicas con el lecho de roca y se pueden medir directamente mediante análisis químico o indirectamente mediante mediciones de pH (o alcalinidad,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) y conductividad (que es una medida del contenido total de sólidos disueltos o TDS).

La dureza es la suma de los iones  $\text{Ca}_{24}$  y  $\text{Mg}_{24}$  y es una medida de la cantidad de caliza disuelta. Otras mediciones que a veces se toman para aguas kársticas incluyen:

- $\text{O}_2$  disuelto (agotado si se elimina mediante un proceso de descomposición biológica)
- $\text{CO}_2$  disuelto (mayor para el agua que se filtra a través del suelo)
- Temperatura (generalmente más fría que el agua superficial)
- Recuento de bacterias (especialmente para estudios de contaminación)
- Fluorescencia UV para material orgánico (por ejemplo, ácidos húmicos o fulvicos del suelo)

## Recarga autógena y alógena de acuíferos kársticos

A nivel de paisaje amplio, el karst se recarga de dos maneras: por el agua que cae directamente sobre el paisaje kárstico (recarga autógena) y por el agua que cae sobre paisajes adyacentes no kársticos y luego ingresa a corrientes superficiales, que a su vez fluyen hacia el paisaje kárstico (recarga alógena) (Figura 12.3.5). Típicamente, la recarga autógena es donde el agua cae sobre el suelo o epikarst, se enriquece en  $\text{CO}_2$  y

proporciona una fuente primaria para la entrada difusa de agua al acuífero subyacente. En algunos casos, este flujo de recarga autógena puede concentrarse en características de entrada puntuales como dolinas. Las características del agua de la recarga alógena dependen de las condiciones aguas arriba, pero generalmente tiene un bajo contenido de iones y transporta sedimentos. En algunos casos, las aguas alógenas pueden ser muy agresivas (ácidas), cuando se derivan de humedales, y al fluir sobre el lecho rocoso carbonatado causando una karstificación extensa. En la isla de Vancouver, no es raro que los arroyos alogénicos que drenan hacia una unidad kárstica formen una línea de canales a lo largo del límite superior de dicha unidad.

### Ejercicio 12.2 Comparación de la química del agua subterránea

La siguiente tabla muestra los resultados del análisis de tres muestras de agua subterránea de un acuífero kárstico de caliza en Inglaterra y tres de un acuífero de arenisca en Columbia Británica. Todos los resultados están expresados en mg/L.

**Tabla 12.1.1** Análisis de muestras de agua subterránea de un acuífero kárstico de piedra caliza en Inglaterra y un acuífero de arenisca en Columbia Británica

Muestra	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl-	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
a	233	20	23	8	1.4	74	7
b	158	24	17	80	0.6	5.4	1
do	97	8	14	48	0.1	6.7	0
d	271	18	25	6	1.4	112	6
mi	290	14	22	6	1.1	110	1
F	68	8.6	20	126	0.4	20	2

Con base en lo que sabe sobre la piedra caliza y la arenisca, indique cuáles de estas 6 muestras es probable que provengan del acuífero kárstico y cuáles del acuífero de arenisca.

¿Cuáles son las principales diferencias entre la química del agua en estos dos acuíferos?

Las respuestas del ejercicio se proporcionan en [el Apéndice 2](#).

Un concepto importante a comprender es el de "cuenca kárstica" o área de drenaje que aporta agua a una unidad kárstica en particular. La cuenca (cuenca hidrográfica) en un paisaje no kárstico se define típicamente como todas las áreas que drenan hacia el cauce principal y puede definirse fácilmente a partir de la topografía superficial utilizando las alturas del terreno para trazar las divisorias topográficas. Los límites de una cuenca kárstica son bastante diferentes y no están restringidos por las divisorias topográficas; de hecho, pueden cruzar por debajo de ellas con flujo de agua subsuperficial a lo largo de conductos. Por lo tanto, la delimitación de una cuenca kárstica es difícil y puede requerir varias técnicas para determinar completamente su extensión. Una de las técnicas más útiles para este propósito es el trazado de tintes. Se debe tener cuidado para asegurar que el trazado de tintes se realice bajo diversas condiciones de flujo (es decir, etapas de flujo), ya que las áreas de cuenca pueden variar entre caudales bajos y caudales máximos dependiendo de la distribución y las conexiones entre conductos.

# Almacenamiento, movimiento y descarga de agua de un acuífero kárstico

**Figura 12.3.5** Recarga alógena y autógena de un paisaje kárstico

En general, gran parte del agua en un acuífero kárstico se almacena tanto en la porosidad de la matriz como en la de las fracturas, mientras que los conductos (que suelen representar un pequeño porcentaje de la porosidad total) proporcionan las vías para la mayor parte del movimiento del agua. La lluvia después de un período más seco generalmente ingresa al acuífero kárstico y llena la mayor parte del espacio poroso disponible de la matriz y la fractura antes de descargar el flujo de agua a lo largo de los conductos. Los conductos proporcionan el sitio principal para el flujo de agua dentro del acuífero, pero también dirigen el flujo dentro y fuera de las fracturas. Los conductos se forman a partir de fracturas agrandadas por solución, que una vez que alcanzan cierta dimensión ( $>10$  mm) se convierten en conductos. Se estima que se necesitan miles de años para formar un conducto de  $>10$  mm de tamaño a partir de una fractura, mientras que en algunos casos puede tomar de 100,000 a un millón de años para desarrollar un conducto de un metro de tamaño.<sup>[11]</sup> En general, el almacenamiento de agua en la matriz y la porosidad de la fractura se considera a largo plazo, mientras que el almacenamiento de agua en los conductos es a corto plazo.

Varios términos son importantes para comprender el flujo de agua subterránea (y es relevante tanto para los acuíferos kársticos como para los no kársticos: carga hidráulica, gradiente hidráulico y conductividad hidráulica. La carga hidráulica es la elevación de un cuerpo de agua por encima de un cierto dato (como el nivel del mar) (Figura 12.3.6). Esto proporciona la energía gravitacional para que el agua fluya cuesta abajo. Cuanto mayor sea la elevación del cuerpo de agua por encima de un dato, mayor será la carga hidráulica. El cambio relativo en la carga hidráulica sobre una unidad de distancia es el gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica puede considerarse como la resistencia del flujo de agua a través de un cierto tipo de roca o material en una cierta cantidad de tiempo y se mide en m/s. En resumen, el agua subterránea fluye desde una carga hidráulica alta a una baja a una velocidad determinada por la carga hidráulica y la resistencia de la roca al flujo (o conductividad hidráulica).

**Figura 12.3.6** Tierras kársticas de gran altitud en el Parque Provincial White Ridge, Gold River, Isla de Vancouver.

La principal vía por la que el agua sale de un acuífero kárstico es mediante un manantial kárstico. Los manantiales kársticos representan agua que ha fluido a través de un acuífero kárstico y suelen aparecer en la superficie como una abertura o conducto en el lecho rocoso por el que fluye agua. Los manantiales kársticos pueden variar desde pequeños hilos de agua hasta un río caudaloso de diez metros de ancho. En su mayoría, los manantiales kársticos se ubican en zonas de menor altitud a lo largo de valles, orillas de lagos o litorales. En algunos casos, pueden surgir manantiales bajo masas de agua. Los manantiales kársticos se diferencian de los que pueden presentarse en otros tipos de roca en que, en su mayoría, se alimentan por conductos. Por lo tanto, los manantiales pueden utilizarse para determinar muchas de las características físicas y químicas de un acuífero kárstico. El tipo de flujo en los manantiales puede ser constante, intermitente, estacional o inverso. Los manantiales con flujo constante indican que el acuífero tiene una capacidad de almacenamiento significativa, en relación con la cantidad de agua que

fluye a través del sistema (véase la Figura 12.3.3). Los manantiales de flujo constante a veces se denominan manantiales de salida, que generalmente se encuentran cerca del nivel base del acuífero. Los flujos estacionales o intermitentes ocurren en los manantiales de desbordamiento, que se encuentran por encima de los manantiales de salida, y son más activos durante los caudales máximos o las crecidas.

Cuando el acuífero kárstico está confinado por una unidad de roca impermeable suprayacente, puede desarrollarse un exceso de carga hidráulica y dar lugar a la formación de manantiales artesianos. Los manantiales también pueden surgir bajo lechos de arroyos, lagos y el mar, donde, por supuesto, son más difíciles de detectar. Muchos manantiales kársticos contienen un exceso de iones (es decir, están sobresaturados) y forman depósitos de toba calcárea tanto alrededor de la abertura del manantial como extendiéndose como montículos o escalones río abajo.

## Investigaciones del acuífero kárstico

Los acuíferos kársticos pueden investigarse de diversas maneras, lo cual es importante antes de tomar cualquier decisión sobre la gestión del territorio. Cartografiar la extensión de la cuenca kárstica puede ser problemático, pero siempre es necesario antes de realizar cualquier análisis hidrogeológico detallado. Es necesario determinar los puntos de entrada y salida de agua, así como cualquier información sobre las vías de flujo subsuperficial (por ejemplo, a partir de mapas de cuevas). El trazado de colorantes se utiliza comúnmente para determinar las conexiones subsuperficiales del flujo de agua a través de conductos y cuevas.

Los manantiales kársticos son sitios críticos para la recopilación de datos, ya que reflejan fielmente las características de la red de conductos y el área de recarga. Por ejemplo, los manantiales cuyos caudales fluctúan rápidamente con las inundaciones probablemente estén relacionados con la recarga alógena, mientras que los manantiales menos susceptibles a las variaciones de caudal probablemente estén asociados con la recarga autógena. Asimismo, la calidad del agua de los manantiales (p. ej., temperatura, turbidez, pH, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales) puede proporcionar información sobre las posibles características de la recarga y los tiempos de almacenamiento o residencia (Figura 12.3.7). El agua turbia y pobre en iones podría sugerir una recarga alógena y un corto tiempo de residencia, mientras que el agua limpia y rica en iones podría indicar una residencia más prolongada o una recarga autógena. Se pueden configurar registradores de datos continuos para medir muchas de estas características tanto en momentos predeterminados como durante eventos específicos (p. ej., inundaciones).

Las mediciones de conductividad eléctrica con un medidor portátil sencillo pueden utilizarse como herramienta de mapeo rápido para determinar si el agua de un arroyo específico proviene de un manantial kárstico o ha estado en contacto con un lecho rocoso carbonatado. Generalmente, cuanto más altas sean las lecturas, mayor será el contenido iónico y mayor la probabilidad de asociación del agua con el lecho rocoso carbonatado.

La distribución y orientación de los conductos en un acuífero son difíciles de determinar. Se pueden realizar derrumbes y cartografía del subsuelo, pero obviamente se limitan a los conductos accesibles. El uso del trazado de colorantes es probablemente la técnica más eficaz para determinar las conexiones de los conductos y las trayectorias

de flujo. La perforación de pozos, junto con las pruebas de bombeo, también puede utilizarse para evaluar la porosidad de la matriz y las fracturas de una unidad kárstica. Las técnicas geofísicas, como el georadar y la gravedad, también pueden emplearse en cierta medida para identificar conductos o aberturas subterráneas.

El rastreo de colorantes es una de las técnicas más importantes utilizadas en la evaluación de acuíferos kársticos, y es una de las más divertidas de llevar a cabo (Figura 12.3.8). Los objetivos principales del rastreo de colorantes son determinar las conexiones de las trayectorias de flujo dentro de un acuífero kárstico. Sin embargo, el rastreo de colorantes también puede brindar información sobre la red de conductos dentro del acuífero, la posible cuenca de captación de un manantial y las tasas de flujo de agua dentro del sistema. La mayoría de los estudios de rastreo de colorantes utilizan formas líquidas/en polvo de colorantes fluorescentes no tóxicos (p. ej., fluoresceína, rodamina WT, eosina y uranina), que se colocan en sitios de inyección o entradas seleccionados (p. ej., golondrinas) donde el agua ingresa a un acuífero. (Nota: también existen otros métodos de rastreo de agua, como el uso de esporas inertes, isótopos diluidos o sal; sin embargo, los colorantes no tóxicos suelen ser los más comunes). Antes de colocar los tintes en los sitios de inyección, se establecen sitios de recolección de pruebas en todas las salidas potenciales, como manantiales, arroyos que reaparecen, etc.



**Figura 12.3.8** Introducción del colorante rodamina en un arroyo que se hunde, Isla de Vancouver, BC

## Impactos en los acuíferos kársticos y su remediación

Los acuíferos kársticos, al igual que todos los demás acuíferos subterráneos, pueden contaminarse y verse afectados de diversas maneras. Las principales preocupaciones son tanto la cantidad como la calidad del agua. Los impactos en la cantidad de agua pueden ocurrir por diversas razones, en particular cuando se produce un uso excesivo o un bombeo excesivo de pozos y la contaminación entra al subsuelo. La naturaleza variable de los acuíferos kársticos puede generar mucha confusión en cuanto a los puntos de entrada y de almacenamiento de agua dentro del acuífero. Los acuíferos kársticos son particularmente sensibles debido a su capacidad inherente para transportar rápidamente contaminantes dentro y a través del sistema hidrológico mediante flujo de conductos, y al hecho de que existen numerosas conexiones o aberturas potenciales entre la superficie y el subsuelo.

La contaminación de los acuíferos kársticos puede provenir de diversas fuentes, como la industria, la agricultura, el desarrollo urbano, los sistemas sépticos y las carreteras. Los contaminantes pueden incluir diversos metales, materiales orgánicos e inorgánicos, como nitratos, bacterias, petróleo, sal y sedimentos. Existen dos fuentes principales de

contaminación de las aguas subterráneas que suelen considerarse: la dispersa y la puntual. La remediación de contaminantes en un acuífero kárstico puede realizarse para eliminarlos o reducirlos a un nivel aceptable. En todos los acuíferos kársticos, la remediación debe considerar los tres tipos de porosidad: matriz, fractura y conducto. Si la mayor parte del material contaminante se introduce a través del flujo del conducto, es posible que se filtre a través de la sección del conducto del sistema kárstico con poco impacto en el resto del acuífero. Asimismo, los contaminantes introducidos a través del suelo y el epikarst pueden quedar atrapados o almacenados en el acuífero durante mucho más tiempo y solo ser evacuados durante inundaciones ocasionales.

Distintas partes del acuífero pueden requerir distintos tipos de remediación. Las técnicas de remediación pueden variar desde la inacción (dejándolo para los procesos naturales de recuperación), hasta el tratamiento exhaustivo del suelo, pasando por el bombeo y la limpieza de las aguas. Las estrategias dependerán de la fuente, el tipo y la persistencia del contaminante, el material huésped, las vías de flujo, los riesgos y los recursos disponibles. En el caso de fuentes dispersas, el principal enfoque de remediación podría ser modificar las prácticas que causaron la contaminación, mientras que en el caso de fuentes puntuales, el enfoque probable es eliminar o contener el material contaminante. La remediación de acuíferos kársticos es un proceso complejo, lento y difícil, que requiere una evaluación minuciosa antes de la implementación del trabajo.

#### **Atribuciones de los medios**