

## Le grotte e l'acqua

### La circolazione dell'acqua

Le acque normalmente presenti in rocce porose, come sabbie o ghiaie, occupano in modo continuo tutti i vuoti presenti, ma in rocce carsificate queste si organizzano in corsi d'acqua, a volte veri e propri fiumi sotterranei, che percorrono enormi gallerie di parecchi metri di diametro e diversi chilometri di sviluppo. Le acque dei corsi sotterranei si muovono con le stesse modalità dei corsi d'acqua superficiali: come questi, sono soggette a piene causate da precipitazioni in superficie (che in grotta giungono con un certo ritardo, dovuto alla lentezza dell'infiltrazione), e sono in grado di scavare e erodere la roccia con processi meccanici di abrasione, possono trasportare sedimenti di varia granulometria e possono creare depositi alluvionali all'interno delle grotte.

### Immense riserve

La zona satura di un sistema carsico presenta uno sviluppo e una profondità che dipendono dalla struttura geologica: a volte la zona satura può essere di spessore molto piccolo, o assente, come nei sistemi carsici "sospesi" sul livello di base, a volte può avere spessore di centinaia di metri, e costituire un'immensa e preziosa riserva idrica.

La zona più superficiale della zona satura, detta zona epifreatica, subisce delle variazioni stagionali e può risalire anche di parecchie decine di metri nei periodi più piovosi: è una zona importantissima per la formazione delle grotte, perchè, grazie all'effetto Boegli dovuto al mescolamento di acque a composizione chimica differente (le acque meteoriche e le acque profonde) è qui che si formano, in gran parte, le gallerie di maggiori dimensioni.

Al di sotto della zona epifreatica, le acque della zona satura si muovono molto lentamente e possono rimanere all'interno dell'acquifero carsico per decine o centinaia di anni, prima di rivedere la luce nelle sorgenti.

Questo fa sì che le acque carsiche siano molto vulnerabili sia all'inquinamento (un inquinante potrebbe rimanere per decine di anni all'interno della falda acquifera), sia allo sfruttamento eccessivo (lo svuotamento della zona satura potrebbe richiedere decenni per la ricostituzione del primitivo livello delle acque): si tratta quindi di riserve preziose, ma da proteggere e sfruttare con grande oculatezza.

### Le sorgenti

Le fuoriuscite di acque sotterranee in superficie prendono il nome di sorgenti se l'origine dell'acqua è sconosciuta o proviene da assorbimento diffuso, e di risorgenti se sono invece la venuta a giorno di corsi d'acqua inghiottiti più a monte, come il già citato caso del Timavo. Le sorgenti possono essere classificate in vario modo, in funzione della portata, della costanza del flusso o delle caratteristiche geologiche che ne determinano la formazione.

Molte sorgenti hanno un flusso perenne, anche se le variazioni di portata possono essere notevoli, in funzione delle precipitazioni; altre sorgenti, come le già citate sorgenti di troppo pieno, possono avere un deflusso temporaneo. Dal nome della celebre Fontaine de Vaucluse (Francia), sorgenti caratterizzate da andamento verticale e grandissima profondità (in molti casi superiore ai 300 m) vengono dette sorgenti vauclusiane. Alcune, per la particolare conformazione delle gallerie d'uscita, possono avere deflusso intermittente. Un deflusso regolarmente intermittente può essere osservato anche per sorgenti in prossimità del mare, dove può essere sensibile l'influenza delle maree. La direzione della corrente è in genere diretta dall'interno della grotta verso l'esterno e rimane in genere costante, ma, in alcuni casi, il flusso può invertirsi. Alcune sorgenti, infatti, possono alternativamente funzionare come sorgenti o come inghiottitoi. Questo può accadere in funzione delle precipitazioni, con scadenza stagionale, come nei già citati ponor, o, in prossimità della costa, per effetto delle maree, come nei katavothre (per esempio, quelli dell'isola di Cefalonia) o nelle sorgenti sottomarine dette estavelles. In alcuni tipi particolari di sorgenti sottomarine, le vrulja, le portate delle acque dolci che arrivano alla sorgente attraverso condotti carsici sono tali da contrastare la pressione dell'acqua marina, che, in alcuni punti può addirittura essere superata, dando origine al fenomeno del ribollimento delle acque, ben noto lungo le coste greche e dalmate, e un tempo sfruttato dai naviganti per l'approvvigionamento di acqua potabile. Le velocità delle correnti in questi punti possono essere impressionanti, tanto che in passato hanno spesso alimentato leggende di mostri sottomarini.

## Il movimento dell'acqua

Le sorgenti carsiche presentano una forte dipendenza dagli eventi piovosi esterni per diversi motivi. La velocità delle acque della zona vadosa è elevata, paragonabile a quella dei corsi d'acqua esterni, ma non solo: l'aumento del carico idraulico conseguente all'entrata in grotta di grandi quantità di acqua può esercitare una forte pressione sulle acque della zona satura, che vengono letteralmente spinte all'esterno, con un effetto detto di pistonaggio, termine che rende bene l'idea del meccanismo. Mentre un'onda di piena conseguente all'arrivo delle acque di infiltrazione arriverà dopo un certo tempo, necessario al trasporto fisico delle acque infiltrate, l'effetto pistone fa sì che l'onda di piena si propaghi non come onda di materia, ma di energia: la velocità di propagazione dell'onda di piena è quindi molto maggior della velocità di flusso delle acque, e si ritiene essere pari alla velocità del suono: in certi casi, quindi, la propagazione dell'onda di piena è praticamente istantanea. Questo significa che un evento piovoso in superficie si può tradurre, alla sorgente, in una piena pressoché immediata, che segue l'evento piovoso di poche ore, o di pochi minuti. L'arrivo di piene di questo tipo è rapido e senza segni premonitori, come un progressivo innalzarsi del livello dell'acqua o della velocità della corrente. Sono note cavità situate in prossimità della zona satura che si riempiono in pochi minuti in caso di acquazzoni anche di modesta entità (es. La grotta di Peyrejal, nel Sud della Francia): per l'esplorazione di queste grotte è tassativa la consultazione di previsioni meteorologiche affidabili e un'ottima conoscenza del sistema.

L'arrivo di una piena per propagazione diretta, invece, è spesso preannunciato da segnali quali graduale innalzamento del livello dell'acqua o aumento della velocità del flusso, spesso accompagnati da rumori quali colpi d'ariete sulle pareti, fischi o rombi dovuti all'espulsione dell'aria dalle gallerie che si vanno allagando (famoso è l'esempio della Grotta Masera, sul Lago di Como, una sorgente di troppo pieno la cui entrata in funzione è preannunciata da un forte rombo "di tuono", perfettamente udibile nel vicino paese e che fa accorrere gli abitanti a godersi lo spettacolo).

Interessante è confrontare l'andamento delle portate nel corso di una piena (con un grafico detto idrogramma) in un acquifero a circolazione diffusa (tipico delle rocce porose) e in un acquifero carsico: la presenza di grandi condotti carsici fa sì che l'arrivo dell'onda di piena sia più veloce e concentrato nel tempo, così che il picco di piena è, a parità di precipitazioni, molto più alto.

L'onda di piena è in genere accompagnata da un aumento della torbidità dell'acqua e dal trasporto di materiale preso in carico. Le relazioni tra andamento delle portate e variazioni di contenuto in sali disciolti (misurato dalla conducibilità elettrica) e torbidità nel corso di una piena in un acquifero carsico indicano che l'aumento della conducibilità elettrica è in relazione con il pistonaggio di acque che sono rimaste a lungo nella zona satura (e si sono quindi arricchite di carbonati), mentre l'aumento della torbidità è legato all'arrivo diretto di acque di infiltrazione: l'analisi delle acque ci permette di evidenziare, quindi, l'arrivo dell'onda di piena dinamica e di quella "fisica". Le analisi chimiche e di portata delle acque di una sorgente sono piuttosto complesse, ma sono però indispensabili per comprendere i meccanismi di piena in un sistema carsico.

## Gli acquiferi carsici

Gli acquiferi carsici rappresentano un'importantissima risorsa idrica in moltissime regioni della Terra: i terreni carsici, infatti, sono, per loro stessa natura, privi di acque superficiali, e tutta la circolazione idrica avviene in profondità.

Si tratta, però, di risorse molto delicate da utilizzare e da proteggere. Gli acquiferi carsici, infatti, per alcune loro caratteristiche, sono particolarmente vulnerabili agli inquinamenti e all'eccessivo sfruttamento.

Un utilizzo eccessivo e incontrollato delle riserve delle zone sature profonde può essere un pericolo per questo tipo di acquiferi: le acque profonde, infatti, a volte si muovono molto lentamente e richiedono anni o decenni per essere sostituite e un emungimento eccessivo può compromettere per sempre lo sfruttamento dell'intero acquifero.

Ma è soprattutto nei riguardi della propagazione di sostanze inquinanti che gli acquiferi carsici appaiono particolarmente vulnerabili. In una sabbia o una ghiaia, dove le velocità delle acque sono molto lente, il contatto prolungato dell'acqua con la roccia fa sì che le acque possano essere depurate da eventuali inquinanti, sia per effetto di filtro meccanico, sia per naturale degrado di alcune sostanze con il tempo, sia per l'azione di colonie di batteri che vivono sulla superficie dei granuli. Questi processi fanno sì che molti inquinanti, soprattutto quelli organici, vengano eliminati dall'acquifero stesso, con un meccanismo di autodepurazione che contribuisce a proteggere la falda acquifera dagli inquinamenti. Nella zona

più superficiale di un acquifero carsico, le acque si muovono a velocità elevate, paragonabili a quelle di un corso d'acqua superficiale, e l'effetto di autodepurazione è praticamente nullo: quello che entra in un acquifero carsico, quasi sempre esce immutato alla sorgente, spesso in brevissimo tempo. Nella zona satura profonda, invece, dove la circolazione è molto lenta, le sostanze inquinanti si possono raccogliere e depositare, concentrandosi. Successivamente, il particolare meccanismo di propagazione delle piene, per pistonaggio, può provocare la fuoriuscita istantanea e concentrata di un eventuale inquinante, che si è magari accumulato lentamente nel corso degli anni. Spesso questi episodi di inquinamento istantaneo appaiono inspiegabili, perchè non si riesce ad individuare alcuna fonte di inquinamento attuale: piccole quantità di inquinanti, ben tollerabili da altri tipi di acquiferi, divengono così potenzialmente assai pericolose per un acquifero carsico.

Purtroppo le aree carsiche hanno un'altra caratteristica che le rende ancora più vulnerabili: la presenza, nella zona di assorbimento, di una grande quantità di depressioni, inghiottitoi, pozzi e doline sembra ideale per farne delle comode discariche dove occultare tutto ciò che non serve più, a volte anche materiali assai pericolosi. Troppo spesso si dimentica, o si finge di non sapere che in questo modo si inquina l'intero sistema carsico. Poichè non sempre è noto il punto di risorgenza delle acque carsiche, l'inquinamento prodotto nella zona di assorbimento può andare ad inquinare sorgenti distanti anche diversi chilometri, addirittura in valli adiacenti: il malcostume di chi vive nelle zone a quote più alte può causare a volte gravi problemi agli ignari abitanti del fondovalle. La conoscenza degli acquiferi carsici è ancora tanto scarsa, purtroppo, che fino a pochi anni addietro è stato persino proposto di utilizzare le grotte per lo stoccaggio di rifiuti tossici e radioattivi!