

IL CARSISMO

Con il termine carsismo, derivante da Carso, regione geografica situata al confine tra Italia ed ex Jugoslavia, si identifica quell'insieme di fenomeni causati dalla dissoluzione di rocce calcaree e gessose ad opera di acque rese acidule dalla presenza di anidride carbonica.

Se l'acqua piovana si infiltra nel sottosuolo può scavare cavità sotterranee: grotte, pozzi e gallerie.

In condizioni ambientali particolari avviene il processo inverso, ovvero la rideposizione del carbonato di calcio disciolto nell'acqua, con formazione di strutture particolari come le stalattiti e le stalagmiti.

In superficie le zone carsiche non presentano corsi d'acqua: le acque vengono infatti raccolte da depressioni a imbuto, chiamate doline e convogliate attraverso inghiottitoi, o foibe, nelle cavità sotterranee, dove possono scorrere come fiumi veri e propri.

Altre forme superficiali tipicamente carsiche sono i *polje*, ampi bacini del fondo pressoché pianeggiante.

Questo fenomeno che potenzialmente interessa tutte le rocce si manifesta quasi esclusivamente sulle rocce a solubilità maggiore ovvero le rocce carbonatiche (Calcari e Dolomie) e quelle evaporitiche (Gessi e Salgemma), ma considerando che queste sono circa il 15 delle terre emerse il fenomeno del carsismo è ben diffuso sul pianeta.

La maggior parte dei fenomeni carsici conosciuti, sia di superficie che di sottosuolo è dovuta all'azione delle acque di origine meteorica (la pioggia), ma importanti sono anche quei fenomeni legati alla presenza di acque di mare in prossimità della linea di costa, oppure la dove si ha la risalita di acque profonde che vengono in contatto con acque di origine meteorica in corrispondenza di importanti faglie.

Il carsismo da acque meteoriche è quello definito "classico" in quanto è quello che più facilmente si manifesta sulla superficie terrestre.

Un'altra caratteristica importante che favorisce questo fenomeno è lo stato di fratturazione della roccia in questione; maggiori sono le fratture maggiore sarà il volume di roccia interessato.

Per entrambe la solubilità in acqua pura e a temperatura ambiente (poiché la temperatura influenza la solubilità) è molto bassa, dell'ordine di 10-20 mg/l, ma questa aumenta notevolmente quando nell'acqua vi sono sciolte altre sostanze, in particolare acidi.

Nella pratica le acque di provenienza meteorica, arricchite di CO₂, hanno poteri corrosivi non molto diversi sia in climi freddi che in climi caldi, tanto che il contenuto in carbonati (quello disciolto e trasportato dalle acque in soluzione) delle sorgenti carsiche è sostanzialmente analogo sia all'equatore che alle alte latitudini. Il maggior sviluppo dei fenomeni carsici che si riscontra nei paesi tropicali è dunque dovuto alla maggiore quantità di precipitazioni, non tanto al maggior potere corrosivo delle acque.

All'origine quindi dei fenomeni carsici vi è la circolazione dell'acqua nel sottosuolo. Uno dei maggiori problemi che in passato assillava i ricercatori, che studiavano la chimica dei processi carsici, era quello di spiegare l'esistenza di condotti carsici a grande profondità anche molto lontano dalle zone di ingresso delle acque circolanti.

Il processo di scioglimento del calcare in acqua è infatti piuttosto rapido e quindi l'acqua dovrebbe raggiungere la saturazione dopo pochi metri di percorso sotterraneo soprattutto per le acque che si muovono, con moto lentissimo, nelle fessure dalle dimensioni sub-millimetriche, durante le prime fasi di sviluppo dei fenomeni carsici sotterranei.

A dare una risposta a questa interrogative è stato Boegli che nel 1963 propose il meccanismo della "corrosione per miscelazione". Il processo è molto semplice: due acque, contenenti quantità diverse di calcare in soluzione, quando si mescolano tra loro acquistano una percentuale in calcare sempre minore della soglia di precipitazione. Comunque questa non è la sola spiegazione per questi fenomeni che

talvolta sono di dimensioni enormi; ve ne sono altre come il fatto che la presenza di altre specie chimiche nell'acqua aumenti la solubilità del carbonato di calcio (per un aumento di forza ionica).

E ormai opinione comune comunque che le situazioni in cui si ha il massimo sviluppo di forme carsiche siano quelle in cui vengono in contatto acque con un diverso chimismo (cioè degli elementi chimici che sono sciolti in esse).

Gli effetti più vistosi dei processi carsici si hanno sull'aspetto superficiale del terreno, nel quale, in zone ben "carsificabili", si ha una infiltrazione di acqua nel terreno pari al 50 di quella piovuta, e in certe situazioni si arriva al 90.

Tutto questo fa sì che l'acqua non scorra sulla superficie (ruscellamento superficiale) e quindi il risultato è che il principale agente modellatore del paesaggio terrestre (l'erosione ad opera dell'acqua) sia fortemente ridotto. Questo spiega la presenza di forme che raccolgono l'acqua che possono essere di dimensioni molto variabili: da qualche centimetro al metro, chiamati *karren* o campi carreggiati.

Poi vi sono altre forme che convogliano l'acqua nel sottosuolo, solitamente di dimensioni maggiori come gli inghiottitoi o le doline (cavità di forma circolare con uno o più punti di assorbimento idrico); queste cavità possono assumere varie forme da quella a pozzo, a imbuto, a scodella e altre. Possiamo avere i *polje* che sono dei bacini chiusi di dimensioni chilometriche con versanti ripidi e fondo appiattito ad opera del carsismo; le valli cieche in cui vi è un corso d'acqua che poi improvvisamente viene inghiottito da una cavità e si perde nel sottosuolo.

Un'altra forma molto comune è la gola carsica: una profonda incisione con fianchi ripidi, dovuta al fatto che l'azione erosiva viene compiuta principalmente sul fondo. Nel sottosuolo invece si formano una serie di cunicoli, grotte, gallerie (a volte di notevoli dimensioni, ne è stata misurata una galleria di 32 metri di diametro), e pozzi che in parte si uniscono a formare una ragnatela tridimensionale, ma in genere si allargano di più quelle che seguono la massima pendenza del versante in cui il movimento, la velocità e la quantità di acqua che vi transita è maggiore.

IL CARSISMO COME RISORSA

Il sistema carsico costituisce, per certi versi, una delle principali risorse idriche sotterranee presenti sul pianeta e valutarne la valenza presuppone la conoscenza di alcune nozioni fondamentali quali il concetto di acquifero, la sua capacità di immagazzinamento, rilascio e trasporto, i criteri di classificazione di un sistema acquifero e la capacità di scambio tra acquiferi diversi.

Si definisce acquifero una formazione geologica in grado di immagazzinare acqua all'interno dei suoi pori o delle sue fessure e di consentirne la circolazione con portate economicamente sfruttabili dall'uomo.

Nel sistema carsico le grotte costituiscono dei punti di accesso al sottosuolo, che permettono la raccolta diretta d'informazioni di tipo geologico, geomorfologico ed idrogeologico.

Il contributo maggiore dell'indagine speleologica riguarda lo studio idrogeologico e la caratterizzazione chimico-fisica delle risorse idriche contenute negli acquiferi carsici. Inoltre, l'accesso a zone con deflusso idrico temporaneo o permanente permette di effettuare prove con traccianti per determinare le direttrici del deflusso sotterraneo e individuare il bacino idrogeologico di pertinenza del sistema carsico.

GLI ACQUIFERI CARSICI

Gli acquiferi carsici costituiscono delle risorse idriche di estrema importanza, che hanno soprattutto valenza di risorsa strategica: dati dell'UNESCO indicano che circa il 30% dell'acqua potabile disponibile su scala mondiale proviene da questi acquiferi (Forti, 1998).

Ciò dipende dal fatto che nelle aree carsiche l'infiltrazione delle acque meteoriche è sempre molto elevata, arrivando, in certi casi, al 100% delle acque disponibili per il ruscellamento superficiale. Variano invece da caso a caso le capacità dell'acquifero di immagazzinare le acque che si infiltrano e i tempi con cui queste vengono restituite dalle sorgenti, in funzione del grado di sviluppo del carsismo o, più in generale, dalle caratteristiche idrodinamiche dei sistemi carsici. In Italia le rocce carbonatiche coprono circa il 15% del territorio. In esse, gli acquiferi carsici, grazie anche ai buoni apporti di acque meteoriche, costituiscono una risorsa idrica fondamentale per l'approvvigionamento di molte aree italiane, soprattutto da quando le risorse idriche degli acquiferi di pianura vanno sempre più degradandosi, per fenomeni di inquinamento, ed impoverendosi per il sovrasfruttamento.

Nell'Italia centrale e meridionale la maggior parte delle sorgenti alimentate da acquiferi carbonatici sono captate, in parte o totalmente, per alimentare tramite importanti opere acquedottistiche, le maggiori città (Acquedotti del Peschiera a Roma, del Serino a Napoli, Pugliese); altre opere sono in corso di realizzazione o di progetto per rifornire un'utenza sempre più numerosa ed esigente.

Viceversa nelle zone dell'Italia settentrionale la maggioranza delle sorgenti carsiche, alcune delle quali anche di notevole portata, è libera. Ciò è dovuto soprattutto all'abbondanza di acqua negli acquiferi di pianura, che non ha giustificato, sino ad oggi, i notevoli costi necessari per la realizzazione degli acquedotti per l'approvvigionamento delle zone maggiormente popolate della Pianura Padana.

In questi ultimi anni, però, i fenomeni d'inquinamento che sempre di più interessano le falde idriche della Pianura Padana, stanno rendendo le risorse degli acquiferi carsici della fascia prealpina di estrema importanza strategica.

La problematica dell'uso potabile di queste acque si scontra, da un lato, con le altre forme di utilizzazione (essenzialmente quelle industriale, idroelettrica ed irrigua), dall'altro con la tutela della qualità della risorsa, in aree che presentano caratteristiche di vulnerabilità del tutto peculiari.

Per quanto concerne il primo aspetto, recentemente la L.36/1994 (Legge Galli) ha stabilito che l'uso prioritario dell'acqua è quello per il consumo umano; ciononostante stanno diventando sempre più numerosi i prelievi da acquiferi, sia superficiali che profondi, per uso irriguo o industriale, anche a causa dell'evolversi delle tecnologie di perforazione meccanica.

Il secondo aspetto è quello della vulnerabilità all'inquinamento. La rapidità del trasferimento delle acque sotterranee che caratterizza le aree carsiche porta diverse conseguenze, essenzialmente legate all'assenza o alla riduzione dell'effetto di autodepurazione delle acque meteoriche che avviene durante l'infiltrazione e il transito attraverso la zona non satura degli acquiferi.

Quando esistono punti di infiltrazione concentrata delle acque sotterranee (inghiottitoi), può verificarsi che, in concomitanza con l'evento piovoso, vengano convogliate nel sistema carsico in tempi molto rapidi le sostanze eventualmente presenti sulla superficie. Queste possono comprendere prodotti per l'agricoltura, deiezioni legate alla pastorizia o addirittura (come avviene spesso) animali morti. Tali sostanze possono arrivare in tempi molto rapidi alle sorgenti (ore o pochi giorni), ed essere restituite con concentrazioni tali da costituire un rischio per la salute degli eventuali utilizzatori della risorsa idrica. Se l'infiltrazione è diffusa, in assenza quindi di inghiottitoi, doline o altri punti ad infiltrazione preferenziale, la vulnerabilità della falda è inferiore, poichè gli apporti non sono concentrati e il tempo necessario all'infiltrazione efficace per raggiungere la falda potrebbe essere relativamente lungo (dell'ordine dei diversi giorni o qualche settimana, Preziosi et al., 1995). In questo caso potrebbe essere non del tutto trascurabile l'effetto di autodepurazione, legato ai processi chimici, fisici e biologici che avvengono innanzitutto nel suolo e quindi nell'acquifero non saturo. A questo proposito è bene sottolineare come gli acquiferi carsici possano essere modellati come sistemi di drenaggio a doppia porosità: i condotti carsici e la rete di fratture (Schoeller, 1967; Kiraly, 1975, Mangin, 1975; Atkinson, 1977).

Le modalità, le velocità di scorrimento e la capacità d'immagazzinamento dei due insiemi di vuoti sono estremamente differenti, a tal punto che i modelli matematici che tentano di descrivere con delle

relazioni il flusso dell'acqua in questi acquiferi devono prendere in considerazione un sistema a doppio circuito, con differenti equazioni per i due reticoli e scambi reciproci in funzione dei potenziali idraulici dei due sistemi (Király, 1984; Sauter, 1993; Teutsch, 1993, Garfias et alii, 1998).

Questo approccio, che certamente descrive il fenomeno in modo più preciso rispetto a quello della "porosità singola", richiede una conoscenza della geometria del sistema molto dettagliata ed impone la calibrazione di molti più parametri di quanto richiesto dai modelli di simulazione che rappresentano l'acquifero carbonatico con approcci convenzionali.

Generalmente le grotte permettono di accedere alla parte "non satura" degli acquiferi, ove avvengono i processi di infiltrazione e di trasferimento verticale delle acque meteoriche. In particolari condizioni e con particolari tecniche esplorative (speleologia subacquea) è anche possibile accedere ai condotti perennemente sommersi della zona satura.

Indagini dirette molto semplici permettono infatti di rilevare il percorso delle acque dalla superficie sino, in qualche caso, alla zona satura, di misurare il tempo di transito in diverse condizioni di regime e di valutare la gerarchizzazione del sistema. Queste caratteristiche si ripercuotono sui tempi e i modi in cui un impulso di infiltrazione, legato ad un singolo evento di pioggia, si trasmette attraverso la zona insatura del sistema.

L'esplorazione delle grotte permette inoltre di valutare gli apporti alla percolazione provenienti dalla zona di immagazzinamento sottocutaneo, cioè dalle coperture detritiche superficiali e dalla zona prossima alla superficie intensamente fratturata e minutamente carsificata, che può giocare un ruolo notevole, anche in termini di flusso di base, laddove la parte non satura è ben sviluppata.

Le prove di tracciamento permettono in primo luogo d'individuare le direzioni principali di drenaggio e la velocità media del flusso idrico, inoltre forniscono informazioni nella definizione del bacino idrogeologico. Se il deflusso del tracciante alla sorgente viene misurato in continuo assieme alla portata erogata, si possono avanzare delle ipotesi sui volumi immagazzinati, tramite l'analisi della variazione della concentrazione del colorante restituito dalla sorgente nel tempo (Civita et al., 1993).

Il numero di prove di tracciamento condotte nel tempo dagli speleologi in sistemi carsici italiani è ormai molto alto (probabilmente nell'ordine di qualche centinaio) ma solo in un numero limitato di casi i risultati sono stati pubblicati e resi di dominio pubblico.

Allo stato attuale, le maggiori conoscenze sull'idrodinamica dei sistemi carsici italiani sono relative alle Alpi Liguri, tra le zone meglio conosciute in assoluto, ad alcune zone delle Prealpi lombardo-venete, al Carso triestino, alle Alpi Apuane, al M. Cucco, ai Simbruini, agli Albumi, alla Sardegna e ad altri massicci carsici dell'Italia centro-meridionale su cui gli speleologi da diversi anni compiono esplorazioni e ricerche.

I sistemi carsici delle prealpi lombardo-venete (Forti e Marchesi, 1993; Uggeri, 1996 Sottocorno et al., 1996) hanno caratteri non dissimili da quelli delle Alpi Liguri.

Un caso emblematico, a livello mondiale, di ricerche idrogeologiche compiute attraverso l'ausilio d'indagini speleologiche è quello del Carso triestino, in cui, da oltre duecento anni, vengono compiute ricerche per individuare il corso sotterraneo del fiume Timavo, che sgorga, a poca distanza da Monfalcone (si veda Galli, 1999, per la bibliografia storica completa).

Il Timavo riceve acqua da numerosi inghiottitoi, il principale dei quali è quello del Fiume Reka, in territorio sloveno e dalle acque d'infiltrazione diffusa dell'ampio altopiano del Carso (Boegan, 1938; Gemiti, 1982; Menichetti, 1994; Ballarin e Semeraro, 1998). La connessione idrogeologica tra Reka e Timavo è da sempre radicata nelle tradizioni popolari e a partire dall'inizio del diciannovesimo secolo, molti studiosi si sono ingegnati di dimostrarla attraverso prove di tracciamento con l'uso dei mezzi più disparati: dalla paglia, a galleggianti di legno, alle anguille. Per molti aspetti si può dire che le prime intuizioni, a livello mondiale sulla idrogeologia carsica, derivano proprio dai primi approcci scientifici

al problema della provenienza dell'acqua del Timavo e del suo utilizzo per l'approvvigionamento della città di Trieste.

LA DETERMINAZIONE DELLA SUPERFICIE PIEZOMETRICA

Un'importantissima informazione, spesso sottovalutata, che proviene dalla ricerca speleologica è l'individuazione e localizzazione dei punti di affioramento della superficie piezometrica all'interno della grotta. In questi casi si dispone di uno o più punti, interni alla struttura, per determinare il gradiente piezometrico, misurare le sue oscillazioni, prelevare campioni di acqua.

Si tratta di informazioni di fondamentale importanza, in assenza di perforazioni meccaniche, per passare dall'approccio di tipo "scatola nera" a quello fenomenologico.

Purtroppo il raggiungimento del reticolo perennemente attivo, è un'eventualità piuttosto rara, mentre molto più frequenti sono le cavità che si sviluppano ad alta quota mantenendosi sempre nella parte non satura. L'informazione in questo caso è limitata al definire, nei casi in cui la grotta sia sufficientemente profonda, un limite massimo al gradiente della falda.

Un caso eccezionale, a riguardo, è quello della Valle d'Ametola, nelle Alpi Apuane, dove in un'area di meno di 3 km² vi sono ben 10 grotte, con profondità variabili da 400 a 900 m, che raggiungono la superficie piezometrica, permettendo di ricostruirne la geometria con elevata precisione. Proprio tali conoscenze hanno permesso di prevedere la direzione di flusso, poi accertata tramite colorazioni e di escludere rapporti con altre sorgenti, più vicine in linea d'aria, ma incompatibili per quota e caratteristiche idrodinamiche (Piccini, 1994).

Fabio Ferrarini