



REGIONE  
LIGURIA  
Delegazione  
Speleologica  
Ligure

*Società  
Speleologica  
Italiana*

# QUADERNI DIDATTICI

CLUB ALPINO ITALIANO



Con il patrocinio della  
Commissione Centrale per la Speleologia

Erga  edizioni

12

BARTOLOMEO VIGNA

con un contributo di Gilberto Calandri

# GLI ACQUIFERI CARSICI



QUADERNI DIDATTICI della  
Società Speleologica Italiana

Coordinamento editoriale:

*Giovanni Badino, Carlo Balbiano, Natalino Russo*

*Indirizzi degli Autori di questo Quaderno:*

- Bartolomeo Vigna, Via S. Bernolfo 53, Mondovì (CN)  
e-mail: [bvigna@athena.polito.it](mailto:bvigna@athena.polito.it)

- Gilberto Calandri, Salita Don Glorio 14, Imperia

© Società Speleologica Italiana  
Via A. Zamboni, 67 - 40127 Bologna  
[www.ssi.speleo.it](http://www.ssi.speleo.it)

Si fa espresso divieto di riprodurre in qualsiasi  
maniera, anche parzialmente,  
il contenuto dei Quaderni.

Edizione riservata  
realizzata nel mese di ottobre 2001 da  
ERGA EDIZIONI  
Via Biga 52 r. - 16144 Genova  
Tel. 010.8328441 - Fax 010.8328799  
[www.erga.it](http://www.erga.it)

*Quaderni didattici della  
Società Speleologica Italiana*

- 1 Geomorfologia e speleogenesi carsica**  
*Leonardo Piccini*
- 2 Tecnica speleologica**  
*Angelo De Marzo, Giuseppe Savino*
- 3 Il rilievo delle grotte**  
*Chiara Silvestro*
- 4 Speleologia in cavità artificiali**  
*Giulio Cappa*
- 5 L'impatto dell'uomo sull'ambiente di grotta**  
*Mauro Chiesi, Gianluca Ferrini, Giovanni Badino*
- 6 Geologia per speleologi**  
*Valentina Malcapi, Leonardo Piccini*
- 7 I depositi chimici delle grotte**  
*Paolo Forti*
- 8 Meteorologia ipogea**  
*Carlo Balbiano*
- 9 L'utilizzo del GPS in speleologia**  
*Gian Domenico Cella, Fabio Siccardi, Alberto Verrini*
- 10 La vita nelle grotte**  
*Marco Bani*
- 11 Storia della Speleologia**  
*Lamberto Laureti*
- 12 Gli acquiferi carsici**  
*Bartolomeo Vigna,  
con un contributo di Gilberto Calandri*

QUADERNI DIDATTICI  
DELLA  
SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA

12

Bartolomeo Vigna \*  
con un contributo di Gilberto Calandri \*\*

**GLI ACQUIFERI CARSICI**

\* *Dipartimento di Georisorse e Territorio - Politecnico di Torino  
Gruppo Speleologico Piemontese*

\*\* *Gruppo Speleologico Imperiese*

REGIONE LIGURIA

DELEGAZIONE SPELEOLOGICA LIGURE

*Il suggestivo acronimo GIN sta oggi a significare un Geosito Ipogeo Naturale ovvero, molto più semplicemente, una "grotta", come si è soliti definire appunto un tale "antro naturale".*

*In Liguria di grotte ce ne sono circa 1500, un numero elevato considerata la limitata superficie del nostro territorio, distribuite sulle 39 aree carsiche individuate con la legge regionale n. 14 del 3 Aprile 1990.*

*Tali aree costituiscono ambienti di grande interesse, non solo paesaggistico, ma anche e soprattutto naturalistico ambientale, considerate anche le potenzialità idrologiche, scientifiche e culturali peraltro ad oggi non del tutto sfruttate.*

*Con la legge regionale 14/1990 si è data una concreta occasione per attivare, anche attraverso finanziamenti costanti, iniziative di salvaguardia, ricerca e valorizzazione del patrimonio carsico, che hanno prodotto ad oggi indubbi risultati, quali una maggiore conoscenza degli affioramenti carbonatici liguri relativamente all'aspetto ipogeo ed una qualità dell'ambiente sicuramente "salvaguardata", principalmente per quanto riguarda l'aspetto idrogeologico.*

*Tra i differenti "risultati attesi" dalla già citata Legge regionale è questo forse il principale: aver salvaguardato dall'inquinamento importantissimi corpi idrici sotterranei estremamente fragili, ma ricchissimi di acque oggi non utilizzate .*

*Se nel 1995 veniva sfruttato in Italia solo il 30% degli acquiferi carsici, si prevede oggi un repentino aumento dell'emungimento da tali sistemi, sino all'80% nel 2005, tenuto conto dei possibili inquinamenti degli acquiferi di pianura.*

*Per questo si ritiene pertanto di estremo interesse la pubblicazione, nell'ambito della Collana dei "Quaderni didattici" della Società Speleologica Italiana, del Volume "Gli acquiferi carsici" che la stessa, in collaborazione con la Delegazione Speleologica Ligure, ha avviato per "fare il punto" sulle conoscenze scientifiche relative ad un tema tanto attuale ed importante quale appunto "il sistema acqua" in ambienti carsici.*

*Per tale impegno, un particolare riconoscimento va pertanto alla Società Speleologica Italiana per il lavoro che svolge in campo nazionale e naturalmente alla Delegazione Speleologica Ligure, con la quale la Regione collabora da anni, con l'auspicio che altre iniziative possano far seguito a questa.*

Genova, 12 ottobre 2001

Ing. Roberto Levaggi  
Assessore alla Tutela dell'Ambiente e  
all'Edilizia della Regione Liguria



*L'occasione per avviare la redazione di questo "quaderno didattico" dedicato agli "acquiferi carsici" si è presentata due anni or sono, quando, a cavallo tra la Liguria e il Piemonte, la Delegazione Speleologica Ligure (associazione federativa dei gruppi speleologici liguri) organizzò il corso nazionale "Introduzione allo studio dell'idrologia carsica" (32° corso di terzo livello della Commissione Nazionale Scuole di Speleologia della Società Speleologica Italiana: Col di Nava-Gola delle Fascette-Bossea (IM-CN), 8-10 ottobre 1999).*

*I docenti del corso (Gilberto Calandri, Paolo Forti e Bartolomeo Vigna) non predisposero dispense per gli argomenti da loro trattati, ma si concordò l'impegno di pubblicare e integrare quanto era stato da loro illustrato, per renderlo disponibile a un più vasto pubblico, non solo speleologico.*

*Nelle pagine che seguono Vigna e Calandri (da parecchi anni impegnati "sul campo") ampliano ulteriormente la panoramica sull'idrologia carsica presentata durante il corso e documentano adeguatamente l'indispensabile contributo che gli speleologi possono apportare per la conoscenza degli acquiferi carsici: Gilberto Calandri ha curato il capitolo 14, relativo alle misure e alle analisi geochimiche, mentre Bartolomeo Vigna è l'autore di tutta la rimanente parte di questa pubblicazione (fotografie e disegni compresi).*

*La Delegazione Speleologica Ligure da oltre 25 anni promuove la conoscenza, la documentazione e la tutela delle grotte e delle aree carsiche liguri, operando spesso in stretta collaborazione con la Regione Liguria: è pertanto particolarmente lieta di partecipare alla realizzazione di questo quaderno didattico della Società Speleologica Italiana (stampato con il parziale contributo della Regione Liguria, L.R. 14/1990), che favorirà indubbiamente nuovi approfondimenti operativi nell'analisi e nello studio dei territori carsici, ovviamente non solo in Liguria.*

Rinaldo Massucco

*Presidente della Delegazione Speleologica Ligure*

<b>1. L'IMPORTANZA DEGLI ACQUIFERI CARSIICI</b> .....	pag. 6
<b>2. LA FORMAZIONE DELLE RETI CARSIICHE</b> .....	6
<b>3. PARAMETRI CHE CONDIZIONANO LE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DI UN SISTEMA</b> .....	7
3.1 La morfologia ed il clima .....	7
3.2 La litologia .....	8
3.3 Le caratteristiche strutturali .....	8
3.4 Rapporti tra fratturazione, carsificazione ed idrogeologia .....	9
<b>4. STRUTTURE E SISTEMI IDROGEOLOGICI</b> .....	9
<b>5. ZONAZIONE DI UN SISTEMA CARSIICO</b> .....	10
5.1 L'area di alimentazione .....	11
5.2 La zona non satura .....	12
5.3 La zona satura .....	14
5.4 L'area di emergenza .....	15
<b>6. SCHEMATIZZAZIONE DEI SISTEMI CARSIICI</b> .....	16
6.1 Sistemi con rete a dreno dominante .....	17
6.2 Sistemi con rete a dreni interdipendenti .....	18
6.3 Sistemi con rete a circolazione dispersiva .....	19
<b>7. LE SORGENTI</b> .....	20
<b>8. LE PIENE</b> .....	23
8.1 La piena nelle diverse zone di un sistema .....	24
8.2 Tipi di piene in relazione agli apporti .....	26
<b>9. LE MISURE DI PORTATA</b> .....	27
<b>10. IL BILANCIO IDROGEOLOGICO</b> .....	29
<b>11. I TRACCIANTI ARTIFICIALI</b> .....	30
11.1 I traccianti artificiali più utilizzati .....	30
11.2 I traccianti fluorescenti .....	31
11.3 Utili informazioni .....	31
11.4 Immissione del tracciante .....	32
11.5 Raccolta dati alle sorgenti .....	32
11.6 Analisi in laboratorio .....	33
11.7 La risposta dei traccianti .....	33
<b>12. LE CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE</b> .....	34
<b>13. GLI ACQUISITORI AUTOMATICI</b> .....	36
<b>14. MISURE E ANALISI GEOCHIMICHE DELLE ACQUE CARSIICHE</b> .....	37
14.1 Approccio dello speleologo allo studio delle acque .....	37
14.2 Analisi delle acque e campionatura .....	38
14.3 Errori nelle misure .....	38
14.4 Le analisi sul terreno e i kits portatili .....	39
14.5 Le analisi fondamentali sul terreno .....	40
14.6 Componenti maggiori e minori di un'acqua carsica .....	41
14.7 Le sostanze inquinanti .....	42
14.8 Considerazioni ed elaborazione dei dati .....	42
<b>TESTI CITATI</b> .....	48



## 1. L'IMPORTANZA DEGLI ACQUIFERI CARSICI

Le acque sotterranee contenute negli acquiferi carsici costituiscono una preziosa fonte di alimentazione per grandi aree del mondo, dalla Florida allo Yucatan, dalla Cina a molti paesi del Mediterraneo.

Secondo le ricostruzioni archeologiche, si può affermare che molti centri delle antiche civiltà siano collegati alla presenza di copiose sorgenti che, in particolar modo nelle regioni semiaride, costituivano una risorsa indispensabile per il loro sviluppo.

L'Italia è un paese particolarmente ricco di grandi sorgenti alimentate da serbatoi carbonatici, più o meno carsificati.

Emergenze, capaci di fornire portate medie dell'ordine di diverse migliaia di litri al secondo, sono localizzate in quasi tutte le nostre regioni, da Nord fino a Sud e nelle isole maggiori. Da queste traevano alimentazione i grandi acquedotti dell'antichità, come quello dell'Acqua Marcia di Roma e quelli campani di Neapolis e Pompei. Successivamente, nell'Ottocento e nel Novecento, importanti opere, tra le maggiori dell'epoca, hanno condottato le acque sorgive appenniniche per alleviare la sete della Puglia (l'Acquedotto Pugliese) e della Campania (Acquedotto del Serino). Nell'Italia circumpadana, invece, la cultura del trasferimento a distanza più o meno lunga di risorse sorgive montane non si è quasi mai resa necessaria: in pianura, infatti, è sempre stato sufficiente scavare pozzi sotto i propri piedi per attingere senza fatica al grande serbatoio multistrato padano. Ciò ha portato a trascurare l'importanza delle sorgenti carsiche che pure sono presenti in buon numero nell'arco alpino ed ai suoi piedi. Attualmente, però, siamo di fronte ad una inversione di tendenza ancora soltanto accennata, a causa del progressivo depauperamento qualitativo e quantitativo delle risorse di pianura a seguito di fenomeni di sovrasfruttamento ed inquinamento generalizzato.

Gli acquiferi carsici sono da tempo oggetto di numerosi studi tendenti alla conoscenza del loro funzionamento, ad una esatta valutazione del loro grado di vulnerabilità e ad una utilizzazione razionale delle loro acque. Essi sono infatti da considerare una vera e propria risorsa strategica per l'alimentazione idropotabile del futuro. È evidente che tali risorse devono essere ben tutelate, anche perché a causa della continua antropizzazione del territorio sono sempre più esposte ad elevati rischi di contaminazione sia per cause accidentali che permanenti. Gli acquiferi molto carsificati presentano infatti caratteristiche tali da esercitare uno scarsissimo contrasto alla propagazione degli inquinanti, per l'elevata velocità di flusso e la scarsa capacità di autodepurazione. I meccanismi di degradazione naturale in un sistema molto carsificato sono infatti generalmente molto scarsi e legati essenzialmente al contrasto esercitato dalla copertura del carso, a fenomeni ossidanti nella zona non satura e all'effetto della diluizione nella zona satura. Le notevoli differenze presenti in un sistema carsico, legate essenzialmente alla organizzazione della rete di drenaggio ed alla velocità di circolazione delle acque nelle diverse parti del sistema, possono attenuare o aggravare gli effetti dell'inquinamento.

È evidente che i dati e le informazioni che possono raccogliere gli speleologi sono determinanti negli studi relativi all'idrogeologia carsica di una data area. È altrettanto vero che una buona conoscenza scientifica sui diversi processi idrogeologici che intervengono ed interagiscono nella formazioni delle reti carsiche può essere utile agli esploratori per la ricerca di nuove prosecuzioni, per la descrizione di un sistema carsico e, in alcuni casi, anche per la prevenzione di possibili incidenti legati alle piene sotterranee.

## 2. LA FORMAZIONE DELLE RETI CARSICHE

Numerose fasi deformative, fragili e duttili, hanno interessato nel tempo gli ammassi rocciosi, provocandone una fratturazione più o meno intensa ed estesa. Unitamente alle altre discontinuità presenti e tra loro collegate, come i giunti di strato, esse giocano un ruolo fondamentale dal punto di vista idraulico, poiché trasformano un ammasso roccioso praticamente impermeabile in un acquifero caratterizzato da una relativa permeabilità.

La geometria e l'estensione dei fenomeni carsici dipendono da una innumerevole serie di fattori tra loro interagenti, ma è ovvio che un ruolo fondamentale dello sviluppo della carsificazione profonda è legato alla circolazione delle acque sotterranee. È quindi indispensabile che:

- siano presenti nell'ammasso discontinuità sufficientemente aperte ed interconnesse per favorire un certo deflusso ed avviare la carsificazione;
- esista un carico idraulico che, unitamente alla permeabilità dell'ammasso, determini una velocità di scorrimento delle acque nelle fratture e nei giunti.

L'effetto appaiato della portata e della aggressività delle acque con il tempo genera una concorrenza nelle vie di deflusso, dando origine ad un processo di autoalimentazione progressivo delle vie di drenaggio principali. Durante le prime fasi della carsificazione, le acque iniziano a circolare nelle discontinuità dell'am-



masso roccioso interessando in modo diffuso l'intero acquifero, ma, nel tempo, si potrà avere una vera e propria selezione progressiva con il drenaggio che tenderà ad impostarsi nelle discontinuità maggiormente aperte dove le perdite di carico sono più ridotte. L'erosione e la corrosione si concentreranno quindi nei settori a maggiore permeabilità, penalizzando le parti meno trasmissive. È così che nei massicci calcarei dove sono presenti favorevoli situazioni, a partire da un insieme fratturato relativamente omogeneo, si svilupperà nel tempo una rete di flusso principale impostata anche in cavità percorribili dagli speleologi. Altrove, la notevole compattezza, o al contrario, l'estrema fratturazione dell'ammasso limiteranno il processo di carsificazione profonda, con l'assenza di importanti reticoli carsici ed un deflusso sotterraneo assente o relativamente diffuso ed omogeneo nelle discontinuità poco carsificate dell'ammasso calcareo. La circolazione idrica sotterranea, impostata durante le prime fasi lungo piani di taglio e giunti di strato, seguirà nelle diverse parti di un sistema percorsi piuttosto differenti. Nella zona non satura è il fattore gravità a condizionare in prim'ordine l'intero deflusso delle acque, che seguiranno percorsi prevalentemente verticali, a baionetta, discriminando tra tutte le discontinuità presenti i piani più inclinati ed utilizzando i giunti orizzontali esclusivamente per trasferimenti di livello. Si origineranno quindi cavità prettamente verticali con alternanze di pozzi e meandri.

Nella zona satura la circolazione idrica tenderà a svilupparsi secondo direttrici orizzontali, seguendo i percorsi con minori perdite di carico verso le emergenze. Si formeranno in questo modo importanti orizzonti di carsificazione, estremamente sviluppati orizzontalmente in corrispondenza della quota del livello di base locale, anche se l'ammasso è caratterizzato da una fratturazione estesa ben al di sotto della quota delle sorgenti. In questa zona si formeranno quindi i classici reticoli di condotti a pieno carico con andamento a saliscendi.

Occorre sottolineare che questa descrizione è ideale e che, molto frequentemente, si osservano situazioni ben più complesse dove fasi deformative fragili, sollevamenti dei massicci, approfondimenti dei livelli di base e cicli di carsificazione si susseguono nel tempo, condizionando pesantemente la geometria dell'intero reticolo di drenaggio.

### **3. PARAMETRI CHE CONDIZIONANO LE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DI UN SISTEMA**

#### **3.1 La morfologia ed il clima**

Le caratteristiche morfologiche e climatiche di un'area carsica rivestono un ruolo molto importante nel condizionare le modalità di alimentazione di un dato sistema e l'evoluzione del carsismo sotterraneo. Le situazioni che oggi si osservano, spesso ereditano situazioni morfologiche e climatiche molto diverse da quelle attuali e che hanno pesantemente condizionato lo sviluppo delle forme principali. Basti pensare come gran parte del territorio italiano è stato interessato negli ultimi tre milioni di anni da situazioni climatiche molto differenti nel tempo, variabili da climi asciutti e molto freddi a periodi caldo-umidi di tipo tropicale.

Tra le principali situazioni morfo-climatiche attuali nel territorio europeo, possiamo riconoscere:

- Strutture di tipo tabulare, tipiche della fascia mediterranea, caratterizzate da una macchia spontanea molto fitta ma con una ridottissima copertura residuale ad eccezione delle zone a polje o fondi di doline. Sono prevalenti le microforme di assorbimento. Tipiche sono le zone dell'avanpaese apulo-salentino, i carsi sardi, il carso triestino, i grandi plateau francesi.
- Strutture a dislivello moderato, tipiche delle regioni temperato-umide, con rigogliosa vegetazione e roccia calcarea subaffiorante, con estremo sviluppo delle zone a dolina (aree carsiche di media altitudine dei carsi francesi, dell'Appennino centro-meridionale, dell'ex Jugoslavia, dell'Europa orientale).
- Strutture carsiche di alta quota, a forte dislivello, dove il ruolo delle glaciazioni quaternarie ha condizionato pesantemente la morfologia e l'idrogeologia. Tipiche di tali situazioni sono le estese superfici di carso nudo, con estrema abbondanza delle microforme e ridottissima presenza di copertura vegetale (carsi alpini spagnoli, francesi, austriaci, italiani e sloveni).

La morfologia superficiale gioca un ruolo fondamentale nelle modalità di infiltrazione delle acque superficiali, sia per quanto riguarda i processi attuali sia per le situazioni in passato.

Le forme superficiali, quali inghiottitoi attivi, vaste aree di roccia nuda con microforme assorbenti, conche o valloni endoreici, favoriscono una rapida e totale infiltrazione delle acque superficiali, mentre versanti molto acclivi, potenti coperture di depositi a bassa permeabilità o la presenza di una rigogliosa vegetazione limitano e rallentano il processo infiltrativo. La presenza di forme di ruscellamento superficiale (che concentrano, o in passato hanno convogliato, importanti volumi d'acqua verso gli inghiottitoi) ha sicuramente favorito lo sviluppo di importanti sistemi carsici facilmente esplorabili (innumerevoli sono le situazioni di questo tipo presenti nel territorio italiano, dal Marguareis agli Alburni).



### 3.2 La litologia

La natura litologica delle rocce che costituiscono l'ossatura di un massiccio carbonatico ha, ovviamente, un ruolo molto importante nel processo di carsificazione e quindi nelle modalità della circolazione sotterranea. Nel territorio italiano sono presenti numerose e differenti successioni di rocce carbonatiche che possono essere sommariamente distinte dal punto di vista idro-litologico in:

- serie prevalentemente dolomitiche nelle quali il processo di carsificazione è in genere meno sviluppato, con la presenza di numerosi, ma limitati sistemi idrogeologici;
- serie carbonatiche a scheletro terrigeno più o meno prevalente (calcari arenacei, calcari marnosi, conglomerati e breccie), serie silico-calcaree e silico-dolomitiche, nelle quali il fenomeno carsico si manifesta in modo ed in grado diversificato a seconda dell'abbondanza della frazione terrigena e che dunque sono dotati di una permeabilità variabile, prevalentemente per fessurazione e subordinatamente per carsismo;
- serie francamente calcaree e marmoree, caratterizzate da una estrema ricchezza di morfologie superficiali assorbenti e dalla presenza di estesi reticoli idrogeologici, dotate di una permeabilità da media ad elevata a seconda dell'indice di carsismo e di fratturazione.

### 3.3 Le caratteristiche strutturali

Lo stato di fratturazione delle rocce carbonatiche gioca un ruolo dominante nella circolazione idrica sotterranea che si esplica principalmente nel complesso reticolo delle discontinuità più o meno carsificate, irregolarmente distribuite e variamente interconnesse. È pertanto essenziale che la struttura di un ammasso roccioso sia attentamente descritta distinguendo le differenti tipologie delle discontinuità, che possono essere distinte in: piani di faglia principali, fratturazione in grande, microfessurazione e giunti di strato.

I *piani di faglia*, generati dallo spostamento relativo di due porzioni dell'ammasso, giocano ruoli idrogeologici molto differenti in base allo stato di microfessurazione della roccia interessata dai movimenti. Possono formarsi quindi delle zone intensamente fratturate, chiamate fasce cataclastiche, che costituiscono delle vie altamente drenanti, oppure settori con notevoli riempimenti di materiali fini (dette fasce milonitiche, legate ad una intensa destrutturazione della roccia) o di breccie ricementate da fluidi profondi, che rappresentano sovente delle effettive barriere impermeabili, che condizionano la circolazione profonda.

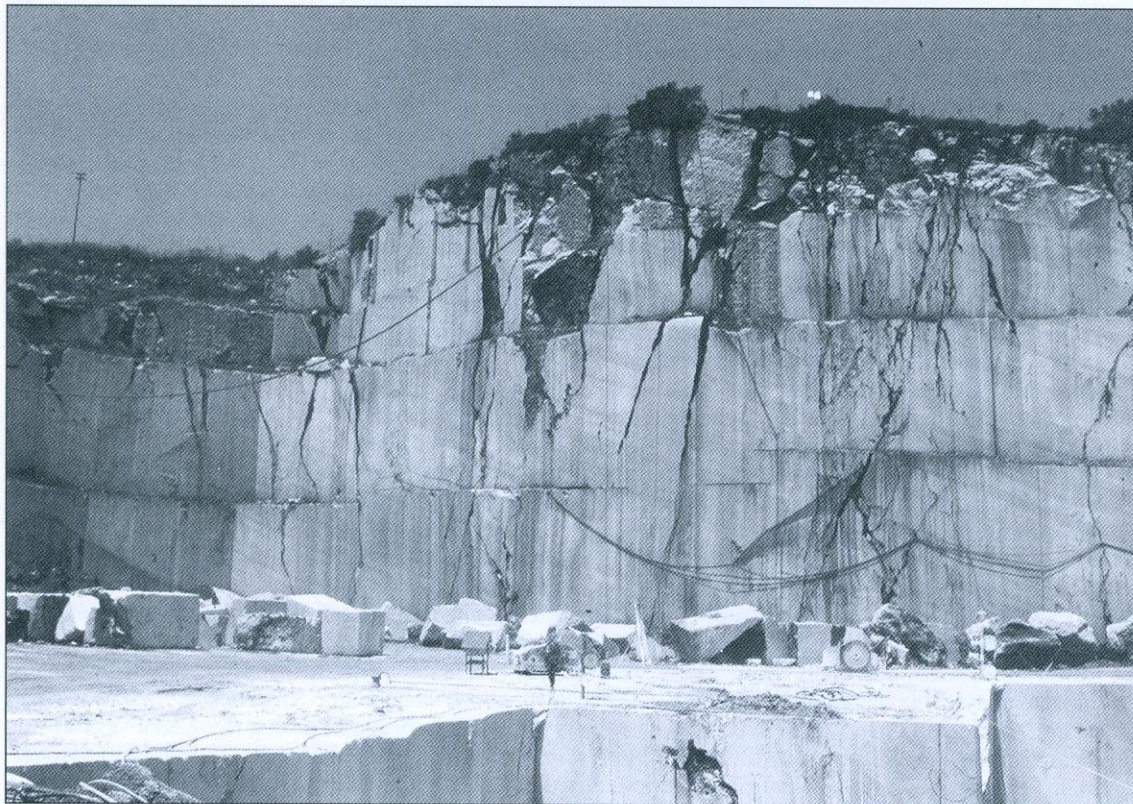


Foto 1: *Discontinuità carsificate ed assenza della fratturazione a piccola scala in una cava di marmo in Sardegna*



La *fratturazione in grande* è riferita a discontinuità piuttosto aperte ed estese, con elevato grado di interconnessione, legate in genere a fasi distensive dell'ammasso roccioso. È tipica dei massicci molto carsificati, come le serie calcareo-dolomitiche del Marguareis o le unità marmoree delle Alpi Apuane.

La *microfessurazione* è caratterizzata da una elevatissima fratturazione della roccia, superando anche le 100 discontinuità al metro lineare, che risultano essere piuttosto chiuse. L'estrema frammentazione dell'ammasso roccioso è in genere legata ad importanti fasi compressive, come quelle collegate alla messa in posto dei principali fronti di sovrascorrimento appenninici (massicci del M. Nuria e Velino presso Rieti o della Val d'Agri a sud di Potenza). La circolazione idrica risulta essere molto lenta e totalmente dispersa e diffusa nell'ammasso roccioso.

I *giunti di strato*, che sono le discontinuità che in genere separano le diverse bancate calcaree, giocano un ruolo molto differente in base alle condizioni stratigrafiche e strutturali di un massiccio carsico. In alcuni sistemi i giunti risultano essere le vie privilegiate della circolazione sotterranea e quindi sono altamente carsificati con grosse gallerie e forre come quelle presenti nelle grotte di Campo dei Fiori, presso Varese. In genere costituiscono delle importanti vie di trasferimento delle acque sotterranee, che favoriscono l'interconnessione con le altre discontinuità presenti, caratterizzate da diverse giaciture.

### 3.4 Rapporti tra fratturazione, carsificazione ed idrogeologia

Lo stato di fratturazione di un massiccio carsico gioca quindi un ruolo fondamentale nel condizionare le modalità di circolazione delle acque sotterranee e quindi nello sviluppo delle reti carsiche. Negli ammassi carbonatici caratterizzati da una assenza della fratturazione a piccola scala e dalla esistenza di importanti discontinuità con frequenza estremamente bassa, ma con un alto grado di connessione (Foto 1), è presente in genere una circolazione profonda prevalentemente impostata lungo vie privilegiate, con lo sviluppo di importanti reti carsiche progressivamente evolute fino allo stato attuale (tipici sono i massicci delle Alpi Apuane, del settore centro-orientale sardo, del Marguareis, del Carso triestino, del Canin, ecc). Le caratteristiche idrogeologiche sono quindi improntate dalla presenza di importanti collettori con conseguenti estreme variazioni della portata, molto ridotta nei periodi asciutti e con piene violente ed immediate in seguito ad importanti eventi infiltrativi.

Al contrario nei massicci caratterizzati da una elevata fratturazione, sia a piccola che a grande scala, presente in superficie ed in profondità (Foto 2), l'infiltrazione e la circolazione profonda delle acque risultano estremamente diffuse ed omogenee. I fenomeni carsici superficiali sono limitati ad ampie depressioni tettonico-carsiche o doline (rappresentativi di tale situazione sono numerosi massicci dell'Appennino centrale e meridionale, delle Alpi occidentali ed orientali). In profondità la circolazione idrica è distribuita in modo omogeneo nel fitto e capillare reticolo di discontinuità. Non esistendo quindi vie preferenziali di deflusso, lungo le quali lo scorrimento concentrato delle acque attiva una progressiva dissoluzione: il fenomeno carsico non trova le condizioni favorevoli ad un suo sviluppo. L'esistenza di importanti sorgenti che drenano questi massicci è condizionata unicamente dalla geometria degli orizzonti impermeabili al contorno, che guidano il deflusso verso le zone più depresse della struttura carbonatica. Il loro regime idrodinamico è ovviamente legato alla relativamente bassa permeabilità dell'ammasso roccioso, con portate molto costanti nel tempo e con assenza di pronunciati eventi di piena.

## 4. STRUTTURE E SISTEMI IDROGEOLOGICI

Per *struttura idrogeologica* o *idrostruttura* si intende l'insieme di più unità o formazioni geologiche (ad esempio calcari dolomitici triassici, calcari puri giurassici e calcari arenacei cretacei), aventi una sostanziale unità spaziale e giaciturale, visti nel loro assetto geometrico attuale, ove si verificano le condizioni necessarie e sufficienti per il deflusso e l'accumulo di acque sotterra-

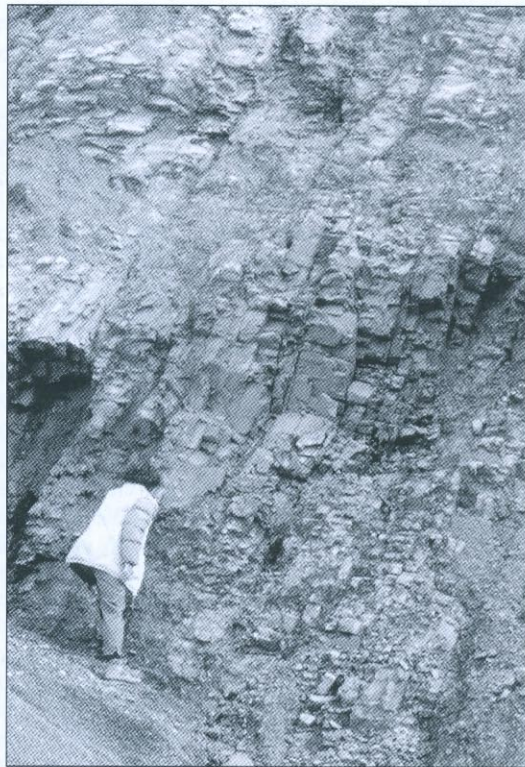


Foto 2: L'elevata fratturazione di un ammasso roccioso inibisce la formazione di estesi condotti carsici (Massiccio del M. Velino, Lazio)



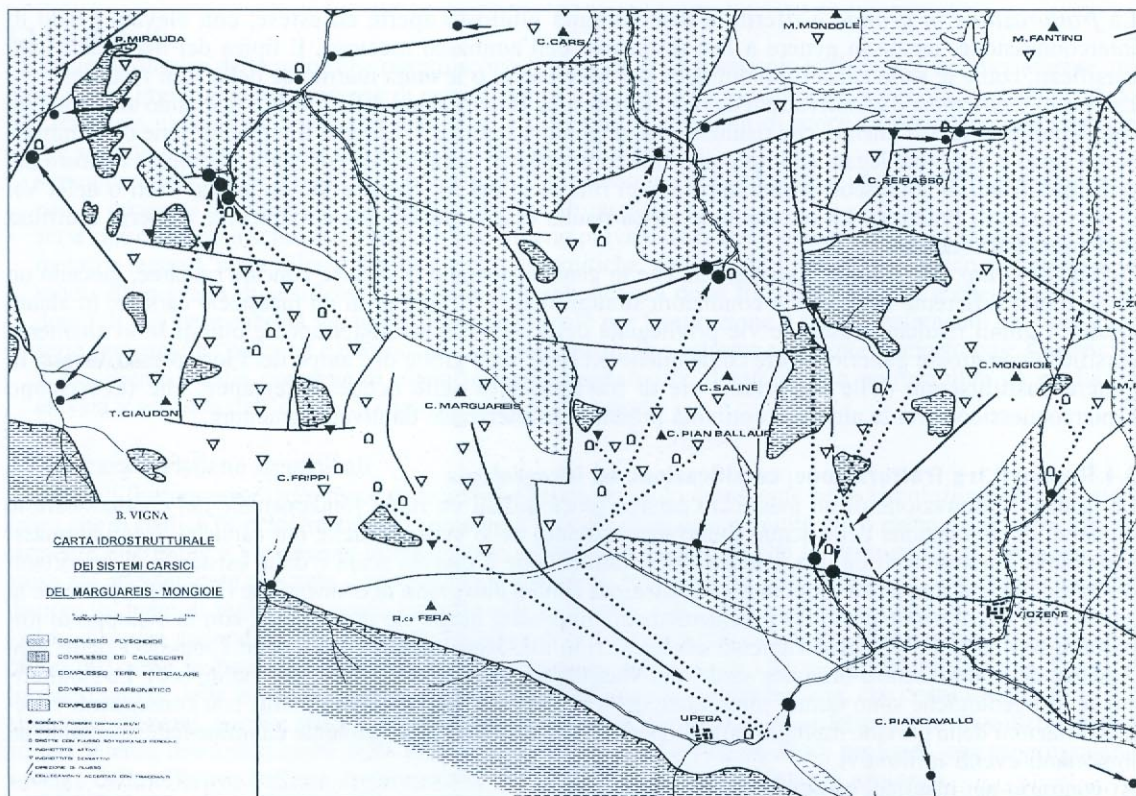


Fig. 1: La struttura idrogeologica del Marguareis-Mongioie ed i numerosi sistemi carsici che alimentano le rispettive sorgenti

nee sotto l'azione dei gradienti di pressione (Civita 1975). I limiti di una idrostruttura sono dati dai rapporti stratigrafici e/o tettonici con le unità adiacenti caratterizzate da un minore grado di permeabilità. La corretta definizione dell'idrostruttura è di primaria importanza per la comprensione della circolazione idrica sotterranea.

All'interno della singola struttura idrogeologica possono essere identificati uno o più sistemi acquiferi tra loro indipendenti o interdipendenti (Fig. 1). Un sistema acquifero è l'insieme a livello del quale i deflussi sotterranei si organizzano a costituire una unità di drenaggio che alimenta una sorgente o un gruppo di sorgenti interconnesse (Mangin 1975).

Nelle situazioni in cui una struttura idrogeologica sia costituita da più sistemi, risulta difficile individuare i principali spartiacque sotterranei che separano i diversi settori. L'esplorazione delle cavità e l'esecuzione di test con traccianti permettono di raccogliere utilissimi dati per identificare tali limiti. In alcuni sistemi le cavità percorribili dagli speleologi seguono, invece, percorsi molto diversi rispetto alla attuale circolazione sotterranea. La struttura idrogeologica del Marguareis-Mongioie, ad esempio, è costituita da numerosi sistemi, con confini non facilmente individuabili. Nel settore orientale è ubicato l'abisso del Gache', che si dirige verso SW e confluisce nel complesso di Piaggia Bella, appartenente al sistema della Sorgente Foce, localizzata in Val Tanaro. Una serie di colorazioni, effettuate nel Gache', hanno invece evidenziato un collegamento con le sorgenti dell'Ellero, poste verso Nord, sul versante opposto del massiccio.

## 5. ZONAZIONE DI UN SISTEMA CARSICO

In un sistema carsico è possibile individuare diverse zone o parti con funzionalità e modalità di circolazione idrica tra loro molto diverse (Fig. 2).

Si riconosce:

- una area di alimentazione che raccoglie le acque di precipitazione e di ruscellamento superficiale e che può anche ricevere gli apporti provenienti da zone non carsiche limitrofe alla struttura;
- una zona non satura, detta anche vadosa o areata, caratterizzata da una circolazione idrica con percorsi prevalentemente verticali, con portate molto differenziate, in base alle condizioni meteorologiche;



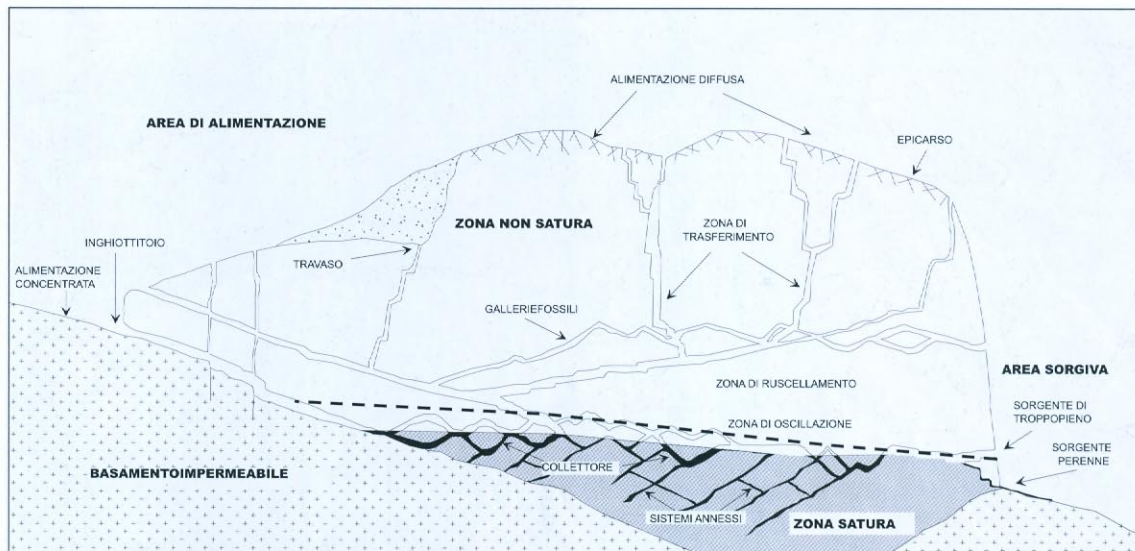


Fig. 2: Zonazione di un sistema carsico

- una *zona saturata*, detta anche freatica, con vie di drenaggio ad andamento prevalentemente orizzontale, dove tutti i vuoti risultano saturi, separata in genere dalla zona sovrastante da un orizzonte altamente carsificato semiattivo;
- una *area sorgiva* con una o più sorgenti perenni ed altre temporanee chiamate troppopieni con portate piuttosto variabili nel tempo e condizionate dagli apporti infiltrativi.

In molti sistemi carsici queste differenti zone non sono così facilmente distinguibili o rappresentative. L'area di alimentazione può essere, ad esempio, molto ridotta, così come l'area sorgiva può mancare del tutto nelle situazioni in cui si verifica un travaso tra l'acquifero carbonatico ed una pianura alluvionale adiacente. In numerosi massicci, l'estensione e lo sviluppo della rete carsica sono stati condizionati dalla sovrapposizione di più cicli di carsificazione collegati alla complessa evoluzione geodinamica plio-quadernaria, con gallerie fossili ubicate anche a centinaia di metri di dislivello rispetto all'attuale livello freatico. Sta nella bravura degli speleologi individuarne le diverse parti e capirne il loro reale sviluppo ed estensione. In altre aree, invece, le numerose fasi di erosione quadernaria hanno smantellato in gran parte la rete di flusso originale, lasciando unicamente dei relitti dell'antico reticolo carsico, con una circolazione idrica attuale quasi inesistente o del tutto diversa da quella passata.

### 5.1 L'area di alimentazione

Comprende l'intera superficie dell'idrostruttura carsica e può anche ricevere il contributo di estesi versanti costituiti da litotipi non calcarei che riversano le acque di ruscellamento superficiale verso l'acquifero carbonatico. Il carso può essere coperto da depositi residuali e alluvio-colluviali o presentare estese superfici di roccia nuda con sviluppo delle diverse microforme da corrosione, doline, inghiottitoi e depressioni tettonico-carsiche che condizionano pesantemente le modalità di infiltrazione delle acque superficiali. Ogni sistema viene alimentato da differenti tipi di apporti, in funzione non solo delle condizioni climatiche locali, ma anche delle differenti situazioni geologico-strutturali. Riconosciamo una *infiltrazione diffusa*, detta anche *primaria* legata alle precipitazioni che interessano l'intero areale, che può essere immediata quando è legata alle precipitazioni piovose o ritardata in seguito allo scioglimento del manto nevoso. Il fenomeno si esplica rapidamente nelle zone dove affiorano superfici carsiche nude (Foto 3), mentre appare più o meno rallentato laddove il carso è sottoposto ai diversi tipi di copertura. Si individua invece una *infiltrazione concentrata* o *secondaria* quando le acque di ruscellamento superficiale provenienti anche da rocce non carsiche comprese nell'area di alimentazione di un sistema si riversano in un inghiottitoio attivo o semiattivo (Foto 4). Generalmente il ruscellamento superficiale è organizzato con un reticolo di drenaggio che termina in un punto preciso (inghiottitoio) o le cui acque si perdono in un tratto più o meno lungo del subalveo (inghiottitoi di subalveo). La presenza di rocce non carbonatiche lateralmente confinanti o superiormente sovrapposte all'acquifero carsico condiziona l'esistenza dei *travasi* di acque sotterranee verso il sistema principale. Si tratta di acquiferi di secondaria importanza, costituiti da falde di detrito, morene, lembi flisciodi semipermeabili o da zone particolarmente fratturate del basamento cristallino, che cedono lentamente all'acquifero carbonatico le acque immagazzinate con apporti più o meno cospicui, ma in genere molto continui nel



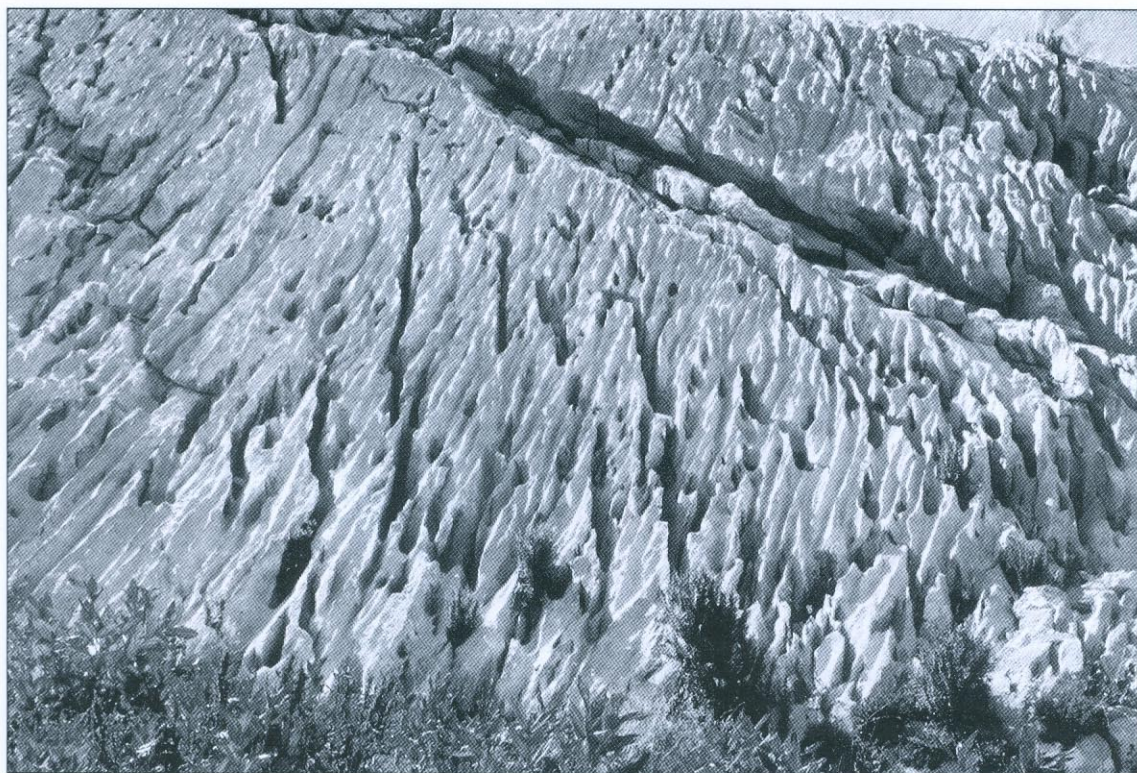


Foto 3: *Le estese superfici di carso nudo condizionano le modalità d'infiltrazione (M. Mongioie, Piemonte)*

tempo anche in assenza di precipitazioni dirette.

## 5.2 La zona non satura

La *zona non satura*, denominata anche *zona vadosa*, *vadose zone* per gli anglosassoni e *zone non saturée* per i francesi, occupa il volume di acquifero dominato dall'area di alimentazione e limitato verso il basso dalla zona satura. La sua funzione è quella di trasferire in profondità, con percorsi prevalentemente verticali, le acque provenienti dalla superficie. Lo spessore è legato essenzialmente all'entità di rilievo e, in alcuni massicci, può addirittura superare i 2000 m di spessore. In questa zona si possono individuare differenti parti, condizionate in particolar modo da fattori stratigrafico-strutturali, con funzionalità e spessori molto differenti e diversificati da massiccio a massiccio: l'epicarso, le zone di trasferimento e di ruscellamento e le zone inattive.

L'*epicarso* è presente nella parte più superficiale, in genere fino a 2-5 m di profondità, ed è caratterizzato da una struttura nettamente individuata e caratterizzata da una intensa fratturazione (Foto 5) che si riduce progressivamente o limitata alla base da un orizzonte irregolare piuttosto carsificato, separata dalla sottostante porzione rocciosa più compatta. Il suo ruolo è quello di assorbire rapidamente le acque meteoriche e di trasferirle in profondità. I fattori genetici della intensa fratturazione sono legati essenzialmente alla decompressione dell'ammasso ed ai processi di gelificazione e termoclastismo. Gli autori francesi distinguono due zone principali: la prima comprende anche le microforme superficiali, con acqua di assorbimento ritenuta alla base del suolo o dai



Foto 4: *Inghiottitioio che raccoglie le acque di ruscellamento superficiale (Ardèches, Francia)*



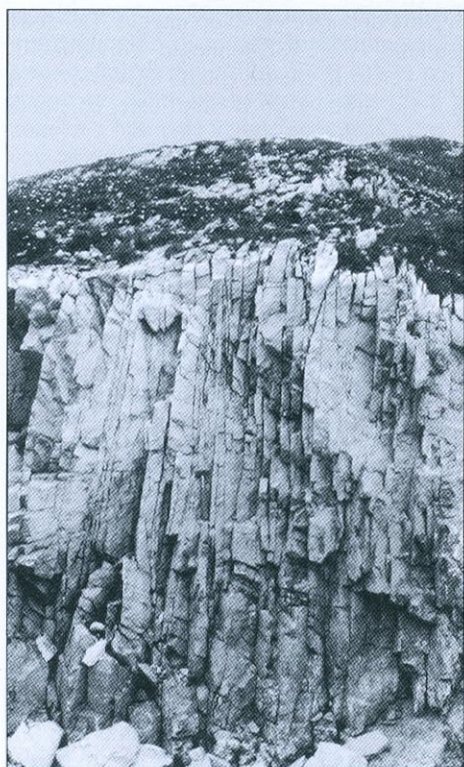


Foto 5: *L'intensa fratturazione dell'epicarso (M. Mondolè, Piemonte)*

sedimenti argillosi residuali. La seconda zona può essere limitata inferiormente da un orizzonte carsificato, con circolazione orizzontale di acqua al contatto con i calcari più compatti soggiacenti. In caso di intense precipitazioni l'epicarso rimane saturo per un certo periodo. La *zona di trasferimento* presenta una circolazione saltuaria, in funzione degli apporti atmosferici, ed è caratterizzata da un deflusso che avviene seguendo percorsi verticali o a baionetta, impostati lungo pozzi e meandri o in corrispondenza di fratture e fessure ancora poco carsificate. In mancanza di apporti diretti solo veli acquee ricoprono le pareti delle cavità o delle discontinuità, mentre in seguito ad apporti infiltrativi si instaura una circolazione più o meno abbondante. Progressivamente, scendendo in profondità, il reticolo carsico è in genere più organizzato; incomincia a delinearsi una circolazione perenne (*zona di ruscellamento*) con una serie di collettori più o meno importanti (Foto 6) ed un andamento delle cavità caratterizzato da percorsi meno verticali, con tratti suborizzontali. Legata all'evoluzione temporale del sistema carsico, questa zona può impostarsi in corrispondenza di antichi livelli scavati in regime di pieno carico. Si osservano quindi forre o gallerie che presentano una caratteristica evoluzione da forme di carso profondo (condotte), approfondite o collassate, percorse da correnti perenni. In situazioni stratigrafico-strutturali differenti, in genere caratterizzate dalla presenza di un basamento o di livelli impermeabili localizzati al di sopra della quota delle sorgenti, il flusso sotterraneo è ovviamente condizionato dalla geometria di questi orizzonti: la rete di drenaggio è quindi strutturata con una serie di importanti collettori impostati in corrispondenza di tale limite, come quelle presenti nel Complesso di Piaggia Bella o nei grandi abissi francesi e

pirenaici. In alcuni sistemi la zona non satura può comunicare direttamente con l'area di emergenza per l'assenza o lo spessore limitato della zona satura. In molti massicci si osservano importanti livelli di gallerie a sviluppo prevalentemente orizzontale con morfologie tipiche dei condotti scavati a pieno carico, formatesi in corrispondenza della zona satura. Tali gallerie, che vengono chiamate *fossili* o *inattive*, sono del tutto prive di scorrimento idrico e possono essere localizzate anche a centinaia di metri al di sopra dell'attuale livello di saturazione. Esse sono il risultato della complessa evoluzione dei sistemi carsici, caratterizzati in genere da una serie di approfondimenti progressivi dell'intero reticolo di drenaggio condizionati dai numerosi eventi geodinamici che nel tempo interessano la superficie terrestre. Sollevamenti del massiccio, approfondimenti dei valloni principali legati a fenomeni di erosione fluviale o glaciale, modificano la posizione delle sorgenti e con esse, di conseguenza, la geometria del reticolo carsico. Le gallerie fossili possono presentare le morfologie primarie intatte, essere colmate in parte da depositi terrigeni o concrezioni, mostrare approfondimenti e crolli che obliterano quasi del tutto la loro genesi primaria. I riempimenti, localmente molto estesi, costituiti da sedimenti sabbioso-siltosi o ciottolosi a volte cementati sulle pareti, suggeriscono l'esistenza di più fasi di colmamento e svuotamento, legate alle variazioni climatiche quaternarie. Anche nella zona di trasferimento verticale si riconoscono vie completamente abbandonate dalle acque: numerosi sono i pozzi e meandri o anche estesi settori che ri-

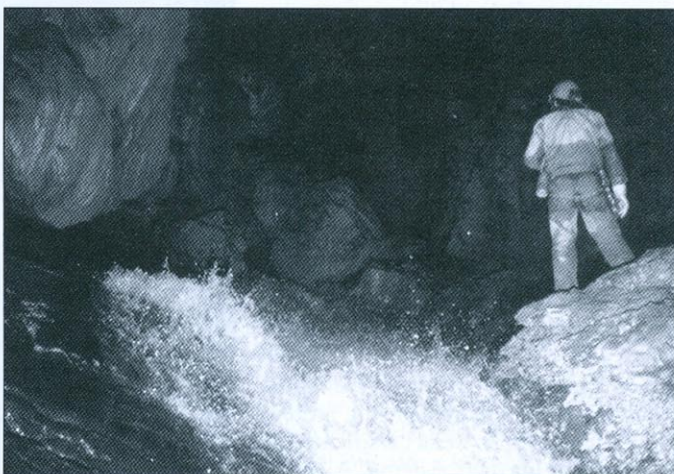


Foto 6: *Importante collettore nella zona di ruscellamento della Grotta Mottera (Piemonte)*



sultano essere totalmente inattivi a causa di fenomeni di cattura da parte di nuove vie di drenaggio. Tali zone (molto interessanti) spesso non vengono esplorate in quanto risultano essere difficilmente individuabili. Spesso durante un'esplorazione sono invece seguite le traiettorie più verticali, che diventano attive anche in seguito ad un violento temporale e che conducono in molti casi a vie strette e poco carsificate, chiamate *ringiovanimenti*.

### 5.3 La zona satura

La *zona satura* caratterizza in genere gli orizzonti più bassi di un sistema carsico e corrisponde a quell'insieme di gallerie, condotte, anche di dimensioni molto ridotte, e fratture totalmente sommerse, in corrispondenza delle quali le acque, in pressione, si spostano con direzioni prevalentemente sub-orizzontali verso l'area delle emergenze. Viene indicata anche con il termine di *zona freatica*, *karst noyé* per i francesi e *phreatic zone* per gli anglosassoni. La superficie che separa questa zona allagata dalla sovrastante è chiamata *superficie piezometrica virtuale o reale*, in base allo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. Nei sistemi caratterizzati da un relativo sviluppo delle cavità carsiche si può parlare di una superficie virtuale, essendo l'acqua in pressione nelle condotte e misurabile unicamente in alcune parti del massiccio (imbocco dei sifoni). Le perdite di carico in tali orizzonti sono in genere molto ridotte o quasi nulle e, di conseguenza, la pendenza di questa superficie è ridottissima, inferiore anche allo 0.02% (Tolman 1937). Durante le piene importanti, invece, la rete carsica non riesce a smaltire l'intero afflusso ed ovviamente la pendenza della superficie piezometrica diventa decisamente più elevata e differenziata da settore a settore (bacini SERSEM di Civita 1975).

Nei sistemi caratterizzati da una elevata fratturazione e da un carsismo ridotto si parla di una superficie piezometrica reale, assimilabile a quella presente negli acquiferi porosi. In tali situazioni le perdite di carico sono maggiori e di conseguenza le pendenze sono più elevate, in genere dell'ordine del 0.2%. La morfologia delle gallerie presenti nella zona satura è caratterizzata da condotte con tipiche sezioni sub-circolari (scavo in regime di pieno carico), a prevalente sviluppo orizzontale. La geometria dell'intero reticolo sommerso e la forma delle gallerie è ovviamente in strettissima relazione con le diverse discontinuità presenti nel massiccio: il flusso idrico seguirà le zone a minori perdite di carico verso la zona sorgiva, con percorsi tortuosi che possono essere caratterizzati anche da sali-scendi con dislivelli di centinaia di metri. L'estensione dell'intero reticolo sommerso è, in genere, in stretta relazione con la posizione topografica delle sorgenti e con la geometria delle rocce impermeabili che limitano lateralmente ed inferiormente l'acquifero carsico. Possono quindi essere presenti dei sistemi con una ridottissima zona satura, costituita da gallerie allagate che funzionano unicamente da vie di drenaggio delle acque (collettori principali impostati in prossimità di limiti di permeabilità), o, al contrario, sistemi costituiti da enormi serbatoi con centinaia di chilometri di reti carsiche sviluppate sia in orizzontale che in verticale (dreni interconnessi sviluppati in strutture lateralmente confinate da importanti soglie di permeabilità). La zona satura è in genere soggetta a notevoli variazioni dei livelli idrici: in occasione di rilevanti apporti infiltrativi le gallerie non riescono a smaltire l'intero flusso proveniente dalla superficie e, di conseguenza, le acque risalgono per diverse decine di metri di dislivello, invadendo anche settori che generalmente sono del tutto privi dello scorrimento idrico. In tali situazioni possono innescarsi notevoli circolazioni d'aria, dovute allo spostamento di ingenti volumi d'acqua, con attivazione in superficie di buchi soffianti. Tale fenomeno è ben noto, durante importanti piene, nel carso triestino e sloveno. In molti abissi, che raggiungono la quota prossima al livello freatico, sono state osservate oscillazioni superiori anche ai 100 m di dislivello (abissi di Trebiciano o delle Alpi Apuane). L'orizzonte compreso tra la quota massima e la quota minima dei livelli idrici viene indicato con la terminologia di *zona epifreatica* o *zona di oscillazione* ed è estremamente importante nello sviluppo della carsificazione profonda di un dato sistema. A causa delle notevoli e continue variazioni tensionali dell'ammasso roccioso (lega-



Foto 7: *Condotta a pieno carico nella zona epifreatica (Ardèches, Francia)*



te alle differenti pressioni idrostatiche) e al mescolamento di acque chimicamente diverse tra loro (acque di neoinfiltrazione, acque profonde ed acque circolanti nel sistema), si esplica in queste zone una notevole azione sia erosiva che corrosiva con un estremo sviluppo della rete carsica (Foto 7). Nella zona saturata si possono individuare due differenti parti che, a seconda delle condizioni geologico-strutturali dell'ammasso roccioso (in particolare dello stato di fratturazione), possono essere più o meno sviluppate e presentare funzionalità differenti. I *collettori principali* si identificano con i condotti carsici maggiori ed interessati da un flusso continuo diretto verso le sorgenti con funzione di vie di drenaggio.

I *sistemi annessi*, costituiti dalla capillare rete delle discontinuità e da condotti più o meno estesi, rappresentano invece la parte più rilevante del sistema con funzione di serbatoi che ospitano importanti riserve idriche e, in assenza di apporti diretti, alimentano i collettori principali. Lo svuotamento di questi sistemi è in genere lento a causa delle perdite di carico cui sono soggetti (notevoli restringimenti della sezione, riempimenti di depositi a permeabilità ridotta). Nei periodi con notevoli apporti essi si saturano raggiungendo livelli più elevati rispetto a quello dei collettori e, al cessare dell'infiltrazione, cedono lentamente i volumi accumulati garantendo al sistema un certo flusso anche dopo periodi piuttosto lunghi in assenza di precipitazioni.

Gli idrogeologi distinguono nella zona saturata due tipi di riserve denominate riserve regolatrici e riserve permanenti. La *riserva regolatrice* è rappresentata dal volume d'acqua sotterranea immagazzinata, caratterizzata da una cessione veloce (nei condotti) ed una lenta (nelle discontinuità) e corrisponde all'escursione annua del livello piezometrico sotto l'effetto della ricarica attiva. La *riserva permanente*, tipica delle strutture a soglia di permeabilità, è costituita dalle acque sotterranee che impregnano le discontinuità o i condotti non interessati dal flusso principale, con movimenti molto lenti e saltuari, dovuti soprattutto alla pressione esercitata dalle masse d'acqua sovrastanti (onde di pressione) che si verificano in occasione di notevoli apporti infiltrativi.

#### 5.4 L'area di emergenza

Nella zona altimetricamente più bassa della struttura carbonatica sono in genere ubicate le emergenze del sistema carsico. In molte situazioni sono presenti diverse sorgenti: quelle topograficamente più basse sono dette *perenni*; altre, a quote maggiori, si attivano solo in occasioni di intensi apporti infiltrativi e sono chiamate *sorgenti di troppopieno* (Foto 8). La posizione dell'area di emergenza è sovente condizionata da particolari situazioni idrostrutturali, legata alla presenza di importanti contatti stratigrafici o strutturali (faglie, sovrascorrimenti) tra rocce a basso grado di permeabilità (basamenti cristallini, depositi fliosciodi, sedimenti argillosi, ecc) e l'acquifero carbonatico. In corrispondenza o in prossimità di tale limite sono in genere ubicate le sorgenti principali.

Nell'area di emergenza, a causa delle numerose situazioni di rapida evoluzione morfologica dei versanti (erosioni fluviali o glaciali, approfondimenti dei livelli di base, ecc.), possono verificarsi locali fenomeni di distensione dell'ammasso roccioso che condizionano la circolazione nelle parti terminali del sistema carsico. In tali settori sono presenti numerose fratture di rilascio (giunti di trazione), parallele ai pendii, che intersecano i condotti principali anche a centinaia di metri dall'uscita. Le acque abbandonano le gallerie principali e, seguendo tali discontinuità, più basse e poco carsificate, tornano alla luce in diverse zone lungo i versanti, ubicate anche a notevoli distanze dall'uscita principale. In occasione di portate rilevanti queste vie non sono in grado di smaltire l'intero flusso: si attivano così le gallerie principali più alte e con luci maggiori. In alcuni massicci questi condotti sbucano in parete, anche a decine di metri d'altezza rispetto al fondovalle, originando delle spettacolari cascate.

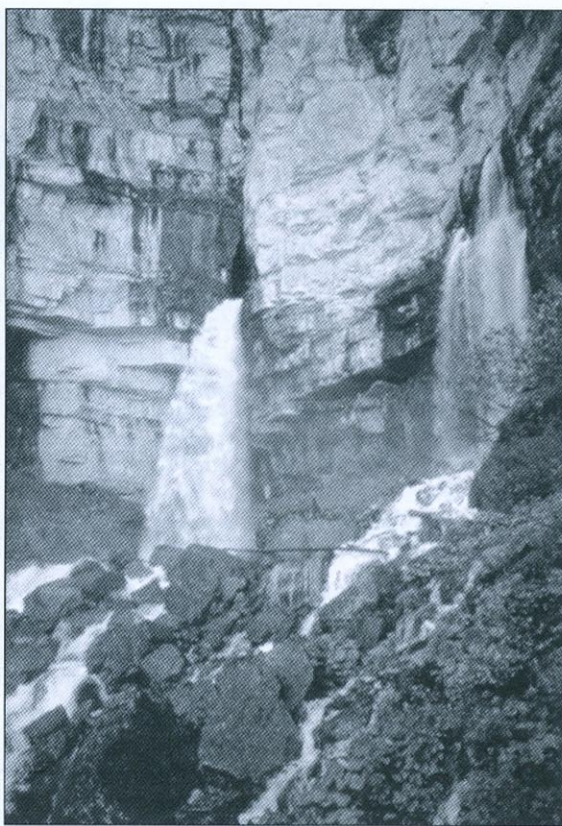


Foto 8: *Sorgenti di troppopieno del sistema carsico del Pesio (Piemonte)*



Nell'area di emergenza non sono ubicate solo le sorgenti attuali condizionate dalla circolazione idrica che tende sempre al massimo risparmio energetico seguendo le vie più basse, generalmente intransitabili. In molti casi, più in alto, anche a centinaia di metri di altezza, è possibile individuare le antiche uscite, ora totalmente abbandonate dalle acque, che permettono di entrare nel cuore del sistema carsico.

Molto utilizzato è il termine di *livello di base* che secondo Margat (1972) costituisce un livello di acque sotterranee o superficiali che limita inferiormente una falda carsica, influenzandone l'altezza della superficie piezometrica.

Si può quindi affermare che il livello di base generale sia costituito dal livello marino, mentre risulta sicuramente più utile indicare le diverse condizioni morfo-strutturali che vincolano il flusso di un sistema carsico. È quindi possibile distinguere:

- un *livello di base carsico*, rappresentato dalla quota della emergenza topograficamente più bassa verso la quale si dirigono le acque del sistema;
- un *livello di base strutturale*, rappresentato dalla quota dell'elemento idrostrutturale meno permeabile più basso che limita o tampona l'acquifero carbonatico;
- un *livello di base locale*, rappresentato dal talweg del corso idrico gerarchicamente più importante nel quale confluiscono le acque carsiche.

## 6. SCHEMATIZZAZIONE DEI SISTEMI CARSIKI

Negli ammassi rocciosi fessurati e carsificati, l'infiltrazione, la circolazione profonda, la portata alle sorgenti e le variazioni dei parametri fisico-chimici delle acque sono pesantemente condizionate dalle caratteristiche fisiche del sistema e dalla geometria del serbatoio. A tali parametri si associano quindi due importantissimi meccanismi che regolano la circolazione delle acque sotterranee: le trasmissioni dei carichi idraulici e la velocità effettiva del flusso. Le *trasmissioni dei carichi idraulici* (dette anche onde di pressione) sono legate alle variazioni dei livelli idrici, nei diversi settori di un sistema, e condizionano pesantemente la portata delle sorgenti e temporanei cambiamenti della mineralizzazione delle acque (fenomeni di pistonaggio). La *velocità del flusso idrico*, che corrisponde al trasferimento effettivo dell'acqua, condiziona, invece, le caratteristiche geochimiche delle acque emergenti alle sorgenti e, in alcuni sistemi o in parte di essi, anche i valori della portata.

Un acquifero in rocce carbonatiche è caratterizzato da una estrema eterogeneità del reticolo di flusso (Fig. 3), costituito da zone altamente permeabili che occupano in genere un volume molto esiguo (cavità carsiche



Fig. 3: Schematizzazione di un sistema carsico: le cavità di grosse dimensioni occupano un volume esiguo rispetto i settori dell'ammasso roccioso a permeabilità molto più ridotta



di grosse dimensioni) ed ampi settori dell'ammasso roccioso a permeabilità molto più ridotta (fratture, fessure ed altre discontinuità poco carsificate). I condotti carsici, in base alla loro posizione ed organizzazione in seno all'acquifero, possono costituire dei percorsi preferenziali del flusso sotterraneo chiamati *collettori principali o secondari* o rappresentare estesi e complessi serbatoi denominati *dreni interdipendenti* della zona saturata.

I primi sono percorsi da veri e propri fiumi sotterranei, come quelli presenti nel sistema Marguareis-Foce, con portate molto variabili che, in caso di abbondanti precipitazioni, nell'arco anche di poche ore, possono trasformarsi in impetuosi e pericolosi corsi d'acqua. I secondi, simili alla complessa rete di gallerie freatiche del sistema Holloch, in Svizzera, costituiscono dei grandi serbatoi, con notevoli variazioni dei livelli idrici, condizionati dagli apporti esterni e che smaltiscono i volumi accumulati in tempi piuttosto lunghi.

I complessi reticoli di fratture e delle altre discontinuità, collegati alla rete di flusso principale, costituiscono le zone meno permeabili di un sistema carsico nei quali le acque sotterranee si spostano con velocità molto ridotta. Essi hanno una funzione estremamente importante nella circolazione sotterranea poiché ospitano importanti riserve idriche che alimentano costantemente la rete di drenaggio principale anche in seguito a periodi particolarmente siccitosi. Alcuni autori hanno descritto e differenziato il funzionamento dei diversi sistemi carsici, sulla base dell'architettura del reticolo drenante, della presenza di grossi collettori o di estesi reticoli di discontinuità poco carsificate e della risposta idrodinamica conseguente. Mangin (1984), analizzando le portate di numerose sorgenti carsiche riconosce diversi sistemi rappresentativi, distinti sulla base delle differenti risposte ad un evento infiltrativo. Forti (1998) suddivide gli acquiferi carsici in *omogenei, parzialmente inomogenei ed inomogenei*, caratterizzati da un diverso comportamento sia idrodinamico che geochimico.

Civita et al. (1992), sulla base dei dati forniti dal monitoraggio in continuo di numerosi sistemi campione appositamente attrezzati, riconoscono tre diversi modelli concettuali di base denominati: *sistemi con rete a dreno dominante, sistemi con rete a dreni interdipendenti, sistemi con rete a circolazione dispersiva* sinteticamente descritti di seguito.

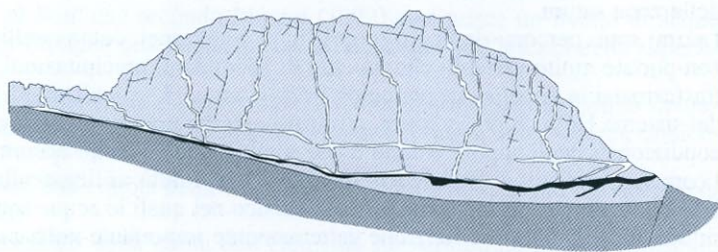
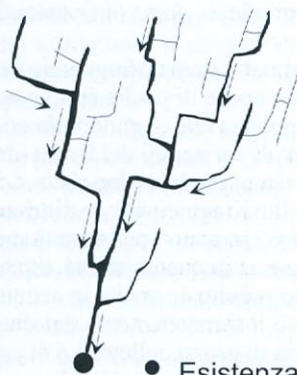
Occorre evidenziare come spesso la circolazione negli acquiferi carbonatici sia, in genere, molto più complessa rispetto a quella sintetizzata in questi tre modelli. Si possono riconoscere infatti situazioni intermedie dove, all'interno del medesimo sistema, coesistono più tipologie della rete di drenaggio, sviluppate sia un senso verticale che orizzontale. In ogni caso, nella descrizione di un sistema è sempre possibile e utile far riferimento ad uno dei tre modelli concettuali, essendo le caratteristiche idrodinamiche (andamento nel tempo delle portate) e idrogeochimiche (variazioni chimico-fisiche delle acque) intimamente legate alla tipologia di flusso prevalente.

### 6.1 Sistemi con rete a dreno dominante

Sono sviluppati prevalentemente in ammassi rocciosi compatti, con una fratturazione non elevata ma interessata da una notevole carsificazione. La rete di drenaggio è impostata prevalentemente in grossi collettori, in alcuni massicci ubicata in prossimità di un substrato impermeabile, mentre secondario è l'apporto delle discontinuità poco permeabili. Manca una zona saturata vera e propria mentre sono generalmente presenti nella parte più bassa dell'acquifero tratti completamente allagati (sifoni), più o meno lunghi, che costituiscono unicamente una via di transito delle acque sotterranee. La rete di flusso è ben organizzata, con una serie di collettori principali e secondari in grado di smaltire rapidamente gli apporti infiltrativi (Fig. 4). Con portate elevate, sono state misurate velocità delle acque superiori ai 1000 metri all'ora. Le variazioni di portata di questi fiumi sotterranei sono estremamente marcate, a volte superiori a tre ordini di grandezza. Le sorgenti sono quindi caratterizzate da un indice di variabilità molto elevato con magre pronunciate e piene improvvise e violente. Tali sistemi rispondono quindi in modo estremamente rapido agli input infiltrativi con un comportamento molto simile a quello di un corso d'acqua superficiale a regime torrentizio. In occasione di importanti eventi di piena, si osserva alle sorgenti una repentina diminuzione della mineralizzazione, per l'arrivo delle acque di neoinfiltrazione che attraversano rapidamente l'intero circuito e sostituiscono in tempi relativamente brevi le acque presenti nell'acquifero. In tali periodi è possibile che si verifichi un sensibile aumento della carica batterica o del tenore in nitriti e nitrati legato all'intenso dilavamento della materia organica presente nelle aree assorbenti. Le emergenze di questi sistemi sono generalmente localizzate in prossimità di un contatto poco inclinato tra rocce impermeabili e l'acquifero carbonatico, o in corrispondenza di ampi condotti carsici ad andamento prevalentemente orizzontale che favoriscono un rapido drenaggio delle acque sotterranee. In molti casi è quindi possibile accedere a gran parte del sistema sotterraneo attraverso le cavità percorse da questi corsi d'acqua. Sono molti gli esempi di sistemi carsici che rispecchiano tale funzionamento, essendo questi i più facilmente esplorabili e quindi maggiormente conosciuti. Tra i più rappresentativi possiamo citare i sistemi del Piemonte meridionale che alimentano le sorgenti del Pis del Pesio, della Foce, della Mottera e delle Vene-Fuse. Anche i sistemi del Timavo e della Codula di Luna sembrano in parte rispecchiare il funzionamento di un sistema a dreno dominante.



## RETE A DRENO DOMINANTE



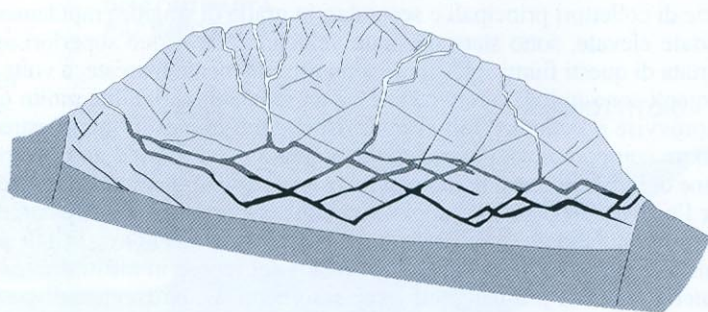
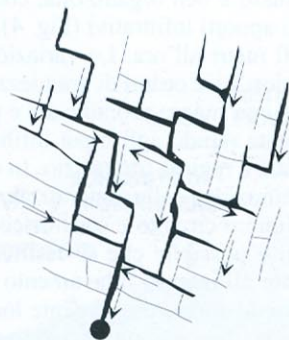
- Esistenza di importanti vie di drenaggio preferenziali
- Organizzazione della rete di drenaggio
- Condotti sifonanti ma assenza di una zona satura tradizionale

Fig. 4: Planimetria e sezione di un sistema a dreno dominante

## 6.2 Sistemi con rete a dreni interdipendenti

Sono presenti in ammassi rocciosi con fratturazione ed altre discontinuità localmente piuttosto estese e carsificate. La zona non satura è caratterizzata in genere dalla assenza di importanti corsi d'acqua (collettori principali) mentre possono essere particolarmente numerose le cavità ad andamento prevalentemente verticale (i classici abissi). Queste grotte sono semiattive (con acqua circolante solo in occasione di importanti precipitazioni) e costituiscono delle vie privilegiate del deflusso sotterraneo, tra loro indipendenti, verso le zone più profonde dell'acquifero. La carsificazione della zona non satura può essere anche piuttosto ridotta, con assenza di grotte verticali percorribili dagli speleologi ed una circolazione idrica impostata prevalentemente su reticoli di fratture poco allargate. In altri sistemi sono presenti, invece, estesi reticoli di condotti carsici totalmente asciutti (gallerie fossili), ad andamento prevalentemente orizzontale, che testimoniano

## RETE A DRENI INTERDIPENDENTI



- Presenza di numerose vie di drenaggio interdipendenti
- Circolazione semidispersiva nella rete di condotti e fratture
- Esistenza di zone sature con più "sersem" semidipendenti

Fig. 5: Planimetria e sezione di un sistema a dreni interdipendenti



l'esistenza di antichi livelli completamente sommersi sviluppatasi in condizioni morfologiche ed idrogeologiche del massiccio molto differenti da quelle attuali. Successivi approfondimenti del reticolo di drenaggio superficiale hanno pesantemente condizionato la circolazione sotterranea del sistema, che ha del tutto abbandonato queste gallerie per scorrere ora anche centinaia di metri più in basso. In profondità, generalmente ad una quota prossima a quella delle sorgenti, è invece presente una zona allagata (zona satura) molto estesa e caratterizzata da una serie di condotti e fratture variamente carsificate, collegate fra loro, che costituiscono un importante serbatoio con cospicue riserve idrogeologiche (Fig. 5). In tale zona, l'altezza sul livello del mare dei livelli idrici, denominata anche superficie piezometrica, risulta essere piuttosto diversa da settore a settore. Questi settori possono essere soggetti a notevoli variazioni del livello, superiori anche al centinaio di metri, legate all'arrivo di acque provenienti dalla superficie (dopo abbondanti precipitazioni), ed all'impossibilità della rete carsica di smaltire rapidamente l'ingente volume idrico. In alcune grandi cavità, come l'Hoëllloch, in Svizzera (185 km di sviluppo), solo in alcuni periodi (autunno-inverno) è possibile accedere alle gallerie sviluppate nella parte bassa del sistema in quanto decine di chilometri di condotti sono per diversi mesi l'anno totalmente invasi dalle acque in seguito alle piene primaverili. Le portate di questi sistemi, alle sorgenti, presentano nel tempo variazioni più contenute ed una risposta più ritardata rispetto a quelle del modello a dreno dominante, sebbene l'idrogramma mostri anche in questo caso picchi di piena notevoli in occasione dei principali eventi infiltrativi. La curva di svuotamento presenta poi una progressiva diminuzione della portata che può mantenersi con valori moderatamente elevati anche per lunghi periodi, a testimonianza dell'importanza delle riserve regolatrici presenti nella zona satura e della discreta capacità di autoregolazione del sistema acquifero. Gli indicatori idrogeochimici alle emergenze mostrano, durante le piene, temporanei aumenti della mineralizzazione in seguito a fenomeni di pistonaggio legati alle modalità di messa in carico della rete di drenaggio. In tali periodi gli importanti volumi provenienti dalla superficie, causano la rimobilizzazione di acque molto mineralizzate presenti nei settori meno permeabili del sistema. Le sorgenti alimentate da questi sistemi sono generalmente di tipo valclusiano, con l'esistenza di complessi settori allagati, lateralmente confinati da rocce impermeabili o legati a situazioni morfologiche che condizionano la totale saturazione di questi settori. Sono gli speleosub che esplorano queste cavità sifonanti che, spesso, raggiungono profondità superiori alle centinaia di metri e sviluppi di diversi chilometri.

Sistemi carsici simili a quelli descritti alimentano le grandi sorgenti dell'Oliero, del Livenza, alcune delle principali sorgenti delle Alpi Apuane, le sorgenti del Calore e del Tanagro ai piedi del massiccio degli Alburni.

### 6.3 Sistemi con rete a circolazione dispersiva

Interessano gli ammassi rocciosi carbonatici caratterizzati da una intensa fratturazione, anche a piccola

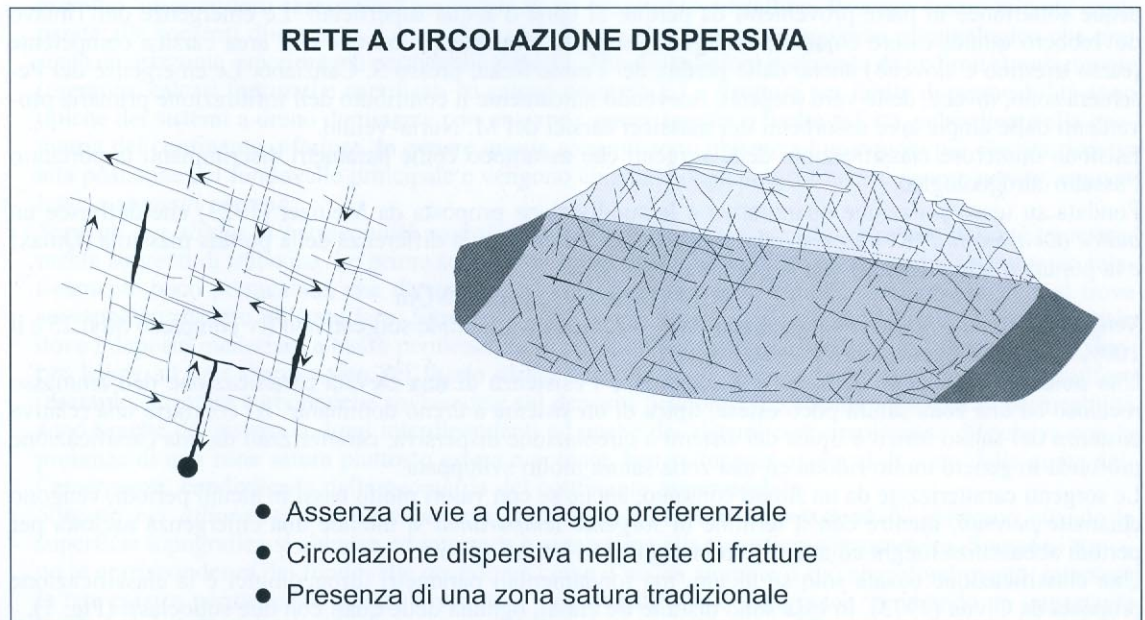


Fig. 6: Planimetria e sezione di un sistema a circolazione dispersiva



scala, con numerose famiglie di discontinuità tra loro intimamente collegate, tanto da rendere la circolazione profonda simile a quella di un acquifero poroso in ghiaie e sabbie. In questi sistemi non esistono collettori, ma solo una complessa rete di flusso, diffusa ed omogenea nella miriade di discontinuità dell'ammasso roccioso, caratterizzata da una superficie piezometrica abbastanza regolare (Fig. 6). Possono essere presenti, nelle diverse parti dell'acquifero, anche cavità di un certo sviluppo che si sono formate per favorevoli condizioni locali, ma che non alterano le modalità del flusso idrico. Le acque si spostano molto lentamente nell'ammasso roccioso, a seguito della permeabilità ridotta della rete di drenaggio, con velocità inferiori anche ad 1 metro al giorno. Alle sorgenti, alimentate da acquiferi di ampie dimensioni, giungono quindi acque piuttosto vecchie, infiltratesi anche diverse decine di anni prima. La geometria delle rocce impermeabili che limitano lateralmente il massiccio carbonatico condiziona il flusso sotterraneo verso la zona sorgiva. Le portate alle emergenze mostrano variazioni molto contenute nel tempo, con incrementi non correlabili con i singoli eventi infiltrativi ed in genere sfasati di diversi mesi rispetto a questi. La mineralizzazione di queste acque è ovviamente piuttosto elevata, a causa della lenta circolazione in seno all'acquifero, con una notevole costanza temporale dei valori e blande variazioni non sempre legate all'andamento climatico annuale. Generalmente si osservano unicamente dei moderati cambiamenti a carattere stagionale (fenomeno di omogeneizzazione del segnale chimico). Le sorgenti, in genere caratterizzate da diverse polle che alimentano piccoli laghi o zone umide, sono situate nelle zone più basse dell'acquifero, in prossimità del contatto con le rocce impermeabili di contorno. Nel settore appenninico meridionale sono numerosi gli esempi di importanti emergenze ubicate in corrispondenza di esigui affioramenti calcarei, lateralmente confinati da sedimenti impermeabili, ed alimentate da vaste aree carsiche poste anche a centinaia di chilometri di distanza. Queste sorgenti, con valori massimi che in genere vengono raggiunti nei periodi estivi, quando c'è maggior richiesta di acqua, sono spesso captate ad uso idropotabile e servono importanti acquedotti che distribuiscono questa preziosa risorsa anche a centinaia di chilometri di distanza (acquedotto Pugliese, del Serino, del Comprensorio Romano). Sono i sistemi con rete a circolazione dispersiva che alimentano le grandi sorgenti appenniniche come quelle del Peschiera, del Gari, del Fibreno e di Caposele.

## 7. LE SORGENTI

Per *sorgente* si intende un punto o una zona più o meno ristretta della superficie terrestre, in corrispondenza della quale si verifica la venuta a giorno di acque sotterranee per cause del tutto naturali connesse con l'assetto idrogeologico regionale e locale (Civita 1973). Al termine di sorgente si aggiunge la qualificazione "normale" per distinguere le acque sorgive a temperatura e chimismo normali da quelle termali (a temperatura elevata) e da quelle minerali (con chimismo qualitativamente e/o quantitativamente particolare). Sinonimo di sorgente è il termine *emergenza* mentre con *risorgente* o *risorgenza* si intende la venuta a giorno di acque sotterranee in parte provenienti da perdite di corsi d'acqua superficiali. Le emergenze del Timavo dovrebbero quindi essere chiamate risorgenti, essendo alimentate oltre che dall'area carsica competente (carso triestino e sloveno) anche dalle perdite del Fiume Reka, presso S. Canziano. Le emergenze del Peschiera sono, invece, delle vere sorgenti, ricevendo unicamente il contributo dell'infiltrazione primaria provenienti dalle ampie aree assorbenti dei massicci carsici del M. Nuria-Velino.

Esistono numerose classificazioni delle sorgenti che assumono come parametri discriminanti la portata o l'assetto idrogeologico.

Fondata su una valutazione quantitativa è la suddivisione proposta da Meinzer (1923) che definisce un *indice di variabilità* ( $R_v$ ) espresso dal rapporto percentuale tra la differenza della portata massima ( $Q_{max}$ ) e la portata minima ( $Q_{min}$ ) con la portata media ( $Q_m$ ):

$$R_v = (Q_{max} - Q_{min}) * 100 / Q_m$$

Vengono definite costanti le sorgenti con  $R_v \leq 25\%$ , subvariabili le sorgenti con  $R_v$  compreso tra il 25 e il 100% e variabili quelle con  $R_v > 100\%$ .

Una notevole variazione della portata suggerisce l'esistenza di una elevata carsificazione dell'ammasso roccioso ed una zona satura poco estesa, tipica di un sistema a dreno dominante. Al contrario una relativa costanza del flusso idrico è tipica dei sistemi a circolazione dispersiva, caratterizzati da una carsificazione profonda in genere molto ridotta ed una zona satura molto sviluppata.

Le sorgenti caratterizzate da un flusso continuo, anche se con valori molto bassi in alcuni periodi, vengono chiamate *perenni*, mentre con il termine di *sorgente temporanea* si intende una emergenza asciutta per periodi abbastanza lunghi ed attiva solo in seguito ad intensi apporti.

Una classificazione basata solo su alcuni, ma fondamentali parametri idrogeologici è la classificazione proposta da Civita (1973). In essa sono distinte tre classi, ognuna delle quali con due sottoclassi (Fig. 7).

- *Sorgenti per limite di permeabilità definito o indefinito*. Le prime sono condizionate da un limite con giacitura sub-orizzontale tra due complessi idrogeologici a permeabilità relativa differente come, ad



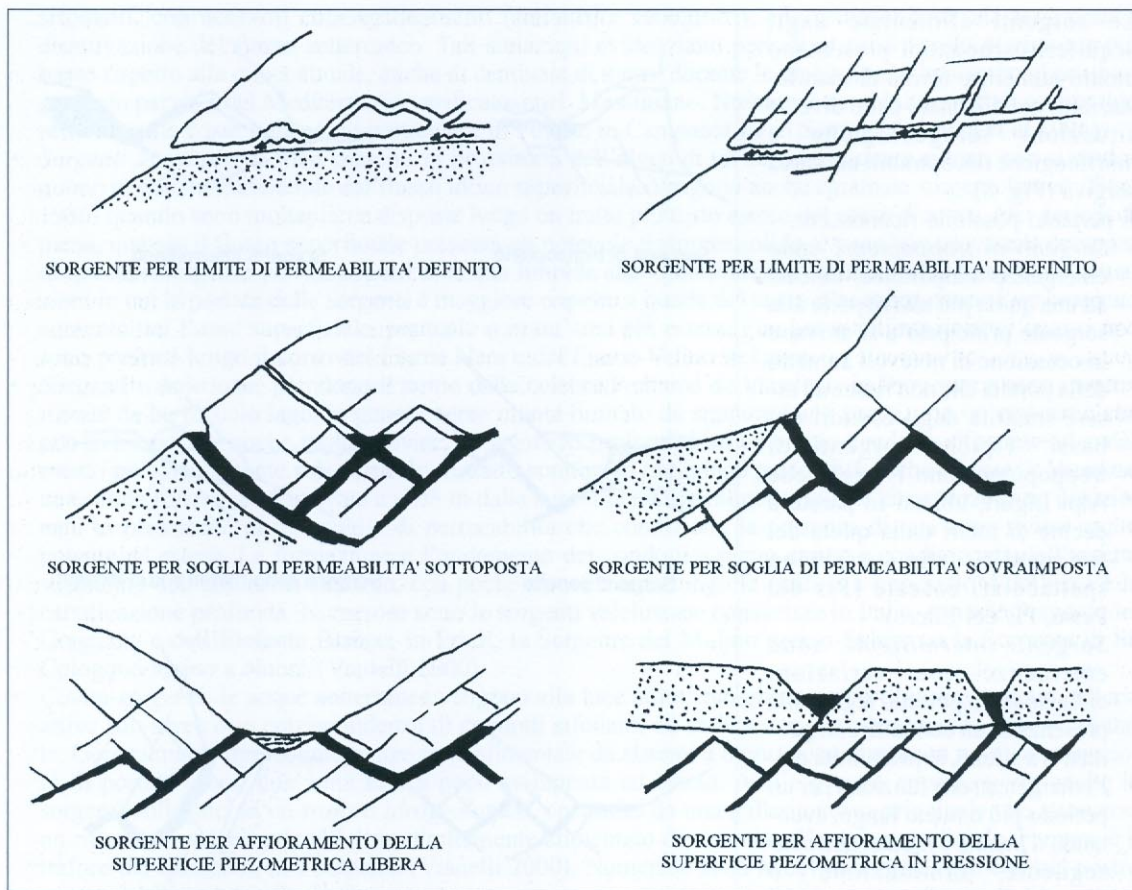


Fig. 7: Sezioni schematiche delle diverse tipologie di sorgenti (da Civita 1973), in bianco l'acquifero carbonatico, in puntinato i depositi a permeabilità ridotta

esempio, un acquifero carbonatico poggiante su un basamento cristallino. Possono essere in parte equiparate alle sorgenti di contatto. Le seconde sono legate al medesimo complesso idrogeologico che presenta un orizzonte superiore più permeabile rispetto al livello inferiore e separato da un limite transizionale (esempio: calcari fratturati e carsificati su calcari compatti). Le strutture per limite di permeabilità sono tipiche dei sistemi a dreno dominante con una zona satura assente o molto ridotta, subordinata alla geometria del confinante inferiore. In genere queste sorgenti sono ubicate ad una quota più elevata rispetto alla posizione del fondovalle principale e vengono chiamate dagli autori francesi *source percée*, equivalente a *sorgenti sospese*.

- *Sorgenti per soglia di permeabilità sovrainposta o sottoposta*. In passato venivano definite genericamente sorgenti di trabocco. Le prime sono poste in corrispondenza di un complesso idrogeologico relativamente poco permeabile, che determina un tamponamento della circolazione sotterranea e si trova sovrapposto rispetto all'acquifero. Situazioni simili sono tipiche dei carsi dell'Appennino meridionale dove i depositi quaternari a bassa permeabilità ricoprono l'acquifero carbonatico. Le seconde sono sempre legate ad uno sbarramento del flusso idrico con una soglia sub-verticale sottoposta all'acquifero (esempio: strutture carbonatiche sovrascorse sui depositi flioscoidi). Le strutture a soglia di permeabilità sono tipiche dei sistemi a dreni interdipendenti ed anche dei sistemi con circolazione dispersiva con la presenza di una zona satura piuttosto estesa e potente, ben sviluppata anche al di sotto della quota dell'emergenza, condizionata dalla geometria del confinante impermeabile.
- *Sorgenti per affioramento della superficie piezometrica libera o in pressione*. Si generano quando la superficie topografica si abbassa ed interseca o si avvicina alla superficie piezometrica. Spesso si trovano in corrispondenza dei fondovalle quando un corso d'acqua, durante il suo approfondimento, interseca la rete carsica permettendo quindi la venuta a giorno delle acque sotterranee, generando un importante fronte sorgivo. Emergenze che presentano tali situazioni interessano indifferentemente le diverse tipologie dei sistemi carsici precedentemente descritte.



Le sorgenti alimentate dagli acquiferi carbonatici presentano inoltre numerose forme di manifestazioni, condizionate dalle diverse situazioni idrogeologiche e morfologiche riscontrabili nell'area sorgiva (Fig. 8).

È pertanto possibile riconoscere:

- **Sorgenti di troppopieno:** sono emergenze temporanee, ubicate ad una quota più alta rispetto alla sorgente principale e si attivano in occasione di notevoli aumenti della portata che non riesce ad essere smaltita dagli esuttori più bassi. Tipiche sorgenti di troppopieno sono i "pis" delle Alpi Liguri, ubicati in parete a decine di metri dalla quota del fondovalle, che originano spettacolari cascate (Pis del Pesio, Pis del Ellero).
- **Sorgenti intermittenti:** sono emergenze con variazioni cicliche della portata, legata alla presenza di un condotto con geometria a sifone, in prossimità dell'emergenza, che funziona per un periodo più o meno lungo, svuotando il bacino a monte, con conseguente diminuzione o disattivazione alla sorgente del flusso sotterraneo. Progressivamente, il condotto si ricolma, innescando nuovamente il sifone. L'emergenza intermittente italiana più conosciuta è la sorgente dell'Acqua Santa, in provincia di Trento.
- **Sorgenti sepolte:** sono emergenze legate ad una particolare situazione idrostrutturale dell'area sorgiva dove i depositi alluvionali, caratterizzati da valori della permeabilità molto variabili, ricoprono parzialmente e marginalmente l'acquifero carbonatico. Nella condizione in cui l'acquifero è coperto da una coltre più o meno potente di sedimenti altamente permeabili, si determina un travaso di acque sotterranee tra i calcari e le alluvioni. In superficie, sono quindi presenti solo piccole venute d'acqua o aree del tutto asciutte quando il livello piezometrico è ubicato a profondità maggiore. Simili situazioni si trovano ai piedi dell'Appennino campano e sono state descritte da Civita et al. (1975). Quando l'acquifero carbonatico è invece coperto da depositi poco permeabili, le acque risalgono in superficie attraverso particolari pseudocondotti, dando luogo ad emergenze con portate relativamente costanti, legate all'effetto di laminazione generato dall'acquifero in pressione (Civita et al. 1991). Sorgenti con simile assetto si trovano nel Piemonte meridionale, presso Beinette e nel Varesotto (Sorgenti di Luvinata e Barasso).
- **Sorgenti sottomarine o sub-lacustri:** sono emergenze ubicate sul fondale marino o lacustre, legate alla variazione del livello di base in seguito ad innalzamento dei livelli idrici superficiali o a fenomeni di subsidenza nell'area sorgiva. Numerose sorgenti sottomarine sono collegate ad ampi condotti carsici

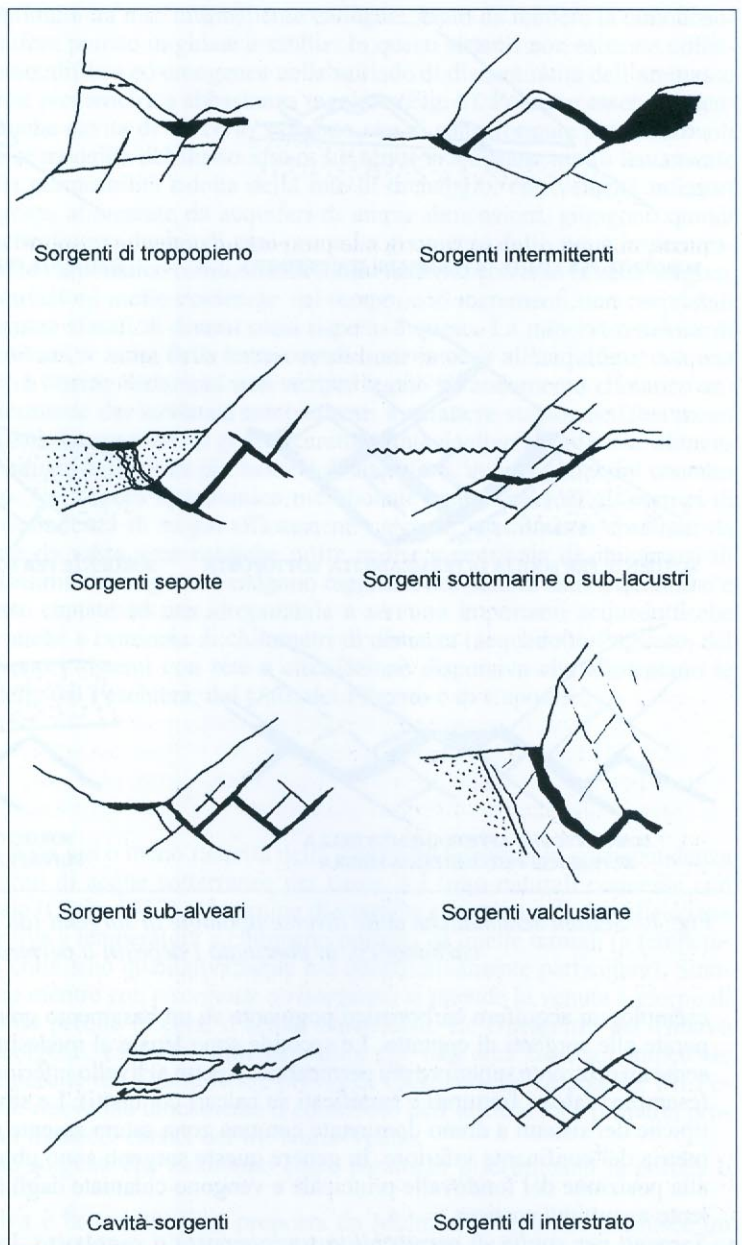


Fig. 8: Sezioni schematiche delle diverse forme di manifestazioni di sorgenti carsiche



sifonanti, con notevoli concrezionamenti (stalattiti e stalagmiti), che testimoniano una temporanea disattivazione del flusso sotterraneo. Tali situazioni evidenziano periodi in cui il livello marino era più basso rispetto alla quota attuale, anche di centinaia di metri, durante le glaciazioni o in seguito al prosciugamento parziale del Mediterraneo verificatosi nel Messiniano. Numerose sono le sorgenti di questo tipo presenti sulle coste italiane, in particolare in Puglia, in Campania ed in Sardegna (Alvisi et al. 1994).

- *Sorgenti in subalveo*: sono presenti in prossimità dell'alveo di un corso d'acqua e spesso non si distinguono in quanto mascherate dal flusso idrico superficiale. Vengono anche chiamate sorgenti lineari (Boni 1986) quando sono molteplici e disposte lungo un tratto piuttosto esteso del corso d'acqua. Nei periodi di piena, quando il flusso superficiale presenta un notevole trasporto solido, è possibile rilevare la presenza di queste emergenze per gli apporti di acqua limpida che i pescatori conoscono molto bene. Nelle situazioni in cui la portata delle sorgenti è maggiore rispetto a quella del corso d'acqua si osserva un cospicuo aumento del flusso superficiale, puntuale o in un'area più estesa. Famose manifestazioni di questo tipo sono presenti lungo il corso del Fiume Nera e del Fiume Velino in Lazio.
- *Sorgenti valclusiane*: prendono il nome dalla celebre Fontaine de Vaucluse, in Provenza e sono caratterizzate da un piccolo lago, in genere verso monte limitato da strapiombanti pareti, con un emissario che può avere portate anche molto elevate, collegato in profondità ad un ampio condotto sifonante ad andamento prevalentemente sub-verticale. Il tratto sommerso raggiunge profondità anche elevate: a Vaucluse una sonda subacquea è arrivata a -308 m dalla superficie. Generalmente queste emergenze sono posizionate in prossimità di una soglia di permeabilità che condiziona la presenza di una zona satura molto potente ed estesa. La formazione e l'andamento dei condotti a pieno carico è condizionata dall'assetto strutturale dell'ammasso calcareo, con poche discontinuità lungo le quali si è impostato il deflusso e la carsificazione profonda. Numerose sono le sorgenti valclusiane conosciute in Italia, come le Sorgenti del Gorgazzo e dell'Elefante Bianco, in Friuli, la Sorgente del Mulino presso Salerno o la Sorgente di Su Cologone vicino a Nuoro (Vianelli 2000).
- *Cavità-sorgenti*: le acque sotterranee vengono alla luce attraverso grotte percorribili lungo delle gallerie attive sub-aeree o in corrispondenza di condotti sifonanti ad andamento prevalentemente sub-orizzontale. Generalmente queste emergenze sono alimentate da sistemi a dreno dominante, con notevoli variazioni di portata e con una zona satura poco sviluppata ed estesa. A tale gruppo appartengono anche le sorgenti collegate ad un *traforo idrogeologico*, costituito da una galleria attiva principale che attraversa un rilievo da un versante all'altro, direttamente alimentato da un corso d'acqua superficiale. Famoso è il traforo del Bussento, in Campania (Vianelli 2000). Numerose sono le cavità-sorgenti presenti nel nostro paese, dal Piemonte alla Sicilia.
- *Sorgenti di interstrato*: sono emergenze generalmente non puntuali ed interessanti un'ampia zona sorgiva, che vengono alla luce attraverso innumerevoli discontinuità dell'ammasso roccioso (fratture e giunti di strato), poco carsificate. Spesso sono coperte da detrito più o meno grossolano o da sedimenti fini depositatisi sul fondo di depressioni con rigogliosa vegetazione. Le portate sono piuttosto costanti. Queste sorgenti sono alimentate anche da sistemi molto carsificati le cui acque sotterranee, in prossimità della venuta a giorno, abbandonano i grossi condotti carsici e percorrono una serie di fratture poco carsificate, più basse, legate a fattori di decompressione del versante (Balbiano et al. 1989).

## 8. LE PIENE

Numerosi sono i rischi di incidenti, in grotta, causati dalle piene, che, per fortuna, spesso si concludono solo con notevoli ritardi nell'uscita dalla cavità, legati a lunghe attese alla base dei pozzi o in fondo a gallerie, in settori asciutti, ad aspettare la diminuzione dei livelli idrici. Ovviamente in simili situazioni è l'esperienza e la conoscenza della grotta che ci permettono di evitare tragiche conseguenze. Purtroppo in alcune situazioni, in parte legate all'ignoranza del problema, ma spesso per imprudenza, si sono verificati incidenti mortali come quelli di Roncobello, in Lombardia, dell'Abisso Gortani, in Canin, o al *Gouffre des Trois* al Marguareis, dove gli esploratori sono stati sorpresi da importanti piene durante la risalita di tratti verticali.

Per gli speleologi è quindi molto utile conoscere i meccanismi con cui si genera un simile fenomeno ed i pericoli che ne conseguono. Le piene sono legate ad un aumento della portata di un corso d'acqua sotterraneo e all'attivazione di flussi idrici in settori solitamente asciutti, in conseguenza di temporanei ed abbondanti apporti che giungono dalla superficie (piogge, scioglimento neve, contributi di corsi d'acqua superficiali). L'andamento nel tempo della portata alle sorgenti è solo in parte legato all'intensità dell'alimentazione, mentre è pesantemente condizionato dallo stato di carsificazione dell'ammasso roccioso.

Il periodo intercorrente tra l'inizio della precipitazione e l'aumento del flusso sotterraneo è legato sia alla velocità dell'acqua di neoinfiltrazione, sia all'effetto della trasmissione delle pressioni idrauliche nelle fratture o nei condotti a pieno carico (Civita et al. 1999). In tali settori, in occasione di apporti dalla superficie, si verificano aumenti del livello idrico con una conseguente risposta, quasi immediata, anche a chilometri di distanza. I notevoli aumenti della portata che si riscontrano alle sorgenti, a poche ore dall'inizio della preci-



pitazione, quando occorrono tempi ben più lunghi per l'arrivo dell'acqua dalle aree di alimentazione, sono legati a tale fenomeno.

Anche lo stato di saturazione dei diversi orizzonti di un sistema carsico condiziona il comportamento idrodinamico di un circuito carsico che può essere, a parità di apporti, molto differente da un periodo all'altro. Un temporale, seguente un periodo particolarmente piovoso, può innescare una piena abbondante, mentre la portata rimane invariata in seguito ad un evento simile, ma successivo ad un periodo secco, essendo gran parte degli apporti trattenuti dal suolo e dal reticolo delle fratture asciutte. Un

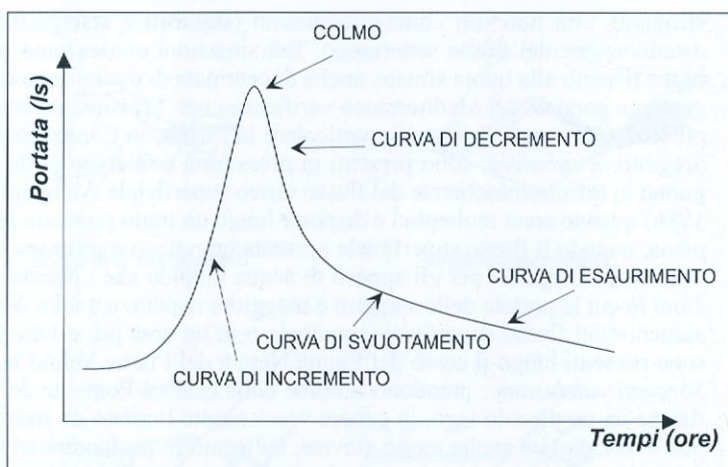


Fig. 9: Un evento di piena e le diverse suddivisioni

evento di piena è formato da diverse parti (Fig. 9) che vengono così distinte:

- una *curva di incremento*, che caratterizza la prima fase della piena, con un aumento della portata ed una risposta molto differenziata e legata ad una innumerevole serie di fattori, tra cui l'intensità oraria degli apporti, la copertura del carso (rallenta il processo infiltrativo), la presenza di inghiottitoi o vaste superfici di carso nudo (favoriscono una rapida infiltrazione), la tipologia della rete di drenaggio;
- il *colmo*, che evidenzia il raggiungimento della portata massima, in genere con un picco di breve durata nei settori più prossimi alla superficie ed invece con una curva più dolce nei settori più profondi, per l'arrivo differenziato dell'acqua dalle diverse parti del sistema;
- una *curva di svuotamento*, che sottolinea la progressiva diminuzione della portata, nella quale è in genere possibile distinguere un primo tratto con una discesa più marcata chiamata *curva di decremento* seguito da una decrescita più lenta detta *curva di esaurimento*. La prima parte della curva è legata allo svuotamento dei condotti principali e minori, mentre la seconda parte all'apporto delle fessure e dei settori a permeabilità più ridotta. Si riconosce anche una prima fase in cui il sistema è ancora condizionato dagli apporti infiltrativi, ed un secondo periodo non più influenzato dalle precipitazioni, con una decrescita molto più dolce.

### 8.1 La piena nelle diverse zone di un sistema

Nelle diverse parti funzionali in cui si suddivide un sistema carsico le piene presentano comportamenti e modalità di sviluppo molto differenti (Fig. 10) e di conseguenza diversi rischi per gli speleologi.

- Nella *zona di trasferimento* il flusso avviene lungo pozzi e meandri; in mancanza di apporti, la poca acqua presente si sposta lentamente con veli continui o gocciolii lungo i tratti verticali. In seguito a precipitazioni abbondanti queste vie diventano attive e percorse da corsi d'acqua che, anche se con portate limitate, si scaricano nei pozzi trascinando, in alcuni casi, detriti di discreta pezzatura. Il pericolo per gli speleologi, quando sorpresi in un salto verticale dall'arrivo della piena, è legato soprattutto a problemi di ipotermia, ed una cascata con una portata di pochi litri al secondo, che investe direttamente una persona, costituisce spesso un rischio mortale. Particolarmente insidiose sono le cavità ad andamento verticale, direttamente collegate ad importanti inghiottitoi, come gran parte degli abissi presenti sugli Alburni o in Cilento, dove ingenti volumi d'acqua si possono scaricare lungo pozzi e meandri anche in seguito ad un singolo temporale estivo. In queste grotte si nota una impressionante quantità di materiale fluitato dalla superficie, in particolare tronchi d'albero e fogliame, che sono stati depositati anche in posti molto distanti dalle direttrici ideali del flusso sotterraneo. Nei corsi di alta quota o nelle zone con ampie superfici di carso scoperto, l'infiltrazione è diffusa e dispersa per cui, nei settori più superficiali, i volumi idrici defluenti sui pozzi, risultano essere piuttosto ridotti. In ogni caso, nei sistemi altamente carsificati, anche in occasione di un violento temporale estivo, le vie di drenaggio si attivano in tempi rapidissimi; nei settori più superficiali (a 100 m dalla superficie) la piena può arrivare anche in soli 30 minuti dall'inizio della precipitazione, mentre in profondità sono stati osservati repentini aumenti del flusso a poche ore dall'inizio del fenomeno piovoso. Il pericolo maggiore è quindi durante la risalita di una lunga verticale: la piena è improvvisa e nell'arco di alcuni minuti un pozzo asciutto o con qualche stillicidio può essere percorso da una violenta cascata. Si può quindi capire l'importanza dell'armo dei tratti verticali, al di fuori della linea dell'acqua. In alcune zone l'onda di piena è preceduta da un notevole aumento della corrente d'aria, legata all'effetto pistone esercitato dagli importanti volumi idrici messi in gioco. Termi-



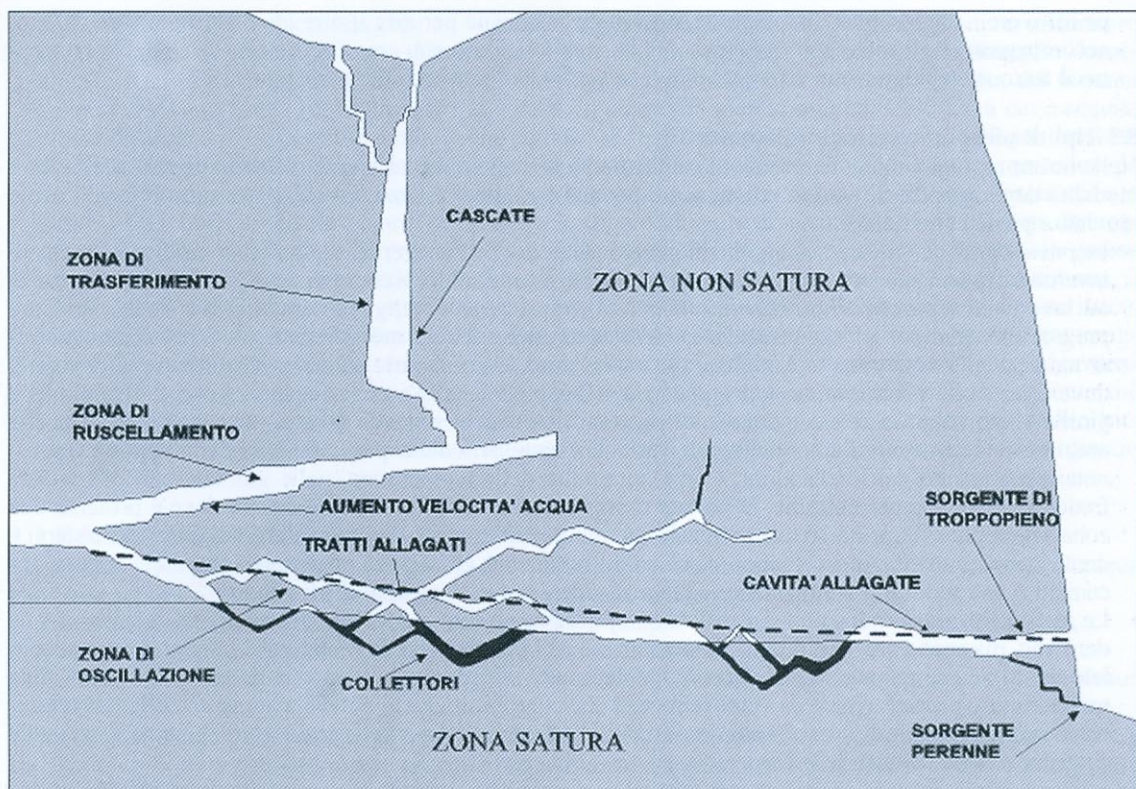


Fig. 10: Le zone di un sistema carsico con differenti pericoli legati ad un evento di piena

nata l'infiltrazione, altrettanto rapidamente la portata si esaurisce e, dopo aver aspettato in un luogo riparato, è possibile riprendere la risalita.

- Nella *zona di ruscellamento*, in genere non sussistono grandi problemi se le vie di flusso hanno una dimensione necessaria a fare transitare l'onda di piena. Anche con notevoli aumenti della portata, i livelli nei collettori salgono relativamente poco mentre si incrementa la velocità del flusso. Spesso percorrendo in alto le grandi gallerie è possibile risalire verso la superficie. Notevoli problemi si incontrano nei tratti verticali che, in genere, diventano intransitabili ad eccezione di armi particolarmente aerei. La piena in queste zone non è così improvvisa come nei tratti superiori e, in genere, è indicata da un aumento progressivo della portata e dal notevole incremento dei gocciolii dagli arrivi secondari.
- Nelle *gallerie prossime alla zona satura*, la piena può essere molto pericolosa per allagamento totale o parziale di questi tratti che nei periodi di magra sono anche del tutto asciutti. In seguito ad abbondanti precipitazioni, il notevole volume d'acqua che arriva dalla superficie non riesce ad essere smaltito in tempi brevi verso la zona sorgiva, con conseguente risalita del livello di falda di diverse decine di metri. Nei sistemi del Timavo o delle Alpi Apuane sono stati osservati incredibili aumenti del livello idrico, superiori anche alle centinaia di metri. In genere la crescita non è molto rapida e, se non si devono percorrere lunghe distanze, è possibile raggiungere luoghi sicuri. Nei condotti freatici semi-attivi possono essere anche molto pericolosi i tratti con geometria ad U, dove un solo modesto apporto (ad esempio un abbondante gocciolio), può colmare la zona più depressa rendendola sifonante per lunghi periodi.
- Nell'*area di emergenza*, le piene sono particolarmente rischiose sia nelle grotte-sorgenti sia nelle cavità che funzionano da troppopieno. Il pericolo maggiore è sempre legato ad improvvisi e rapidi aumenti dei livelli idrici, con conseguente sifonamento dei tratti più stretti o più bassi e conseguente chiusura della cavità. Numerosi sono stati gli speleologi intrappolati in queste grotte, che per fortuna hanno trovato riparo in luoghi asciutti, aspettando anche giorni prima di poter ritornare fuori. Molto spesso in queste situazioni interviene il soccorso speleologico che, con l'aiuto dei vigili del fuoco attrezzati delle necessarie pompe, riescono ad abbassare i livelli idrici e a far uscire gli sfortunati in tempi relativamente brevi. Nella grotta della Taramburla, al confine tra Piemonte e Liguria tre speleologi rimasero intrappolati, causa il sifonamento della galleria di ingresso, in seguito ad una grossa piena. Il rischio di ulteriori precipitazioni e la lenta diminuzione del livello idrico, nonostante l'impiego di numerose e potenti pom-



pe idrovore, suggerirono l'impiego delle tecniche subacquee per fare uscire gli sventurati. Due di loro, accompagnati dagli speleosub, superarono il breve sifone (uno non era neppure capace a nuotare!), mentre il terzo speleologo riuscì a tornare alla luce grazie al disinnescamento del passaggio.

## 8.2 Tipi di piene in relazione agli apporti

Nelle nostre regioni a clima temperato si originano piene con effetti e risposte differenti legate alle diverse modalità degli apporti. Si possono distinguere pertanto: piene di fusione nivale, piene nivo-pluviali, piene pluviali e piene eccezionali.

- Le *piene di fusione nivale* avvengono in genere nel periodo primaverile, ma possono verificarsi anche in inverno a causa di anomali innalzamenti termici legati a venti caldi (di compressione adiabatica o sciroccali) od inversioni termiche. Generalmente non sono improvvise e vengono caratterizzate da un aumento progressivo della portata che può mantenersi elevata anche diversi mesi. In dettaglio è possibile osservare nei sistemi maggiormente carsificati (sistemi a dreno dominante) una serie di pulsazioni giornaliere, dove è possibile correlare ulteriori aumenti del flusso idrico con i cicli diurni di fusione nivale. Nelle giornate particolarmente calde sono stati misurati notevoli incrementi della portata, nell'arco di poche ore, che evidenziano una ulteriore piena particolarmente pericolosa per la rapidità della risposta e per il notevole aumento dei livelli idrici. Con il diminuire della temperatura, nelle giornate particolarmente fredde o durante le ore notturne, la portata ritorna a valori molto bassi. Nei sistemi dove è presente una zona satura più sviluppata ed una permeabilità minore che smorza l'input infiltrativo, tipica dei sistemi a dreni interdipendenti, si osservano invece solo oscillazioni giornaliere contenute con picchi appena accennati o una serie di gradini a salire e poi a scendere per esaurimento degli apporti.
- Le *piene nivo-pluviali* di solito si verificano in primavera e sono pericolose per gli ingenti volumi che ne derivano, ma anche prevedibili in quanto connesse ad importanti perturbazioni che in genere sono segnalate dai bollettini meteorologici. Generalmente questi eventi sono associati a perturbazioni di origine mediterranea, accompagnate da venti sciroccali che contribuiscono al notevole aumento delle temperature. Si originano, quindi, piene molto importanti in quanto all'apporto delle piogge si somma il notevole contributo della fusione delle nevi.
- Le *piene pluviali* sono in relazione a fenomeni piovosi di lunga durata o a eventi temporaleschi brevi, ma molto intensi. Queste piene sono particolarmente pericolose nei sistemi altamente carsificati, dove inghiottitoi o ampie superfici di carso nudo favoriscono una rapida infiltrazione delle acque. Le importanti precipitazioni primaverili o autunnali causano sovente piene di notevole intensità ma non improvvise e con aumento della portata piuttosto graduale, riscontrabile nei diversi settori del sistema carsico. In genere questi apporti non presentano intensità orarie elevate, ma, persistendo diversi giorni, forniscono notevoli contributi al sistema. Tali eventi sono piuttosto prevedibili in quanto associati a perturbazioni importanti che, in genere, vengono annunciate dai bollettini meteorologici. Al contrario, i fenomeni temporaleschi non sono prevedibili e nell'arco di poche ore possono scaricare una notevole quantità di pioggia che origina piene improvvise, anche se di breve durata. Nelle grotte verticali, ingenti volumi idrici possono raggiungere rapidamente i pozzi con conseguenti rischi per chi si trova in questi tratti. In profondità, nei sistemi di grandi dimensioni a volte le portate dei corsi d'acqua aumentano di pochi l/s quando i temporali sono molto localizzati ed interessano quindi solo una piccola parte dell'area di ricarica. Anche in seguito a periodi particolarmente asciutti, una rilevante parte della precipitazione va a saturare il suolo e l'epicarso, senza fornire alcun contributo ai settori più profondi.
- Le *piene eccezionali* sono, in genere, associate ad importanti eventi alluvionali, con una risposta del sistema carsico spesso anomala e con piene incredibili che possono interessare anche settori che da centinaia di anni non avevano più visto scorrere acqua. Sono ovviamente pericolosissime per chi si trova intrappolato in grotta ma, a volte riservano inaspettate sorprese agli esploratori. La particolare circolazione idrica che si instaura durante tali eventi può infatti, aprire o chiudere dei passaggi, trasportando via o depositando ingenti volumi di detriti e sabbie. Numerosi sono gli esempi che si possono citare. Nella grotta delle Fuse, nel Piemonte meridionale, piccola cavità ubicata in vicinanza di una grossa sorgente, gli speleologi imperiesi hanno per anni scavato una grossa frana senza riuscire a passare. L'evento alluvionale verificatosi nel novembre '94 ha aperto questo passaggio permettendo l'esplorazione nei tratti a monte. Al contrario, nella Priamara, grotta non attiva nell'entroterra ligure, ma posta in prossimità della zona satura, sono state necessarie numerosissime punte per svuotare un cunicolo colmo di sabbia ed esplorare le successive gallerie. Una importante piena ha successivamente interessato la cavità e richiuso il condotto, sedimentando numerosi metri cubi di detriti. Particolarmente interessante è stato l'eccezionale evento di piena verificatosi nella Grotta di Bossea (Piemonte meridionale) nell'ottobre del 1996. Questa cavità-sorgente è caratterizzata da un corridoio di accesso fossile, sovrapposto ad una galleria attiva, seguito da una serie di grossi saloni attrezzati per il percorso turistico e da un canyon che termina in condotti sifonanti, esplorati fino ad una profondità di 70 m e caratterizzati da enormi depositi di sabbie



e limi. Nella grotta è ubicata da oltre un ventennio una stazione scientifica dotata anche di un misuratore in continuo della portata del corso d'acqua principale che ha permesso di ricostruire in dettaglio l'eccezionale fenomeno. In seguito ad un evento alluvionale particolarmente intenso, la portata del torrente sotterraneo è aumentata sensibilmente raggiungendo un valore massimo di ca. 1400 l/s, a cui è seguita una improvvisa ed inspiegabile diminuzione con una serie di anomale oscillazioni, fino all'annullamento del flusso idrico nell'arco di una decina di ore. Poi, improvvisamente, una incredibile piena, preceduta da un ingente trasporto solido di acqua e fango, ha interessato la grotta raggiungendo una portata stimata superiore a 6.000 l/s, per oltre 5 ore (ovviamente le apparecchiature di misura sono state in parte danneggiate). L'ondata è defluita nelle grosse gallerie della cavità fino in prossimità delle sorgenti. In questo settore le vie di deflusso, con sezioni piuttosto ridotte, non sono riuscite a smaltire l'ingente volume, il livello idrico è così aumentato attivando anche le gallerie alte, fossili, utilizzate dal percorso turistico. L'eccezionale piena è stata attribuita ad una ostruzione delle condotte sifonanti ubicate nella parte terminale della grotta, a causa di una serie di assestamenti e smottamenti della massa dei sedimenti fini presenti lungo le ripide gallerie ed osservata anche dagli speleosub, in precaria stabilità. Nel tratto a monte si è verificato di conseguenza un notevole accumulo di acqua con un progressivo aumento dei livelli idrici fino a quando la pressione idrostatica è riuscita a liberare il condotto e ad innescare lo straordinario evento.

## 9. LE MISURE DI PORTATA

La misura di portata è la determinazione di una variabile fisica che serve a conoscere la quantità di acqua che passa in una sezione di un canale naturale o artificiale, nell'unità di tempo.

Le tecniche di misura della portata si basano su tre principi:

- misura del tempo necessario al riempimento di un contenitore a volume noto;
- misura della velocità del fluido e conoscenza dell'area della sezione bagnata, nel punto in cui si effettua il rilevamento;
- misura del livello del liquido a monte di una struttura idraulica primaria tipo stramazzo o canale calibrato.

Le misure di portata possono essere eseguite manualmente, singole o ad intervalli di tempo, o in continuo con l'ausilio di appositi acquisitori. È ovvio che le misure in continuo forniscono anche informazioni indispensabili per comprendere il funzionamento di un dato sistema carsico.

La *misura volumetrica* è la più semplice da effettuare in grotta o presso le emergenze, ma è fattibile solo con portate esigue, utilizzando contenitori a volume noto (secchielli o grossi bidoni), che devono essere facilmente rimovibili, anche una volta pieni. Consiste nel fare defluire nel contenitore l'intero flusso idrico, in genere in prossimità di una cascatella, e misurare, con un cronometro, il tempo necessario al suo riempimento o al raggiungimento di un dato livello. Il calcolo della portata viene eseguito dividendo il volume idrico misurato per i secondi necessari al colmamento del recipiente.

La misura che si basa sulla *velocità del flusso idrico* può essere effettuata impiegando diversi metodi e dovrebbe essere eseguita in corrispondenza di un canale naturale, il più regolare possibile (eliminando eventualmente i grossi ciottoli), con velocità dell'acqua non troppo elevata; mai in sezioni spumeggianti o molto turbolente. Il sistema più semplice consiste nell'utilizzare un oggetto galleggiante (che in genere segue i filetti fluidi più veloci), meglio impiegare della segatura umida (non galleggia e rimane sospesa in acqua), o un tracciante artificiale (si diffonde rapidamente nell'intero volume idrico), e misurare il tempo di passaggio tra due punti posti ad una distanza conosciuta, ricavando così la velocità del flusso idrico. Occorre poi calcolare l'area della sezione bagnata del tratto più rappresentativo del canale con l'ausilio di un metro rigido. Il valore della portata si ottiene moltiplicando l'area misurata per la velocità sottointesa (attenzione alle unità di misura!). Altre tecniche della misura della velocità impiegano sistemi con parti in movimento tipo i mulinelli o i così detti siluri. Con questi strumenti (prezzo intorno a 1.500 Euro) si effettuano una serie di misure lungo una sezione opportunamente individuata, essendo in genere la velocità del flusso piuttosto differente nelle diverse zone del corso d'acqua. Moltiplicando poi la velocità misurata per l'area sottointesa di ogni elemento e sommandone i diversi valori si ricava la portata complessiva. Tale misura risulta essere piuttosto precisa se il tratto preso in esame presenta una sezione piuttosto regolare, ingombra di sassi.

Le tecniche descritte finora consentono unicamente di effettuare delle misure puntuali, mentre per una registrazione in continuo del valore della portata bisogna ricorrere a strumentazioni differenti, abbinare a particolari strutture idrauliche che operano una restrizione calibrata di un canale naturale o artificiale e che controllano il perimetro e la velocità del flusso. Queste strutture vengono chiamate *sistemi primari di misura* e si dividono in due categorie principali: gli *stramazzi* ed i *canali di misura*.

Uno *stramazzo* è uno sbarramento costruito in un canale naturale o artificiale, che verso monte crea una vasca di calma con scorrimento molto lento, sopra il quale il flusso idrico scorre attraverso una apertura di forma ben definita. Le geometrie della bocca possono essere molteplici, la più comune è quella con apertura



triangolare, ideale per misure di estrema precisione anche per blande variazioni di portata. Più facile da costruire in grotta o presso una sorgente è lo stramazzo rettangolare a pareti sottili senza contrazione, che sfrutta le pareti del condotto carsico, o lo stramazzo a pareti larghe (Foto 9). Queste opere sono semplici ed economiche da costruire ed i materiali comunemente usati sono il calcestruzzo ed il metallo. Lo sbarramento viene eseguito erigendo una piccola diga dotata di una apertura, nella quale si convoglia il flusso idrico, che a fine opera viene chiusa del tutto. Nella parte alta viene inserita la bocca metallica (triangolare, trapezoidale o rettangolare) o un'apertura rettangolare con larghezza di circa 50 cm (stramazzo a pareti larghe), utilizzando calcestruzzo e pietrame raccolto in loco. Per gli stramazzi valgono le seguenti considerazioni generali:

- a valle della bocca deve essere garantita una buona areazione della vena affluente per evitare che il flusso aderisca alla parete;
- la distanza tra bordo di sfioro e massimo livello dell'acqua a valle stramazzo deve essere maggiore di 5 cm;
- il bordo di sfioro deve essere perfettamente orizzontale.

I canali di misura vengono genericamente chiamati anche canali a contrazione laterale, di fatto esistono varie forme con caratteristiche leggermente differenti. Essi creano una restrizione e/o una variazione di pendenza della sezione di flusso, costringendo il liquido ad una velocità costante. Risultano di più difficile realizzazione rispetto agli stramazzi classici, ma l'intera opera può essere prefabbricata in materiali metallici ed inserita poi direttamente in loco.

La portata degli stramazzi e dei canali è determinata dalla misurazione dell'altezza del liquido nella vasca di calma a

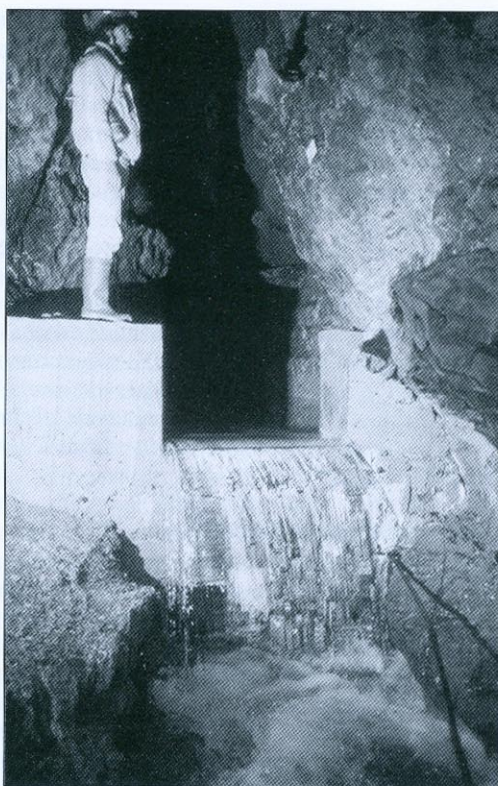


Foto 9: Lo stramazzo a pareti larghe costruito nella Grotta di Bossea (Piemonte)

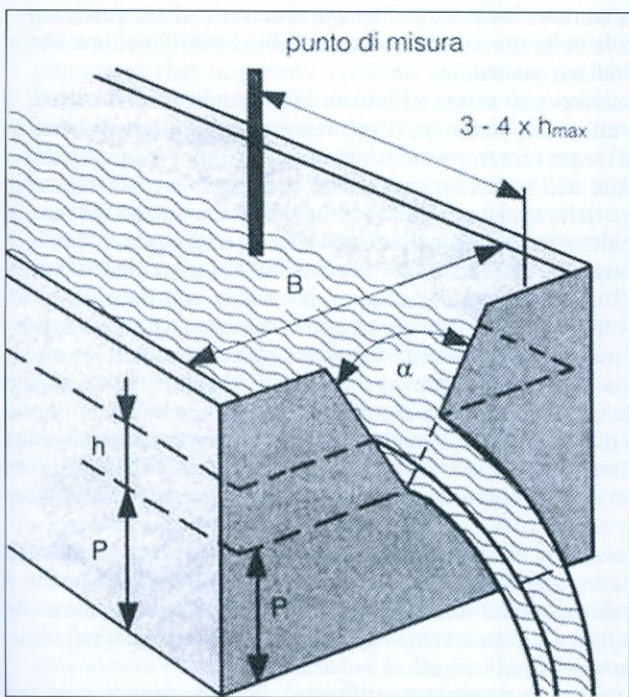


Fig. 11: Schema di uno stramazzo triangolare e relativa posizione della sonda automatica

monte e dal successivo calcolo utilizzando le opportune formule elaborate per le diverse geometrie della bocca a stramazzo. È importante effettuare alcune misure puntuali di portata con altri metodi per verificare l'attendibilità dei dati calcolati. Occorre inoltre tenere presente che, in prossimità dell'apertura dello stramazzo, si verifica una curvatura della superficie libera con un abbassamento del livello legato alla viscosità ed alla tensione superficiale dell'acqua (anche alcuni cm). La misura precisa deve quindi essere rilevata ad una distanza dalla bocca di 3-4 volte l'altezza corrispondente alla portata massima (Fig. 11).

Per una registrazione continua della portata il sistema primario di misura deve essere abbinato ad un misuratore di livello automatico che utilizza diversi principi. I più comuni sono i misuratori ad ultrasuoni, a bolle d'aria ed i trasduttori di pressione. Definire quale possa essere lo strumento migliore è difficile in quanto per ogni situazione ognuno di essi presenta vantaggi e svantaggi.

Il loro costo si aggira intorno a 1.000 Euro. Sono in grado di funzionare autonomamente per oltre tre mesi e, passato tale periodo, si scaricano i dati, in genere utilizzando un com-



puter portatile e si sostituiscono le batterie.

Il *sensore ad ultrasuoni* è il più diffuso per misure in corsi d'acqua superficiali. La tecnica di misura si basa sul principio di un cono di onde ultrasonore che partono da un sensore posto sopra la superficie da misurare. Il *sensore a bolle* è meno diffuso e si basa su una piccola pompa che fornisce un flusso d'aria all'interno di un tubicino che viene posizionato in acqua, ottenendo un effetto di gorgogliamento d'aria (da cui il nome della tecnica a bolle).

Il *trasduttore di pressione* è lo strumento in grotta più utilizzato, si basa su un sensore sommerso che misura la pressione che il fluido stesso esercita sul trasduttore, determinando l'altezza del liquido. Gli strumenti più precisi registrano anche il valore della pressione atmosferica che influenza ovviamente il dato finale. Si può utilizzare questo strumento, dotato di un cavo fino a 100 m di lunghezza, anche per registrare gli aumenti dei livelli idrici in prossimità di tratti sifonanti.

Tutti questi apparecchi, che vengono alimentati con batterie autonome (stilo, torcia, al piombo), registrano unicamente delle variazioni di livello: per ottenere il valore di portata occorrerà sempre effettuare gli opportuni calcoli con le formule elaborate per i diversi tipi di stramazzo.

Da pochi anni vengono commercializzati dei nuovi strumenti che sono in grado di registrare la velocità media del liquido in corrispondenza di una data sezione e contemporaneamente l'altezza del livello idrico. Con questa tecnica, chiamata *area velocity*, si può quindi fare a meno degli stramazzi, la cui costruzione in alcuni casi risulta di difficile realizzazione (in grotta, a notevoli profondità). Tali apparecchiature, con costi ancora molto elevati, non sono mai state installate in cavità naturali.

## 10. IL BILANCIO IDROGEOLOGICO

Il metodo, chiamato *bilancio potenziale* (Civita et al., 1983, 84), utilizza un procedimento di calcolo numerico che è stato studiato per valutare e controllare le dimensioni ed i limiti di un sistema carsico. Esso consiste, ipotizzata l'area di ricarica di una data sorgente, di calcolare la quantità media annua di acqua che l'acquifero dovrebbe essere in grado di assorbire e quindi restituire alla emergenza. Il confronto tra i risultati ottenuti con il modello di calcolo ed i valori medi annui misurati alla sorgente fornisce un'utile indicazione circa la corretta interpretazione delle dimensioni e dei limiti del sistema in oggetto.

Per discretizzare i parametri indispensabili ad effettuare un bilancio (quota, precipitazioni, temperatura e coefficiente di infiltrazione), si opera una suddivisione dell'area in esame in elementi finiti quadrati (cella elementare), che hanno dimensioni in genere variabili tra 500 e 1000 m di lato, scelte a discrezione, in genere secondo le dimensioni dell'area.

Per ogni cella, univocamente definita da una coppia di numeri corrispondenti alla riga e alla colonna del reticolo di suddivisione, vengono eseguiti i seguenti calcoli:

- determinazione della quota media ponderale (indicando con  $q_a$ ,  $q_b$ ,  $q_c$ ,  $q_d$  le quote dei vertici di ogni elemento e con  $q_v$  quella del suo centro), si definisce:

$$Q_m = (q_a + q_b + q_c + q_d + 4q_v) / 8$$

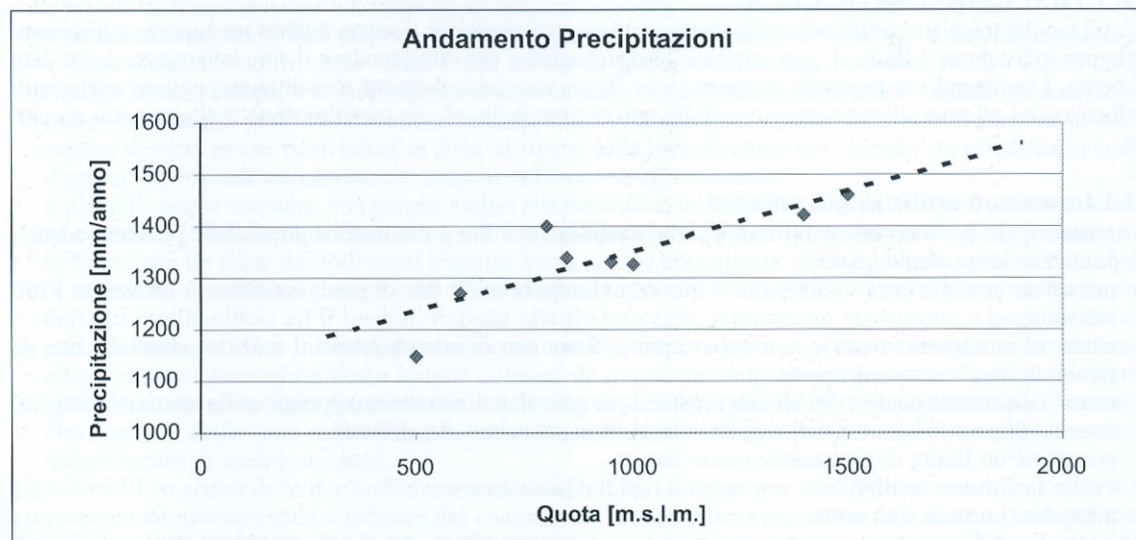


Fig. 12: Correlazione quota-precipitazioni di alcune stazioni pluviometriche



- determinazione della precipitazione totale media annua (Pt) e della temperatura media annua (T) mediante la relazione che lega gli apporti e la temperatura alla quota. Tale relazione viene ricavata tramite l'interpolazione lineare dei dati medi annui rilevati alle stazioni pluviometriche (Fig. 12) e termometriche localizzate a quote note ed ubicate in prossimità o nell'area investigata. La validità delle relazioni così ricavate è funzione del numero di stazioni presenti all'interno o in vicinanza dell'area oggetto di indagine e del numero di anni ai quali si riferiscono le misure. In genere si prendono in considerazione almeno 20 anni di rilevamenti.

$P_t = \text{mm medi annui alla quota media della cella}$

$T = \text{°C media annua alla quota media della cella}$

- Calcolo del tasso di evapotraspirazione, E (quantità di acqua che viene sottratta per fenomeni di evaporazione e traspirazione della copertura vegetale), eseguito tramite la relazione:

$$E = (P_t / (0.9 + P_t^2 / L^2))^{1/2}$$

dove L è il coefficiente che identifica il potere evaporante dell'atmosfera (Turc, 1954)

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

(viene calcolato in mm medi annui alla quota della cella).

- Determinazione del valore di precipitazione efficace (Pe), in mm/anno, sottraendo alla precipitazione totale l'aliquota relativa all'evapotraspirazione:

$$P_e = P_t - E$$

- Calcolo del valore dell'infiltrazione efficace (I), in mm/anno, che si ottiene moltiplicando il valore della precipitazione efficace per un coefficiente d'infiltrazione  $\chi$ , variabile tra 0 e 1

$$I = P_e * \chi$$

La scelta di tale coefficiente spetta all'operatore che deve tenere conto di molteplici fattori che condizionano l'infiltrazione: le caratteristiche di permeabilità dei diversi litotipi affioranti nell'area di alimentazione, la pendenza dei versanti, la copertura del carso, la presenza di inghiottitoi. In genere il coefficiente  $\chi$  negli acquiferi carsici varia da 0.8 ad 1.

- Determinazione del volume d'acqua infiltratosi annualmente (Vi), per ogni cella elementare, in m<sup>3</sup>/anno, mediante la relazione:

$$V_i = I * \alpha * A$$

dove A corrisponde alle dimensioni della cella elementare mentre con  $\alpha$  si indica, ai bordi della struttura, la percentuale dell'area interessata dal bilancio.

- Somma di tutti i valori delle celle elementari Vi, per ricavare il volume totale medio annuo di acqua che si è infiltrata nell'area di ricarica del sistema. La portata media annua, espressa in l/s, che dovrebbe essere evacuata dalla sorgente si ottiene dividendo il dato ottenuto, con i secondi presenti in un anno.

Il confronto tra la portata calcolata e la portata media annua misurata permette di ricavare utilissime informazioni che possono confermare o meno le dimensioni dell'area di ricarica ipotizzata o indicare la presenza di altre emergenze appartenenti al medesimo sistema, non conosciute o non prese in esame.

## 11. I TRACCIANTI ARTIFICIALI

L'utilizzo dei traccianti artificiali, nello studio degli acquiferi carsici, è senza dubbio un apporto indispensabile per individuare i limiti di una struttura idrogeologica e per comprendere il funzionamento di un dato sistema. Esaminando le modalità di restituzione di un tracciante è infatti possibile raccogliere anche utili informazioni relative all'organizzazione della rete di drenaggio ed alla carsificazione dell'ammasso roccioso.

### 11.1 I traccianti artificiali più utilizzati

Le sostanze che possono essere utilizzate come tracciante devono presentare caratteristiche prossime a quelle di un tracciante ideale, ossia:

- possedere una altissima solubilità in acqua ed in tempi brevi al fine di poter considerare istantanea l'immissione;
- essere chimicamente neutro, non subire quindi fenomeni di adsorbimento o reazioni chimiche che ne diminuiscano la concentrazione;
- essere fisicamente neutro, quindi non separarsi per gravità o rimanere intrappolato nella matrice litologica;
- non modificare le caratteristiche dinamiche dell'acqua (viscosità, densità);
- possedere un limite di rilevazione molto basso;
- essere facilmente analizzabile con metodi rapidi e poco costosi;
- possedere una tossicità nulla.

I traccianti artificiali attualmente in uso hanno un comportamento che si approssima a quello ideale, ma ognuno di loro presenta alcune controindicazioni. Tra le sostanze reperibili sul mercato possiamo annovera-



re:

- gli isotopi radioattivi: sono molto validi ma richiedono uno stretto controllo da parte delle autorità sanitarie, tale da risultare poco pratico il loro impiego;
- i traccianti chimici (cloruro di sodio, bromuri): possono alterare le caratteristiche dinamiche dell'acqua ed inoltre necessitano nell'impiego negli acquiferi carsici di rilevanti quantitativi;
- i traccianti biologici: sono di difficile reperibilità in Italia, costosi e di complicato utilizzo;
- i traccianti fluorescenti: sono le sostanze più utilizzate anche se presentano alcuni inconvenienti legati alla sospetta tossicità di alcuni elementi (rodamina B) e, più in particolare, ad una loro eccessiva colorazione anche in concentrazioni basse.

## 11.2 I traccianti fluorescenti

Sono delle particolari sostanze, di corrente uso industriale, opportunamente trattate anche in campo medico, con un comportamento che si avvicina a quello di un tracciante ideale. Tra le numerosissime sostanze fluorescenti presenti sul mercato, quelle che presentano le più valide caratteristiche d'uso in campo dell'idrogeologia carsica sono la *fluoresceina sodica* ed il *tinopal CBS-X*. I test di tossicità indicano che, tra le diverse sostanze fluorescenti, sono questi due prodotti che presentano i requisiti migliori in quanto risultano essere non mutageni e non cancerogeni, con bassa LD50 (concentrazione letale per il 50% degli organismi acquatici trattati). I test di irritazione dell'occhio e della cute indicano che tali sostanze possono essere maneggiate senza particolari pericoli, mantenendo le usuali precauzioni. Al contrario, altri traccianti fluorescenti, come la *rodamina B*, risultano essere sia cancerogeni che mutageni (Smart 1984).

La *fluoresceina* è una sostanza in polvere di colore rosso porporeo che, una volta diluita in acqua, fornisce una tipica colorazione verde fluorescente, inconfondibile, visibile ad occhio nudo fino a bassissime concentrazioni. L'utilizzo di tale tracciante è sconsigliabile in aree dove sono presenti sorgenti captate per uso idropotabile, in quanto un possibile arrivo del colorante nelle acque suscita notevole preoccupazione sia da parte degli utenti sia dai gestori della rete idrica. In alcune regioni l'impiego di tale sostanza è addirittura vietato. Si ricorda che, prima di eseguire un test con tracciante, è importante fornire agli uffici competenti (Arpa, Comuni) una richiesta di autorizzazione e le necessarie informazioni per evitare spiacevoli inconvenienti e soprattutto per aprire le porte a possibili e remunerative collaborazioni.

Per ovviare al problema legato alla eccessiva colorazione delle acque o per eseguire test multipli, da alcuni anni viene impiegata una particolare sostanza fluorescente, individuata tra i numerosi "candeggianti ottici" utilizzati come sbiancanti nei detersivi, chiamata *tinopal CBS-X*. Questo particolare tracciante, in polvere di colore giallino, ha il pregio di essere invisibile all'occhio umano a concentrazioni basse, fornendo all'acqua solo una opalescenza azzurrina in tenori piuttosto elevati ed essere facilmente rilevabile con un comune fluorimetro.

I prezzi della fluoresceina e del tinopal si aggirano intorno ai 50 Euro al kg.

## 11.3 Utili informazioni

Prima di utilizzare queste sostanze è importante conoscerne le principali caratteristiche per evitare spiacevoli perdite di tempo e denaro. L'impiego di tali traccianti può essere infatti condizionato da:

- il decadimento fotochimico (elevata sensibilità alla luce): è relativamente basso per la fluoresceina e solo a concentrazioni molto basse ed in tempi molto lunghi, si verifica una diminuzione del valore della fluorescenza. Il tinopal è invece altamente fotosensibile ed occorre quindi prendere alcune precauzioni: i campioni d'acqua prelevati devono essere custoditi in contenitori opachi (bottiglie in plastica nere), i captori devono essere posizionati in zone al riparo della luce diretta, i tracciamenti se effettuati in corsi d'acqua superficiali devono essere eseguiti nelle ore serali o notturne;
- il pH delle acque carsiche: è in genere vicino alla neutralità, in ogni caso la fluoresceina è molto sensibile ad eventuali valori bassi, mentre il tinopal è meno disturbato da possibili scostamenti di tale parametro;
- la filtrazione da parte dei sedimenti argillosi viene spesso considerata come parametro determinante per la negatività di certi tracciamenti. In effetti qualsiasi sostanza fluorescente viene in parte trattenuta dai depositi argillo-siltosi ed il tinopal, rispetto alla fluoresceina, presenta un più elevato adsorbimento da parte di sedimenti fini. In realtà, in un sistema carsico, non si verifica mai una situazione in cui il flusso idrico percorra sezioni piuttosto lunghe colmate da questi depositi, se non nei primi tratti delle cavità dove è presente una circolazione irrisoria. In tali situazioni è sconsigliabile effettuare qualsiasi tracciamento. Nei condotti della zona satura l'argilla presente sulle pareti influisce invece molto marginalmente sul trattenimento di queste sostanze.

La solubilità in acqua delle due sostanze è molto differente. La fluoresceina è piuttosto solubile, anche se a concentrazioni elevate tende a formare dei coaguli che devono essere pazientemente sciolti. Il tinopal presenta invece valori piuttosto bassi, con sedimentazione della sostanza a partire da concentrazioni superiori ai 100 mg/l.



#### 11.4 Immissione del tracciante

In genere l'immissione del tracciante viene considerata puntuale, ovvero effettuata in tempi relativamente brevi, per studiare poi alle sorgenti le modalità di restituzione del colorante. Essendo queste sostanze anidre delle polveri, vengono immesse direttamente in acqua spargendole manualmente, poco alla volta per evitare concentrazioni e quindi eventuali coaguli, o, meglio, preparando in loco una soluzione liquida che viene poi sversata. Attenzione a non creare anomali cambiamenti di portata che originano un'onda che temporaneamente invade le pareti rocciose depositando una parte del tracciante. Si sconsiglia di effettuare test in zone con scorrimenti idrici molto bassi o quasi inesistenti, perché una notevole parte del tracciante rimane intrappolato in zone con flusso nullo come pozzette o in tratti con sedimenti fini. Il tinopal, a causa della bassa solubilità, deve essere utilizzato unicamente in piccoli corsi d'acqua con portate superiori a 1 l/s.

La quantità del tracciante da utilizzare è condizionata da diversi fattori. La portata alla sorgente è il parametro che sembra essere determinante, ma, in realtà, è il volume di acqua interessata dal tracciamento la misura più importante necessaria a calcolarne il quantitativo ideale. Questo volume, molto difficile da quantizzare, è particolarmente condizionato dalla tipologia del sistema e dalle dimensioni della zona satura, nella quale il tracciante si diffonde ed in parte si disperde nei settori meno trasmissivi. Verranno quindi forniti unicamente i risultati ottenuti da tre interessanti e rappresentativi test eseguiti in Piemonte.

In un piccolo inghiottitoio del sistema delle Sorgenti Vene, un tipico *circuito a dreno dominante*, sono stati utilizzati 2 kg di fluoresceina. Il colorante è stato rinvenuto alla emergenza, che al momento del test presentava una portata di oltre 1000 l/s, con una elevata colorazione ben visibile anche ad occhio nudo. In un inghiottitoio del sistema di Bossea che alimenta un tipico *circuito a dreni interconnessi*, sono stati immessi 4 kg di fluoresceina, rilevata solo strumentalmente alle sorgenti, a 2 km di distanza, in concentrazioni molto basse. La portata delle emergenze era di soli 50 l/s. Alcuni mesi dopo il test, in occasione di una importante piena, i captori appositamente posizionati hanno evidenziato ancora la presenza del tracciante, a dimostrazione della elevata dispersione del colorante nella estesa rete satura e di una sua rimobilizzazione solo in occasione di notevoli aumenti del carico idraulico.

Alle Sorgenti del Maira, alimentate da un sistema con *circolazione dispersiva*, dopo 4 mesi di osservazioni i captori risultavano essere ancora negativi, nonostante l'impiego di 5 kg di fluoresceina introdotti in una perdita a pochi km dalla emergenza, a causa della elevatissima dispersione e diffusione del tracciante nella zona satura.

#### 11.5 Raccolta dati alle sorgenti

Per verificare i possibili collegamenti tra i diversi punti d'acqua di un sistema, occorre collocare degli appositi captori presso tutte le sorgenti dell'area in esame, anche in corrispondenza delle emergenze che, sulla base delle prime conoscenze, dovrebbero essere estranee al test. Successivamente presso i punti risultati positivi si potranno eseguire studi più mirati per esaminare le modalità di restituzione del tracciante utilizzando metodologie diverse con campionamenti dettagliati delle acque o con l'ausilio di appositi acquisitori automatici.

I captori in genere vengono posizionati prima di eseguire il test, soprattutto per evitare facilissime contaminazioni. È opportuno che lo speleologo che maneggia il tracciante non provveda al loro recupero, essendo in genere gli stivali o gli scarponcini inquinati dal colorante. Meglio quindi che tali operazioni vengano eseguite da differenti persone.

I captori sono costruiti usando, come contenitore, una retina plastica o metallica (ideale è la rete da zanzariera), opportunamente piegata e pinzata per ottenere una bustina (tipo da tè) di circa 8 cm di lato. Vengono quindi colmati con granuli di carbone vegetale (meglio utilizzare quelli di alcuni mm di diametro). Il tinopal viene invece catturato solo dal cotone, si utilizzano pertanto le garze sterili da medicazione, piegate in quattro e pinzate nella bustina. Queste hanno una durata limitata e marciscono dopo circa un mese di permanenza in acqua.

Alle sorgenti si posizionano numerosi captori, ben ancorati con un filo robusto, in zone con corrente non troppo violenta, al riparo della luce e soprattutto dai curiosi che spesso li estraggono dall'acqua. Occorre inoltre tenere presente che, in genere, le sorgenti sono caratterizzate da portate molto variabili, di conseguenza, possono rimanere all'asciutto o esser portati via dalla corrente. La persona che posiziona i captori provvederà anche al loro recupero, sostituendoli con altri nuovi e lasciandone uno che accumula nel tempo la sostanza in caso di una restituzione molto blanda del tracciante. La cadenza del campionamento varia, in genere si procede con un primo prelievo dopo pochi giorni, un secondo dopo una settimana e poi con un intervallo più rado.

Per esaminare la curva di restituzione del tracciante occorre invece realizzare, direttamente in acqua, una serie di misure molto ravvicinate nel tempo. La strumentazione più valida è un acquisitore automatico, da poco tempo in commercio, costruito all'Università di Neuchatel, che effettua misure molto precise di concentrazione della fluoresceina, del tinopal e della torbidità ogni 4 minuti e funzionante per lunghi periodi



(costo intorno ai 4.000 Euro).

È possibile usare anche un campionatore automatico di acque (quelli autocostituiti, con un semplice orologio ed una serie di bottigliette sono molto meno costosi) e successivamente analizzare in laboratorio i campioni raccolti.

### 11.6 Analisi in laboratorio

I captori raccolti alle emergenze devono essere analizzati utilizzando metodologie differenti a seconda dell'impiego dei carboni o del cotone.

I carboni vengono immessi in un contenitore e ricoperti con una soluzione di potassa alcolica debitamente preparata. Questa soluzione viene fatta utilizzando delle pastiglie di idrato di potassio (si comprano in farmacia), sciolte in alcool metilico (più difficile da trovare ma con una durata nel tempo molto superiore all'alcool etilico) con una percentuale intorno al 10%. Dopo alcuni minuti, si filtra la soluzione attraverso appositi supporti, per eliminare eventuali tracce di carbone. Impiegando un contenitore in vetro ed una luce disposta ortogonalmente alla vista si osserva il campione: se appare il classico verde scuro fluorescente, ben distinguibile da un giallo paglierino legato alla presenza di sostanze organiche, il captore viene considerato positivo. In caso di dubbi o con concentrazioni molto basse, si utilizzano gli appositi fluorimetri che sono in grado di rilevare anche tracce molto basse di fluoresceina. I captori in cotone devono essere invece analizzati direttamente con il fluorimetro opportunamente tarato sulla lunghezza d'onda del tinopal.

### 11.7 La risposta dei traccianti

Un tracciante artificiale rappresenta un segnale che viene introdotto nell'acquifero, subisce variazioni più o meno marcate influenzate dalla complessità del circuito ed in parte dallo stato idrodinamico del sistema. Viene quindi restituito alle emergenze in concentrazioni diverse e con intervalli di tempo più o meno lunghi. La velocità di flusso calcolata con i coloranti fornisce un dato abbastanza variabile e non determinante per comprendere il funzionamento di un dato sistema. I risultati ottenuti sono infatti strettamente dipendenti dalla situazione idrodinamica durante il tracciamento, con valori di velocità che possono variare anche di due ordini di grandezza in rapporto alle portate. Analoghe differenze si riscontrano immettendo il tracciante nelle diverse zone del sistema, con velocità elevate nel caso di tracciamenti nei collettori principali e risposte molto più lente dalle vie secondarie. Esaminando invece la geometria della curva di restituzione del tracciante alla sorgente è possibile ottenere informazioni molto utili per comprendere il funzionamento di un dato sistema (Uggeri et al. 1992). Sulla base delle differenti tipologie della rete di drenaggio, la risposta al tracciamento sarà infatti molto diversificata tra un circuito e l'altro (Fig. 13).

La *restituzione ad impulso unico* è contraddistinta da una curva con un picco principale piuttosto pronunciato, un aumento ed una diminuzione dei valori di concentrazione del tracciante piuttosto breve e condizionato dalla situazione idrodinamica al momento del test. Nei periodi con portate elevate la restituzione può

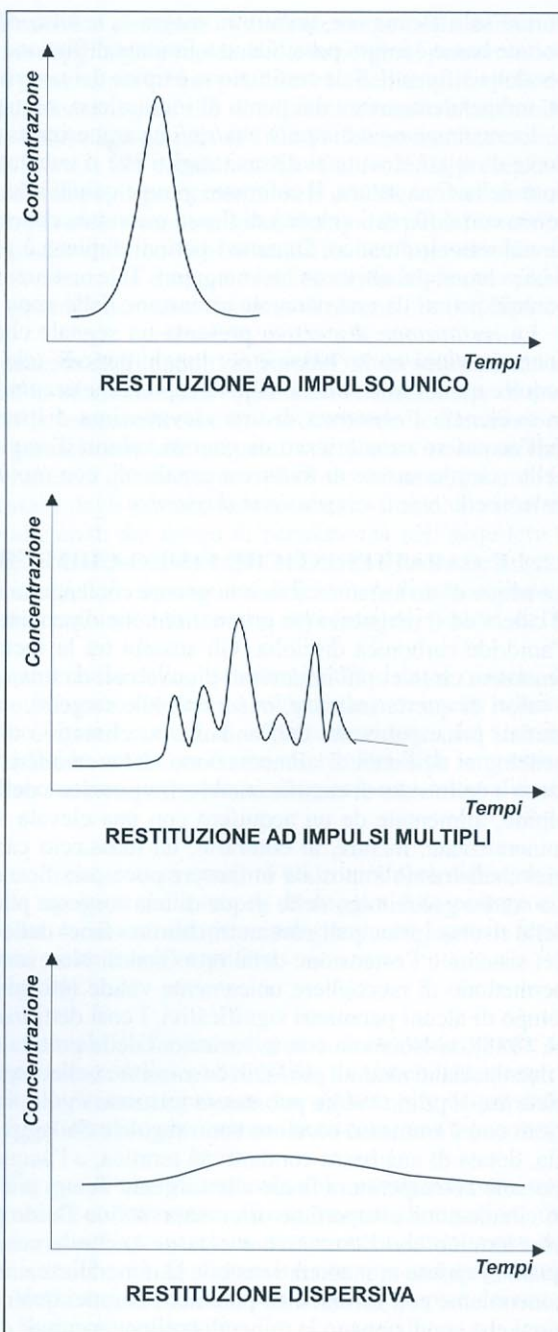


Fig. 13: *Differenti geometrie della curva di restituzione di un tracciante artificiale*



durare solo alcune ore, mentre in magra la restituzione può persistere alcuni giorni. Durante i periodi con portate basse è infatti possibile una limitata diffusione e dispersione del tracciante nei laghi e nelle eventuali condotte sifonanti. Tale restituzione è tipica dei sistemi con una *rete a primario dominante*, dove il tracciante, indipendentemente dal punto di immissione, segue un unico percorso, prima di arrivare alla sorgente.

La *restituzione ad impulsi multipli* è caratterizzata da una successione di picchi secondari (andamento a dente di sega), dovuta ai diversi tragitti che il tracciante segue diffondendosi nella complessa rete dei condotti della zona satura. Il colorante giunge quindi alla sorgente in tempi piuttosto lunghi, seguendo numerose vie con differenti velocità di flusso e con una concentrazione piuttosto bassa, legata all'elevata dispersione nel reticolo freatico. Durante i periodi di piena è possibile misurare anche un arrivo più diretto, attivandosi percorsi più alti e con luci maggiori. Tale restituzione caratterizza i sistemi con *rete a dreni interconnessi*, contraddistinti da una notevole estensione della zona satura.

La *restituzione dispersiva* presenta un segnale che giunge all'emergenza in tempi molto lunghi e con concentrazioni molto basse e per lunghi periodi, tale da essere, a volte, non rilevabile strumentalmente in acqua e quindi solo con l'ausilio di captori che accumulano nel tempo il tracciante. Un simile comportamento evidenzia l'esistenza di una elevatissima dispersione del colorante dovuta alla presenza di settori dell'acquifero caratterizzati da enormi volumi d'acqua immagazzinati. Le sostanze immesse si diffondono nella complessa rete di fratture e canalicoli, con moto laminare e velocità del flusso molto lente, tipica dei sistemi con *rete a circolazione dispersiva*.

## 12. LE CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Le acque di un sistema carsico in genere contengono in soluzione quattro sostanze principali: i bicarbonati, il calcio ed il magnesio (in proporzioni che dipendono dalla natura calcarea o dolomitica dell'acquifero) e l'anidride carbonica disciolta. Gli scambi tra la roccia carbonatica, l'acqua e l'anidride carbonica sono i fenomeni chimici più importanti e governati da una serie di delicati equilibri.

I valori di queste sostanze, misurabili alle sorgenti, sono legati ad una innumerevole serie di fattori condizionati principalmente dall'andamento climatico di una determinata zona, dagli aspetti morfologici e pedologici dell'area di alimentazione, dalle caratteristiche litologiche ed idrostrutturali dell'ammasso roccioso e dallo stato di carsificazione e fratturazione dell'intero massiccio. Le sorgenti di un corso d'alta quota alpino, alimentate da un acquifero con una elevata velocità di flusso, ad esempio, mostrano acque poco mineralizzate, mentre, al contrario, un massiccio carbonatico di media latitudine e con una circolazione prevalentemente impostata in fratture poco carsificate è caratterizzato da acque molto ricche in sali.

Lo studio geochemico delle acque di una sorgente può essere molto utile non solo per conoscere la qualità della risorsa (principali parametri chimico-fisici delle acque), ma anche per comprendere il funzionamento del sistema e l'estensione della rete carsica. Non sono quindi solo le approfondite analisi chimiche che ci permettono di raccogliere unicamente valide informazioni puntuali, ma sono soprattutto le variazioni nel tempo di alcuni parametri significativi, i così detti *traccianti naturali* o "*time dependent factors*" (Civita et al. 1988), in isocronia con le variazioni della portata, che forniscono i dati più interessanti.

I due traccianti naturali più facili da misurare nelle acque di una sorgente sono la temperatura e la conducibilità elettrica. Il primo valore può essere misurato molto facilmente anche nella zona di assorbimento e le interazioni con l'ammasso roccioso sono regolate da leggi relativamente semplici. Gli scambi termici tra la roccia, dotata di una bassa conduttività termica, e l'acqua, caratterizzata invece da un'alta conduttività, condizionano la temperatura finale alle sorgenti. Tempi più o meno lunghi di permanenza nell'acquifero, quantità in circolazione e superficie di contatto solido-fluido permettono all'acqua di raggiungere o meno l'equilibrio termico con l'ammasso roccioso. Anche la conducibilità elettrica è un ottimo tracciante naturale in quanto esprime in maniera sensibile la mineralizzazione totale dell'acqua e mostra, in genere, un andamento concordante con diversi altri parametri chimici quali la durezza, il contenuto in calcio e carbonati. Le reazioni che condizionano la mineralizzazione e quindi direttamente la conducibilità sono, però, di più difficile interpretazione, in quanto legate a numerosi fattori, tra loro interagenti, quali la natura litologica, la presenza di CO<sub>2</sub> di diversa origine, variazioni di temperatura, miscelamenti di acque con composizione e grado di saturazione diverso, scambi ionici con la matrice rocciosa, ecc.

Il concetto di saturazione di un'acqua rispetto ad un certo minerale presente nella matrice rocciosa di un acquifero (nel nostro caso i carbonati) è estremamente intuitivo: si dice *satura* rispetto ad un certo minerale l'acqua che non è in grado né di sciogliere né di depositare quel minerale. Viene quindi chiamata *sottosatura* quell'acqua che è ancora in grado di portare in soluzione lo stesso minerale (acqua aggressiva), e *sovrassatura* quell'acqua che deposita il minerale per piccole variazioni di pH, di temperatura o di pressione, non potendolo più mantenere in soluzione (acqua incrostante). Nell'arco di un anno idrologico alle sorgenti possono arrivare acque con differenti gradi di saturazione, mineralizzazione e temperatura, prevalentemente condizionate dalle caratteristiche idrogeologiche del reticolo di drenaggio.

Possiamo riconoscere:



- *Acque di neoinfiltrazione*, legate agli apporti infiltrativi e circolanti prevalentemente nella zona non satura. A seconda della tipologia del sistema, possono raggiungere rapidamente le sorgenti percorrendo i condotti principali o andare a rimpinguare le riserve presenti nei settori più fratturati dell'acquifero. Sono caratterizzate da temperature molto variabili, direttamente legate alle condizioni atmosferiche (molto fredde nella stagione invernale e relativamente calde nella stagione estiva). I valori della mineralizzazione sono, in genere, piuttosto bassi e condizionati dall'intimità del contatto solido-fluido, dalla presenza e tipologia delle coperture del carso e soprattutto dai tempi di permanenza nell'acquifero. Nei sistemi altamente carsificati e caratterizzati da una zona satura assente o molto ridotta, le acque di neoinfiltrazione raggiungono le emergenze conservando le caratteristiche chimico-fisiche acquisite nell'attraversamento della zona più superficiale del carso. Alle sorgenti si osservano dunque evidenti diminuzioni del valore della conducibilità elettrica e della temperatura, in genere isocrono o ritardato di alcune ore con il picco di piena.
- *Acque delle riserve regolatrici*, in regime non influenzato dagli apporti infiltrativi, si spostano piuttosto lentamente nell'acquifero, con velocità strettamente condizionate dall'organizzazione della rete di drenaggio. Sono presenti nei settori meno permeabili dell'ammasso roccioso (zone con notevole fratturazione e fessurazione o condotti parzialmente ostruiti) e garantiscono alle sorgenti una portata relativamente costante in assenza di infiltrazione diretta. La temperatura di queste acque è piuttosto costante, essendo in equilibrio con la parte del mezzo roccioso interessata dagli scambi termici solido-fluido. I valori di mineralizzazione sono piuttosto stabili e sono condizionati dai tempi di permanenza nell'acquifero e dalle temperature. Presentano tenori più elevati rispetto le acque di neoinfiltrazione, essendo state in gran parte tamponate nell'attraversamento della zona non satura. Solo in occasione di fenomeni di mescolamento tra acque provenienti da settori differenti si determina un ulteriore aumento dei valori della mineralizzazione.
- *Acque delle riserve permanenti*, sono intrappolate nel reticolo delle discontinuità del sistema o anche in condotti carsici non interessati dal flusso principale e vengono interessate soltanto da movimenti saltuari in occasione di notevoli aumenti del carico idraulico legati a periodi di importante ricarica del sistema (fenomeni di pistonaggio). I lunghi tempi di contatto fluido-roccia condizionano i valori della temperatura e della conducibilità di queste acque che risultano essere più calde e maggiormente mineralizzate rispetto alle acque delle riserve regolatrici.

I differenti tipi di acqua sopra menzionati raggiungono le sorgenti in quantità ed in modalità differenti, a seconda delle diverse condizioni idrodinamiche e della tipologia della rete di drenaggio. Alle emergenze, durante i periodi di piena, si osservano quindi complesse variazioni dei principali parametri legate a fenomeni di mescolamento che interessano le diverse acque presenti nell'acquifero.

È possibile quindi riconoscere i seguenti fenomeni (Fig. 14):

- il *pistonaggio*, in genere osservabile durante la fase iniziale dell'evento di piena, è caratterizzato da un aumento più o meno marcato dei valori della temperatura e della conducibilità. La rimobilizzazione di acque intrappolate, termicamente più calde e mineralogicamente più cariche rispetto alle acque delle riserve regolatrici, è legata ai notevoli aumenti del carico idraulico che mettono in circolazione (*squeezing*) anche parti rilevanti delle riserve permanenti;
- la *sostituzione*, sottolinea l'arrivo alla sorgente dell'acqua di neoinfiltrazione, solo in minima parte mescolata alle altre acque presenti nel sistema. Il fenomeno è caratterizzato da una marcata diminuzione dei diversi parametri chimico-fisici. La sostituzione può essere limitata ad una temporanea diminuzione dei valori che, in genere, si verifica al colmo della piena, o nel periodo successivo con una caduta generale dei valori, evidenziando un completo rinnovamento delle acque circolanti nell'acquifero, tipico dei sistemi con una zona satura molto ridotta e presenza di importanti collettori;
- la *miscelazione* tra le acque di neoinfiltrazione e le acque residenti nell'acquifero è caratterizzata alla sorgente da un contenuto abbassamento termico e, in genere, da un aumento della conducibilità delle acque rispetto ai valori misurati in regime non influenzato. L'incremento della mineralizzazione è dovuto agli apporti di acque maggiormente aggressive ed alla ripresa dei fenomeni di dissoluzione, causata dal mescolamento di acque, chimicamente simili, ma con diverso contenuto di sostanze disciolte (TDS), che diventano nuovamente aggressive, come evidenziato dal diagramma di Tillmans. Le zone dell'acquifero interessate da questi mescolamenti sono generalmente caratterizzati da un grande sviluppo dei condotti carsici (ipercarsismo da miscelazione, Forti 1991). Questa risposta è tipica dei sistemi caratterizzati dalla presenza di una zona satura piuttosto estesa e carsificata;
- l'*omogeneizzazione* è un processo di mescolamento che annulla del tutto il segnale delle acque di neoinfiltrazione. I valori della temperatura e della conducibilità quindi si mantengono costanti nel tempo o presentano temporanei aumenti o diminuzioni (andamento a dente di sega), non correlabili con le



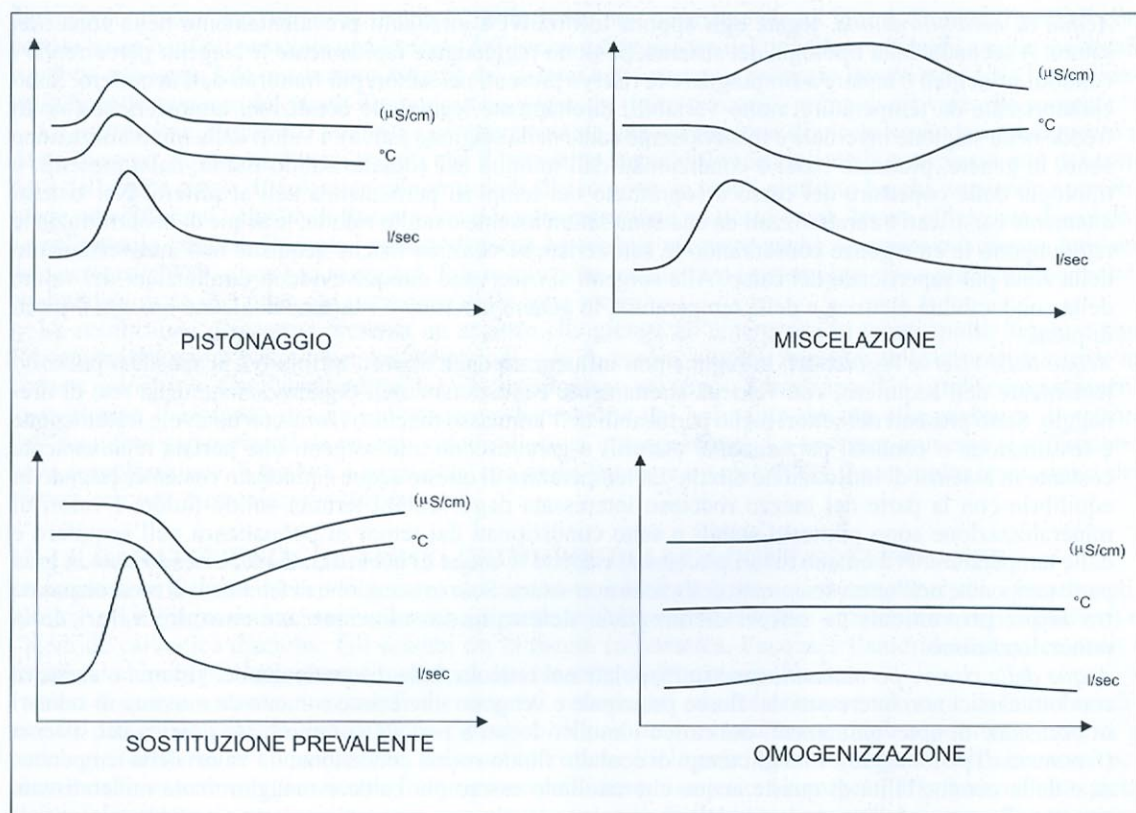


Fig. 14: *Variazioni della temperatura e della conducibilità specifica durante un evento di piena*

variazioni della portata. In genere questa risposta è tipica dei sistemi caratterizzati da una circolazione molto lenta e dispersiva, in una complessa rete di discontinuità poco carsificate, in grado di annullare il segnale esterno.

### 13. GLI ACQUISITORI AUTOMATICI

Le peculiari caratteristiche idrodinamiche degli acquiferi carsici, spesso interessati da rapide e notevoli variazioni della portata, suggeriscono, per una corretta interpretazione relativa al funzionamento di un dato sistema, un approccio metodologico particolare, con misure dei principali parametri chimico-fisici delle acque precise e ravvicinate nel tempo. La raccolta dei dati effettuata manualmente si è dimostrata del tutto insufficiente per il dettaglio richiesto, l'impiego dei campionatori automatici, anche se programmati ad intervalli di prelievo abbastanza ravvicinati, permette unicamente l'analisi di una singola piena. Solo recentemente sono stati introdotti sul mercato delle apparecchiature specifiche per l'uso sul terreno, portatili, dotate di alimentazione autonoma, poco costose e di facile impiego. Con tali apparecchiature è possibile raccogliere utili informazioni relative alle diverse modalità di circolazione delle acque sotterranee, evidenziando i diversi meccanismi e tipi di acque che giungono alle sorgenti, in particolare durante importanti piene (Vigna 1992). Le correlazioni di questi dati con le misure di portata e/o con i dati delle precipitazioni sono quindi in grado di evidenziare l'esistenza di estesi serbatoi saturi (interessanti per gli speleosub) o la presenza di importanti collettori lungo i quali transitano rapidamente le acque di neoinfiltrazione (buone possibilità esplorative).

Gli acquisitori automatici attualmente in commercio sono in grado di misurare e registrare tutta una serie di parametri delle acque sotterranee, tra cui i valori della temperatura, della conducibilità elettrica, del pH, dell'ossigeno disciolto. I prezzi di simili apparecchi sono piuttosto elevati, ma sul mercato è possibile trovare anche strumentazioni poco costose (intorno ai 1.000 Euro), in grado di misurare i due parametri che possono essere considerati i migliori traccianti naturali, poiché marcano, reagendo molto sensibilmente alle variazioni della portata, l'arrivo di acque diverse: la temperatura e la conducibilità elettrica. Lo strumento ideale per questi studi è una sonda multiparametrica che, oltre ad acquisire questi valori, misura anche le variazioni dei livelli idrici. Si trova in commercio ad un prezzo di ca. 3.500 Euro.



Gli acquirenti tradizionali sono degli apparecchi di dimensioni e peso molto ridotti, adatti all'uso anche in grotta, in genere costituiti da due parti: una sonda ed un acquirentore con relative batterie. La prima, dotata dei diversi sensori, deve essere immersa in acqua e fissata con una semplice staffa alle pareti della cavità utilizzando i fix per la progressione in grotta, ricordando che durante le piene la velocità del flusso idrico ed i livelli aumentano notevolmente. In genere si sceglie una zona con una corrente non troppo elevata (mai in acqua bianca) ed eventualmente si protegge la sonda con un semplice tubo forellato, in plastica (Foto 10). Nel caso di installazione presso sorgenti,

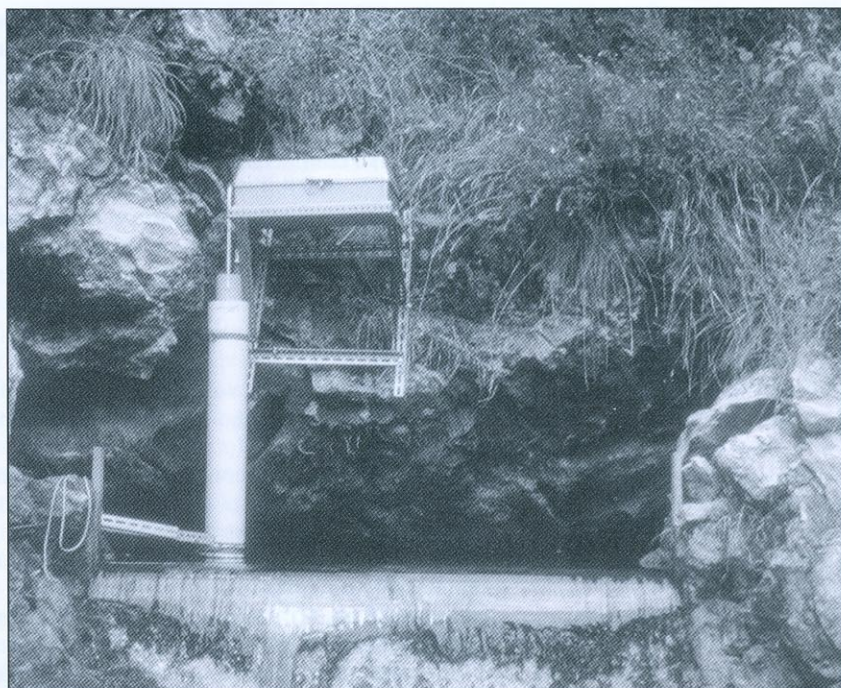


Foto 10: *Acquisitori e stramazzo a pareti sottili presso la Sorgente delle Fuse (Piemonte)*

la sonda deve essere posizionata direttamente all'uscita e non in vicinanza a questa, essendo la temperatura dell'acqua immediatamente influenzata dalle condizioni climatiche esterne.

L'acquirentore (in alcuni modelli è incorporato nella sonda) e/o il terminale di scarico dati e le batterie (collegate alla sonda mediante un cavo con lunghezza massima di ca. 100 m) devono essere posizionati in un luogo sicuro, in alto, al riparo delle piene.

La cadenza delle misure è programmabile tramite un personal computer, con possibilità di scelta compresa tra 1 ed oltre 400 minuti. L'intervallo di acquisizione influenza, logicamente, i tempi massimi di registrazione. La scelta è condizionata dalla risposta del sistema, con variazioni dei principali parametri, anche orarie, nei circuiti altamente carsificati. In genere l'intervallo delle misure viene inizialmente impostato in 2 ore e, sulla base dei dati raccolti, successivamente corretto.

Terminato il periodo di acquisizione, in genere compreso tra 3 e 6 mesi, i dati acquisiti vengono raccolti utilizzando un personal computer.

La taratura delle apparecchiature, relativa ai due parametri considerati, può essere eseguita molto saltuariamente, essendo quasi tutti gli strumenti dotati di sensori funzionanti per lunghi periodi. In ogni caso è sempre consigliabile verificare in loco l'attendibilità delle misure utilizzando dispositivi portatili debitamente tarati e precisi.

## 14. MISURE E ANALISI GEOCHIMICHE DELLE ACQUE CARSIICHE

Le analisi chimico-fisiche, anche semplici, possono fornire ulteriori e preziose indicazioni e conferme sui drenaggi ipogei e la struttura dei karst (solo attraverso di esse, ricavando la quantità e la tipologia delle rocce erose o disciolte e trasportate dalle acque, si può avere il quadro dell'attuale evoluzione del carsismo).

Specie in zone con complessa situazione geologica il chimismo può offrire una lettura, spesso sicura, sul condizionamento dei diversi litotipi.

Analisi rigorose possono diventare uno strumento di notevole utilità pratica e pubblica, anche con grossi risparmi economici, specie per quanto riguarda zone difficilmente (o non) accessibili al personale specializzato.

### 14.1 Approccio dello speleologo allo studio delle acque

Gli speleologi sono spesso gli unici operatori in grado di effettuare monitoraggi nell'ambiente sotterraneo o in remoti, difficili angoli delle aree carsiche. La raccolta dei dati chimico-fisici delle acque sul terreno è



accessibile, produttivamente, a tutti gli speleologi: non basta tuttavia la sola buona volontà. Quindi bisogna non solo conoscere e scegliere il materiale ed i tipi di analisi, ma, soprattutto, saper applicare con consapevolezza e con la massima precisione le diverse metodiche (anche in condizioni difficili!!!, es. in grotta). E acquisire poi una solida esperienza (ancor più necessaria per quanto riguarda la lettura e l'interpretazione dei dati).

Il consiglio (oltre all'umiltà ed alla pazienza) è cominciare con misure tra le più semplici e comunque molto significative, come la temperatura, il pH, la conducibilità specifica.

Bisogna insomma farsi una "*forma mentis*": quindi prima d'approcciarsi a qualsiasi misura e analisi e soprattutto alla trasmissione e divulgazione dei dati in qualunque forma e veicolo (da internet alle pubblicazioni, ecc.) si deve essere convinti che qualsiasi valore non sicuro può essere fuorviante e, se ripreso da altri ricercatori, può creare gravi danni, non solo alla conoscenza di quella specifica area carsica.

## 14.2 Analisi delle acque e campionatura

Diversi tipi di analisi (es. temperature, ossigeno disciolto, solfuri, bicarbonati, CO<sub>2</sub>, ecc: v. più avanti) vanno effettuate direttamente sul terreno, altri campioni possono essere portati (eventualmente opportunamente tamponati) in laboratorio per le altre analisi.

La raccolta dei campioni viene di norma effettuata con contenitori di polietilene (da 100 cc. a 1000 cc. a seconda delle esigenze), opportunamente puliti. Per certi elementi (es. carbonio organico totale, BOD, COD, ossigeno disciolto, odore e diverse sostanze inquinanti) si deve usare un contenitore di vetro (talora senza bolle d'aria, es. per l'ossigeno disciolto). Per altri elementi (es. fenoli) si usano vetri particolari: ma è un settore che ben difficilmente può coinvolgere lo speleologo.

Se si campiona per analisi batteriologiche s.l. sono necessari contenitori di vetro sterilizzati.

Fondamentale è la conservazione del campione per garantire la stabilità e inalterabilità di tutti i suoi costituenti nell'intervallo di tempo che intercorre tra il prelievo e l'analisi. La perfezione è quasi impossibile, tuttavia bisogna evitare alcuni fattori che portano ad alterazioni della composizione del campione: es. imperfetta chiusura del contenitore, cessione di sostanze da parte del contenitore, variazioni dello stato fisico di alcuni elementi e composti chimici (specie per aumenti di temperatura), alterazione della composizione conseguente all'attività microbica.

Per certi elementi si devono usare procedimenti di stabilizzazione (alcuni ricordati nel seguito) ricordandosi che nella valutazione delle analisi bisogna tener conto della diluizione provocata dall'aggiunta dei reattivi. Una buona garanzia per la stabilità delle caratteristiche dell'acqua sarebbe la refrigerazione costante del campione a 4°C: decisamente difficile dalla zona carsica al laboratorio (se poi i campioni sono raccolti durante una spedizione all'estero!!!). Quindi le analisi di laboratorio devono essere effettuate per elementi stabili (es. Calcio, Magnesio, Sodio, Potassio) o opportunamente stabilizzati (es. silice, cloruri, solfiti, solfati, composti dell'azoto).

Inoltre bisogna ricordarsi dell'intervallo massimo di tempo tra il prelievo e l'analisi: diversi composti devono essere analizzati entro le 24 ore (es. nitriti e nitrati, ossigeno disciolto, solfiti), gli altri entro una settimana.

Per capire l'evoluzione dei caratteri geochimici delle acque (specie in relazione alle piene, ai periodi di massima magra, ecc.) sono molto utili i campionatori portatili che possono raccogliere campioni d'acqua (sino a 24-48) modulati in intervalli di tempo decisi dall'operatore: la metodologia è importantissima per quanto riguarda le esperienze con traccianti, altrettanto utile per il chimismo, con le limitazioni di cui sopra (in pratica non possiamo avere uno spettro chimico completo delle acque, perché alcuni componenti, non tamponati, si alterano nell'arco della serie dei prelievi). In parte si può sopperire con registratori elettronici in continuo di parametri come temperatura, pH, conducibilità, ecc.

Notiamo comunque come al di là dei costi (specie per i campionatori portatili) difficilmente accessibili a gruppi speleologici, se non di lunga e comparata esperienza nel settore idrogeologico - chimico - fisico (e quindi che sanno già come gestire i monitoraggi), le apparecchiature elettroniche (et similia) in questo settore siano valide solo con costanti accurate tarature e verifiche (questo vale anche per la gestione informatizzata dei monitoraggi).

## 14.3 Errori nelle misure

Il valore di una misura di una determinazione analitica è sempre affetto da un errore, anche se si è operato con la massima cura: la probabilità aumenta se si opera con strumenti e metodi semplificati e talora di basso costo (tra cui vari tipi di kits portatili). Margini di errori elevati, anche inficianti la validità della misura, possono verificarsi con strumenti elettronici non rigorosamente tarati.

Nell'esecuzione di un'analisi, sul terreno o in laboratorio, si possono distinguere errori sistematici ed errori casuali.

Gli errori del metodo dipendono dalle caratteristiche specifiche del metodo d'analisi impiegato (es. presen-



za di reazioni collaterali): sono errori che dipendono dalle apparecchiature e dai reattivi impiegati; così le apparecchiature utilizzate per le diverse analisi possono non essere a punto (es. scorretta taratura) seppure funzionanti, i reattivi possono essere non correttamente standardizzati, o scaduti, o inquinati da sostanze estranee.

Ci sono poi gli errori operativi (purtroppo non infrequenti nell'ambito carsico-speleologico!): sono dovuti alla scarsa cura e correttezza prestata dall'operatore durante l'esecuzione dell'analisi, come errori di lavaggi, quantità non precisa del campione da esaminare (es. con i kits portatili bisogna fare attenzione ai menischi!), scarsa precisione nelle operazioni di travaso, filtrazione, ecc., il mancato preciso rispetto dei tempi e delle temperature di reazione (specie nelle reazioni sul terreno).

Gli errori individuali dipendono dalle caratteristiche personali dell'operatore: non saper usare con correttezza le metodiche, incapacità ad individuare il punto finale della titolazione (cioè individuare il punto esatto del viraggio colorimetrico), eccessiva fretta nelle analisi, dare come risultato definitivo quello della prima (e unica!) analisi. Questi errori possono essere relativamente frequenti nell'ambito speleologico.

Ci sono poi gli errori cosiddetti psicologici: es. facendo una seconda o terza analisi si tende (se non ci sono gravi discrepanze) a ricavare un risultato il più possibile in accordo con quanto determinato nella prima analisi effettuata sullo stesso campione, oppure a farle in fretta già pensando ad un risultato del tutto simile. Gli errori casuali o accidentali sono sempre presenti: es. ripetendo un'analisi i risultati non sono mai perfettamente identici. Si può rimediare operando con grande cura ed attenzione ripetendo varie volte l'analisi.

La precisione viene data in termini di scarto quadratico medio. Più semplicemente si può eliminare i dati discrepanti e considerare solo i valori intorno alla media. Tuttavia una assoluta identità fra i risultati di una serie di misure deve essere perlomeno osservata (e valutata) con sospetto!

Ricordarsi che una elevata precisione dello strumento (per non parlare delle cifre decimali lette!) non garantisce sempre un alto grado di accuratezza e precisione del risultato. Possono esservi errori sistematici dello strumento e dell'analisi che inficiano una serie di determinazioni.

Ogni determinazione dovrebbe essere effettuata su due diversi campioni anche per la necessità di mettersi al riparo da errori di campionamento.

Un'analisi può essere considerata soddisfacente se i risultati delle singole determinazioni sono in buon accordo tra loro e la media dei risultati.

#### 14.4 Le analisi sul terreno e i kits portatili

Lo studio completo di un'acqua carsica richiede sia analisi sul terreno sia analisi di laboratorio. Queste ultime devono essere effettuate da laboratori specializzati con personale ad alta professionalità (magari diffidare anche dall'amico chimico se non si è sicuri della sua cura e del coinvolgimento nelle analisi affidategli: "tanto per gli speleologi bastano dati alla buona!". Casi del genere sono relativamente frequenti: ed i dati vengono poi pubblicati!).

Alcune analisi sul terreno sono assolutamente indispensabili (così temperatura, pH, bicarbonati, CO<sub>2</sub>), altre, previ opportuni trattamenti del campione, possono essere effettuate in laboratorio.

Lo speleologo sul terreno può far uso di strumenti elettronici s.l. e di test rapidi di analisi (test kits). I primi sono rappresentati da termometri, pHmetri e conduttivimetri.

Per tutti vale il discorso della qualità: strumenti di ditte serie e specializzate, con garanzie e di un certo costo. Non prendere neppure in considerazione strumenti molto economici, come certi pHmetri e conduttivimetri per attività agricole o per piscine e simili, né farsi ingannare dalle numerose cifre decimali! Per il termometro è necessaria una taratura periodica (es. con un termometro a mercurio al 1/10 di °C, marchiato). Il conduttivimetro va tarato (con le apposite soluzioni di taratura) indicativamente ogni 2-3 settimane (e dopo aver subito stress ambientali). Il pHmetro, sicuramente lo strumento più delicato, va tarato ogni giorno di utilizzazione (e nello stesso giorno dopo aver subito stress ambientali); a riposo la sonda va tenuta in soluzione acquosa. Senza queste fondamentali precauzioni è meglio rinunciare all'uso di questi strumenti (la conducibilità specifica può essere misurata in laboratorio).

Sconsigliamo l'uso di questi strumenti nelle grotte (impegnative): a parte i traumi del trasporto, le condizioni ambientali (specie l'umidità a saturazione) creano gravi problemi (e talora danni) al preciso funzionamento.

I test kits, in uso ormai da decenni, costituiscono (almeno per certe analisi) una valida ed economicamente vantaggiosa alternativa ed integrazione alle analisi di laboratorio. Si tratta di scatole (specifiche per ogni analisi) di facile uso (sono da scartarsi, assolutamente, i tests su striscia perché non offrono precisioni adeguate all'analisi di un'acqua carsica).

Noi usiamo da trent'anni soprattutto kits della *Ditta Merck* (cui di seguito faremo riferimento per la descrizione delle varie tipologie), ma esistono tests rapidi di diverse altre ditte (es. in Italia la Farmitalia Carlo Erba) altrettanto validi.

I test kits sono strumenti molto semplici, quindi teoricamente usabili da tutti. La loro semplicità obbliga alla



massima precisione ed al rispetto rigoroso di tutte le indicazioni metodologiche ben evidenziate nelle rispettive scatole e nelle istruzioni allegate: ogni piccola imperfezione porta ad invalidare questo tipo di analisi. Bisogna conoscere bene i limiti di questi kits (alcuni suggerimenti saranno forniti nella descrizione delle singole componenti delle acque carsiche), innanzitutto sapere quali tipi di test kits offrono precisioni compatibili con le caratteristiche delle acque carsiche (e quindi utilizzabili correttamente nelle pubblicazioni, nei bilanci idrici, nelle elaborazioni grafiche, ecc.).

I kits hanno una scadenza minima (indicativamente non supera i 3 anni), se conservati correttamente alle temperature indicate sulle confezioni. Ad esempio se facciamo una spedizione in un corso tropicale (i kits all'estero sono uno strumento comodo e funzionale), con stress termometrici, bisogna portare una quantità ridotta di reattivi, perché dopo la spedizione (talora durante!!!) il materiale andrà eliminato perché non più affidabile (si possono comunque controllare con soluzioni standard).

Insistiamo sull'uso estremamente rigoroso dei kits: ad esempio se rimane anche una piccola bolla d'aria nelle apposite siringhe titolatrici, l'analisi è completamente falsata (comportarsi come se si facesse un'iniezione endovena!); se non si rispettano scrupolosamente i range termometrici i valori colorimetrici vengono falsati e quindi l'analisi è nulla. Bisogna imparare a conoscere il corretto momento di un viraggio colorimetrico: è necessaria parecchia esperienza, ma, specie nei primi tempi, si devono fare dei confronti con le classiche analisi di laboratorio (al contrario si tenderà soprattutto a sovrastimare il risultato dell'analisi).

Con i kits è necessario fare tre analisi dello stesso campione (con tutte le precauzioni suggerite nel capitolo 14.3, "Errori nelle misure", p. 38).

I tipi di kits, facendo riferimento alla *Ditta Merck*, sono essenzialmente tre: gli *Aquamerck*, gli *Aquaquant* e i *Microquant*.

Gli *Aquamerck* (ad es. corrispondenti, grosso modo, al sistema Idrimeter della Carlo Erba) comprendono sia tests titrimetrici, sia tests colorimetrici: accoppiano semplicità e rapidità. Il metodo titrimetrico è decisamente valido nelle analisi di campagna se si usano i kits con le siringhe titolatrici (il principio di questa analisi si basa sulla reazione della sostanza da determinare con un reagente titolante: il punto finale della reazione viene individuato attraverso il viraggio di un indicatore). I kits colorimetrici (uno o più reagenti che danno origine ad una reazione cromatica) determinano la concentrazione della sostanza ricercata in base a gradazioni di colore confrontate con una scala cromatica standard: questi sistemi, per quanto validi, su basse concentrazioni, di norma nelle acque carsiche, non possono avere valori precisi per essere inseriti ad esempio in un corretto bilancio ionico (e nei grafici).

Decisamente affidabili i test tipo *Aquaquant* anche con basse concentrazioni. L'elevata sensibilità di questi kits (specie quelli con provette lunghe) sfrutta il principio fisico della riflessione. Tra l'altro le interferenze dovute alla presenza di elementi estranei sono assai ridotte.

I kits tipo *Microquant* (prevedono un confronto cromatico in trasparenza con un comparatore a disco, generalmente con 10 gradazioni) per quanto di buona durata generalmente non possono fornire dati fini, per elementi a bassa concentrazione, da inserire opportunamente nei bilanci ionici (e negli spettri grafici). Sono attendibili per medie concentrazioni (a parte, talora, qualche perplessità sul confronto cromatico): quindi sistema pratico ma per valori generali di un'acqua carsica.

In generale per tutte le metodologie c'è il problema di eventuali sostanze interferenti o inibenti le reazioni: le spiegazioni allegate ai kits sono di norma chiare (per applicarle bisogna avere specifica esperienza nel settore chimico). Ripetiamo un consiglio dovuto al buon senso ed all'esperienza: cominciare a monitorare alcuni parametri fondamentali (e magari facili) come temperatura, pH, conducibilità, durezza totale e bicarbonati, naturalmente con estrema cura. Dopo un po' di tempo (i primi anni: non è il caso di spaventarsi!) allargare, se si hanno le possibilità tecniche (analisi precise di laboratorio), il campo ad uno studio completo chimico-fisico.

È molto più serio e produttivo sviluppare una ragionata programmazione delle analisi (es. misure stagionali e/o in riferimento alle precipitazioni, monitoraggi più o meno contemporanei a tutte le acque di un'area carsica, ecc. ecc.), magari solo analizzando pochi, fondamentali parametri, piuttosto che analisi più complete come numero di elementi, ma saltuarie ed in frammentari punti di un'area.

#### 14.5 Le analisi fondamentali sul terreno

Per comprendere i caratteri fondamentali di un'acqua carsica è necessario effettuare in loco le misure di temperatura, pH, bicarbonati, e possibilmente la CO<sub>2</sub> disciolta. Si consigliano anche la durezza totale e la conducibilità specifica.

Si ricorda che tutte le misure, dalla temperatura alle varie campionature, vanno effettuate nell'acqua corrente a media profondità (quindi si devono evitare contatti con il fondo e la superficie), in acqua limpida.

Per la temperatura consigliamo l'uso del classico termometro a mercurio con scala di lettura (e relativa precisione) a 1/10 e 1/5 di °C. In grotta, data la fragilità degli strumenti, si può usare un termometro al mezzo grado (ovvie le tarature periodiche). Sia chiaro che la lettura dello strumento va fatta con il bulbo ben



immerso nell'acqua (con un termometro munito di certificato di garanzia)!

È opportuno determinare anche il valore della temperatura dell'atmosfera esterna.

Il *pH* (cologaritmo della concentrazione degli ioni idrogeno presenti nell'acqua) più semplicemente esprime l'acidità di un'acqua. La determinazione è semplice e veloce se si ha un pHmetro tarato e di buona qualità. Altrimenti meglio usare metodi colorimetrici (kits) con la maggior finezza possibile (comunque assolutamente consigliabili in grotta).

Il *biossido di carbonio* ( $CO_2$ ) *disciolto* va determinato sul terreno (anche con accurate tecniche di prelievo durante il trasporto del campione in laboratorio si hanno delle variazioni). Esistono due metodi: titolazione con carbonato di sodio e metodo nomografico. Il primo comporta l'uso del pHmetro ed una soluzione di indicatore alla fenolftaleina (oltre alla soluzione standard di carbonato di sodio 0,0454 N). Si tratta di un'analisi chimica effettuabile da esperti, quindi non generalizzabile agli speleologi: la metodica si trova comunque nei normali manuali d'analisi delle acque. Il metodo nomografico richiede la determinazione in loco dei solidi disciolti, del pH, dei carbonati e dei bicarbonati, oltre alla temperatura. È inoltre necessario l'apposito grafico (nomogramma) di buona finezza (si può arrivare ad una precisione dell'1%).

I *bicarbonati* ( $HCO_3^-$ ), in pratica corrispondono alla durezza temporanea (un tempo definita come la durezza rimossa per ebollizione del campione in esame e conseguente precipitazione del carbonato di calcio e magnesio), cioè al contenuto di ione bicarbonato nell'acqua. Effettuabile con i test kits più sensibili: analisi da fare in fretta (ad esempio preparare già pronta la siringa di titolazione). La presenza di fosfati può falsare l'analisi (precipitare con soluzione al 10% di fluoruro di bario).

Per la *conducibilità* bisogna usare un ottimo conduttivimetro opportunamente tarato. I valori vengono letti in microsiemens per cm (1 microsiemens corrisponde a circa 0,6 mg/l di residuo solido inorganico). La sonda va bene immersa nell'acqua, se questa è molto turbolenta la misura può essere falsata (effettuare la misura in un contenitore di polietilene).

La *durezza totale* è la somma dei cationi alcalino-terrosi, in genere corrisponde alla concentrazione degli ioni calcio e magnesio. In pratica in un'acqua tipicamente carsica corrisponde alla mineralizzazione o salinità media dell'acqua. È un dato primario non solo per i confronti con altre acque (o nei vari punti di un sistema carsico), ma anche per valutare la dissoluzione chimica o erosione chimica in un massiccio carsico (usando le classiche formule di Corbel o Pulina o Gams). Inoltre la determinazione (con gli appositi kits titrimetrici che riprendono le classiche titolazioni complessometriche) è semplice e piuttosto precisa (attenzione all'inizio del viraggio!). La presenza di ioni ferro e rame può impedire il viraggio (trattare con soluzione acquosa al 6% di cianuro di potassio). Tra le analisi che bisognerebbe effettuare sul terreno ricordiamo: nitriti, nitrati, ammoniaca, ossigeno disciolto, solfati; in caso contrario bisogna opportunamente stabilizzarli.

#### 14.6 Componenti maggiori e minori di un'acqua carsica

In genere si definiscono elementi maggiori otto composti (i cationi: calcio, magnesio, sodio e potassio e gli anioni: cloro, solfati, bicarbonati e nitrati) che di norma rappresentano almeno il 95% della mineralizzazione di un'acqua: servono per calcolare il bilancio ionico e per le principali sintesi grafiche.

Per il *calcio* si possono usare i kits portatili con siringa titolatrice (attenzione all'inizio del viraggio: in genere si tende a sovrastimare. Confrontare con le analisi di laboratorio).

Per il *magnesio* (in teoria corrisponde alla differenza tra la durezza totale e lo ione calcio) si consiglia vivamente l'analisi in laboratorio (i kits non hanno, almeno per basse concentrazioni, una precisione accettabile in un bilancio ionico).

Il *sodio* ed il *potassio* devono essere determinati in laboratorio, generalmente mediante spettrofotometria di assorbimento atomico. Il sodio può essere molto importante, indicando ad es. contaminazioni da haliti (es. cloruro di sodio).

Gli anioni *cloruri* e *solfati* vanno analizzati con tecniche di laboratorio (i kits non sono adeguati per precise determinazioni sui bassi valori presenti spesso in un'acqua carsica: d'altronde si tratta di elementi molto importanti per individuare eventuali presenze e contaminazioni di rocce evaporitiche). I campioni per l'analisi dei solfati andrebbero stabilizzati (5 ml di  $CH_2OOH$  + 5 ml di formaldeide al 40% per l campionato). La determinazione dei *bicarbonati*, come detto, va effettuata sul terreno.

I *nitrati* per concentrazioni molto basse vanno analizzati in laboratorio (stabilizzare con 40 mg di  $HCl_2$  per l di campione), altrimenti si possono usare i kits.

Tra gli altri elementi è consigliabile analizzare il contenuto in *silice* (frequentemente rocce silicee costituiscono il basamento impermeabile di un'area carsica e possono venire a contatto con le acque sotterranee in varie situazioni). Si possono usare i tests kits più sensibili (es. tipo Aquaquant con scala di precisione da 0,01 mg/l).

Tra gli elementi minori, e comunque presenti in alcune aree carsiche, il *ferro* ed il *rame* permettono di fruire di kits con soddisfacente precisione.

Specie in carsi a basse quote (o potenzialmente inquinati o inquinabili) è consigliato esaminare l'*ossigeno*



disciolto (assieme a nitriti e ammonio) come indicatori della sostanza organica e di polluzioni. I kits portatili hanno di norma una precisione adeguata.

#### 14.7 Le sostanze inquinanti

La gamma delle sostanze inquinanti può essere enorme: ufficialmente oltre i 4 milioni (quantità minima di detersivi si trovano anche nelle acque piovane!).

A parte gli inquinanti fisici (colore, sostanze solide in sospensione, ecc.) sono soprattutto numerosi gli inquinanti chimici. Tra i sali minerali disciolti, a parte fosfati, solfati e cloruri eventualmente di derivazione agricola, lo speleologo nelle aree carsiche può completare le analisi chimico-fisiche tradizionali con la determinazione dei nitriti e dell'ammonio, che sono importanti indicatori della degradazione della materia organica (esistono specifici validi kits per basse concentrazioni con speciali provette lunghe).

I microinquinanti (metalli pesanti, pesticidi e detergenti), come gli idrocarburi, non possono rientrare nel campo di indagine dello speleologo: certo si devono segnalare gli inquinamenti individuabili non strumentalmente!

Per gli inquinanti organici, specie i batteri, ci si deve affidare alle colture di laboratorio (prelevare i campioni in vetro sterile e conservare a +4 °C). Esistono termostati portatili e kits di campagna: possono essere utilizzati per spedizioni all'estero.

#### 14.8 Considerazioni ed elaborazione dei dati

Per quanto riguarda l'interpretazione dei dati chimico-fisici, una trattazione sarebbe estremamente lunga e varia e non può quindi rientrare nei limiti di queste note pratiche. Esperienza, approfondita conoscenza bibliografica, discussioni e partecipazione a convegni specialistici e accurata conoscenza geologica-geomorfologica e speleologica di un'area carsica sono le premesse indispensabili. Prima di proporre interpretazioni e sintesi bisogna avere una massa di dati validi, con una distribuzione logica: non limitarsi ad interpretare i dati di un solo monitoraggio! (ad esempio una marcata durezza totale può dipendere dagli andamenti stagionali e dai deflussi, da una lunga permanenza in zona saturata o da una prolungata interfaccia acqua-roccia, in zone di breccia o di percolazione in leptoclasti, oppure da particolari situazioni geologiche; ci sono poi da considerare condizioni termometriche e altitudinali, ecc. ecc.).

Primo passo nella trasmissione ed elaborazione dei dati è il corretto uso delle unità di misura: da utilizzare i mg/l (corrispondenti ai ppm = parti per milione) per i risultati bruti. Per i grafici di sintesi usare i pesi molari che vengono espressi in milliequivalenti/litro (meq/l). Se non si vogliono fare i calcoli chimici esistono semplici tabelle per la trasformazione rispettiva delle due unità di misura.

Per le durezza vengono ancora comunemente usate altre unità di misura (riportate ad esempio in diversi tests kits): il grado tedesco (°d) (corrispondente a 0,357 meq/l e a 17,80 ppm) e il grado francese (°f), usato in diversi grafici (corrispondente a 0,200 meq/l e a 10 mg/l).

Prima di elaborare i dati (sia sotto forma di tabelle, sia di grafici che sono il lettore universale) bisogna controllare l'attendibilità delle nostre analisi (e d'ora in poi ci riferiamo ad uno spettro chimico completo, almeno all'analisi degli otto elementi chimici preponderanti): è quello che si chiama bi-

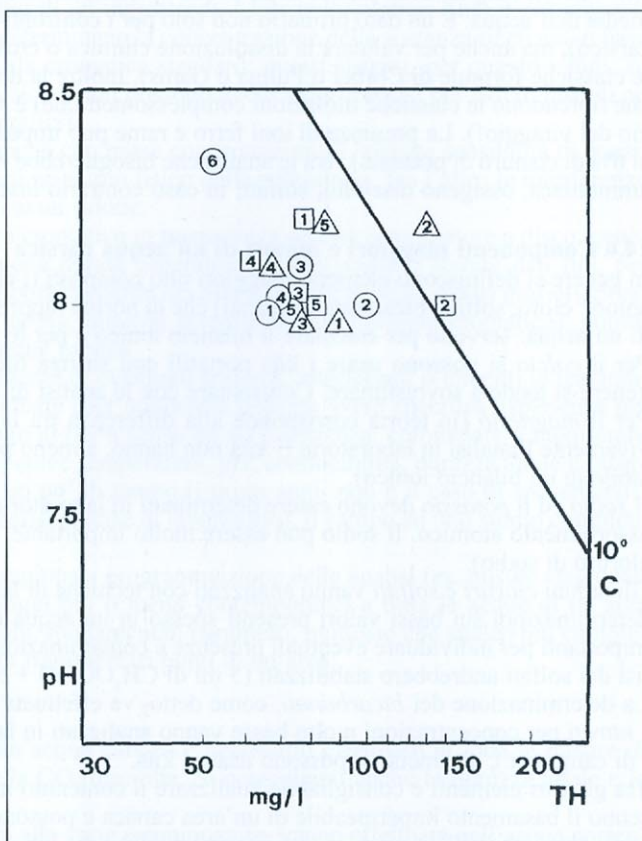


Fig. 15: Esempio di diagramma ph - durezza totale (sec. Roques). La diversa riquadratura dei numeri delle sorgenti si riferisce a periodi diversi di monitoraggio (dis. G. Calandri, C. Grippa)



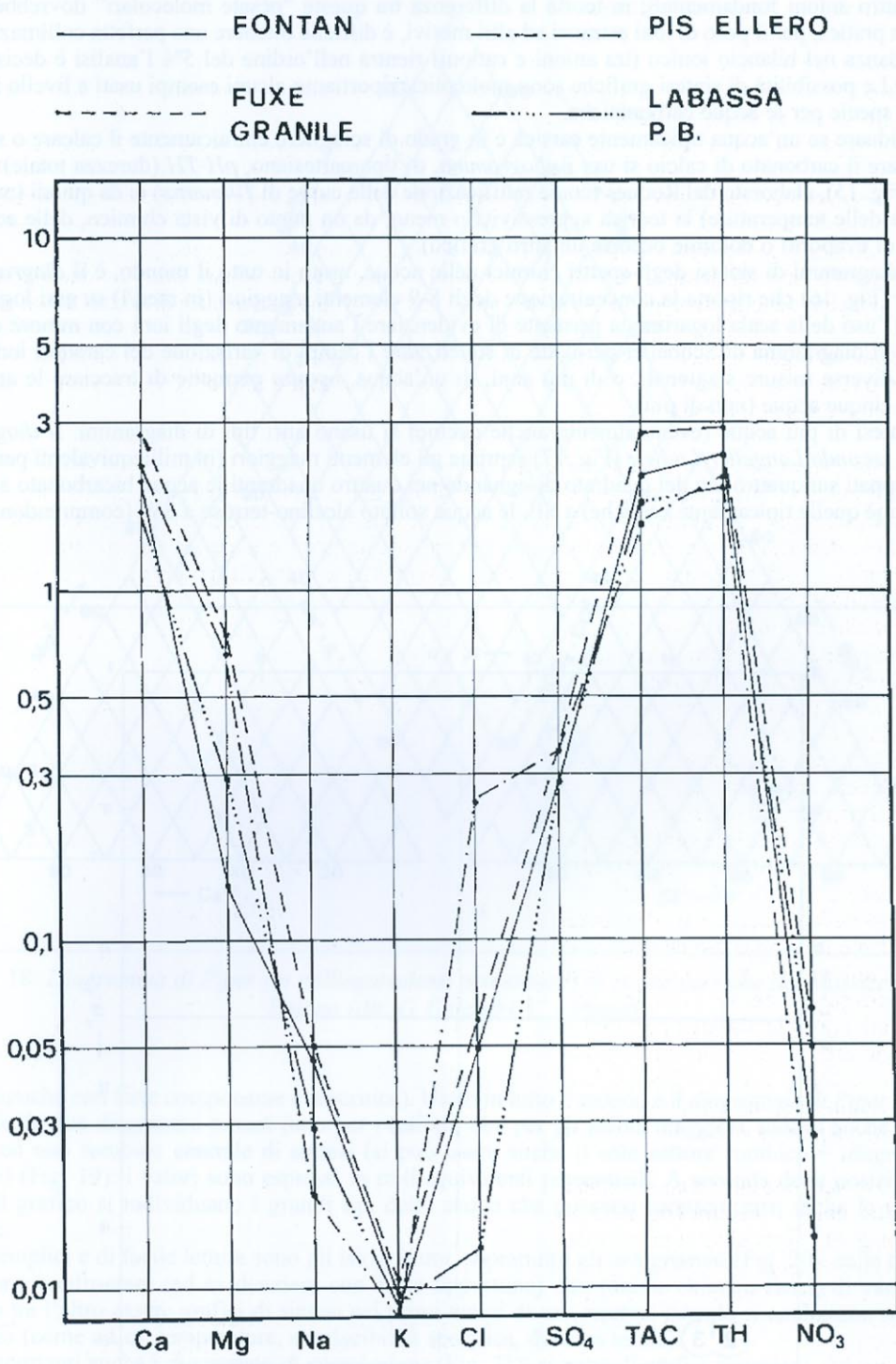


Fig. 16: Diagramma di Schoeller (in milliequivalenti percentuali) di alcune acque carsiche delle Alpi Liguri (dis. G. Calandri, C. Grippa)



lancio ionico di un'acqua. In pratica si devono sommare i valori molari (meq/l) dei quattro cationi principali e dei quattro anioni fondamentali; in teoria la differenza tra queste "pesate molecolari" dovrebbe essere uguale, in pratica, per il peso di ioni estranei ed altri motivi, è difficile ottenere una perfetta collimazione: se la discordanza nel bilancio ionico (tra anioni e cationi) rientra nell'ordine del 5% l'analisi è decisamente affidabile. Le possibilità di sintesi grafiche sono molteplici: riportiamo alcuni esempi usati a livello internazionale e specie per le acque carbonatiche.

Per individuare se un'acqua tipicamente carsica è in grado di sciogliere chimicamente il calcare o se tende a depositare il carbonato di calcio si usa il *diagramma*, di tipo cartesiano, *pH-TH* (durezza totale): questo grafico (Fig. 15), elaborato dal Roques (come rettificazione delle curve di *Tillmans*) ci dà quindi (modulata a seconda delle temperature) la teorica aggressività o meno, da un punto di vista chimico, delle acque (in presenza di evaporiti o dolomie occorre un altro grafico).

Uno dei diagrammi di sintesi degli spettri chimici delle acque, usato in tutto il mondo, è il *diagramma di Schoeller* (Fig. 16) che riporta la concentrazione degli 8-9 elementi maggiori (in meq/l) su assi logaritmici verticali (l'uso della scala logaritmica permette di evidenziare l'andamento degli ioni con minore concentrazione). Il diagramma di Schoeller permette di sintetizzare i campi di variazione dei caratteri ionici nell'arco di diverse misure stagionali, o di più anni, di un'acqua, oppure permette di tracciare le analisi di quattro o cinque acque (non di più).

Per la sintesi di più acque (eventualmente anche decine) si usano altri tipi di diagrammi. Il *diagramma graduato secondo Langelier-Ludwig* (Fig. 17) esprime gli elementi maggiori (in milliequivalenti percentuali) raggruppati sui quattro lati del quadrato disegnando nei quattro quadranti le acque bicarbonato alcalino-terrose (cioè quelle tipicamente carsiche) a SE, le acque solfato alcalino-terrose a SW (comprendono anche

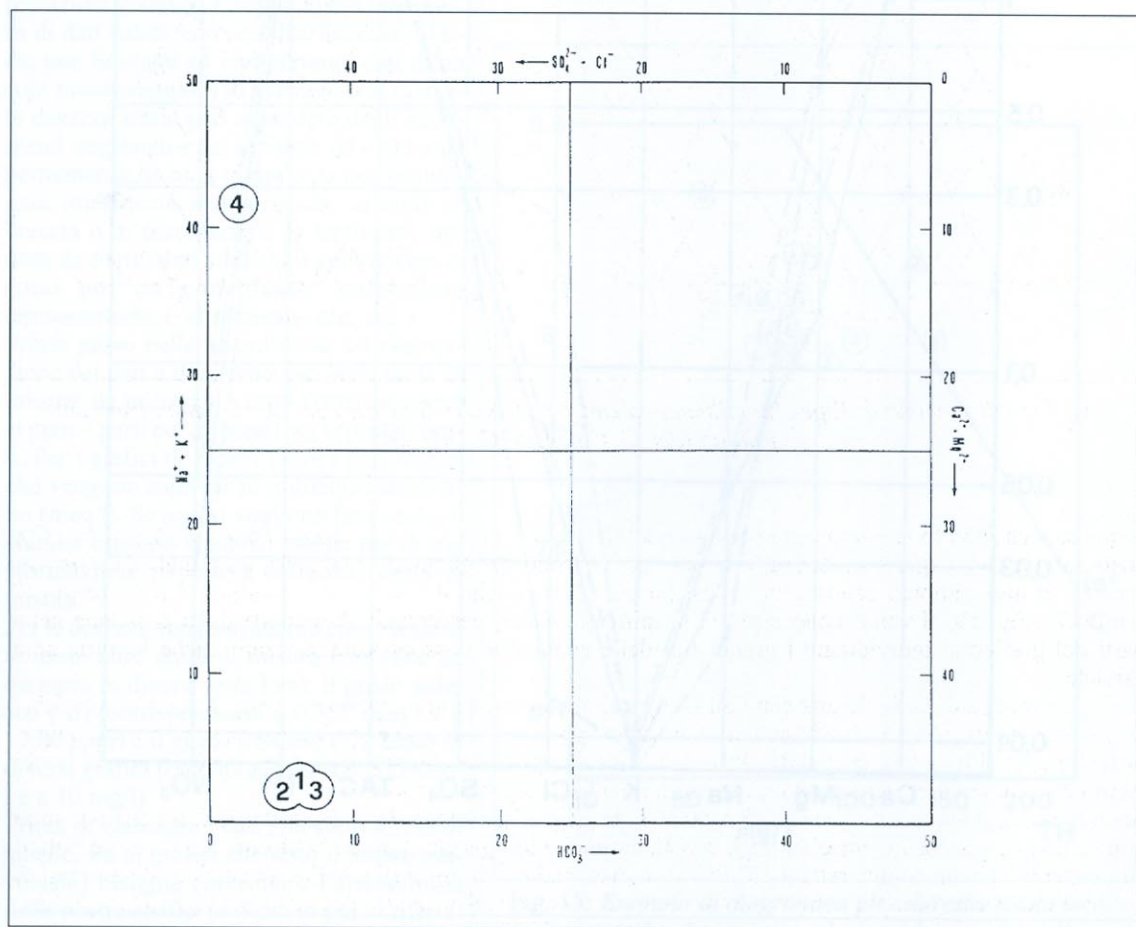


Fig. 17: Diagramma quadrato di Langelier - Ludwig di alcune acque dei gessi crotonesi (quadrante SW acque solfato calciche, quadrante NW acque a dominanza halitica (dis. G. Calandri, C. Grippa)



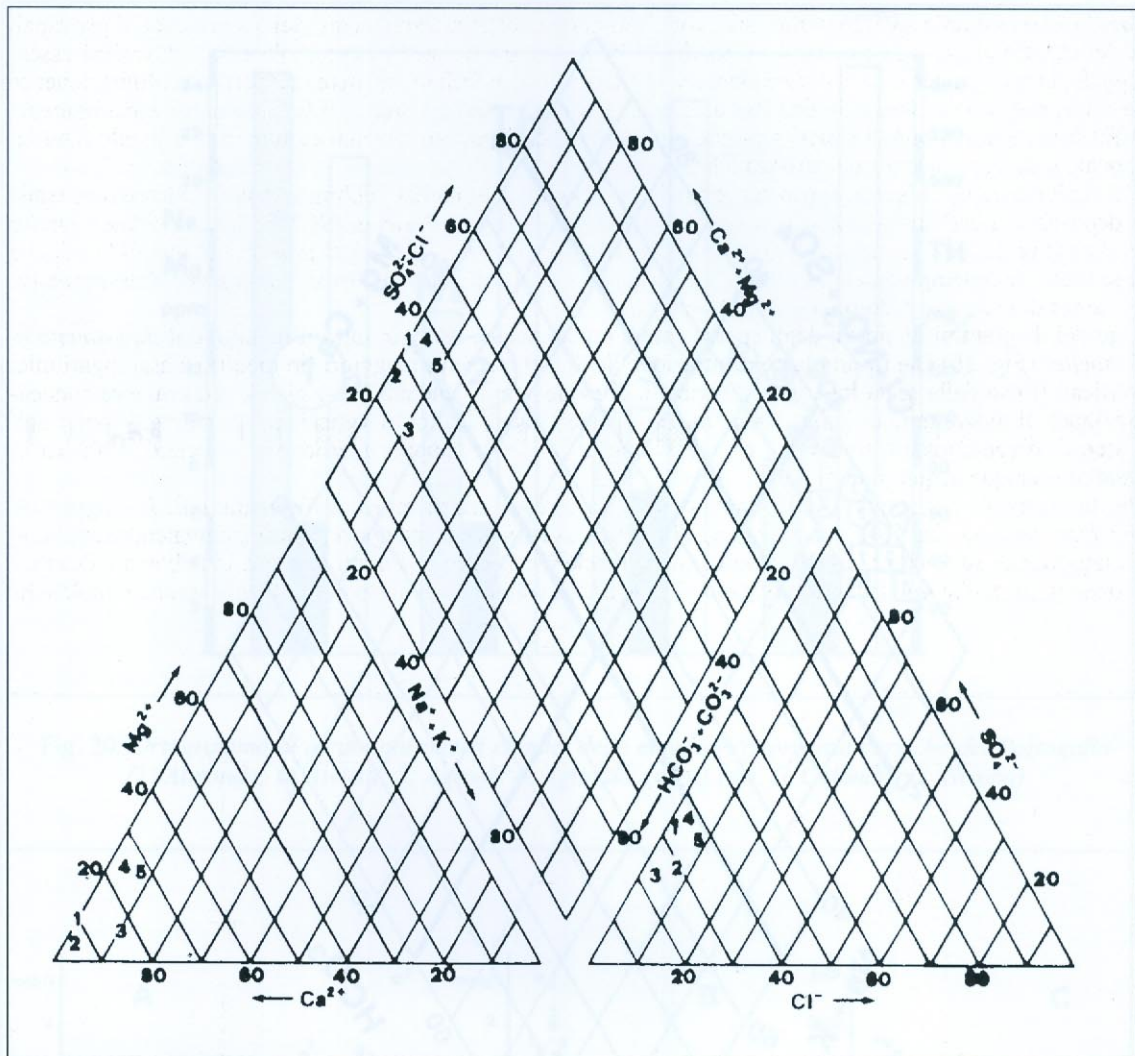


Fig. 18: Diagramma di Piper (in milliequivalenti percentuali) di acque carsiche del Massiccio del Pollino (dis. G. Calandri, C. Grippa)

acque carsiche con forte componente evaporitica). Usato in tutto il mondo è il *diagramma di Piper* (Fig. 18), costituito da due diagrammi ternari (uno per i cationi, uno per gli anioni maggiori, usabili anche separatamente) ed un rombo centrale di sintesi (si può usare anche il solo settore rombico = *diagramma di Languth*) (Fig. 19); i valori sono espressi in milliequivalenti percentuali. A seconda della posizione nelle parti del grafico si individuano i grandi tipi delle acque che possono caratterizzare anche le varie aree carsiche.

Molto semplici e di facile lettura sono gli istogrammi, soprattutto gli *ortogrammi* (Fig. 20): sulle colonnine si possono confrontare (ed evidenziare con scale opportune) dati (anche chimico-fisici) di varie acque. Possono tra l'altro essere grafici di sintesi nei primi tempi di una ricerca, quando si analizzano solo pochi parametri (come ad es. temperature, conducibilità specifica, durezza totale).

Sono importanti anche i *diagrammi di correlazione* (Fig. 21): si tratta di grafici cartesiani, sui cui assi sono confrontati due elementi, correlati dagli aspetti chimici e idrogeochimici: es. confrontando Calcio e Solfati se risultano allineati su una retta a 45° indicano dissoluzione di minerali a solfati di calcio. I diagrammi di correlazione permettono il confronto fra molti tipi di elementi ed anche fra decine di acque. Molto significativa è ad esempio la correlazione tra Calcio e Magnesio (il rapporto Mg/Ca ci dà una chiara idea della componente dolomitica in un acquifero carsico: ad es. un valore vicino a 1 indica come la roccia sia costituita essenzialmente da dolomia, valori intorno a 0,5-0,6 sono tipici di calcari dolomitici, mentre con rapporti



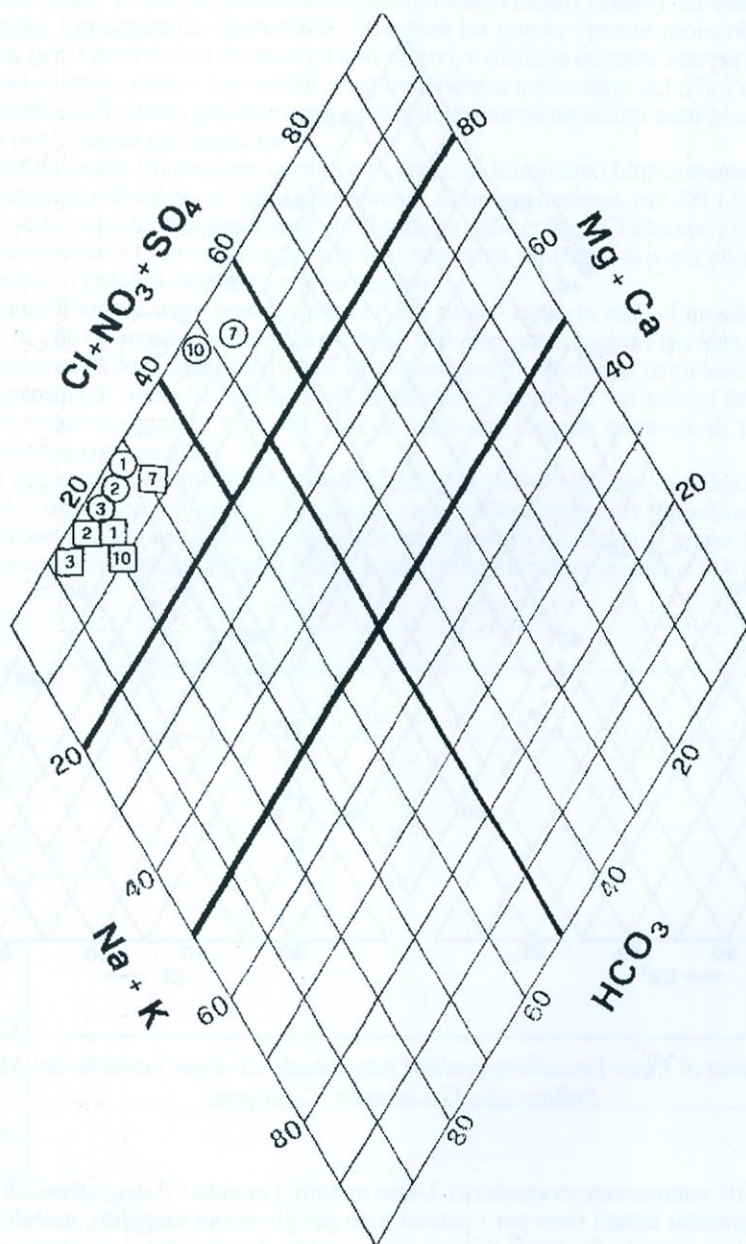


Fig. 19: Diagramma di Languth (valori espressi in percentuali di meq/l) di acque carsiche del Piano dei Cavalli (prov. Sondrio). La diversa bordatura dei numeri si riferisce a campionature in periodi diversi (dis. R. Buccelli, G. Calandri)

di 0,1-0,2 la presenza di rocce dolomitiche è pressoché nulla). In questi grafici si usano i milliequivalenti per litro.

Ovviamente esistono altri tipi di elaborazioni e di grafici, ma un uso preciso dei grafici sopra accennati è più che sufficiente per sintetizzare i dati di anni di ricerche e di analisi. Inoltre è sempre preferibile usare gli stessi tipi di visualizzazione (specie quelli usati pressoché universalmente).



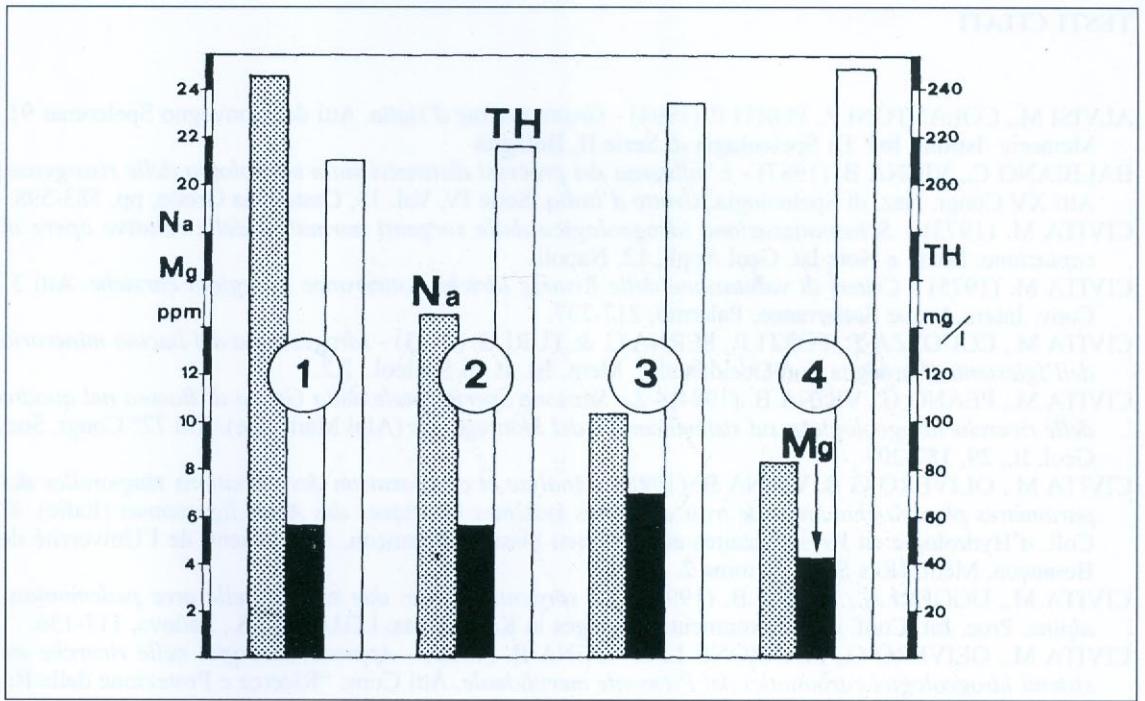


Fig. 20: Ortogramma di alcuni parametri chimici delle maggiori risorgenza carsiche del Portogallo (1: Almonda; 2: Alviela; 3: Agroal; 4: Agua de Ancos) (dis. G. Calandri, C. Grippa)

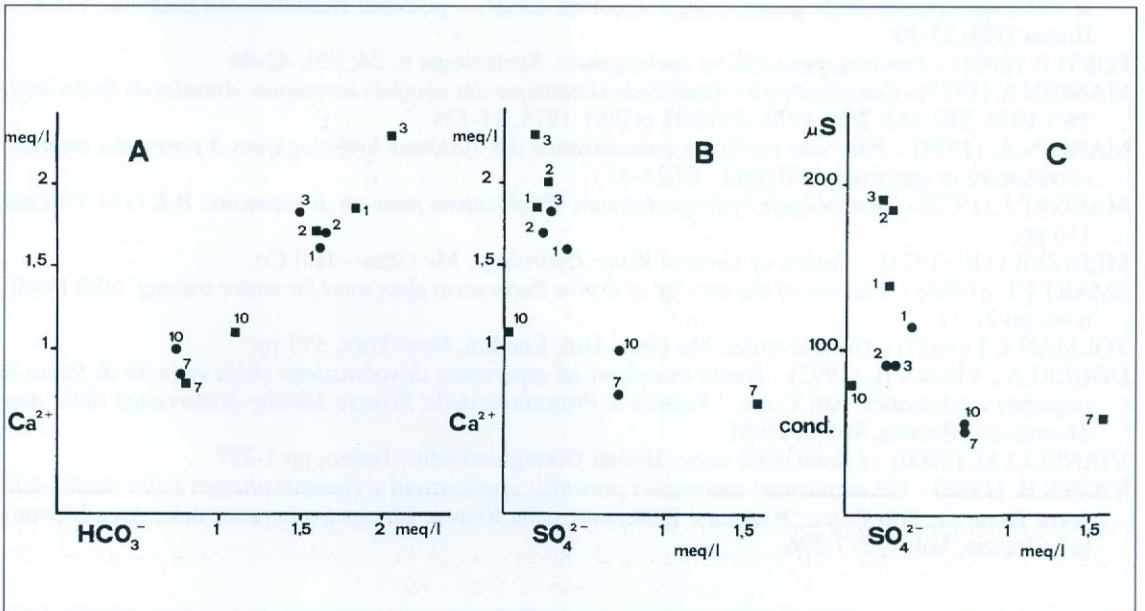


Fig. 21: Esempi di diagrammi di correlazione di acque carsiche del Piano dei Cavalli (dis. R. Buccelli, G. Calandri)



## TESTI CITATI

- ALVISI M., COLANTONI P., FORTI P. (1994) - *Grotte marine d'Italia*. Atti del Convegno Speleomar 91, Memorie Istituto Ital. Di Speleologia -6 Serie II, Bologna
- BALBIANO C., VIGNA B. (1987) - *L'influenza dei processi distensivi sulla morfologia delle risorgenze*. Atti XV Congr. Naz. di Speleologia. *Grotte d'Italia*, Serie IV, Vol. 15, Castellana Grotte, pp. 583-598.
- CIVITA M. (1973) - *Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di captazione*. Mem. e Note Ist. Geol Appl., 12, Napoli.
- CIVITA M. (1975) - *Criteri di valutazione delle Risorse Idriche Sotterranee in regioni carsiche*. Atti 3° Conv. Intern. Acque Sotterranee, Palermo, 217-237.
- CIVITA M., COCOZZA T., FORTI P., PERNA G. & TURI B. (1983) - *Idrogeologia del bacino minerario dell'Iglesiente* (Sardegna Sud-Occidentale). Mem. Ist. It. di Speleol., 2,2.
- CIVITA M., PEANO G., VIGNA B. (1984) - *La Stazione Sperimentale della Grotta di Bossea nel quadro delle ricerche idrogeologiche sui sistemi carsici del Monregalese* (Alpi Marittime). Atti 72° Congr. Soc. Geol. It., 29, 187-207.
- CIVITA M., OLIVERO G. & VIGNA B. (1988) - *Analyse et comparaison des variations temporelles des paramètres physico-chimiques de trois différents systèmes karstiques des Alpes liguriennes* (Italie). 4° Coll. d'Hydrologie en Pays Calcaires et en Milieu Fissuré, Besançon, Ann. Scient. de l'Université de Besançon, Mèm. Hors Série, 6, tome 2.
- CIVITA M., UGGERI A., VIGNA B. (1991) - *Le sorgenti sepolte: due esempi nelle aree pedemontane alpine*. Proc. Int. Conf. on Environmental Changes in Karst Areas. I.G.U. - U.I.S., Padova, 117-136.
- CIVITA M., OLIVERO G., MANZONE L. & VIGNA B. (1992) - *Approcci sinergici nelle ricerche sui sistemi idrogeologici carbonatici del Piemonte meridionale*. Atti Conv. "Ricerca e Protezione delle Risorse Idriche Sotterranee delle Aree Montuose", Brescia, Vol. 1, 53- 86.
- CIVITA M., PEANO G., VIGNA B. (1999) - *Primi risultati dello studio dell'insaturo carbonatico nel sistema di Bossea* (Alpi Liguri - Piemonte Meridionale). Atti "3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio", Parma 13-15/10/1999
- FORTI P. (1998) - *Gli acquiferi carsici: problematiche per il loro studio ed utilizzo*. Atti Convegno nazionale sull'inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività. Ponte di Brenta (PD), 13-39
- FORTI P. (1991) - *Processi ipercarsici e speleogenesi*. Speleologia n. 24, SSI, 42-46
- MANGIN A. (1975) - *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. *Annales de Speleologie* 29/3 1974, 282-332; 29/4 1974, 495-601 et 30/1 1975, 21-124
- MANGIN A. (1984) - *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale*. *J. Hydrol.*, 67, 25-43
- MARGAT J. (1972) - *Terminologie hydrogeologique. Propositions pour un dictionnaire*. B.R.G.M. Orléans, 136 pp.
- MEINZER O.E. (1923) - *Outline of Ground Water Hydrology*. Mc Graw - Hill Co.
- SMART P.L. (1984) - *A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing*. NSS Buull., n 46, pp 21-31
- TOLMAN C.F. (1937) - *Ground water*. Mc Graw-Hill, London, New-York, 593 pp.
- UGGERI A., VIGNA B. (1992) - *Nuovi traccianti ed esperienze di valutazione della velocità di flusso in acquiferi carbonatici*. Atti Conv. "Ricerca e Protezione delle Risorse Idriche Sotterranee delle Aree Montuose", Brescia, Vol. 1, 29-51
- VIANELLI M. (2000) - *I fiumi della notte*. Bollati Boringhieri edit., Torino, pp 1-327
- VIGNA B. (1992) - *Gli acquisitori automatici portatili: applicazioni e risultati ottenuti nello studio delle rocce fessurate*. Atti Conv. "Ricerca e Protezione delle Risorse Idriche Sotterranee delle Aree Montuose", Brescia, Vol. 1, 277-296.





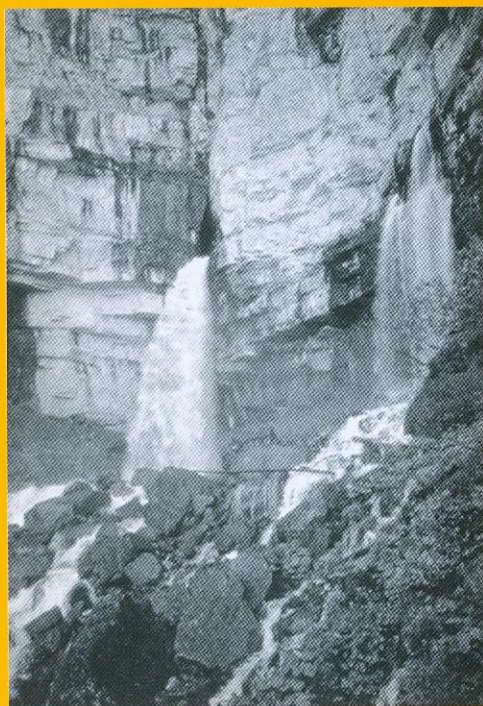
## QUADERNI DIDATTICI

Società  
Speleologica  
Italiana

È ormai passato più di un quarto di secolo da quando, con il Manuale di Speleologia, edito dalla Longanesi, la speleologia italiana tentò di darsi un testo di riferimento complessivo sulla speleologia, intesa nei suoi vari aspetti di “discorso sul mondo sotterraneo”. Da allora le numerose scuole di speleologia in Italia hanno avvicinato al mondo delle grotte molte decine di migliaia di persone ma, stranamente, senza riprendere il progetto di dare un ausilio didattico completo a chi realizzava e seguiva i corsi.

In passato la Società Speleologica Italiana ha provveduto a coprire il settore più critico, quello delle tecniche di progressione sicura in grotta, con una serie di testi ma gran parte degli altri argomenti rimanevano totalmente scoperti.

Un paio d'anni fa il Direttivo ha deciso di rimettere mano al progetto, articolandolo in una serie completa di Quaderni Didattici. Lo scopo, naturalmente, era quello di fornire manualistica ai corsi tenuti dalla Commissione Nazionale Scuole di Speleologia della SSI, ma strada facendo ci siamo accorti che, più ambiziosamente, potevamo cercare di dare un'informazione dettagliata sul mondo delle grotte anche ad un pubblico ben più vasto, trattandone tutti gli aspetti: Geomorfologia e Speleogenesi, Rilievo, Speleologia in Cavità Artificiali, Impatto dell'Uomo sull'Ambiente, Tecniche di Base, Storia della Speleologia, Geologia per Speleologi, Clima, Reazioni a Emergenze, Primo Soccorso, Idrogeologia Carsica, Immagini, Documentazione, Organizzazione della Speleologia, Grandi Grotte del Mondo, Vita nelle Grotte, Depositi chimici, Riempimenti e altri in progetto. Siamo sicuri che questa iniziativa sarà un passo importantissimo per una migliore conoscenza del mondo sotterraneo.



*Sorgenti del sistema carsico del Pesio  
(Piemonte)*