Cenni di idrogeologia dei sistemi carsici

Pieruccioni Diego

diegopieruccioni@isprambiente.it

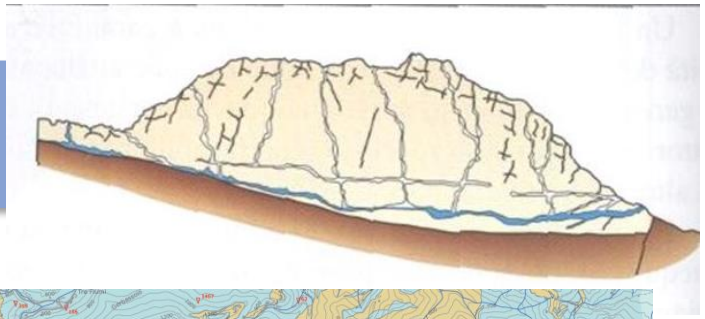
Corso nazionale di aggiornamento culturale online in Geologia

12-28 Novembre 2024

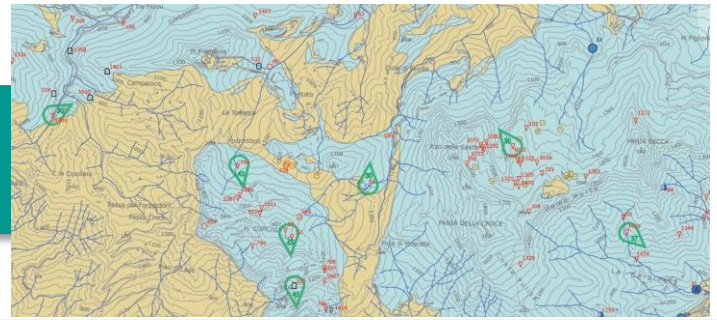
Acquiferi fessurati e acquiferi carsici

Zonazione di un sistema carsico

Funzionamento di un sistema carsico



Studio degli acquiferi carsici



Acquiferi fessurati

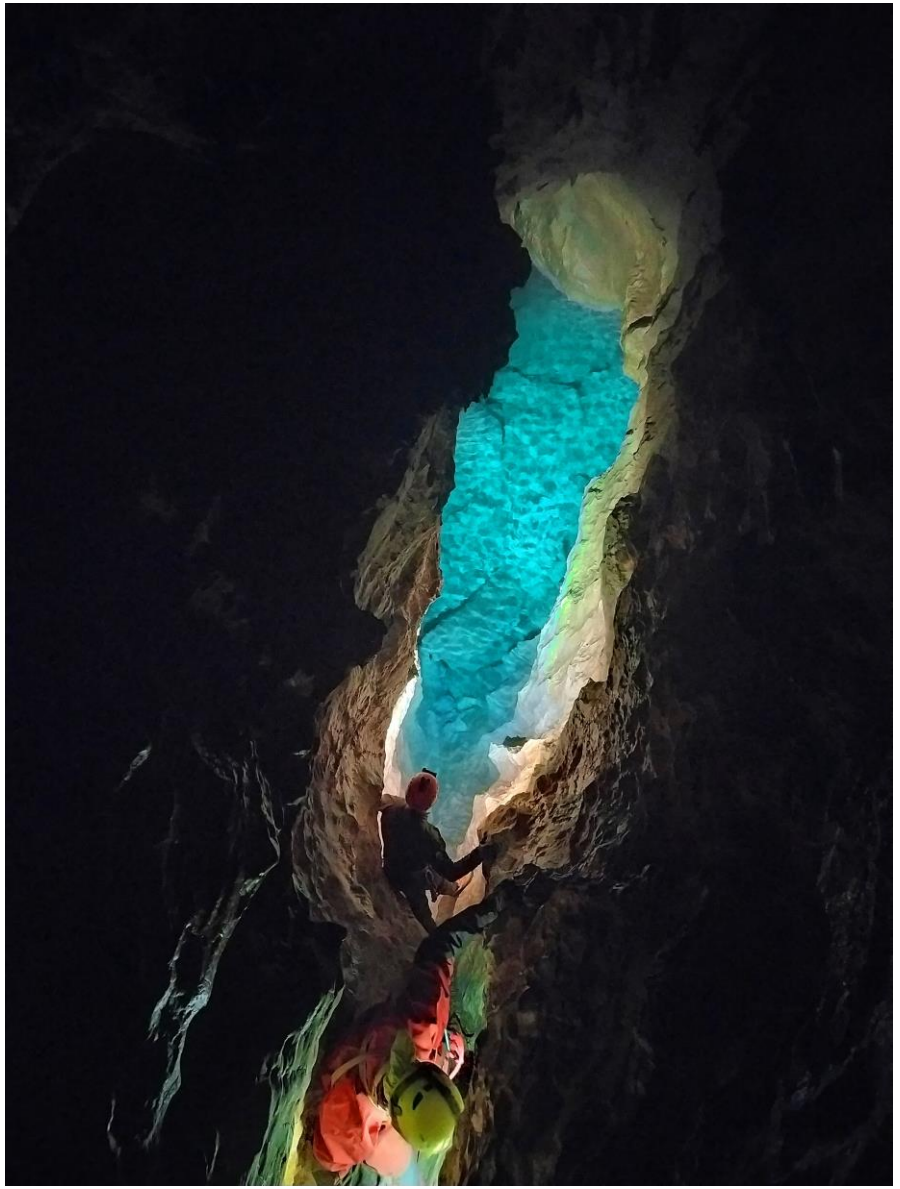
Gli **acquiferi in roccia** sono tradizionalmente meno studiati degli acquiferi porosi per alcuni motivi:

- **sono ritenuti meno importanti nella ricerca idrica**;
- **si dispone di un minor numero di dati quantitativi**;
- **sono di difficile modellazione**, appartenendo a sistemi complessi quali gli ammassi rocciosi.

Del resto la presenza di fratture riveste un ruolo fondamentale nella caratterizzazione idrogeologica di un ammasso roccioso, con variazioni di conducibilità idraulica anche di alcuni ordini di grandezza lungo la direzione delle fratture stesse.

Possono inoltre esserci in superficie fasce di alterazione della roccia, che condizionano l'infiltrazione, o zone a diversa entità di fratturazione all'interno di uno stesso ammasso roccioso, fenomeni che variano drasticamente le caratteristiche idrauliche.

Gli acquiferi fessurati, quindi, oltre ad essere **disomogenei** e **anisotropi**, sono in genere **discontinui**. Possono essere considerati continui solo quelli dotati di molteplici e fitti sistemi di discontinuità.



Lago Nero (Alpi Apuane)

Acquiferi fessurati

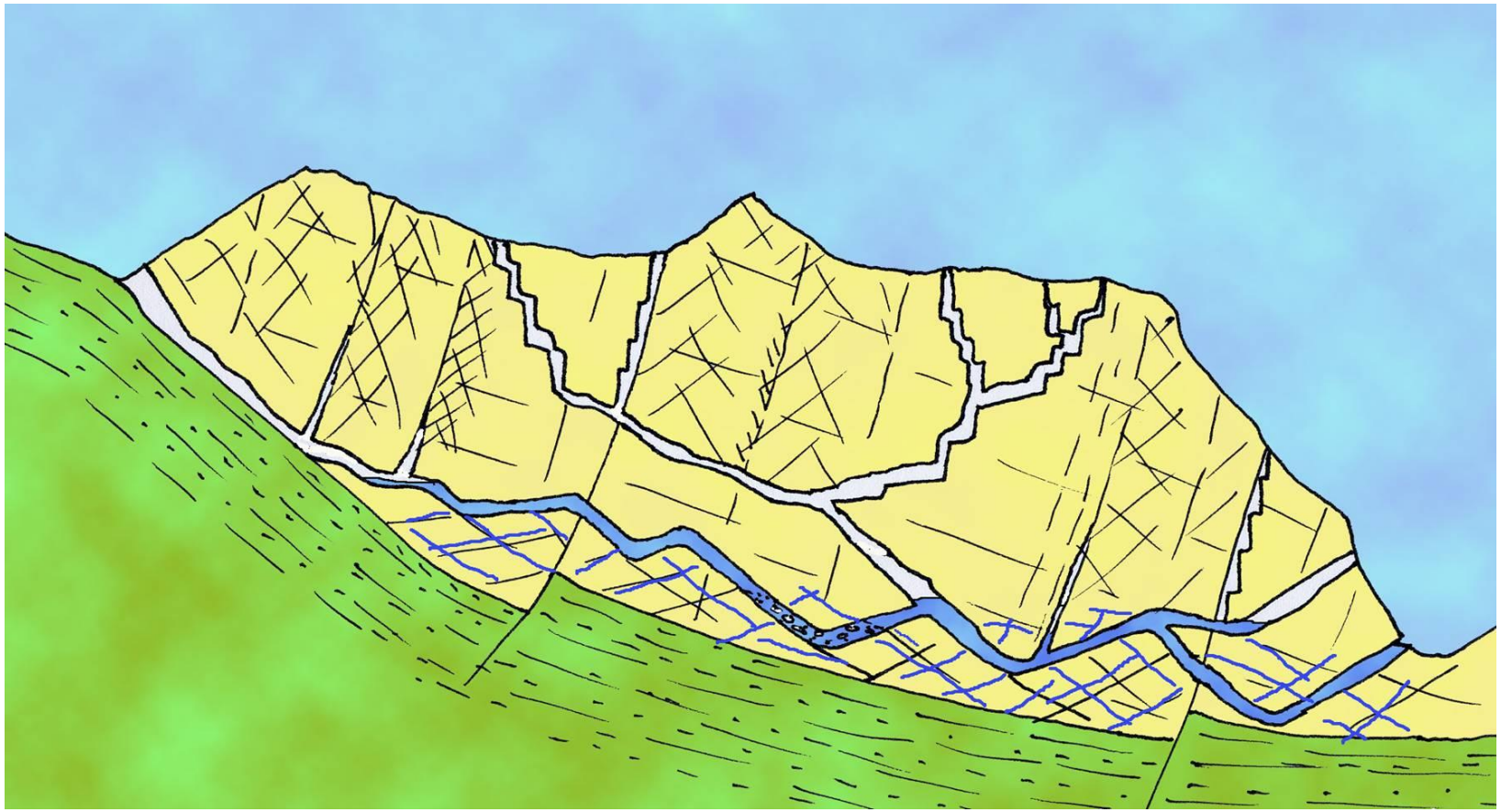
Negli ammassi rocciosi fessurati:

- **entità di infiltrazione**
- **modalità di infiltrazione**
- **circolazione sotterranea**
- **restituzione delle acque**

sono intrinsecamente collegate alla geometria dell'ammasso roccioso e al suo stato di fratturazione.

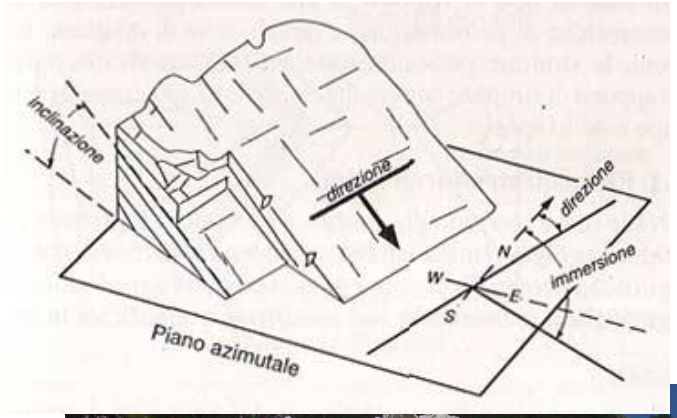
L'elaborazione di un modello idrogeologico di un sistema fessurato deve quindi partire da due obiettivi:

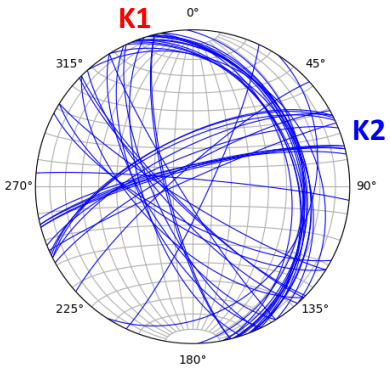
1. **identificazione geometrica del serbatoio**;
2. **identificazione delle discontinuità che condizionano il drenaggio** dell'ammasso roccioso.



Schema di un acquifero fessurato (da Vigna, 2009)

Identificazione delle discontinuità che condizionano il drenaggio





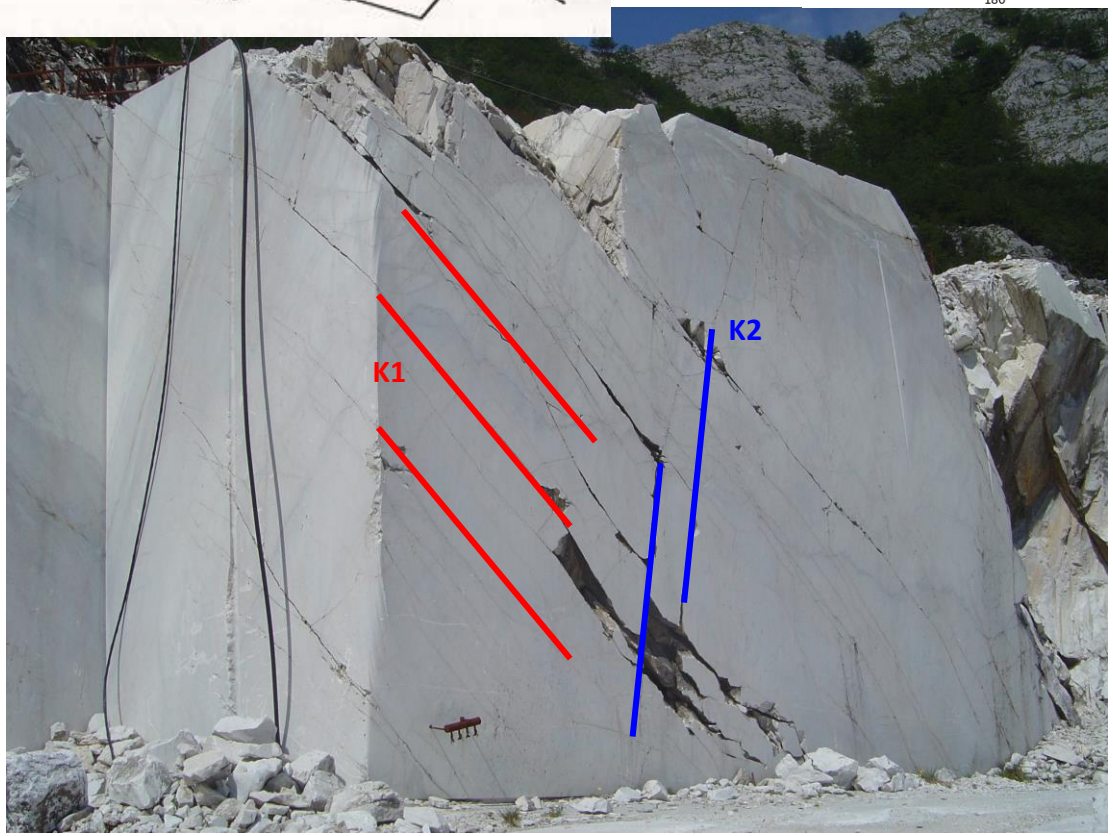
Le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso sono raggruppabili in famiglie sulla base della loro orientazione, che, per quanto possa avere valori più o meno dispersi costituisce l'intorno di un valore modale caratteristico per ogni singola famiglia.

La giacitura di una discontinuità è definita attraverso direzione, immersione e inclinazione.

I sistemi di discontinuità determinano, con la loro giacitura, una spiccata orientazione del flusso idrico.

Le grandezze che permettono di descrivere lo stato e le caratteristiche di fratturazione di un ammasso roccioso sono:

- **Spaziatura delle discontinuità**: distanza media tra le discontinuità della stessa famiglia.
- **Intensità di fratturazione**: numero di discontinuità per metro.
- Rock Quality Designation (**RQD**): in un sondaggio % di spezzoni di carota superiori a 10 cm.
- **Persistenza**: estensione delle discontinuità.
- **Apertura**: distanza tra le pareti delle discontinuità.
- **Riempimento**: materiale di riempimento delle discontinuità.

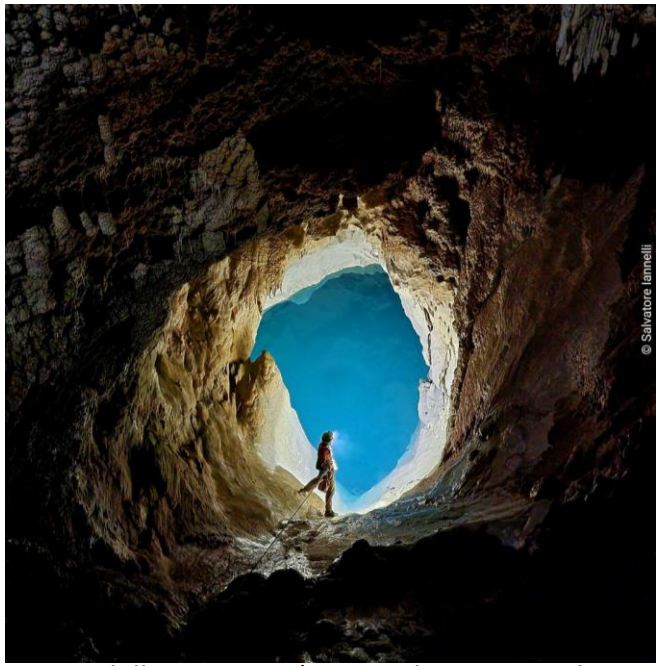


Sistemi di discontinuità tagliate in un fronte di cava (M. Altissimo, Alpi Apuane)

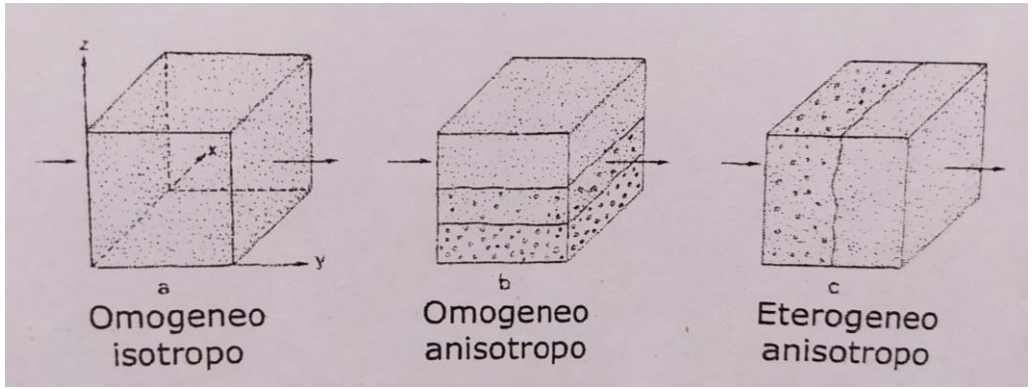
Acquiferi carsici

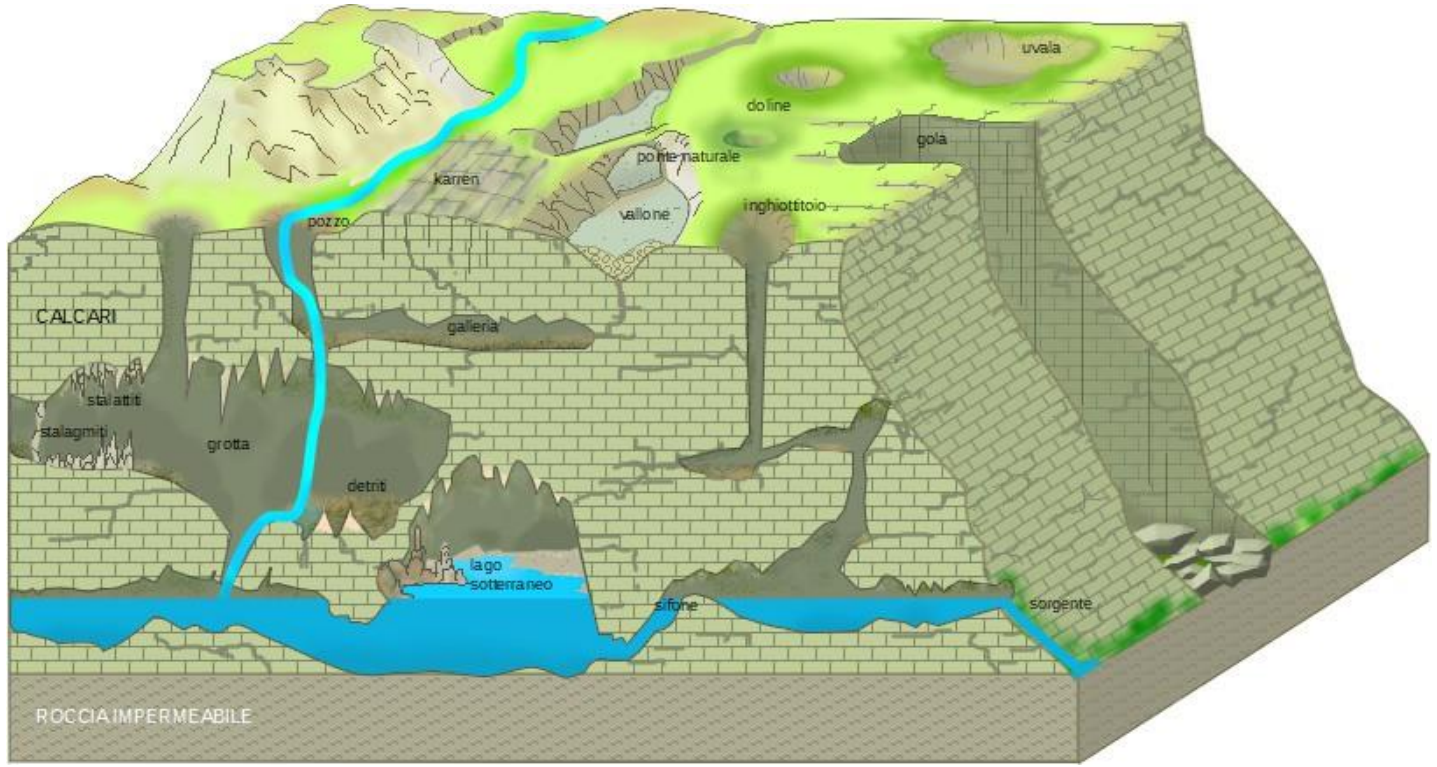
Gli **acquiferi carsici** fanno parte degli **acquiferi fessurati** e, come tali, ne riassumono e spesso ne amplificano le proprietà precedentemente esposte (**disomogenei**, **anisotropi**, **discontinui**).

Il modello idrogeologico è necessariamente una semplificazione del sistema reale!!



Lago dello svizzero (Grotta di Frasassi; da S. Iannelli)





Schema di un sistema carsico

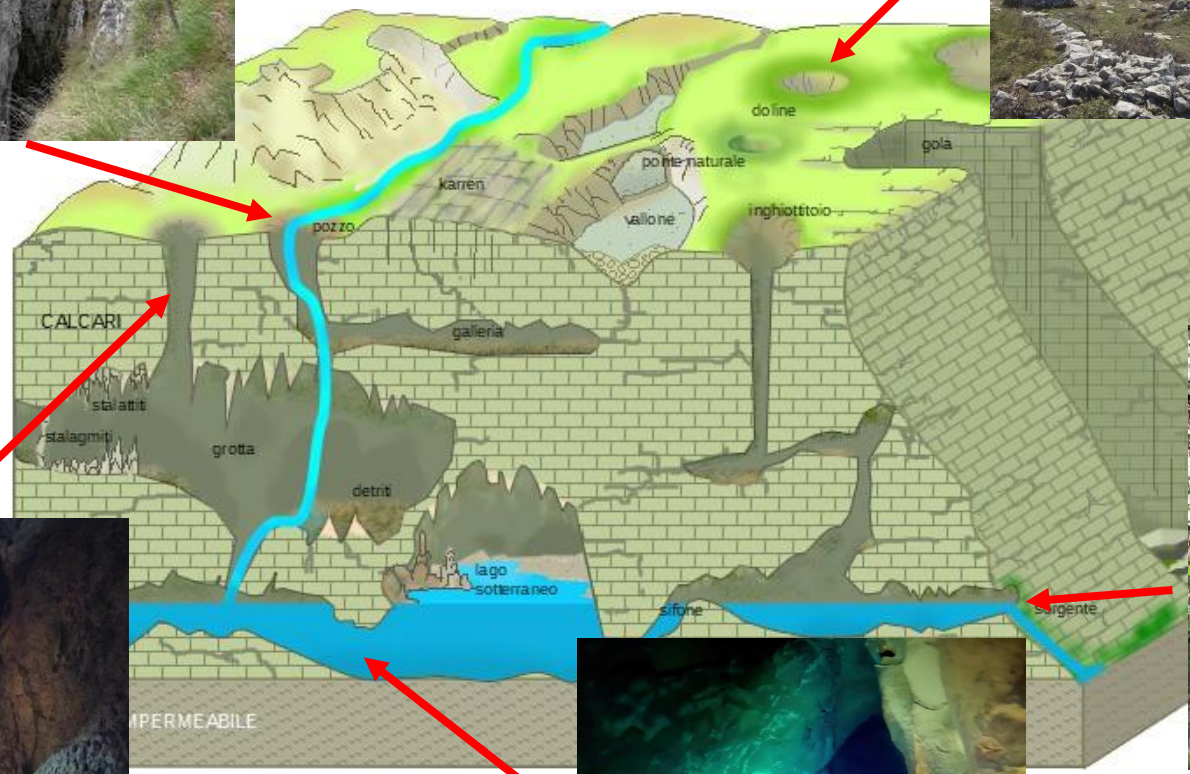
Sistema carsico 1

In senso idrogeologico, il termine **sistema carsico** è entrato nell'uso comune per riferirsi all'**insieme di forme superficiali e profonde che costituiscono il sistema di assorbimento, drenaggio e recapito delle acque** superficiali e meteoriche, **verso uno più punti di emergenza**.

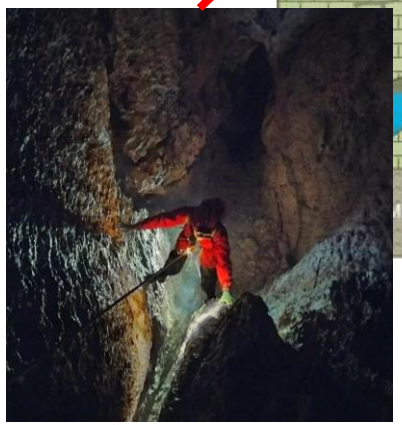
Da un punto di vista idrogeologico, la conseguenza più importante dei fenomeni carsici è quella di dare ad una roccia un elevato **coefficiente di infiltrazione**. Nelle aree carsiche tale coefficiente supera il **50%** del totale delle precipitazioni, ed in alcuni casi può raggiungere il **90%**. Ciò comporta esiguo ruscellamento superficiale e trasporto solido.

Ingresso cavità (Abisso Revel, Alpi Apuane)

Dolina (Majella)

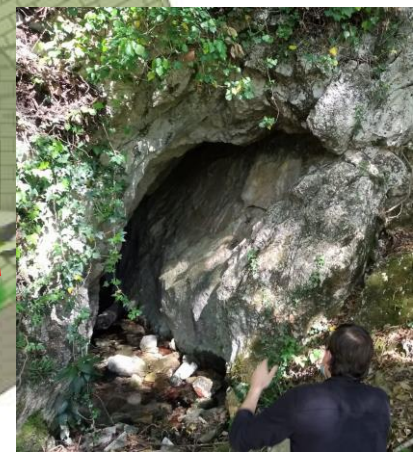


Schema di un sistema carsico



Pozzo (Buca dei Tunnel, Alpi Apuane)

Galleria freatica attiva (Pollaccia, Alpi Apuane; da L. Casati)



Sorgente del Muglione (Alpi Apuane)

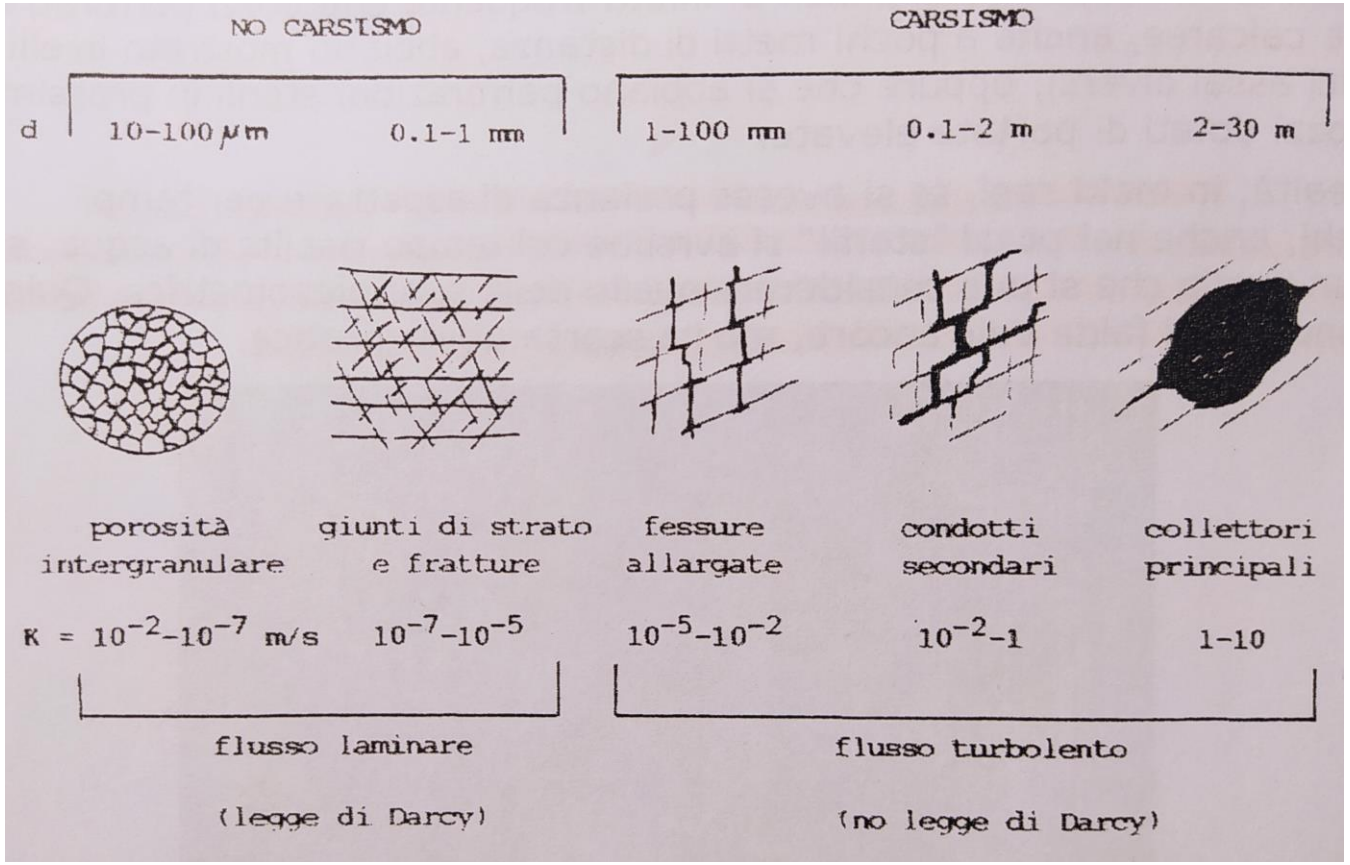
Caratteri idrogeologici degli acquiferi carsici: porosità e permeabilità

La **porosità** è il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale della roccia.
La **permeabilità** invece rappresenta l'attitudine di una roccia a lasciarsi attraversare dall'acqua.

In un acquifero carsico **si possono trovare diversi tipi di porosità**, sia primaria (legata alla formazione della roccia) che secondaria (legata al processo di fratturazione).

Pertanto, lo studio idrogeologico di un acquifero carsico presenta problematiche particolari, venendo a mancare i principali assunti che permettono una trattazione matematica relativamente semplice. Infatti:

- un acquifero carsico **non può essere considerato un mezzo omogeneo e isotropo**;
- **il flusso non avviene in condizione di regime laminare** (non è valida la legge di Darcy)



Caratteri idrogeologici degli acquiferi carsici: piezometria

Anche il concetto di **superficie piezometrica** (superficie superiore di un acquifero in cui la pressione dell'acqua è uguale alla pressione atmosferica) **per un acquifero carsico assume aspetti particolar**i.

Ancora oggi si ricorda lo scontro tra due massimi studiosi dell'800 degli acquiferi carsici:

- **Martel**: sosteneva che le acque in un sistema carsico circolassero solo in condotti ben definiti e che quindi non si potesse parlare di falda.
- **Grund**: al contrario, ne sosteneva l'esistenza.

In realtà entrambi avevano ragione; in altre parole, **un acquifero carsico è caratterizzato sia da condotti con deflusso concentrato, sia da fala in rete di micro-fratture**.

In sintesi, in un acquifero carsico si ha un sistema di canali a deflusso concentrato, scavati in un ammasso roccioso caratterizzato da un sistema di fratture poco o nulla allargate per corrosione e dotate di permeabilità relativamente bassa. A seconda dell'entità e della modalità di infiltrazione si avrà **alimentazione dei canali da parte della falda o viceversa**.

Il problema di una superfice piezometrica non definita si concretizza ad es. con la realizzazione di pozzi. È infatti frequente che pozzi perforati in rocce carbonatiche, anche a pochi metri di distanza, abbiano mostrato livelli statici assai diversi, oppure che si abbiano perforazioni sterili in prossimità di pozzi dotati di portate elevate.

Esempio di ammasso roccioso caratterizzato da fratture di diverse dimensioni, e frattura carsificata (Alpi Apuane)

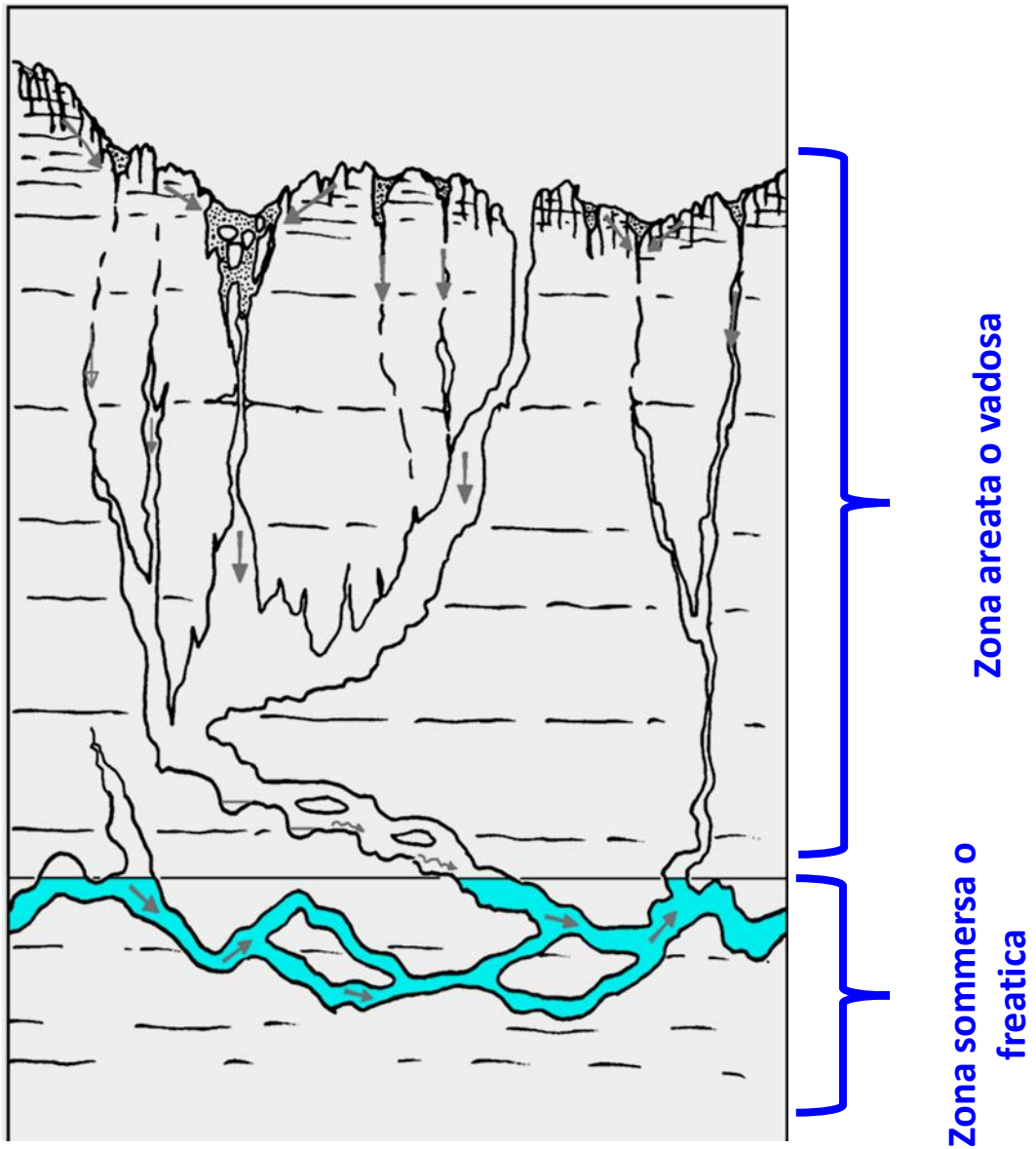
Sistema carsico 2

Un sistema carsico è dunque così definibile:
volume di roccia in cui esiste una rete di tridimensionale di fessure e condotte di dimensioni variabili, che, al di sotto di una certa superficie, più o meno regolare e corrispondente alla superficie piezometrica, sono completamente allagati.

Questo permette di distinguere due zone:

- una **zona areata**, detta anche non satura o vadosa;
- una **zona sommersa**, o satura o freatica.

Non si deve cadere nell'errore di voler ricostruire superfici piezometriche in acquiferi carsici solo sulla base di qualche pozzo, sorgente o sulla quota di fondo di alcune cavità carsiche, pretendendo magari anche di ricostruire le linee di deflusso o di calcolare la permeabilità media in base ai gradienti idraulici che ne derivano.



Schema di un sistema carsico

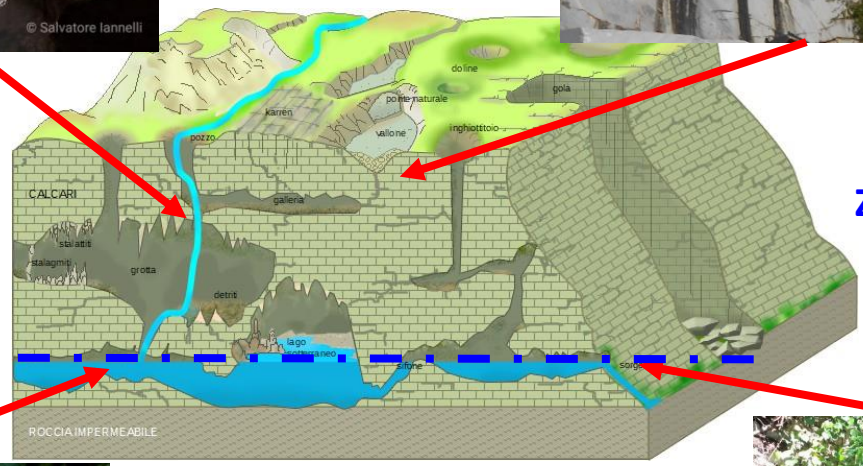
Zonazione di un sistema carsico

In un sistema carsico si possono distinguere:

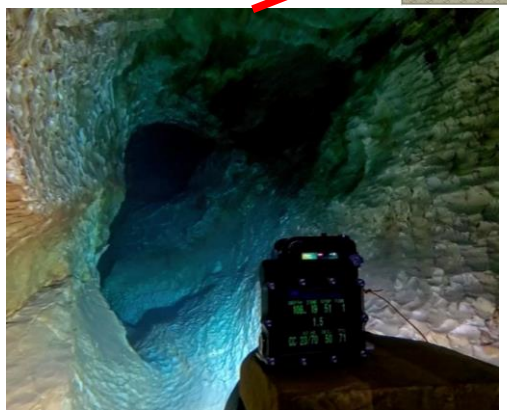
- **Area di alimentazione**: raccoglie le acque di precipitazione, di scioglimento delle nevi, di ruscellamento superficiale o anche di sistemi sotterranei non carsici.
- **Zona non satura**: circolazione idrica con percorsi prevalentemente verticali e con portate differenziate a seconda delle condizioni metereologiche e idrauliche.
- **Zona satura**: vie di drenaggio prevalentemente orizzontali, con tutti i vuoti saturi; separata in genere da una zona non satura da un orizzonte altamente carsificato.
- **Area di emergenza**: con una o più sorgenti perenni ed altre temporanee (troppo pieni), con portate più o meno variabili.

Antro del Corchia (Alpi Apuane; da S. Iannelli)

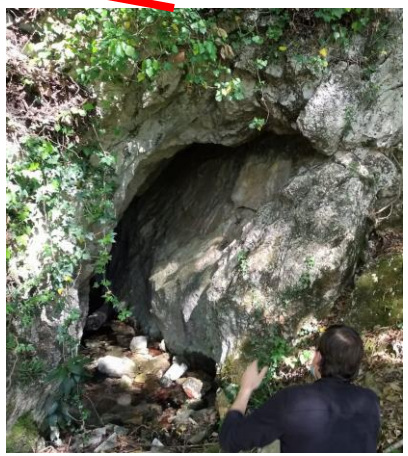
Madielle (Alpi Apuane)



Schema di un sistema carsico



Pollaccia (Alpi Apuane; da L. Casati)

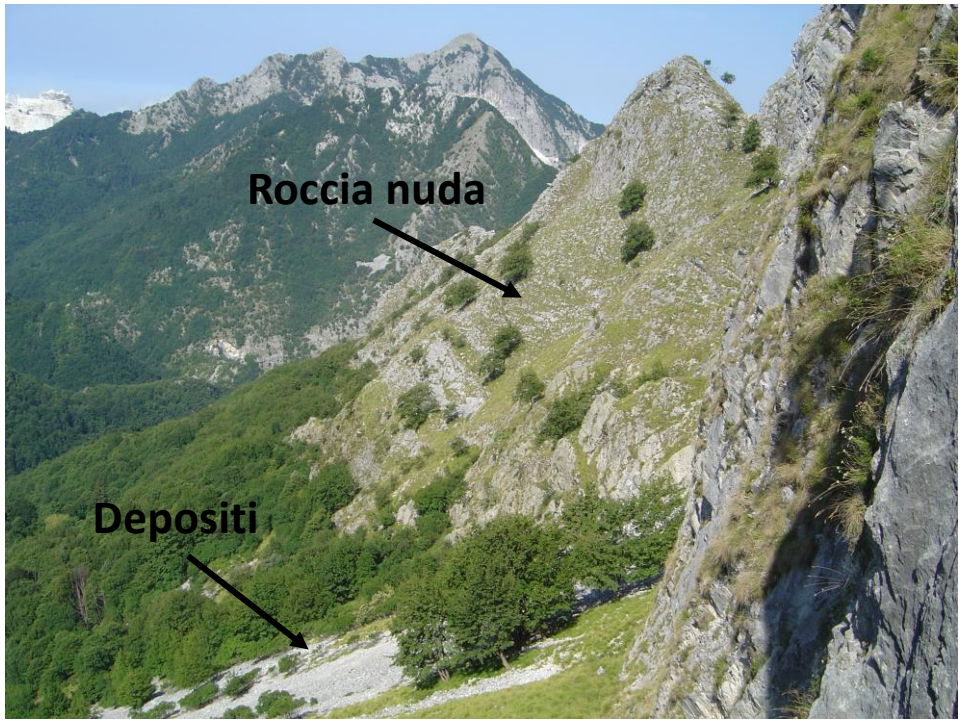


Sorgente del Muglione (Alpi Apuane)

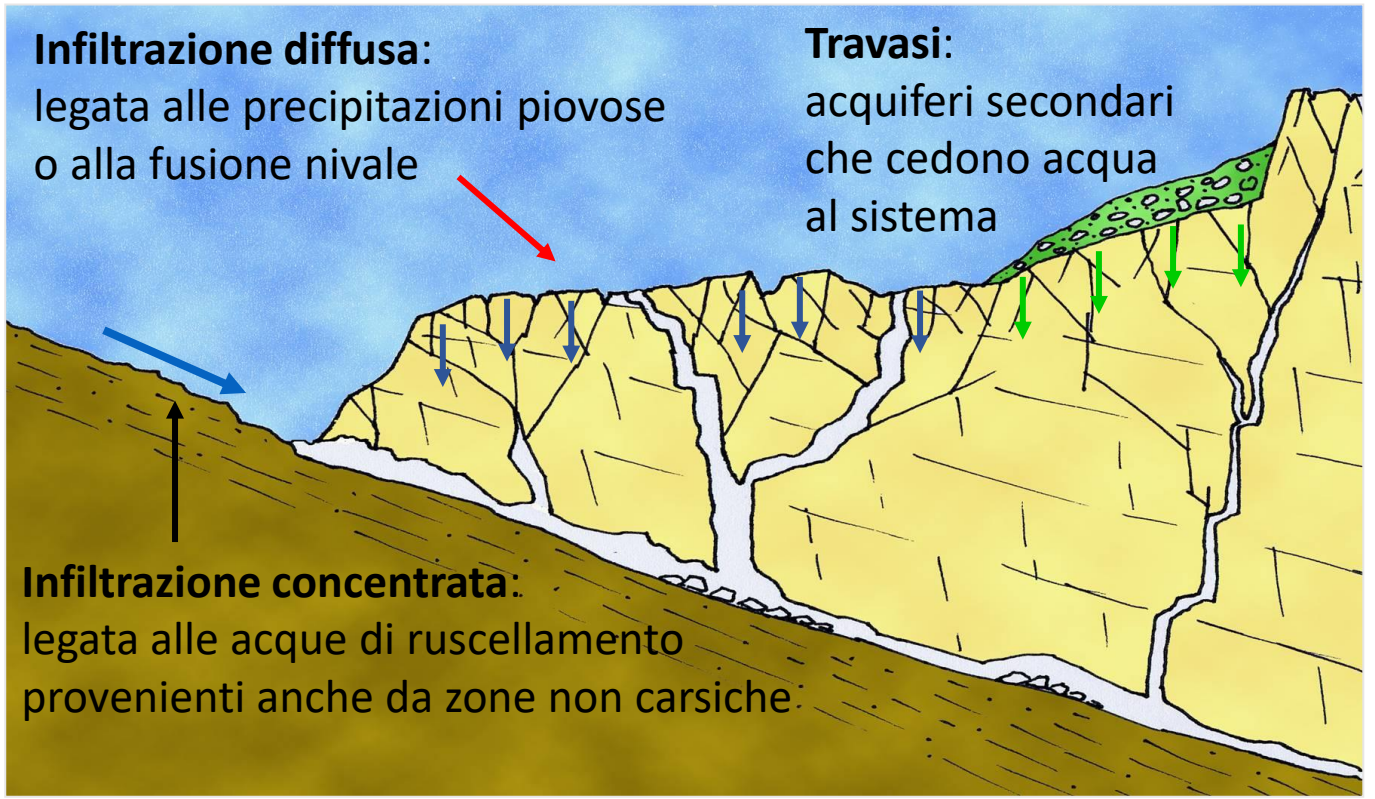
Zonazione di un sistema carsico: area di alimentazione

L'area di alimentazione è l'intera superficie del sistema carsico che può ricevere anche gli apporti idrici da versanti costituiti da rocce non carbonatiche.

La superficie può essere ricoperta da depositi eluviali o eluvio-colluviali, o presentare estese superfici di roccia nuda con sviluppo di forme di corrosione.



Area di alimentazione carsica (Alpi Apuane)



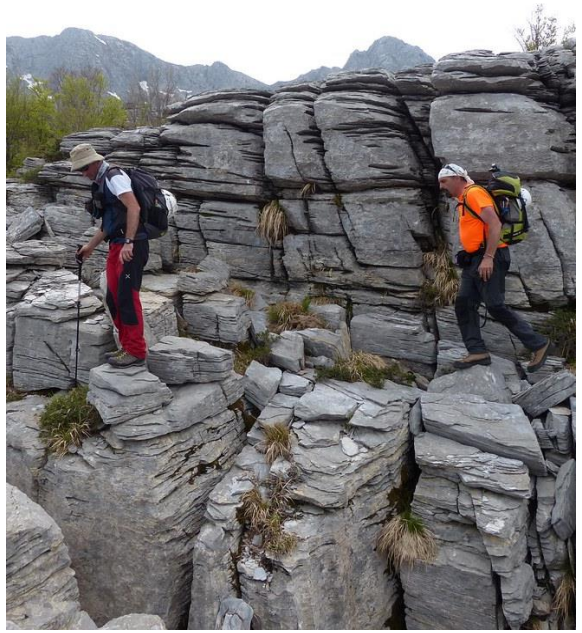
Area di alimentazione di un sistema carsico (da Vigna, 2009)

Zonazione di un sistema carsico: area di alimentazione

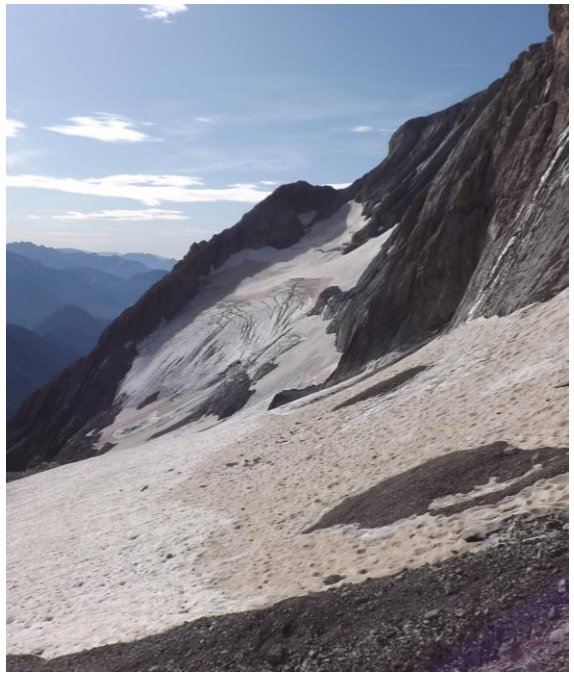
Infiltrazione diffusa

L'**infiltrazione diffusa** è legata essenzialmente alle precipitazioni che **interessano l'intero areale**, e può essere:

- **immediata**, se legata a precipitazioni piovose;
- **ritardata**, se legata allo scioglimento di un manto nevoso.



Infiltrazione immediata attraverso reticolo di fratture (Alpi Apuane; da E Lotti)

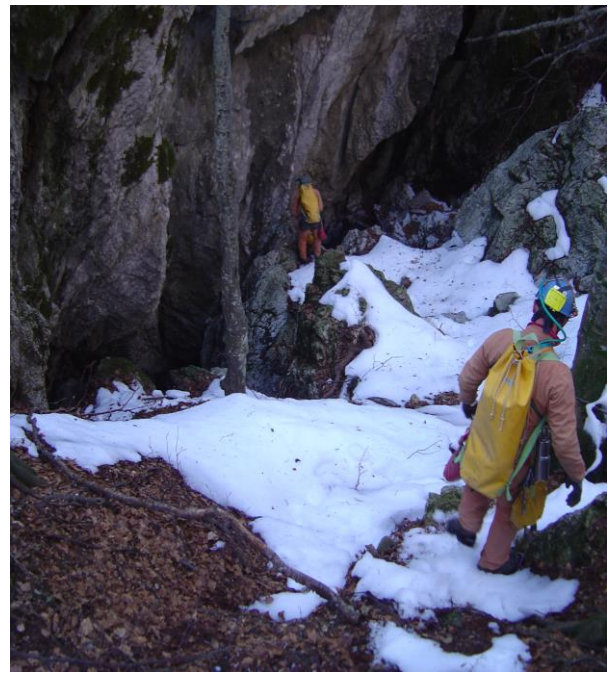


Infiltrazione ritardata attraverso scioglimento di ghiaccio (M. Perdido, Pirenei)

Infiltrazione concentrata

L'**infiltrazione concentrata** si ha quando **le acque di ruscellamento** superficiale, provenienti anche da rocce non carsiche, **si riversano in punti localizzati di assorbimento** (inghiottitoio) o lungo un subalveo.

Inghiottitoio (Pian Ambrogi, Marguareis; da B. Vigna)



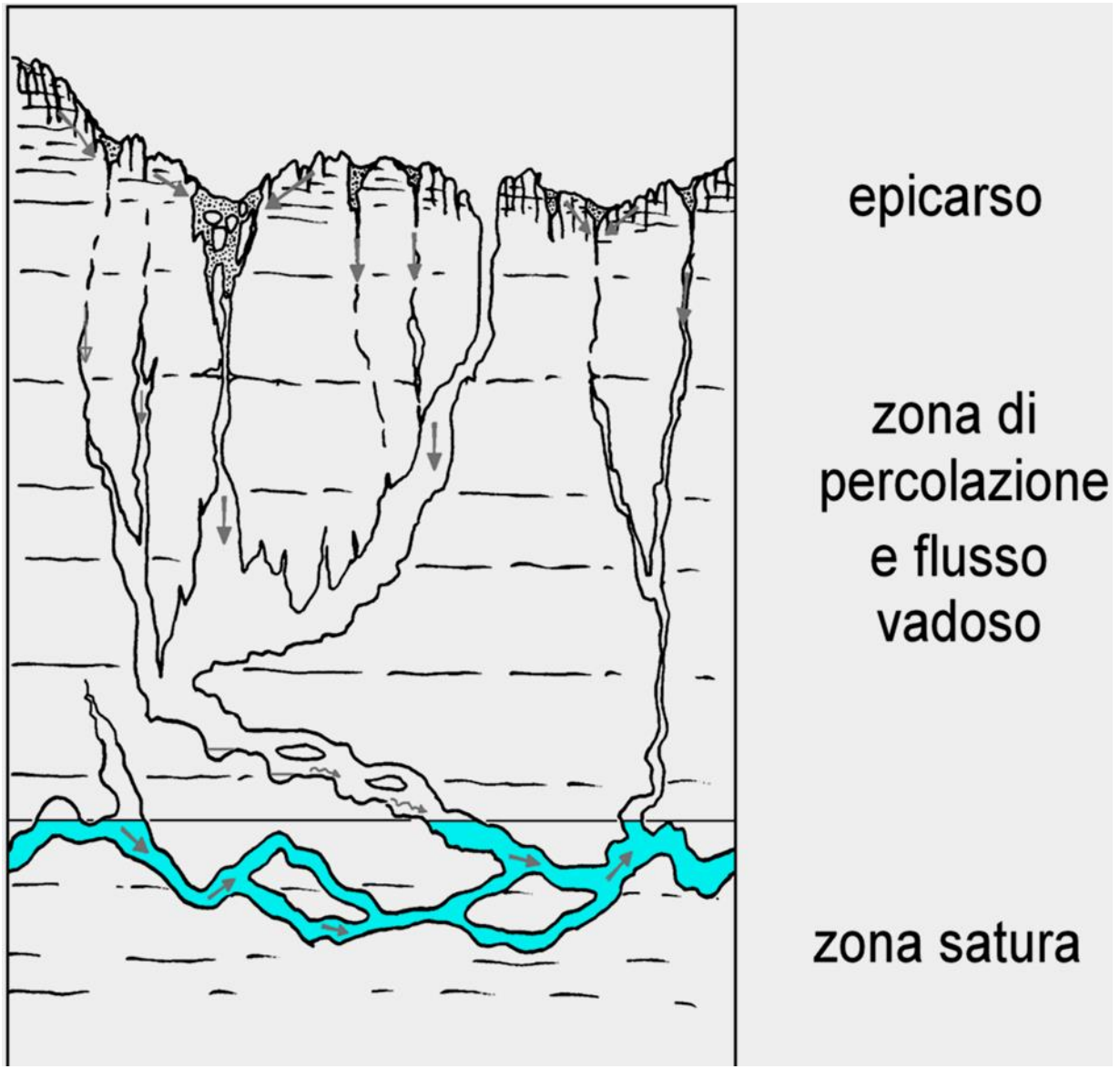
Inghiottitoio (Tana dell'Uomo Selvatico, Alpi Apuane)

Zonazione di un sistema carsico: zona non satura

La **zona non satura** rappresenta il **volume dell'acquifero compreso tra l'area di alimentazione** e la sottostante **zona satura**. La sua funzione è quella di trasferire in profondità , con percorsi generalmente verticali, le acque provenienti dalla superficie.

In questa fascia si possono individuare diverse parti, anche in funzione delle diverse caratteristiche geologico-strutturali del massiccio:

- **epicarso**;
- **zone di trasferimento e ruscellamento**;
- **gallerie inattive**.

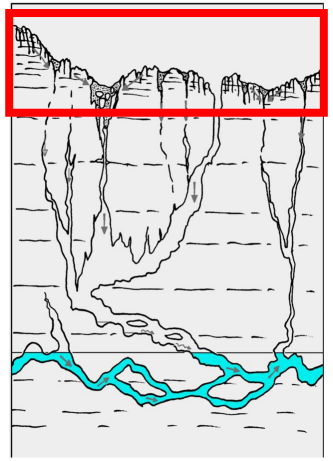


Schema di un sistema carsico

Zona non satura: epicarso

L'**epicarso** si trova nella porzione più superficiale di un sistema carsico ed ha una struttura nettamente influenzata dallo stato di **fratturazione** (dovuta a decompressione, gelificazione, termoclastismo..). **La sua funzione è quella di assorbire rapidamente le acque superficiali**.

Nelle aree montane, nell'epicarso, possono essere presenti pozzi che possono ospitare ingenti ammassi nevosi, che con la loro fusione contribuiscono all'alimentazione diretta dell'acquifero (infiltrazione ritardata).



Panoramica su epicarso esposto in fronte di cava (M. Corchia, Alpi Apuane)

Buca della neve (Alpi Apuane)

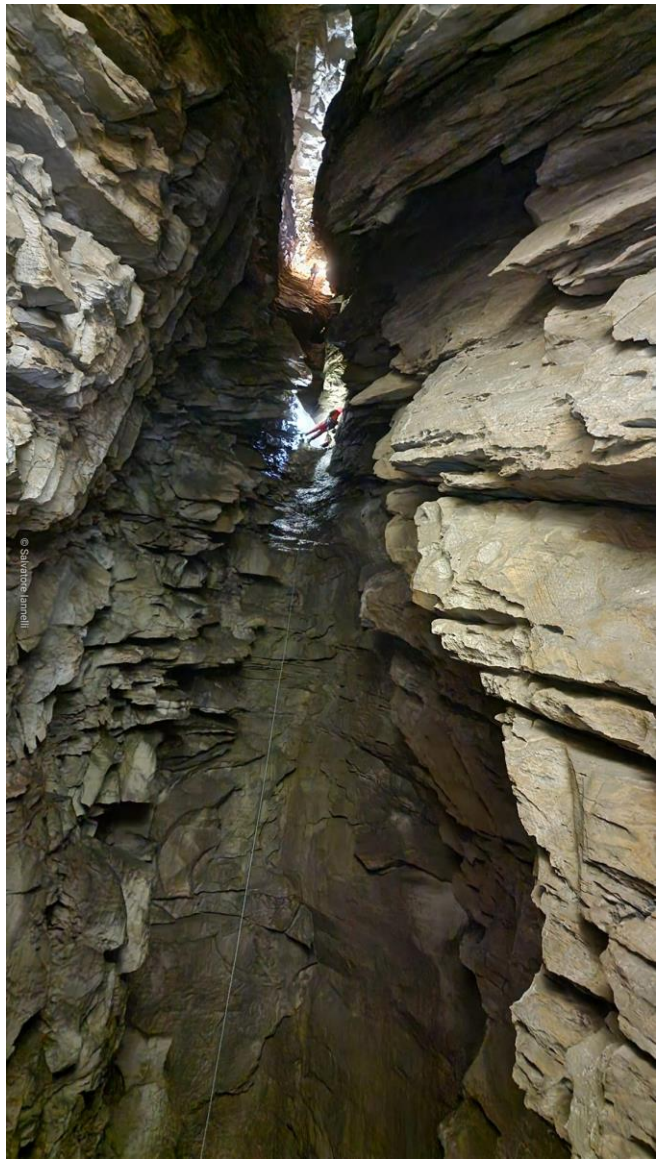
Conca delle Masche (Alpi Liguri, da B. Vigna)

Epicarso esposto in fronte di cava (Madielle, Alpi Apuane)

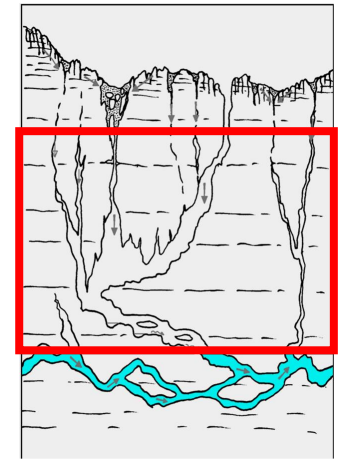
Zona non satura: zona di trasferimento e ruscellamento

La zona di trasferimento è **situata tra l'epicarso** e la sottostante **zona satura**. In questa zona la **circolazione** avviene **in maniera saltuaria in funzione degli apporti atmosferici**. Man mano che si scende più in profondità il reticolo di drenaggio diventa più organizzato e inizia a delinearsi una circolazione perenne (zona di ruscellamento), con una serie di collettori più o meno importanti che passano da un andamento prevalentemente verticale (**pozzi**) ad uno (sub-)orizzontale (**forre e meandri**).

Passaggio in frana sul Fondo dell'Antro del Corchia (Alpi Apuane; da S. Iannelli)



Pozzacchione (Antro del Corchia, Alpi Apuane; da S. Iannelli)



Forra (Monti del Matese; da S. Iannelli)

Zona non satura: zona di trasferimento e ruscellamento

ATTENZIONE ALLE PIENE!

I pozzi possono diventare attivi nell'arco di 30-60 minuti con afflussi idrici anche importanti (decine di l/s) che possono impedire le più semplici manovre.
Nelle gallerie della zona di trasferimento la circolazione delle acque si attiva soltanto in seguito a importanti precipitazioni, durante la quale si attivano percorsi idrici anche piuttosto differenti rispetto l'andamento principale della cavità. Venute idriche anche rilevanti possono provenire in tempi molto brevi (alcuni minuti) da zone strette e impercorribili (zone di ringiovanimento del sistema).

In caso di piena occorre trovare un luogo asciutto e aspettare anche **tempi lunghi** (decine di ore) **per la diminuzione del flusso idrico** prima di riprendere la risalita verso l'esterno.

MONTAGNA. GRUPPO DEL MARGUAREIS

"Bloccati nella grotta dall'acqua"

Nella notte si sono calati i soccorritori, dopo alcune ore i tre speleo sono riemersi

PAOLA SCOLA
GIANNI SCARPACE
ROCCAFORTE MONDOVI'

Li ha sorpresi la piena improvvisa di un torrente sotterraneo, ingrossato dai temporali. Si sono dovuti fermare nel ventre della montagna e attendere che il livello dell'acqua scendesse. Poi hanno iniziato la risalita, ma con un pesante ritardo. Le squadre di soccorso li hanno incontrati a un centinaio di metri dall'uscita della grotta «I grassi trichechi», tra Cima delle Saline e Pian Ballaur, quota 2400. Sono tornati in superficie ieri mattina i tre speleologi per i quali, domenica pome-

Testimonianze

«Niente paura ma freddo»

«La piena ci ha sorpresi Mai trovati in una situazione simile»

Alberto Gabutti presidente Gsp di Torino

Nuova Europa / Altre news

Slovenia: oggi al via recupero cinque bloccati in grotta

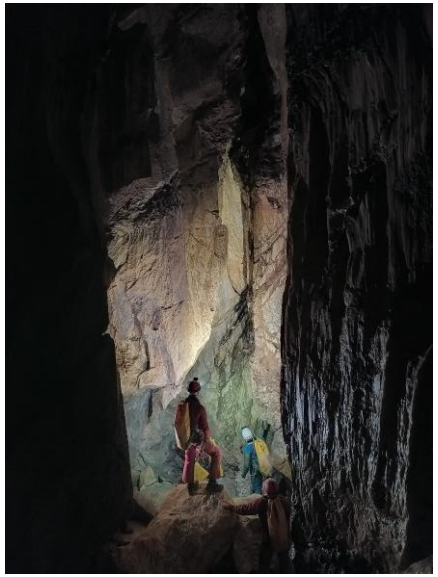
Da sabato nella Krizna Jama, ma non sono in pericolo

Grotta di Piaggia Bella (Alpi Liguri; da B. Vigna)

Zona non satura: zona di trasferimento e ruscellamento

Nella zona non satura sono presenti anche **gallerie del tutto abbandonate dalle acque**, chiamate **gallerie inattive o fossili**.
L'abbandono da parte delle acque di queste gallerie può essere dovuto a movimenti tettonici, crolli, fenomeni erosivi, ecc.., i quali vanno a modificare la circolazione nelle reti di drenaggio. Le gallerie inattive **possono presentare diverse morfologie** con condotte a pieno carico o con evidenti approfondimenti del livello idrico.

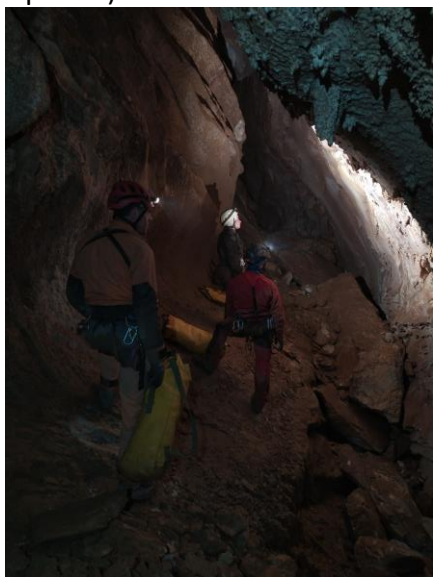
Galleria della Neve (Antro del Corchia, Alpi Apuane)


Fighiera (Antro del Corchia, Alpi Apuane)

Galleria di crollo (Antro del Corchia, Alpi Apuane)

Ramo delle pisoliti (Abisso Milazzo, Alpi Apuane)

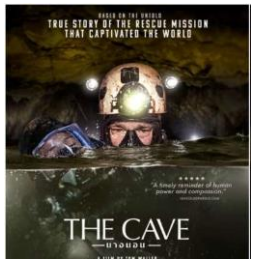
Canyon (Antro del Corchia, Alpi Apuane)

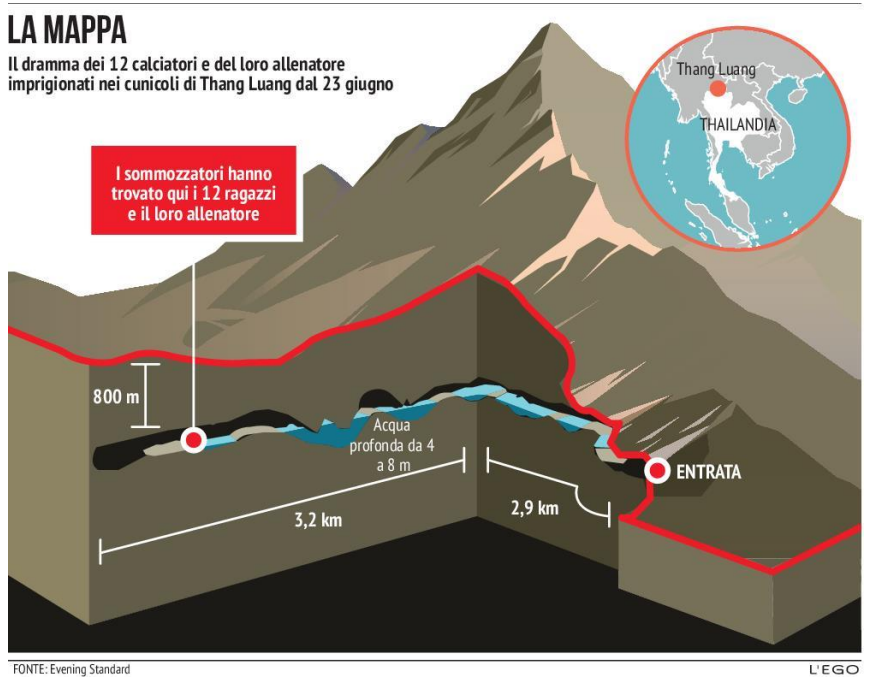

Ramo di Valinor (Antro del Corchia, Alpi Apuane)

Zona di oscillazione

La zona di oscillazione è quel volume di acquifero posto tra la zona non satura e la zona satura. In occasione di notevoli apporti d'acqua (piogge intense, scioglimento dei ghiacci), **i livelli idrici possono risalire di parecchi metri** (nel Carso triestino e in Apuane sono state osservate risalite superiori ai 100 metri) invadendo anche totalmente le gallerie della zona di scorrimento.

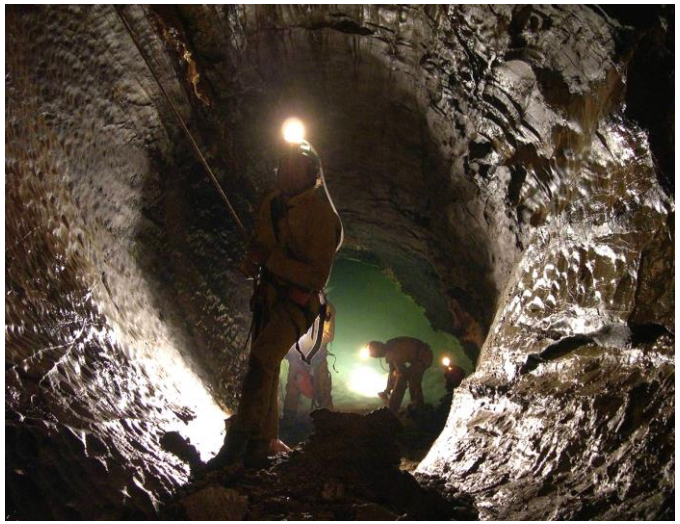
Nei periodi di piena le gallerie della zona di oscillazione vengono totalmente invase dalle acque: la risalita dei livelli idrici può avvenire anche in pochissime ore. **Attenzione quindi agli allagamenti!**





Incidente di Thang Luang del 2018, storia raccontata nel libro «Acquanauta» e nel film «The cave».

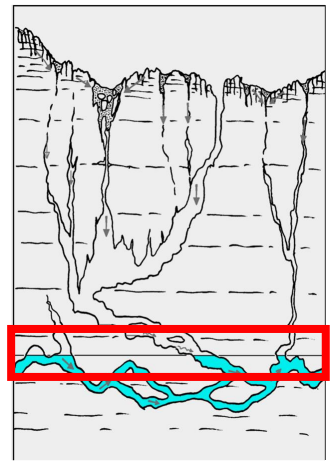
Risorgenza di Capo Quirino (Monti del Matese; da S. Iannelli)



Grotta del Lupo (Alpi Liguri; da B. Vigna)

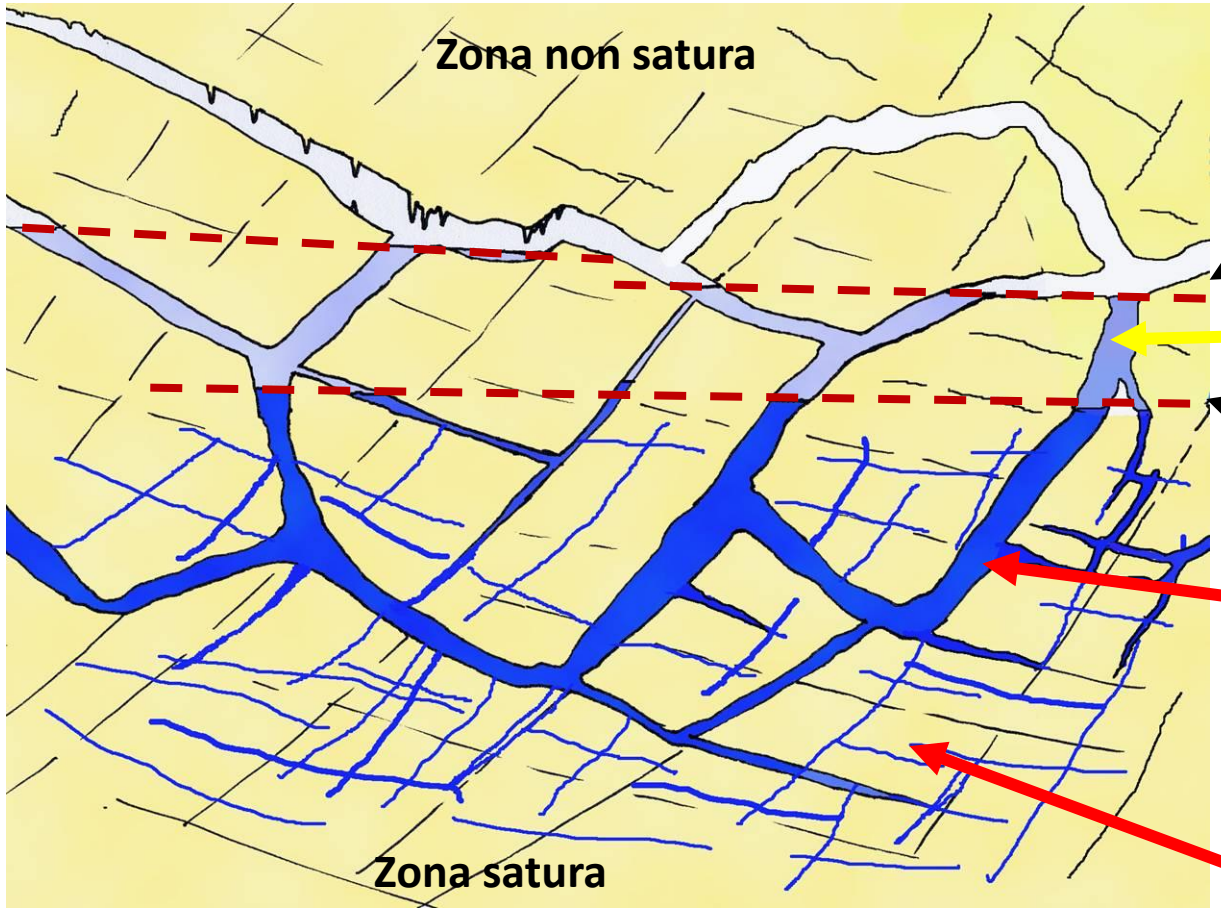
THAILANDIA. Sei turisti stranieri, fra cui tre minorenni, e due guide thailandesi sono morti annegati dopo essere stati sorpresi da piene improvvise in una grotta. Una ragazza di 17 anni è sopravvissuta ed è stata tratta in salvo.

Incidente di Kao Sok avvenuto nel 2007



Zona satura

La zona satura caratterizza gli orizzonti più bassi di un sistema idrogeologico carsico e corrisponde a quell'insieme di gallerie, condotti, cavità, fratture (anche di ridotte dimensioni) **sature di acqua**, in cui **l'acqua è in pressione** e si muove con movimento prevalentemente sub-orizzontale verso l'area di emergenza. La superficie che **separa la zona satura da quella non satura** è definita **superficie piezometrica virtuale** (virtuale perché l'acqua è in pressione e circola prevalentemente nelle fessure). Se il sistema è caratterizzato da una **fratturazione molto spinta**, allora si può parlare di una **superfici piezometrica reale**, assimilabile a quella degli acquiferi porosi.



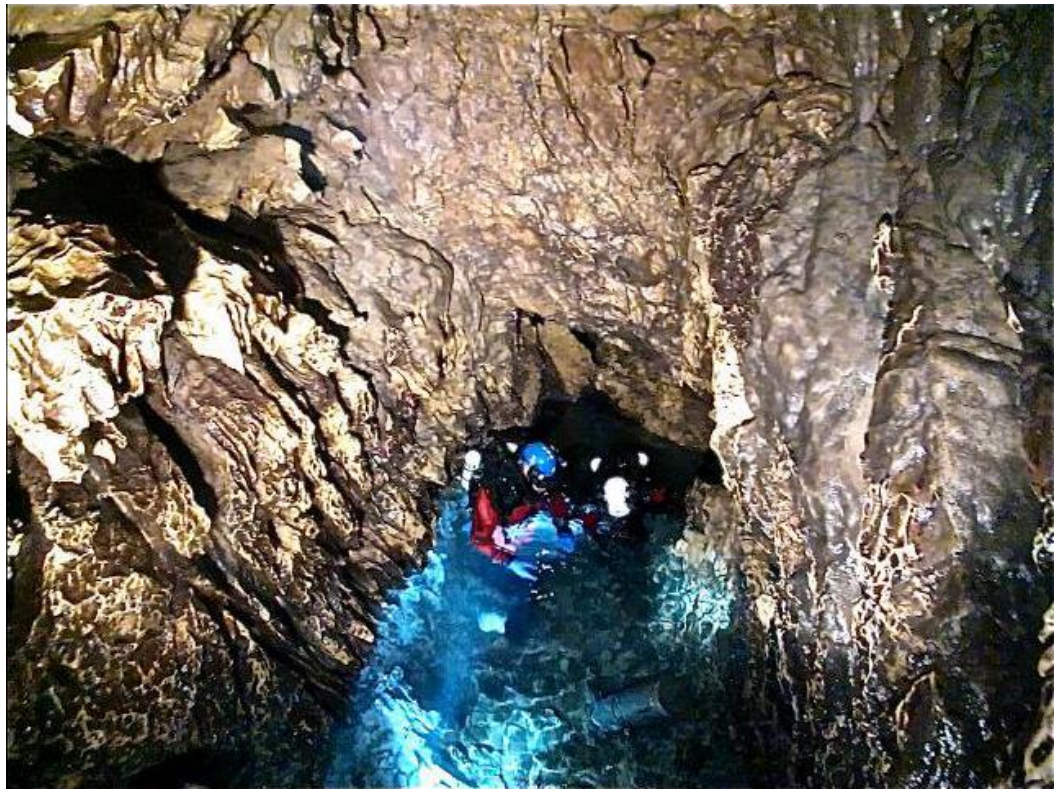
Schema di un sistema carsico

Collettori principali: condotti con velocità della circolazione idrica differente a seconda degli apporti (funzione di drenaggio).

Sistemi annessi: rete di fratture e condotti con circolazione idrica molto lenta (funzione di serbatoi).

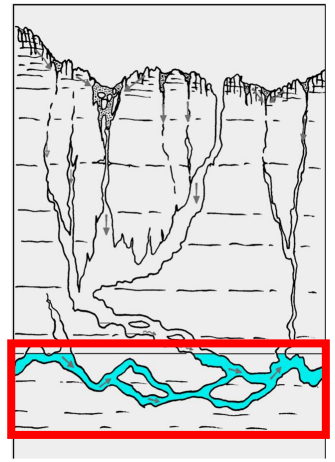
Zona satura

L’inizio della zona satura è segnato, all'interno di un sistema carsico dalla presenza di un sifone. Il livello idrico di un sifone è variabile nel tempo e in base agli apporti idrici sotterranei.



Immersione nel sifone terminale della Buca di Renara (Alpi Apuane; da L. Del Venanzio)

Immersione nel sifone terminale dell’Abisso Chimera (Alpi Apuane; da M. Faverjon)



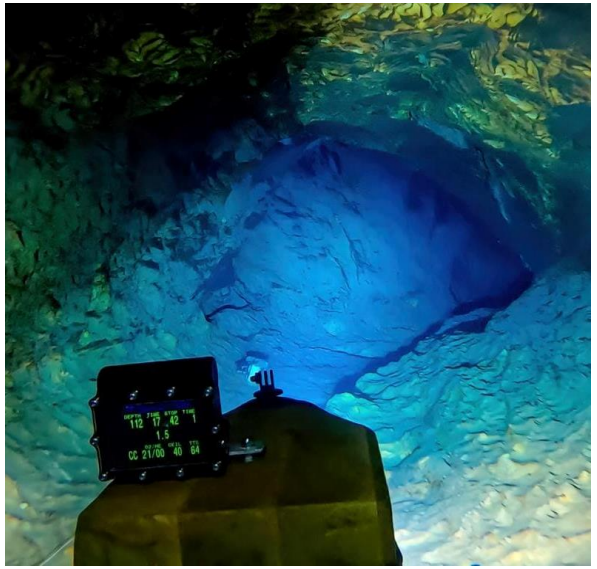
Sifone terminale dell’Abisso Astrea (Alpi Apuane; da arch. GSPi)

Zona satura

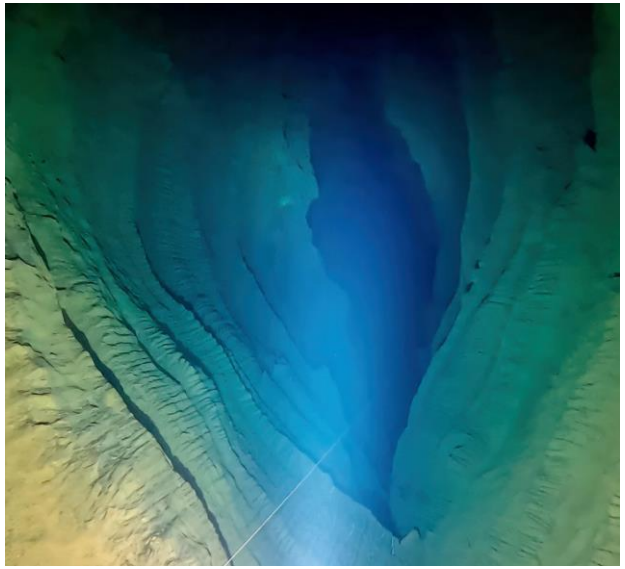
Nella zona satura si possono individuare due diverse tipologie di vie di circolazione:

Collettori principali

Sono i **condotti principali, interessati da flusso continuo**, diretto verso le sorgenti, con funzione di via di drenaggio. Possono ricevere alimentazione diretta o essere alimentati dai sistemi annessi.



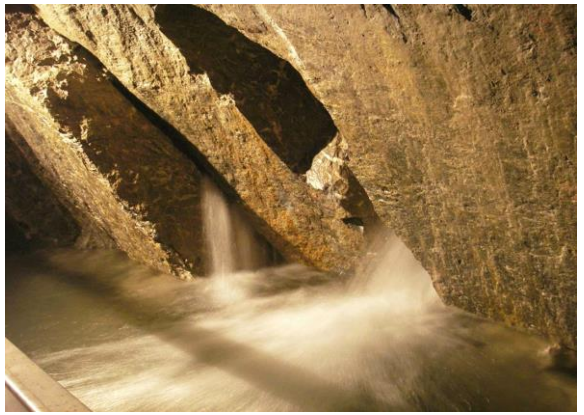
Galleria freatica della risorgenza della Pollaccia (Alpi Apuane; da L. Casati)



Galleria freatica della grotta di Castelcivita (Cilento; da L. Casati)

Sistemi annessi

Sono costituiti dalla **rete capillare di discontinuità** e da condotti più o meno estesi e rappresentano la parte più importante dell'acquifero carsico, contenendo importanti riserve idriche. **Alimentano i collettori principali**. Il loro svuotamento in genere è più lento; nei periodi con notevoli apporti possono saturarsi, **rilasciando lentamente i volumi accumulati**, garantendo al sistema un certo afflusso anche dopo periodi lunghi di assenza di pioggia.



Galleria ferroviaria del Col di Tenda (Alpi Marittime; da B. Vigna)

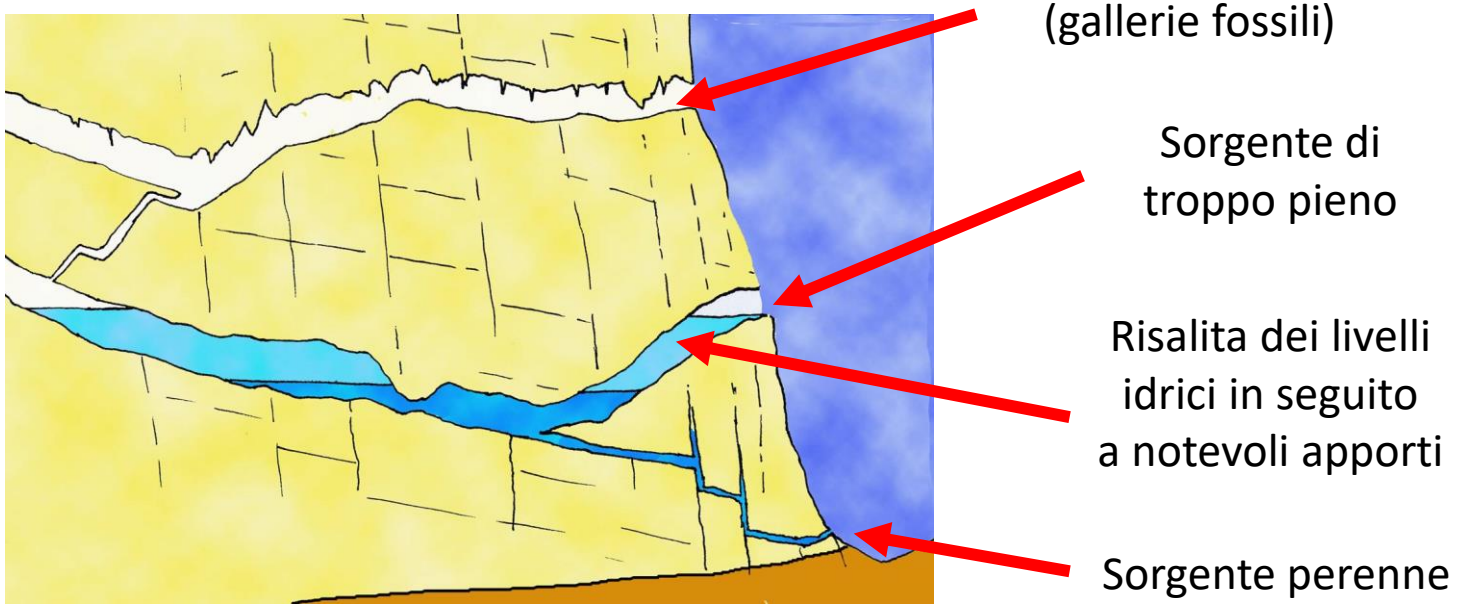
Area di emergenza

L'area di emergenza rappresenta la **zona altimetricamente più bassa della struttura carbonatica** dove, in genere, sono ubicate le sorgenti del sistema carsico.

Possono essere presenti diversi tipi di emergenza:

- **sorgenti perenni**, sono quelle topograficamente più basse;
- **sorgenti di troppo pieno**, sono sorgenti ubicate a quote maggiori e si attivano solo in particolari condizioni di afflussi.

Sorgenti dell'Ellero (Alpi Liguri; da B. Vigna)

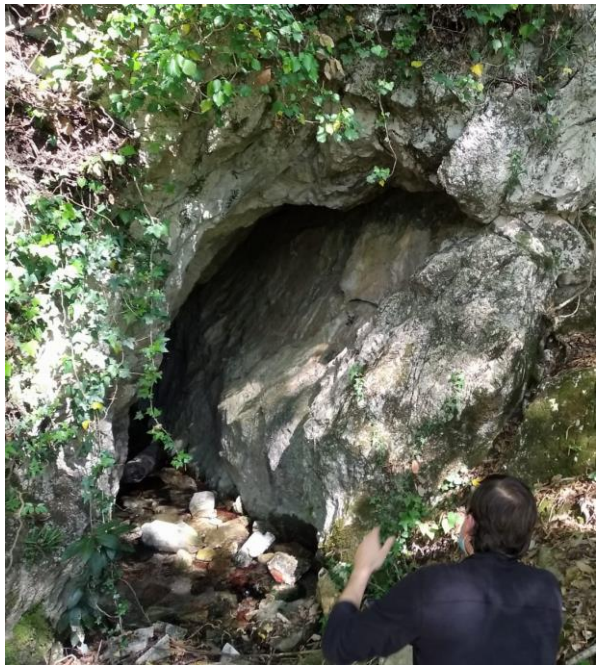


Schema di un sistema carsico e rapporti con le sorgenti (da Vigna, 2009)

Sorgente della Pollaccia (Alpi Apuane) in fase di magra (sinistra) e in piena (destra)

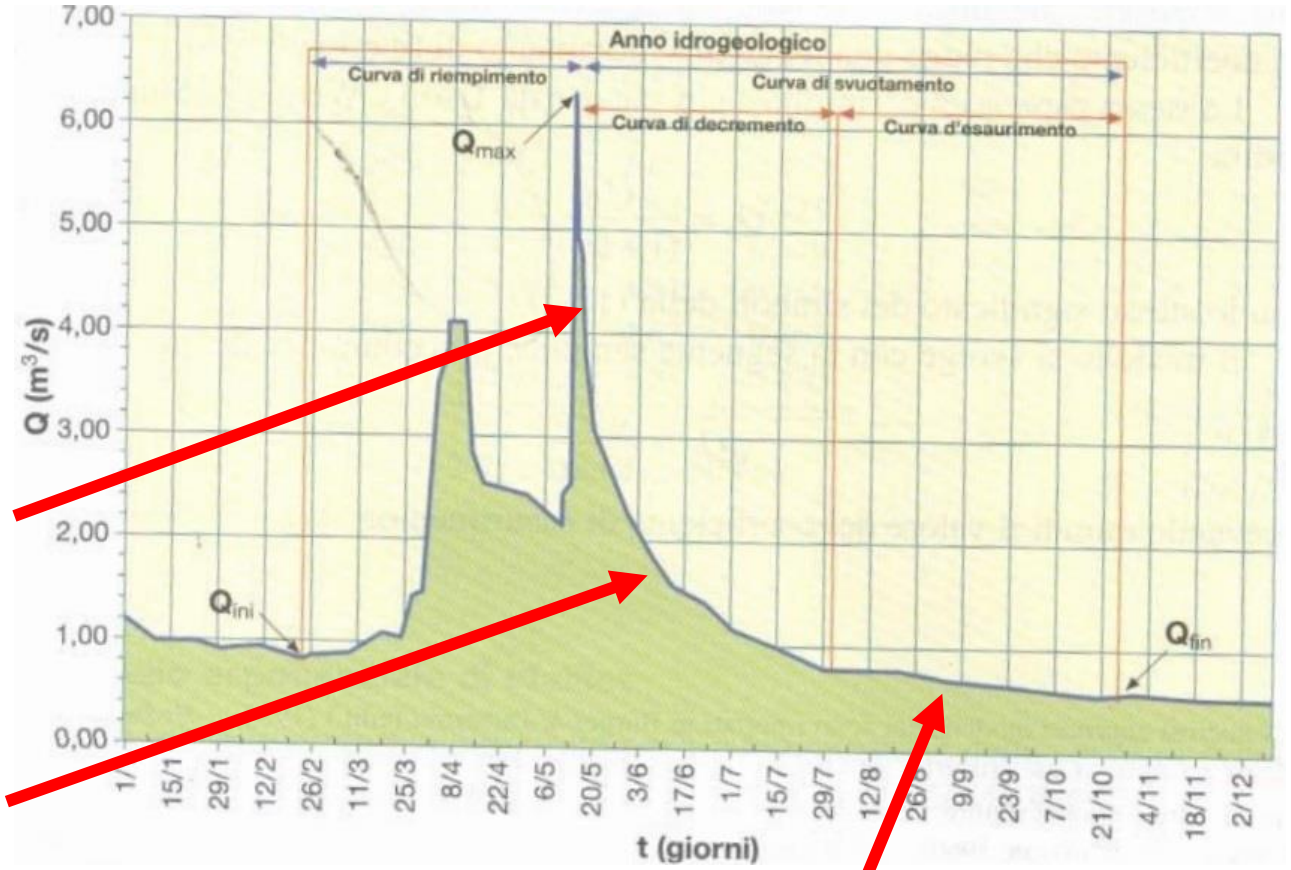
Area di emergenza

Le sorgenti carsiche hanno una **curva di esaurimento complessa**, legata al **contributo diversificato di porzioni dell'acquifero caratterizzate da permeabilità differente**. In genere, nelle sorgenti carsiche si riconoscono tre tratti a pendenza via via minore, in funzione della permeabilità via via minore dei vuoti in cui si trova l'acqua immagazzinata.



Sorgente del Muglione (Alpi Apuane)

Esempio di idrogramma di portata, utile per definire la curva di esaurimento di una sorgente



Esaurimento dell'acqua contenuta nei condotti carsici principali

Esaurimento dell'acqua contenuta nei canali più piccoli

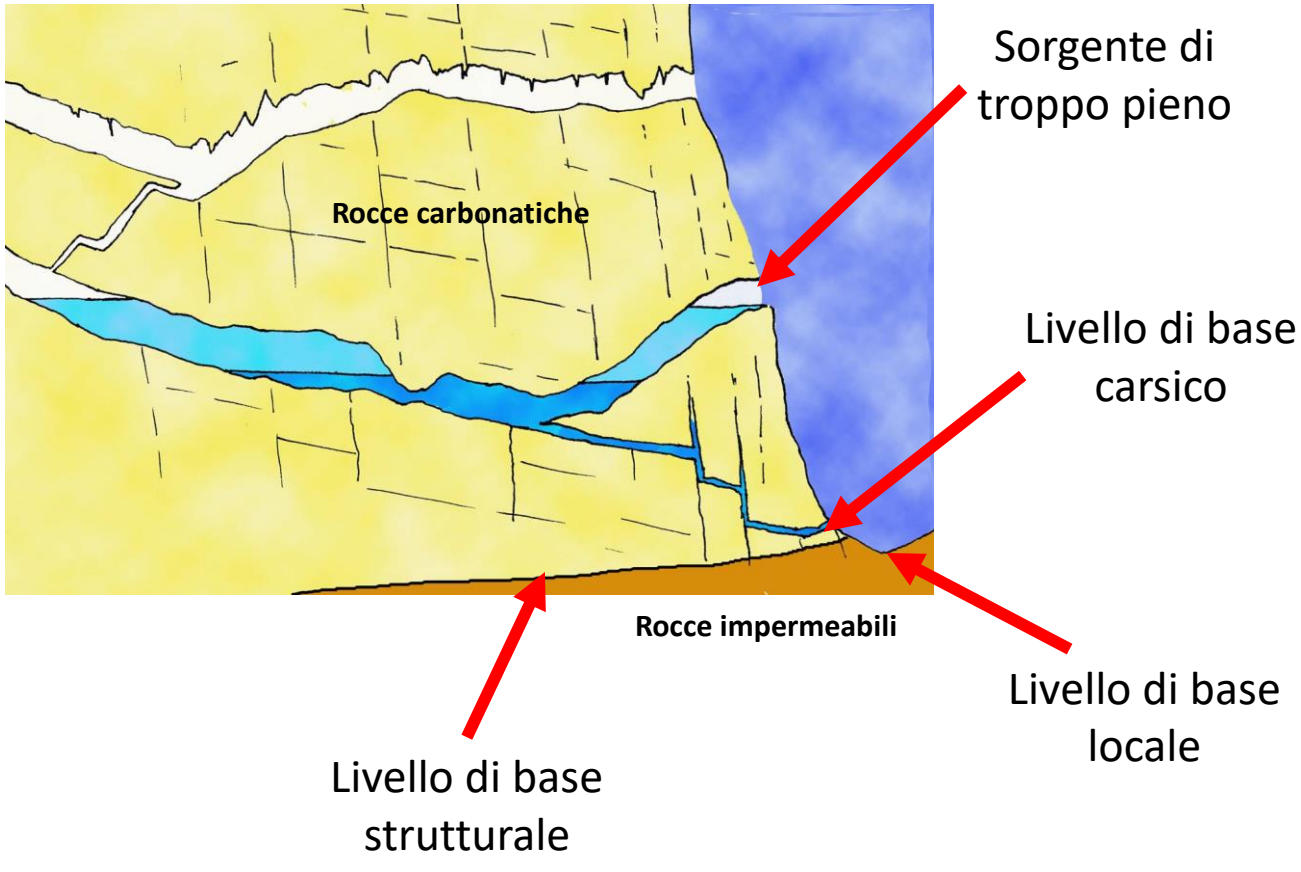
Esaurimento dell'acqua contenuta nelle fratture poco o nulla carsificate

Area di emergenza

La posizione dell'area di emergenza principale è spesso condizionata da importanti discontinuità geologico-strutturali (contatti stratigrafici, faglie, sovrascorrimenti) che separano il complesso carbonatico da rocce a permeabilità minore.
Il **livello di base**, nella definizione di Marat (1972) costituisce un **livello di acque sotterranee che delimita inferiormente un acquifero carsico**, influenzandone la quota e la superficie piezometrica. Si può quindi definire come livello di base generale il livello marino, ma può essere utile indicare localmente le diverse condizioni morfo-strutturali che condizionano il flusso di un acquifero carsico. Si distinguono così:

- **Livello di base carsico**: quota dell'emergenza topograficamente più bassa verso la quale si dirigono le acque del sistema.
- **Livello di base strutturale**: quota dell'elemento idro-strutturale meno permeabile, più basso, che delimita il massiccio carbonatico.
- **Livello di base locale**: quota del collettore gerarchicamente più importante (fiume, lago, mare) nel quale confluiscono le acque carsiche.

Schema di un sistema carsico e rapporti con le sorgenti (da Vigna, 2009)

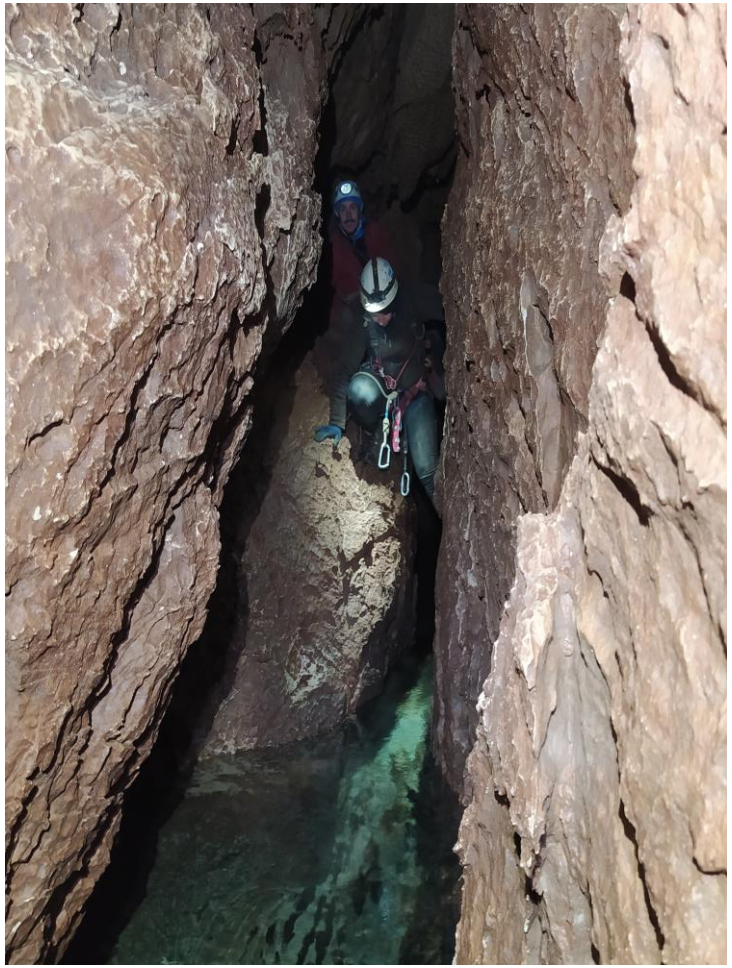


Funzionamento di un sistema carsico

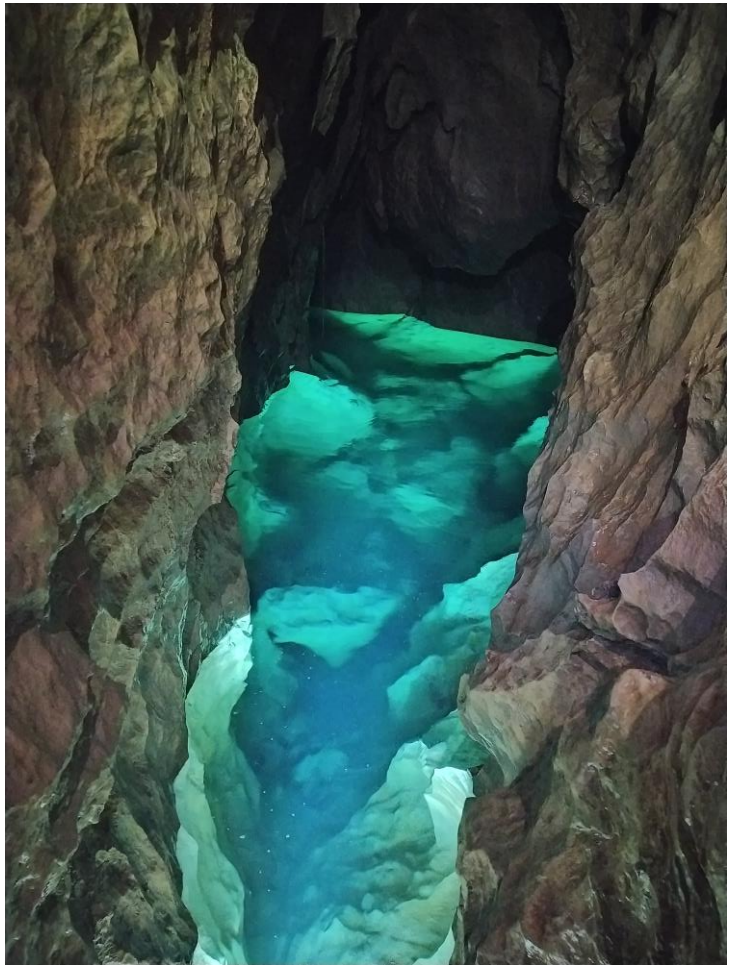
L'area di emergenza In merito al funzionamento di un sistema carsico, Civita et al. (1992) riconoscono **tre diversi modelli concettuali** di base:

- **sistemi a circolazione a dreno dominante**;
- **sistemi con circolazione a dreni interdipendenti**;
- **sistemi a circolazione dispersiva**.

Queste schematizzazioni sono comunque delle semplificazioni rispetto a quello che accade veramente in un acquifero carsico reale.



Rio Sara (Abisso Pianone, Alpi Apuane)



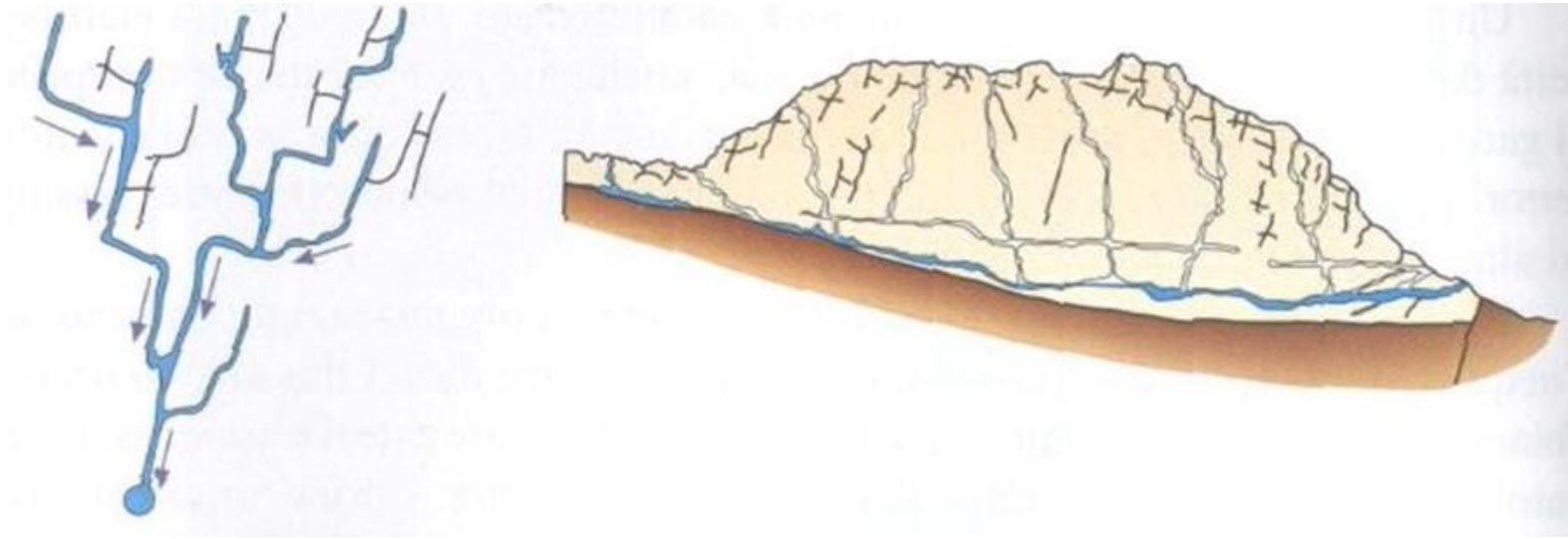
Lago nero (Antro del Corchia, Alpi Apuane)

Sistemi a circolazione a dreno dominante

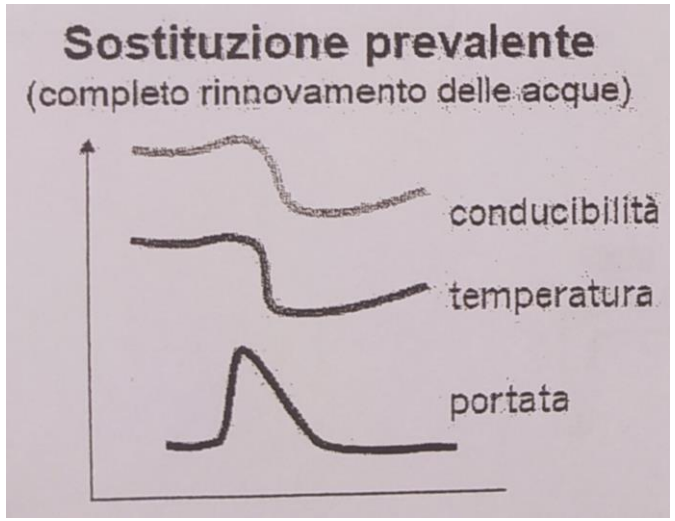
Si sviluppano in ammassi rocciosi compatti, con fratturazione non spinta ma **interessata da notevole carsificazione**. La rete di drenaggio è impostata su **grossi collettori**, mentre è secondario l'apporto delle discontinuità poco permeabili.

Manca una zona satura vera e propria, mentre sono completamente allagati alcuni tratti, più o meno lunghi, che costituiscono le vie di transito delle acque sotterranee. **Sono state misurate velocità di scorrimento superiori a 1km/h**.

In questi casi le **variazioni di portata sono marcate**; pertanto, le sorgenti presentano magre pronunciate alternate a piene improvvise. Ciò comporta che, durante gli eventi di piena, la **mineralizzazione delle acque diminuisce, per l'arrivo di acque di infiltrazione** che attraversano rapidamente il massiccio.



Schema di un sistema carsico con circolazione a dreno dominante (da Civita et al., 1992)



Comportamento idrodinamico e idrogeochimico

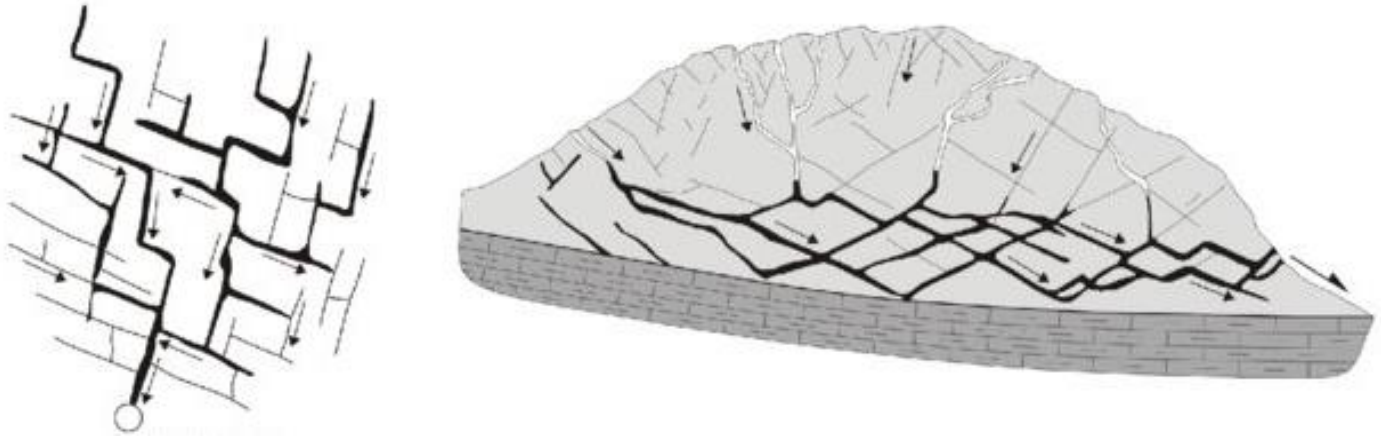
Pollaccia (Alpi Apuane; da L. Casati)

Sistemi a circolazione a dreni interdipendenti

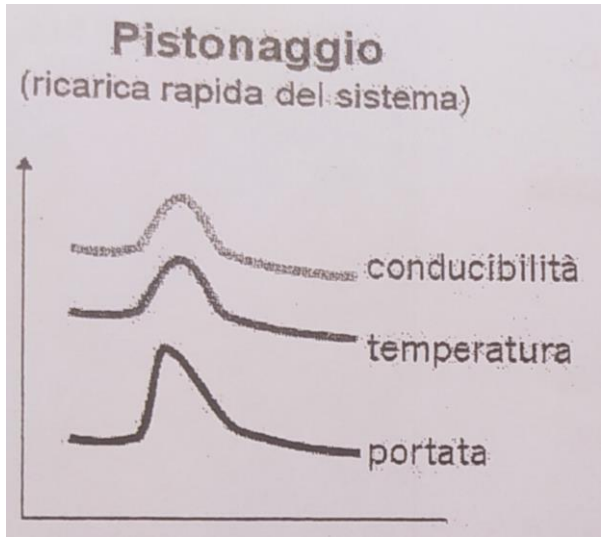
Sono presenti in ammassi rocciosi con fratturazione e altre discontinuità piuttosto marcate e carsificate. La zona non satura è caratterizzata in genere da **assenza di importanti collettori**, mentre possono essere numerose le cavità a prevalente andamento verticale. Tali cavità sono **attive solo in occasione di abbondanti precipitazioni** e costituiscono le vie privilegiate, **tra loro indipendenti**, verso le zone più profonde.

In profondità, a quota prossima a quella delle sorgenti, è invece presente una **zona satura molto estesa**, caratterizzata da condotte e gallerie, collegate tra loro, che costituisce un importante riserva idrogeologica. Le porate delle sorgenti hanno variazioni più contenute ed una risposta più ritardata rispetto al caso precedente, sebbene possano verificarsi importanti picchi di piena a seguito di notevoli eventi infiltrativi.

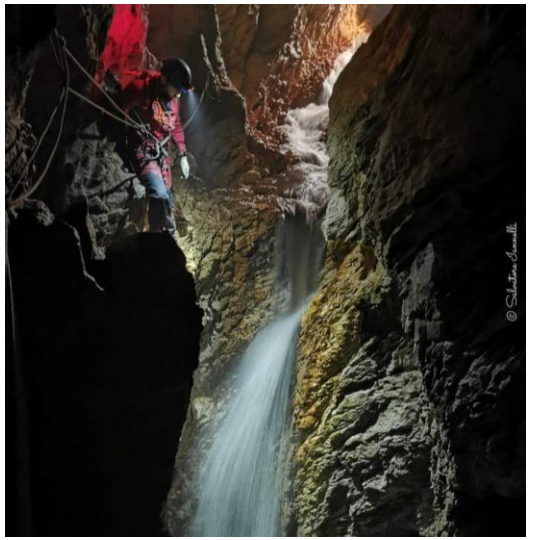
Gli indicatori geochimici alle emergenze mostrano, durante le piene, **temporanei aumenti della mineralizzazione per effetto pistonaggio**, ovvero gli importanti volumi di acqua in transito causano la **rimobilizzazione di acque più vecchie** presenti in settori meno permeabili.



Schema di un sistema carsico con circolazione a dreni interdipendenti (da Civita et al., 1992)



Comportamento idrodinamico e idrogeochimico

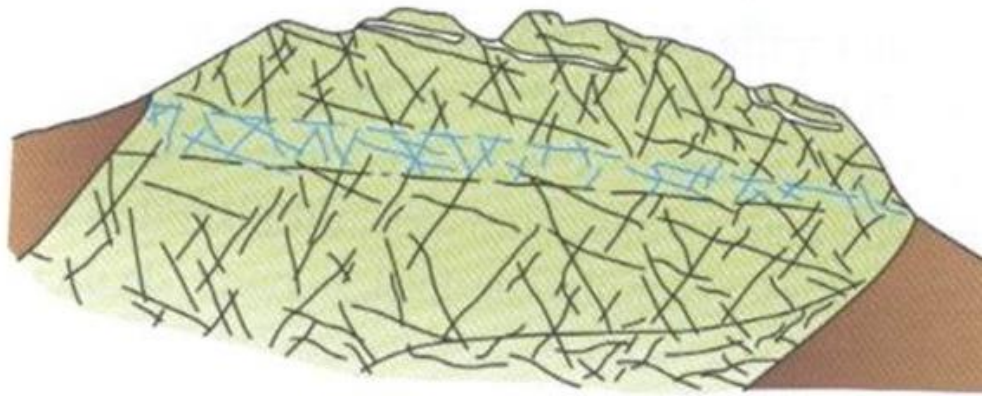


Monti del Matese (da S. Iannelli)

Sistemi a circolazione dispersiva

Interessano **ammassi rocciosi carbonatici scarsamente carsificati aventi intensa fratturazione**, con numerose famiglie di discontinuità tra loro **intimamente collegate**, avvicinando la circolazione profonda a quella di un **sistema poroso**. In questo sistema non esistono collettori, ma solo una complessa rete di flusso che rende la superficie piezometrica abbastanza regolare.

Localmente possono essere presenti cavità più sviluppate, dovute a condizioni favorevoli. Le acque si spostano lentamente nell'ammasso roccioso, per la permeabilità più ridotta del sistema (la **velocità può essere inferiore di 1m/giorno**). Alle sorgenti giungono quindi acque vecchie. **La zona di emergenza si manifesta in genere con più polle**. Le portate delle sorgenti mostrano variazioni contenute, con incrementi notevolmente sfasati rispetto agli eventi infiltrativi. Per la lenta circolazione **la mineralizzazione delle acque è piuttosto elevata**.



Schema di un sistema carsico con circolazione dispersiva (da Civita et al., 1992)

Porzione di ammasso roccioso assimilabile ad un sistema a circolazione dispersiva (Alpi Apuane)

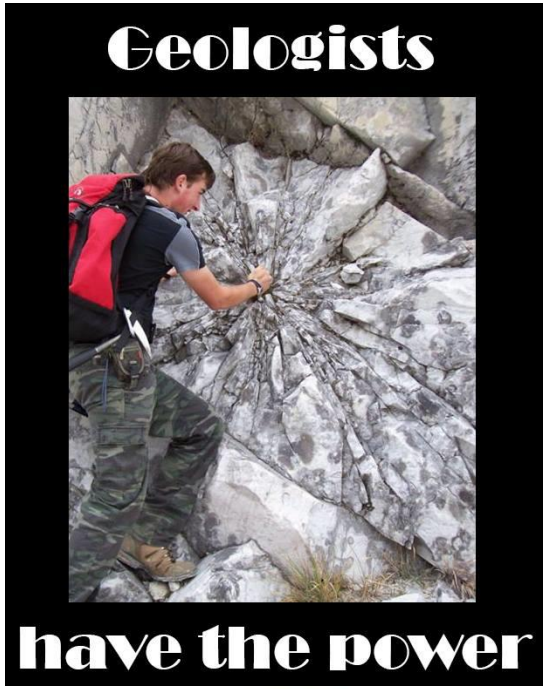
Studio degli acquiferi carsici

Da quanto esposto fino ad ora, si capisce come **lo studio di un acquifero carsico** e il suo sfruttamento come risorsa idrica necessitino di **un approccio diverso da quello usato per i mezzi a porosità primaria** o per fessurazione. Infatti, se per questi ultimi si può partire dal presupposto che si trattino di mezzi omogenei e isotropi, **quello carsico deve essere considerato a priori un mezzo discontinuo, non omogeneo e anisotropo**.

Ciò si traduce nel fatto che per un acquifero carsico **deve essere fatta una caratterizzazione geologica estremamente accurata**.

Per prima cosa, bisognerà **conoscere esattamente la stratigrafia** delle formazioni carbonatiche che costituiscono l'acquifero carsico e di quelle confinanti (nei confronti di un sistema carsico, tutte le altre formazioni possono essere considerati acquicludi).

Molto importante è **conoscere l'andamento dei sistemi di discontinuità** nelle varie litologie carbonatiche: in generale, a maggior indice di fratturazione corrisponde anche un maggior sviluppo di carsismo e quindi una maggiore permeabilità.

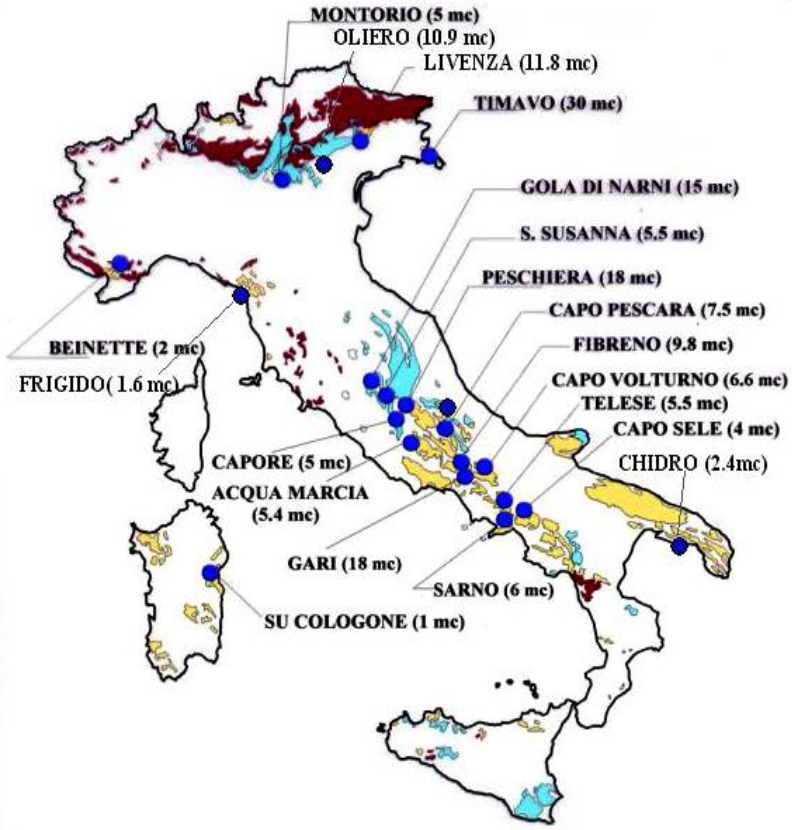


Perché studiare gli acquiferi carsici?

<u>Gli acquiferi carsici hanno un ruolo fondamentale nel reperimento di acque destinate ad uso potabile</u>. Già i romani a partire dal 312 a.C. costruirono acquedotti per portare l'acqua dalle sorgenti dell'Appennino alle principali città. Una delle prime ad essere sfrutta fu la sorgente del Peschiera che è ancora sfruttata a scopi idropotabili.

Attualmente le acque ad uso potabile a livello mondiale provengono per circa il 30% da acquiferi carsici (**<u>in Italia, attualmente il 40% delle acque potabili deriva da acquiferi carsici</u>**) e si presume che **<u>nel 2050 l'80%</u>** delle acque destinate al consumo umano proverrà da questo tipo di acquiferi.

<u>Quindi lo studio degli acquiferi carsici è di fondamentale rilevanza.</u>



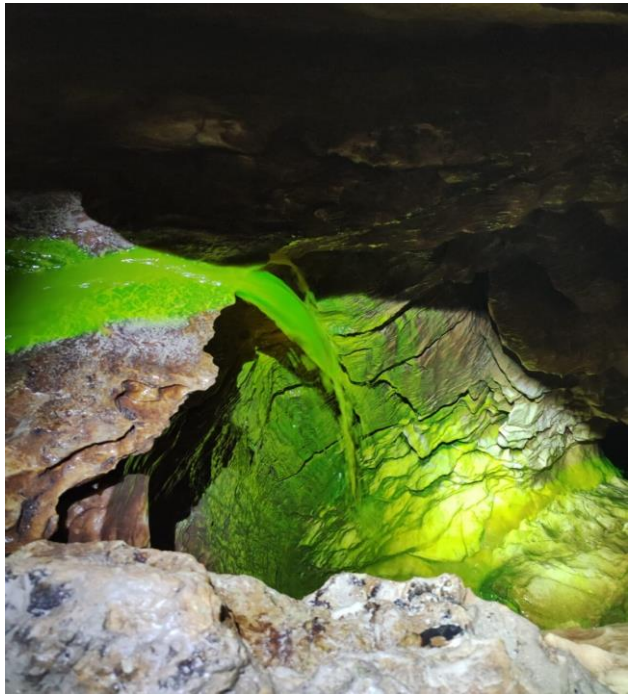
Le principali sorgenti alimentate da acquiferi in rocce carbonatiche nel territorio italiano. Con differenti colori vengono indicati i principali acquiferi: in marrone serie prevalentemente dolomitiche, in giallo serie calcareo-marmoree, in azzurrino serie calcareo arenacee o intercalari (da Vigna, 2009)

Sorgenti del Peschiera vicino Rieti (da B. Vigna)

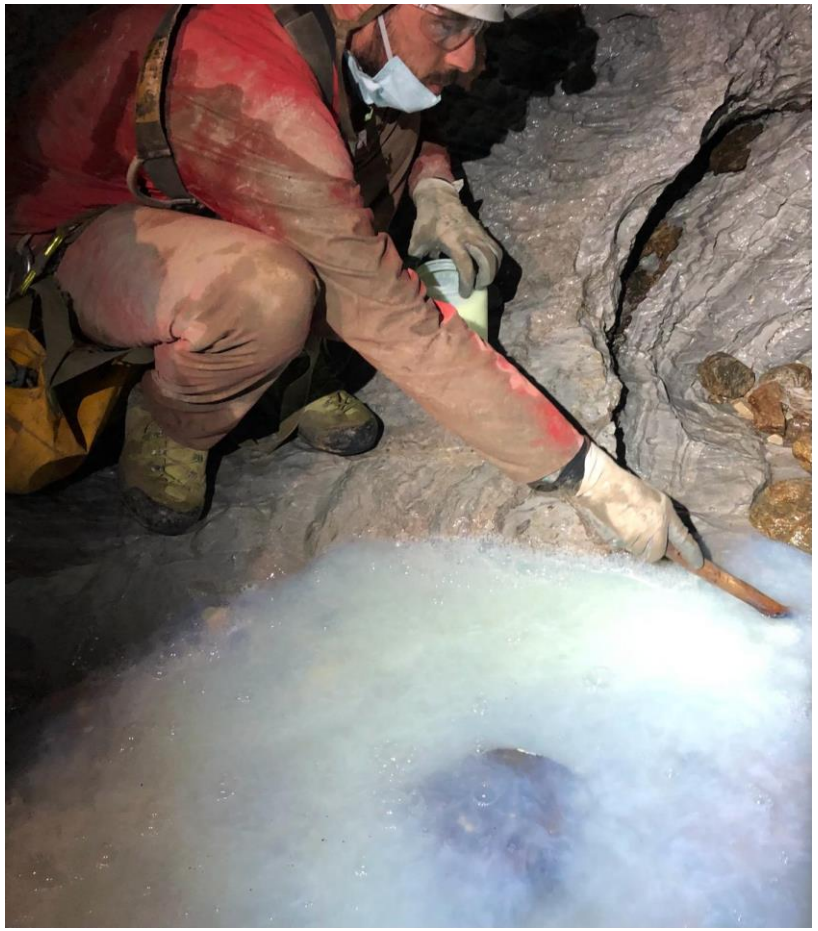
Acquedotto Claudio (Roma)

Come studiare un acquifero carsico?

Uno dei modi per studiare un acquifero carsico è quello di effettuare delle colorazioni all'interno dei collettori di un sistema carsico, e monitorare a quale sorgente esce. In questo modo si può ricostruire il bacino di alimentazione della sorgente.



Tracciamento con fluorescina sodica All'Abisso Tripitaka (Alpi Apuane; arch. FST)



Tracciamento con Tinopal alla Buca dei Francesi (Alpi Apuane; arch. GSAL)

Fluorimetro per tracciamento in continuo

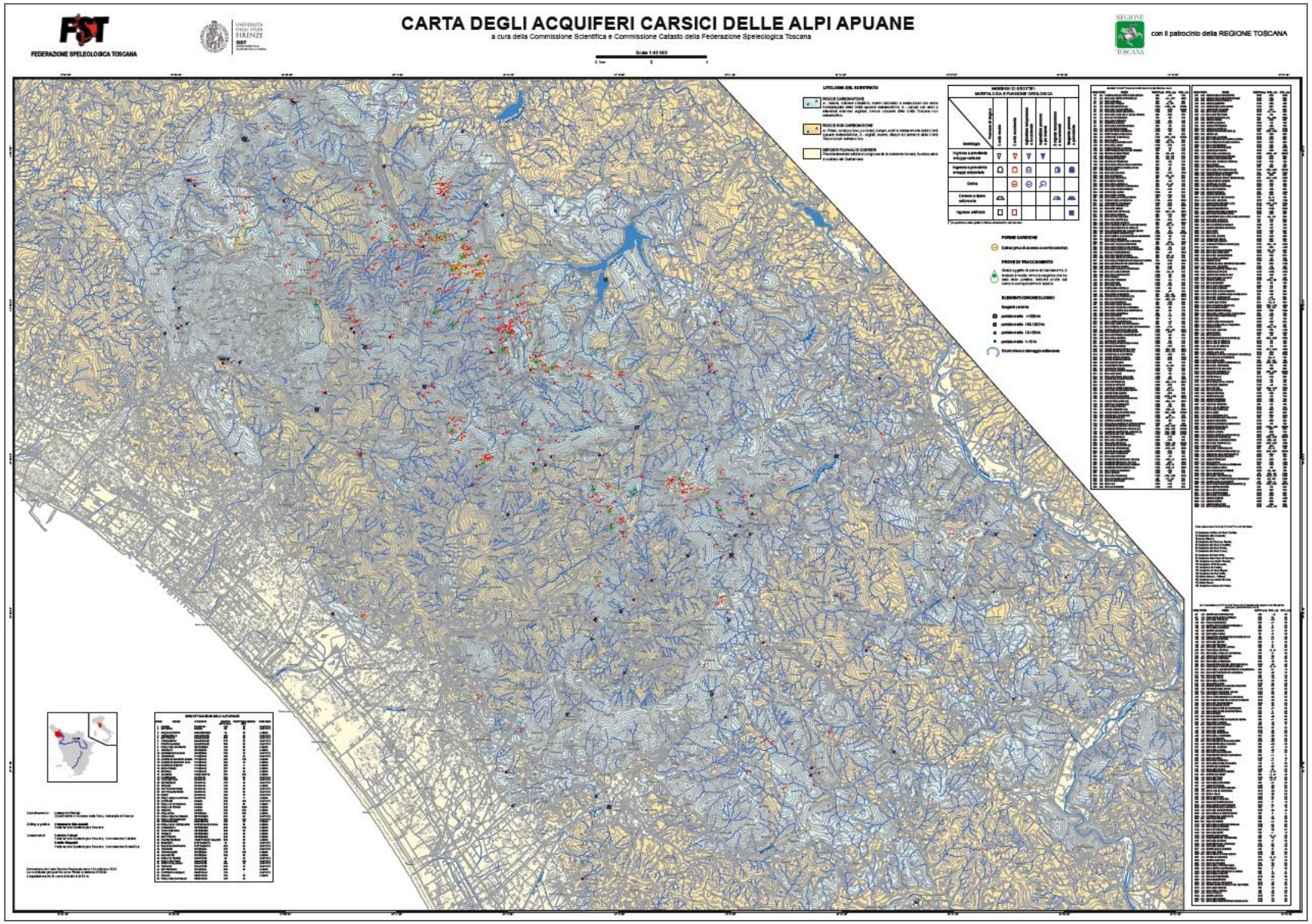
Monitoraggio sorgenti con captori ai carboni attivi (Alpi Apuane; arch. GSAL)

Carta degli acquiferi carsici

Dopo oltre 55 prove di tracciamento svolte in 51 anni di attività di ricerca speleologica e non solo, hanno permesso di poter interpretare e dare una prima forma al reticolo idrologico/idrogeologico delle Alpi Apuane, realizzando la prima carta degli acquiferi carsici.

La carta realizzata è disponibile al link: https://www.speleotoscana.it/2015/03/10/carta/

Il modello idrologico è consultabile al link: https://drive.google.com/file/d/1sB4rLCucPRou9zmWlvmCj-WjaPRD_p5r/view

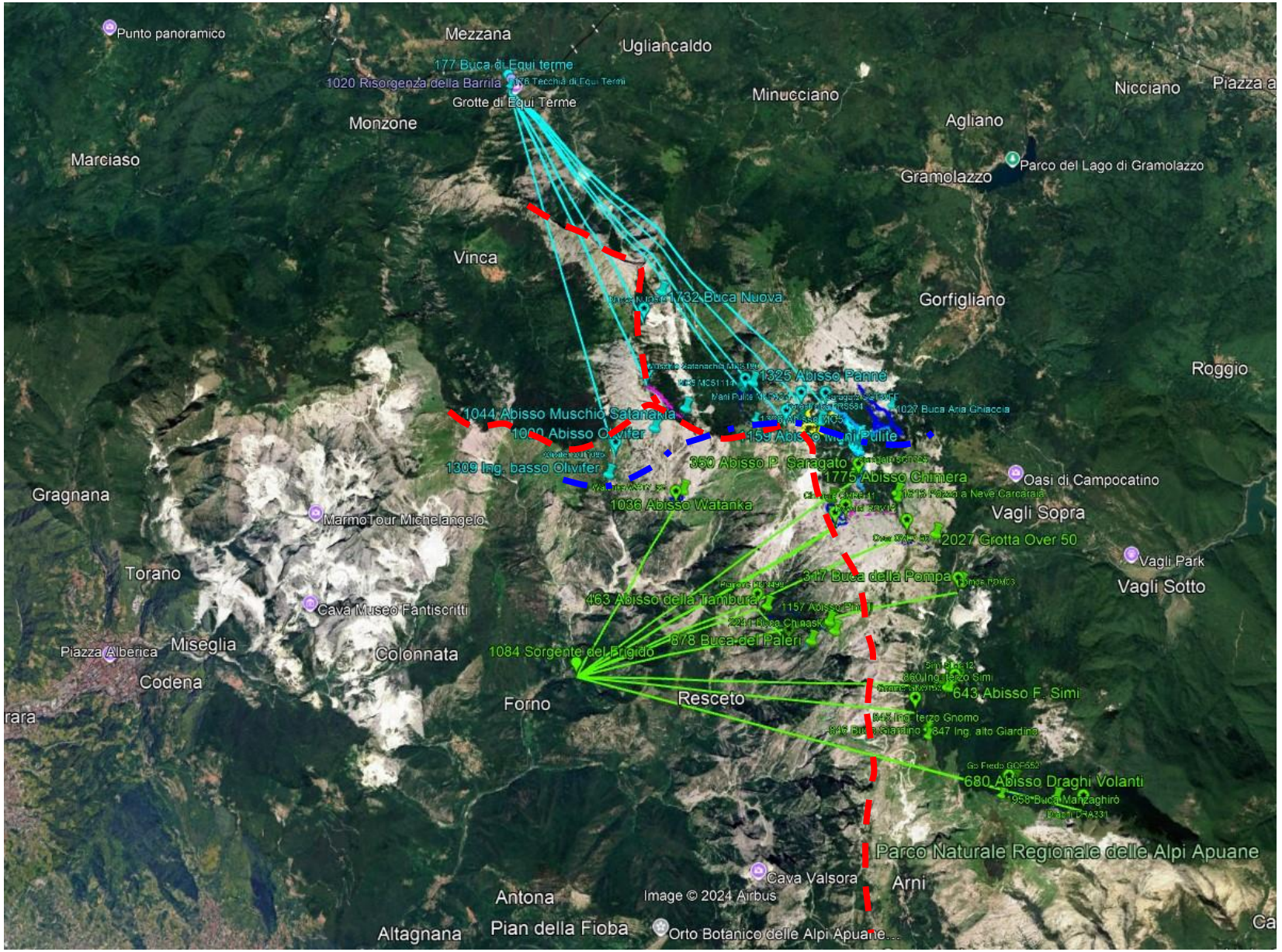


Carta degli acquiferi carsici delle Alpi Apuane

Carta degli acquiferi carsici

Mettendo insieme i tracciamenti effettuati nei vari sistemi carsici è possibile disegnare (in maniera approssimativa) gli spartiacque sotterranei che delimitano i vari acquiferi carsici.

<u>Nell'esempio riportato notare come lo spartiacque idrogeologico non corrisponde allo spartiacque idrografico!!</u>

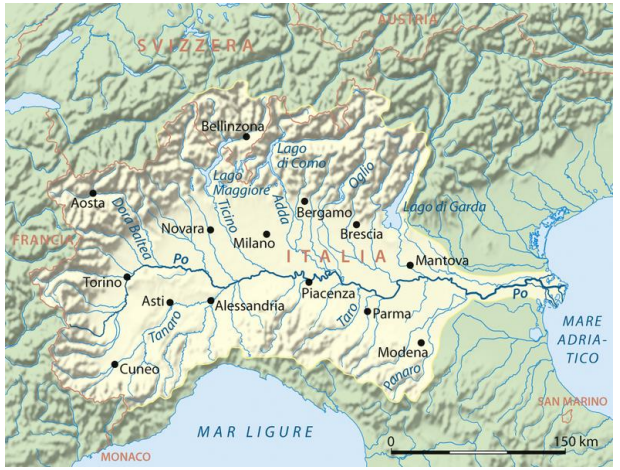


Schema del bacino idrogeologico del Frigido (verde) e quello di Equi Terme (azzurro) (da sito web FST)

Bacino idrografico e bacino idrogeologico

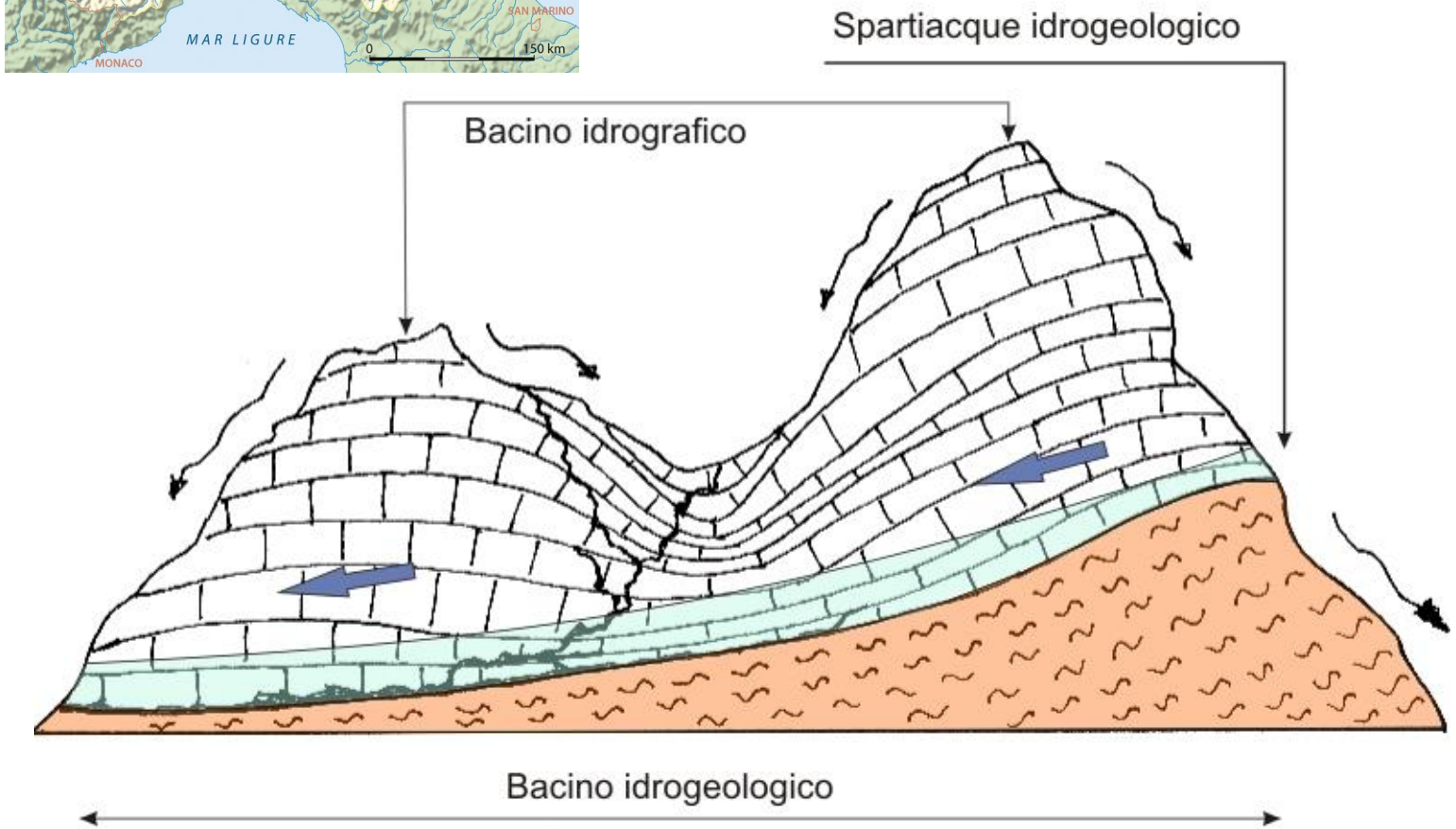
Il **bacino idrografico** è l'area topografica (solitamente identificabile in una valle o una pianura) **delimitata da uno spartiacque topografico** di raccolta delle acque che scorrono sulla superficie del suolo confluenti verso un determinato corpo idrico recettore (fiume, lago o mare interno).

Un **bacino idrogeologico** è la **frazione di bacino idrografico posta nel sottosuolo**, delimitata da uno spartiacque freatico (o sotterraneo). **Spesso non coincide con il bacino idrografico**, in quanto non considera il solo deflusso di acque superficiali, ma anche lo s**corrimento di infiltrazione che dipende dalla stratigrafia e dalla conformazione geologica del sottosuolo.**



Schema del bacino idrografico del Po

Differenza tra bacino idrografico e bacino idrogeologico



Vulnerabilità degli acquiferi carsici

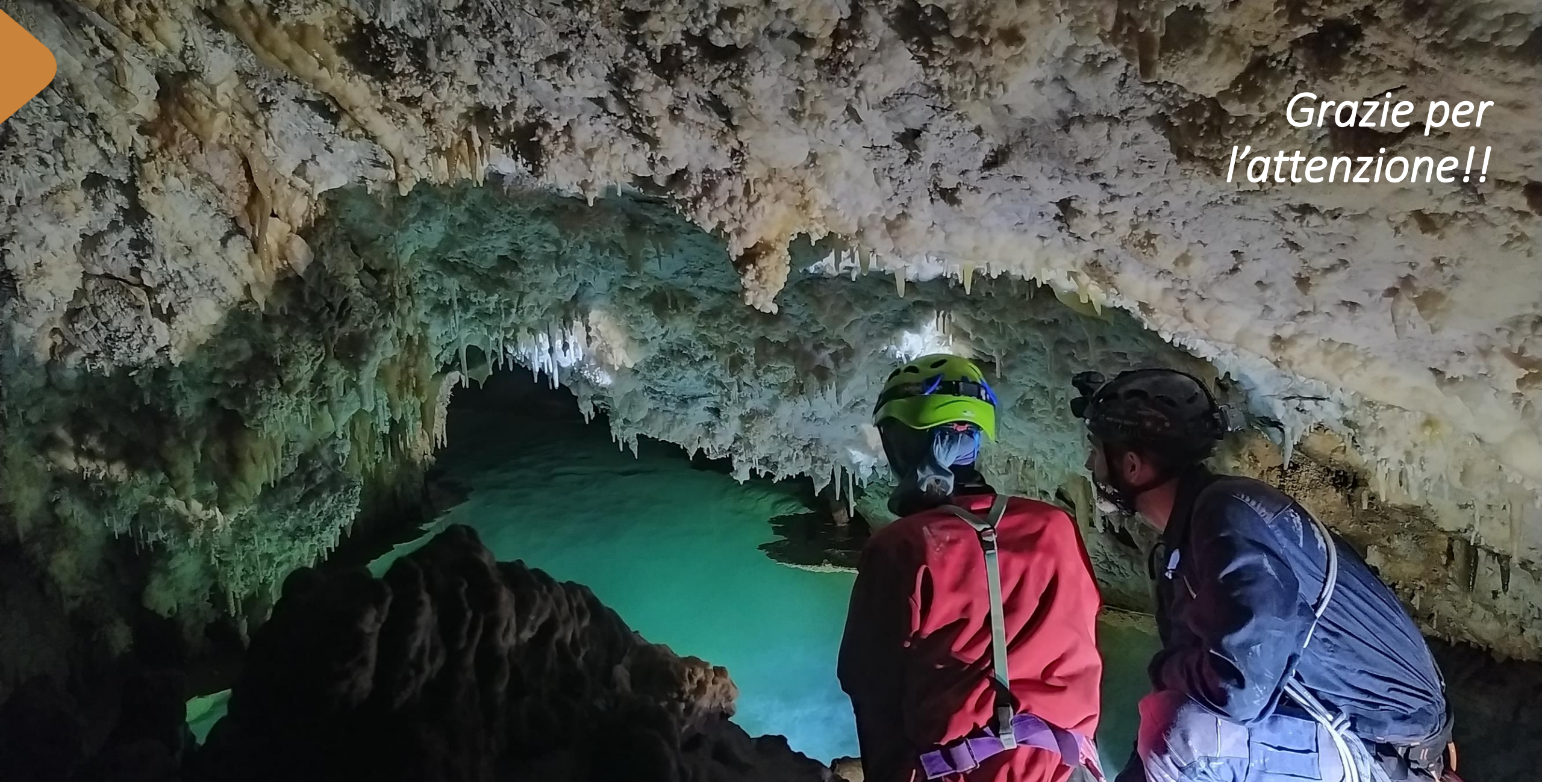
Particolare importanza per la salvaguardia della risorsa idrica in acquiferi carsici, assume la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento.
Infatti, **a differenza degli acquiferi in terreni granulari, quelli carsici sono di gran lunga più vulnerabili e senza alcuna capacità di autodepurazione**.

NON si fanno i propri bisogni in grotta, soprattutto quelli solidi!!

Inquinamento da marmettola Ramo dei Maremmani (Antro del Corchia, Alpi Apuane)

Inquinamento da marmettola Fiume Carrione (Alpi Apuane)

Inquinamento da rifiuti urbani



Scuola estiva 2023
Rilevamento geologico e cartografia CARG

PROGETTO CARG

ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente