

# CENNI DI SPELEOGENESI SPELEOLOGIA SUBCQUEA

Attilio Eusebio

L'immersione speleosubacquea si svolge all'interno di grotte, di varia dimensione e sviluppo, da pochi metri fino a centinaia di chilometri, formatesi a seguito di un fenomeno conosciuto in termini generici come carsismo: questo processo porta alla formazione delle grotte (speleogenesi) in rocce carbonatiche (calcari e dolomie), nei gessi e in minor misura in altre rocce a differente solubilità. Le forme che questi processi generano sono a diverse scale. Trattandosi di un argomento molto vasto, ci limiteremo a descrivere le grotte e i fenomeni associati relativamente alle immersioni speleosubaquee.

Relativamente alla morfologia delle grotte percorse durante le immersioni è utile conoscere le forme di dissoluzione e di erosione meccanica, essendo quelle più strettamente legate ai processi di formazione. Meno importante, ai nostri fini, la genesi dei riempimenti di origine fisica (ghiaia e sabbia) e di quelli chimici (speleotemi) né le forme che questi assumono, sebbene concrezionamenti vistosi siano fortemente appariscenti anche sott'acqua e rappresentino un elemento estetico di grande valore. Quanto detto nel seguito è ripreso, sintetizzato e rivisto da "Speleogenesi e morfologie dei sistemi carsici in rocce carbonatiche" di Jo De Waele e Leonardo Piccini (2008) - Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello "Geomorfologia Carsica" .



*Foto 1 – La grande galleria freatica all'uscita del 1° sifone dell'Orso di Ponte di Nava (autore A.Eusebio)*

## Il carsismo

Per carsismo s'intende l'insieme di processi d'asportazione delle rocce in cui il fenomeno dominante è quello della dissoluzione della roccia in acqua. La parola Carso si ritrova in molte lingue pre-Indo-Europeo come karra o gara, che significa "pietra". Questo termine risulta ricorrente in molte lingue. La dissoluzione avviene naturalmente dove è presente acqua in forma liquida, e quindi in zone temperate, tropicali ecc., attuali o passate. L'età dei processi che oggi appaiono ai visitatori delle grotte è stata in passato lungamente dibattuto, oggi quasi tutti gli studiosi sembrano convergere verso una formazione delle grotte in epoca molto remota collegandola con il fenomeno della "chiusura del Mediterraneo".

In termini geologicamente antichi si ipotizza la formazione delle grotte (in particolare per le aree europee e messicane) intorno al Miocene, quindi da 5 a 10 milioni di anni fa. Le grotte attuali rappresentano quindi dei fossili viventi. Questa è una delle ragioni per cui le cavità si ritrovano spesso in luoghi che in apparenza non hanno nessuna particolare caratteristica, per cui si estendono sotto il livello del mare con profondità importanti e i loro legami con la rete idrologica attuale possono essere poco noti. In pratico chi entra in una grotta, si accinge, senza rendersene conto, di entrare in un museo vivente. Questa è una delle ragioni per cui bisogna averne il massimo rispetto e attenzione. L'ambiente è alieno e antico ed è il residuo di una storia iniziata molti milioni di anni fa.

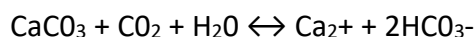
Noi siamo dei visitatori fortunati che possono godere delle bellezze con rispetto e attenzione. La dissoluzione avviene con maggiore efficacia in presenza di condizioni strutturali e di giacitura degli strati adatti, la presenza di discontinuità (stratificazione, diaclasi, fratture, ecc.) facilita l'accesso dell'acqua in profondità e di conseguenza lo scavo delle gallerie. Queste rocce sono, in ordine d'importanza, quelle carbonatiche (composte da calcite, dolomite, ecc.), quelle evaporitiche (composte da salgemma, gesso, anidrite, ecc.) e le quarziti (composte da quarzo).



Foto 2 – Le gallerie freatiche, fortemente concrezionate di Su Anzu – Sardegna (autore A.Eusebio)

## Le rocce carbonatiche

Il processo carsico nelle rocce carbonatiche è quello più studiato e più conosciuto poiché circa il 12% della superficie terrestre emersa è costituito da rocce carbonatiche (molto più di gesso, salgemma e quarzite), circa un quarto della popolazione mondiale vive in aree carsiche, e almeno il 25% delle acque potabili proviene da aree carsiche. La dissoluzione del carbonato di calcio in acqua arricchita in anidride carbonica può essere rappresentata dall'equilibrio:



Si tratta quindi di una reazione che si può svolgere sia verso destra (sciogliendo il carbonato di calcio), sia verso sinistra (depositandolo e quindi creando le concrezioni). Tutte queste reazioni sono influenzate dalla pressione parziale della CO<sub>2</sub>, dalla temperatura e dall'acidità (concentrazione in H<sup>+</sup> o pH).

Valori più alti di CO<sub>2</sub> aumentano il potere solvente dell'acqua, ma esistono altri fattori che influiscono, sia direttamente sia indirettamente, sulla solubilità di un carbonato in acqua. Questi fattori sono la temperatura, la pressione, la presenza di altri acidi (piogge acide, acidi organici, ossidazione di metalli, ecc.), l'effetto dello ione comune, l'effetto della forza ionica, l'effetto dell'accoppiamento ionico, l'effetto della miscelazione e la presenza di elementi in tracce e naturalmente il tempo.

## La speleogenesi

La speleogenesi è l'insieme dei processi che portano alla formazione delle grotte, dove per grotta s'intende una cavità naturale di dimensioni tali da essere accessibile all'uomo.

I processi speleogenetici sono molteplici e si manifestano praticamente in tutti i contesti geologico-ambientali. Esistono grotte formate da processi che non includono la dissoluzione carsica (grotte vulcaniche, grotte nei ghiacciai, grotte di crollo, ecc.), ma la maggior parte delle grotte è formata prevalentemente da processi di dissoluzione in rocce carbonatiche (speleogenesi carsica).

Nelle rocce carbonatiche le grotte si formano essenzialmente grazie a due tipi di processi in cui l'agente è l'acqua: processi chimici (dissoluzione della roccia e corrosione) e processi fisici (erosione). Le acque coinvolte possono essere di origine meteorica (epigeniche: ricarica della roccia solubile dall'alto verso il basso), oppure possono essere acque profonde (ipogeniche: ricarica della roccia solubile dal basso verso l'alto).



La formazione di un sistema carsico in una determinata area geografica con un certo tipo di clima dipende principalmente da fattori di tipo idrogeologico. Tra i fattori maggiormente influenti ci sono la provenienza dell'acqua (profonda o superficiale) e la quantità di essa che s'introduce nel sistema in funzione dello spazio e del tempo.

La maggior parte dei sistemi carsici che conosciamo si generano dalla combinata dell'azione di dissoluzione e corrosione carsica ed erosione per opera delle acque meteoriche che si muovono per gravità dai punti d'infiltrazione verso i punti di recapito (risorgive e sorgenti carsiche). In questi casi parliamo, per semplicità, di sistemi carsici normali.

Le aree carbonatiche in diretto contatto con le acque marine sono soggette ad una dissoluzione della roccia più intensa dovuta alla miscelazione tra acqua dolce ed acqua salata. Quando in aree costiere o isole interamente carbonatiche la ricarica avviene in modo diffuso ed è autoctona, la dissoluzione è particolarmente sviluppata in tre zone: la superficie che riceve le acque di pioggia, la parte superiore della zona satura dove avviene miscela tra acque d'infiltrazione e acque sotterranee, e lungo l'alocono, ove acque salate si miscelano con acque dolci.

Nelle isole o aree costiere in cui le rocce affioranti sono carbonatiche, ma in profondità esistono rocce poco solubili, la speleogenesi si differenzia poco dall'isola o area costiera interamente carbonatica. Se la roccia poco solubile si propaga al di sopra della zona satura influenzerà la forma della superficie piezometrica, e quindi la forma delle grotte. Un caso frequente è quello di un'area carsica costiera in cui l'apporto di acque meteoriche può essere molto importante con formazione di valli cieche, inghiottitoi e grotte con fiumi sotterranei. Queste acque, venendo a contatto con acque salmastre e salate, possono divenire ancora più aggressive. Le grotte, tuttavia, si sviluppano preferenzialmente lungo la zona di miscelazione tra acque d'infiltrazione e zona satura e lungo l'alocono.

In zone costiere troviamo spesso anche sedimenti contenenti almeno il 50% di cemento carbonatico che portano allo sviluppo di forme carsiche molto particolari,

Altro caso particolare sono le aree carbonatiche sede di intense mineralizzazioni a solfuri, contenenti tipicamente pirite, blenda, galena ed altri minerali, spesso sfruttati in miniere anche profonde. L'ossidazione dei minerali sulfurei nella zona di percolazione può provocare un'acidità rinnovata delle acque in grado di accelerare i processi di dissoluzione dei carbonati.

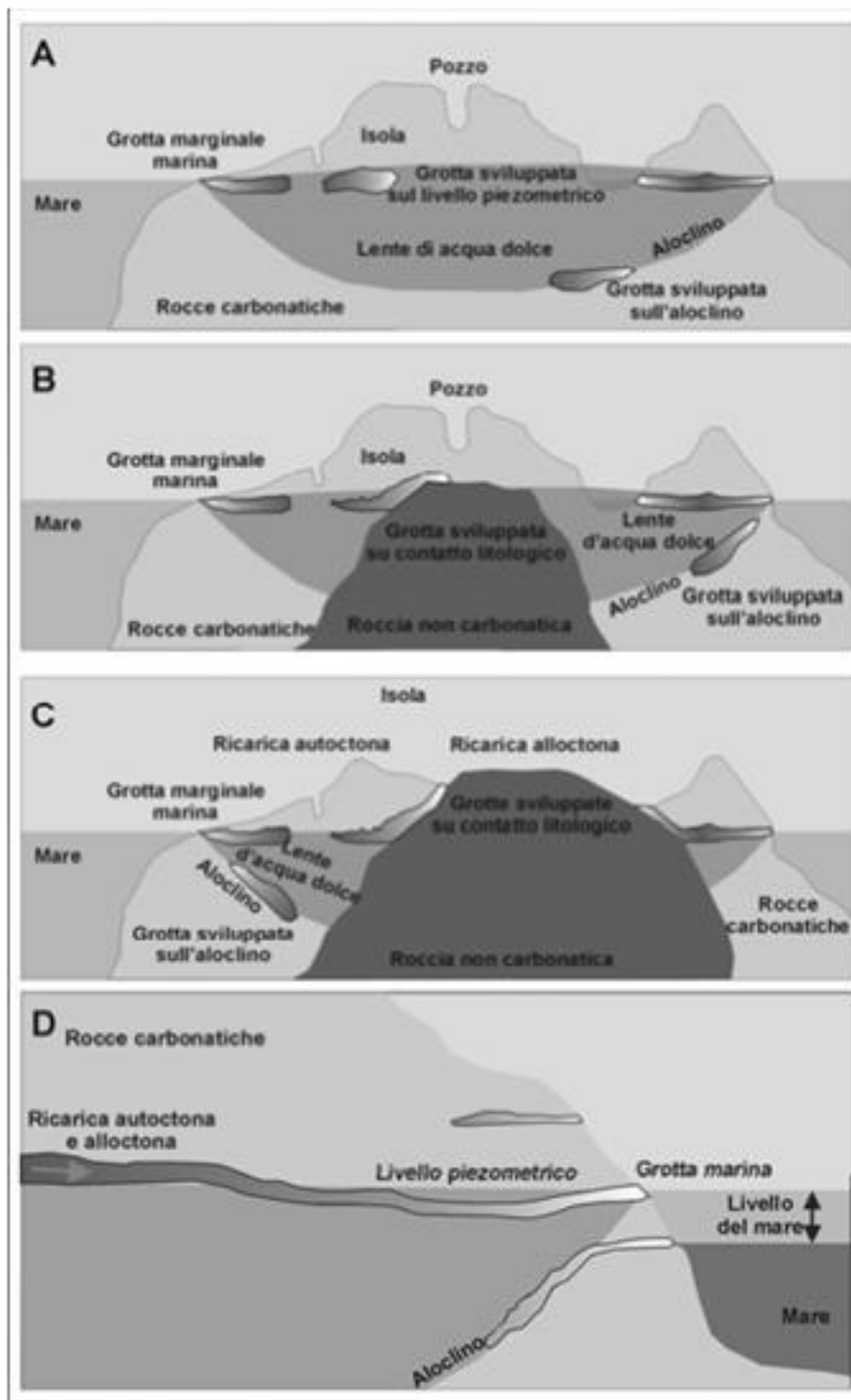


Fig. 1 Carsismo costiero: A. Isola carbonatica; B. Isola carbonatica con rocce impermeabili in profondità; C. Atollo; D. Costa carbonatica con ricarica alloctona e autoctona. (DeWeale & Piccini 2008)

## Struttura e morfologia dei sistemi carsici

Per sistema carsico s'intende, comunemente, l'insieme di forme superficiali e soprattutto sotterranee prodotte da processi carsici, o da processi da essi indotti, la cui funzione è di drenare le acque sotterranee da una determinata area verso una sorgente carsica (PICCINI, 1999). Si tratta quindi di un particolare tipo di "bacino idrogeologico", in cui la componente sotterranea del deflusso è dominante e la cui struttura è riconducibile, in genere, ad un modello tridimensionale.

Come qualsiasi sistema di drenaggio, la struttura di un sistema carsico dipende da molteplici fattori, il cui ruolo può essere sostanzialmente passivo (caratteristiche geologiche) o attivo (condizioni ambientali).

I principali fattori passivi sono legati alla litologia delle rocce che costituiscono il sistema, alle caratteristiche e alla distribuzione delle discontinuità e all'assetto strutturale, vale a dire alla configurazione geometrica dell'ammasso roccioso nel suo complesso.



*Foto 3 – Il massiccio del Marguareis, le differenze litologiche, strutturali e morfologiche hanno dato origine ad un panorama carsico articolato sia in superficie, sia in profondità (autore A.Eusebio)*

Le condizioni ambientali, legate essenzialmente all'orografia, al clima e all'assetto idrologico, si ripercuotono nella provenienza e nelle modalità di circolazione dell'acqua. Tali condizioni sono soggette a variare nel tempo, perciò si manifestano in modi ed entità diverse durante tutta l'evoluzione di un sistema carsico.

Tra i fattori attivi va considerata anche la tettonica, che si esplica essenzialmente attraverso fenomeni di sollevamento o abbassamento a scala regionale o locale. I tempi di sviluppo di un sistema carsico coprono, infatti, periodi che possono durare anche diversi milioni di anni e che quindi comprendono spesso le fasi di sollevamento o abbassamento a cui sono soggette aree continentali tettonicamente attive.

## Litologia

Sebbene speleogenesi e carsismo non interessino solo le rocce carbonatiche, è soprattutto in queste che si trovano la maggior parte dei complessi di grotte e delle forme carsiche che danno luogo a sistemi organizzati.

Nell'ambito delle rocce carbonatiche la litologia esercita la sua influenza in funzione di alcune caratteristiche che riguardano la tessitura (granulometria), la maggiore o minore stratificazione, la presenza di interstrati o lenti meno solubili (es. calcari selciferi), la presenza di filoni o corpi di breccie o materiale insolubile. Da queste caratteristiche litologiche dipende in primo luogo il grado di carsificabilità. In modo del tutto qualitativo possiamo raggruppare le principali rocce carbonatiche in tre classi di carsificabilità:

- Alta: calcari massicci o a strati spessi, marmi;
- Media: calcari a strati sottili, calcareniti, calcari selciferi, dolomie;
- Bassa: calcari marnosi, calcescisti, calcari selciferi metamorfici, cataclasiti.

Le grotte di dimensioni maggiori si trovano soprattutto nelle rocce della prima classe, ma esistono numerose eccezioni e i maggiori sistemi carsici comprendono spesso settori a diverso grado di carsificabilità.

## Discontinuità litologiche

Le discontinuità presenti in un ammasso roccioso possono essere di tre tipi:

- Stratificazione - superfici primarie di deposizione;
- Fratturazione - superfici secondarie prodotte per rottura meccanica;
- Clivaggio - superfici secondarie in rocce deformate prodotte da sforzi di taglio e/o compressivi (es. calcari metamorfici).

I giunti di strato hanno di per sé conducibilità idraulica ridotta. Diventano più permeabili quando i pacchi di strato sono stati soggetti a movimenti differenziali, come quando vengono piegati o tagliati in condizioni di bassa pressione. In questo caso le irregolarità delle superfici di strato producono linee di flusso d'interstato.



Le fratture (dette anche diaclasi), sono legate a sforzi tettonici, e possono essere associate a faglie o a piegamenti. Nelle pieghe si hanno sia zone in distensione sia in compressione, con formazione di fratture con orientamento parallelo, trasversale od obliquo rispetto alla direzione di massimo sforzo. In linea di principio hanno maggiore conducibilità idraulica le fratture dovute a distensione.



*Foto 4 – Il massiccio del Marguareis, Pian Ambrogio, sono evidenti le faglie che interessano il calcare (autore A.Eusebio).*

Il ruolo delle fratture dipende molto anche dal carico litostatico a cui sono sottoposte: in condizioni di elevato carico litostatico sono permeabili solo le fratture di distensione. In condizioni di carico litostatico basso, vale a dire sino a profondità di qualche decina o centinaia di metri al massimo, tutte le discontinuità tendono ad aprirsi, grazie a fenomeni di rilascio tensionale, e quindi diventano permeabili.

La permeabilità verticale delle fratture superficiali influenza soprattutto lo sviluppo di forme carsiche di superficie e la configurazione della zona più vicina all'esterno di un sistema carsico (zona epidermica o epicarso). Se le fratture hanno una conducibilità idraulica alta abbiamo di solito la formazione di cavità a pozzo, mentre se la conducibilità è più bassa avremo la formazione di ampie depressioni poco accentuate (doline), centrate sulle zone più fratturate.

Nella zona vadosa la struttura dei sistemi carsici dipende essenzialmente dalle condizioni di permeabilità "in grande" dell'ammasso roccioso. In condizioni di bassa permeabilità verticale avremo

la formazione di sistemi gerarchizzati (ad albero). Questo succede perché esistono solo poche vie suscettibili di diventare dreni verticali importanti, che diventano quindi "attrattori" nei confronti dell'acqua che circola nell'epicarso e delle cavità che si sviluppano nella zona di percolazione. In condizioni di elevata permeabilità verticale, cioè quando esistono più vie potenziali di drenaggio verticale, si sviluppano numerose vie parallele confluenti direttamente nella zona satura.

A livello della zona satura (ovvero quella dove l'acqua è sempre presente in un complesso carsico ed è quella che maggiormente interessa gli speleosub), il grado di fratturazione determina quello che possiamo definire come "grado di libertà" del sistema.

Se la fratturazione è bassa i condotti sono costretti a seguire poche vie di flusso, spesso dall'andamento complesso. In questo caso avremo sistemi batifreatici con tipico andamento a saliscendi. Con fratturazione diffusa avremo sistemi che tendono a seguire la quota della superficie piezometrica, vale a dire la quota potenziale di livello idrico.

Esistono ovviamente innumerevoli casi intermedi, in presenza di un grado di fratturazione che non sia né troppo basso né troppo alto. In questi casi, che poi sono la maggior parte, avremo sistemi misti, con porzioni epifreatiche collegate da segmenti freatici che si possono spingere anche molto al di sotto della superficie piezometrica.



*Foto 5 – Massiccio del Marguareis – vallone del Cappa, il raddoppio di sequenza calcari bianchi giurassici e calcari scistosi del Cretaceo ha ripercussioni nella formazione e nello sviluppo delle forme ipogee. Meandri e pozzi presentano alternanze stratigrafiche e morfologiche molto caratteristiche (autore A.Eusebio).*

Anche l'orientamento delle principali famiglie di fratture può influenzare la struttura di un sistema carsico. Molte grotte mostrano in pianta un andamento a reticolo regolare, in cui i condotti si dispongono secondo una, più spesso due, direzioni preferenziali.

Una semplice analisi statistica degli orientamenti dei condotti permette di correlare la configurazione di un sistema carsico con l'assetto delle discontinuità, ovvero con il contesto tettonico in cui esso si è formato. Viceversa, il rilevamento delle fratture in superficie e dei marcatori cinematici permette di fare previsioni sull'andamento generale dei sistemi carsici in profondità, sulla base dell'ipotesi che durante le fasi di formazione questi abbiano scelto soprattutto le discontinuità oggetto di distensione (perpendicolari alla direzione di minimo sforzo).



Fig. 2 . La risorgenza di Cala Luna mostra evidenti sviluppi di gallerie lungo alcune principali direttrici tratto dal Convegno Internazionale di Speleologia Subacquea - Calagonone 2015

## Morfologie ipogee

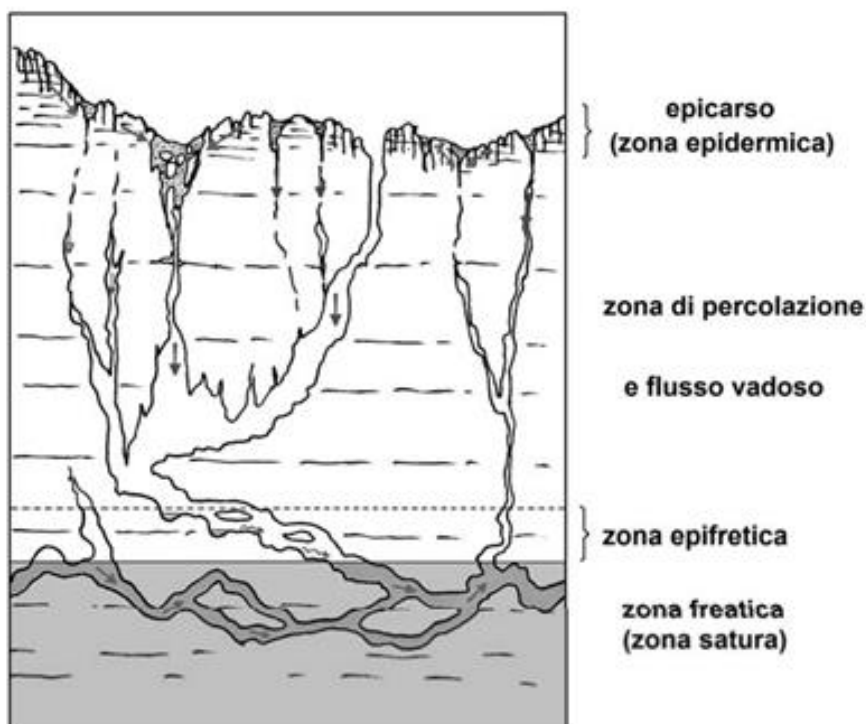
I sistemi carsici sono degli insiemi più o meno organizzati di condotti, prodotti da processi di dissoluzione e d'erosione. I condotti possono avere dimensioni variabili, in sezione, da pochi mm a qualche decina di metri. Le caratteristiche morfologiche riguardano sia la scala del condotto, per quanto riguarda la geometria del condotto stesso e in particolare la sezione trasversale, sia la scala piccola, cioè relativa alla struttura delle pareti in roccia (forme parietali).

Nei sistemi carsici, al di sotto dell'epicarso, caratterizzato da elevata porosità e da circolazione diffusa, si riconoscono tipicamente tre zone, caratterizzate da flussi idrici in condizioni idrodinamiche diverse:

- Zona vadosa (o di scorrimento a pelo libero);
- Zona epifreatica (o di oscillazione piezometrica);
- Zona freatica (o di flusso a pieno carico).

Questi tre ambienti, i cui limiti non sono sempre facilmente definibili né identificabili, sono caratterizzati da diverse caratteristiche morfologiche in funzione delle diverse modalità di flusso.

Alla scala dei condotti, si osservano andamenti prevalentemente verticali nella zona vadosa (pozzi) e prevalentemente orizzontali (gallerie) in quella epifreatica e freatica. Il ruolo dei fenomeni di erosione meccanica è particolarmente importante nella zona vadosa inferiore, in corrispondenza dei collettori principali, e in quella epifreatica, mentre è assai minore in quella freatica. La forma dei condotti assume particolari configurazioni in funzione del regime idrologico dominante e del carico litostatico



*Fig. 3 Partizione verticale delle condizioni di flusso in un sistema carsico epigenico.*

## Zona vadosa

Subito al di sotto della zona epicarsica, cioè nella parte alta della zona vadosa, i condotti assumono in genere andamento verticale e prendono il nome generico di pozzi.

La forma può essere quasi perfettamente cilindrica, lentoidale, più o meno schiacciata, o a fuso. Essa dipende dalle caratteristiche strutturali della roccia e dal tipo di alimentazione. Dove prevalgono percolazione e flussi laminari parietali, i pozzi hanno sezione orizzontale da circolare ad allungata, in funzione delle modalità di alimentazione (puntuale o lineare).

I pozzi possono formare successioni pressoché continue, oppure essere intervallati da brevi cunicoli o strette forre. La loro profondità può arrivare sino a diverse centinaia di metri, soprattutto in presenza di calcari poco stratificati e attraversati da fratture verticali molto profonde dovute a fenomeni di rilascio tensionale in prossimità di pareti esterne. Nelle zone di flusso incanalato i pozzi hanno spesso una sezione complessa, con ampliamenti e restringimenti, e maggiore sviluppo in pianta.



Foto 6 – Marguareis (Cuneo) Nella zona di assorbimento la acque vengono raccolte lungo vie di drenaggio principali . In questo caso un pozzo carsico veicola verso il basso le acque meteoriche e quelle di fusione della neve (autore Attilio Eusebio).

Nella zona vadosa profonda, o in condizioni di bassa penetrabilità verticale del corpo roccioso (fratturazione poco sviluppata) o di basso gradiente idraulico, si possono formare lunghe forre

sotterranee. L'andamento morfologico può essere caratterizzato da brevi cascate collegate da tratti a minore pendenza, oppure avere pendenza regolare, più o meno accentuata. La pendenza e il profilo longitudinale di queste forre dipendono molto da fattori litostrutturali, in altre parole dall'inclinazione degli strati e dalla presenza di faglie e fratture. Nel caso di una grotta di contatto, questa è vincolata a seguire il tetto della formazione impermeabile di base. Nelle forre l'azione d'erosione meccanica può avere un ruolo prevalente rispetto a quello della dissoluzione, specie nei sistemi con alimentazione esterna.

L'andamento in pianta delle cavità sotterranee può essere rettilineo o ad anse (meandri). In genere, l'andamento rettilineo si ha in presenza di rocce fratturate o di flussi a regime variabile; l'andamento a meandri si ha in rocce compatte e con flussi più regolari. Le anse tendono a spostarsi verso valle approfondendosi, dando ai meandri un andamento sinuoso anche in sezione verticale.

### **Zona Freatica**

La zona freatica è caratterizzata da flussi solitamente lenti in condizioni di totale saturazione e con pressioni elevate (sino a qualche decina di bar). Queste condizioni influenzano la forma dei condotti, che tende ad essere regolare con profili da circolari ad ellittici, più o meno eccentrici

I condotti hanno un andamento orizzontale o a "sali/scendi", in funzione del diverso assetto strutturale (giacitura degli strati, fratturazione, ecc.), con sezioni solitamente ellittiche, queste sono le zone più interessanti per gli speleosub in quanto spesso inondate. Nella zona di assorbimento le acque vengono raccolte lungo vie di drenaggio principali. In questo caso un pozzo carsico veicola verso il basso le acque meteoriche e quelle di fusione della neve. (Foto Attilio Eusebio) sse maggiore lungo le superfici di discontinuità. La maggiore o minore eccentricità dipende dalla permeabilità della discontinuità e quindi, spesso, dal carico litostatico. Con forti spessori di roccia si hanno condotti a sezione sub-circolare, mentre con modesti condotti a sezione molto ellittica, in genere con asse maggiore orizzontale.

I condotti freatici costituiscono spesso degli insiemi anastomizzati di gallerie, in cui non è sempre riconoscibile un condotto principale, e presentano diversioni e bypass.

Le gallerie di ambiente freatico possono evolvere in forre quando vengono a trovarsi nella zona epifreatica e rimangono a lungo oggetto di flussi idrici in condizioni di non saturazione. Se il flusso non può approfondirsi, per la presenza di un orizzonte più resistente all'erosione o perché ha raggiunto un profilo d'equilibrio, si ha erosione laterale, con allargamento della galleria, che assume una tipica morfologia a tunnel e dimensioni anche notevoli. E' così che si formano le grandi gallerie tipiche delle grotte tropicali d'attraversamento, larghe anche diverse decine di metri.



*Foto 7 Yucatan – Riviera Maya). Le gallerie scavate nei calcari messicani risultano di maggiori dimensioni rispetto a quelle esistenti in Europa, con una rete molto capillare a debole profondità. La loro grande estensione è legata principalmente al mescolamento delle acque dolci e salate. Si tratta di cavità relativamente antiche che presente notevoli fenomeni di concrezionamento. (autore A.Eusebio)*



*Foto 8 Grotta di Riu Neri (Friuli) anche in questo caso il condotto risulta ancora pieno di acqua. La frattura generatrice in questo caso è circa parallela all'asse principale della galleria (autore A. Eusebio)*