

**FST** Federazione  
Speleologica  
Toscana

*Società  
Speleologica  
Italiana*

# QUADERNI DIDATTICI

CLUB ALPINO ITALIANO



Con il patrocinio della  
Commissione Centrale per la Speleologia

*Erga edizioni*

1

LEONARDO PICCINI

# GEOMORFOLOGIA E SPELEOGENESI CARSICA



QUADERNI DIDATTICI della  
Società Speleologica Italiana

Coordinamento editoriale:

*Giovanni Badino, Carlo Balbiano, Natalino Russo*

Per entrare in contatto con gli Autori rivolgersi alla  
sede della Società Speleologica Italiana  
Via A. Zamboni, 67 - 40127 - Bologna

© Società Speleologica Italiana

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

Edizione riservata  
realizzata nel mese di ottobre 1999 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 Storia della speleologia**  
*Franco Utili*
- 8 Il clima delle grotte**  
*Carlo Balbiano*

QUADERNI DIDATTICI  
DELLA  
SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA

1

Leonardo Piccini  
**GEOMORFOLOGIA  
E SPELEOGENESI CARSICA**

Con illustrazioni di Maria Dematteis

## La serie dei Quaderni Didattici SSI

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 qualche decina di migliaia di persone ma, stranamente, non si è mai ripreso il progetto di dare un ausilio didattico completo a chi realizzava e seguiva i corsi. Le iniziative in tal senso erano solo quelle della stesura di dispense a livello locale, meritorie ma in genere molto carenti.

Il *Manuale*, ormai completamente superato, aveva anche mostrato che la tentazione "enciclopedica" di concentrare tutto in un'unica pubblicazione era molto pericolosa perché le varie branche della speleologia hanno una velocità di rinnovamento molto diversa l'una dall'altra e non si poteva, né si può, sperare di avere un testo unico completamente aggiornato.

Da alcuni anni 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 davvero molto approfonditi, ma gran parte degli altri settori rimanevano totalmente scoperti.

Un paio d'anni fa il Consiglio Direttivo ha deciso di rimettere mano al progetto, articolandolo in una serie di *Quaderni Didattici completi*. 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 anche ad un pubblico ben più vasto sul mondo delle grotte.

A questo primo quaderno ne seguiranno su: *Rilievo delle Grotte*, *Speleologia in Cavità Artificiali*, *Impatto dell'Uomo sull'Ambiente di Grotta*, *Tecniche di Base*, *Storia della Speleologia*, *Geologia per Speleologi*, *Climatologia delle Grotte*, *Reazioni a Emergenze*, *Primo Soccorso*, *Idrogeologia Carsica*, *Immagini dalle Grotte*, *Documentazione del Mondo Sotterraneo*, *Organizzazione della Speleologia*, *Grandi Grotte del Mondo*, *Vita nelle Grotte* e vari altri in progetto.

Si può dunque capire come il programma sia realmente ambizioso ma, grazie all'impegno di molti, pensiamo di poter completare il primo ciclo di stampa dell'intera collana entro breve tempo. Fatto questo bisognerà rimettere mano ai quaderni già editi correggendo refusi, imprecisioni, inadeguatezze che inevitabilmente saranno apparse.

I *Quaderni Didattici* sono dunque intesi ad integrare e divulgare quanto già esiste; il loro livello di approfondimento non è mirato al livello che deve essere tenuto da un corso di primo o secondo livello, ma piuttosto a fornire le basi culturali per realizzare corsi. Per questo quelli che vanno a coprire ex-novo un settore sono adeguatamente approfonditi, mentre quelli che hanno solo un obiettivo di introduzione a letture più approfondite già esistenti lo sono in misura minore.

Quanto poi siamo riusciti nel nostro intento lo giudicherà la sperimentazione: noi per ora abbiamo fatto i primi, fondamentali passi dopo decenni di immobilità.

Siamo particolarmente grati alle *Federazioni Speleologiche Regionali* che collaborano con questa iniziativa e al *Club Alpino Italiano* che ha voluto darle il suo patrocinio. Speriamo sia solo la prima di molte iniziative che manderemo avanti tutti insieme.

Un grazie agli Autori e ai numerosissimi lettori che si sono sobbarcati la fatica di pazienti letture delle bozze in cerca di imprecisioni e migliorie da apportare.

Ma un grazie speciale va soprattutto a Natalino Russo, Carlo Balbiano e Maria Dematteis che col loro paziente lavoro hanno permesso il nascere di questa iniziativa.

Il Presidente della SSI  
Giovanni Badino



## PRESENTAZIONE

Esiste un mondo meraviglioso sottoterra che non è Wonderland di Lewis Carroll ma è molto più reale e sicuramente altrettanto fantastico: è il mondo nascosto delle grotte e della cavità ipogee della nostra regione. La Toscana è rinomata per le opere d'arte, per la sua storia, per il paesaggio, per il mare e le sue splendide isole, ma non è nota come una delle regioni più carsiche del continente. Invece sotto i nostri piedi c'è racchiuso un mondo di grotte piccole e grandi, che dalle Apuane si diramano in tutta la regione. Alcuni recenti fenomeni che hanno portato alla formazione di doline (Camaione e Grosseto) sottolineano questa "presenza" sotterranea che è ricca e diversificata, oggetto di un apposito censimento che è divenuto parte integrante del Piano di Indirizzo Territoriale della Toscana, non soltanto come quadro conoscitivo, ma soprattutto come patrimonio da tutelare. Quando si parla di cavità carsiche in genere si ha a che fare spesso con "autostrade" sotterranee delle acque che collegano territori e versanti diversi, dissestando zone distanti anche chilometri dagli inghiottitoi. Si tratta quindi di presenze vulnerabili, delicate, a rischio di contaminazione, che vanno rispettate e tutelate. Per questo che la conoscenza, lo studio, l'attenzione a questi importanti fenomeni sotterranei è elemento essenziale per la loro protezione e conservazione.

Claudio Del Lungo  
*Assessore all'Ambiente Regione Toscana*

Era da diverso tempo ormai che si era manifestata la necessità di dotare i gruppi speleologici di una sorta di “libro di testo” al quale fare riferimento in occasione dei corsi di speleologia o degli incontri di studio.

Dopo un lungo periodo trascorso tra stesura dei testi e definitiva messa in cantiere dell’iniziativa, fortemente voluta dalla Società Speleologica Italiana, ecco arrivare i primi risultati. Questa dispensa, a cura di Leonardo Piccini, vuole essere una base didattica dalla quale attingere le prime nozioni che devono costituire la base del bagaglio culturale di ogni speleologo.

L’abitudine al rapporto con l’allievo, Leonardo Piccini insegna all’università di Firenze, ha sicuramente contribuito alla riuscita di un piccolo manuale completo ma di facile apprendibilità.

Gianni Ledda

*Presidente della Federazione Speleologica Toscana*



## PREFAZIONE E RINGRAZIAMENTI

In questa breve dispensa sono trattati, in modo semplice e succinto, i fenomeni carsici e le forme che ne derivano, con particolare attenzione a quelle sotterranee. Per problemi di spazio, imposti dalla scelta di limitare il numero di pagine e di figure per contenere i costi, si è scelto di non trattare i fenomeni pseudocarsici e le grotte d'origine diversa da quella carsica, come ad esempio le grotte laviche o quelle nei ghiacciai. Anche nell'ambito dei fenomeni propriamente carsici si è scelto di concentrare l'attenzione su quelli che interessano le sole rocce carbonatiche, poiché i processi carsici in altri tipi di rocce, in particolare in quelle gessose, comportano processi evolutivi diversi.

Infine, non si fa cenno ai riempimenti di grotta, siano essi chimici che fisici, argomento che meriterebbe un manuale specifico, vista anche la ricaduta che può avere su molte discipline attinenti con la speleologia (ad esempio la paleontologia e l'archeologia).

In altre parole si è preferito non trattare certi argomenti, rimandandoli ad eventuali future dispense della stessa collana, anziché esporli in maniera frettolosa ed insoddisfacente. Per tali ragioni queste dispense sono ben lontane dall'abbracciare tutte le situazioni connesse con la formazione e lo sviluppo delle forme carsiche, sia di superficie sia sotterranee, e tanto più delle grotte in genere.

Per porre rimedio, almeno in parte, all'esigenza di condensare in poche righe argomenti che necessiterebbero di maggiore spazio ho ritenuto opportuno corredare ogni capitolo di una breve guida ad ulteriori letture, che possono essere trovate, spero senza troppe difficoltà, nella principale bibliografia italiana e straniera.

Questo lavoro è il prodotto dell'integrazione di molteplici letture sull'argomento, nonché di esperienze e considerazioni personali. Come tale ha la sua quota di soggettività, legata soprattutto alle situazioni che l'autore ha avuto modo di conoscere e studiare in prima persona. Anche per ovviare a questo, durante la stesura, le bozze sono passate sotto l'occhio esperto di alcuni dei maggiori studiosi di fenomeni carsici in Italia. In particolare hanno apportato significative migliorie i contributi di Carlo Balbiano, Alfredo Bini, Aldo Cinque, Paolo Forti e Ugo Sauro, ai quali va la mia più sincera riconoscenza. Utili osservazioni mi sono state fornite da Antonio Santo, Nicoletta Santangelo, Marco Vattani e Bartolomeo Vigna, che desidero ringraziare sentitamente.

Un doveroso riconoscimento va poi al consiglio della SSI che ha promosso quest'iniziativa editoriale e che mi ha affidato il compito di scrivere queste dispense. Infine un sincero grazie anche a Natalino Russo, coordinatore di questa collana di dispense didattiche, che mi ha continuamente stimolato a proseguire con impegno nel lavoro, e a Maria Dematteis per l'attenta esecuzione dei disegni.

<b>1. Carsismo e sistemi carsici .....</b>	<b>1</b>
1.1. Generalità	1
1.2. Ambienti e sistemi carsici	1
<i>Letture ulteriori</i>	2
<b>2. Chimica dei processi carsici in rocce carbonatiche .....</b>	<b>2</b>
2.1. dissoluzione	3
2.2. Effetti dovuti alla miscelazione	
2.3. Processi ipercarsici	4
<i>Letture ulteriori</i>	5
<b>3. Morfologia degli ambienti carsici.....</b>	<b>5</b>
3.1. Generalità	5
3.2. Classificazione delle forme carsiche	5
3.3. Forme di superficie s.l.	6
3.3.1. <i>Forme di raccolta</i>	8
3.3.2. <i>Forme di ruscellamento</i>	8
3.3.3. <i>Forme di infiltrazione</i>	8
3.3.4. <i>Forme di emergenza</i>	10
3.4. Forme sotterranee	10
3.4.1. <i>Condotti carsici</i>	11
3.4.2. <i>Forme parietali</i>	12
3.5. Forme indotte	13
<i>Letture ulteriori</i>	15
<b>4. Speleogenesi carsica.....</b>	<b>15</b>
4.1. Generalità	15
4.2. Caratteristiche idrogeologiche dei sistemi carsici	15
4.3. Cenni sulle teorie speleogenetiche	16
4.3.1. <i>Evoluzione dei sistemi carsici</i>	16
4.3.2. <i>Sistemi carsici idrotermali</i>	16
<i>Letture ulteriori</i>	17
<b>5. Cenni sui fattori che influenzano i sistemi carsici.....</b>	<b>17</b>
5.1. Generalità	17
5.2. Fattori lito-strutturali (passivi)	17
5.2.1. <i>Litologia</i>	18
5.2.2. <i>Discontinuità strutturali</i>	18
5.3. Fattori geo-ambientali (attivi)	18
5.3.1. <i>Tettonica attiva</i>	18
5.3.2. <i>Fattori idrogeologici</i>	18
5.3.3. <i>Fattori climatici</i>	19
<i>Letture ulteriori</i>	20
<b>Bibliografia .....</b>	<b>21</b>



# 1. CARSISMO E SISTEMI CARSICI

## 1.1. Generalità

Con il termine **carsismo** s'intende comunemente un insieme di fenomeni di asportazione delle rocce carbonatiche (calcari e dolomie) che si attuano attraverso processi fisico-chimici che portano tali rocce in soluzione nell'acqua. Il più importante tra questi processi è la dissoluzione ad opera dell'acido carbonico ( $H_2CO_3$ ) che le acque naturali contengono quale prodotto dell'idratazione del Biossido di Carbonio (o anidride carbonica =  $CO_2$ ) presente nell'ambiente.

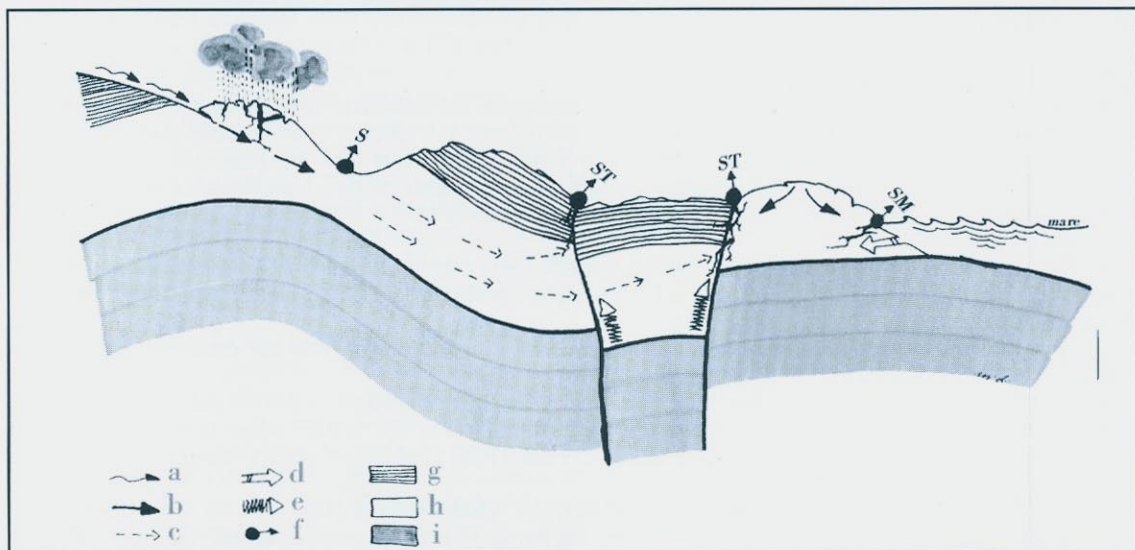
I processi di dissoluzione non agiscono, però, solo sulle rocce carbonatiche ma, in misura più o meno grande, su tutte le rocce che costituiscono la superficie terrestre. Forme analoghe a quelle dei paesaggi carsici più classici si trovano, infatti, anche su altri tipi di rocce, seppur in particolari condizioni climatiche e morfologiche. Questo succede sia in rocce più facilmente solubili di quelle carbonatiche, come ad esempio i gessi, che meno solubili, come ad esempio le quarziti o i graniti.

Più in generale, possiamo affermare che i fenomeni carsici abbracciano uno spettro piuttosto ampio di situazioni e prescindono sia dalle caratteristiche litologiche delle rocce, sia dal tipo di processo chimico che porta la roccia in soluzione. Nella maggior parte delle situazioni essi interessano le rocce a maggiore solubilità, vale a dire le rocce carbonatiche (calcari e dolomie) ed evaporitiche (gessi e salgemma). Questo accade per la semplice ragione che sulle altre litologie gli effetti dei processi carsici sono così lenti da essere prontamente cancellati da altri processi di degradazione più attivi.

Possiamo dunque affermare che: maggiore è la solubilità di una roccia, più ampio è lo spettro di situazioni morfo-climatiche nelle quali tale roccia risulta carsificabile. Viceversa, rocce a bassa solubilità potranno dare luogo ad ambienti carsici solo in particolari condizioni. I gessi, ad esempio, si presentano carsificati praticamente a tutte le latitudini e in tutti i contesti morfologici. Le quarziti invece, in pratica le rocce meno alterabili e solubili che esistano, sono carsificabili solo in condizioni di climi estremamente umidi e caldi, e in situazioni con rilievo poco accentuato; condizione questa che limita l'energia disponibile per i processi meccanici di erosione.

In particolari condizioni, anche per le rocce carbonatiche può succedere che, in superficie, i processi carsici siano subordinati ad altri tipi di processi morfogenetici. In questi casi accade che il carsismo, pur non in grado di condizionare molto il paesaggio, condiziona però l'assetto idrologico. Questa situazione ricorre spesso nei carsi di alta montagna o della fascia subartica ove l'azione del gelo rimane il processo di modellamento superficiale dominante.

La maggior parte dei fenomeni carsici conosciuti, sia di superficie sia di sottosuolo, è dovuta all'azione delle acque di origine meteorica oppure all'azione delle acque marine (Fig. 1). Si conoscono però fenomeni, per lo più sotterranei, dovuti alla circolazione di acque di origine profonda: queste acque possono essere quelle rimaste imprigionate in rocce sedimentarie durante la loro deposizione, dette acque



**Fig. 1** Diversi tipi di sistemi carsici in funzione dell'origine e delle modalità di circolazione: a) ruscellamento superficiale; b) circolazione sotterranea per gravità; c) circolazione profonda con risalita convettiva; d) intrusione di acque marine; e) risalita di acque di origine profonda (connate o iuvenili); f) sorgenti carsiche (S=sorgenti normali, ST=sorgenti termali, SM=sorgenti marine); g) copertura impermeabile; h) rocce carsificabili(carbonatiche); i) basamento impermeabile.



“connate” (o anche “fossili”), oppure essere il prodotto di processi magmatici o metamorfici che avvengono in profondità nella crosta terrestre, nel qual caso vengono chiamate acque “iuvenili”.

Particolarmente importanti sono quei fenomeni che si hanno nelle zone ove vengono a contatto acque di origine diversa, come l'acqua dolce con quella marina in prossimità delle coste, oppure là dove si ha la risalita di acque di origine profonda, come ad esempio in corrispondenza di importanti zone di faglia.

Il carsismo legato al flusso sotterraneo delle acque meteoriche, che può essere legato unicamente alla gravità, oppure a meccanismi di convezione (innescati da un termalismo più o meno spinto che le acque assumono spingendosi in profondità = carsismo idrotermale), è in ogni modo quello che più facilmente si manifesta sulla superficie terrestre e con cui più spesso hanno a che fare gli speleologi (e l'unico che verrà qui approfondito).

## 1.2. Ambienti e sistemi carsici

Si definisce “carsico” un ambiente in cui i processi che portano le rocce in soluzione prevalgono su altri tipi di agenti modellatori, caratterizzandone il paesaggio e l'assetto idrologico.

Ma come si “misura” l'effetto dei processi carsici?

Un tempo ci si basava soprattutto su criteri morfologici, vale a dire sulla diffusione di forme tipiche del Carso vero e proprio (quello tra Trieste e la Slovenia), come le doline, i karren, le grotte, etc.. Su queste basi era ad esempio la nota suddivisione di Cvijic (1960), che distingueva un carso pienamente sviluppato (olocarso) da uno solo parzialmente sviluppato (merocarso). In tempi più recenti si è, viceversa, dato sempre più importanza all'assetto idrologico, del quale certi caratteri peculiari del paesaggio non sono altro che delle conseguenze morfologiche. In questo senso non potremo considerare pienamente carsica una zona in cui i processi carsici si limitano ad agire sulla superficie esposta delle rocce senza condizionarne le caratteristiche idrogeologiche “in grande”; cosa che accade spesso a piccola scala su superfici di rocce calcaree pressoché prive di discontinuità, o quando i residui insolubili lasciati dai fenomeni di alterazione chimica occludono le fratture impedendo ai processi carsici di spingersi in profondità.

Un sistema carsico è, dunque, un particolare tipo di **sistema idrologico** ove il drenaggio segue soprattutto vie sotterranee, lungo condotti di dimensioni tali da permettere il flusso di elevate quantità d'acqua. Da ciò si deduce che la caratteristica fondamentale che un corpo roccioso deve avere perché in esso si sviluppi un sistema carsico è la presenza di discontinuità che permettano la formazione di una rete di drenaggio sotterranea; solo in questo caso i processi carsici potranno agire in profondità.

Sebbene nelle prime fasi l'acqua presente nelle discontinuità si muova con velocità bassissima, se essa viene, seppur lentamente, rinnovata, tali discontinuità sono allargate consentendo l'afflusso di quantità sempre maggiori d'acqua che scioglie altra roccia, e così via, con un meccanismo la cui velocità tende ad aumentare nel tempo (si tratta cioè di un processo a retroazione positiva).

Solo quando le fessure saranno allargate in misura tale da consentire veloci flussi dell'acqua, inizierà un'azione meccanica ad opera dei materiali che essa trascina in sospensione dopo gli acquazzoni più violenti (abrasione meccanica).

### Letture ulteriori

Numerosi sono i testi a carattere generale, che si occupano dei fenomeni carsici, ma solo pochi affrontano attentamente il problema di una loro corretta definizione. Un approccio abbastanza corretto si trova sui recenti volumi di Ford & Williams (1989) e di White (1988), due testi fondamentali per una conoscenza generale dell'idrologia e della geomorfologia degli ambienti carsici. Una sintetica ma ottima rassegna delle diverse situazioni legate ai fenomeni carsici sotterranei è invece data da Ford (1988), nel volume “Paleokarst”.

In lingua italiana c'è da segnalare il capitolo di morfologia carsica di Sauro (1991), inserito nel testo di “Geomorfologia” di G.B. Castiglioni, che affronta anche i problemi dei rapporti tra processi carsici e altri processi morfogenetici.

Seppur non recentissimi, rimangono degli ottimi testi a carattere generale sul carsismo i volumi di Sweeting (1972), Jakucs (1977) e in particolare di Bögli (1980).

Per chi invece volesse approfondire il carsismo nei gessi, oltre a quanto reperibile nei testi già citati, si potranno trovare utili aggiornamenti nel volume “Gypsum karst of the world” edito da Klimchouk et al. (1998), mentre un approccio più didattico è quello di Forti (1991) pubblicato su Speleologia Emiliana.

## 2. CHIMICA DEI PROCESSI CARSICI IN ROCCE CARBONATICHE

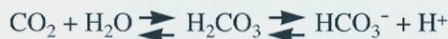
La gran parte dei fenomeni carsici conosciuti riguarda le rocce a composizione carbonatica: calcari, dolomie e litologie a composizione intermedia. Calcari e dolomie ospitano i sistemi sotterranei di gran lunga più diffusi e importanti nel mondo, per questa ragione tratteremo solo i processi che le coinvolgono, tralasciando i processi di dissoluzione che interessano le altre famiglie di rocce che, con l'eccezione di quelle solfatiche, sono di qualche interesse speleologico solo in casi eccezionali.



## 2.1. Soluzione

La **calcite** -  $\text{CaCO}_3$  - e la **dolomite** -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  - sono i principali costituenti delle rocce carbonatiche; per entrambe la solubilità in acqua pura è piuttosto bassa, intorno a 10-15 mg/l a temperatura ambiente (poco più di quella del quarzo). La solubilità di queste due specie chimiche aumenta di un ordine di grandezza quando l'acqua acquisisce una certa acidità naturale, diventando "aggressiva". In questo caso il processo non è più di semplice soluzione ma diventa un attacco acido, prendendo il nome generico di **corrosione**.

L'acido più comunemente disciolto nelle acque naturali è l'acido carbonico, proveniente dall'idratazione del  $\text{CO}_2$  di origine atmosferica, biologica od endogena, secondo la reazione:



Il processo di solubilizzazione della calcite e della dolomite in acqua in presenza di  $\text{CO}_2$ , può dunque essere espresso dalle due formule:



In presenza di  $\text{CO}_2$  la solubilità della calcite è di circa 100 mg/L per una pressione di  $\text{CO}_2 = 100 \text{ Pa}$  ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ Pascal} = 10^{-5} \text{ bar}$ ) e raggiunge i 500 mg/l per  $\text{PCO}_2 = 10^4 \text{ Pa}$ , alla temperatura di  $25^\circ\text{C}$ . Di poco inferiore è la solubilità della dolomite alle stesse condizioni di temperatura e pressione di  $\text{CO}_2$ , circa 90 e 480 mg/l rispettivamente.

Quel che differenzia i due equilibri è soprattutto la velocità di reazione che è decisamente inferiore per il processo di soluzione della dolomite. In altre parole, per solubilità teoriche di calcite e dolomite sostanzialmente analoghe, quest'ultima risulta in pratica meno "solubile", a parità di tempo di reazione, a causa di una minore velocità di soluzione. Per sciogliere 1 g di dolomia occorre dunque più tempo che per sciogliere 1 g di calcare; non più acqua, solo più tempo.

Senza entrare nei dettagli termodinamici che regolano questi equilibri chimici, si può dunque affermare che la solubilità delle rocce carbonatiche, a parità delle altre condizioni, è tanto maggiore quanto più  $\text{CO}_2$  è presente nell'acqua.

L'effetto della temperatura sulla solubilità di calcite e dolomite in acqua pura, e in condizioni ambientali normali, è quasi trascurabile. La solubilità di  $\text{CO}_2$ , invece, diminuisce in maniera considerevole con l'aumentare della temperatura. Questo fa sì che acque fredde siano teoricamente più aggressive di acque calde, anche se la minor velocità di dissoluzione a basse temperature attenua in parte questo effetto.

Il fatto è che raramente un'acqua naturale ha la possibilità di saturarsi in  $\text{CO}_2$  (a meno che non finisca in una bottiglia di acqua gassata!). Il  $\text{CO}_2$  presente nell'atmosfera è, infatti, molto poco; mentre assai di più se ne trova nei suoli, a causa dei diversi processi biologici che si svolgono in essi soprattutto ad opera di piante e batteri, e per effetto della decomposizione della materia organica. E' questa la ragione per cui le acque che filtrano attraverso spesse coltri di suolo si arricchiscono maggiormente in  $\text{CO}_2$ , di quanto non succeda alle acque che cadono sulla roccia nuda e s'infiltrano rapidamente in profondità. Si è osservato anche che durante le stagioni in cui l'attività biologica nel terreno è maggiore, cioè la primavera e l'estate, le acque di infiltrazione sono maggiormente aggressive. Per le stesse ragioni, nelle aree tropicali umide, ove i processi di decomposizione dei residui vegetali sono molto intensi durante tutto l'anno, le acque di infiltrazione, benché più calde di quelle delle regioni temperate e fredde, hanno un'azione carsogena maggiore essendo mediamente più ricche in  $\text{CO}_2$ .

## 2.2. Effetti dovuti alla miscelazione

Un meccanismo particolare di dissoluzione dei calcari, che gode di una certa notorietà benché la sua importanza, in termini quantitativi, sia probabilmente modesta, è quello della miscelazione di acque a diverso contenuto di  $\text{CO}_2$ , proposto per la prima volta, in chiave speleogenetica, da Bögli nel 1963. Il processo di dissoluzione del calcare in acqua è, infatti, piuttosto rapido e quindi un'acqua in lento movimento attraverso le fratture di una roccia calcarea dovrebbe raggiungere la saturazione dopo poche decine di metri di percorso sotterraneo. Se poi consideriamo che durante le prime fasi di sviluppo dei condotti sotterranei, le acque si muovono con moto lentissimo in fessure di ampiezza submillimetrica, risulta difficile capire come sia possibile lo sviluppo di fenomeni carsici molto profondi.

Il processo di miscelazione fornisce una possibile spiegazione, poiché esso permette la riattivazione di soluzioni ormai sature; il processo è relativamente semplice e facilmente intuibile esaminando la curva di solubilità della calcite in funzione della pressione di  $\text{CO}_2$  (Fig. 2). In sostanza, miscelando due soluzioni sature con diverso contenuto in  $\text{CaCO}_3$ , ottengo una soluzione sempre sottosatura e quindi in grado di sciogliere altro calcare. Quest'effetto agisce soprattutto nelle fasi in cui i condotti carsici in formazione sono completamente allagati.

E' abbastanza evidente che questo processo non è in grado, da solo, di spiegare l'esistenza di ambienti



carsici sotterranei molto profondi, ma a Bögli spetta ugualmente il merito di aver posto il problema all'attenzione scientifica e di aver aperto la strada alla scoperta di altri processi. Tra questi ricorderemo l'effetto della forza ionica di una soluzione, che provoca un aumento di solubilità dei carbonati. Tale effetto è particolarmente importante in presenza di cloruro di sodio (NaCl), che in concentrazioni anche modeste può raddoppiare la solubilità della calcite. E' questa una delle ragioni per cui la solubilità della calcite nell'acqua di mare è molto elevata

In generale possiamo affermare che tutti i processi di miscelazione hanno effetti sullo sviluppo del carsismo sia in un senso, vale a dire aumentando la solubilità dei carbonati, che nell'altro, cioè provocando la precipitazione dei carbonati in soluzione. E' anzi ormai opinione diffusa che le situazioni in cui si ha il massimo sviluppo di cavità carsiche siano proprio quelle dove vengono a contatto acque a differente chimismo, come ad esempio lungo le superfici di contatto tra rocce di composizione diversa o lungo le zone in cui si mescolano acque superficiali e acque marine o di origine profonda.

### 2.3. Processi ipercarsici

Nell'attraversare uno spessore di suolo o di roccia le acque meteoriche si possono arricchire in altri acidi oltre a quello carbonico. Questi possono essere acidi di origine organica (provenienti da materia organica in decomposizione), acidi contenuti in fluidi provenienti da emanazioni vulcaniche (ad esempio l'acido solfidrico =  $H_2S$ ) oppure acidi prodotti dalla ossidazione di minerali (in particolare i solfuri).

Tra gli acidi che possono aver un effetto importante sullo sviluppo di fenomeni carsici sotterranei va ricordato l'acido solforico ( $H_2SO_4$ ) che si forma attraverso processi ossidativi dei solfuri. I solfuri metallici, e in particolare la pirite ( $FeS_2$ ), sono spesso presenti in quantità anche rilevanti nelle rocce carbonatiche, sia dispersi sia concentrati in vene mineralizzate. In questi casi la formazione di acido solforico, che

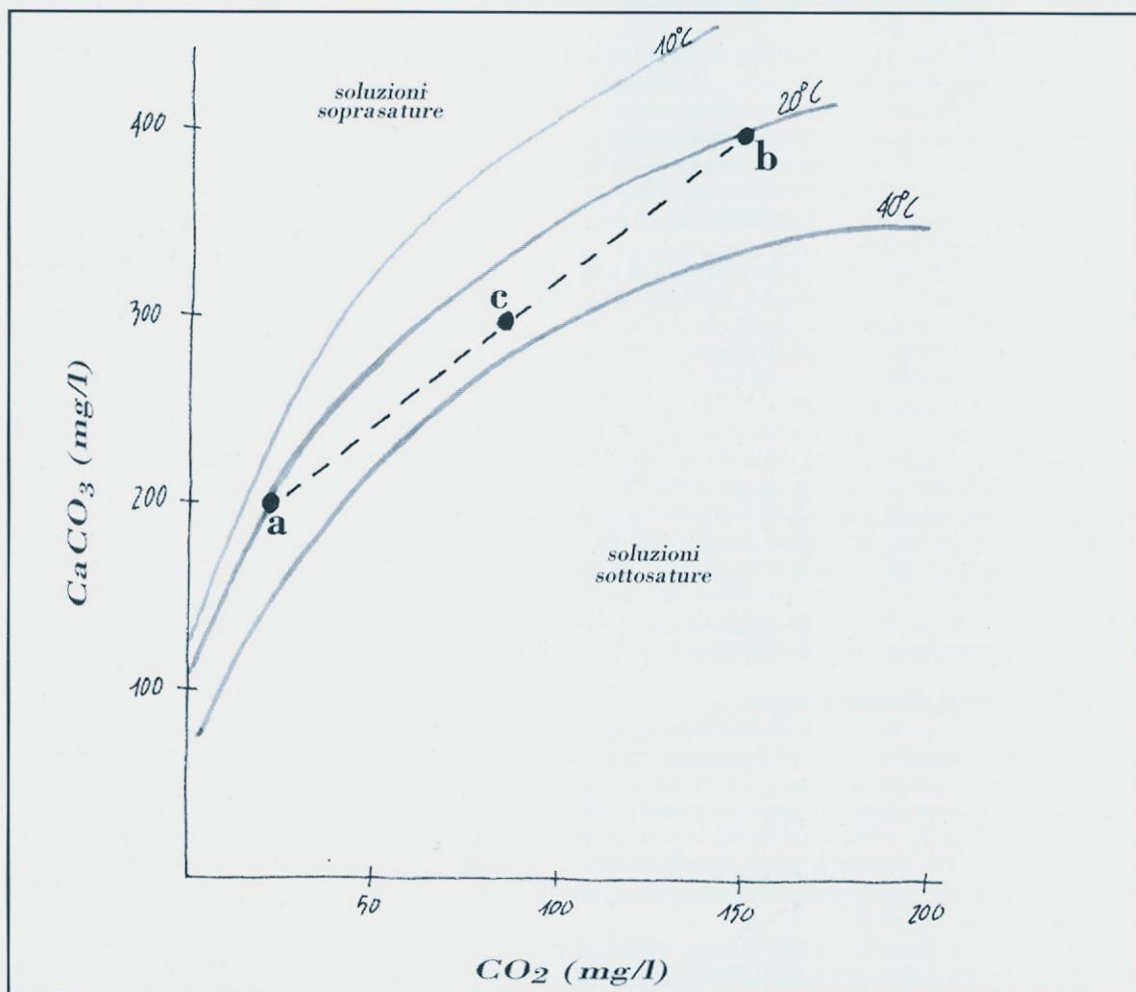


Fig. 2 Curve di saturazione del carbonato di calcio a diverse temperature, per acque contenenti  $CO_2$ . La miscelazione in parti uguali di due acque sature a e b, ma con diverso tenore di  $CO_2$ , porta ad una soluzione intermedia c sottosatura (effetto Bögli).



è un acido molto forte, può portare alla dissoluzione di grandi volumi di roccia soprattutto nell'intorno degli orizzonti più ricchi in questi minerali.

Un altro acido forte con importanti effetti carsogenetici è l'acido nitrico ( $H_2NO_3$ ), di origine quasi sempre organica, il quale da origine a prodotti molto solubili (nitrati) e quindi facilmente asportabili dall'acqua.

I processi legati alla azione di acidi forti o alla presenza di altri sali in soluzione oltre ai carbonati, e che coinvolgono più di tre componenti all'equilibrio, sono stati definiti **ipercarsici**. Tali processi, un tempo ritenuti importanti solo nel carsismo da acque idrotermali, si sono col tempo rilevati molto più diffusi di quanto sospettato in un primo momento. Anche in questo caso si tratta di saper riconoscere i processi che hanno avuto un'azione determinante, poiché in realtà le acque naturali contengono sempre molte sostanze chimiche in soluzione e quindi i processi ipercarsici sono sempre attivi in qualche misura.

In conclusione, il carsismo è sempre il risultato di processi chimici complessi, tra i quali, in funzione delle condizioni fisico-chimiche, potranno prevalere i processi di dissoluzione semplice, di corrosione oppure diversi tipi di processi ipercarsici. Questi ultimi assumono un ruolo riconosciuto come determinante, soprattutto nei casi in cui si ha l'apporto di acque termali ricche di  $H_2S$ , in presenza di rocce che contengono solfuri (anche in tracce) e nelle situazioni in cui si ha la miscelazione di acque marine con acque dolci sotterranee.

### *Letture ulteriori*

Oltre ai testi a carattere generale già citati nel primo capitolo, si possono trovare approfondimenti sulla chimica dei processi carsici, sempre con una trattazione non troppo specialistica, in diversi articoli apparsi su riviste e periodici di speleologia. Tra i lavori che danno maggiori dettagli più facilmente reperibili possiamo citare il lavoro di Roques (1973), tradotto in italiano, e il testo inglese di Picknett et al. (1976), nel volume "Science of Speleology". Se invece si vogliono approfondire i processi ipercarsici, si può iniziare dalla lettura dei due articoli di Forti (1991 e 1992) apparsi su Speleologia, la rivista semestrale della Società Speleologica Italiana.

## **3. MORFOLOGIA DEGLI AMBIENTI CARSI**

### **3.1. Generalità**

Il paesaggio delle aree carsiche presenta aspetti molto caratteristici, che ne fanno un ambiente unico nel suo genere. I processi carsici, infatti, quando agiscono per un tempo sufficientemente lungo, hanno come conseguenza più importante quella di rendere le rocce affioranti dotate di un elevato coefficiente di infiltrazione; in altre parole, la maggior parte dell'acqua di precipitazione, che non viene restituita all'atmosfera per evaporazione o trattenuta dalla vegetazione, s'infiltra nel sottosuolo. In un'area carsica il ruscellamento superficiale è, dunque, sempre molto modesto e talvolta nullo, e caratterizzato, salvo che in occasione di precipitazioni eccezionali, da uno scarso trasporto di sedimenti.

Le acque di precipitazione vengono raccolte da bacini chiusi (cioè senza sbocco superficiale) di dimensioni variabili da qualche centimetro a qualche chilometro, e convogliate verso punti di infiltrazione. Molte forme carsiche sono perciò legate all'infiltrazione delle acque superficiali. Per queste ragioni è frequente osservare come, a grande scala, il carattere morfologico più appariscente di un'area carsica sia la rarefazione, o la quasi totale assenza, di una rete di drenaggio superficiale. A differenza di quanto avviene sulle altre litologie, dove le acque di ruscellamento scavano una rete di vallecole confluenti in incisioni di dimensioni progressivamente maggiori, sulle rocce carsificate si osservano spesso valli senza sbocco e segmenti di reticolo disconnessi, che drenano cioè dei bacini chiusi (bacini endoreici).

Forme carsiche pure, cioè dovute esclusivamente a processi carsici, sono in pratica solo quelle di piccole dimensioni. Nelle forme di dimensioni maggiori, altri processi di modellamento possono avere un ruolo anche più importante della dissoluzione carsica. Le forme a scala media e soprattutto grande sono, dunque, quasi sempre forme poligenetiche; ciò nonostante se si tratta di forme tipiche, il cui sviluppo è legato alle particolari caratteristiche idrogeologiche di tali ambienti, si usa classificarle tra le forme carsiche.

### **3.2. Classificazione delle forme carsiche**

Le forme prodotte dai processi carsici sono tra le più studiate di tutti i paesaggi terrestri. Il riconoscimento e la descrizione delle molte forme presenti, a tutte le scale, ha dato origine ad una terminologia complessa e di estremo dettaglio, e a molte classificazioni che si basano su criteri sia geometrici, sia genetici.

In questa sede ricorderemo, per brevità, solo le forme più comuni e tipiche dei carsi della fascia temperata, facendo riferimento alla terminologia più usata in Italia ed in Europa, e rimandando ai testi citati in bibliografia per ulteriori approfondimenti.

Le forme carsiche sono classicamente distinte in due grandi categorie: **forme di superficie** (epicarso, o anche exocarso) e **forme sotterranee** (ipocarso, o anche endocarso).



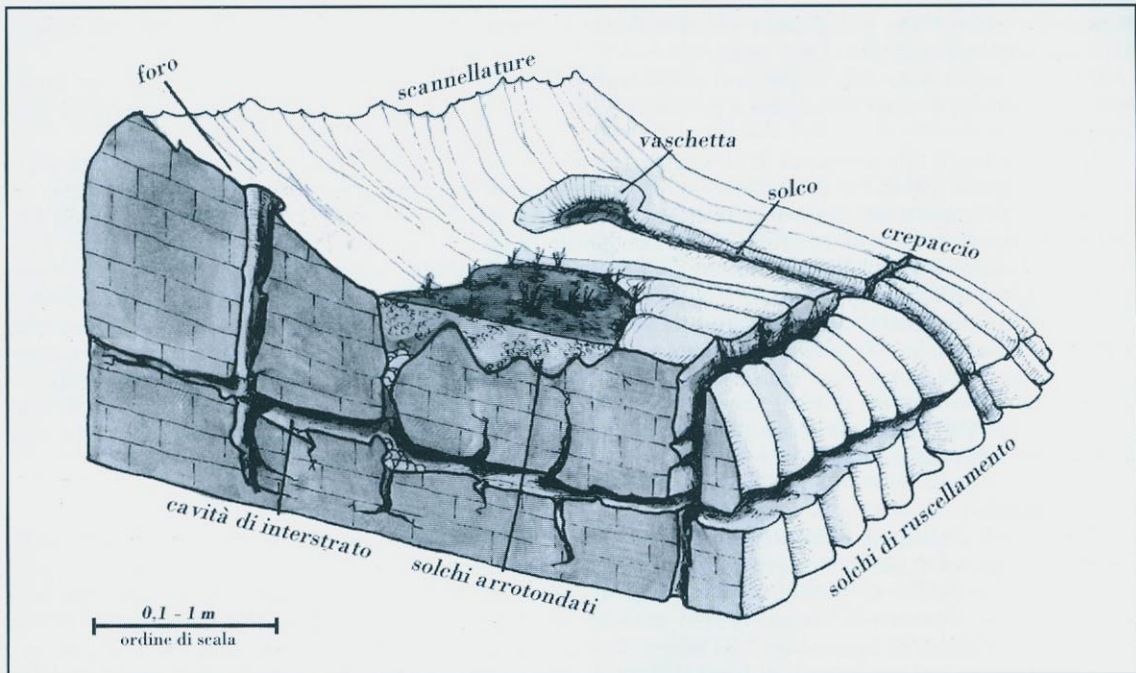


Fig. 3 Forme carsiche minori di superficie.

Convenzionalmente si considerano “superficiali” quelle forme di dissoluzione prodotte dal ruscellamento delle acque di origine atmosferica (di precipitazione, di fusione o di condensazione) su superfici di roccia esposte (cioè a “cielo libero”), o coperte da detrito o suolo; mentre sono “sotterranee” quelle forme dovute alla circolazione profonda delle acque di infiltrazione o di origine endogena. Le forme legate all’infiltrazione, tra cui le doline e gli ingressi delle grotte, pur manifestandosi in superficie, sono legate all’esistenza di un carsismo di sottosuolo; sono quindi forme che possiamo considerare intermedie, o di “interfaccia”, sebbene, nella prassi, tali forme siano considerate alla stregua di quelle di superficie poiché sono osservabili dall’esterno.

Le forme carsiche sotterranee costituiscono nel loro insieme quelle che genericamente vengono definite **cavità carsiche**. Si tratta cioè di vuoti di dimensioni variabili, normalmente collegati tra loro a costituire i **sistemi carsici sotterranei**. Il termine **grotta** viene invece comunemente usato per indicare una cavità naturale di dimensioni tali da essere percorribile dall’uomo; in questa definizione non rientra nessun criterio genetico e quindi le grotte di origine carsica sono solo uno, anche se il più comune, dei tanti tipi di grotte possibili. Si usa invece parlare di **reticolo carsico** quando ci si riferisce all’insieme di fratture e canali di dimensioni qualsiasi sviluppati nel sottosuolo e comunicanti tra loro.

Riguardo alla gerarchia dimensionale delle forme è entrato nell’uso parlare di forme piccole, medie o grandi (o anche di micro, meso e macroforme). Tale distinzione non si basa su limiti precisi ed è puramente indicativa: una dolina, ad esempio, può avere dimensioni che vanno da qualche decina di centimetri a diverse centinaia di metri, e quindi può essere una forma che potremmo definire piccola, media o grande.

Nell’impossibilità, dunque, di porre limiti precisi tra i tre ordini dimensionali, proponiamo una suddivisione qualitativa che si basa sull’approccio più comune per l’individuazione e lo studio delle diverse forme. In questo senso sono definite: **forme grandi** quelle rilevabili e studiabili a partire da carte topografiche a piccola scala ( $\leq 1:50.000$ ) e dalle immagini da satellite; **forme medie** quelle rilevabili dalla cartografia a scala grande ( $\geq 1:25.000$ ) e dalle foto aeree; **forme piccole** quelle rilevabili e studiabili sul terreno. La classe dimensionale di riferimento nella tabella classificativa riportata (tab. 1) è quella in cui le diverse forme si presentano più comunemente.

### 3.3. Forme di superficie s.l.

Le forme di superficie tipiche, che si osservano camminando su un terreno carsico, sono il risultato dei processi dissolutivi, in senso lato, operati direttamente dalle acque di precipitazione durante il ruscellamento, la raccolta o l’infiltrazione. Nel ricordare solo alcune delle forme più comuni, descritte soprattutto riguardo alla loro funzione idrogeologica, useremo i termini più in uso nella lingua italiana, anche se talvolta impropri o derivati da altre lingue. Tra parentesi viene invece riportato il termine di uso internazionale più diffuso.



# SCHEMA DI CLASSIFICAZIONE IDROFUNZIONALE DELLE FORME CARSICHE

ORDINE DIMENSIONALE

FORME PICCOLE	FORME MEDIE	FORME GRANDI
---------------	-------------	--------------

FORME DI SUPERFICIE S.L.

di raccolta		vaschette (kamenitza)		
di ruscellamento	<i>libero</i>	solchi (karren) liberi		valli chiuse valli cieche
	<i>isottocutaneo</i>	solchi (karren) coperti	doline di subsidenza	
di infiltrazione	<i>puntuale</i>	fori di dissoluzione pozzi di percolazione	doline pozzi a neve	
	<i>lineare</i>	crepacci	corridoi (bogaz)	valli carsiche
	<i>areale</i>			uvala conche carsiche
di emergenza	<i>a pelo libero</i>	cavità sorgenti		polje di attraversamento
	<i>artesia</i>	sorgenti valchiusane		polje piezometrici

forme indotte (non carsiche)	pozzi di crollo	doline di soliflusso doline di crollo	polje marginali
------------------------------	-----------------	--	-----------------

FORME DI SOTTOSUOLO

di percolazione		karren ipogei	pozzi (a fusoidi)	
di scorrimento a pelo libero	<i>prev. verticale</i>	lame di roccia	pozzi cascata	
	<i>prev. orizzontale</i>	mensole, marmitte	forre, meandri	
di scorrimento a pieno carico		scalops, canali di volta, pendenti, cupole etc.	condotte "freatiche", gallerie paragenetiche	

forme indotte (non carsiche)		sale e gallerie di crollo	
------------------------------	--	---------------------------	--

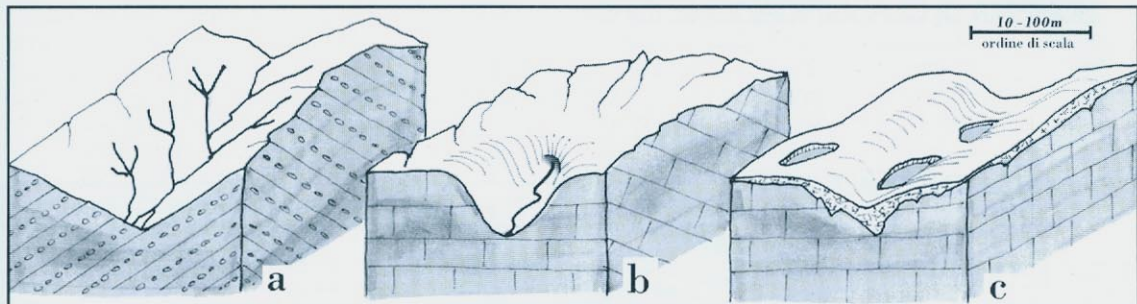


Fig. 4 a) Valle "normale" in rocce non carsificabili; b) valle chiusa; c) valle carsica di infiltrazione lineare

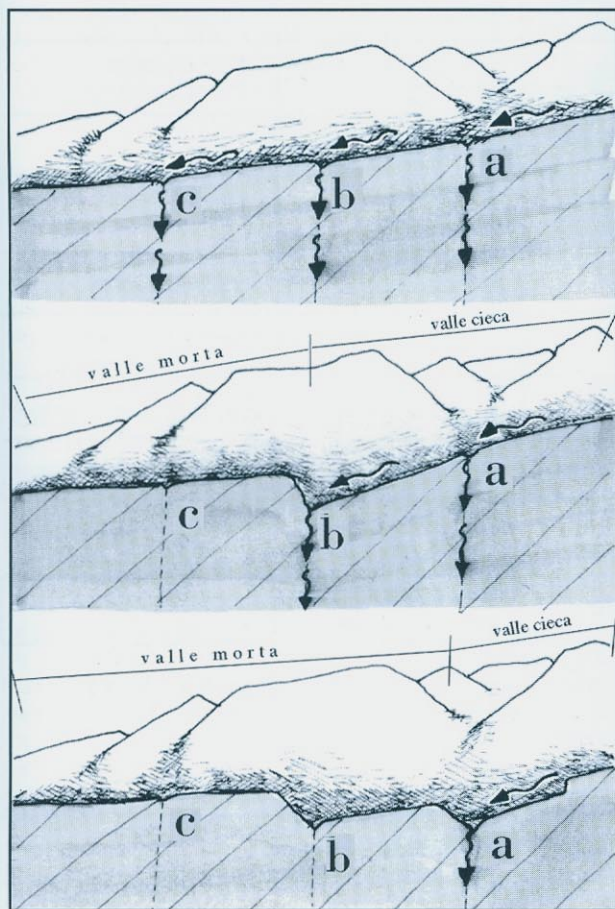


Fig. 5 Evoluzione di una valle attiva in valle morta e valle cieca a seguito di catture sotterranee.

sviluppa laddove l'acqua piovana non ha la possibilità di infiltrarsi nel sottosuolo.

Le forme di dissoluzione che si formano al contatto tra substrato roccioso e copertura di detrito o suolo, sono genericamente dette **karren coperti**; tali forme sono distinguibili per le creste arrotondate che dividono le varie depressioni (da cui il nome di *rundkarren*).

A scala assai più grande possiamo considerare come forme carsiche dovute al ruscellamento superficiale le **valli chiuse** (Fig. 4) e le **valli cieche** (Fig. 5). Nei paesaggi carsici le valli non sono però delle forme scavate per sola dissoluzione. In realtà si tratta di forme poligenetiche, cioè dovute all'azione di più processi modellatori, tra cui i processi di erosione meccanica. Le valli chiuse sono valli che hanno origine da una grossa sorgente carsica, e pertanto sono prive di un ampio ventaglio di testata, che caratterizza invece le incisioni scavate dai corsi d'acqua che derivano la loro portata dalla confluenza delle acque di ruscellamento superficiale. Le valli cieche, invece, sono tali perché finiscono con un inghiottitoio, e quindi non hanno sbocchi superficiali.

### 3.3.1. Forme di raccolta

Le forme più comuni che si originano in seguito alla raccolta di acqua piovana in piccole depressioni sono le **vaschette di corrosione** (*kamenitza*), che si trovano su superfici di roccia esposta orizzontali o poco inclinate; esse hanno forma pressoché circolare e diametri generalmente variabili da pochi centimetri sino ad oltre un metro. Depressioni di dimensioni maggiori con il fondo costituito da detrito, in cui permangono dei piccoli laghetti, possono considerarsi ancora forme di raccolta, anche se la loro origine può essere legata soprattutto a processi di infiltrazione, poi venuti meno per l'intasamento delle vie di drenaggio sotterraneo (doline allagate).

### 3.3.2. Forme di ruscellamento

Le forme legate al ruscellamento delle acque di precipitazione, su percorsi che raramente superano la decina di metri sono dette nel loro insieme **campi solcati** (*karren*). Le incisioni di dimensioni minori, solitamente di qualche centimetro di profondità e larghezza, vengono chiamate **scannellature** (*rillenkarren*), quelle con dimensioni di qualche decimetro di profondità e larghezza, sono invece chiamate **docce** o **solchi carsici** (*rinnenkarren*). In genere le prime si formano su superfici di roccia con pendenza elevata ed hanno andamento rettilineo, le seconde, invece, si osservano su superfici di roccia con pendenza anche modesta, nel qual caso hanno spesso andamento sinuoso. Nel loro insieme, scannellature e solchi costituiscono un reticolo di drenaggio superficiale a scala ridotta, che si



### 3.3.3. Forme di infiltrazione

Le forme che si originano per infiltrazione localizzata in un punto, sono costituite da fori ad andamento verticale di forma pressoché cilindrica, più o meno influenzata da fattori strutturali, e di dimensioni variabili. Le cavità di dimensioni sino a qualche decimetro sono dette genericamente **fori carsici**, mentre le cavità di dimensioni maggiori, e spesso con sezione di forma allungata in direzione della discontinuità lungo cui si sono generate, vengono chiamate **pozzi di percolazione** (Fig. 6). I pozzi di percolazione possono talvolta avere dimensioni notevoli, con profondità che possono raggiungere qualche centinaio di metri.

Le doline sono forme legate alla dissoluzione concentrata ad opera di acque di infiltrazione raccolte su piccoli bacini chiusi, aventi in genere un'estensione compresa tra qualche decina e qualche migliaio di m<sup>2</sup>. Il più delle volte l'infiltrazione si realizza attraverso più punti ravvicinati e concentrati in un'area ristretta. Nelle zone di alta montagna le doline sono solitamente prive di copertura e possono col tempo approfondirsi anche per effetto della corrosione esercitata dalla neve che in esse si accumula, trasformandosi nei cosiddetti **pozzi a neve**. Il più delle volte però il fondo delle doline è occupato da detriti o terre residuali, che danno alla depressione una forma troncoconica (le cosiddette doline a piatto, o a ciotola).

Doline possono formarsi anche in rocce non carsificabili ma permeabili, che ricoprono rocce carbonatiche. In tal caso la dissoluzione agisce sulla roccia carsificabile sepolta creando un vuoto che viene progressivamente occupato dalla massa di roccia sovrastante che si abbassa; le doline così formatesi vengono dette **doline di subsidenza**.

Tra le forme di superficie s.l. osservabili solo direttamente sul terreno, rientrano anche la maggior parte degli ingressi delle grotte. Quando questi hanno la funzione di assorbire le acque di infiltrazione, si possono distinguere le **cavità di assorbimento diffuso** da quelle in cui s'immette un vero corso d'acqua, nel qual caso vengono chiamati **inghiottitoi**.

Le forme di infiltrazione lineare si sviluppano in corrispondenza di superfici di discontinuità (fratture o giunti di strato) generalmente verticali, lungo le quali si realizza la coalescenza di forme di infiltrazione puntuale. In questo modo si originano delle depressioni strette e allungate che vengono chiamate **crepacci carsici** (*kluftkarren, grikes*), se di qualche metro di lunghezza. Le depressioni allungate che si formano per infiltrazione lineare lungo fasci di fratture, ed estese per diverse decine di metri vengono dette genericamente **corridoi carsici** (*bogaz*).

Certe **valli carsiche**, vale a dire ampie depressioni allungate con profilo arrotondato e prive di scorrimento, quando non si tratti di valli originatesi in passato ad opera di acque superficiali ora catturate a monte da inghiottitoi (valli morte), possono essere il risultato dell'infiltrazione lineare lungo importanti ed estese linee di fratturazione della roccia (fig. 4c).

Le grandi depressioni carsiche, dette anche **uvala** o **macrodoline**, possono essere invece considerate come il risultato di infiltrazione areale, e sono spesso il prodotto della coalescenza di più doline. Queste

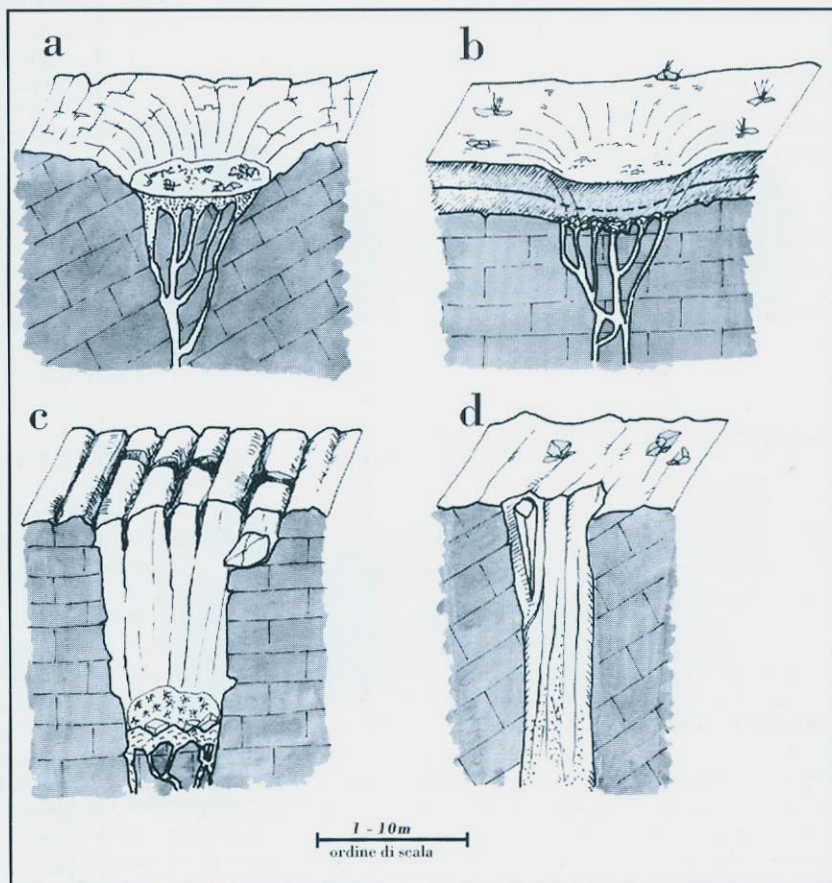


Fig. 6 Forme di infiltrazione localizzata di medie dimensioni: a) dolina di dissoluzione; b) dolina di subsidenza; c) "pozzo a neve"; d) pozzo di percolazione



depressioni, di dimensioni superiori a qualche centinaio di m, hanno il fondo occupato da detriti e terre residue, nelle quali si formano di frequente doline di subsidenza di dimensioni minori.

Tra le grandi forme carsiche rientrano anche i **polje** (Fig. 7), sebbene per molti di essi vi siano all'origine processi erosivi di tipo meccanico e sempre una forte influenza strutturale. I polje, il cui significato in lingua slava è quello di campo piano, in contrasto con i rilievi rocciosi circostanti, possono avere origine diversa, ma la forma è quasi sempre quella di una vasta depressione a fondo piatto, di dimensioni superiori al chilometro, circondata da versanti ripidi privi di pendii di raccordo. Sul fondo dei polje attivi si ha circolazione superficiale di acqua, almeno stagionale; si tratta quindi di forme miste in cui convivono spesso condizioni di emergenza, ruscellamento e infiltrazione. Nei polje inattivi si può avere accumulo di detriti e terre residuali.

Tutti i polje di maggiori dimensioni risentono dell'assetto strutturale, trattandosi spesso di depressioni tettoniche. Un caso particolare è quello dei polje marginali, formati in seguito a processi di erosione meccanica ad opera delle acque di ruscellamento provenienti da zone circostanti.

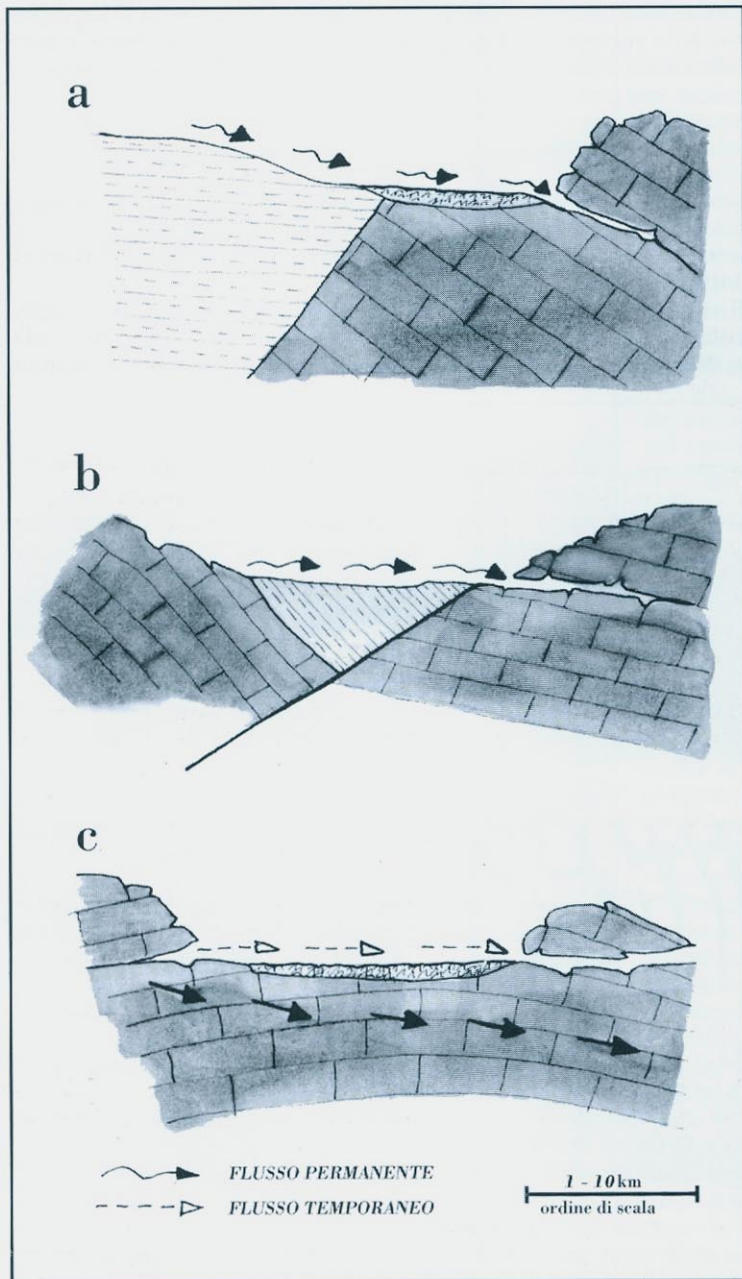


Fig. 7 Tipi di polje: a) perimetrale; b) strutturale di attraversamento; c) di livello di base (piezometrico)

### 3.3.4. Forme di emergenza

Le cavità che si aprono in superficie con funzione di sorgenti, e che rappresentano quindi i punti di emergenza dell'acqua raccolta da sistemi carsici più o meno vasti, possono essere sostanzialmente di due tipi: **cavità sorgenti a pelo libero**, quando un torrente sotterraneo esce da una cavità parzialmente areata, e le **sorgenti valclusiane**, in cui l'acqua risale per spinta idrostatica lungo condotte sommerse (Fig. 8).

Un caso particolare è quello di cavità che fungono alternativamente da sorgenti (durante i periodi più piovosi) e da inghiottitoi (durante la stagione secca). Tali cavità sono frequenti soprattutto al fondo dei polje attivi, che vengono periodicamente allagati, e prendono il nome di *estavelle*.

### 3.4. Forme sotterranee

Le forme carsiche sotterranee, cioè le cavità che i processi carsici formano nel sottosuolo, sono forme dovute al movimento in profondità delle acque di infiltrazione verso i punti di emergenza e costituiscono, nel loro insieme, quelli che vengono chiamati **sistemi carsici sotterranei**. Di tali forme non esiste una classificazione precisa, e spesso risulta difficile definirne anche i limiti geometrici e quindi descriverle. Da un punto di vista gerarchico possiamo distinguere delle forme di ordine dimensionale superiore, da forme di ordine dimensionale inferiore. Le prime sono costituite



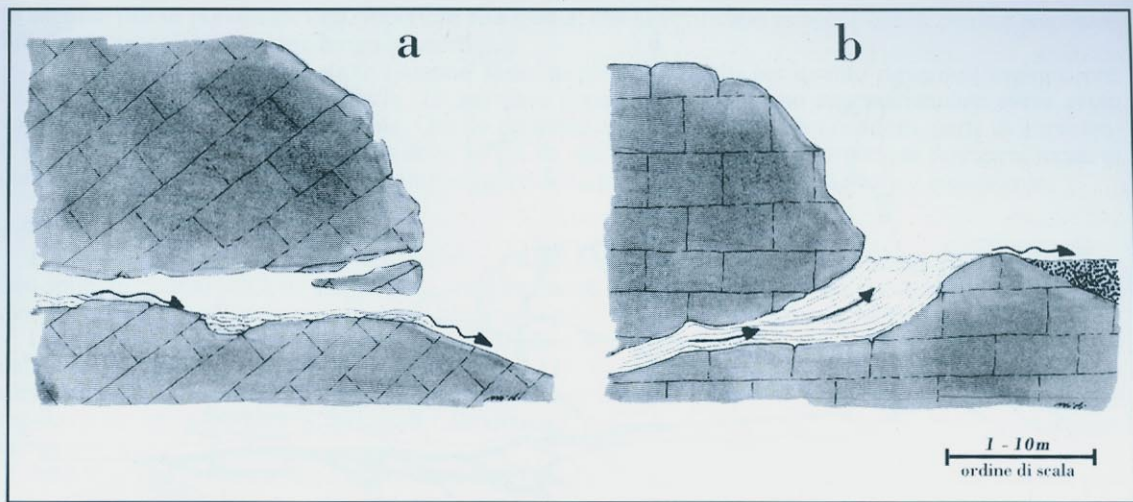


Fig. 8 Forme di emergenza (sorgenti carsiche): a) a pelo libero; b) valclusiane

dai diversi tipi di **condotti carsici**, le forme di piccole dimensioni che si trovano sulle pareti dei condotti carsici, sono invece dette genericamente **forme parietali**.

I condotti carsici, di qualsiasi dimensione essi siano, si originano ad opera delle acque che si muovono lungo le discontinuità presenti nella roccia, e pertanto risentono sempre della struttura, vale a dire delle caratteristiche e dell'orientazione delle discontinuità. Le forme parietali invece possono non essere influenzate dalla struttura, formandosi su superfici di roccia anche prive di discontinuità.

### 3.4.1. Condotti carsici

Una prima classificazione dei diversi tipi di condotti carsici riguarda la funzione idrogeologica, o meglio le condizioni idrodinamiche presenti durante la loro formazione: avremo perciò **condotti di percolazione**, e **condotti di scorrimento a pelo libero**, che insieme costituiscono quelli che vengono detti genericamente **condotti vadosi**, e **condotti di scorrimento a pieno carico**, più comunemente detti **condotti freatici** (fig. 9).

Tra le forme di percolazione, le più comuni sono i **pozzi** (che abbiamo detto potersi aprire anche in superficie), spesso con forma a fusoidi, che si originano a partire da discontinuità verticali per l'opera di dissoluzione dei veli d'acqua che scorrono sulle pareti. Di scorrimento a pelo libero sono invece i **pozzi cascata**, quando il flusso è verticale in caduta libera; quando lo scorrimento avviene invece su percorsi a componente prevalentemente orizzontale, si formano i **meandri** e le **forre**. Nello sviluppo delle forme di scorrimento a pelo libero entra in gioco l'azione erosiva meccanica esercitata dalle acque in movimento quando queste trasportano anche un carico di sedimenti in sospensione.

Classiche forme di scorrimento a pieno carico sono le **gallerie singenetiche** o **tubi freatici** e i **condotti paragenetici** (dette anche impropriamente gallerie di erosione antigraavitativa, essendo comunque il prodotto di processi di dissoluzione). Le prime si formano quando l'acqua si muove lungo un condotto occupandone tutto il volume. In questo modo l'azione di dissoluzione si esercita su tutta la superficie bagnata e quindi il condotto tende ad assumere una sezione pressoché circolare, o più frequentemente ellittica con l'asse maggiore in corrispondenza della discontinuità generatrice. La maggiore o minore eccentricità di una galleria a pieno carico dipende dalla possibilità che ha l'acqua di infiltrarsi lungo la discontinuità generatrice. Per queste ragioni le gallerie che si sviluppano sotto grossi spessori di roccia, sottoposte cioè ad un forte carico, hanno comunemente sezioni più circolari di quelle che si sviluppano sotto spessori di roccia modesti, il cui profilo è maggiormente influenzato dalla struttura.

I condotti paragenetici sono il prodotto del rimodellamento di condotti preesistenti che vengono quasi completamente riempiti da sedimenti. In queste condizioni l'azione di corrosione dell'acqua si esercita solo sul soffitto del condotto che viene spianato oppure inciso verso l'alto (da cui il nome di erosione antigraavitativa) da solchi che sono chiamati **canali di volta**.

È facilmente intuibile che qualsiasi condotto carsico nella sua primissima fase di sviluppo, quando è ancora un sottile canalicolo lungo una discontinuità, si trova in condizioni di scorrimento a pieno carico. Normalmente però tale condizione viene meno una volta che il condotto si allarga. Le condizioni di scorrimento a pieno carico si mantengono invece a lungo nei condotti che si sviluppano nelle parti profonde di un sistema carsico, a quote vicine a quelle della sorgente che esso alimenta, cioè del suo livello di base. Per questa ragione nella parte superiore di un sistema carsico i condotti si sviluppano prevalentemente in condizioni vadose, cioè di scorrimento a pelo libero, mentre in quella più bassa si sviluppano



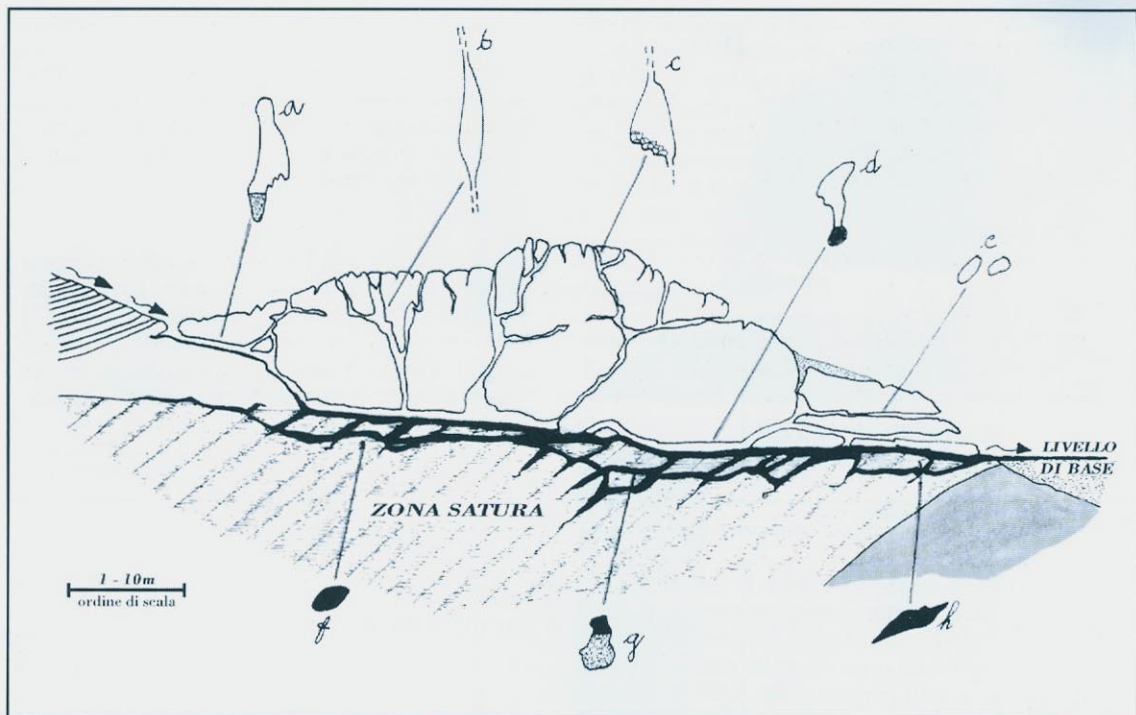


Fig. 9 Distribuzione delle diverse forme di condotti in un sistema carsico sotterraneo: a) forra di erosione verticale; b) pozzo di percolazione a "fusoide"; c) ambienti di crollo; d) forra epifreatica; e) condotti a pieno carico relitti ("fossili"); f) condotto a pieno carico attivo; g) condotto paragenetico parzialmente riempito da sedimenti; h) condotto a pieno carico attivo.

(L'ordine di scala si riferisce alle rappresentazioni dei condotti e non al sistema carsico nel suo complesso)

reti di condotti in condizioni di saturazione.

Quando il livello di base è soggetto ad abbassamento, i condotti in zona saturata vengono progressivamente svuotati dall'acqua e lo scorrimento avviene a pelo libero. Se questa fase di svuotamento è rapida le gallerie vengono prosciugate e rese inattive e si conservano mantenendo la loro forma originaria di condotto a pieno carico. (E' bene ricordare che l'appellativo "gallerie fossili", che spesso si usa per questi condotti quando non sono più percorsi dall'acqua è, da un punto di vista concettuale, errato, poiché l'aggettivo "fossile" andrebbe usato per quelle forme che sono state sepolte da sedimenti in età successiva alla loro formazione. I termini corretti da usare in questi casi sono "gallerie inattive", se abbandonate da poco, oppure "gallerie relitte" quando molto vecchie e già soggette a modificazioni ad opera di altri agenti, come ad esempio il concrezionamento o i crolli). Se invece lo svuotamento è lento e lo scorrimento prosegue per tempi lunghi a pelo libero, i condotti originali vengono approfonditi verso il basso dando origine a vere e proprie forre sotterranee dalle dimensioni spesso gigantesche e caratterizzati da una bassa pendenza del pavimento.

### 3.4.2. Forme parietali

Le forme parietali sono molto importanti per i geomorfologi che studiano le grotte poiché permettono di capire le condizioni idrodinamiche presenti durante la formazione di un condotto, o almeno durante l'ultima fase del suo sviluppo.

Le più conosciute di queste forme sono le **impronte di flusso**, più note con il termine inglese di *scallop*. Si tratta di impronte a forma di cucchiaio, allungate nel senso della corrente, frequenti sulle superfici di roccia compatta in condotte a pieno carico o sulle pareti di forre e meandri sotterranei. L'asimmetria del profilo, visto nella direzione della corrente (cioè lungo l'asse del condotto) indica il verso del flusso, mentre la lunghezza media di un insieme consistente di impronte dà un'indicazione della velocità del flusso (Fig.10).

Conoscendo la velocità del flusso è facile ricavare la portata, moltiplicando tale valore per la sezione del condotto. Occorre comunque molta cautela in queste stime, poiché non è detto che le impronte che misuriamo corrispondano ad una fase di completo allagamento, in particolare se si tratta di una forra. Inoltre non è ancora chiaro in che rapporto stiano la velocità che si ottiene dalle formule e la velocità media del flusso, cioè le condizioni di portata media. E' probabile che le impronte di flusso in un condot-



to segnino fasi di portata elevata, superiore alla media, che si verificano in occasione di piene e responsabili di una maggiore erosione lungo le pareti.

Benché indicative, queste stime possono avere importanti risvolti per quanto riguarda l'esplorazione delle grotte. E' evidente che gallerie che indicano portate elevate devono necessariamente avere avuto ampi bacini di alimentazione a monte. Questo permette anche di distinguere i condotti, parte di importanti sistemi di drenaggio, dalle gallerie dette a "cul de sac", che si originano invece per fenomeni locali di corrosione elevata e che, anche se di ampie dimensioni, non implicano un flusso idrico consistente.

### 3.5. Forme indotte

E' consuetudine comprendere tra le forme carsiche delle forme che, a voler essere rigorosi, carsiche non sono, in quanto prodotte da processi completamente diversi; poiché in esse il carsismo ha comunque avuto un'azione predisponente possiamo chiamarle genericamente **forme carsiche indotte**.

In superficie le più diffuse sono i **pozzi di crollo** e le **doline di crollo**, che si originano per il collasso della volta di cavità prossime alla superficie (Fig. 11). Tali sprofondamenti sono molto comuni nelle aree carsiche, e spesso si trovano anche in quelle zone ove il carsismo non si manifesta in superficie perché sepolto sotto una copertura di sedimenti (alluvioni, morene, loess, detriti, etc.), detto perciò carso soggiacente

Le doline che si manifestano in presenza di coperture di depositi alluvionali, che vengono rimossi gra-

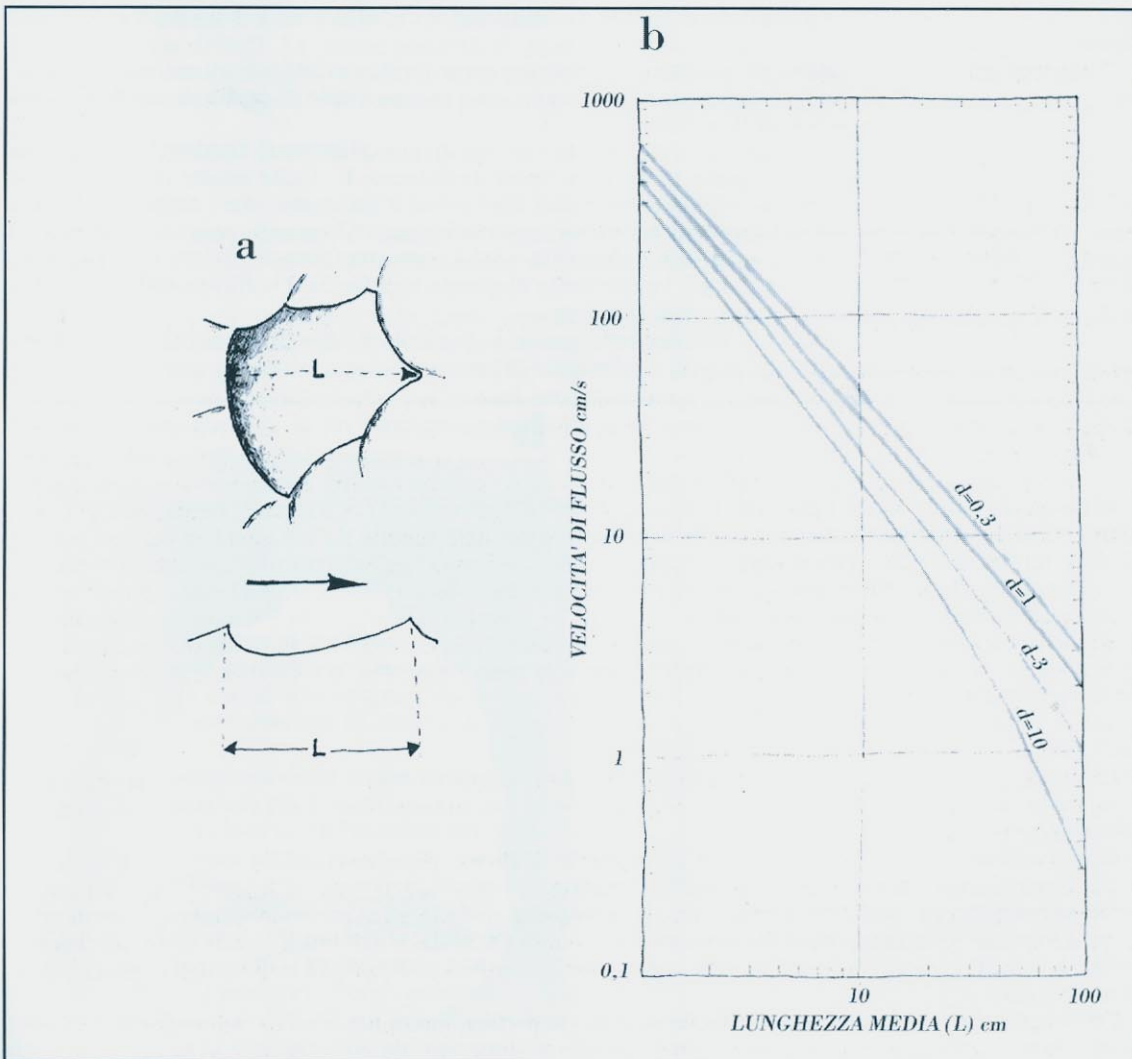


Fig. 10 Impronte di corrente (scallop): a) forma dell'impronta, la freccia indica il verso di flusso della corrente idrica; b) relazione tra velocità del flusso e lunghezza media (L) delle impronte di corrente (relazione di Curl, 1967), d=diametro in metri del condotto supposto a sezione circolare.

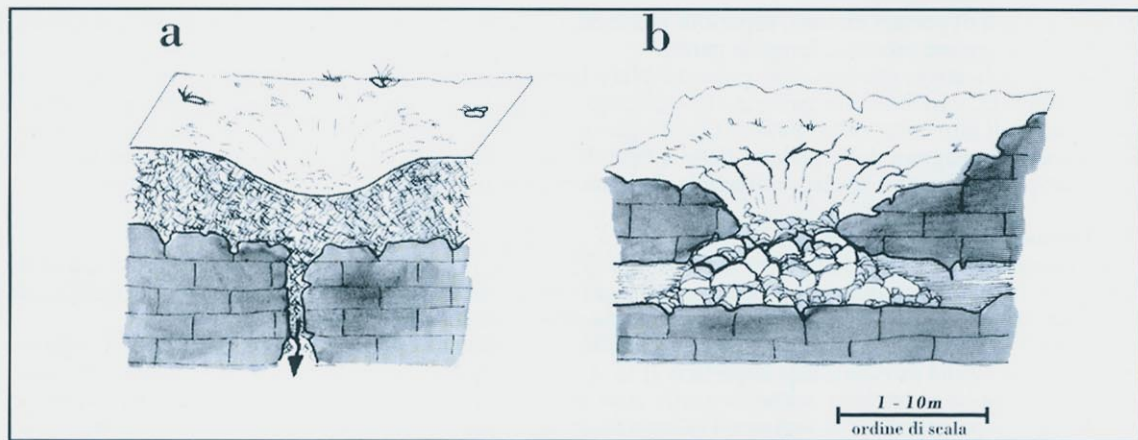


Fig. 11 Forme carsiche "indotte": a) dolina di soliflusso; b) dolina (o pozzo) di crollo.

dualmente per vie sotterranee (processo indicato con il termine inglese di *piping*) senza un vero collasso del materiale di copertura, vengono dette **doline di soliflusso** o di suffusione e sono anch'esse forme indotte.

Riguardo alle forme di sottosuolo, possiamo considerare come forme indotte tutti gli ambienti sotterranei prodottisi in seguito a crolli. Tra queste le più comuni sono le grandi **sale di crollo**, le cui dimensioni possono talvolta essere gigantesche (Fig. 12).

Le sale e le grandi gallerie di crollo occupano uno spazio diverso rispetto ai condotti originari, ora sepolti sotto i detriti, da cui hanno preso avvio i fenomeni di distacco. E' facile intuire che perché una sala o una galleria di crollo possano raggiungere grandi dimensioni è necessario che i detriti che si staccano dalla volta vengano via via asportati per erosione o corrosione. Altrimenti, poiché l'ammasso di detrito di crollo occupa un volume maggiore rispetto alla roccia compatta (circa il 20-30% in più), succede che il pavimento detritico s'innalza più velocemente di quanto non faccia il soffitto e quando i due si toccano il processo di ampliamento per crolli si blocca.

Gli ambienti di crollo sono molto comuni nelle grotte, in particolare nelle porzioni più prossime alla superficie, e in molti sistemi carsici i crolli e i distacchi di materiale costituiscono un importante mecca-

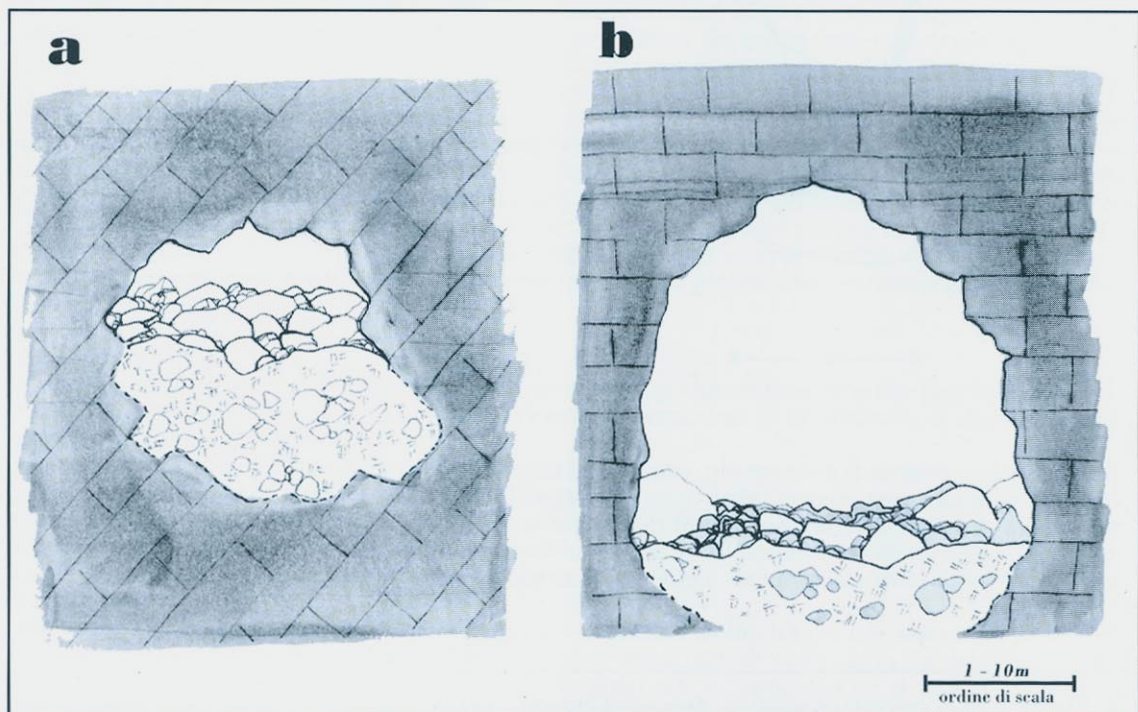


Fig. 12 Evoluzione di un ambiente sotterraneo di crollo: a) senza evacuazione di detriti; b) con evacuazione di detriti



nismo speleogenetico. Nelle zone profonde dei sistemi carsici i crolli sono invece più rari. Questo succede perché il forte carico litostatico cui è soggetta la roccia rende i vuoti sotterranei più stabili di quelli prossimi alla superficie, in cui il rilascio di tensione provoca un incremento nella fratturazione della roccia e, inoltre, pareti e volta delle cavità si trovano soggetti a spinte differenziali che si manifestano con sforzi di taglio lungo le pareti.

### **Letture ulteriori**

Per le forme carsiche, sia di superficie sia sotterranee, esiste una bibliografia vastissima. Limitandosi ai lavori più facilmente reperibili in lingua italiana, si può ancora fare riferimento al testo di Sauro (1991), per una trattazione generale, mentre una dettagliata rassegna delle forme carsiche superficiali si può trovare in Bini et al. (1986) e in Perna & Sauro (1978). Una classificazione generale dei paesaggi carsici, su basi morfostrutturali, è invece quella proposta da F. Forti et al. (1975)

In lingua inglese, oltre ai testi a carattere generale già citati, dedica ampio spazio alle forme carsiche di superficie il volume di Jennings (1985). Riguardo agli articoli comparsi su riviste e testi specifici vale la pena citare il lavoro di Mylroie (1984), che presenta un'originale classificazione delle forme carsiche con approccio idrogeologico.

Non esistono lavori a carattere generale, in lingua italiana, espressamente dedicati alle forme carsiche di sottosuolo e alla loro classificazione. A forme particolari sono dedicati i noti lavori di Dematteis (1963) e di Pasini (1973). Tra i testi stranieri si può ricordare il volume di Bögli (1980), tradotto anche in inglese, che dedica ampio spazio ai sistemi carsici sotterranei, oppure l'ormai datato, ma ancor valido, lavoro di Bretz (1942). Le forme parietali di grotta sono state descritte in dettaglio da Bini (1978) e recentemente sono diventate oggetto di un dettagliato testo interamente dedicato ad esse scritto da Slabe (1995). Riguardo all'analisi delle scalop possiamo rifarci ai lavori originali di Curl (1974).

## **4. SPELEOGENESI CARSIKA**

### **4.1. Generalità**

Col termine "speleogenesi" s'intende quell'insieme di fenomeni, non necessariamente carsici, che portano alla formazione di cavità sotterranee naturali, vale a dire delle grotte (dal latino *spaelaeus* = spelunca, caverna, grotta).

Le moderne teorie speleogenetiche danno importanza a molti fattori che possono agire in successione o contemporaneamente, anche all'interno di uno stesso sistema carsico. Oltre ai meccanismi di soluzione, ed eventualmente ipercarsici, può avere un'importanza tutt'altro che trascurabile l'erosione meccanica. Nelle fasi più avanzate di sviluppo dei sistemi carsici sotterranei assumono un ruolo importante i crolli (**processi gravi-clastici**), la cui entità aumenta via via che il carico litostatico diminuisce a causa dei processi di erosione superficiale.

### **4.2. Caratteristiche idrogeologiche dei sistemi carsici**

In rocce permeabili per porosità intergranulare (porosità primaria), come ad esempio una sabbia o un conglomerato, o per sola fratturazione, l'acqua si distribuisce in maniera abbastanza uniforme saturando, al di sotto di una certa profondità, tutti i vuoti della roccia, al pari di una spugna parzialmente immersa nell'acqua.

Un acquifero carsico si configura, invece, come una rete di canali di deflusso preferenziale scavati in un corpo roccioso permeabile solo laddove le discontinuità sono state sufficientemente allargate dalla dissoluzione. Più che ad una spugna esso somiglia quindi ad una rete sviluppata nelle tre dimensioni. Le grotte, dunque, sono porzioni di sistemi di drenaggio delle acque di infiltrazione verso i punti di emergenza.

Il flusso sotterraneo delle acque in un sistema carsico ben sviluppato avviene sia lungo condotti carsici, di dimensioni più o meno grandi, sia nella rete di discontinuità (fratture e superfici di strato) che interessano la roccia. In funzione del regime o delle modalità di infiltrazione (diffusa o concentrata) potremo avere alimentazione dei canali da parte della falda nella rete di fratture o viceversa.

Al di sotto di una certa superficie ideale, dall'andamento più o meno regolare, i condotti e le fessure sono completamente allagati. Tale superficie, che gli idrogeologi chiamano **piezometrica**, separa due zone ove il movimento delle acque avviene con modalità ben diverse: una zona areata, detta comunemente **zona insatura** (o **zona vadosa**), posta al di sopra della superficie piezometrica, in cui le acque si muovono lungo percorsi tendenzialmente verticali dalla superficie verso il basso; una zona sommersa, detta **zona satura**, in cui le acque, che riempiono completamente i condotti, hanno movimento tendenzialmente orizzontale verso i punti di emergenza. La **zona satura** è detta anche comunemente **zona freatica**, riprendendo un aggettivo, "freatico", che sarebbe più corretto usare solo nel caso delle falde acquifere libere presenti nei depositi permeabili per porosità primaria.

La superficie piezometrica è soggetta a periodiche oscillazioni in funzione del regime idrico, rag-



giungendo le altezze massime durante le piene maggiori e deprimendosi sino al livello delle emergenze più basse durante i periodi di siccità prolungata. La zona compresa tra il livello di massima e quello di minima è comunemente detta **settore di oscillazione** o anche **zona epifreatica**. Si tratta del settore dove si ha il massimo sviluppo di fenomeni carsici sotterranei in ragione della maggior velocità dell'acqua, dei frequenti fenomeni di miscelazione e dei repentini cambiamenti di regime.

Normalmente un sistema carsico ha uno o più punti di emergenza, ove vengono a giorno le acque assorbite nelle aree di alimentazione, concentrati in una stessa zona e a quote simili. La quota delle sorgenti inferiori determina il **livello di base idrogeologico** del sistema.

### 4.3. Cenni sulle teorie speleogenetiche

I meccanismi speleogenetici di tipo strettamente carsico, che coinvolgono cioè processi di dissoluzione e corrosione più o meno complessi, sono molteplici. Per semplicità considereremo solo i meccanismi legati alla circolazione sotterranea di acque di origine meteorica, traslasciando dunque l'azione delle acque di provenienza endogena e di quelle marine. Daremo invece diverso risalto ai casi in cui la formazione di grotte è ad opera di acque di origine meteorica che si muovono per gravità, da quelli in cui le acque si muovono per moti convettivi in seguito a idrotermalismo (sistemi carsici idrotermali).

#### 4.3.1. Evoluzione dei sistemi carsici

Quando un corpo roccioso carbonatico si trova esposto all'azione delle acque meteoriche, si ha lo sviluppo di sottilissimi canalicoli che, seguendo le discontinuità della roccia, si propagano a partire dai molti punti di "entrata" delle acque di infiltrazione sino ad uno o più punti di "uscita". A connessione avvenuta, ha inizio una lenta riorganizzazione gerarchica in cui la maggior parte dei canalicoli abortisce, mentre quelli che risultano privilegiati dalle loro caratteristiche idrogeologiche si ampliano andando a costituire la rete di drenaggio preferenziale delle acque di circolazione. Durante questa prima fase i canali carsici sono interessati da un flusso idrico in condizioni prevalentemente di pieno carico.

In tempi generalmente dell'ordine delle decine di migliaia di anni, la rete di condotti assume una conducibilità idraulica tale da portare alla formazione di una superficie piezometrica, la cui quota si stabilizza, in mancanza di condizionamenti strutturali, vicino alla quota dei punti di emergenza delle acque.

L'andamento del reticolo carsico formatosi è, nelle prime fasi, ancora fortemente condizionato dalla struttura del corpo roccioso; in particolare i condotti della zona freatica possono avere andamento irregolare e possono spingersi anche al di sotto della superficie piezometrica, seguendo quelle discontinuità che sono risultate più favorevoli al loro sviluppo. In seguito, le acque nella zona satura tendono ad aprirsi una strada più diretta verso i punti di emergenza, scavando dei nuovi condotti che seguono la superficie piezometrica. Questo processo è facilitato se la roccia è ben fratturata, ma in genere richiede un tempo piuttosto lungo e può realizzarsi solo se i punti di emergenza rimangono stabili per un discreto lasso di tempo.

#### 4.3.2. Sistemi carsici idrotermali

Non tutte le acque che vengono assorbite in superficie riemergono per gravità in corrispondenza di sorgenti normali. Può succedere infatti che una parte dell'acqua di sottosuolo imbocchi vie sotterranee molto lunghe e profonde, anche di diversi chilometri, per poi riemergere a distanze notevoli in corrispondenza di faglie. In questi casi le acque sotterranee possono venir riscaldate dando origine a sorgenti termali.

I meccanismi con cui le acque sotterranee possono essere riscaldate sono principalmente due: a causa di un gradiente geotermico anomalo, legato alla presenza in profondità di corpi magmatici ancora in raffreddamento, oppure per processi chimici esotermici, che comportano trasformazioni mineralogiche in rocce profonde. Del primo tipo sono ad esempio i fenomeni idrotermali che si hanno in prossimità di aree vulcaniche attive o recenti, come ad esempio alcuni di quelli nella Toscana meridionale e nel Lazio. Del secondo tipo sono invece i fenomeni idrotermali che si hanno nell'Appennino Umbro-Marchigiano, ove si ritiene che il riscaldamento dell'acqua avvenga ad opera della trasformazione da anidrite in gesso di rocce evaporitiche situate in profondità.

Le acque, una volta riscaldate, tendono a salire con moti convettivi verso la superficie lungo zone di debolezza, in genere rappresentate da faglie importanti, che arrivano ad intercettare questi serbatoi caldi profondi. Se durante il loro percorso verso la superficie le acque attraversano rocce carbonatiche, si ha lo sviluppo di fenomeni carsici profondi di tipo idrotermale. Tali processi sono molto attivi poiché queste acque sono solitamente ricche di acido solfidrico (da cui il classico odore di uova marce) che ossidandosi produce acido solforico e quindi danno origine a processi ipercarsici in grado di sciogliere grandi quantità di calcare.

Le grotte di origine idrotermale possono formarsi sia a notevole profondità, sia in vicinanza della superficie piezometrica, dove si ha la miscelazione tra acque termali risalenti dal basso e acque di infiltrazione meteorica fredde. Nel primo caso si originano grotte con andamenti labirintici tridimensionali, in cui gli ambienti sotterranei di dimensioni maggiori, di forma subsferica, sono collegati da condotti di



dimensioni minori. Spesso in tali sistemi l'influenza strutturale sugli ambienti è modesta poiché l'elevato potere corrosivo delle acque termali non è condizionato molto dalla giacitura delle discontinuità. Le grotte sviluppatasi lungo la superficie piezometrica, invece, hanno sviluppo preferenzialmente orizzontale, spesso organizzato in piani sovrapposti ognuno dei quali segna una fase di stazionamento della superficie piezometrica idrotermale.

L'importanza dei fenomeni carsici idrotermali è dimostrata dalla consistenza dei depositi di travertino lasciati da sorgenti termominerali, che altro non sono che il corrispettivo dei vuoti scavati da queste acque durante la loro risalita verso la superficie.

### *Lectures ulteriori*

Anche sulla origine delle grotte carsiche esiste una vasta bibliografia, soprattutto in inglese, di cui si può trovare una ragionata sintesi nel testo di Ford & Williams (1989). Oltre ai testi già citati nel capitolo precedente che trattano anche di forme carsiche di sottosuolo, meritano particolare menzione i lavori di Ford (1971), Ford & Ewers (1978), Palmer (1991) e Renault (1970), tra i più significativi relativamente alla origine e lo sviluppo delle grotte in rocce carbonatiche.

In lingua italiana, possiamo citare, il primo più che altro per interesse storico, il lavoro di Maucci (1952) che introduce il concetto di "erosione inversa", e il testo didattico di Forti et al. (1978) inserito nel Manuale di Speleologia a cura della Società Speleologica Italiana.

Sulla origine delle grotte idrotermali, possiamo trovare spunti e indicazioni bibliografiche nel volume delle Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia dedicato al carsismo della Gola di Frasassi, e in particolare nei lavori di Bocchini e Coltorti (1990), Cucchi & Forti (1990) e Galdenzi (1990), e nella recente rassegna "Thermal karst system" di Forti (1996)

## 5. CENNI SUI FATTORI CHE INFLUENZANO DEI SISTEMI CARSICI

### 5.1. Generalità

I fattori che influenzano, nel tempo e nello spazio, lo sviluppo dei sistemi carsici sono molteplici. In via teorica possiamo distinguere dei fattori più strettamente **lito-strutturali**, da fattori genericamente **geo-ambientali**. I primi sono legati ad eventi geologici che si sono verificati ben prima dello sviluppo dei fenomeni carsici, preparando il terreno su cui essi poi agiranno e hanno perciò un ruolo passivo. I secondi, invece, sono legati ad eventi che si verificano in concomitanza con i processi carsici, interagendo con essi, e sono soggetti a mutare anche durante le fasi di carsificazione, assumendo quindi un ruolo attivo.

### 5.2. Fattori lito-strutturali (passivi)

#### 5.2.1. Litologia

La composizione di una roccia è il primo e più importante fattore geologico del carsismo. Questo succede perché i processi carsici sono la conseguenza di fenomeni di dissoluzione in acqua la cui entità è strettamente legata alla natura chimica delle rocce.

Oltre alla composizione chimica, un'importante azione è esercitata dalle caratteristiche tessiturali e dalle strutture sedimentarie delle rocce. Tra le strutture sedimentarie la stratificazione è quella che ha il maggiore peso sullo sviluppo di un sistema carsico.

Oltre alla stratificazione vi possono essere altre **strutture primarie**, che possono costituire vie preferenziali di circolazione delle acque. Si tratta soprattutto di vuoti rimasti durante i processi che portano alla formazione di una roccia. Essi sono comuni in rocce di precipitazione come i **travertini**, o nei **calcarei di scogliera** corallina che non hanno subito grossi fenomeni di costipazione e ricristallizzazione, cioè poco diagenizzati. Si tratta quindi di situazioni particolari che raramente riguardano le successioni carbonatiche più antiche.

Un caso particolare è quello di strati che possiedono una discreta permeabilità anche in assenza di discontinuità secondarie. Lungo tali orizzonti possono svilupparsi condotti carsici che seguono gli strati, generalmente con andamento labirintico; tali condotti hanno di solito piccole dimensioni e solo raramente sono percorribili. Forme di questo tipo sono comuni in successioni carbonatiche che non hanno subito un forte seppellimento dopo la loro formazione e che non sono state soggette a cementazione da parte di acque circolanti durante le fasi diagenetiche.

#### 5.2.2. Discontinuità strutturali

Perché si abbia lo sviluppo di un carsismo sotterraneo occorre che l'acqua abbia la possibilità di portare la propria azione in profondità anziché limitarsi a sciogliere le rocce in superficie. Occorrono cioè delle vie che consentano all'acqua di infiltrarsi nel sottosuolo; queste vie sono le discontinuità presenti nella roccia.

Le spinte tettoniche sono responsabili della formazione di **fratture** all'interno di un corpo roccioso,



quando questo non è in grado di rispondere plasticamente agli sforzi cui è sottoposto. Come per i giunti di strato, anche le superfici di frattura sono di per sé poco penetrabili dall'acqua; lo diventano quando lungo di esse si ha un movimento di distensione, anche piccolo, di una parte rispetto all'altra, oppure quando per effetto della erosione superficiale queste vengono "scaricate" dal peso delle masse rocciose sovrastanti e tendono ad aprirsi.

Un importante fattore riguarda la densità di fratturazione. Si ritiene, infatti, che nei massicci carbonatici in cui la fratturazione è molto spinta e pervasiva, non si ha lo sviluppo di condotti carsici di grandi dimensioni, poiché l'acqua si disperde nella fitta rete di fratture, anziché concentrarsi, lungo poche linee di flusso preferenziale.

### 5.3. Fattori geo-ambientali (attivi)

#### 5.3.1. Tettonica attiva

Quando si ha a che fare con fenomeni tettonici recenti, verificatisi negli ultimi milioni di anni (in genere negli ultimi 5) o tuttora in atto, si parla di **neotettonica**. Gli effetti della neotettonica sulla evoluzione dei sistemi carsici sono un campo di ricerche piuttosto recente e ancora in via di sviluppo.

L'effetto più importante dei movimenti neotettonici sullo sviluppo dei sistemi carsici è quello legato alle variazioni nella posizione del livello di base. Sono noti anche casi in cui per effetto di movimenti neotettonici, settori o interi sistemi carsici hanno visto cessare l'apporto idrico dalle loro aree di alimentazione.

Evidenze di movimenti di tettonica recente sono visibili in molti sistemi sotterranei come superfici di dislocazione che tagliano un condotto sotterraneo. Solo in qualche caso si tratta di vere e proprie superfici di faglia. Più comune è invece riscontrare in grotta gli effetti di deformazioni di piccola entità che si verificano per il carico delle rocce sovrastanti, come risposta al modellamento superficiale del rilievo, oppure alla formazione del condotto carsico stesso. Comuni sono anche le fratture di distensione legate alla vicinanza dei versanti

#### 5.3.2. Fattori idrogeologici

I modi in cui un sistema carsico viene alimentato sono tra i principali fattori in grado di influenzarne la struttura. Anche qui possiamo ricondurci ad alcune situazioni tipo:

**alimentazione diffusa** - si ha quando le acque di precipitazione vengono assorbite in maniera dispersa (a grande scala) attraverso fratture e cavità carsiche di infiltrazione che si aprono direttamente in superficie;

**alimentazione concentrata** - è quella che si realizza ad opera degli **inghiottitoi**, cioè in corrispondenza di punti in cui un corso d'acqua, che raccoglie le acque di un bacino superficiale abbastanza ampio, perde il proprio deflusso nel sottosuolo attraverso cavità carsiche;

**alimentazione indiretta** - è la situazione in cui le acque di precipitazione vengono assorbite da rocce non carsificate che le rilasciano in maniera graduale ed estremamente dispersa a rocce carbonatiche sottostanti o in contatto laterale.

In funzione dei tre tipi di assorbimento, il sistema sotterraneo di drenaggio, che porta le acque assorbite verso i punti di emergenza, assumerà una struttura spaziale diversa (Fig. 13).

Un altro importante fattore idrogeologico che influenza l'andamento di un reticolo carsico è la posizione dei punti di emergenza. Esaminando un sistema carsico, il cui recapito è rappresentato da una singola sorgente, con il tempo esso tende ad una configurazione caratterizzata da un insieme di vie di drenaggio a sviluppo prevalentemente verticale, che portano le acque di infiltrazione in profondità sino ad una quota prossima a quella della sorgente; qui un reticolo di condotti ad andamento orizzontale con struttura ramificata raccoglie le acque convogliandole verso la sorgente. In condizioni di stabilità, il reticolo di drenaggio orizzontale tende nel tempo ad appiattirsi sulla quota della sorgente, con condotte in cui le acque scorrono a pelo libero.

Nelle zone montuose e in sollevamento raramente si arriva ad una situazione di questo tipo, poiché l'incisione delle valli circostanti determina il continuo abbassamento del livello di base idrologico. Le sorgenti vengono quindi attratte verso il basso mentre il sistema di condotti che le alimentava viene progressivamente abbandonato a partire dalle zone esterne verso quelle più interne dei massicci montuosi. In mancanza di ostacoli di natura geologica (ad esempio livelli di rocce impermeabili) si formerà un nuovo sistema di drenaggio in corrispondenza del nuovo livello di base idrogeologico.

Nei grandi sistemi carsici, come è il caso ad esempio del famoso complesso del Corchia, questo processo si è ripetuto più volte; in questi casi si possono riconoscere i piani di gallerie che segnano i diversi livelli raggiunti di volta in volta dalla zona di drenaggio orizzontale. Il diverso grado di "maturità" raggiunto dal piano di gallerie si manifesta anche attraverso l'andamento del reticolo nel suo insieme ed i caratteri morfologici delle gallerie. Piani poco evoluti sono caratterizzati da gallerie con morfologie a pieno carico, con andamento a saliscendi, senza importanti evidenze di scorrimento a pelo libero; l'andamento generale è di tipo labirintico o anastomizzato, cioè poco gerarchizzato. Viceversa piani molto evo-



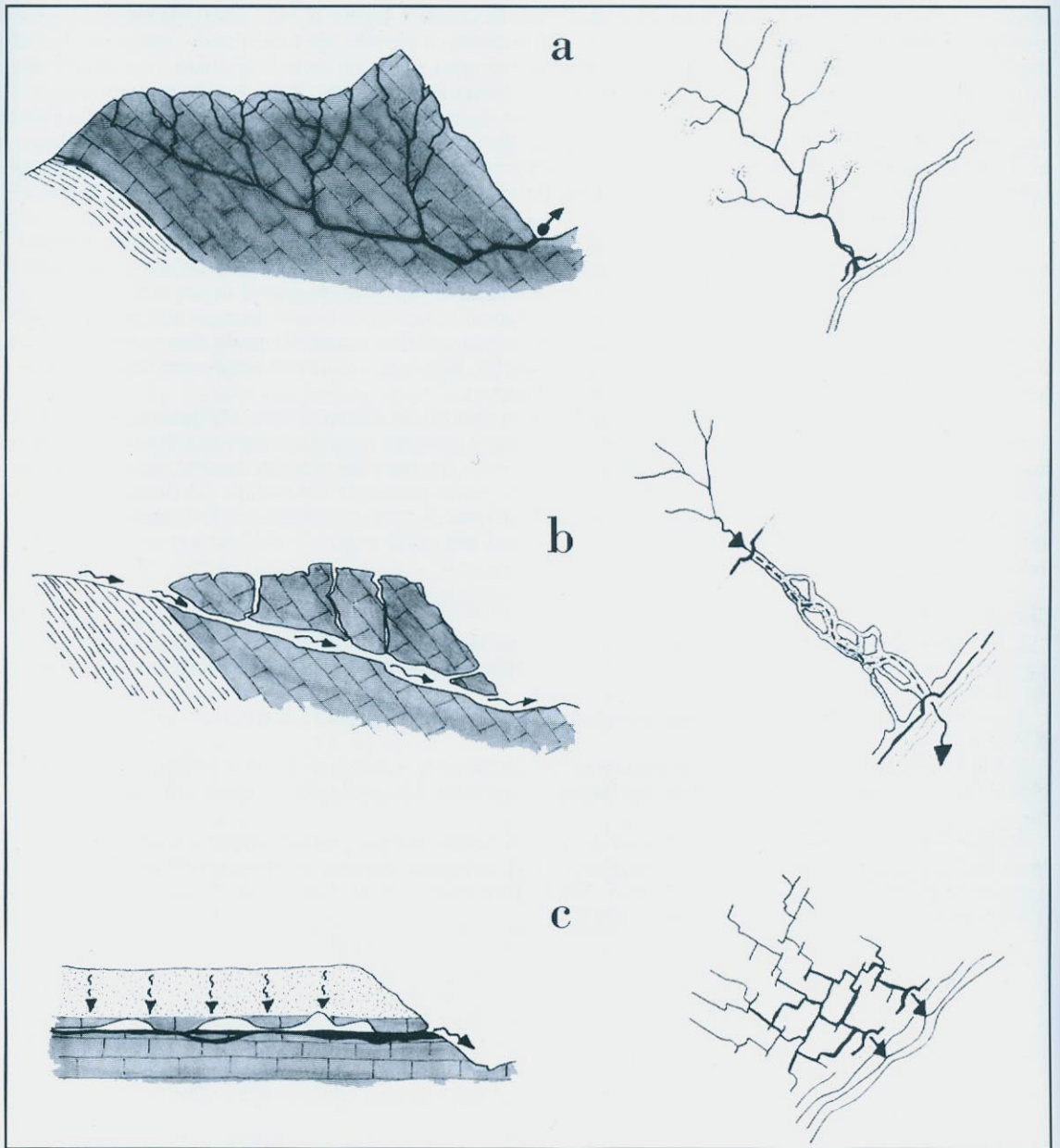


Fig. 13 effetto delle modalità di alimentazione sull'andamento dei sistemi carsici: a=alimentazione diffusa, b= alimentazione concentrata (allogenica), c= alimentazione indiretta (vedi testo per le spiegazioni)

luti sono caratterizzati dalla presenza di canyon sotterranei incisi a partire da condotte a pieno carico, i cui resti rimangono preservati sulla volta delle forre, scavati ad opera di acque che scorrevano a pelo libero; l'andamento è solitamente di tipo dendritico.

### 5.3.3. Fattori climatici

Gli effetti del clima sullo sviluppo dei fenomeni carsici sono sempre molto complessi da riconoscere. Ciò è dovuto al fatto che il clima è soggetto a variazioni anche notevoli sul breve periodo, cioè su tempi confrontabili a quelli di sviluppo dei sistemi carsici. Per fare un esempio la maggior parte dei sistemi carsici esistenti in Europa ha conosciuto le fasi glaciali del Quaternario, e quindi ha visto l'alternarsi di periodi freddi e secchi (le glaciazioni) a periodi temperati e umidi (le fasi interglaciali).

Esiste un sostanziale accordo nel ritenere che il carsismo nelle zone a clima caldo-umido si sviluppi a velocità maggiore che non nelle zone temperate e fredde. Ciò dipende in primo luogo dalla maggior disponibilità di acqua, legata a precipitazioni generalmente molto elevate, soprattutto in prossimità delle

coste. Un altro fattore che aumenta la velocità di carsificazione è legato al fatto che l'attività biologica, principale fonte del  $\text{CO}_2$  disciolto nelle acque di infiltrazione, è elevata per tutto l'anno, senza variazioni stagionali. Nelle zone temperate, viceversa, l'attività biologica segue un ciclo stagionale, con un periodo di massima attività in primavera ed estate e di bassa in autunno ed inverno. Tutto questo ci porta a ritenere che nelle aree equatoriali e tropicali umide, le acque di infiltrazione, benché più calde di quelle delle fasce temperate-fredde, abbiano la possibilità di arricchirsi maggiormente di  $\text{CO}_2$ , prelevandolo dal terreno. La maggior efficacia dei processi carsici si manifesta però soprattutto sul carsismo superficiale, e in particolare su quello sottocutaneo, cioè al di sotto delle coperture residuali, che, infatti, mostra forme di dissoluzione accentuate (megakarren).

Nel sottosuolo le acque arrivano già cariche di sali e quindi con potere corrosivo molto attenuato. Anzi, quando queste acque giungono in un ambiente sotterraneo ventilato trovano un'atmosfera meno ricca di  $\text{CO}_2$  e quindi depositano  $\text{CaCO}_3$ , formando ammassi di concrezioni spesso imponenti.

Il carsismo sotterraneo, dunque, risente meno dei fattori climatici di quanto non accada per quello di superficie. Il maggior tasso di precipitazioni delle zone equatoriali e tropicali umide, che si riflette in un maggiore flusso di acqua annuo attraverso i sistemi carsici, influisce soprattutto sulle morfologie dei condotti e solo in piccola parte sulla struttura dei sistemi carsici.

Il discorso è diverso quando abbiamo a che fare con sistemi ad alimentazione allogenica, nei quali si riversano grossi corsi acqua che nella stagione delle piogge possono raggiungere portate notevoli. In questo caso l'andamento climatico ha un maggior riflesso sulla struttura del sistema carsico; inoltre, entra in azione l'effetto della abrasione meccanica ad opera del molto materiale trasportato dal fiume. E' spesso in situazioni come questa che si sono formati i grandi sistemi di attraversamento (trafori idrologici) costituiti da gallerie di dimensioni talora colossali, comuni nei carsi tropicali del sud est asiatico (Cina, Indocina, Indonesia, etc.).

### ***Letture ulteriori***

L'influenza dei diversi fattori, sia passivi sia attivi, sulla evoluzione dei sistemi carsici sotterranei è un argomento di ricerca ancora ben lontano dall'essere sufficientemente studiato. Le indicazioni bibliografiche di carattere generale sono pertanto ancora limitate.

Tra i lavori già citati vanno ricordati nuovamente i testi di Bögli (1980), di Renault (1970) e il lavoro di Ford & Ewers (1978).

Più strettamente correlati con l'argomento in questione sono i lavori di Palmer (1975, 1984 e 1987, 1991), che si occupano principalmente dei fattori di controllo idrogeologico, e quello di Davies (1958) che si occupa del controllo strutturale.

Su questi temi può risultare utile la lettura di lavori a carattere monografico relativi a studi sulla evoluzione dei maggiori sistemi carsici. Limitatamente al territorio italiano si possono citare i lavori di Agostini & Piccini, (1994), Bini & Pellegrini (1998), Bini et al. (1993), Eusebio & Vigna (1992), Piccini (1991 e 1994), Santangelo & Santo (1991, 1997)



## BIBLIOGRAFIA

- Agostini S. & Piccini L. (1994) – *Aspetti geomorfologici ed evolutivi del sistema carsico di Pietrasecca – Appennino Centrale, Italia*. Ist. It. Spel., Mem., **5**, s. II: 61-70.
- Bini A. (1978) - *Appunti di geomorfologia ipogea: le forme parietali*. Atti V° Conv. Reg. Spel. Trentino Alto Adige, Lavis: 19-46.
- Bini A., Meneghel M. & Sauro U. (1986) - *Proposta di legenda per una cartografia geomorfologica delle aree carsiche*. Atti e Mem. Comm. Gr. E. Boegan, **25**: 21-59.
- Bini A. & Pellegrini A. (1998) *Il carsismo del Moncodeno*. Geologia Insubrica, vol. 3 (in stampa).
- Bini A., Rigamonti I., Uggeri A. (1993) - *Evidenze di tettonica recente nell'area Monte Campo dei Fiori - Lago di Varese*. Il Quaternario, **6** (1): 3-14.
- Bocchini A. & Coltorti M. (1990) – *Il Complesso Carsico Grotta del Fiume – Grotta Grande del Vento e l'evoluzione geomorfologica della Gola di Frasassi*. Ist. It. Spel., Mem., **4**, s. II: 155-180.
- Bögli A. (1980) - *Karst hydrology and physical speleology*. Ed. Springer Verlag: pp. 300.
- Bretz (1942) – *Vadose and phreatic features of limestone caverns*. Journ. Geol., **50**: 675-811.
- Cucchi F. & Forti P. (1990) – *L'evoluzione speleogenetica del Complesso Carsico Grotta del Fiume – Grotta del Vento (San Vittore Genga – Marche)*. Ist. It. Spel., Mem., **4**, s. II: 143-154.
- Curl R. L. (1974) – *Deducing flow velocity in cave conduits from scallops*. Nat. Spel. Soc. Bull., **26**: 33-38.
- Cvijic J. (1960) - *La geographies des terrains calcaires*. Monogr. Acad. Serbe Sc. Art., t. 341 (postumo).
- Davies W. E. (1958) - *Origin of caves in folded limestones*. Nat. Spel. Soc. Bull., **22**: 5-18.
- Dematteis G. (1963) – *L'erosione regressiva nella formazione dei pozzi e delle gallerie carsiche*. Atti IX° Congr. Naz. Spel., Trieste: 153-163.
- Eusebio A & Vigna B. (1992) - *Il fenomeno carsico nel Piemonte meridionale: evoluzione e conoscenze*. Proc. of Int. Congr. "Alpine Caves: Alpine Karst Systems and their Environmental Context", Asiago (VI): 193-202.
- Ford, D.C. (1971) - *Geologic structure and a new explanation of limestone cavern genesis*. Trans. Cave Res. Gr. of Great Britain, **13**: 81-94.
- Ford D. C. (1988) - Characteristics of dissolutional cave system in carbonate rocks. In "Paleokaerst" (James N. P. & Choquette P.W. Eds.) Springer-Verlag, New York: 25-57.
- Ford D.C. & Ewers R. O. (1978) – *The development of limestone cave systems in the dimension of length and depth*. Int. Journ. Spel. **10**: 213-244.
- Ford D. C. & Williams P. (1989) - *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, London: pp. 593.
- Forti F., Stefanini S & Ulcigrai F (1975) – *Relazioni tra solubilità e carsificabilità nelle rocce carbonatiche del carso triestino*. Atti e Mem Comm. Grotte "E. Boegan", Trieste: 19-49.
- Forti P. (1991) – *Processi carsici e speleogenesi (prima parte)*. Speleologia, **24**: 42-46.
- Forti P. (1992) – *Processi carsici e speleogenesi (seconda parte)*. Speleologia, **26**: 11-15.
- Forti P. (1996) - *Thermal karst system*. Acta Carsologica, v. 25: 99-117.
- Forti P., Perna G. & Sauro U. (1978) – *Grotte e fenomeni carsici*. In "Manuale di Speleologia" (S.S.I. Ed.), Longanesi & C: 95-153.
- Galdenzi S. (1990) – *Un modello genetico per la Grotta Grande del Vento*. Mem. Ist. It. Spel., **4**, s. II: 123-142.
- Jacuks L. (1977) - *Morphogenetics of karst regions. Variants of karst evolution*. Ed. Adam Hilger, Bristol: pp. 384.
- Jennings J.N. (1985) - *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell, Oxford and New York: pp. 293.
- Klimchouk A., Lowe D., Cooper A. & Sauro U. (Ed.s.) (1996) - Gypsum karst of the world. Int. Journ. Spel., **25**, n.3-4: pp. 308.
- Maucci W. (1952) - *L'ipotesi dell'erosione inversa come contributo allo studio della speleogenesi*. Boll. Soc. Adr. Sc. Nat., **46**: pp. 60.
- Myroie J. E. (1984) - *Hydrologic classification of caves and karst*. In "Groundwater as a geomorphic agent" (La Fleur R. G. Ed.), Boston, Allen and Unwin: 157-172.
- Nicod J. (1972) - *Pays et paysages du calcaire*. Ed. Presses Univ. de France, Paris: pp. 244.
- Palmer A. N. (1975) - *The origin of maze caves*. Nat. Spel. Soc. Bull., **37**(3): 55-76.
- Palmer A. N. (1984) - *Geomorphic interpretation of caves features*. In La Fleur R. G. (ed.) "Groundwater as a geomorphic agent", Boston, Allen and Unwin: 173- 209.
- Palmer A. N. (1987) - *Cave levels and their interpretation*. The Nat. Spel. Soc. Bull., **49**: 50-66.
- Palmer A. N. (1990) - *Groundwater processes in karst terraines*. Geol. Soc. Amer., Special Paper **252**: 177-209
- Palmer A. N. (1991) – *Origin and morphology of limestone caves*. Geol. Soc. Am. Bull., **103**: 1-21.

- Pasini G. (1973) – *Sull'importanza speleogenetica dell'erosione antigravitativa*. Le Grotte d'Italia, **4**, s.IV: 297-308.
- Perna G. & Sauro U. (1978) – *Atlante delle microforme di dissoluzione carsica superficiale del Trentino e del Veneto*. Mem. Museo Tridentino Sc. Nat., **22**, n. serie, Trento: pp. 176
- Piccini L. (1991) - *Ipotesi sulla evoluzione del Complesso Carsico del M. Corchia (Alpi Apuane)*. Atti del V° Congr. Fed. Spel. Tosc., Stazzema: 59-82..
- Piccini L. (1994) – *Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana, Italia)*. Natura Bresciana, Ann. Mus. Civ. Sc. Nat. Brescia, **30**, 1996: 45-85.
- Picknett R. G., Bray L. G. & Stenner R. D. (1976) – *The chemistry of cave waters*. In "The science of speleology" (Ford T. D. & Cullingford C. H. D. Eds.), Academic Press, London: 213-266.
- Renault P. (1970) – *La formation des cavernes*. Ed. Presses Univ. De France, Paris: pp.128.
- Roques H. (1973) – Atti Sem. Speleogenesi. Le Grotte d'Italia, **4**, s. IV: 37-71
- Santangelo N. & Santo A. (1991) - *Endokarstic evolution of carbonatic massifs in Campania (southern Italy): geological and geomorphological implications*. Proc. of the Int. Conf. on Environmental Changes in Karst Areas, Quad. Dip. Geogr. Padova: **13**, 83-93.
- Santangelo N. & Santo A. (1997) - *Endokarst processes in the Alburni massif (Campania, Southern Italy): evolution of ponors and hydrogeological implication*. Z. Geomorph. N. F., **41**, 2: 229-246.
- Sauro U. (1991) - *Morfologia carsica*. in: G. B. Castiglioni "Geomorfologia", Utet: 208-254.
- Slabe T. (1995) – *Cave rocky relief and its speleogenetical significance*. Znanstvenoraziskovalni Center Sazu, Ljubljana: pp. 120.
- Sweeting M.M. (1972) - *Karst landforms*. Ed. Macmillan, London: pp. 362.
- White W. B. (1988) – *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford Uni. Press: pp. 464.





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, Riempimenti e altri in progetto.

Siamo sicuri che questa iniziativa sarà un passo importantissimo per una migliore conoscenza del mondo sotterraneo.



*Concrezioni “a forma vegetale”  
nella grotta di Antiparos (Grecia)  
in una stampa XVIII secolo.*