

PAOLO FORTI¹

**Le concrezioni di grotta:
il più potente archivio esistente per il
quaternario recente**

Riassunto

Le grotte sono tra i più longevi componenti del paesaggio e sono delle perfette “trappole di accumulo” per depositi fisici e chimici che si conservano intatti per lunghi periodi di tempo.

Negli ultimi anni gli speleotemi si sono dimostrati essere gli strumenti più duttili e potenti per le ricostruzioni paleoambientali e paleoclimatiche relativamente al quaternario recente, permettendo dettagli sino all’anno.

Nel presente lavoro vengono brevemente descritti gli studi paleoclimatici, paleoambientali e sismici che possono essere effettuati partendo dalle concrezioni. Infine si evidenzia come la struttura ordinata delle bande di accrescimento delle concrezioni fornisca automaticamente una cronologia relativa degli eventi e come sia teoricamente abbastanza semplice trasformare questa cronologia relativa in assoluta attraverso differenti metodi di datazione assoluta.

Parole Chiave: Concrezioni, Paleoclimatologia, Paleosismologia, Cronologia assoluta

Abstract

Caves are amongst the most preserved geomorphologic features and represent perfect sedimentological trap for physical and chemical deposits that may be kept untouched therein even over very long span of time.

In the last decades speleothems resulted the best and powerful tools to reconstruct paleo-environments and paleo-climates in the late Quaternary, allowing a resolution up to 1 year or lower.

In the present paper the climatic, seismic and environmental studies which may be carried out using speleothems are briefly reported

Finally it will be emphasised the possibility to directly use the speleothem growing layers as relative chronology for the observed phenomena and the easy way to transform it into absolute by means of some absolute dating methods.

¹ Istituto Italiano di Speleologia Via Zamboni 67, 40126 Bologna; e-mail: *forti@geomin.unibo.it*

Keywords: Speleothems, Paleo-climate. Paleo-seismology, Absolute Dating

Introduzione

Le grotte sono tra le più longevi componenti del paesaggio, potendo preservarsi quasi intatte per decine di milioni di anni e anche più. Per tutto il tempo della loro vita una delle caratteristiche delle cavità naturali è quella di essere delle gigantesche e perfette “trappole di accumulo”, di favorire cioè la sedimentazione sia fisica che chimica al loro interno.

Tra i materiali fisici più comunemente accumulati in grotta ricordiamo:

- Sedimenti (fluviali, marini, vulcanici etc..)
- Materiale organico (frammenti di piante e/o animali, spore etc.)
- Reperti archeologici

Mentre i depositi chimici vengono di solito suddivisi in:

- Concrezionamenti (carbonatici, gessosi etc.)
- Mineralizzazioni

La bassa energia, che caratterizza le grotte in generale, offre poi a questi depositi la possibilità di mantenersi praticamente inalterati per un lungo periodo di tempo, cosa che sarebbe quasi impossibile all'esterno.

I depositi delle cavità naturali sono quindi di fondamentale importanza in molte delle branche della ricerca scientifica: in particolare sono assolutamente indispensabili per lo studio di tutto quello che è avvenuto sulla terra anche milioni di anni addietro. Esse rappresentano poi l'archivio più completo e dettagliato per ricostruire eventi che si sono succeduti nell'ultimo milione di anni.

Non è un caso, infatti, che la grande maggioranza degli importanti siti archeologici del Paleolitico inferiore siano in grotta: senza le cavità naturali la nostra storia si arresterebbe a poche migliaia di anni addietro.

Tra tutti i sedimenti di grotta, comunque, quelli chimici e segnatamente le concrezioni di carbonato di calcio si stanno dimostrando gli strumenti più duttili e potenti per le ricostruzioni paleoambientali e paleoclimatiche relativamente al quaternario recente, per cui possono, in alcuni casi, fornire un dettaglio addirittura inferiore all'anno.

Nel presente lavoro, quindi, verranno brevemente descritti gli studi (paleoclimatici, paleoambientali e sismici) che possono essere effettuati partendo dalle concrezioni, le metodiche che di volta in volta debbono essere impiegate e i risultati che ci si aspetta di ottenere.

Infine si evidenzierà come la struttura necessariamente ordinata delle bande di accrescimento delle concrezioni fornisca automaticamente una cronologia relativa degli eventi registrati al loro interno e come sia teoricamente abbastanza semplice trasformare questa cronologia relativa in assoluta attraverso diffe-

renti metodi di datazione che, in alcuni casi limite permettono di raggiungere indeterminazioni inferiori all'anno solare.

Le Concrezioni ed i Paleoclimi

Un primo campo di indagine in cui le concrezioni sono molto importanti è quello delle ricostruzioni paleoclimatiche che possono essere effettuate da vari tipi di osservazioni, che di volta in volta possono essere:

- Sulle forme
- Sulla composizione mineralogica
- Sulle inclusioni solide o fluide
- Sul contenuto isotopico

La struttura laminata e necessariamente ordinata delle concrezioni permette, poi, di ricavare immediatamente una ricostruzione cronologica "relativa" degli eventi corrispondenti a ogni singola banda di accrescimento.

La morfologia e i paleoclimi

Varie sono le concrezioni la cui morfologia può risentire delle variazioni climatiche esterne (Hill & Forti 1997), tra tutte, però, le stalagmiti sono quelle che possono più semplicemente fornire indicazioni valide.

E' stato infatti dimostrato (Franke, 1965) che il diametro di equilibrio di una stalagmite dipende da:

$$d = 2\sqrt{\frac{c_o \cdot q}{\pi \cdot v}}$$

dove: c_o = *materiale depositato dalla unità di volume di soluzione*

q = *quantità d'acqua che cade nell'unità di tempo*

v = *velocità di accrescimento apicale*

$\Theta = 3,14.....$

Ma se il volume d'acqua che cade sulla stalagmite è sufficientemente elevato, allora c_o e v sono costanti e pertanto il diametro dipenderà esclusivamente dalla quantità d'acqua che alimenta la stalagmite stessa: questo spiega come mai in una stessa grotta possono coesistere stalagmiti che hanno la stessa età ma dimensioni diversissime.

Sfruttando proprio questa proprietà delle stalagmiti, si possono fare anche semplici osservazioni paleoclimatiche: infatti se in una grotta, o meglio in un insieme di grotte della stessa area, si osservano stalagmiti che evidenziano tutte una rastremazione del loro diametro verso l'alto, è evidente che il clima dell'area è divenuto più arido (Fig. 1).

La variazione opposta (passaggio da clima arido a clima più piovoso) non può essere direttamente osservata, perché la naturale evoluzione delle bande di accrescimento tende a mascherare l'aumento di diametro, che può essere osservato esclusivamente facendo una sezione longitudinale della stalagmite stessa (Fig. 2).

La composizione mineralogica ed i paleoclimi

Una variazione del clima può anche influenzare la natura stessa del minerale che si deposita sotto forma di concrezioni di grotta. Tale processo è particolarmente evidente nelle grotte in gesso ove spesso coesistono concrezionamenti di calcite e di gesso.

I due processi genetici (Forti & Rabbi 1981, Calaforra 1996, Calaforra & Forti 1999) che portano alla deposizione del gesso e della calcite nelle grotte in gesso sono assolutamente differenti tra loro: l'evaporazione, che determina la deposizione del gesso, è infatti un fenomeno fisico che è controllato essenzialmente dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria, mentre la dissoluzione incongruente, che controlla la deposizione del carbonato di calcio è un fenomeno chimico che è controllato essenzialmente dalla concentrazione parziale della CO₂ presente nella soluzione, che a sua volta dipende dalla attività biologica a livello del suolo o dalla quantità di materia organica presente nelle acque di percolazione.

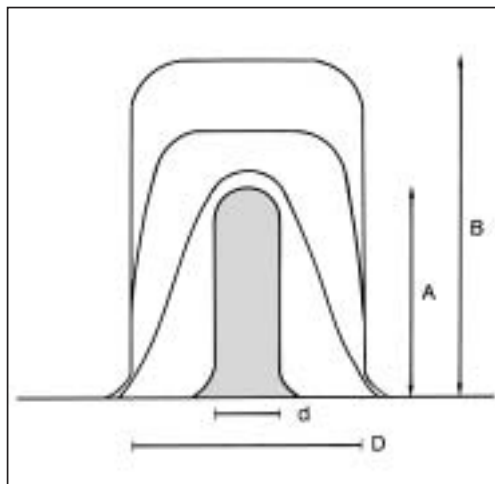


Fig. 2 - L'aumento permanente di acqua di alimentazione causa l'aumento del diametro delle stalagmiti (da d a D), che però non è direttamente osservabile dato che la stalagmite con diametro più piccolo (A) viene "inglobata" da quella a diametro maggiore (B). Per evidenziare il processo è necessario quindi fare una sezione longitudinale della stalagmite medesima.

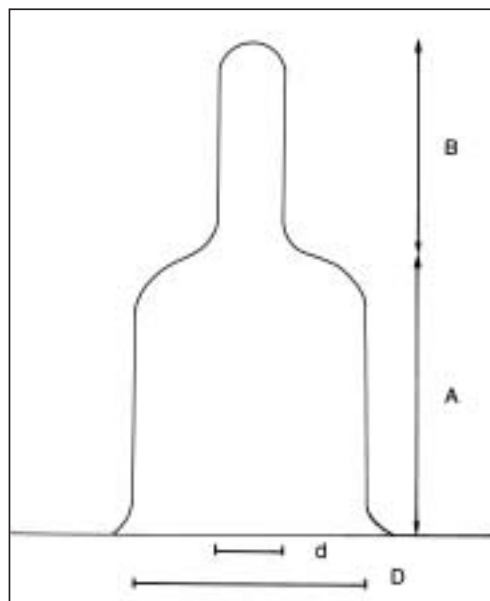


Fig. 1 - Forma caratteristica di una stalagmite che ha subito una diminuzione permanente nella quantità di acqua di alimentazione: tale diminuzione si riflette sul suo diametro che è passato da D a d (A periodo di alta alimentazione e B periodo di bassa alimentazione).

chimico che è controllato essenzialmente dalla concentrazione parziale della CO₂ presente nella soluzione, che a sua volta dipende dalla attività biologica a livello del suolo o dalla quantità di materia organica presente nelle acque di percolazione.

All'interno di una grotta in gesso, quindi, la presenza esclusiva di speleotemi di calcite o di gesso o, più comunemente, la prevalenza di uno di essi dipende dalla efficienza in quella particolare cavità di uno dei due meccanismi genetici, che, in competizione tra loro tendono a far depositare l'uno o l'altro minerale.

La deposizione di gesso, essendo controllata dall'evaporazione, ovviamente, a parità di altre condizioni (quali per esempio la ven-

tilazione), sarà maggiore in aree aride e possibilmente calde, ove le precipitazioni sono scarse e quindi le acque di infiltrazione hanno tutto il tempo di saturarsi in gesso e inoltre l'umidità relativa tenderà ad essere, anche in grotta, relativamente bassa.

Il massimo sviluppo dei concrezionamenti in gesso, infatti, sono stati osservati nei deserti del Nuovo Messico negli USA e di Sorbas in Spagna, ma anche in tutta l'area dell'Africa Settentrionale. In queste stesse zone, essendo scarsa o del tutto assente la vegetazione è logico attendersi un basso contenuto in CO₂ nelle acque di infiltrazione e quindi l'impossibilità, totale o parziale, per la dissoluzione incongruente di instaurarsi, con conseguente assenza totale o grande scarsità di speleotemi calcitici.

Al contrario, la formazione di calcite, essendo appunto dovuta alla dissoluzione incongruente del gesso ad opera di acque molto ricche in anidride carbonica, richiede di conseguenza la presenza di ben sviluppata vegetazione e di suoli maturi al di sopra del sistema carsico: per questo le aree in cui è logico aspettarsi un notevole sviluppo di speleotemi calcitici sono quelle con clima da umido a molto umido e con climi non troppo rigidi. In effetti i più vasti concrezionamenti calcitici sono stati osservati in Europa continentale, Italia del nord, e Cuba.

In Tabella 1, per varie zone climatiche mondiali, sulla base delle osservazioni sperimentali effettuate nel corso degli ultimi 20 anni, sono schematizzati i rapporti percentuali esistenti e le caratteristiche principali del concrezionamento, sia di gesso che di calcite presente all'interno delle grotte in gesso.

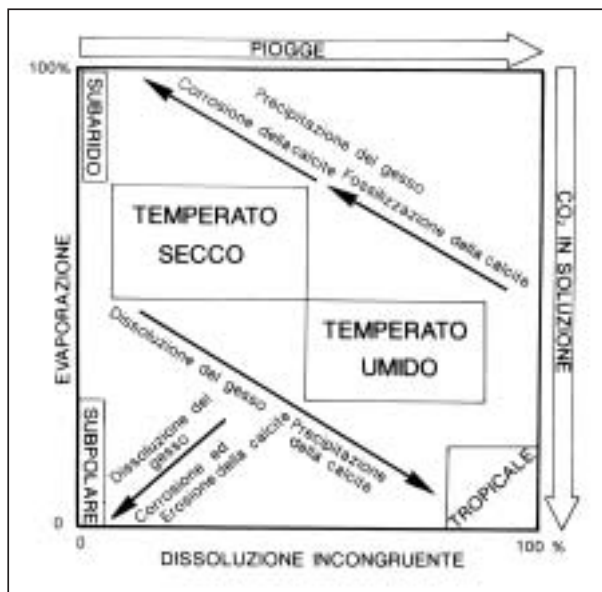


Fig. 3 - Schema delle variazioni indotte nel concrezionamento in funzione dell'efficienza relativa dell'evaporazione e della dissoluzione incongruente con indicazione delle aree caratteristiche dei principali climi della terra (da Calaforra & Forti 1999).

		CONCREZIONAMENTI ATTUALI			
ZONA CLIMATICA	LOCALIZZAZIONE	GESSO		CALCITE	
		PERCENTUALE	CARATTERISTICHE	PERCENTUALE	CARATTERISTICHE
Subpolare	Pinega (Russia)		Solo polvere stagionale		Assente
Temperata umida	Bologna (Italia)	25-40	Infiorescenze, piccole stalattiti, nelle zone di evaporazione accentuata	60-75	Grandi colate e crostoni stalattitici
Temperata secca	Entella (Sicilia)	50-60	Infiorescenze e stalattiti diffuse	40-50	Grandi colate solo dove è presente suolo all'esterno
Subarida	Sorbas (Spagna)	100	Grandi stalattiti, stalagmiti e colate		Assente
Tropicale	P.Alegre (Cuba)	15-25	Rare infiorescenze, a volte stagionali	75-85	Stalattiti, stalagmiti e colate

Tab. 1 - Caratteristiche e percentuali delle concrezioni di gesso e di calcite attualmente in formazione all'interno di grotta in differenti aree climatiche della terra (da Calaforra & Forti, 1999).

In pratica quindi è il clima dell'area che effettivamente permette al gesso o alla calcite di divenire il deposito principale di una grotta in gesso: infatti il clima influenza di maniera diametralmente opposta i due meccanismi evolutivi.

Si può quindi affermare che il concrezionamento presente all'interno di una determinata cavità altro non è che un indicatore dello specifico clima che ha caratterizzato l'area carsica in cui si apre la grotta nei periodi in cui gli speleotemi si sono sviluppati.

Pertanto se in una data grotta si osservano cambiamenti improvvisi nel concrezionamento (da calcite dominante a gesso dominante o viceversa, oppure il passaggio da gesso o calcite a nessun deposito) è ragionevole supporre che il clima dell'area sia cambiato nel tempo.

Sulla base delle attuali conoscenze, quindi, è possibile tracciare un quadro generale delle modificazioni che una determinata variazione climatica dovrebbe indurre sui depositi chimici di una grotta in gesso (Fig. 3).

E' bene chiarire, però, che mentre alcune variazioni di clima danno luogo a modificazioni nel che possono essere conservate e quindi rilevate anche dopo un relativamente lungo lasso di tempo, al contrario altre si mantengono per un periodo molto minore e quindi hanno maggiore probabilità di non essere rilevabili. Questo dipende dal fatto che il gesso e la calcite hanno proprietà completamente differenti: in particolare la solubilità ed erodibilità del gesso è molto maggiore di quella della calcite.

Sulla base di queste osservazioni si può concludere che l'analisi della mineralogia delle concrezioni contenute nelle grotte in gesso può essere un metodo molto efficace per lo studio preliminare dei paleoclimi dell'area in cui si apre la grotta stessa.

L'applicazione di questa metodologia, comunque, è limitata essenzialmente agli ultimi 100.000 anni, dato che questo intervallo di tempo è mediamente limite per la conservazione dei fenomeni carsici in gesso (Cucchi *et Al.* 1998).

Anche nelle grotte in calcare esistono variazioni nella composizione mineralogica delle concrezioni che possono permettere di risalire, anche se con maggiore difficoltà, alle variazioni climatiche esterne.

L'alternanza di calcite e di aragonite infatti può essere indice di variazione dei parametri esterni: in generale infatti si osserva la formazione di calcite quando il processo prevalente è la diffusione della CO₂ corrispondente a periodi di clima temperato o caldo umido, mentre l'aragonite diviene dominante quando l'evaporazione è il processo principale (conseguente ad un periodo di clima caldo secco o arido).

L'applicazione di queste considerazioni in ambiente carbonatico non è così immediata come in ambiente gessoso: infatti, a differenza di quelle gessose, nelle grotte carbonatiche esistono molti altri fattori non climatici (presenza di

ioni estranei, correnti o stratificazioni d'aria di grotta, concentrazione di CO₂ o altri ancora), che possono portare al medesimo risultato (Hill & Forti 1997).

Le inclusioni ed i paleoclimi

Tutte le concrezioni, mentre si accrescono, inglobano all'interno della loro struttura vari tipi di "impurezze", solide o fluide che possono essere utili per studi paleoclimatici e paleoambientali.

I materiali che più spesso possono essere ritrovati inglobati nelle concrezioni sono: minerali in traccia, frammenti di roccia trasportati in sospensione durante le piene, polvere portata dalle correnti d'aria, materiale organico che può variare dalle molecole di acidi umici, a spore e a pollini. Inoltre il processo di cristallizzazione può portare all'incapsulamento di "inclusioni fluide" piccole bolle contenenti liquidi e/o gas che corrispondono alla soluzione originale da cui la concrezione ha avuto luogo.

In particolare per gli studi paleoclimatici sono particolarmente utili i pollini e le inclusioni fluide.

I pollini, incapsulati nelle bande di accrescimento delle concrezioni, si conservano infatti praticamente inalterati e possono quindi servire per definire, almeno a grandi linee, non solo gli intervalli di tempo in cui gli speleotemi analizzati erano attivi e ed evidenziare così eventuali stop nel concrezionamento, ma anche dare indicazioni paleoambientali, sulle associazioni floristiche di volta in volta presenti sul territorio in cui si apre la grotta.

Queste ultime, poi, mettendo in evidenza la prevalenza nel tempo di questo o quel tipo di pianta permettono di indicare con notevole precisione l'avvicinarsi di periodi "freddi" e di periodi "caldi" e quindi, in ultima analisi forniscono indicazioni, anche se non molto dettagliate, sui paleoclimi.

Osservazioni molto più precise sull'evoluzione paleoclimatica di una data area si possono ottenere dallo studio delle "inclusioni fluide". Il contenuto in liquidi e gas degli eventuali vuoti all'interno del reticolo cristallino dei vari minerali che possono comporre le concrezioni di grotta, rappresentano la composizione chimica della soluzione "madre", cioè dell'acqua che fluiva sulla concrezione stessa al momento della sua deposizione.

Lo studio di dettaglio di queste "inclusioni fluide" permette da un lato di definire quantitativamente il chimismo delle acque al momento in cui una data lamina si è depositata e inoltre può permettere anche di definirne la temperatura: dato che la temperatura dell'acqua di una grotta è una diretta conseguenza del clima dell'area di alimentazione della stessa è evidente che le variazioni di temperatura osservate all'interno di uno speleotema altro non sono che la conseguenza di una variazione climatica esterna.

Gli isotopi stabili e i paleoclimi

Nel reticolo cristallino di una concrezione si trovano elementi quali l'Ossigeno, il Carbonio, lo Zolfo e molti altri, che in natura sono presenti sotto forma di isotopi stabili di peso differente, il cui rapporto percentuale è costante.

In natura ogni passaggio di fase fa sì che gli isotopi più pesanti si concentrino nelle fasi solide e/o liquide, mentre quelli più leggeri tendono a trasferirsi in quella gassosa pertanto in presenza di una forte evaporazione la composizione isotopica di una concrezione risulterà essere molto più ricca in isotopi pesanti di un'altra che si sia formata invece in condizioni di evaporazione assente o molto ridotta.

E' evidente che, a parità degli altri parametri ambientali, maggiore è la temperatura in grotta, maggiore sarà l'evaporazione e questo rende possibile ricavare indicazioni paleoclimatiche.

Il processo consiste nell'analizzare la quantità relativa dei singoli isotopi stabili presenti nella concrezione (Ossigeno, Zolfo, Carbonio, etc...) e dal loro rapporto specifico è possibile risalire alle temperature di deposizione.

Tra tutti gli isotopi che possono essere utilizzati, è l'ossigeno quello che fornisce i dati più attendibili e questo perché esso proviene praticamente tutto dall'acqua di infiltrazione essendoci solo poche parti per milione che derivano dal carbonato di calcio della roccia incassante e dalla anidride carbonica proveniente dall'atmosfera (Ford, 1997).

L'utilizzazione del Carbonio per questi studi, infatti, in generale soffre dell'indeterminatezza nella definizione del rapporto esistente tra carbonio derivante dalla roccia e carbonio derivante dall'atmosfera: tale rapporto può variare anche notevolmente da speleotema a speleotema e anche all'interno della stessa concrezione da una banda alla successiva.

Quanto detto per il Carbonio è valido anche per tutti gli altri isotopi stabili, escluso l'ossigeno, e pertanto è quest'ultimo che viene di norma utilizzato in questi studi.

L'equazione che lega la temperatura di deposizione al rapporto isotopico dell'ossigeno è la seguente:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 16.9 - 4.38(\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}) + 0.18(\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}})$$

Mentre il valore per $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ si ricava direttamente dall'analisi delle singole bande di calcite all'interno dello speleotema, il valore $\delta^{18}\text{O}_{\text{acqua}}$ viene ottenuto analizzando l'acqua eventualmente intrappolata al momento della cristallizzazione all'interno delle inclusioni fluide precedentemente descritte.

Gli speleotemi, la paleosismicità e il rischio sismico

Un importante campo di utilizzazione scientifica delle concrezioni di grotta, ed in particolare delle stalagmiti, è quello delle ricostruzioni paleosismiche (Forti, 1999), che rivestono una importanza fondamentale anche applicativa, permettendo una definizione del rischio sismico su un intervallo di tempo molto maggiore (oltre i 600.000 anni) di quanto possa fare la sismologia storica (massimo 2000 anni).

Attualmente è generalmente accettato che lo studio delle concrezioni di grotta è un potente mezzo per:

1. La localizzazione degli epicentri dei grandi terremoti del passato.
2. La datazione relativa ed assoluta degli stessi (fino a 500.000 - 750.000 anni BP).
3. La stima della loro magnitudo
4. L'ottimizzazione della valutazione del rischio sismico.

Le cavità naturali situate in aree sismiche possono contenere vari speleotemi rotti o crollati, anche se di gran lunga prevalgono le stalattiti e le stalagmiti. Naturalmente prima di procedere nelle analisi sismotettoniche bisogna accertarsi che le rotture siano realmente conseguenze di terremoti e quindi bisogna discriminare tutte quelle causate da altri fattori non sismici. Tra questi i più comuni sono l'eccessivo peso delle stalattiti e delle vele, che quindi si distaccano dal soffitto da cui pendevano, oppure lo scivolamento di stalagmiti, colate e colonne sviluppatasi sopra un substrato di materiale plastico (argilla) o incoerente (sabbia, ciottoli). Inoltre in alcune aree centro-europee, poi, la maggior parte dei crolli di concrezioni nelle grotte è dovuto al lento movimento di lingue di ghiaccio che avevano completamente riempito la cavità durante i periodi glaciali. Infine la rottura e/o il crollo di concrezioni ed a ogni latitudine dipendere non da fattori naturali (sismici o no) ma antropici: volontariamente o involontariamente, infatti, la frequentazione umana delle grotte comporta spesso rotture di speleotemi, che possono essere davvero difficili da discriminare rispetto a quelli dovute a cause naturali.

E' assolutamente necessario, comunque, effettuare preventivamente un dettagliato studio morfologico e litologico della grotta per determinare se le concrezioni si sono spezzate o sono crollate a seguito di terremoti o invece per altre cause naturali o antropiche.

Un altro mezzo per identificare i crolli indotti da eventi sismici è quello di effettuare un'analisi statistica sulle età dei crolli medesimi (Agostini *et Al.*, 1994): le rotture dovute ad un terremoto saranno raggruppate attorno a una data ben definita, mentre quelle dovute ad altre cause risulteranno normalmente distribuite in maniera casuale.

Vi sono comunque alcune tipologie di crollo che possono essere immediatamente correlate a fenomeni sismotettonici (Fig. 4) e tra queste, certo le più caratteristiche e comuni sono le fratture lungo un piano suborizzontale di grandi stalagmiti, che in alcuni casi non ha portato al crollo della porzione superiore dello speleotema ma solo ad una sua leggera rotazione o traslazione (Gospodarich 1977).

Questo tipo particolare di frattura è dovuto alla presenza di vibrazioni di alta frequenza collegate alle onde sismiche.

Queste vibrazioni possono indurre la rottura per risonanza di stalagmiti o, anche, di stalattiti lungo piani suborizzontali corrispondenti ai modi di risonanza delle concrezioni stesse (Fig. 5).

Un'altra evidenza di fenomeni indotti da terremoti può essere fornita dal fatto che le stalagmiti, le stalattiti e le colonne crollate giacciono lungo direzioni ben determinate, di solito coincidenti con quelle dei principali strutture tettoniche presenti nella cavità (Agostini *et Al.*, 1994).

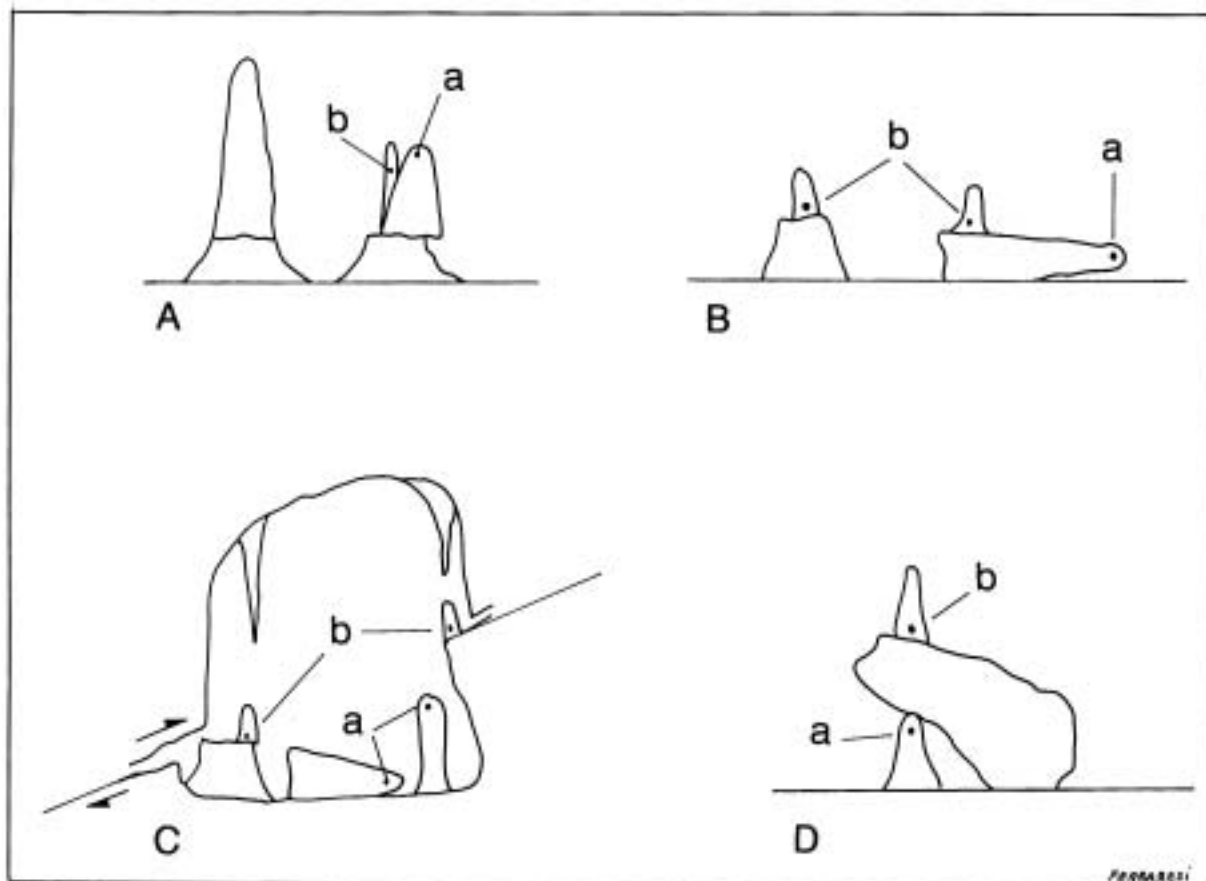


Fig. 4 - Caratteristiche rotture di concrezioni indotte da eventi sismici. Rottura di una stalagmite lungo un piano orizzontale a causa della risonanza indotta da onde sismiche: (A) la parte superiore della stalagmite è rimasta appoggiata sulla parte inferiore, avendo subito solo una piccola traslazione e/o rotazione; (B) la parte superiore spezzata giace presso la sua base. (C) Crollo di una stalagmite per spostamento della parete presso cui era cresciuta. (D) Una nuova stalagmite è cresciuta su un blocco di roccia caduto che ha coperto una stalagmite più antica. Le lettere (a) e (b) indicano i punti in cui si dovrebbero effettuare i campionamenti per le datazioni assolute dei depositi che si sono formati appena prima o appena dopo l'evento sismico (da Forti 1999).

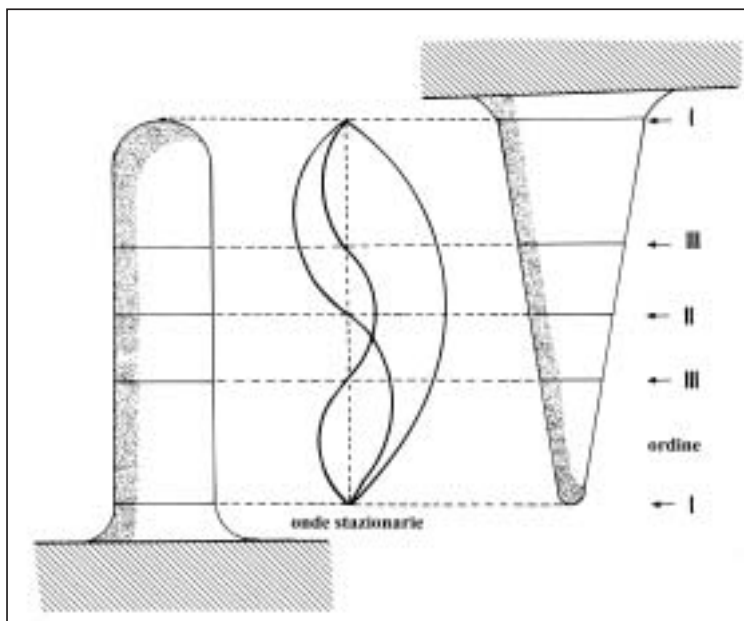


Fig. 5 - La risonanza indotta da onde sismiche causa la rottura delle stalattiti e delle stalagmiti lungo piani perpendicolari al loro asse e in posizioni definite dalle onde stazionarie che si sviluppano all'interno della concrezione stessa. Nel caso delle stalagmiti rotture per risonanza del primo ordine sono favorite, mentre nelle stalattiti sono più probabili rotture secondo ordini superiori di risonanza. Questo differente comportamento è dovuto alla loro differente morfologia: le stalagmiti infatti possono essere assimilate a cilindri, mentre le stalattiti a coni molto allungati che quindi sono più deboli verso l'apice (da Forti 1999, modificato).

Infine bisogna citare che, a volte, le stalagmiti rotte per risonanza possono fornire informazioni per valutare le accelerazioni subite nel corso dell'evento sismico: infatti, se si fanno analisi su stalagmiti provenienti da differenti grotte della stessa area, si può anche risalire alla posizione dell'epicentro e avere una zonazione di quel particolare terremoto.

Dati paleosismici ancora più accurati possono poi essere ricavati dalle stalagmiti anche se non fratturate o crollate: le informazioni sono infatti registrate nelle lamine di accrescimento di questi speleotemi (Forti & Postpischl 1986).

Una sezione lucida lungo l'asse di accrescimento di una stalagmite normalmente mostra una evidente successione di lamine simmetriche. Idealmente, dato che l'asse della stalagmite registra la verticale di caduta della goccia che genera la stalagmite, se questa verticale si è mantenuta stabile nel tempo l'asse risulterà perfettamente lineare. In realtà le osservazioni sperimentali hanno dimostrato che variazioni progressive o istantanee nell'asse di accrescimento sono spesso presenti in molte stalagmiti: tali variazioni possono dipendere da fattori sismotettonici ma anche essere la conseguenza di fenomeni locali (correnti d'aria permanenti che spostano la goccia, migrazione del punto di distacco della goccia sul soffitto, scivolamento gravitativo della stalagmite cresciuta su un substrato incoerente, o altri ancora), che comunque possono essere discriminate attraverso un'analisi statistica.

In alcuni casi l'asse di accrescimento delle stalagmiti presenta brusche variazioni di direzione, che, se possono essere esclusi fattori perturbativi locali, sono indici di un evento sismico.

Dai terremoti, poi, spesso dipende anche il brusco cambio di colore, di tessitura o di composizione chimica delle bande di accrescimento della stalagmite

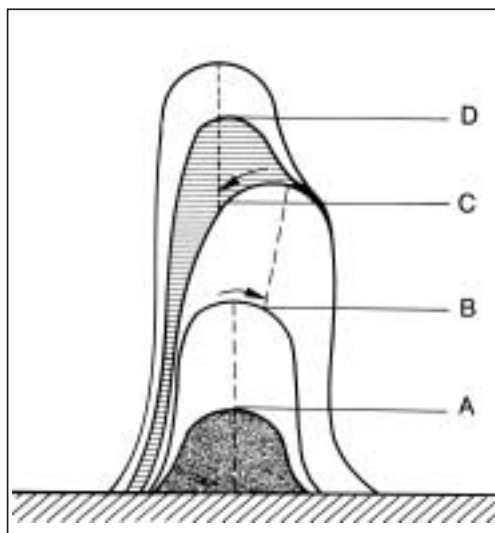


Fig. 6 - Improvvisi cambi di chimismo evidenziati da cambi di colore o di tessitura delle bande di accrescimento o improvvisi cambi nella verticalità dell'asse delle stalagmiti possono essere indice di fenomeni sismici (da Forti 1999).

(Fig. 6): tali variazioni infatti sono la diretta conseguenza dell'improvvisa variazione nella quantità e/o composizione chimica delle acque di infiltrazione che alimentano la stalagmite, variazione indotta dall'evento sismico.

Certamente, il risvolto pratico più importante di queste analisi è quello legato alla valutazione del rischio sismico, che normalmente si basa sul catalogo dei terremoti storici, e che quindi difficilmente arriva oltre i 2000 anni. E' ovvio che questo intervallo temporale è troppo breve per essere sicuri che il massimo terremoto possibile per tale area sia effettivamente avvenuto e pertanto il rischio sismico risulta generalmente sottostimato.

Gli studi sugli speleotemi permettono invece di riconoscere i grandi paleosismi e di datarli sino al limite del metodo di datazione radiometrica, che è attualmente attorno ai 600.000 anni: ora è logico ritenere che un simile intervallo cronologico sia stato sufficiente perché la struttura sismogenetica abbia generato il massimo dei terremoti possibile.

Le concrezioni e la cronologia degli eventi

Tutti gli studi paleoclimatici appena descritti non forniscono indicazioni per quel che concerne la cronologia degli eventi: è evidente invece come sia importante poter posizionare correttamente in una sequenza temporale ordinata le singole variazioni climatiche evidenziate.

La struttura laminata e necessariamente ordinata delle concrezioni permette di ricavare immediatamente una ricostruzione cronologica "relativa" degli eventi corrispondenti a ogni singola banda di accrescimento: infatti le bande "superiori" sono necessariamente sempre più giovani di quelle "inferiori".

Molto spesso, poi, le singole lamine di accrescimento rappresentano un anno solare: in questi casi, quindi, potrebbe teoricamente essere possibile passare immediatamente da una cronologia relativa ad una assoluta.

In pratica, però, tale trasformazione non è né facile né immediata e soprattutto è assolutamente aleatoria per una serie di motivi, di cui i più comuni sono:

- assenza di chiare laminazioni
- presenza di bande con frequenza diversa da quella annuale
- periodi di stop nel concrezionamento
- periodi di ridissoluzione parziale della concrezione

L'osservazione di dettaglio al microscopio ottico e a quello elettronico permette di discriminare alcuni se non tutti questi problemi, ma comunque non può mai fornire la sicurezza e pertanto attualmente le bande di accrescimento vengono di norma utilizzate solamente come “supporto” e “integrazione” di altri metodi di datazione.

Attualmente, per ottenere una cronologia assoluta e non solo relativa attraverso lo studio delle concrezioni si possono usare differenti metodi, tra cui i più comunemente utilizzati sono:

- Paleomagnetismo
- ^{14}C
- $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$
- Luminescenza

Ciascuno di metodi di datazione assoluta delle concrezioni ha problemi e limiti insiti nel metodo stesso e pertanto bisogna decidere, caso per caso, quale o quali siano i più adatti.

Una trattazione dettagliata dei singoli metodi di datazione assoluta esula dallo scopo e dalle possibilità di questo lavoro, sarà qui sufficiente accennare, per ciascuno di loro, ai problemi ed i limiti che presentano, in modo da rendere eventualmente più agevole la scelta.

Il paleomagnetismo

Questo metodo si basa sul fatto che la polarità magnetica naturale della Terra si è invertita varie volte nel corso dell'evoluzione del nostro pianeta: dato che all'interno delle concrezioni possono rimanere intrappolate sostanze magnetiche, queste ultime forniscono indicazioni sulla polarità al momento della loro deposizione e quindi, in ultima analisi, danno indicazioni cronologiche che possono coprire un lasso di tempo anche molto lungo (diverse decine di milioni di anni).

Il metodo però non è utilizzabile per concrezioni più giovani di 700.000 anni, dato che da allora non si sono più verificate inversioni nella polarità della Terra e anche per i periodi più antichi le indicazioni sono molto grossolane e comunque possono essere utilizzate solamente se si è certi che non si sono verificati degli stop nel concrezionamento, che porterebbero a vanificare tutte le misure.

Il metodo del ^{14}C

Il metodo è basato sulla misura del decadimento radioattivo del Carbonio che inizia dal momento che questo è intrappolato nel reticolo cristallino della calcite o del carbonato di calcio: data la sua cinetica il metodo è applicabile solamente per gli ultimi 50-80.000 anni con errori sperimentali che possono variare

da decine a migliaia di anni. Un grosso problema che limita enormemente la sua utilizzazione pratica è dato dal fatto che, anche in questa ristretta finestra temporale, è praticamente molto difficile valutare il contributo del carbonio “morto”, di quel carbonio cioè che, derivando dalla dissoluzione del calcare e non dall’anidride carbonica dell’atmosfera, praticamente non contiene assolutamente l’isotopo radioattivo su cui si basa il metodo.

Il metodo del $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

Questa tecnica di datazione assoluta delle concrezioni è quella che è stata maggiormente utilizzata negli ultimi 30 anni. Il metodo è basato sul decadimento naturale dell’Uranio in Torio e, data la sua cinetica, ha un campo massimo di applicazione sino ai 7-800.000 anni BP, con errori che dipendono sia dalla concentrazione di partenza dell’Uranio sia dall’età del campione e che possono comunque variare da centinaia a decine di migliaia di anni.

L’Uranio e il Torio, pur trovandosi naturalmente sia nei suoli che nella roccia

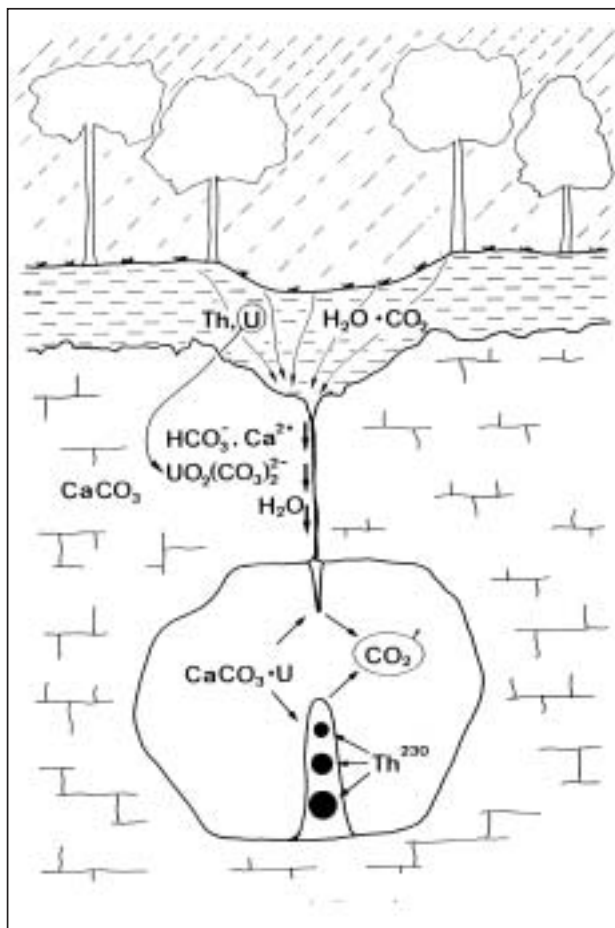


Fig. 7 - Il trasporto dell’Uranio dal suolo all’ambiente di grotta avviene per solubilizzazione da parte delle acque meteoriche. Nelle concrezioni esso decade dando luogo alla formazione di Torio (da Quinif 1998, modificato).

carbonatica, vengono trasportati selettivamente dalle acque di infiltrazione meteorica. Infatti queste ultime possono portare in soluzione solo l’Uranio e quindi solo questo elemento viene veicolato all’interno della grotta e quindi inglobato nel reticolo cristallino della calcite nelle concrezioni, ove, a causa del decadimento radioattivo, si trasforma in Torio. Le bande più antiche delle concrezioni, pertanto, contengono più Torio e meno Uranio di quelle più recenti (Fig. 7).

Le limitazioni di questo metodo vengono soprattutto dalle possibili “riaperture” del sistema geochimico, che comportano un aumento dell’uranio all’interno dello speleotema, con conseguente diminuzione dell’età radiometrica apparente dello stesso, ovvero da inquinamento da torio residuale, trasportato in fase solida durante gli eventi di alluvionamento della cavità ed eventualmente

intrappolato nelle bande di accrescimento delle concrezioni, con conseguente innalzamento dell'età radiometrica apparente.

La luminescenza

Il metodo sfrutta la proprietà che alcune sostanze (acidi umici, fulvici etc.) hanno di emettere luce se eccitati da una radiazione (UV, Laser, etc.): la quantità di luminescenza dipende dalla concentrazione di queste sostanze, che è governata in ultima analisi dall'irraggiamento solare.

L'analisi della zonazione in microbande a luminescenza differente di una sezione lucida dello speleotema, permette di ricostruire la cronologia di accrescimento di una concrezione fino ad un limite di precisione inferiore al giorno.

In teoria il metodo non ha limiti temporali ma attualmente è limitato a periodi inferiori ai 100.000 anche perché richiede la costanza del processo di concrezionamento dal presente a tutto il periodo che viene studiato.

E' il sistema di datazione assoluta delle concrezioni adottato più di recente e che sembra più promettente per gli sviluppi futuri soprattutto in quei casi per cui sia necessario un dettaglio davvero elevato.

Conclusioni

Le osservazioni brevemente riportate nei paragrafi precedenti hanno ampiamente confermato l'enorme interesse che le grotte in generale ed i sedimenti chimici al loro interno in particolare hanno per tutto quello che concerne il Quaternario recente

A tutt'oggi, infatti, le concrezioni sono lo strumento più raffinato e attendibile per la ricostruzione paleoambientale, paleosismica e paleoclimatica del Quaternario recente per cui possono fornire un dettaglio cronologico assolutamente irraggiungibile con altri metodi di indagine.

In un prossimo futuro con il miglioramento delle metodologie e delle strumentazioni le analisi sulle concrezioni di grotta diverranno ancora più semplici ed accurate e quindi, considerata la diffusione in tutto il mondo delle grotte con depositi chimici all'interno, sarà possibile ottenere l'evoluzione climatica, sismica ed ambientale di una qualunque parte del mondo per l'ultimo milione di anni con risoluzione addirittura inferiore all'anno.

Bibliografia

AGOSTINI S., FORTI P., POSTPISCHL D. 1994 - *Gli studi sismotettonici e paleosismici effettuati nella Grotta del Cervo di Pietrasecca (L'Aquila - Italia Centrale)*. Mem. Ist. It. Spel. S.2, 5 : 97-104

- CALAFORRA J.M., 1996 *Contribucion al conocimiento de la karstologia de yesos*. PhD. Thesis, Università di Granada, 350 pp.
- CALAFORRA J.M., FORTI P. 1999 *Le concrezioni all'interno delle grotte in gesso possono essere utilizzate come indicatori paleoclimatici?* *Speleologia Emiliana*, s.IV n.10, p.10-18
- CUCCHI F., FORTI P., FINOCCHIARO F. 1998 *Gypsum degradation in Italy with respect to climatic, textural and erosional conditions*. *Geogr. Fis e Dinam. Quat. Suppl. III*, t.4, p.41-49
- FORD D. 1997 *Dating and Paleo-environmental studies of Speleothems* In HILL C.A. & FORTI P. "Cave Minerals of the World", Nat. Spel. Soc. Huntsville, p.271-284
- FORTI P. 1999 *Evidencias tectónicas y sísmicas a partir del estudio de espeleotemas: conocimiento actual y desarrollo futuro*. *Int. Symp. Cueva de Nerja*, p. 19-33
- FORTI P. 2000 *I depositi chimici delle grotte*. Società Speleologica Italiana, Quaderno Didattico n.7, in stampa
- FORTI P. & POSTPISCHL D., 1986 *May the growth axes of stalagmites be considered as recorders of historic and prehistoric earthquakes? Preliminary results from the Bologna karst area*. *Int. Symp. Engineering problems in seismic areas*, Bari, v.1: 183-193
- FORTI P., RABBI E. 1981 *The role of CO₂ in gypsum speleogenesis: I° contribution* *Int.J. of Speleol.* 11: 207-218
- FRANKE H.W. 1965 *The theory behind stalagmite shapes*. *Studies in Speleology* 1(2-3) p. 89-95
- GOSPODARICH R., 1977 - *Collapsing of speleothems in Postojna cave system*. *Proc. 7th Int. Spel. Congress, Sheffield* : 223-240.
- HILL C.A., FORTI P., 1997 *Cave Minerals of the World* Nat. Spel. Soc. Huntsville, 464 pp
- QUINIF Y. (Editor) 1998 *Karst & Tectonics*. *Speleochronos*, hors serie 199 pp