

Ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali da concrezioni di grotta

Andrea BORSATO^{1*} & Paolo FORTI²

¹Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, I-38100 Trento

²Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 67, I-40127 Bologna

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: borsato@mtsn.tn.it

RIASSUNTO - *Ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali da concrezioni di grotta* - Negli ultimi anni gli speleotemi (concrezioni di grotta) vengono sempre più utilizzati per ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali. Le concrezioni, e in particolare le stalagmiti, sono in grado di registrare con precisione e dettaglio, talora con risoluzione annuale o addirittura sub-mensile, i cambiamenti del clima e dell'ambiente durante gli ultimi 500 ka. I requisiti indispensabili per ogni ricostruzione da speleotemi sono il monitoraggio ambientale, che definisce l'ambiente di formazione attuale delle concrezioni, e datazioni radiometriche che ne precisino l'esatta cronologia. Tra le applicazioni più importanti vi sono studi sulla morfologia esterna e interna, e sulla composizione mineralogica e tessiturale, che danno indicazioni sulle variazioni di alimentazione e possono essere utilizzate per studi sulla paleosismicità, e per ricostruire variazioni di livelli freatici (marini o del livello locale). L'analisi chimica delle concrezioni dà indicazioni sul chimismo delle acque meteoriche, sulla stagionalità, nonché su cambiamenti nel sistema di alimentazione. L'applicazione più importante è invece l'analisi della composizione isotopica della calcite e delle inclusioni fluide presenti negli speleotemi, da cui si possono ricostruire variazioni di temperatura e di piovosità, indicare la provenienza dei fronti nuvolosi, ricostruire la copertura vegetazionale e le variazioni nell'attività solare.

SUMMARY - *Palaeoclimate and palaeoenvironmental reconstruction from speleothems* - During the past two decades, speleothems have become a well established archive of palaeoclimate and palaeoenvironmental reconstructions. Speleothems, and particularly stalagmites, encode precisely and with great resolution (sometimes better than 1 month resolution) climatic and environmental changes that occurred within the last 500 ka. Necessary prerequisites for any palaeoclimate and palaeoenvironmental reconstruction from speleothem are a good knowledge of the cave-environment through monitoring and the radiometric dating that fix the exact chronology. The morphology (external shape and internal microstratigraphy) of speleothems provides informations on water availability, mineralogical and textural composition changes are aridity indicators, and deviations from the growth axis as well as ruptures may provide evidence of past earthquakes. Trace element composition relates the chemistry of speleothems to that of the drip water as well as to changes in the water feeding-system. One of the most important proxy data extracted from speleothems are stable isotope ratio changes in both speleothems carbonate and fluid inclusions, from which it is possible to reconstruct temperature and rainfall changes, as well as changes in the storm-track trajectories and in the vegetation cover and soil activity.

Parole chiave: grotte naturali, speleotemi, stalagmiti, paleoclima, paleosismicità

Key words: natural cavities, speleothems, stalagmites, palaeoclimate, palaeoseismicity

1. INTRODUZIONE

Gli ambienti sotterranei sono certamente tra i più importanti laboratori naturali in cui si possono svolgere studi e ricerche che, in alcuni casi, non potrebbero essere effettuati in nessun altro luogo. Infatti, le grotte hanno caratteristiche peculiari che le rendono insostituibili dal punto di vista scientifico, quali l'assenza totale di luce e le variazioni minime o nulle di tutti gli altri parametri ambientali (tempera-

tura, umidità relativa ecc.). Inoltre, le cavità naturali sono ambienti molto stabili che possono funzionare da "trappole di accumulo" e conservare concrezioni e sedimenti per un lasso di tempo molto lungo. Le scienze della terra, naturalmente, sono nel loro complesso le discipline scientifiche che maggiormente utilizzano le cavità naturali nelle loro ricerche, ma in pratica non vi è branca delle scienze che non tragga informazioni utili e spesso esclusive dal mondo ipogeo (Tab. 1).

Disciplina	Campi di interesse	
Archeologia	reperti, graffiti, dipinti	
Biologia	adattamenti, strategie, ecosistemi, microbiologia	
Fisica	meteorologia, climatologia	
Ingegneria	grandi vuoti, stoccaggi, grotte turistiche	
Medicina	speleoterapia, psicologia, psichiatria	
Scienze della Terra	Geomorfologia	carsismo, speleogenesi, paleoambienti
	Geofisica	maree terrestri
	Geochimica	elementi maggiori e in traccia
	Geologia marina	variazioni livello del mare
	Geologia strutturale	elementi strutturali, neotettonica
	Idrogeologia	acquiferi carsici, dissoluzione carsica
	Mineralogia	minerogenesi, processi a bassa entalpia
	Paleoclimatologia	isotopi stabili, datazioni radiometriche
	Paleontologia	tane, trappole di accumulo
	Sedimentologia	sedimenti fisici, concrezionamento
Stratigrafia	sequenze stratigrafiche	
Vulcanologia	morfologie delle colate, struttura vulcanica profonda	

Tab. 1- Principali discipline per cui la ricerca speleologica è fondamentale.

Tab. 1 - Research fields for which speleology is fundamental.

Visto il loro numero, comunque, non è possibile descrivere in maniera anche succinta tutti i campi delle scienze della terra in cui le grotte sono utilizzate dal punto di vista scientifico. Si è ritenuto pertanto di accennare a grandi linee solo ai più importanti filoni di ricerca che utilizzano le concrezioni di grotta nell'ambito delle ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali.

Tra i materiali fisici più comunemente accumulati in grotta ricordiamo: sedimenti (fluviali, marini, vulcanici ecc.), materiale organico (frammenti di piante e/o animali, spore ecc.) e reperti archeologici;

i depositi chimici invece vengono di solito suddivisi in concrezionamenti (carbonatici, gessosi ecc.) e mineralizzazioni (Hill & Forti 1997).

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. In molti casi essi rappresentano 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 (calcite e aragonite) 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.

2. LE CONCREZIONI DI GROTTA E LE RICOSTRUZIONI PALEOCLIMATICHE E PALEOAMBIENTALI

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

- morfologia (esterna e interna: microstratigrafia)
- composizione mineralogica e tessiturale
- composizione chimica (elementi maggiori e in traccia)
- composizione delle inclusioni solide o fluide
- composizione isotopica
- fluorescenza e luminescenza (vedi Shopov 2005).

Inoltre, per inquadrare precisamente il contesto spazio-temporale, qualsiasi ricostruzione paleoclimatica o paleoambientale da concrezioni di grotta necessita di un monitoraggio ambientale che definisca l'ambiente di formazione attuale delle concrezioni, e di datazioni radiometriche che ne precisino l'esatta cronologia (vedi § 4).

Molto spesso la sola presenza di concrezioni è di per sé un dato di estremo interesse per la ricostruzione paleoambientale. Ad esempio Atkinson & Rowe (1992) hanno utilizzato datazioni U/Th per studiare la velocità del sollevamento eustatico regionale e per stimare la velocità di incisione valliva. Similmente, la datazione radiometrica di concrezioni vadose sommerse o di concrezioni di ambiente freatico ora al di sopra del livello marino, permettono di ricostruire con precisione le oscillazioni del livello del mare negli ultimi 500.000

anni (Antonioli *et al.* 1998; Bard *et al.* 2002; Vesica *et al.* 2000). Per un approfondimento di quest'ultimo argomento si rimanda ad Antonioli (2005).

2.1. La morfologia esterna delle stalagmiti

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 (Curl 1973).

È 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

π = 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 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, a sinistra). 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.1, a destra).

Una trattazione aggiornata di questo argomento si trova nel recente articolo di Kaufmann (2003) che, nel dimostrare come la crescita delle stalagmiti dipenda fortemente da temperatura e quantità di CO₂ presente nel suolo, discute i problemi relativi alla cinetica di dissoluzione e precipitazione della calcite in sistema chiuso e aperto.

2.2. Composizione mineralogica e tessiturale delle concrezioni

Una variazione del clima può anche influenzare la natura stessa del minerale che precipita in grotta. Tale processo è particolarmente evidente nelle grotte

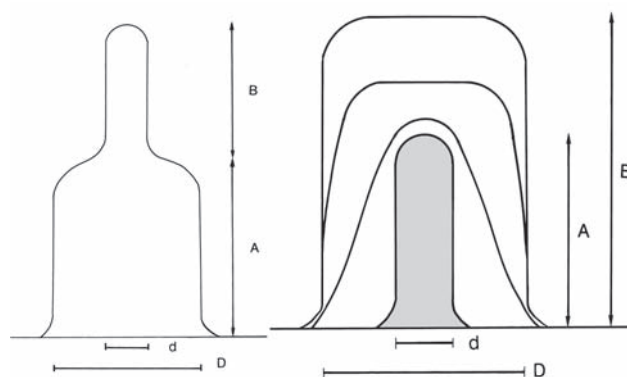


Fig. 1 - A sinistra: forma caratteristica di una stalagmite che ha subito una diminuzione permanente nella quantità di acqua di alimentazione: tale diminuzione si riflette sul suo diametro che è passato da D a d (A: periodo di alta alimentazione; B: periodo di bassa alimentazione).

A destra: 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 (modificato da Forti 2002).

Fig. 1 - Left side: characteristic shape of a stalagmite which underwent a permanent lowering in feeding water: as a consequence, its diameter lowered from D to d (A: being the period of high dripping; B: that of low dripping). Right side: the permanent increase in feeding water causes a corresponding increase in stalagmite diameter (from d to D); this change is not directly visible because the stalagmite with the smaller diameter (A) is trapped inside the larger one (B). Therefore it is necessary to cut the stalagmite along a vertical plane to display this variation (after Forti 2002, modified).

in gesso ove spesso coesistono concrezioni 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. All'interno di una grotta in gesso, quindi, la presenza esclusiva di speleotemi di calcite o di gesso o la prevalenza di uno di essi dipende dalla maggior efficienza di uno dei due meccanismi genetici.

La deposizione di gesso, essendo controllata dall'evaporazione, sarà maggiore in aree aride e calde: infatti, il massimo sviluppo è stato osservati nei de-

serti del Nuovo Messico (USA) e di Sorbas in Spagna, ma anche in tutta l'area dell'Africa Settentrionale. In queste zone, caratterizzate da vegetazione scarsa o assente, il basso contenuto in CO_2 nelle acque di infiltrazione inibisce la dissoluzione incongruente, con conseguente scarsità o assenza di speleotemi calcitici. Al contrario, la formazione di calcite richiede la presenza di vegetazione ben sviluppata 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 non troppo rigido. In effetti i più vasti concrezionamenti calcitici sono stati osservati in Europa continentale, Italia del nord, e Cuba.

In pratica, quindi, è il clima che permette al gesso o alla calcite di divenire il deposito dominante di una grotta in gesso, e se si osservano cambiamenti improvvisi nel concrezionamento (da calcite dominante a gesso dominante o viceversa) oppure l'interruzione del concrezionamento è ragionevole supporre che il clima dell'area ove si sviluppa la grotta sia cambiato nel tempo. Sulla base delle attuali conoscenze, quindi, è possibile tracciare un quadro generale delle modificazioni che una variazione del clima induce sui depositi chimici di una grotta in gesso (Fig. 2).

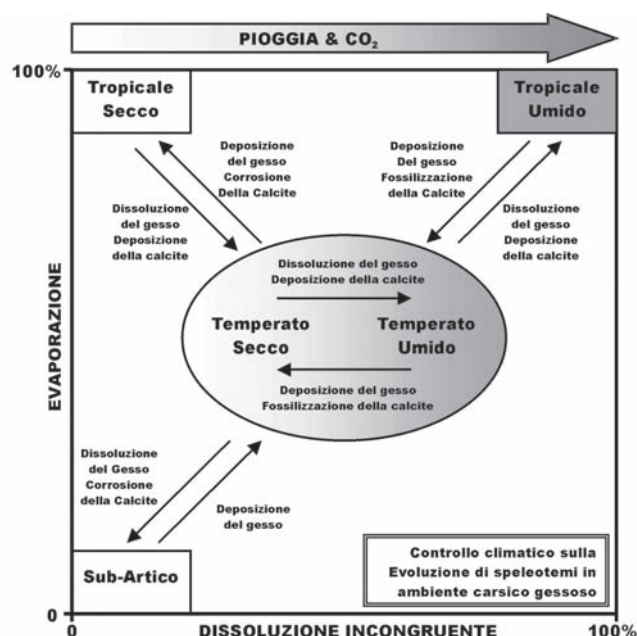


Fig. 2 - Schema delle variazioni indotte nel concrezionamento all'interno di grotte in gesso in funzione dell'efficienza relativa dell'evaporazione e della dissoluzione incongruente, con indicazione delle aree caratteristiche dei principali climi della terra (da Calaforra & Forti 1999, modificato).

Fig. 2 - Expected trends in speleothem evolution within gypsum karst as a consequence of relative efficiency of evaporation toward incongruent dissolution in the different climatic zones of the world (after Calaforra & Forti 1999, modified).

Si può quindi affermare che l'analisi mineralogica delle concrezioni nelle grotte in gesso è un metodo efficace negli studi paleoclimatici, sebbene l'applicazione di questa metodologia sia limitata agli ultimi 100.000 anni, intervallo temporale medio per la conservazione dei fenomeni carsici in gesso (Cucchi *et al.* 1998).

Anche nelle grotte in dolomia esistono variazioni nella composizione mineralogica delle concrezioni che possono permettere di risalire, pur con maggiore difficoltà, alle variazioni climatiche. L'alternanza di calcite e di aragonite, le due forme più comuni di carbonato di calcio, può essere infatti indice di variazione dei parametri esterni, in quanto si osserva la formazione di calcite quando il processo prevalente è la diffusione della CO_2 , corrispondente a periodi di clima temperato o caldo umido, mentre l'aragonite diviene dominante quando l'evaporazione, conseguente ad un periodo di clima più arido, è il processo principale (Railsback *et al.* 1994; Hill & Forti 1997; Frisia *et al.* 2002).

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 (inomogeneità della roccia, presenza di ioni estranei, correnti o stratificazioni d'aria di grotta, etc.) che possono portare al medesimo risultato (Hill & Forti 1997).

Ricordiamo, infine, che il significato ambientale delle differenti tessiture della calcite (colonnare, aciculare, microcristallina, dendritica) sono discusse in Frisia *et al.* 2002 e Frisia 2005a.

2.3. La composizione chimica delle concrezioni

Lo studio della composizione chimica delle concrezioni di grotta, sebbene intrapreso già negli anni '80 (Gascoyne 1992), ha avuto una forte accelerazione dalla fine degli anni '90 grazie all'introduzione di tecniche analitiche di alta risoluzione come il SIMS (secondary ionization mass spectrometry: Roberts *et al.* 1998; Huang *et al.* 2001; Baldini *et al.* 2002) e lo XRF (X-ray fluorescence spectrometry: Frisia *et al.* 2003a, 2003b, 2004) che permettono di ottenere una risoluzione spaziale fino a 1 μm . Vengono analizzati elementi maggiori quali Mg, Sr e Ba, o meglio il rapporto molare Mg/Ca, Sr/Ca, e Ba/Ca, che, a seconda della situazione ambientale e climatica della grotta e della concrezione studiata, danno indicazioni sulle variazioni di temperatura e/o idrologiche a scala stagionale (Roberts *et al.* 1998; Fairchild *et al.* 2000; Finch *et al.* 2001; Huang *et al.* 2001; Baldini *et al.* 2002; Treble *et al.* 2003) (Fig. 3).

Elementi in traccia quali Br, Fe, Na, P, S, U e Zn (Treble *et al.* 2003; Frisia *et al.* 2003a, 2004) vengono analizzati in particolare in stalagmiti a laminazione annuale, in cui è possibile datare con precisione ciascuna lamina di accrescimento, oltre che distinguere, in base alla struttura delle laminazioni, il succedersi

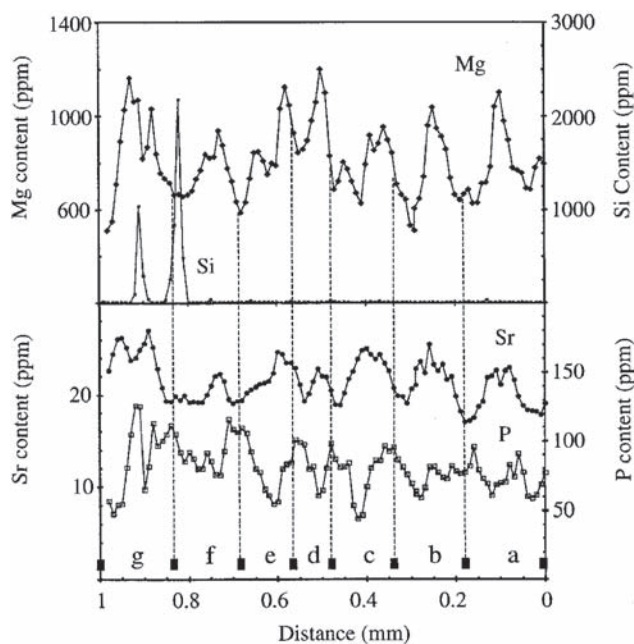


Fig. 3 - Variazione degli elementi in traccia nella stalagmite ER76 (Grotta di Ernesto, Trentino). Le linee tratteggiate evidenziano la posizione approssimativa dei livelli ricchi di inclusioni che evidenziano la laminazione annuale (Huang *et al.* 2001).

Fig. 3 - Trace element variations in the ER76 stalagmite (Grotta di Ernesto, Trentino). Small bars are approximate positions of inclusion-rich layers that identified the annual lamination (Huang *et al.* 2001).

delle stagioni nel corso dell'anno. In queste concrezioni la distribuzione dei microelementi, come degli elementi maggiori, ha una tipica struttura sinusoidale a frequenza annuale (Robert *et al.* 1998; Huang *et al.* 2001; Treble *et al.* 2003; Frisia *et al.* 2003a, 2003b), che permette di ricostruire variazioni idrologiche a scala stagionale o registrare con precisione la variazione a scala secolare di aerosol atmosferici quali lo zolfo (Frisia *et al.* 2004).

2.4. Le inclusioni e i paleoclimi

Tutte le concrezioni, mentre si accrescono, inglobano all'interno della loro struttura vari tipi di "impurezze" quali minerali in traccia, frammenti di roccia trasportati in sospensione, polvere portata dalle correnti d'aria, materiale organico, spore e 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 molto utili i pollini e le inclusioni fluide.

I pollini, incapsulati nelle bande di accrescimento delle concrezioni, si conservano praticamente inalterati e possono quindi servire per definire le associazioni

floristiche di volta in volta presenti sul territorio in cui si apre la grotta (Bastin 1979; Bastin & Gewelt 1986). Queste associazioni, mettendo in evidenza la prevalenza nel tempo di differenti associazioni vegetali, permettono poi di ricostruire con precisione l'avvicinarsi di periodi freddi/caldi o aridi/umidi, fornendo indicazioni sull'evoluzione ambientale dell'area.

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 (Matthews *et al.* 2000).

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 dall'altro può anche permettere di quantificare la temperatura (McGarry *et al.* 2004). Infatti, 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.

2.5. La composizione isotopica degli speleotemi

Negli ultimi vent'anni lo studio delle variazioni della composizione degli isotopi stabili (ossigeno e carbonio) degli speleotemi ha assunto un'importanza via via crescente e i numerosi articoli sulle maggiori riviste internazionali ne testimoniano l'enorme potenzialità (Gascoyne 1992; Dorale *et al.* 1992; Wang *et al.* 2001; Richards & Dorale 2003; Fleitmann *et al.* 2003). In un articolo di sintesi McDermott (2004) delinea lo stato attuale delle conoscenze.

Data l'importanza, l'argomento viene sviluppato in un altro articolo (Frisia 2005b), ma a titolo di esempio riportiamo una sintesi di due serie isotopiche ad alta risoluzione pubblicate di recente (Fig. 4).

Anche gli isotopi radiogenici, e in particolare gli isotopi dello stronzio e dell'uranio (Kaufman *et al.* 1998), trovano applicazione nelle ricostruzioni paleoclimatiche da speleotemi, sebbene, dato il costo elevato delle analisi, gli esempi pubblicati fino ad oggi si limitino a serie a bassa risoluzione.

3. SPELEOTEMI, PALEOSISMICITÀ E RISCHIO SISMICO

Un importante campo di studio delle concrezioni di grotta, e in particolare delle stalagmiti, è quello delle ricostruzioni paleosismiche (Forti 1999), le

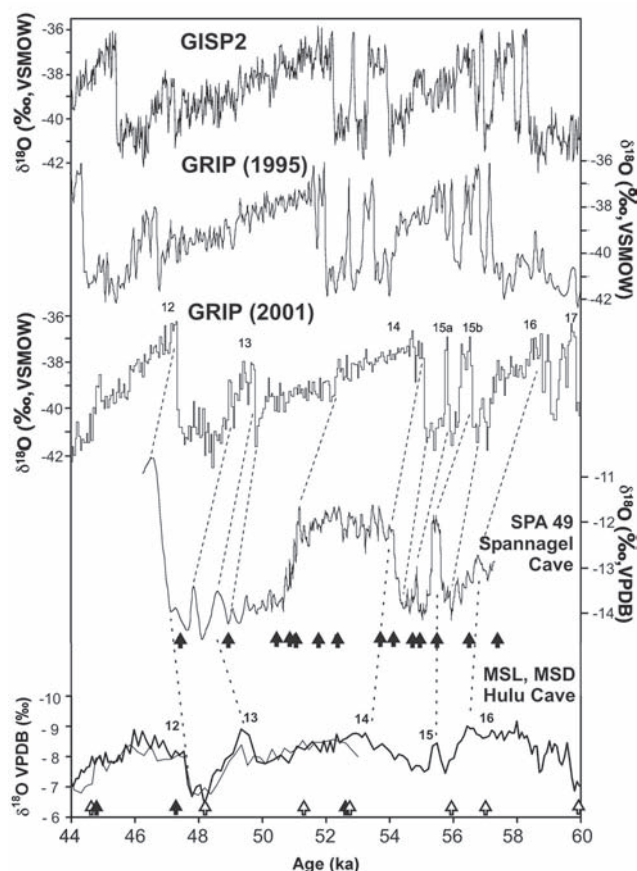


Fig. 4 - Confronto tra record del $\delta^{18}\text{O}$ di speleotemi (Hulu Cave, China: Wang *et al.* 2001; Spannagel Cave, Austria: Spötl & Mangini 2002) datati tramite TAMS U-Th (freccie in basso) e carote di ghiaccio della Groenlandia (Grootes *et al.* 1993; Johnsen *et al.* 1995; Johnsen *et al.* 2001) durante l'ultimo ciclo glaciale. I numeri si riferiscono agli eventi Dansgaard-Oeschger (D-O) nelle carote di ghiaccio. Notare la scala inversa per la stalagmite di Hulu Cave (figura da Richards & Dorale 2003).

Fig. 4 - Comparison between last glacial period $\delta^{18}\text{O}$ records from speleothems (Hulu Cave, China: Wang *et al.* 2001; Spannagel Cave, Austria: Spötl & Mangini 2002) based on TAMS U-Th ages (shown by arrows) and Greenland ice cores (Grootes *et al.* 1993; Johnsen *et al.* 1995; Johnsen *et al.* 2001). Numbers refer to Dansgaard-Oeschger (D-O) events in ice cores. Note the inverse scale of Hulu Cave stalagmite (figure from Richards & Dorale 2003).

quali rivestono un'importanza anche applicativa, permettendo una definizione del rischio sismico su un intervallo di tempo molto maggiore (500.000 anni) di quanto possa fare la sismologia storica (massimo 2000 anni).

Attualmente è in genere accettato che lo studio delle concrezioni di grotta sia un potente mezzo per:

- 1) la localizzazione degli epicentri dei grandi terremoti del passato;

- 2) la datazione relativa e assoluta degli stessi (fino a 500.000 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. Prima di procedere nelle analisi sismotettoniche bisogna accertare che le rotture siano realmente conseguenze di terremoti, e quindi bisogna discriminare quelle causate da fattori non sismici. Tra questi, i più comuni sono l'eccessivo peso di stalattiti e drappaggi, e lo scivolamento di speleotemi sviluppatasi sopra un substrato di materiale plastico (argilla) o incoerente (sabbia, ciottoli). Inoltre, in alcune aree centro-europee, molti crolli di concrezioni sono dovuti al lento movimento di lingue di ghiaccio che avevano completamente riempito la cavità durante i periodi glaciali. Infine, rotture e crolli possono dipendere da fattori antropici, in quanto la frequentazione umana delle grotte comporta spesso rotture di speleotemi.

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

Vi sono comunque alcune tipologie di crollo che possono essere immediatamente correlate a fenomeni sismotettonici (Fig. 5), e tra queste le più caratteristiche e comuni sono le fratture lungo un piano suborizzontale di grandi stalagmiti, che in alcuni casi non portano 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 alle vibrazioni ad alta frequenza collegate alle onde sismiche, che possono indurre la rottura per risonanza di stalagmiti o stalattiti lungo piani suborizzontali. In alcuni casi, le stalagmiti rotte per risonanza permettono di 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 più accurati possono essere ricavati dalle lamine di accrescimento di stalagmiti non fratturate o crollate, che possono registrare variazioni progressive o istantanee nell'asse di accrescimento. 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 dello speleotema, ecc.), che possono essere discriminati attraverso l'analisi statistica.

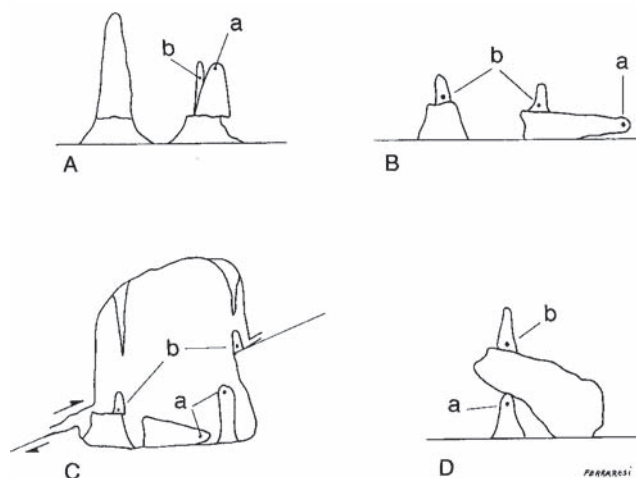


Fig. 5 - Caratteristiche rotture di concrezioni indotte da eventi sismici. Rottura di una stalagmite lungo un piano orizzontale a causa della risonanza indotta da onde sismiche: (A) la parte superiore della stalagmite è rimasta appoggiata sulla parte inferiore, avendo subito solo una piccola traslazione 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 (Forti 1999).

Fig. 5 - Characteristic breakages of speleothems induced by seismic stress. Resonance induced stalagmite cut along a sub-horizontal plane: (A) the upper part is still standing over its base, being only slightly translated and/or rotated from its original position. (B) the broken part lies on the floor close to its base. (C) Stalagmite collapse cause by the displacement of the adjacent wall. (D) New stalagmite growing over a fallen rock, which covered an older stalagmite. Positions (a) and (b) indicate characteristic sampling points for absolute dating of deposits which occurred just before (a) or after (b) the seismic event (Forti 1999).

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

Certamente, il risolto 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. È 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 gene-

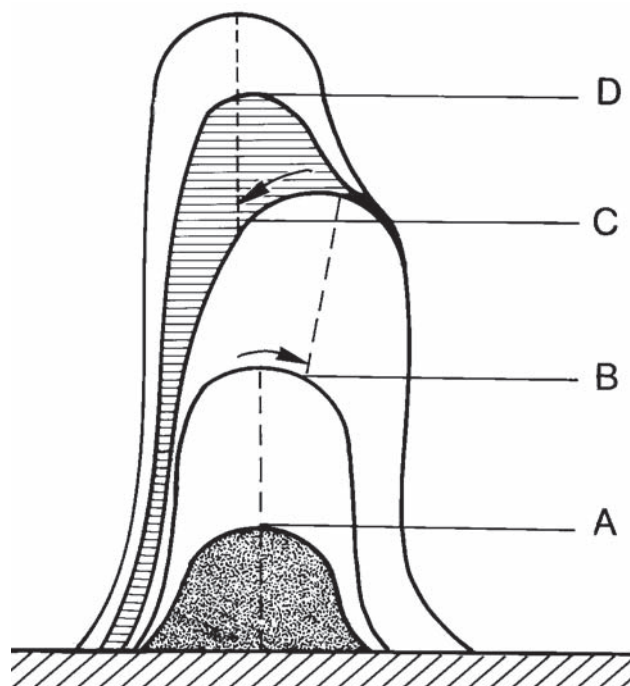


Fig. 6 - Improvvisi cambi di chimismo evidenziati da variazioni di colore o di tessitura delle bande di accrescimento o improvvisi cambi nella verticalità dell'asse delle stalagmiti possono essere indice di fenomeni sismici (Forti 1999).

Fig. 6 - Sudden changes in chemical composition and/or texture of the growing layers and in verticality of the stalagmite growing axis may be the consequence of seismic stresses (Forti 1999).

ralmente sottostimato. Gli studi sugli speleotemi permettono invece di riconoscere i grandi paleosismi e di datarli sino al limite di 500 ka: ora è logico ritenere che un simile intervallo cronologico sia stato sufficiente perché la struttura sismogenetica abbia generato il massimo dei terremoti possibile.

4. METODI DI DATAZIONE DELLE CONCREZIONI

La tecnica più usata nelle datazioni radiometriche degli speleotemi utilizza la serie di disequilibrio degli isotopi dell'uranio ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U e può essere applicata da poche centinaia di anni fino a circa 500 ka (Edwards *et al.* 1987). I requisiti per l'applicazione del metodo e gli approcci per la correzione dovuta alla presenza di torio detritico sono discusse in Tuccimei & Borsato (2005). Un'analisi critica delle recenti innovazioni tecnologiche in questo campo, e in particolare le nuove tecniche di spettrometria di massa che permettono l'utilizzo di soli 10-500 mg di calcite, sono descritte in Goldstein & Stirling (2003), mentre Richards & Dorale (2003) sintetizzano le applicazioni in campo ambientale delle datazioni della serie dell'uranio agli speleotemi.

Altre tecniche radiometriche sono la serie ^{231}Pa - ^{235}U , applicabile nell'intervallo 0-200 ka (Edwards *et al.* 1997), e quella U-Pb, utilizzabile per speleotemi più vecchi di 500 ka con alto contenuto in U e basso tenore di Pb (Richards *et al.* 1998). Entrambi i metodi hanno però, al momento attuale, scarsa applicazione. Per campioni recenti (età inferiore a 50 ka) anche la tecnica del ^{14}C è stata utilizzata, sebbene il problema di determinare la percentuale di carbonio morto nella calcite ne comprometta seriamente la precisione. Per speleotemi più vecchi del limite del metodo U/Th (500 ka), datazioni a bassa precisione si possono ottenere con metodi paleomagnetici, *electron-spin resonance* (Grün 1989) e il disequilibrio $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Ludwig *et al.* 1992).

Va infine ricordato che la struttura laminata di molte concrezioni permette una ricostruzione cronologica "relativa" degli eventi corrispondenti a ogni singola banda di accrescimento e, nel caso di laminazioni annuali, consente di datare con precisione gli speleotemi contandone le singole lamine (Frisia *et al.* 2003).

RINGRAZIAMENTI

Ricerca eseguita nell'ambito del programma COFIN 2000 "Ricostruzione dell'evoluzione climatica e ambientale ad alta risoluzione da concrezioni di grotta lungo una traversa N-S in Italia con particolare riferimento all'intervallo Tardiglaciale-attuale", coordinato dal Prof. U. Sauro.

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.*, 2, 5: 97-104.
- Antonoli, F., 2005 - Variazioni del livello del mare nell'ultimo semiciclo glaciale ottenute da speleotemi in grotte sommerse di aree costiere italiane (in questo volume).
- Antonoli F., Borsato A., Frisia S. & Silenzi S., 1998 - L'uso degli speleotemi per ricostruzioni paleoclimatiche e variazioni del livello del mare. *Il Quaternario - Italian Journal of Quaternary Sciences*, 11 (1): 67-78.
- Atkinson T.C. & Rowe P.J., 1992 - Applications of dating to denudation chronology and landscape evolution. In: Ivanovich M. & Harmon R.S. (eds), *Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*. Oxford University Press, Oxford: 669-703.
- Baldini J., McDermott F. & Fairchild I.J., 2002 - Structure of the 8200-year Cold Event revealed by a speleothem trace element record. *Science*, 296: 2203-2206.
- Bard E., Antonoli F. & Silenzi S., 2002 - Sea-level during the penultimate interglacial period based on submerged stalagmite from Argentarola Cave (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 196/3-4: 135-146.
- Bastin B., 1979 - L'analyse pollinique des stalagmites. *Ann. Soc. Geol. Belgique*, 101: 13-19.
- Bastin B. & Gewalt M., 1986 - Analyse pollinique et datation ^{14}C des concrections stalagmitiques Holocenes: Apports complementaires des deux methods. *Geographie Physique et Quaternaire*, 40: 185-196.
- Calaforra J.M., 1996 - *Contribucion al conocimiento de la karstologia de yesos*. PhD. Thesis, Università di Granada: 384 pp.
- Calaforra J.M. & Forti P., 1999 - Le concrezioni all'interno delle grotte in gesso possono essere utilizzate come indicatori paleoclimatici?, *Speleologia Emiliana*, IV, 10: 10-18.
- Cocchi 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, 4: 41-49.
- Curl R.L., 1973 - Minimum diameter stalagmites. *Nation. Speleol. Soc. Bull.*, 35: 1-9.
- Dorale J.A., González L.A., Reagan M.K., Pickett D.A., Murrell M.T. & Baker R.G., 1992 - A high resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water Cave, Northeast Iowa. *Science*, 258: 1626-1630.
- Edwards R.L., Chen J.H. & Wasserburg G.J., 1987 - ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics and the precise measurements of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81: 175-192.
- Edwards R.L., Cheng H., Murrell M.T. & Goldstein S.J., 1997 - Protactinium-231 dating of carbonates by thermal ionization mass spectrometry: Implications for Quaternary climate change. *Science*, 276: 782-786.
- Fairchild I.J., Baker A., Borsato A., Frisia S., Hinton R.W., McDermott F. & Tooth A.F., 2001 - Annual to sub-annual resolution of multiple trace-element trends in speleothems. *Journal of the Geological Society*, 158: 831-841.
- Finch A.A., Shaw P.A., Weedon G.P. & Holmgren K., 2001 - Trace element variation in speleothem aragonite: potential for palaeoenvironmental reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 186: 255-267.
- Fleitmann D., Burns S., Mudelsee M., Neff U., Kramers J., Mangini A. & Matter A., 2003 - Holocene forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 300: 1737-1739.
- Forti P., 1999 - Evidencias tectónicas y sísmicas a partir del estudio de espeleotemas: conocimiento actual y desarrollo futuro. *Int. Symp. Cueva de Nerja*: 19-33.
- Forti P., 2002 - *I depositi chimici delle grotte*. Società Speleologica Italiana, Quaderno Didattico n. 7: 36 pp.
- Forti P. & Rabbi E., 1981 - The role of CO_2 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): 89-95.
- Frisia S., 2005a - Le tessiture negli speleotemi (in questo volume).

- Frisia S., 2005b - Gli isotopi stabili negli speleotemi (in questo volume).
- Frisia S., Borsato A., Fairchild I.J. & Selmo E.M., 2002 - Aragonite to calcite transformation in speleothems (Grotte de Clamouse, France): environment, fabrics and carbonate geochemistry. *Journal of Sedimentary Research*, 72 (5): 687-699.
- Frisia S., Borsato A., Somogyi A. & Susini J., 2003a - Synchrotron X-ray fluorescence analysis of annually laminated Alpine stalagmites. Climatic Change: The Karst Record III, Montpellier (France), May 2003. Abstract volume: 73 pp.
- Frisia S., Borsato A., Preto N. & McDermott F., 2003b - Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 411-424.
- Frisia S., Borsato A., Susini J. & Fairchild I.J., 2004 - Sulphate in speleothems records atmospheric sulphate variability. *Geochemica Cosmochimica Acta*, 68, 115: A481.
- Gascoyne M., 1992 - Paleoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Reviews*, 11: 609-632.
- Goldstein S.J. & Stirling C.H., 2003 - Techniques for measuring Uranium-series nuclides: 1992-2002. In: Bourdon B., Henderson G.M., Lundstrom C.C. & Turner S.P. (eds), Uranium-series geochemistry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 52: 23-57.
- Gospodarich R., 1977 - *Collapsing of speleothems in Postojna cave system*. Proc. 7th Int. Spel. Congress, Sheffield: 223-240.
- Grootes P.M., Stuiver M., White J.W.C., Johnsen S. & Jouzel J.J., 1993 - Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 366: 552-554.
- Hill C.A. & Forti P., 1997 - *Cave Minerals of the World*. Nat. Spel. Soc., Huntsville: 484 pp.
- Huang Y., Fairchild I.J., Borsato A., Frisia S., Cassidy N.J., McDermott F. & Hawkesworth C.J., 2001 - Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy). *Chemical Geology*, 175: 429-448.
- Johnsen S.J., Dahl-Jensen D., Dansgaard W. & Gundestrup N., 1995 - Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profile. *Tellus*, 47B: 624-629.
- Johnsen S.J., Dahl-Jensen D., Gundestrup N., Steffensen J.P., Clausen H.B., Miller H., Masson-Delmotte V., Sveinbjörnsdóttir A.E. & White J., 2001 - Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journal of Quaternary Science*, 16: 299-307.
- Kaufmann G., 2003 - Stalagmite growth and palaeoclimate: the numerical perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 214: 251-266.
- Kaufman A., Wasserburg G.J., Porcelli D., Bar-Matthews M., Ayalon A. & Halicz L. 1998 - U-Th isotope systematics and U-series ages of speleothems from Soreq Cave, Israel and climatic correlations. *Earth and Planetary Science Letters*, 156: 141-155.
- Matthews A., Ayalon A. & Bar-Matthews M., 2000 - D/H ratios of fluid inclusions of Soreq Cave (Israel) speleothems as a guide to the eastern Mediterranean Meteoric Line relationship in the last 120 ky. *Chemical Geology*, 166: 183-191.
- McDermott F., 2004 - Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23: 901-918.
- McGarry S., Bar-Matthews M., Matthews A., Vaks A., Schilman B. & Ayalon A., 2004 - Constraints on hydrological and paleotemperature variations in the eastern Mediterranean region in the last 140 ka given by the dD values of speleothem fluid inclusions. *Quaternary Science Reviews*, 23: 919-934.
- Railsback L.B., Brook G.A., Chen J., Kalin R. & Fleisher C.J., 1994 - Environmental controls on the petrology of a late Holocene speleothem from Botswana with annual layer of aragonite and calcite. *Journ. Sedim. Res.*, A64 (1): 140-146.
- Richards D.A., Bottrell S.H., Cliff R.A., Ströhle K. & Rowe P., 1998 - U-Pb dating of a speleothem of Quaternary age. *Geochemica Cosmochimica Acta*, 62: 3683-3688.
- Richards D.A. & Dorale J.A., 2003. Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems. In: Bourdon B., Henderson G.M., Lundstrom C.C. & Turner S.P. (eds), Uranium-series geochemistry. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 52: 407-460.
- Roberts M.S., Smart P.L. & Baker A., 1998 - Annual trace element variations in a Holocene speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 154: 237-246.
- Shopov Y.Y., 2005 - Luminescence of Speleothems (in questo volume).
- Spötl C. & Mangini A., 2002 - Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard-Oeschger events during isotope stage 3: Implications for the absolute chronology of Greenland ice cores. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 507-518.
- Treble P., Shelley J.M.G. & Chappell J., 2003 - Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 141-153.
- Tuccimei P. & Borsato A., 2004 - Il metodo ²³⁰Th/²³⁴U applicato alla datazione di speleotemi. Evoluzione delle tecniche analitiche (in questo volume).
- Vesica P., Tuccimei P., Turi B., Fornós J.J., Ginés J. & Ginés A., 2000 - Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems. *Quaternary Sciences Review*, 19/9: 865-879.
- Wang Y.G., Cheng H., Edwards R.L., An Z.S., Wu J.Y., Shen C.C. & Dorale J.A., 2001 - A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294: 2345-2348.