

Ricostruzione climatica dell'Olocene-Pleistocene superiore da una stalagmite del sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Gola di Frasassi, Ancona, Italia)

Paola TUCCIMEI^{1*}, Andrea BORSATO², Paolo FORTI³, Silvia FRISIA², Mauro PALADINI⁴,
Leonardo PICCINI⁴, Roberto SALZANO¹ & Ugo SAURO⁵

¹Dipartimento di Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", L.go S.L. Murialdo 1, I-00146 Roma

²Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, I-38100 Trento

³Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 67, I-40127 Bologna

⁴Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Via La Pira 4, I-50121 Firenze

⁵Dipartimento di Geografia, Università di Padova, Via del Santo 26, I-35123 Padova

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: tuccimei@uniroma3.it

RIASSUNTO - Ricostruzione climatica dell'Olocene-Pleistocene superiore da una stalagmite del sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Gola di Frasassi, Ancona, Italia) - Sulla parte più recente (72 cm) di una carota assiale estratta da una grossa stalagmite ancora in formazione nel sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Gola di Frasassi, Ancona) sono state effettuate datazioni col metodo MC-ICPMS U/Th, analisi isotopiche di O e C e uno studio petrografico. La parte più antica della carota (da 104 a 72 cm dal top), caratterizzata da elevata porosità e tracce di dissoluzione, non è stata analizzata. L'analisi petrografia ha rivelato che la stalagmite è costituita quasi interamente da calcite "colonnare allungata". A 11 mm dalla sommità della concrezione, si osserva un marcato passaggio tessiturale da colonnare allungata (sotto) a dendritica (sopra). Le datazioni hanno permesso di stabilire che lo speleotema ha iniziato a formarsi prima del Dryas Recente, con tasso medio di accrescimento di 227 $\mu\text{m}/\text{anno}$ tra 9,63 \pm 1,06 e 8,84 \pm 0,49 ka e una successiva brusca diminuzione a 51 $\mu\text{m}/\text{anno}$ tra 8,60 \pm 0,34 e 5,35 \pm 0,37, cui fanno seguito tassi di crescita tra 23 e 31 $\mu\text{m}/\text{anno}$ per i restanti 5350 anni. Si nota una tendenza positiva del $\delta^{18}\text{O}$ dall'inizio alla fine del concrezionamento (da -8,0‰ a -7,2‰) interrotto da due singoli picchi negativi a 3,6 ka e 2,0 ka, evidenziati anche nel record del $\delta^{13}\text{C}$. L'andamento del $\delta^{18}\text{O}$ potrebbe rispecchiare un graduale riscaldamento da 12 ka ad oggi, oppure essere legato ad una progressiva diminuzione della piovosità media annua, con conseguente arricchimento nell'isotopo pesante nella zona di evaporazione (Mediterraneo Orientale), analogamente a quanto evidenziato nella Grotta di Soreq (Israele). Il trend generale del profilo del $\delta^{13}\text{C}$ è negativo fino a circa 2 ka (da -5,8‰ a -9,5‰), mentre gli ultimi 2000 anni sono caratterizzati da un aumento del $\delta^{13}\text{C}$ fino al valore attuale di -5,07‰. In particolare, si osserva un arricchimento molto rapido di quasi il 2‰ tra il 1200 e il 1350 AD che riporta i valori medi del $\delta^{13}\text{C}$ a quelli tipici dell'Olocene inferiore e Dryas Recente. Una tendenza verso valori più alti in entrambi i profili isotopici contraddistingue gli ultimi 300-400 anni circa ed è verosimilmente legata ad attività antropiche (deforestazione, trasformazione a pascolo ecc.). Il forte incremento registrato nelle ultime due analisi del record del $\delta^{13}\text{C}$, che si accompagna alla variazione tessiturale prima menzionata, potrebbe testimoniare un aumento nella circolazione dell'aria in grotta a seguito della realizzazione di una galleria artificiale per l'ingresso dei visitatori.

SUMMARY - Late Pleistocene and Holocene climate record from a stalagmite in Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento cave system (Frasassi Gorge, Ancona, Italy) - MC-ICPMS U/Th dating, oxygen and carbon isotopic determinations and petrographic investigations have been performed on the upper portion (72 cm) of a core, axially drilled from a large, actively growing stalagmite in "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" karst system (Frasassi Gorge, Ancona). The younger portion of the core (from 104 to 72 cm from the top), characterised by a relevant porosity with traces of dissolution, has not been analysed. The petrographic study has shown that the stalagmite almost completely consists of "elongated columnar" calcite. At 11 mm from the top there is clear evidence of a marked textural change from "elongated columnar" to dendritic. The stalagmite started to form before the Younger Dryas with an average growing rate of 227 $\mu\text{m}/\text{a}$ between 9.63 \pm 1.06 and 8.84 \pm 0.49 ka and a later abrupt decrease down to 51 $\mu\text{m}/\text{a}$ from 8.60 \pm 0.34 to 5.35 \pm 0.37 ka, followed by rates of 23 and 31 $\mu\text{m}/\text{a}$ for the remaining 5350 years. A positive $\delta^{18}\text{O}$ trend is evident along the axial growth axis of the speleothem (from -8.0‰ to -7.2‰), interrupted by two single negative peaks at 3.6 ka and 2.0 ka, also found in the $\delta^{13}\text{C}$ record. The $\delta^{18}\text{O}$ trend could be connected with a

gradual warming from 12 ka up to the present times, or with a progressive decrease of the average annual precipitation and a consequent enrichment in the heavy isotope in the evaporation area (Eastern Mediterranean), as recorded at Soreq Cave (Israel). The general $\delta^{13}\text{C}$ trend is negative until 2 ka (from -5.8‰ to -9.5‰), whereas the last 2 ka are characterised by an increase of $\delta^{13}\text{C}$ up to the present value of -5.07‰. In particular, a very rapid increase of about 2‰ is evident from 1200 to 1350 AD, reaching the values typical of the Lower Holocene and the Younger Dryas. An increasing trend in both the isotopic records characterises the last 300-400 years and is probably due to anthropic activities. The strong increase measured in the last two $\delta^{13}\text{C}$ analyses, connected with the above mentioned textural change, could testify for an increase of air circulation in the cave triggered by the opening of an artificial tunnel for the entrance of visitors.

Parole chiave: carsismo, Frasassi, speleogenesi, datazioni, speleotemi, isotopi stabili

Key words: karst, Frasassi, speleogenesis, dating, speleothem, stable isotopes

1. INTRODUZIONE

Il sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento", noto al grande pubblico come "Grotte di Frasassi", è senza dubbio il complesso ipogeo più famoso d'Italia. A partire dal 1974, quando i primi 850 metri di sale e gallerie furono aperti alle visite, un interesse sempre crescente è stato manifestato nei suoi confronti da parte di turisti e ricercatori (Rossi 1990; Galdenzi & Menichetti 1990). Numerosi studi sono stati promossi e diretti da un'apposita commissione scientifica, costituita da esperti in varie discipline: biologi, chimici, fisici e geologi (Bertolani & Cigna 1994). Le ricerche più significative sono state pubblicate nel 1990 in una monografia curata da Sandro Galdenzi e Marco Menichetti (Galdenzi & Menichetti 1990), che raccoglie contributi relativi all'assetto geologico-strutturale dell'area, all'evoluzione speleogenetica delle cavità carsiche, alla meteorologia ipogea, alle faune di molluschi e microvertebrati fossili, a ritrovamenti archeologici, alla storia dell'esplorazione speleologica nell'area e agli aspetti economici legati all'apertura delle grotte al turismo. Negli anni successivi le ricerche sono continuate e hanno riguardato, tra l'altro, l'evoluzione geocronologica del sistema carsico, con implicazioni paleoidrogeologiche e paleoclimatiche (Taddeucci *et al.* 1987, 1992; Tuccimei 1994), la relazione tra grotte ipogeniche e ambienti carsici (Galdenzi & Menichetti 1995; Galdenzi *et al.* 1999; Sarbu *et al.* 2000), l'azione corrosiva delle acque sulfuree su placchette calcaree appositamente realizzate (Galdenzi *et al.* 1997), studi sulla chemiosintesi e la speleogenesi nei rami sulfurei delle grotte (Galdenzi & Sarbu 2000; Galdenzi 2001), i processi di fotosintesi (Giordano *et al.* 2000), il monitoraggio ambientale nel sistema ipogeo (Galdenzi & Menichetti 2002) e la composizione isotopica dello zolfo nei depositi di gesso (Galdenzi & Maruoka 2003).

2. ASSETTO GEOMORFOLOGICO

Il sistema carsico "Fiume-Vento" è ubicato nella Gola di Frasassi in provincia di Ancona. La gola si

estende in direzione E-W all'interno dell'Appennino umbro-marchigiano ed è percorsa dal Torrente Sentino. Il reticolo carsico (Fig. 1) si sviluppa per oltre 19 km all'interno della Formazione del Calcarea Massiccio.

La caratteristica più saliente del complesso "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (di seguito indicato anche come "Fiume-Vento") è la presenza di numerosi piani carsici sovrapposti con sale e gallerie anche di notevoli dimensioni. Gli ambienti maggiori sono sviluppati su sette piani principali, posti a quote progressivamente crescenti sul livello del Torrente Sentino (Bocchini & Coltorti 1990).

Il livello più alto, identificato dal numero romano VII, corrisponde all'ingresso naturale della Grotta Grande del Vento ed è posto a 420 metri s.l.m. (210 metri al di sopra del livello di base attuale). Il suo sviluppo è piuttosto modesto, come peraltro sono limitate le estensioni del IV e II livello. Al contrario il VI piano (275 m s.l.m.), sito 140 metri circa al di sotto del livello sovrastante, è piuttosto sviluppato, a indicare una stasi prolungata della falda a quella quota. Piuttosto sviluppati sono anche il V e il III livello posti, rispettivamente, a 275 e 262 metri s.l.m. Il I livello, infine, si trova pochi metri sopra il corso attuale del Sentino. Parte di esso è percorso da un torrente di acqua sulfurea con cospicua portata.

3. MECCANISMI SPELEOGENETICI

La genesi dei sette piani carsici che costituiscono il sistema "Fiume-Vento" è legata all'abbassamento progressivo del livello di base locale, rappresentato dal Torrente Sentino e dalla falda freatica associata. L'incisione della Gola di Frasassi e il contemporaneo sollevamento dell'Appennino sono responsabili della migrazione dei processi speleogenetici verso zone poste a quote più basse. È in quest'ottica che i livelli superiori del sistema "Fiume-Vento" vanno considerati più antichi di quelli sottostanti.

Per la formazione delle grotte in oggetto sono stati proposti due modelli speleogenetici distinti.

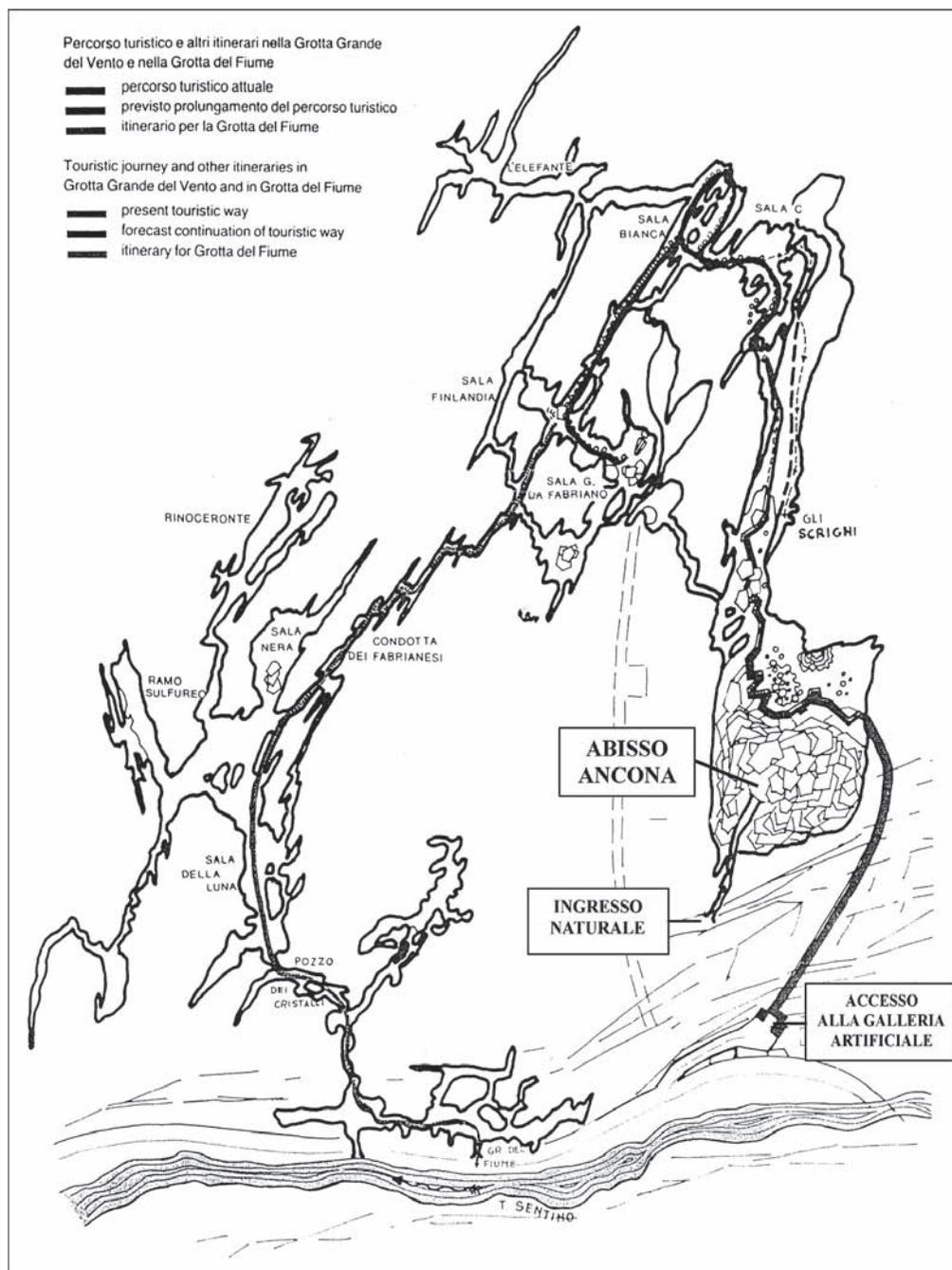


Fig. 1 - Pianta del complesso carsico “Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento”, con indicazione del percorso turistico e di altri itinerari (Consorzio Grotte di Frasassi 1984).

Fig. 1 - Map of “Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento” cave system, with indication of the touristic way and other itineraries (Consorzio Grotte di Frasassi 1984).

Il primo meccanismo (Fig. 2) è governato dall’alternarsi dei processi geomorfologici attivi nei periodi glaciali e interglaciali (Bocchini & Coltorti 1990). Durante le fasi fredde pleistoceniche, l’elevata produzione detritica avrebbe condizionato una forte aggradazione nella gola, a cui sarebbe stata associata, in ambiente ipogeo, la genesi dei principali piani carsici. Ai periodi interglaciali successivi sarebbero invece legati una forte reincisione del corso del Sentino e lo

sviluppo di ambienti ad andamento prevalentemente verticale.

L’altro modello (Galdenzi 1990) riconosce invece il ruolo speleogenetico più importante alle acque solfato-clorurate di provenienza profonda (Sighinolfi 1990), che emergono lungo il corso del Sentino (Fig.1). La falda sulfurea, che attualmente occupa le parti più basse del reticolo ipogeo, avrebbe esercitato un’azione corrosiva massiccia nei confronti del calca-

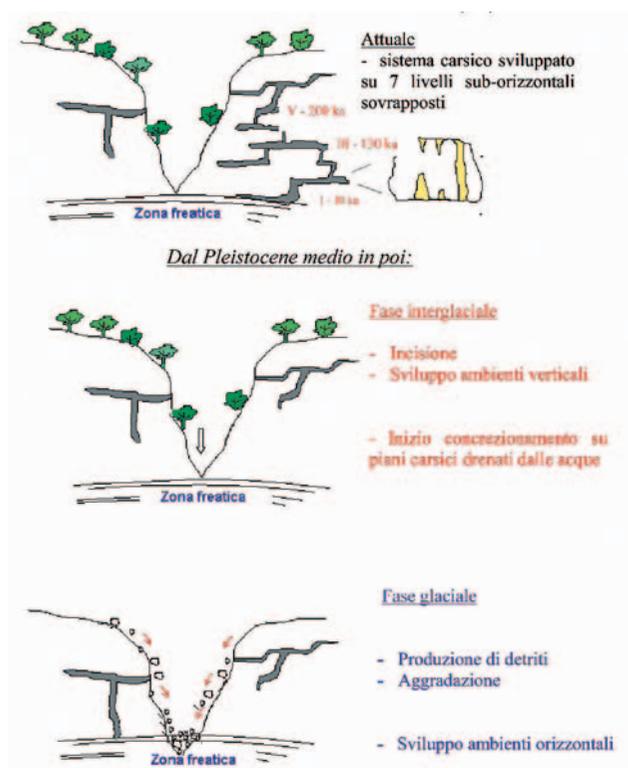


Fig. 2 - Evoluzione del carsismo nell'area di Frasassi secondo il modello di Bocchini & Coltorti (1990).

Fig. 2 - Evolution of karst processes in the Frasassi Gorge according to the model by Bocchini & Coltorti (1990).

re. L'evoluzione di ciascun piano può essere schematizzata come segue (Fig. 3).

- Lo sviluppo della grotta sarebbe probabilmente iniziato in fase freatica in momenti di stabilità del livello di base locale (fase 1a).
- Con il tempo si sarebbe avuto un ampliamento dei condotti e uno sviluppo delle azioni corrosive anche in ambiente aerato (fase 1b).
- In seguito all'abbassamento della rete idrografica esterna, i vecchi condotti freatici sarebbero stati abbandonati e soggetti ad evoluzione in ambiente vadoso, mentre una nuova rete di condotti si sarebbe sviluppata in fase freatica, riprendendo anche vie individuate nelle fase precedente (fase 2). I diversi piani freatici rimarrebbero così collegati da pozzi originati in fase freatica contestualmente al piano carsico sovrastante.

Sebbene i meccanismi citati siano differenti, alcuni punti risultano comuni ai due modelli. Entrambi concordano nel ritenere che i processi di concrezionamento su ciascun piano abbiano avuto inizio subito dopo il drenaggio di sale e gallerie e che, da quel momento, detti processi siano stati sempre attivi. Appare chiaro, quindi, come su ciascun livello siano presenti speleotemi di età differente e che la probabilità d'in-

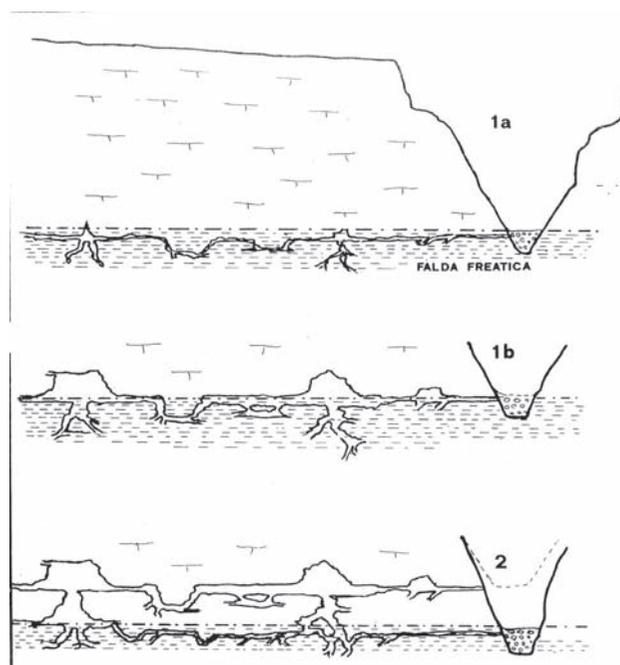


Fig. 3 - Sviluppo del carsismo nel sistema "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" secondo il modello di Galdenzi (1990). Lo sviluppo della grotta sarebbe iniziato in fase freatica in momenti di stabilità del livello di base locale (fase 1a). Con il tempo si sarebbe avuto un ampliamento dei condotti e uno sviluppo delle azioni corrosive anche in ambiente aerato (fase 1b). In seguito all'abbassamento della rete idrografica esterna i vecchi condotti freatici sarebbero stati abbandonati e soggetti ad evoluzione in ambiente vadoso, mentre una nuova rete di condotti si sarebbe sviluppata in fase freatica, riprendendo anche vie individuate nelle fase precedente (fase 2).

Fig. 3 - Development of the karst processes in "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" cave system according to the model by Galdenzi (1990). The genesis of the cave starts in phreatic conditions during phases of stability of the local base level (phase 1a). A further evolution of karst processes in vadose conditions follows (phase 1b). Because of the deepening of the external hydrographic network, the old conduits are drained in vadose environment and a new network of karst conduits develops in phreatic conditions (phase 2).

dividuare quelli più antichi sia direttamente proporzionale al numero di campioni datati. In quest'ottica lo speleotema più antico identifica l'età minima del piano carsico e rappresenta l'inizio di una fase di approfondimento del livello di base locale.

4. EVOLUZIONE DEL CARSISMO ED IMPLICAZIONI PALEOCLIMATICHE

Su numerosi speleotemi provenienti dai piani carsici più sviluppati, essenzialmente il V, il III e il I livello,

sono state effettuate determinazioni cronologiche col metodo del $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ al fine di datare i livelli carsici e gli eventi geologici ad essi collegati (Taddeucci *et al.* 1987, 1992; Tuccimei 1994). I processi di concrezionamento sui livelli V e III hanno avuto inizio rispettivamente 200 mila e 130 mila anni fa, in corrispondenza della transizione tra un periodo freddo e quello caldo successivo. Pertanto le età di formazione e sviluppo dei piani V e III sono state ricondotte alle fasi glaciali relative, corrispondenti agli stadi isotopici 8 e 6, mentre la genesi del I livello è ascrivibile ad almeno 10 mila anni fa (stadio isotopico 2).

Sulla base delle età minime di formazione dei livelli V, III e I e conoscendo la quota relativa di questi rispetto al corso del Sentino, sono state calcolate le velocità massime d'incisione della Gola di Frasassi negli intervalli 200-130 mila, 130-10 mila e 10 mila-attuale (Tuccimei 1994). Esse sono, nell'ordine: 0,20, 0,19 e 0,39 metri ogni 1000 anni.

La distribuzione di frequenza delle età degli speleotemi mostra un netto aumento nel numero di concrezioni a partire da 10 mila anni fa (Tuccimei 1994). Durante questo periodo si nota anche un brusco aumento delle velocità di accrescimento verticale e radiale degli speleotemi. Una simile tendenza viene segnalata anche tra 130 mila e 75 mila anni or sono, durante l'intera durata dello stadio isotopico 5 (Taddeucci *et al.* 1992). Questo dimostra che le condizioni climatiche caldo-umide, tipiche dei periodi interglaciali nelle nostre regioni (Bortolami *et al.* 1977), favoriscono la deposizione del carbonato.

5. COMPOSIZIONE CHIMICA ED ISOTOPICA DELLE ACQUE

5.1. Composizione chimica ed isotopica delle acque sotterranee nella Gola di Frasassi

La composizione chimica della maggior parte delle emergenze d'acqua poste lungo la Gola di Frasassi è del tipo bicarbonato-calcica, con oltre l'80% di bicarbonati e ioni calcio e tenori scarsi di Mg^{2+} e SO_4^{2-} . La salinità è contenuta entro i 350 mg/l ed è legata alla permanenza delle acque nel sottosuolo e quindi alla lunghezza dei circuiti sotterranei (Tazioli *et al.* 1990). Nella gola di Frasassi, la presenza di numerose dislocazioni tettoniche favorisce la risalita di acque sulfuree mineralizzate. Le emergenze di tali acque si rivengono in prossimità delle emergenze di acque bicarbonato-calciche.

Le acque mineralizzate sono classificate come acque sulfuree-clorurate-alcaline, con tenori in solfuri totali prossimi a 20 mg/l (Tazioli *et al.* 1990). La differenziazione più marcata tra le acque mineralizzate e quelle dolci è data da concentrazioni elevate di Na^+ (sino a 475 mg/l), K^+ (125 mg/l), Cl^- (822 mg/l)

e SO_4^{2-} (202 mg/l). Anche il contenuto in Ca^{2+} risulta circa il doppio di quello relativo alle acque bicarbonato-calciche.

La composizione isotopica di ossigeno e deuterio delle acque sotterranee sia dolci che mineralizzate, indica un'origine meteorica, con valori di $\delta^{18}\text{O}$ compresi tra -7,3 e -9,4‰ (V-SMOW) e tra -47 e -56‰ (V-SMOW) per δD (Tazioli *et al.* 1990). Questi dati indicano quote di alimentazione delle acque situate tra i 600 ed i 1000 m, considerando un gradiente di altitudine per l'ossigeno pari a -0,3‰, per 100 metri di altitudine. I tenori naturali di trizio indicano tempi di residenza delle acque nel sottosuolo abbastanza brevi. I valori registrati sono compresi tra 13 e 40 UT (Tazioli *et al.* 1990).

I valori di $\delta^{34}\text{S}$ relativi ai solfati disciolti nelle acque sotterranee dell'area di Frasassi variano tra +11,9 e +13,1, rispetto allo standard CDT. Tenendo conto che valori di $\delta^{34}\text{S}$ pari a circa +13/CDT sono in genere attribuibili ai gessi triassici, mentre per i gessi messiniani i valori di $\delta^{34}\text{S}$ si aggirerebbero sui +20/CDT, si può ritenere che la circolazione idrica sotterranea delle acque mineralizzate interessi più verosimilmente le evaporiti triassiche (Tazioli *et al.* 1990).

5.2. Composizione chimica ed isotopica delle acque del Complesso "Fiume-Vento"

Anche all'interno del complesso carsico "Fiume-Vento", come lungo tutta la Gola di Frasassi, sono presenti acque con chimismo differente, riconducibili al tipo bicarbonato-calcico e al tipo "solfato-clorurato". Il chimismo delle acque di stillicidio è tipicamente bicarbonato-calcico con quantità minime di anioni solfato e cloruro e di altri cationi (Sighinolfi 1990). La composizione di tali acque tende a rimanere estremamente costante nel tempo, essendo poco influenzata da fattori esterni climatico-stagionali. La composizione isotopica dell'ossigeno è costante nel tempo ed è pari a -9,60‰, valore molto prossimo a quello medio delle precipitazioni meteoriche alla sommità del sistema ipogeo.

Le acque bicarbonate della falda libera presentano un chimismo affine a quello delle acque di stillicidio, ma sono distinguibili da esse per un maggior contenuto in Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} e Cl^- . I contenuti di Radon sono sempre inferiori a 40 pCi/L.

Nei piani inferiori della grotta allo stesso livello delle acque precedenti si rinvenivano acque mineralizzate, spesso mescolate con le prime. Generalmente è osservabile una stratificazione fra i due tipi di acqua, con le acque mineralizzate più dense che si concentrano negli strati più profondi.

La composizione delle acque mineralizzate è tipicamente solfato-clorurato sodica, con salinità molto variabile nel tempo (Sighinolfi 1990). I contenuti di radon sono sempre compresi tra 40 e 90 pCi/L e sem-

brebbero escludere l'appartenenza di queste acque a circuiti termali, nei quali la mineralizzazione è sempre accompagnata dall'arricchimento in radon.

6. STUDIO DEGLI SPELEOTEMI

6.1. Descrizione dei campioni ed analisi petrografica

Nella grotta sono stati prelevati 3 campioni: una carota di stalagmite (FR3) nell'Abisso Ancona (III livello carsico – cfr. § 2) e 2 stalagmiti intere nei piani superiori della Grande Grotta del Vento (V livello carsico). Nella trattazione che segue verranno discussi i soli dati relativi alla stalagmite FR3, perché si è dimostrata lo speleotema più interessante ai fini delle



Fig. 4 - Carotaggio della stalagmite FR3, con il primo tratto di carota.

Fig. 4 - Stalagmite FR3 with the first piece of the core.

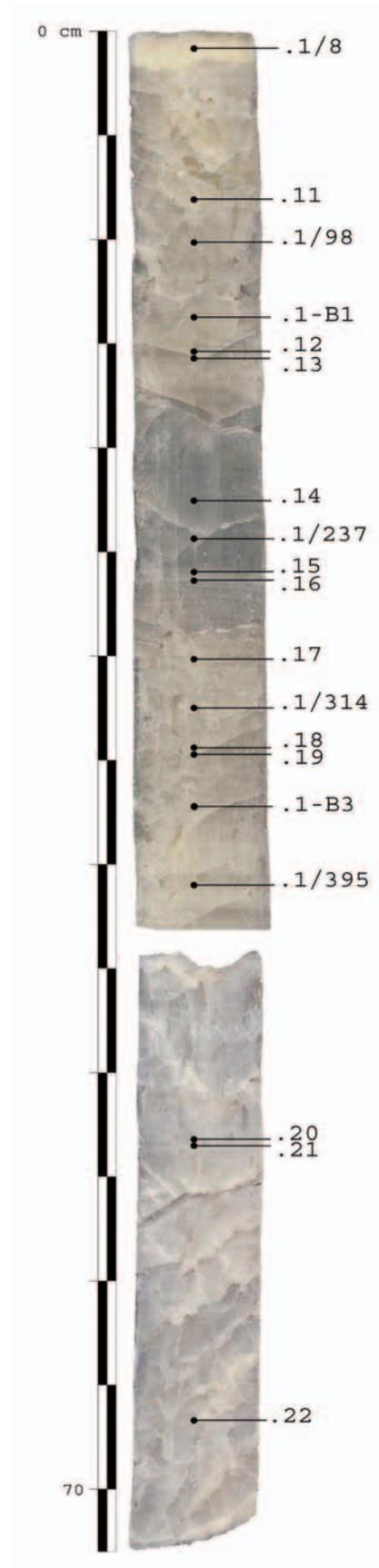


Fig. 5 - Vista della sezione tagliata del campione FR3, con la localizzazione dei campioni datati.

Fig. 5 - The cut slab of sample FR3, with the location of dating sites.

ricerche sul paleoclima recente nella Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento.

La stalagmite FR3, alta 1,04 m e con diametro medio di 25 cm (Fig. 4), è alimentata da uno stillicidio proveniente dalla volta che, in questo punto della sala, è alta oltre 50 m. Al momento del campionamento (inverno 2001) la stalagmite era alimentata da una goccia ogni 115 secondi. La stalagmite è stata carotata interamente nella sua parte assiale grazie ad un carotiere elettrico, ottenendo un cilindro del diametro di 60 mm e della lunghezza di 1040 mm (Fig. 5). La parte inferiore della carota, caratterizzata da elevata porosità e tracce di dissoluzione, non è stata analizzata, e ci si è concentrati sulla parte sommitale di 720 mm. L'analisi del campione sezionato non ha evidenziato discontinuità, né cambiamenti tessuturali marcati, ma solamente deboli bande di accrescimento nel tratto tra 250 e 315 mm dal top della stalagmite (Fig. 4).

L'analisi petrografia su sezioni sottili ha rivelato che la stalagmite è costituita quasi interamente da calcite colonnare a grandi cristalli, larghi mediamente da 2 fino a 15 mm e lunghi fino oltre 100 mm con evidenti tracce di sfaldatura (Fig. 6), e è altresì caratterizzata da un'elevata porosità legata alla presenza di cavità millimetriche irregolari. Dato che il rapporto tra lunghezza e larghezza dei cristalli costituenti la stalagmite è $>$ di 6:1, la tessitura potrebbe considerarsi fibrosa. Tuttavia, i cristalli sono fragili e non hanno le caratteristiche di una fibra, e pertanto preferiamo considerare la tessitura predominante nella FR3 come "colonnare allungata" (Frisia *et al.* 2000).

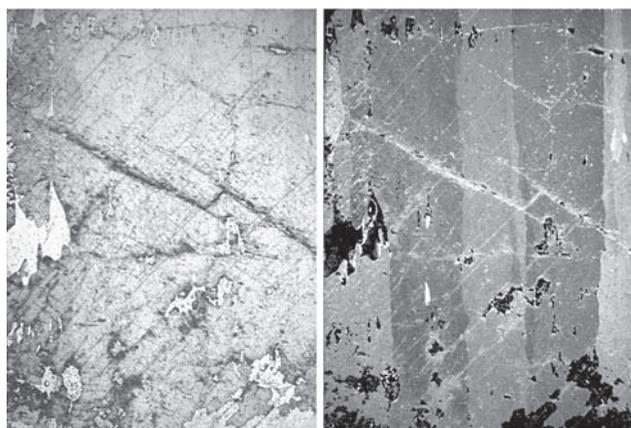


Fig. 6 - Sezione sottile della stalagmite FR3 tra 140 e 170 mm dal top a luce parallela (sinistra) e a nicol incrociati (destra). Altezza delle fotografie = 30 mm. Questa parte della stalagmite è caratterizzata da tessitura colonnare a macrocristalli, con elevata porosità.

Fig. 6 - Thin section of stalagmite FR3 between 140 and 170 mm from the top. Left: transmitted light; right: crossed polars. Height of the figure = 30 mm. This part of the stalagmite is characterized by elongated columnar calcite with several holes.

A differenza della tessitura colonnare osservata nelle concrezioni prelevate alla Grotta del Vento (Piccini *et al.* 2005), i cristalli della stalagmite FR3 hanno bordi dritti e non presentano concrescite laterali. Ciò potrebbe essere un'utile indicazione di meccanismi diversi di alimentazione tra le due concrezioni. La stalagmite di Frasassi potrebbe essere maggiormente soggetta a periodiche interruzioni nell'alimentazione o caratterizzata da un film di fluido di spessore inferiore, legato anche all'altezza della volta che influisce sulla velocità di impatto delle gocce che alimentano la stalagmite. Anche la porosità osservata nella FR3 è diversa da quella della colata GV1, in quanto i pori non sono allungati in modo regolare nel senso della crescita dei cristalli. Invece, i cristalli si "sfrangiano" attorno ai pori, che potrebbero essere strutture primarie di ristagno d'acqua, o, forse, marcare locali episodi di dissoluzione.

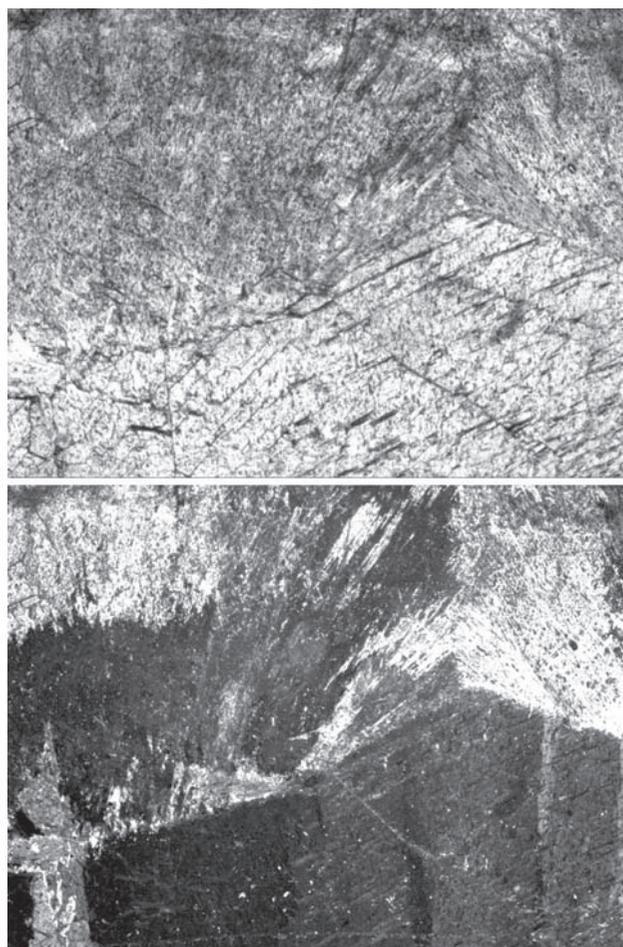


Fig. 7 - Sezione sottile della parte sommitale della stalagmite FR3 a luce parallela (alto) e a nicol incrociati (basso). Base delle fotografie = 24 mm. La transizione tra tessitura colonnare e dendritica avviene a 11 mm dal top.

Fig. 7 - Thin section of the topmost part of speleothem FR3. Up: transmitted light; bottom: crossed polars. Base of the figure = 24 mm. The transition between columnar and dendritic fabric occurs at 11 mm from the top.

Tab. 1 - Risultati delle analisi isotopiche U/Th (errori = 2σ). Nell'ultima colonna sono riportate le età corrette, calcolate utilizzando un rapporto di attività $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ della frazione detritica pari al valore medio crostale di $0,8\pm 0,2$. Sono evidenziate in corsivo le età ritenute attendibili e utilizzate per il modello di età (vedi testo per spiegazioni).

Tab. 1 - Results of U/Th analyses (errors are quoted as 2σ standard deviations). In the last row the corrected ages, calculated by utilising the mean crustal $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ value of 0.8 ± 0.2 , are quoted. In italic the reliable ages utilised in the age model are reported (see text for details).

Campione	dist	conc. U.	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}(t=0)$	Età	Età corretta
	mm	ppb	rapporto di attività				ka	ka
FR3.1-8	8	35.7 \pm 0.10	1.1387 \pm 0.0047	0.0638 \pm 0.0017	9.2 \pm 0.24	1.1415 \pm 0.005	7.19 \pm 0.19	6.58 \pm 0.35
FR3.11	80	34.7 \pm 0.67	1.0739 \pm 0.0390	0.0489 \pm 0.0028	13.0 \pm 0.51	1.0750 \pm 0.040	5.47 \pm 0.32	5.14 \pm 0.41
FR3.1-98	98	45.7 \pm 0.11	1.1769 \pm 0.0016	0.0375 \pm 0.0007	3.4 \pm 0.06	1.1790 \pm 0.002	4.17 \pm 0.08	3.21 \pm 0.32
FR3.1_B1	133	32.3 \pm 1.15	1.3280 \pm 0.1159	0.1086 \pm 0.0114	34.5 \pm 2.03	1.3400 \pm 0.120	12.50 \pm 1.40	12.20 \pm 1.48
FR3.12	145	26.3 \pm 0.26	1.1209 \pm 0.0330	0.0684 \pm 0.0038	7.5 \pm 0.34	1.1240 \pm 0.034	7.72 \pm 0.44	6.92 \pm 0.64
FR3.13	148	24.4 \pm 0.36	1.1334 \pm 0.0326	0.0496 \pm 0.0027	21.6 \pm 1.00	1.1360 \pm 0.033	5.55 \pm 0.32	5.35 \pm 0.37
FR3.14	218	21.6 \pm 0.48	1.1410 \pm 0.0629	0.4360 \pm 0.0303	4.3 \pm 0.16	1.1678 \pm 0.073	61.68 \pm 5.90	52.60 \pm 9.23
FR3.1-237	237	17.0 \pm 0.05	1.1915 \pm 0.0042	0.0593 \pm 0.0016	6.5 \pm 0.18	1.1952 \pm 0.004	6.60 \pm 0.18	5.87 \pm 0.39
FR3.15	255	44.3 \pm 1.23	1.0481 \pm 0.0215	0.1772 \pm 0.0076	24.9 \pm 0.83	1.0510 \pm 0.002	21.27 \pm 1.02	20.65 \pm 1.21
FR3.16	256	31.6 \pm 0.25	1.0712 \pm 0.0176	0.1352 \pm 0.0054	16.5 \pm 0.61	1.0740 \pm 0.019	15.84 \pm 0.69	15.12 \pm 0.89
FR3.17	293	19.5 \pm 0.27	1.1308 \pm 0.0326	0.1006 \pm 0.0068	46.6 \pm 2.96	1.1350 \pm 0.034	11.55 \pm 0.84	11.36 \pm 0.89
FR3.1-314	314	19.5 \pm 0.05	1.1842 \pm 0.0024	0.0813 \pm 0.0014	11.2 \pm 0.20	1.1891 \pm 0.002	9.24 \pm 0.17	8.60 \pm 0.34
FR3.18	335	21.9 \pm 0.24	1.0677 \pm 0.0213	0.0874 \pm 0.0043	24.2 \pm 1.06	1.0700 \pm 0.022	9.97 \pm 0.51	9.66 \pm 0.60
FR3.19	335	20.1 \pm 0.20	1.1396 \pm 0.0273	0.0729 \pm 0.0027	28.1 \pm 0.76	1.1430 \pm 0.028	8.25 \pm 0.32	8.02 \pm 0.38
FR3.1_B3	360	14.8 \pm 0.17	1.1557 \pm 0.0310	0.1211 \pm 0.0076	48.3 \pm 2.90	1.1620 \pm 0.032	14.05 \pm 0.94	13.84 \pm 1.01
FR3.1-395	395	16.2 \pm 0.04	1.1842 \pm 0.0039	0.2100 \pm 0.0098	9.9 \pm 0.49	1.1980 \pm 0.004	25.60 \pm 1.30	23.70 \pm 1.86
FR3.20	513	24.5 \pm 0.18	1.1684 \pm 0.0215	0.0830 \pm 0.0029	37.1 \pm 1.09	1.1730 \pm 0.022	9.44 \pm 0.34	9.25 \pm 0.39
FR3.21	514	29.0 \pm 1.17	0.9265 \pm 0.0337	0.0890 \pm 0.0058	41.5 \pm 1.51	0.9240 \pm 0.035	10.19 \pm 0.70	10.00 \pm 0.75
FR3.22	648	31.2 \pm 0.75	0.9770 \pm 0.0168	0.1011 \pm 0.0044	51.3 \pm 1.67	0.9760 \pm 0.017	11.65 \pm 0.54	11.47 \pm 0.58

Le bande di accrescimento visibili tra 250 e 315 mm dalla sommità della stalagmite sono costituite da un'alternanza di tessitura colonnare più compatta e più porosa analoga a quella descritta da Genty & Quinif (1996) e riconosciuta nelle concrezioni GV1 e GV3 (Piccini *et al.* 2005). È possibile che questo cambiamento tessiturale indichi una variazione nel flusso che alimentava la concrezione rispetto ai periodi precedente e seguente.

A 11 mm dalla sommità della concrezione, si osserva un marcato passaggio tessiturale da colonnare allungata (sotto) a dendritica (sopra). Il passaggio è contraddistinto dalle terminazioni romboedriche dei cristalli colonnari, sulle quali enucleano e si accrescono i tipici cristalli compositi con aspetto a graticcio della tessitura dendritica (Fig. 7). La sommità dei cristalli colonnari è caratterizzata da evidenti macroscalini e micropozzetti irregolari, che potrebbero indicare un episodio di (parziale) corrosione prima della successiva enucleazione della tessitura dendritica. Il passaggio tessiturale deve contraddistinguere un evento che ha alterato notevolmente le caratteristiche fisico-chimiche dell'acqua di percolazione (ad esempio attraverso il processo di degassamento), dato che

si nota anche che la crescita di alcuni cristalli della tessitura colonnare non è in continuità strutturale con il substrato. Nella figura 7, infatti, si notano cristalli dendritici sia in continuità ottica con il cristallo colonnare sottostante, sia con una orientazione quasi perpendicolare ad esso.

6.2. Datazioni U/Th

Sul campione FR3 sono state eseguite 19 datazioni U/Th, utilizzando da 0,2 a 0,4 g di calcite. I risultati delle analisi, eseguite con spettrometro di massa multicollectore con sorgente al plasma (MC-ICPMS) presso il Laboratorio di Geologia isotopica dell'Università di Berna, sono riportati nella tabella 1. Per il calcolo delle età sono state utilizzate le costanti di decadimento in Cheng *et al.* (2000).

Tutti i campioni mostrano un basso tenore di U, che oscilla tra 15 e 45 ppb, con un progressivo incremento delle concentrazioni nei campioni più recenti. I valori estremamente bassi del contenuto in uranio hanno influito negativamente sulla precisione delle analisi. Inoltre, considerato il basso rapporto $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ compreso tra 4 e 50, si è resa necessaria una correzione

per la presenza di torio detritico (Tuccimei & Borsato 2005). L'approccio prescelto è stato quello proposto da Kaufman & Broecker (1965), ma in assenza di dati analitici sulla composizione isotopica del torio nella frazione detritica si è utilizzato il valore medio crostale $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ di $0,8 \pm 0,2$ (Richards & Dorale 2003). Le età così calcolate sono riportate nell'ultima colonna della tabella 1, dove l'errore è stato calcolato attraverso la propagazione della deviazione standard del valore crostale $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$. Questo comporta, per i campioni più contaminati da Th detritico, un errore che può raggiungere il 10% (FR3 1-98).

Nonostante la correzione per il Th detritico, diverse analisi hanno dato età incongruenti con la loro posizione stratigrafica. Ciò è probabilmente legato all'apertura del sistema con rimobilizzazione dell'uranio o immissione di Th (vedi Borsato *et al.* 2005), meccanismi che tendono ad "invecchiare" sistematicamente l'età calcolata (Tab. 1).

Il modello di età è stato pertanto approntato utilizzando solamente le età in corretta posizione stratigrafica, evidenziate in corsivo nella tabella 1 (Fig. 8). Di due campioni, dei quali si sono ripetute le analisi in due subcampioni (FR3.18 e 3.19 nonché FR3.20 e 3.21), si è utilizzata la media aritmetica delle età calcolate. Nella figura 7 sono riportati anche i tassi medi di accrescimento assiale che evidenziano una fase di accrescimento veloce di $227 \mu\text{m}/\text{anno}$ tra $9,63 \pm 1,06$ e $8,84 \pm 0,49$ ka con una successiva brusca diminuzione a valori di $51 \mu\text{m}/\text{anno}$ tra $8,60 \pm 0,34$ e $5,35 \pm 0,37$ ka, cui fanno seguito tassi di crescita tra 23 e 31 $\mu\text{m}/\text{anno}$ per i restanti 5350 anni.

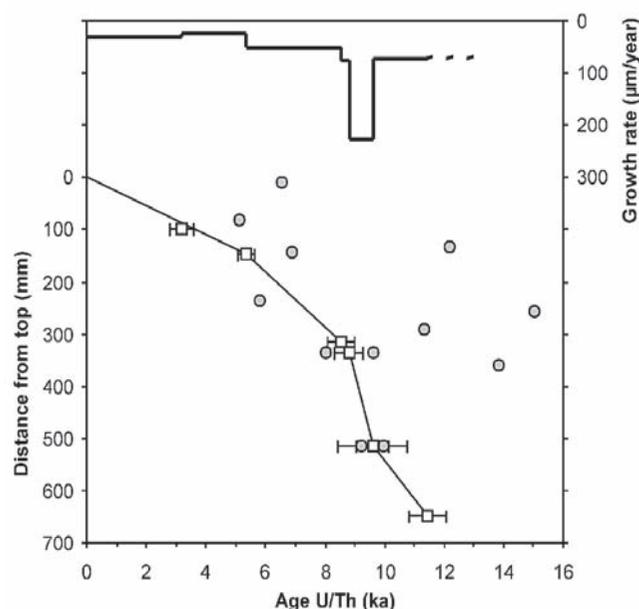


Fig. 8 - Modello di età e tasso medio di accrescimento assiale per il campione FR3 (vedi testo per spiegazioni).
 Fig. 8 - Age model and mean annual axial growth rate of the sample FR3 (see text for explanation).

6.3. Isotopi stabili

I campioni per le analisi dei rapporti isotopici d^{18}O e d^{13}C sono stati ottenuti lungo l'asse centrale della carote, perforando ad una distanza l'uno dall'altro tra 5 e 8 mm micro-pozzetti del diametro di 1 mm e profondità di 2-3 mm, per un totale di 120 campioni. La polvere ottenuta, pari a circa 5-7 mg, è stata fatta reagire sotto vuoto con acido ortofosforico anidro degassato a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ per 8 ore preparato con l'ausilio di una "linea di purificazione". La CO_2 così prodotta è in equilibrio con la soluzione ed è stata analizzata con uno spettrometro di massa Finnigan MAT 250 Delta S. I rapporti isotopici sono stati riportati allo standard di riferimento PDB in ‰. I valori della deviazione standard sono rispettivamente: $\delta^{13}\text{C} = \pm 0,005$, $\delta^{18}\text{O} = \pm 0,15$.

I profili isotopici risultati dalle analisi sono riportati nella figura 9 in cui sono anche rappresentate le datazioni con le barre di errore (2σ) utilizzate per costruire il modello cronologico.

La superficie di crescita della stalagmite, che mostra un valore $\delta^{18}\text{O}$ di $-7,3\text{‰}$ (V-PDB), è in sostanziale equilibrio con l'attuale temperatura della sala che si aggira intorno ai $13,8 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Galdenzi & Menichetti 2002) e la composizione delle acque ipogee ($-8,3 \pm 0,5\text{‰}$ (V-SMOW) cfr. 5.1.). A loro volta, i valori delle acque ipogee sono in accordo con quelli delle acque meteoriche del versante orientale degli Appennini (Longinelli & Selmo 2003): infatti, considerando la stazione di Urbino (quota 485 m s.l.m.), che ha valori medi ponderati di $\delta^{18}\text{O}$ di $-8,01\text{‰}$ (V-SMOW), e utilizzando il gradiente altitudinale $\Delta\delta^{18}\text{O}/100\text{m}$ di $-0,15\text{‰}$ (Longinelli & Selmo 2003) si ottiene, per la quota di infiltrazione delle acque meteoriche al di sopra dell'Abisso Ancona (tra 500 e 700 m s.l.m.), il seguente valore di $\delta^{18}\text{O}$: $-8,18 \pm 0,15\text{‰}$ (V-SMOW).

Ciò testimonia l'assenza (o l'importanza secondaria) di fattori cinetici nel frazionamento acqua-calcite. La sostanziale assenza di fenomeni di frazionamento cinetico è confermata anche dall'assenza di correlazione tra i valori del $\delta^{18}\text{O}$ e del $\delta^{13}\text{C}$ e dal fatto che i singoli picchi dei due record solo raramente sono in fase.

Dalla figura 9 si nota una tendenza positiva del $\delta^{18}\text{O}$ dall'inizio alla fine del concrezionamento. I valori di $\delta^{18}\text{O}$ passano da $-8,0\text{‰}$ tra 12 e 10 ka a circa $-7,2\text{‰}$ negli ultimi 500 anni. Le piccole oscillazioni rientrano nell'errore analitico, mentre le uniche perturbazioni significative sono due singoli picchi negativi a 3,6 ka e 2,0 ka che corrispondono a picchi negativi nel record del $\delta^{13}\text{C}$.

Il trend generale del profilo del $\delta^{13}\text{C}$ è negativo fino a circa 2 ka, con valori del $\delta^{13}\text{C}$ che variano da $-5,8\text{‰}$ tra 12 e 11 ka a $-9,5\text{‰}$ tra 2,5 e 2 ka. Gli ultimi 2000 anni sono invece caratterizzati da un aumento del $\delta^{13}\text{C}$ fino al valore di $-5,07\text{‰}$, misurato alla superficie attuale

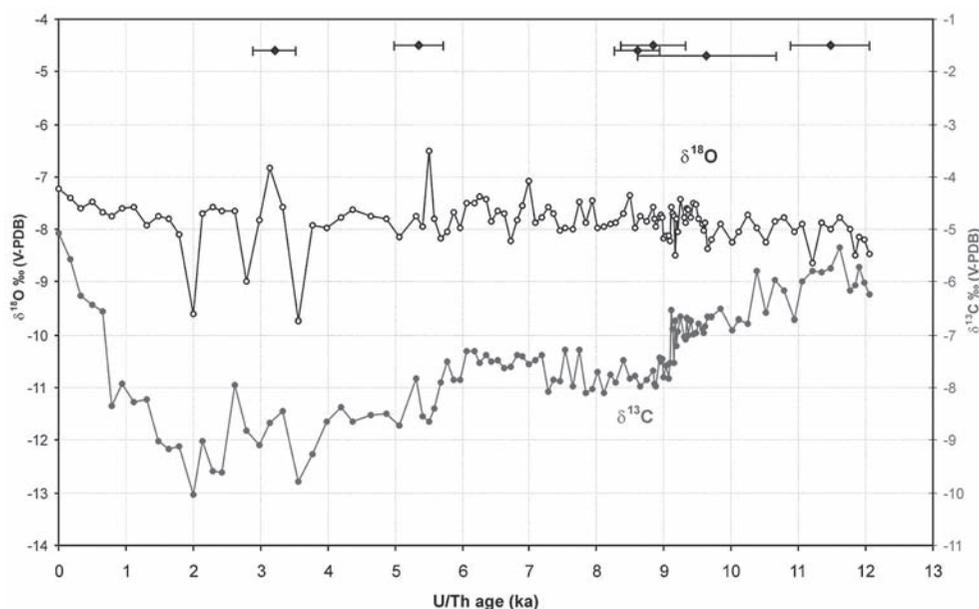


Fig. 9 - Composizione isotopica dell'ossigeno e del carbonio nel campione FR3. Nella parte alta del grafico sono riportate le datazioni U/Th utilizzate con i relativi margini di errore (2σ).

Fig. 9 - Oxygen and carbon isotopic composition of sample FR3. In the upper part of the diagram the reliable U/Th ages with their error bars (2σ) are plotted.

di crescita della stalagmite. In particolare, si osserva un arricchimento molto rapido di quasi 2‰ tra il 1200 e il 1350 AD che riporta i valori medi di $\delta^{13}\text{C}$ a quelli tipici dell'Olocene Inferiore e Dryas Recente. Questo rapido arricchimento in carbonio pesante non ha un parallelo nel profilo isotopico dell'ossigeno che, invece, resta nella media dei valori degli ultimi 2000 anni. La tendenza verso valori più alti in entrambi i profili isotopici contraddistingue gli ultimi 300-400 anni circa.

7. RICOSTRUZIONE DELLA VARIABILITÀ CLIMATICA

Il contesto climatico della Grotta di Frasassi è continentale temperato, con una temperatura media annua di circa 13 °C e precipitazione media annua di 900 mm/anno nella gola e 1100 mm/anno sulle cime. Il picco della piovosità è, in genere, in tardo autunno (Galdenzi & Menichetti 1995). Il ricarica dell'acquifero, alle condizioni attuali, avviene quindi soprattutto in autunno.

In assenza di fattori cinetici, il valore del $\delta^{18}\text{O}$ registrato nelle stalagmiti dipende dal segnale delle acque di percolazione, a sua volta legato al segnale isotopico delle acque meteoriche, nonché dalle fluttuazioni di temperatura che modificano il fattore di frazionamento acqua-calcite (McDermott *et al.* 1999; McDermott 2004). Per questo motivo l'interpretazione del significato del $\delta^{18}\text{O}$ negli speleotemi necessita di un'accurata calibrazione con la situazione attuale,

cosa che non si è potuta realizzare per la stalagmite FR3. In questi casi, un approccio utilizzato da molti ricercatori è quello di riconoscere all'interno del record isotopico periodi notoriamente freddi o caldi e "calibrare" con essi il trend del $\delta^{18}\text{O}$ (Lauritzen & Lundberg 1999). Nel caso della stalagmite FR3, due periodi sicuramente più freddi dell'attuale sono il Dryas Recente (tra 12,7 e 11,5 ka BP, cfr. Ravazzi 2003) e la Piccola Età Glaciale (tra il 1450 e il 1850 AD, cfr. Frisia *et al.* 2003). Durante entrambi questi intervalli il $\delta^{18}\text{O}$ presenta valori sensibilmente più bassi rispetto alla media dell'Olocene e al top della stalagmite. Si può pertanto affermare che il trend positivo del $\delta^{18}\text{O}$ rispecchi un graduale riscaldamento da 12 ka ad oggi, sebbene non sia possibile quantificarne l'entità. Tuttavia, se l'influenza dei fronti è stata soprattutto di origine Mediterranea, e in particolare dal Mediterraneo Orientale, come per la situazione sinottica attuale (Longinelli & Selmo 2003), allora il trend positivo potrebbe anche essere legato ad una progressiva diminuzione della piovosità media annua, e conseguente arricchimento nell'isotopo pesante della zona di evaporazione (Mare Mediterraneo) come osservato per la Grotta di Soreq (Schilman *et al.* 2002). In pratica, se l'ipotesi di Longinelli & Selmo (2003) è corretta, ci dovrebbero essere delle somiglianze tra le serie isotopiche del Mediterraneo Orientale e quelle di Frasassi, correlabili a fenomeni climatici regionali.

Considerando il fatto che si sono analizzati solamente i 72 cm superiori dell'intero speleotema, è molto probabile che la stalagmite FR3 abbia iniziato

a depositarsi prima del Dryas Recente. Il contesto climatico e ambientale per quel periodo era quindi favorevole alla precipitazione di calcite ipogea, contrariamente a quanto osservato in altre regioni italiane, quali le Prealpi trentine (McDermott *et al.* 1999) e la Sicilia (Madonia *et al.* 2005). Dato che i due fattori principali che controllano la formazione e crescita di concrezioni sono la disponibilità d'acqua e la produzione di CO₂ nel suolo, possiamo ipotizzare con ragionevole certezza che ci fosse un suolo attivo al di sopra della grotta precedentemente e durante il deterioramento climatico del Dryas Recente. Nei limiti degli errori di datazione, si deduce dai profili isotopici, per l'intervallo che comprende il Dryas Recente, che l'attività del suolo era ridotta ($\delta^{13}\text{C}$ con valori $> -6\text{‰}$) e che le temperature erano relativamente fredde rispetto all'Olocene ($\delta^{18}\text{O} < -8\text{‰}$). Tuttavia, il Dryas recente negli speleotemi della Grotta di Soreq sembra essere contraddistinto da un arricchimento in ossigeno pesante (di circa 0,5‰), possibilmente collegato all'inaridimento dell'area Medio-Orientale. Nel Dryas Recente, quindi, è possibile che le masse di vapore acqueo avessero traiettorie differenti, che non giungevano fino al Mediterraneo orientale. L'ipotesi che il valore del $\delta^{18}\text{O}$ della calcite della concrezione FR 3 dipenda solo dal frazionamento acqua-carbonato e dalla temperatura, indicherebbe un riscaldamento per il Dryas Recente, che è in contraddizione con tutti gli altri archivi di dati proxy per quell'intervallo di tempo.

A partire da 10,5 ka i valori del $\delta^{13}\text{C}$ diminuiscono. Ciò testimonia una più efficiente attività biologica nel suolo soprastante la cavità, mentre tra 9,6 e 8,6 ka si registra il massimo tasso di crescita assiale (227 $\mu\text{m}/\text{anno}$) legato, con ogni probabilità, a un incremento nelle precipitazioni. Un simile fenomeno è registrato anche negli speleotemi della Grotta di Soreq (Bar-Matthews *et al.* 1997), dove l'Olocene inferiore è caratterizzato dalla piovosità media annua più elevata per gli ultimi 15 ka. Le tessiture sembrano indicare un cambiamento verso un maggiore contrasto stagionale, probabilmente con una stagione molto piovosa e una asciutta, tra circa 8,4 e 7,2 ka BP, corrispondente all'intervallo con una debole laminazione. In questo intervallo di tempo, l'area Mediterranea e Medio-Orientale si trova ancora in un regime caratterizzato da piovosità media annua più elevata che nel recente, a causa della posizione settentrionale della convergenza intertropicale (ITCZ), che si sposterà a sud in conseguenza della diminuita insolazione tra 7 e 6 ka (Fleitmann *et al.* 2003). Il profilo isotopico dell'ossigeno della FR3, tuttavia, non mostra valori particolarmente impoveriti in questo intervallo temporale, suggerendo che per l'area della Gola di Frasassi valori più negativi del $\delta^{18}\text{O}$ dovuti all'*amount effect* sarebbero compensati da un aumento della temperatura media dell'aria che comporta un arricchimento del $\delta^{18}\text{O}$ del-

l'acqua piovana (Rozanski *et al.* 1993; Frisia 2004). Il ogni caso, nel quadro climatico definito per l'Olocene inferiore con accentuato contrasto stagionale e piovosità media annua maggiore dell'attuale, si inserisce bene lo scenario ricostruito per la Grotta di Ernesto (McDermott *et al.* 1999) dove la tessitura predominante per l'Olocene inferiore è quella dendritica.

Il periodo tra circa 4 e 1,8 ka BP è caratterizzato da forte instabilità climatica, o da un'amplificazione di fenomeni ambientali (o climatici) che non sono registrati in modo così marcato in altre grotte italiane, visibile nei picchi negativi dei profili del carbonio e dell'ossigeno. Ancora, si rintraccia una similitudine con l'instabilità climatica registrata negli speleotemi del Mediterraneo Orientale, soprattutto per quei periodi chiave della storia della civiltà Medio-Orientale che vanno dal terzo al primo millennio AC (Bar-Matthews *et al.* 1997). Le tessiture, invece, non sono particolarmente significative, ma indicano solamente come il contrasto idrologico stagionale si fosse attenuato.

I rapidi passaggi dei valori del $\delta^{13}\text{C}$ da -9,1‰ a -8,1‰ intorno a 600 AD e da -8,2‰ a -6,5‰ intorno a 1300 AD sono verosimilmente legati ad attività antropiche. Infatti, le notizie storiche indicano un utilizzo meno regolamentato del territorio (deforestazione, trasformazione a pascolo ecc.) a partire dalla fine dell'Età Romana e culminato nel Medio Evo, probabilmente innescato da deterioramenti climatici.

All'attività antropica è da ricondurre anche la presenza del livello a tessitura dendritica negli ultimi 11 mm della stalagmite FR3, che corrisponde al forte incremento registrato nelle ultime due analisi del record del $\delta^{13}\text{C}$ e testimonierebbe un aumento nella circolazione dell'aria nell'Abisso Ancona. L'età della transizione, utilizzando il tasso di crescita media di 30,5 $\mu\text{m}/\text{anno}$ calcolato con la prima datazione disponibile a 98 mm (cfr. Tab. 1) risulterebbe a 1640 AD, ma considerando la scarsa precisione nella datazione del tratto più recente della stalagmite e la maggiore velocità di crescita della tessitura dendritica rispetto a quella colonnare (Frisia *et al.* 2000) non è da escludere che questo passaggio sia in relazione alla scoperta e alla successiva apertura turistica della grotta. A questo riguardo, Castellani (1990) ricorda come l'Abisso Ancona (da dove proviene la stalagmite FR3) rappresenti l'elemento primario del collegamento naturale tra la grotta e l'ambiente esterno (vedi anche Fig. 1) e che proprio in corrispondenza di detto ambiente sbocchi la galleria artificiale realizzata per consentire l'ingresso ai visitatori. La costruzione della galleria avrebbe modificato la circolazione "a pozzo chiuso" preesistente, caratterizzata da sostanziale stabilità durante l'estate e da un ricambio continuo con l'esterno durante la stagione invernale. Secondo Castellani (1990), l'apertura del condotto artificiale avrebbe favorito la circolazione invernale innescando, in aggiunta, una circolazione

inversa estiva, detta “di condotto”, con un conseguente aumento medio della circolazione d’aria.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la direzione e il personale delle Grotte di Frasassi per aver permesso il prelievo dei campioni.

Lavoro eseguito 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

- Bar-Matthews M., Ayalon A. & Kaufman A., 1997 - Late Quaternary Paleoclimate in the Eastern Mediterranean Region from stable isotope analysis of speleothems in Soreq Cave Israel. *Quaternary Research*, 47: 155-168.
- Bertolani M. & Cigna A., 1994 - Activity of the Scientific Commission of “Grotta Grande del Vento” (Genga, Ancona, central Italy). *International Journal of Speleology*, 23: 51-60.
- Bocchini A. & Coltorti M., 1990 - Il complesso carsico Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento e l’evoluzione geomorfologica della Gola di Frasassi. *Memorie dell’Istituto Italiano di Speleologia*, 4, serie II: 155-179.
- Borsato A., Quinif Y. & Bini A., 2004 - Uranium leaching and open-system alpine speleothems: implication for dating and paleoclimate reconstructions (in questo volume).
- Bortolami G.C., Fontes J.F., Markgraf V. & Saliege J.F., 1977 - Land, sea and climate in the northern Adriatic region during Late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 21: 139-156.
- Castellani V., 1990 - Meteorologia ipogea e Grotta Grande del Vento. *Memorie dell’Istituto Italiano di Speleologia*, 4 - serie II: 181-190.
- Cheng H., Edwards R.L., Hoff J., Gallup C.D., Richards D.A. & Asmeron Y., 2000 - The half-lives of uranium-234 and thorium-230. *Chem. Geol.*, 169: 17-33.
- Consorzio Grotte di Frasassi, 1984 - *La Grotta Grande del Vento. Guida al percorso turistico e alle altre meraviglie nascoste*. Trimboli, Pescara: 62 pp.
- Fleitmann D., Burns S.J., 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.
- Frisia S., 2004 - Gli isotopi stabili negli speleotemi (in questo volume).
- Frisia S., Borsato A., Fairchild I.J. & McDermott F., 2000 - Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and southwestern Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, 70 (5): 1183-1196.
- Frisia S., Borsato A., Preto N. & McDermott F., 2003 - 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.
- Galdenzi S., 1990 - Un modello genetico per la Grotta del Fiume - Grotta Grande e l’evoluzione geomorfologica della Gola di Frasassi. *Memorie dell’Istituto Italiano di Speleologia*, 4 - serie II: 123-141.
- Galdenzi S., 2001 - L’azione morfogenetica delle acque sulfuree nelle Grotte di Frasassi, Acquasanta Terme (Appennino marchigiano - Italia) e di Movile (Dobrogea - Romania). *Le Grotte d’Italia*, 2: 49-61.
- Galdenzi S. & Menichetti M. (a cura di), 1990 - Il carsismo nella Gola di Frasassi. *Memorie dell’Istituto Italiano di Speleologia*, 4, serie II: 241.
- Galdenzi S., & Menichetti, M., 1995 - Occurrence of hypogenic caves in a karst region: examples from central Italy. *Environmental Geology*, 26: 39-47.
- Galdenzi S., Menichetti M. & Forti P., 1997 - La corrosione di placchette calcaree ad opera di acque solfuree: dati sperimentali in ambiente ipogeo. *Proceedings, International Congress of Speleology, 12th, Le Chaux-de-Fonds, Switzerland: Basel*, 1: 187-190.
- Galdenzi S., Menichetti M., Sarbu S. & Rossi A., 1999 - Frasassi caves: a biogenic hypogean karst system. *Proceedings European Conference Karst 99, Etudes de Géographie physique*. CAGEP, Université de Provence, Suppl. XXVIII: 101-106.
- Galdenzi S. & Sarbu S.M., 2000 - Chemiosintesi e speleogenesi in un ecosistema autotrofico ipogeo: i rami sulfurei delle grotte di Frasassi (Italia centrale). *Le Grotte d’Italia*, 1: 3-18.
- Galdenzi S. & Menichetti M., 2002 - Il monitoraggio ambientale nelle Grotte di Frasassi: struttura della rete di acquisizione e nuove indicazioni sul microclima. *Le Grotte d’Italia*, 3: 75-86.
- Galdenzi S. & Maruoka T., 2003 - Gypsum deposits in the Frasassi Caves, central Italy. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65: 111-125.
- Genty D., 1992 - Les spéléothèmes du tunnel de Godarville (Belgique): un exemple exceptionnel de concrétionnement moderne intérêt pour l’étude de la cinétique de la précipitation de la calcite et de sa relations avec les variations d’environnement. *Speleochronos*, 4: 3-29.
- Genty, D. & Quinif, Y., 1996 - Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites – importance for palaeoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 275-288.
- Giordano M., Mobili F., Pezzoni V., Hein M.K. & Davis J.S., 2000 - Photosynthesis in the caves of Frasassi (Italy). *Phycologia*, 39: 384-389.
- Kaufman A. & Broecker W.S., 1965 - Comparison of ²³⁰Th and ¹⁴C ages of carbonate materials from Lakes Lahantan and Bonneville. *Journal of Geophysical Research*, 70: 4039-4054.

- Lauritzen S.E. & Lundberg J., 1999 - Calibration of the speleothem delta function: an absolute temperature record for the Holocene in northern Norway. *The Holocene*, 9: 659-669.
- Longinelli, A. & Selmo E., 2003 - Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrology*, 270: 75-88.
- Madonia G., Frisia S., Borsato A., Mangini A., Paladini M., Piccini L., Miorandi R., Spötl C., Sauro U., Agnesi V., Di Pietro R., Palmeri A. & Vattano M., 2004 - La grotta di Carburangeli – ricostruzione climatica dell'Olocene per la piana costiera della Sicilia nord-occidentale (in questo volume).
- McDermott F., Frisia S., Yiming H., Longinelli A., Spiro B., Heaton T.H.E., Hawkesworth C.J., Borsato A., Keppens E., Fairchild I.J., van der Borg K., Verheyden S. & Selmo E., 1999 - Holocene climate variability in Europe: evidence from $\delta^{18}\text{O}$, textural and extension-rate variations in three speleothems. *Quaternary Science Reviews*, 18: 1021-38.
- McDermott F., 2004 - Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23: 901-918.
- Piccini L., Borsato A., Frisia S., Paladini M., Salzani R., Sauro U. & Tuccimei P. 2004 - Concrezionamento olocenico e aspetti geomorfologici della Grotta del Vento (Alpi Apuane – Lucca): analisi paleoclimatica e implicazioni morfogenetiche (in questo volume).
- Ravazzi C., 2003 - An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 16 (1Bis): 11-18.
- 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.
- Rossi S., 1990 - Alcuni aspetti economici del comune di Genga in relazione all'apertura al turismo delle Grotte di Frasassi. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, 4, II: 231- 234.
- Rozanski K., Araguas-Araguas L. & Gonfiantini R., 1993 - Isotope patterns in modern global precipitation. In: Swart P.K. *et al.* (eds), Climate change in the Continental Isotopic Records. *American Geophysical Union Monograph*, 78, Washington: 1-36.
- Sarbu S. M., Galdenzi S., Menichetti M. & Gentile G., 2000 - Geology and Biology of the Frasassi Caves in Central Italy, an ecological multi-disciplinary study of a hypogenic underground ecosystem In: Wilkens H. *et al.* (eds), *Ecosystems of the world*. New York, Elsevier: 359-378.
- Schilman B., Ayalon A., Bar-Matthews M., Kagan E.G. & Almogy-Labin A., 2002 - Sea-Land paleoclimate correlation in the Eastern Mediterranean region during the Late Holocene. *Israel Journal of Earth Sciences*, 51: 181-190.
- Sighinolfi G.P., 1990 - Studio chimico delle acque del complesso "Grotta di Frasassi" (Ancona). Implicazioni speleogenetiche ed ambientali. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, 4, II: 109-122.
- Taddeucci A., Conte A. & Voltaggio M., 1987 - Datazione col Th-230 di alcuni speleotemi del complesso carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande" a Frasassi del Vento (Ancona). *Bollettino delle Società Geologica Italiana*, 106: 807-812.
- Taddeucci A., Tuccimei P. & Voltaggio M., 1992 - Studio geocronologico del complesso carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande" (Gola di Frasassi, Ancona) e implicazioni paleoambientali. *Il Quaternario*, 5: 213-222.
- Tazioli G.S., Cocchioni M., Coltorti M., Dramis F. & Mariani M., 1990 - Circolazione idrica e chimismo delle acque sotterranee dell'area carsica di Frasassi nelle Marche. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, 4, II: 93-108.
- Tuccimei P., 1994 - L'evoluzione geomorfologica, paleoclimatica e tettonica dell'alta valle dell'Esino (Appennino umbro-marchigiano), ricostruita attraverso la datazione U/Th di speleotemi e travertini. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma.
- Tuccimei P. & Borsato A., 2004 - Il metodo $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ applicato alla datazione di speleotemi. Evoluzione delle tecniche analitiche (in questo volume).