

Concrezionamento olocenico e aspetti geomorfologici della Grotta del Vento (Alpi Apuane – Lucca): analisi paleoclimatica e implicazioni morfogenetiche

Leonardo PICCINI¹, Andrea BORSATO², Silvia FRISIA², Mauro PALADINI¹, Roberto SALZANI³, Ugo SAURO⁴ & Paola TUCCIMEI³

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Via La Pira 4, I-50121 Firenze

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

³Dipartimento di Scienze Geologiche, Università “Roma Tre”, L.go S.L. Murialdo 1, I-00146 Roma

⁴Dipartimento di Geografia, Università degli Studi di Padova, Via del Santo 26, I-35123 Padova

*E-mail dell’Autore per la corrispondenza: piccini@geo.unifi.it

RIASSUNTO - *Concrezionamento olocenico e aspetti geomorfologici della Grotta del Vento (Alpi Apuane – Lucca): analisi paleoclimatica e implicazioni morfogenetiche* - La Grotta del Vento di Fornovolasco è una cavità di origine prevalentemente freatica che ha funzionato in passato da sorgente carsica. I fenomeni di concrezionamento interessano soprattutto il livello intermedio di gallerie. Le datazioni eseguite indicano che il concrezionamento attuale ha avuto inizio in tempi certamente postglaciali, prevalentemente durante l’Olocene inferiore. La grotta, al di là delle prerogative morfologiche e dell’abbondanza di concrezioni, si è dimostrata non particolarmente idonea a questo tipo di studi, non rendendo possibile un’interpretazione accurata, in chiave paleoclimatica, delle analisi isotopiche svolte sui due campioni. La generale tendenza negativa dei valori del $\delta^{18}\text{O}$ durante l’Olocene sembrerebbe indicare che la Grotta del Vento registri un declino delle temperature, come già osservato in altre serie di dati proxy. È possibile che vi sia anche un effetto dovuto all’aumento della piovosità (*amount effect*). Le tendenze negative dei profili del $\delta^{13}\text{C}$ nelle GV1 e GV3 possono essere interpretate come il progressivo aumento dell’attività di degradazione batterica nel suolo in un contesto di disponibilità d’acqua praticamente illimitata. Per l’Olocene, l’indagine tessiturale delle due concrezioni indica una diminuzione del contrasto stagionale e la deposizione in un contesto di elevata disponibilità d’acqua e flusso delle acque di percolazione costante. Queste informazioni ci sembrano coerenti con il quadro climatico attuale delle Alpi Apuane, caratterizzato da una piovosità distribuita durante tutto l’anno. In conclusione, malgrado la scarsa risoluzione dei profili isotopici, i fenomeni di cinetica nella GV 3 e le datazioni problematiche, possiamo dire che gli speleotemi della Grotta del Vento registrano i trend climatici dell’Olocene per la regione mediterranea e, quindi, sarebbero potenzialmente utilizzabili anche per ricostruzioni più dettagliate della variabilità climatica.

SUMMARY - *Holocene speleothems and geomorphic features of the Grotta del Vento (Apuan Alps - Lucca): paleoclimate analysis and morphogenetic significance* - The Grotta del Vento di Fornovolasco is a fossil phreatic cave, which, in a recent past, functioned as a karst spring. Speleothems mainly occur in the conduits of the middle level. Dating indicates that calcite deposits formed after the last deglaciation, and that the maximum growth rate was recorded during the Early Holocene. The speleothems that we analysed are not suitable for palaeoclimate investigations because of the scarce reliability of the dates and the kinetic processes that affected stable isotope fractionation during calcite precipitation. A negative trend of the $\delta^{18}\text{O}$ profile seems to indicate a general decrease in temperature since the Early Holocene, which had already been observed in other Holocene proxy data archives. An effect “amount effect” cannot be ruled out. The parallel negative trend of the $\delta^{13}\text{C}$ profiles is here interpreted as reflecting the progressive increase of the soil microbial degradation under abundant water supply. Textures indicate that seasonal contrast had diminished during Holocene and that the deposition occurred under constant drip-water supply. The climate scenario, thus, is not very different from the present climatic setting of the Alpi Apuane, where precipitation is distributed throughout the year and there is only one, very short, dry period. However, despite the low resolution of the isotopic profiles, kinetics, and dating uncertainties, we feel confident that speleothems from Grotta del Vento recorded large-scale climate trends for the Mediterranean region during the Holocene. Thus, speleothems from Grotta del Vento have the potential to provide useful information for the detailed reconstruction of local climate changes.

Parole chiave: carsismo, speleogenesi, datazioni, isotopi stabili, Alpi Apuane

Key words: karst, speleogenesis, dating, stable isotopes, Apuan Alps

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni le ricerche nel campo delle ricostruzioni paleoclimatiche hanno subito un forte impulso e molte nuove tecniche sono in via di messa a punto. Particolarmente promettenti risultano le ricerche che hanno come oggetto le concrezioni di grotta (speleotemi) effettuate attraverso sempre più sofisticate tecniche di analisi chimica, isotopica, strutturale e di datazione.

In Italia, le ricerche in questo settore sono ancora in numero limitato e riguardano soprattutto grotte dell'Italia Settentrionale (McDermott *et al.* 1999; Frisia *et al.* 2000). Questo lavoro riporta i primi risultati ottenuti su alcune concrezioni prelevate in una grotta dell'Italia Centrale, nelle Alpi Apuane, una delle aree carsiche più importanti della nostra penisola.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CLIMATICO DELL'AREA

Le Alpi Apuane si trovano nella Toscana nord-occidentale ove costituiscono una catena montuosa ben circoscritta, separata dalla dorsale appenninica principale dalla valle tettonica del Fiume Serchio. Tutta l'area presenta estesi affioramenti di rocce calcaree (i famosi marmi) e dolomitiche, intensamente carsificate.

La Grotta del Vento si trova nei pressi del paese di Fornovolasco, piccolo borgo situato ai piedi dei versanti meridionali della Pania della Croce, nel settore meridionale della catena. L'ingresso della Grotta, in origine un malagevole cunicolo percorso da una violenta corrente d'aria, si trova a quota 650 m s.l.m. lungo il Canale del Trimpello e ha coordinate geografiche: long. E 10°21'31" e lat. N 44°02'07". Non lontano si trova una celebre grotta-sorgente, la Tana che Urla, già descritta dal Vallisneri (1661-1730), originario di Trassilico – un paese non molto lontano dalla grotta in questione –, nella sua celebre *Lezione accademica intorno alla origine delle fontane*.

Le Alpi Apuane presentano caratteristiche climatiche assai particolari, legate soprattutto all'entità delle precipitazioni, assai elevate su tutto il massiccio, e all'estrema variabilità microclimatica dovuta all'orografia movimentata e alla presenza di valli profondamente incassate.

Il gruppo delle Panie è soggetto a precipitazioni molto elevate, caratterizzate da frequenti eventi di notevole intensità. In zona è presente una stazione meteorologica, nei pressi del paese di Fornovolasco, che ha registrato una precipitazione annuale media pari a 2416 mm nel periodo 1951-1995 (Piccini *et al.* 1999). Tale valore, già di per sé elevato, è probabilmente inferiore alla media delle precipitazioni nella zona di cresta e dei versanti settentrionali delle Panie, che supera quasi certamente i 3000 mm.

Nella zona non sono presenti stazioni termometriche, e un'estrapolazione delle temperature registrate nelle stazioni della Valle del Serchio, ad esempio a Castelnuovo Garfagnana, appare difficile a causa dell'accentuata microzonazione climatica. Una stima approssimativa della temperatura media del luogo si può ottenere solo dalla temperatura delle grotte, che nel caso della Grotta del Vento è di circa 10,7 °C. È però possibile che vi sia un'inversione termica locale nelle temperature medie al suolo, lungo i versanti meridionali della dorsale delle Panie, legata al fatto che le parti più basse della vallata ricevono in maniera limitata i raggi del sole per molti mesi. Tale possibilità sembra essere confermata dalla temperatura registrata in alcune grotte situate a quota superiore alla G. del Vento, che hanno valori intorno a 13 °C, nonché dalle caratteristiche della vegetazione, che in alcuni settori a quote medie presenta specie più termofile di quelle presenti nello stretto fondovalle.

Il clima presente è caratterizzato da precipitazioni abbondanti in autunno e primavera e da estati solitamente secche, ma caratterizzate da frequenti e violenti temporali, il cui contributo, in termini quantitativi, può essere anche rilevante. Vi sono buone ragioni per credere che le Alpi Apuane siano state soggette ad un clima particolarmente umido già durante il Pleistocene superiore, ipotesi che potrebbe spiegare la presenza di ghiacciai durante l'ultimo massimo glaciale a quote particolarmente basse (sino a 700 m s.l.m.) per zone situate a media latitudine e in prossimità del mare (Jaraund 1996).

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Le rocce che costituiscono i versanti meridionali del gruppo delle Panie e la parte superiore della Valle di Fornovolasco rientrano principalmente nel Complesso Metamorfico Apuano, cioè in quell'insieme di formazioni caratterizzate da un metamorfismo di basso grado, affioranti nella finestra tettonica delle Alpi Apuane (Carmignani & Giglia 1984). In questo settore sono presenti almeno tre unità tettoniche metamorfiche distinte (Nardi 1961; Carmignani *et al.* 2000).

In basso troviamo un ampio affioramento di Pseudomacigno, vale a dire del termine più giovane (Oligocene) della successione metamorfica apuana, su cui poggiano, con contatto tettonico, rocce del basamento paleozoico sormontate, per contatto stratigrafico discordante, da dolomie e calcari fittamente stratificati del Trias.

L'unità metamorfica superiore (unità delle Panie) è invece costituita prevalentemente da una sequenza di piattaforma carbonatica composta principalmente da brecce dolomitiche, dolomie cristalline, marmi dolomitici e marmi, di età compresa tra il Norico e l'Het-

tangiano, spesso circa 1000 m. Nella zona di cresta affiorano Calcari Selciferi e Calcescisti (Hettangiano).

Interposto tra le due unità inferiori e l'unità delle Panie si trova un orizzonte di brecce poligeniche con clasti prevalentemente marmorei, dolomitici e filladici immersi in una matrice calcarea fine di colore ocra, classicamente note come Calcarea Cavernosa (Bigazzi *et al.* 1988).

I motivi strutturali del Complesso Metamorfico sono legati alle complesse fasi duttili e traslative che hanno deformato la successione apuana durante l'Oligocene (Carmignani & Giglia 1984; Carmignani & Kligfield 1990). Tali deformazioni non interessano, se non marginalmente, la serie carbonatica in cui si sviluppa la Grotta del Vento, che si presenta come una successione ordinata di formazioni carbonatiche sovrapposte con giaciture concordanti, anche in unità tettoniche diverse, caratterizzate da inclinazioni variabili da pochi gradi sino a 20-25°, verso i quadranti settentrionali. La stratificazione è ben evidente, soprattutto nei livelli dolomitici, ma nel complesso poco influente sulla struttura della grotta.

La meso-fratturazione è abbastanza spinta, in particolare nei Grezzoni, mentre risulta poco apprezzabile nei livelli marmorei. La macro-fratturazione è legata alla presenza di uno o più sistemi di fratture che si manifestano con direzioni prevalenti NNE-SSW e WNW-ESE.

4. DESCRIZIONE GEOLOGICA E MORFOLOGICA DELLA GROTTA

4.1. Aspetti genetici e morfo-strutturali

L'ingresso della Grotta del Vento si apre a quota 627 ed è rappresentato da una galleria discendente con evidenti morfologie "in pressione". La galleria presenta riempimenti di detriti, ciottolami e sabbie, in gran parte asportati per permettere il passaggio ai turisti. Dopo circa 60 m di percorso si giunge ad un sifone, attualmente aggirato da una galleria artificiale, oltre il quale ci si trova alla base di un vasto ambiente verticale che risale per circa 70 m. Il pozzo è percorso da un ruscello che proviene da una diramazione orizzontale posta 90 m più in alto rispetto all'ingresso. In alto, numerosi camini drenano le acque di infiltrazione provenienti dai pendii al di sopra dell'ingresso della grotta.

Alla base di questo ambiente la galleria prosegue in direzione N, con leggera salita, presentando una serie di vani connessi da brevi tratti di piccole dimensioni. Tutta questa parte è caratterizzata da abbondante concrezionamento attivo, sotto forma di colate, stalattiti, stalagmiti e vele di diverse dimensioni. Qua è là si osservano tracce di una fase di concrezionamento precedente alla attuale.

La galleria, superata una diramazione discendente sulla sinistra, prosegue in salita sino a raggiungere una sorta di valico, oltre il quale la condotta ridiscende assumendo una sezione rotondeggiante. Si tratta di un punto di trabocco di un antico sifone, che comunque non è stato interessato da una fase prolungata di scorrimento a pelo libero, come testimoniato dalla mancanza di evidenti segni di incisione in corrispondenza della soglia.

La condotta, fortemente inclinata, scende di circa 50 m sino ad adagiarsi, presentando un tratto con riempimenti di depositi a ciottoli. Dopo uno stretto passaggio, la galleria torna ampia ma meno inclinata, raggiungendo una zona di confluenza di due torrenti sotterranei. I torrenti provengono da due diramazioni sulla sinistra percorribili per qualche decina di metri.

La galleria è ora ampia sino a 6-8 m, ma alta solo pochi metri, con il pavimento costituito da ciottolami e sabbie limose. Dopo poche decine di metri, la galleria diminuisce di dimensioni sino al punto in cui la volta si abbassa al pelo dell'acqua. Pochi metri prima, sulla sinistra, ha inizio una diramazione ascendente che si sposta di circa 200 m verso S e SW. Poche decine di metri prima del valico, lungo la galleria principale, una diramazione sulla sinistra, in discesa, porta con percorso sinuoso ad affacciarsi su di un pozzo inclinato che immette nell'ambiente terminale, poco a monte della confluenza dei due torrenti.

La grotta presenta aspetti geologici di un certo interesse, sviluppandosi al contatto tra due unità tettoniche diverse. L'ingresso della grotta si apre nelle dolomie cristalline stratificate situate al di sopra del basamento paleozoico che affiora intorno al paese di Fornovolasco (Scisti di Fornovolasco). Tutta la galleria principale, dal sifone alto sino al fondo, si sviluppa in questa formazione, che presenta banchi dolomitici di spessore metrico, spesso brecciati, nella parte inferiore, e livelli di calcari finemente stratificati e laminati, alternati a sottili livelli pelitici (filladi verdi ed ocra) e strati o lembi di strati di dolomie giallastre. Poco prima del sifone terminale, la presenza di livelli filladici di spessore decimetrico, cui si accompagnano corpi di brecce poligeniche a matrice ocrea, fa supporre la vicinanza del basamento.

I rami superiori, dopo essersi sviluppati nelle facies dolomitiche, spesso fortemente cataclate, arrivano ad intercettare il livello di brecce interposto tra unità metamorfica inferiore (Unità Apuana) e unità delle Panie (Fig. 1). Si tratta di brecce poligeniche clasto-sostenute ad elementi prevalentemente carbonatici, con matrice detritica a granulometria sabbiosa, in cui sono localmente presenti granuli filladici.

Il contrasto litologico tra dolomie inferiori e brecce ha influenzato l'andamento della grotta che in corrispondenza del contatto presenta tratti ad andamento orizzontale.

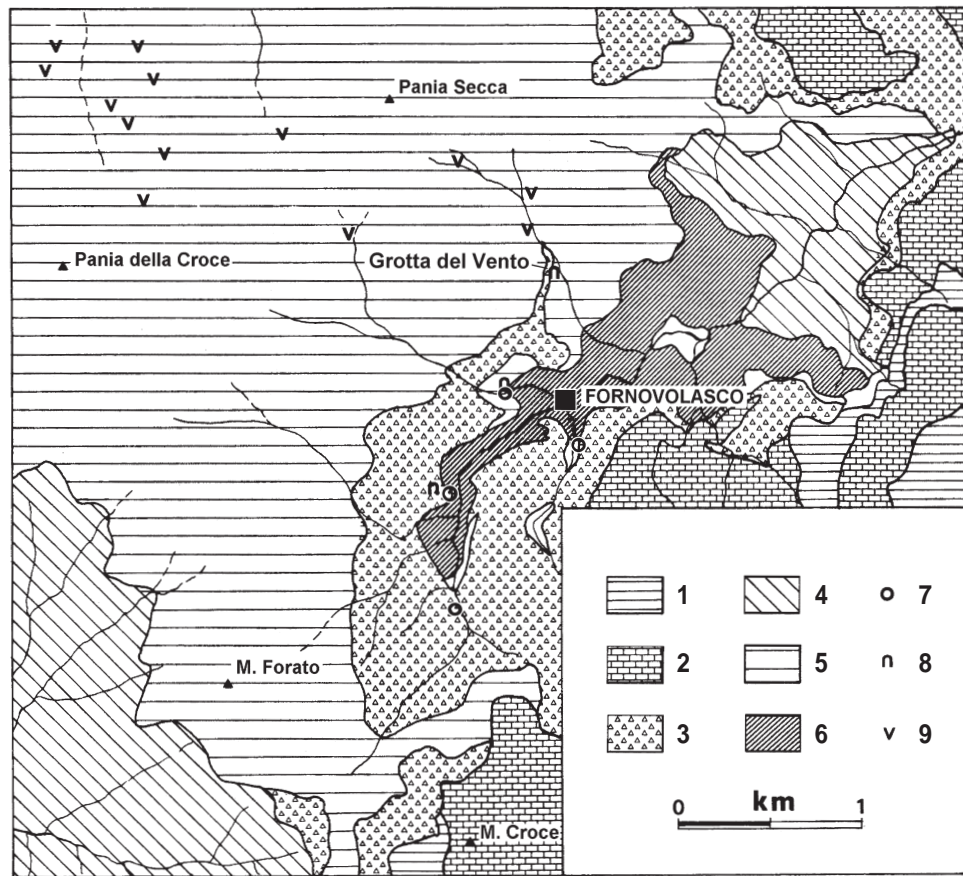


Fig. 1 - Schema geologico semplificato del gruppo delle Panie e della vallata di Fornovolasco.

Legenda: 1) formazioni argilloso-marnose della Falda Toscana; 2) formazioni calcaree della Falda Toscana; 3) Breccie poligeniche; 4) formazioni scisto-arenacee metamorfiche (Pseudomacigno e Scisti Sericitici); 5) formazioni calcareo-dolomitiche metamorfiche (Grezzoni, Marmi e Calcari Selciferi); 6) basamento paleozoico e Verrucano; 7) principali sorgenti carsiche; 8) principali grotte a sviluppo prevalentemente orizzontale; 9) principali grotte a sviluppo verticale.

Fig. 1 - Geological sketch of Panie mountain group and Fornovolasco valley. 1) shaly-marly formations of Falda Toscana; 2) calcareous formations of Falda Toscana; 3) poligenic breccias; 4) schist and metamorphic sandstone (Pseudomacigno e Scisti Sericitici); 5) metamorphic limestone and dolomite (Grezzoni, Marmi e Calcari Selciferi); 6) Paleozoic basement and "Verrucano"; 7) major karst springs; 8) major planar caves; 9) major vertical caves.

In particolare, l'orizzonte di breccie si comporta come un livello a minor permeabilità, sia nei confronti delle dolomie superiori dell'Unità delle Panie, sia delle dolomie inferiori, a causa di una minor pervasività delle fratture.

4.2. Riempimenti detritici e chimici

Da un punto di vista idrico, la grotta è molto attiva. La metà inferiore è infatti soggetta a frequenti episodi di sommersione, durante le piene, che lasciano riempimenti alluvionali di varia granulometria. Lungo i corsi d'acqua principali, verso il fondo della grotta, si trovano ciottolami e ghiaie, poco classate e con clasti di medio arrotondamento, con banchi di sabbie silico-clastiche. Nelle gallerie solo occasionalmente invase dalle acque, si trovano invece depositi di fanghi di de-

cantazione in forma di rivestimento omogeneo delle pareti e di "plastici" di forma conica.

Nella parte alta della grotta si rinvengono solo pochi riempimenti detritici di origine gravi-clastica. Nei pressi dell'ingresso è presente un deposito detritico-ciottoloso, con grossi clasti di provenienza esterna, legato ad una fase in cui la grotta ha probabilmente funzionato come inghiottitoio occasionale. In esso sono state ritrovate anche ossa di *Ursus spelaeus* riferibili all'ultimo glaciale.

Nella parte alta della grotta, quella non più oggetto di alluvionamento, sono presenti numerosi depositi di origine chimica, lasciati da stillicidi e veli d'acqua parietali. Le concrezioni si presentano in tutte le forme più tipiche, ma in genere hanno dimensioni ridotte, testimoniando un concrezionamento relativamente recente. In alcune zone sono presenti resti di un concre-

zionamento più antico, con segni di erosione da parte di acque correnti.

5. IDROLOGIA E METEOROLOGIA IPOGEA

5.1. Idrologia

La cavità presenta due vie d'acqua distinte. La prima è quella che si incontra subito dopo il sifone nei pressi dell'ingresso ed è caratterizzata da un flusso soggetto a forti variazioni che risente rapidamente delle precipitazioni. La portata è solitamente intorno a pochi l/min, ma a seguito di precipitazioni intense può superare i 5 l/s.

La seconda è quella che si incontra al fondo, e che raccoglie l'acqua di due torrenti sotterranei.

Il torrente principale ha una portata media intorno a 4-6 l/s, mentre quello minore ha una portata in genere intorno a 1-2 l/s. Durante le piene maggiori la portata complessiva può superare i 200 l/s, provocando un innalzamento del livello del sifone terminale che non è in grado di smaltire le piene maggiori. In certi casi l'acqua risale di diverse decine di metri, allagando tutta la parte inferiore della grotta.

Il punto di emergenza dell'acqua della Grotta del Vento non è noto. Considerazioni di ordine idrostrutturale e idrodinamico fanno ritenere che non si tratti delle piccole sorgenti poste sopra l'abitato di Fornovolasco, bensì di sorgenti poste a N, nella Turrite Secca (sorgente del Fontanaccio) (Piccini 2002).

5.2. Meteorologia

Come facilmente intuibile dal nome, la grotta è soggetta a un'intensa circolazione d'aria con tipico regime stagionale da ingresso basso. Allo stato attuale la circolazione è ridotta per la posa in opera di una porta in metallo, presso l'imbocco, che presenta solo piccole finestrate.

Prima degli adattamenti turistici il flusso d'aria doveva essere maggiore di quello attuale, anche se limitato alla stagione estiva a causa della chiusura, nelle altre stagioni, del sifone posto poco dopo l'ingresso. A seguito dello scavo del cunicolo che supera il sifone posto al termine della galleria d'ingresso, il flusso d'aria è ora continuo e abbastanza regolare, con ciclicità stagionale e brevi periodi di transizione caratterizzati da flussi irregolari e soggetti a frequenti inversioni. La temperatura dell'aria è mediamente intorno a 10,7 °C, con variazioni di qualche decimo di grado fra le zone superiori e quelle inferiori.

L'umidità è intorno al 100%; solo nei pressi dell'ingresso, in inverno, quando entra aria fredda con basso contenuto assoluto di vapore, si hanno fenomeni di evaporazione lungo le pareti. Tale fenomeno non doveva verificarsi frequentemente prima dell'adattamento

turistico, poiché in inverno il sifone era praticamente sempre chiuso, impedendo, di fatto, una circolazione di tipo invernale, vale a dire con aria in entrata. Tutto ciò porta a ritenere improbabile il verificarsi in passato di significativi episodi di evaporazione all'interno della grotta. La circolazione d'aria doveva infatti essere rilevante solo nel periodo estivo, quando si ha l'ingresso dall'alto di aria calda e umida, in termini assoluti, che dà luogo a fenomeni di condensazione e quindi circola in grotta pressoché in condizioni di saturazione. In inverno, quando cioè entra aria fredda e con bassa umidità assoluta dal basso, la circolazione doveva essere molto più modesta, in seguito alla frequente chiusura per sifonamento del condotto principale.

6. STUDIO DEGLI SPELEOTEMI

6.1. Descrizione dei campioni ed analisi petrografica

Nella grotta sono stati prelevati 4 campioni costituiti da carote estratte in colate di concrezione di spessore decimetrico, apparentemente attive e in accrescimento.

Il primo campione (GV1) è stato prelevato da una colata alimentata da stillicidio nella zona denominata "camino rosa" (Fig. 2) (Fig. 3). Il secondo campione (GV2) è stato prelevato da una colata sottostante alla passerella in cemento nella "Sala del Ciondolo" (Fig. 4). Il terzo campione (GV3) è stato prelevato ai piedi di una grossa e tozza stalattite bianca nella "diramazione delle meraviglie". Il quarto campione (GV4) è stato prelevato pochi metri sotto al precedente, da una colata che riveste la parete della grotta. Dei 4 cam-

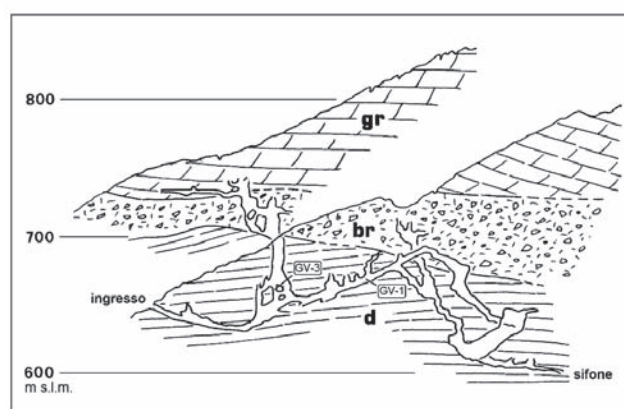


Fig. 2 - Sezione geologica schematica della Grotta del Vento. Le sigle indicano la posizione approssimativa dei campioni di concrezioni studiati: gr Grezzoni (dolomie superiori); br breccie poligeniche; d dolomie stratificate.

Fig. 2 - Geologic sketch profile of Grotta del Vento. The initials indicate the approximate location of sample sites: gr Grezzoni (upper dolomite); br poligenic breccias; d bedded dolomite.

pioni estratti ne sono stati selezionati due, il GV1 e il GV3, per le loro migliori caratteristiche petrografiche, determinate da una maggior trasparenza, un minor contenuto di impurità e una maggiore visibilità delle lamine di accrescimento. I due campioni sono stati segati longitudinalmente con due tagli, ottenendo una

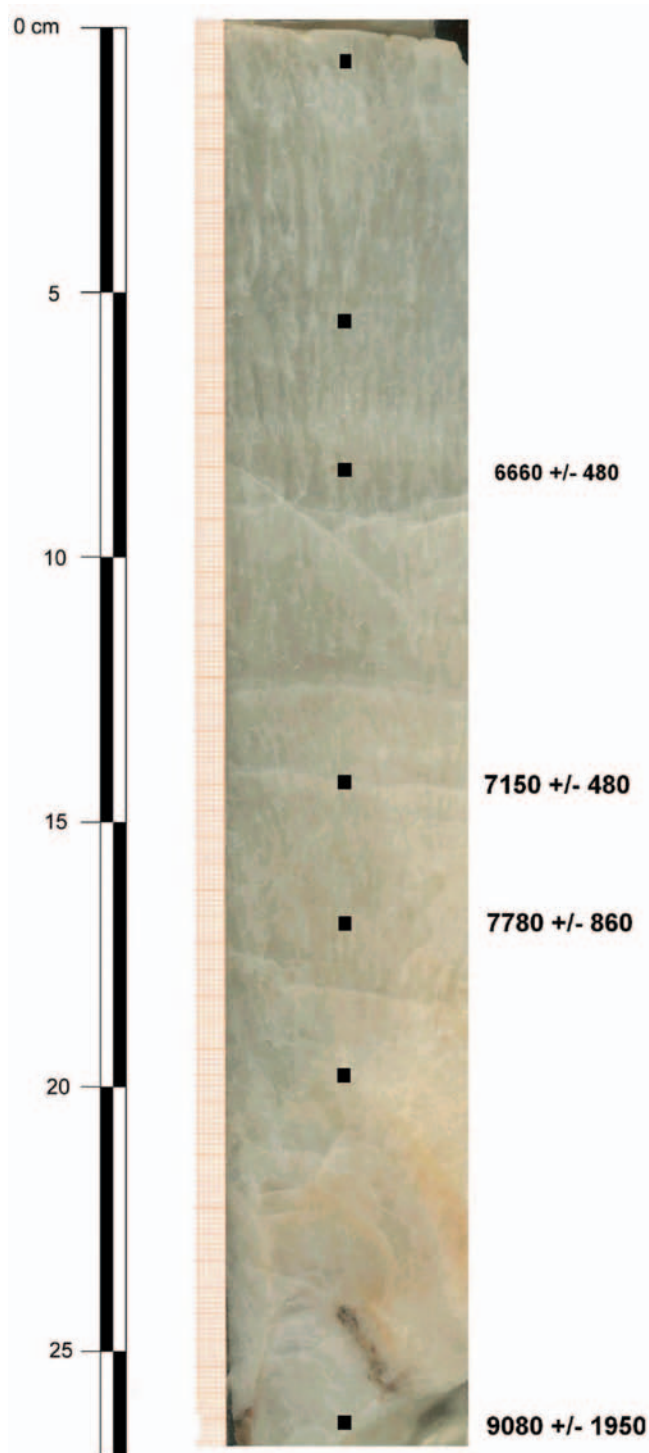


Fig. 3 - Vista della sezione tagliata del campione GV1, con la localizzazione delle datazioni.
Fig. 3 - The cut slab of sample GV1, with the location of dating sites.

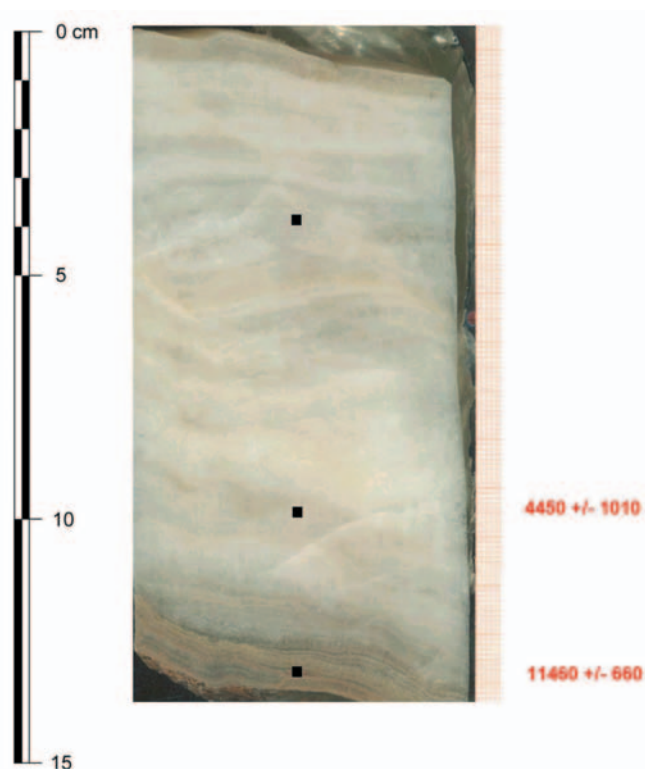


Fig. 4 - Vista della sezione tagliata del campione GV3, con la localizzazione delle datazioni.
Fig. 4 - The cut slab of sample GV3, with the location of dating sites.

lastra centrale dello spessore di circa mezzo cm e due semi-cilindri.

La carota della colata GV1, con diametro pari a 60 mm e una lunghezza misurata lungo l'asse maggiore di 264 mm, si presenta costituita da cristalli di grandi dimensioni allungati perpendicolarmente al substrato e di colore lattescente. Non si notano evidenti discontinuità o laminazioni, né cambiamenti tessiturati marcati. L'analisi petrografia in microscopia ottica conferma che la colata è composta da calcite con tessitura colonnare (Fig. 5) (Frisia *et al.* 2000) costituita da cristalli larghi da 0,1 a 0,3 mm e lunghi fino oltre 4 mm con evidenti tracce di sfaldatura. I bordi tra i cristalli, tuttavia, non sono diritti, ma presentano sia macro-scalini che concrescite laterali. Questa caratteristica determina una porosità relativamente elevata rispetto alla calcite colonnare descritta da Frisia *et al.* (2000) e simile a quella della calcite a palizzata, bianca e porosa, illustrata da Genty (1992) e da Genty & Quinif (1996) per stalagmiti moderne e fossili campionate in cavità sia naturali che artificiali del Belgio. I pori sono allungati secondo la direzione di crescita dei cristalli e i loro bordi sono irregolari. La colata GV1 non mostra alternanze all'interno dello stesso tipo di *fabric* (tessitura), cioè non è caratterizzata da variazioni regolari nella porosità o nel colore. Queste caratteristiche omogenee indicano l'assenza di inter-

ruzione nell'alimentazione dello speleotema per tutto il periodo di accrescimento, cioè disponibilità d'acqua praticamente illimitata.

Il campione GV3, che ha un diametro di 70 mm e 135 mm di lunghezza, è caratterizzato da visibili bande di accrescimento, ben evidenti soprattutto nella sua parte basale. Come si può osservare dalla figura 4, le bande basali sono messe in evidenza dall'alternanza di calcite colonnare e livelli detritici e/o ricchi in materiale organico. In sezione sottile queste bande appaiono costituite da calcite porosa da bianca a trasparente e da veli bruni, molto irregolari, che talora sottolineano le terminazioni dei cristalli di calcite i quali possono anche attraversare varie bande (Fig. 6). Queste caratteristiche indicano che la parte basale dello speleotema GV3 si è formata in condizioni di variabilità nel flusso, soprattutto per quanto riguarda l'apporto di materiale esterno. Questo ha bloccato alcuni dei siti di crescita cristallina, causando l'interruzione della continuità strutturale nella disposizione dei nuovi cristallini rispetto al substrato. Al di sopra della parte basale, la concrezione GV3 è costituita da calcite colonnare (Frisia *et al.* 2000) molto porosa, simile alla calcite a palizzata descritta da Genty (1992).

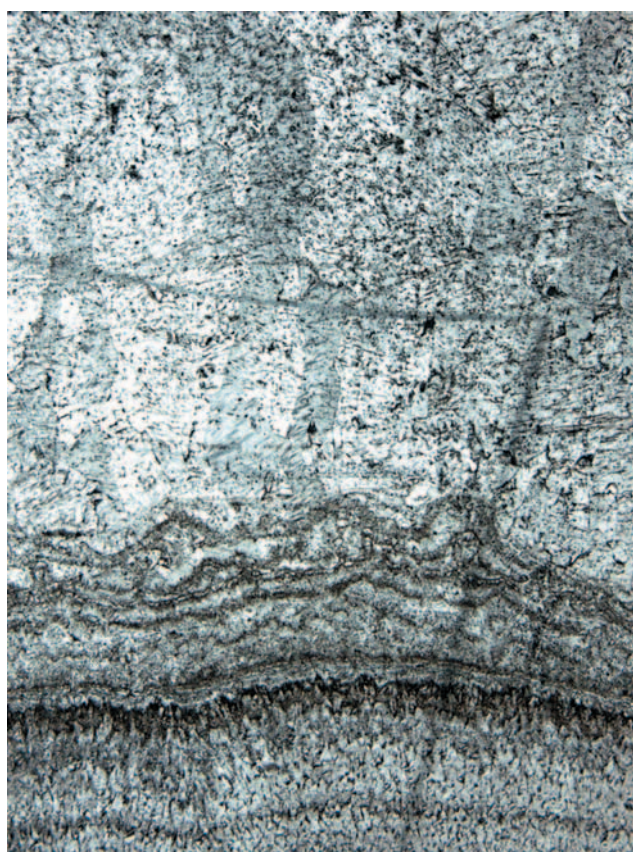


Fig. 5 - Sezione sottile a nicols incrociati dello speleotema GV1, verso l'apice del campione. Base della figura = 24 mm.
Fig. 5 - Thin section (crossed nicols) of speleothem GV1, near the top of sample. Base of the figure = 24 mm.

La porosità intercristallina è ancora più elevata che nel campione GV1, e le bande sono ondulate.

Da quanto descritto si comprende che i campioni GV1 e GV3 sono diversi dal punto di vista petrografico, pur essendo entrambi costituiti da calcite colonnare del tipo "a palizzata". Queste caratteristiche differenti sono, con tutta probabilità, da imputare all'idrologia locale, non ad aspetti climatici. La tessitura delle due concrezioni indica una formazione in condizioni di illimitata disponibilità di acqua, con una variabilità di flusso e/o di *flushing* di materiale esterno per la parte basale della concrezione GV3, forse imputabile ad un maggiore contrasto stagionale rispetto alla porzione media e terminale della stessa concrezione. Questa variabilità non esiste nella GV1, per cui, in base alle caratteristiche petrografiche, si può ipotizzare che nella GV1 manchi la parte più antica. Le datazioni radiometriche confermano questa ipotesi (cfr. Figg. 8, 9).

La tessitura colonnare bianca e porosa della calcite delle concrezioni GV1 e GV3 indica una deposizione in condizioni di clima umido, con alimentazione regolare tutto l'anno. L'assenza di coppie di lamine a calcite compatta e calcite porosa descritte da Genty &



Fig. 6 - Sezione sottile a nicols paralleli dello speleotema GV3, presso la base del campione. Base della figura = 13 mm.
Fig. 6 - Thin section (parallel nicols) of speleothem GV3, near the base of sample. Base of the figure = 13 mm.

Tab. 1 - Risultati delle analisi U/Th sullo speleotemi GV1 e GV3 (errori 2σ). Nella prima colonna, dopo la sigla del campione, le lettere B e C si riferiscono rispettivamente ai laboratori di Berna e Canberra. Nella seconda colonna sono riportate le distanze in mm dalla superficie esterna della colata. Nell'ultima colonna sono riportate le età corrette per la presenza di torio detritico; le età ritenute attendibili e utilizzate per il modello di età sono evidenziate in grassetto (vedi testo per spiegazioni).

Tab. 1 - Results of U/Th analysis on samples GV1 and GV3 (errors 2σ). In the first column, the letter B and C, after the sample code, indicates respectively the laboratory of Bern and Canberra. In the second column, the distance in mm from top is reported. In the last column, the ages are corrected in respect to the content of detritic Thorium; the ages useful for the time model are those in bold (see text for explanation).

campione	dist	U conc.	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}(t=0)$	età	età corretta
	mm	ppb	rapporto di attività				ka	ka
GV1-6_B	6	51.7 ±0.13	1.0348 ±0.0020	0.0913 ±0.0015	10.1 ±0.17	1.0359 ±0.002	10.44 ±0.24	9.58 ±0.45
GV1-55_B	55	47.9 ±0.12	1.0385 ±0.0026	0.0903 ±0.0012	6.0 ±0.09	1.0396 ±0.003	10.33 ±0.29	8.90 ±0.64
GV1-83_C	83	30.2 ±0.01	1.0500 ±0.0020	0.0720 ±0.0008	4.5 ±0.08	1.0512 ±0.002	8.16 ±0.11	6.66 ±0.48
GV1-142_B	142	42.8 ±0.12	1.0439 ±0.0026	0.0700 ±0.0020	8.5 ±0.25	1.0449 ±0.003	7.92 ±0.29	7.15 ±0.48
GV1-169_C	169	34.9 ±0.06	0.6680 ±0.0040	0.0850 ±0.0020	4.1 ±0.09	0.6587 ±0.004	9.77 ±0.36	7.78 ±0.86
GV1-197_B	197	38.9 ±0.10	1.0567 ±0.0032	0.2276 ±0.0060	5.8 ±0.16	1.0614 ±0.003	28.13 ±0.43	23.77 ±1.50
GV1-264_C	264	15.7 ±0.02	1.1610 ±0.0040	0.1380 ±0.0020	1.9 ±0.04	1.1685 ±0.004	16.60 ±0.22	9.08 ±1.95
GV3-35_C	39	28.0 ±0.12	0.7360 ±0.0080	0.0730 ±0.0020	3.0 ±0.09	0.7297 ±0.004	8.31 ±0.65	6.03 ±1.21
GV3-95_C	107	19.9 ±0.01	1.1890 ±0.0020	0.0720 ±0.0006	1.8 ±0.03	1.1934 ±0.002	8.14 ±0.10	4.45 ±1.01
GV3-Base_C	133	19.2 ±0.01	1.1930 ±0.0020	0.1180 ±0.0020	5.2 ±0.13	1.2006 ±0.002	13.67 ±0.12	11.46 ±0.66

Quinif (1996) dimostrerebbe una costante disponibilità di acqua, probabilmente legata a un'elevata capacità di immagazzinamento dell'epicarso. In questo senso, è verosimile che il segnale stagionale e annuale non sia registrato dagli speleotemi della Grotta del Vento, che risponderrebbero invece a fluttuazioni sul medio e lungo periodo nella temperatura media annua (cfr. Frisia *et al.* 2003).

Sulla sezione centrale dei due campioni sono state eseguite le indagini di spettroluminescenza, i cui risultati sono descritti in un altro contributo di questo

volume (Shopov & Stoykova 2005), mentre i due semicilindri sono serviti per le analisi degli isotopi stabili e per le datazioni.

6.2. Datazioni U/Th

Sul campione GV1 sono state eseguite 7 datazioni U/Th, mentre il secondo campione è stato oggetto di sole 3 datazioni; in entrambi i casi si sono utilizzati da 0,2 a 0,4 mg di calcite. I risultati delle analisi, eseguite con spettrometro di massa multicollettore con sorgente al plasma (MC-ICPMS) presso il Laboratorio di Geologia isotopica dell'Università di Berna (sigla _B) e presso il laboratorio di Geochimica isotopica dell'Università di Canberra (sigla _C), sono riportati nella tabella 1. Per le età si sono utilizzate le costanti di decadimento in Cheng *et al.* (2000).

Tutti i campioni mostrano un basso tenore di U, che oscilla tra 15 e 52 ppb, con un leggero trend positivo verso l'alto riscontrabile sia nel campione GV1 che in GV3. Considerato il basso rapporto $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ di tutte le analisi, sempre inferiore a 10, è stato necessario attuare una correzione per la presenza di torio detritico (vedi Tuccimei & Borsato 2005). In assenza di dati analitici si è utilizzato, per la stima del valore iniziale $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ del detrito, il valore medio crostale $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ di $0,8 \pm 0,2$. 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 superare il 20% (GV1-264_C).

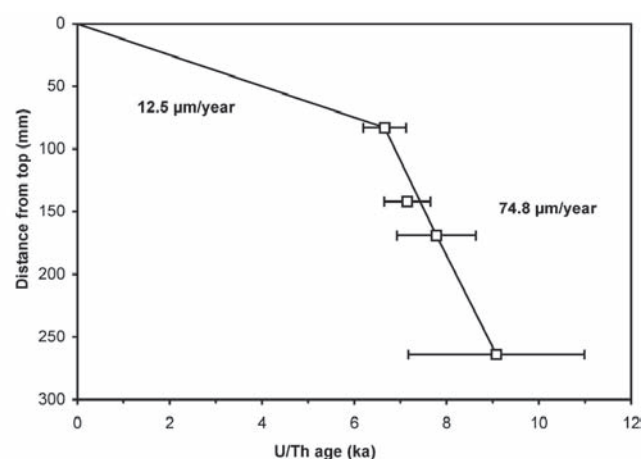


Fig. 7 - Modello di età per il campione GV1 (vedi testo per spiegazioni).

Fig. 7 - Age model of the sample GV1 (see text for explanation).

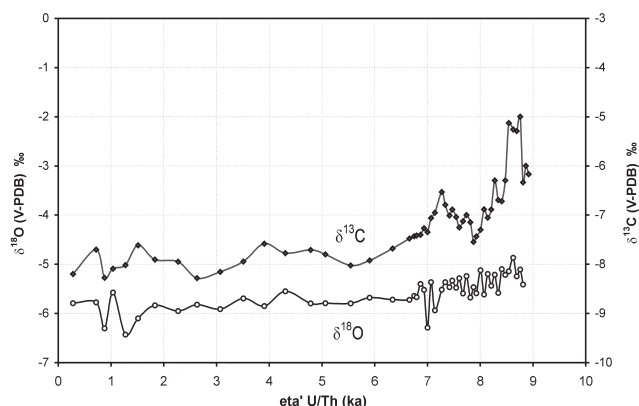


Fig. 8 - Composizione isotopica dell'ossigeno e del carbonio nel campione GV1.

Fig. 8 - Oxygen and carbon isotopic composition of sample GV1.

Per il campione GV1 alcune analisi (GV1-6 e GV-55 e GV1-197) hanno dato età incongruenti con la loro posizione stratigrafica. Ciò è probabilmente legato all'apertura del sistema con possibile lisciviazione dell'Uranio che tende ad "invecchiare" l'età calcolata. Il modello temporale è stato pertanto approntato utilizzando solamente le età in corretta posizione stratigrafica (Fig. 7) che, nell'ipotesi che l'accrescimento sia stato continuo sino ad oggi, hanno evidenziato 2 fasi di concrezionamento durante l'Olocene, caratterizzate da tassi di accrescimento assiale molto differanti: una prima fase tra $9,08 \pm 1,95$ e $6,66 \pm 0,48$ ka, con accrescimento assiale di $74,8 \mu\text{m}/\text{anno}$, cui fa seguito una seconda fase tra $6,66 \pm 0,48$ ka e oggi, con accrescimento assiale di soli $12,5 \mu\text{m}/\text{anno}$. È probabile che questa seconda fase sia stata caratterizzata anche da momenti di non deposizione, ma solamente ulteriori datazioni potrebbero provarlo.

Anche lo speleotema GV3 ha manifestato problemi di inversione di età tra i campioni GV3-35 e GV3-95, ma in questo caso, dato il numero esiguo di analisi, non è possibile stabilire quale sia il valore errato. L'intervallo di crescita, comunque, coincide parzialmente con quello dello speleotema GV1, e sembra indicare una maggior velocità di accrescimento nella parte inferiore rispetto a quella superiore; solamente la base della concrezione sembra essere più antica di qualche migliaio di anni.

6.3. Isotopi stabili

Sui due campioni selezionati sono stati prelevati con un micro-trapano campioni di polvere per le analisi isotopiche ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$). Ogni campione proviene da un foro del diametro di 1 mm e profondità di 2-3 mm, eseguito lungo l'asse centrale (direzione di crescita) delle due carote. La distanza tra un campione e il successivo varia in genere da 4 a 5 mm. La polvere

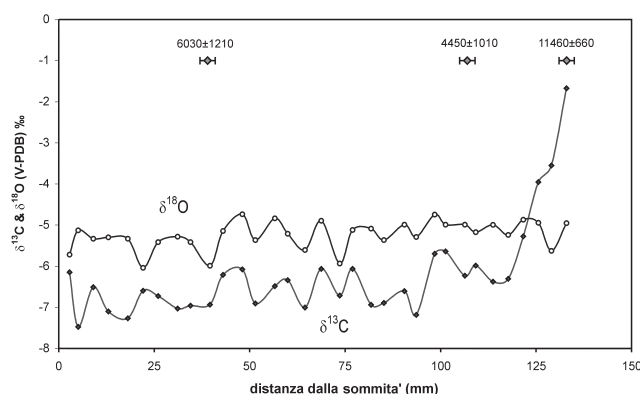


Fig. 9 - Composizione isotopica dell'ossigeno e del carbonio nel campione GV3.

Fig. 9 - Oxygen and carbon isotopic composition of sample GV3.

risultante, pari a circa 4-5 mg, è stata successivamente analizzata in spettrometria di massa seguendo la metodologia standard presso il Laboratorio di Geochimica degli Isotopi Stabili del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze.

I risultati delle analisi isotopiche sono riportati nelle figure 8 e 9. Per la concrezione GV1, applicando il modello di età illustrato nel capitolo precedente, i dati isotopici sono stati confrontati con le età calcolate (Fig. 7), mentre per la concrezione GV3, i profili isotopici sono riportati rispetto alla distanza in mm dalla sommità del campione, in quanto le datazioni effettuate non consentono di ottenere un modello di età affidabile.

Nel campione GV1 (Fig. 8), il top della concrezione ha un valore di $\delta^{18}\text{O}$ di $-5,8\text{‰}$ che, considerato il frazionamento isotopico tra calcite e acqua di percolazione alla temperatura di $10,7 \text{ °C}$ della cavità ($+1,15\text{‰}$, cfr. Hays & Grossman 1991), corrisponderebbe ad un valore dell'acqua di percolazione di $-6,95\text{‰}$. Utilizzando il valore medio annuo di $-5,51\text{‰}$ delle acque meteoriche registrate nella stazione di Pisa (Longinelli & Selmo, 2003) e considerando un gradiente altimetrico $\Delta\delta^{18}\text{O}/100\text{m} = -0,15\text{‰}$, al valore calcolato di $-6,95\text{‰}$ corrisponde una quota di infiltrazione delle acque ipogee di 950 ± 150 m, che è in sostanziale accordo con la situazione topografica del bacino di ricarica della grotta. Si può pertanto affermare che attualmente la calcite si forma in condizioni di equilibrio isotopico o che, comunque, gli effetti cinetici sono trascurabili (cfr. Frisia 2005).

Lungo tutta la concrezione si osserva una tendenza verso l'impoverimento in ^{18}O , quindi una diminuzione del $\delta^{18}\text{O}$, i cui valori variano da $-5,1\text{‰}$ (VPDB) tra 9 e 8 ka BP a circa $-6,5\text{‰}$ (VPDB) tra 2 e 1 ka BP. Nell'ultimo millennio, i valori del $\delta^{18}\text{O}$ sono un poco maggiori rispetto al millennio precedente (circa $-6,0\text{‰}$ VPDB). Le piccole oscillazioni rientrano nel-

l'errore strumentale, mentre le uniche perturbazioni significative sono due episodi con $\delta^{18}\text{O}$ minore tra 7,0 e 7,2 ka e tra 1 e 1,4 ka. Utilizzando i criteri descritti da McDermott *et al.* (1999) per l'interpretazione dei trend del $\delta^{18}\text{O}$ in calciti di concrezioni ipogee (vedi Frisia 2004), si può ipotizzare che l'andamento negativo del $\delta^{18}\text{O}$ tra 9 e 1 ka BP indichi un generale raffreddamento nell'area Mediterranea. Ci sono molte evidenze di un generale declino delle temperature durante l'Olocene sia alle alte che alle medie latitudini (Bradley *et al.* 2003), ed è confortante che questo trend sia osservabile anche alla Grotta del Vento. Gran parte dei dati proxy per l'Emisfero Settentrionale sembrano indicare condizioni di clima caldo per la prima metà dell'Olocene, e in seguito un declino delle temperature culminato nella Piccola Età Glaciale, probabilmente il periodo più freddo di tutto l'Olocene. Purtroppo, la scarsa risoluzione temporale dei dati isotopici e le incertezze nelle età impediscono di ricostruire l'evoluzione climatica degli ultimi mille anni, quindi di osservare se la Piccola Età Glaciale sia contraddistinta o no da una diminuzione del $\delta^{18}\text{O}$. Malgrado la scarsa risoluzione e l'imprecisione nella scala temporale, possiamo dire che la Grotta del Vento registra fedelmente il raffreddamento della SST oceanica e mediterranea (sorgenti del vapore d'acqua) dell'Olocene Medio e i cambiamenti di circolazione globale. Questo è confortante per il futuro dell'indagine paleoclimatica nelle Apuane.

Il profilo del $\delta^{13}\text{C}$ è caratterizzato da una tendenza verso l'impoverimento in ^{13}C passando da -5,2‰ (VPDB) intorno a 8,6 ka BP a valori dintorno a -8,2‰ (VPDB) nell'ultimo millennio. In particolare si osservano due chiari picchi positivi tra 8,9 e 8,5 ka e tra 7 e 7,4 ka, mentre la scarsa risoluzione dell'intervallo tra 0 e 6,6 ka non permette di riconoscere possibili cambiamenti ambientali. I picchi positivi del $\delta^{13}\text{C}$ nell'Olocene inferiore sono caratteristici di altre stalagmiti, ad esempio di quella di Carburangeli (Madonia *et al.* 2005), o di quella di Crag Cave (McDermott *et al.* 1999) e potrebbero essere legate a cambiamenti nel sistema oceano-atmosfera in un contesto climatico di tipo ancora glaciale.

Il trend negativo del $\delta^{13}\text{C}$ durante l'Olocene è registrato anche da altre stalagmiti italiane, come quella della Grotta di Ernesto nelle Prealpi Trentine (McDermott *et al.* 1999) e quelle della Grotta di Frasassi, nell'Appennino Marchigiano (Tuccimei & Borsato 2005); tuttavia, questi record mostrano una chiara risalita del $\delta^{13}\text{C}$ negli ultimi 1500 anni, non osservabile in GV1, anche se ancora una volta dobbiamo sottolineare l'incertezza nelle datazioni. In alternativa, si può ipotizzare una diversa utilizzazione del territorio nelle Apuane, molto più aspre dell'Altopiano di Asiago o della zona di Frasassi, in epoca Medievale.

L'andamento generale dei profili di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ nel campione GV3 è simile a quello della concrezione

GV1, sebbene le poche datazioni attendibili non permettano una precisa correlazione cronologica tra le due serie. Il ^{18}O è caratterizzato da un *trend* negativo per tutto l'Olocene, mentre il $\delta^{13}\text{C}$ mostra una netta e consistente diminuzione nei primi 20-25 mm a partire dalla base e una diminuzione assai più blanda nella restante parte, con un leggero aumento verso la fine.

Questo comportamento del $\delta^{13}\text{C}$, unito alle caratteristiche petrografiche della concrezione, che alla base si presenta fittamente laminata e poi costituita da calcite colonnare "a palizzata" molto porosa, permette di ipotizzare che nei primi 15-20 mm la velocità d'accrescimento media sia stata nettamente inferiore, per la presenza di una o più interruzioni, condensando quindi in poco spazio una tendenza negativa del carbonio imputabile ad un generale aumento dell'attività biologica al passaggio tra Pleistocene Superiore ed Olocene ("tardiglaciale"). In seguito, il suolo si sarebbe stabilizzato. La caratteristica più importante dei profili isotopici del campione GV3, tuttavia, è la covarianza tra $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ (con variazioni dell'ordine dell'1 ‰ in senso positivo), che non è stata osservata in GV1. La covarianza tra isotopi dell'ossigeno e del carbonio in una concrezione è un chiaro indice di effetti cinetici da imputarsi alla combinazione di evaporazione e degassamento: in queste condizioni la calcite precipita in disequilibrio isotopico (Frisia 2005). In una grotta ventilata, quale la Grotta del Vento, ci si aspetterebbe di trovare disequilibrio isotopico. È interessante che solo una concrezione sia stata soggetta all'influenza di correnti d'aria. Quindi, stalagmiti o colate in zone protette della grotta, o caratterizzate da forte alimentazione quali la colata GV1, possono preservare segnali non alterati dalla cinetica.

7. CONCLUSIONI

La Grotta del Vento di Fornovolasco rappresenta una cavità di origine freatica che ha funzionato in passato da sorgente carsica (Piccini 1992, 1994, 1998). I fenomeni di concrezionamento interessano soprattutto il livello intermedio di gallerie, che, dopo una breve fase a pieno carico iniziale, si sono sviluppate prevalentemente in condizioni vadose, approfondendosi in forma di forra nel tratto compreso tra gli antichi sifoni di trabocco interno e il sifone d'ingresso (Piccini 1992). Questo significa che, in teoria, il concrezionamento può avere avuto già inizio quando la grotta era ancora attiva come sorgente. È possibile che i residui di concrezioni più antiche, ed ora quasi completamente erosi, siano riferibili a questa fase epifreatica.

Le datazioni eseguite indicano che il concrezionamento attuale ha avuto inizio in tempi relativamente recenti, e certamente postglaciali. Il ritrovamento di ossa di *Ursus spelaeus* nei depositi dell'ingresso dimostra che durante l'ultimo glaciale la grotta era ormai quasi completamente inattiva, almeno nella

parte alta. In altre parole il concrezionamento attuale, sviluppato prevalentemente durante l'optimum climatico tra Olocene inferiore e medio, si è formato ben dopo l'attivazione delle catture sotterranee che hanno disattivato la grotta. Ciò non toglie che durante eventi eccezionali la grotta possa aver ancora funzionato da troppo-pieno.

L'elevato tenore di Torio detritico riscontrato nelle concrezioni campionate potrebbe essere attribuito a periodiche sommersioni, con deposizione di materiale sopra le concrezioni; la stessa spiegazione potrebbero avere i valori ben inferiori all'unità del rapporto $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ riscontrati in due analisi, imputabili a probabili fenomeni di lisciviazione.

La grotta, al di là delle prerogative morfologiche e dell'abbondanza di concrezioni, si è dimostrata quindi non del tutto idonea a questo tipo di studi, non rendendo possibile un'interpretazione accurata, in chiave paleoclimatica, delle analisi isotopiche svolte sui due campioni.

La generale tendenza negativa dei valori del $\delta^{18}\text{O}$ durante l'Olocene sembrerebbe indicare che la Grotta del Vento registri un declino delle temperature già osservato in altre serie di dati proxy. È possibile che vi sia anche un effetto dovuto all'aumento della piovosità (*amount effect*). Tuttavia, è noto che la piovosità media annua è diminuita in tutta l'area del Mediterraneo a partire da circa 7000 anni BP (Bar-Matthews *et al.* 1997). Dato che il trend negativo del $\delta^{18}\text{O}$ continua nell'Olocene medio, escludiamo che la sua diminuzione nella GV1 (e nella GV3) indichi un aumento della piovosità alla scala dell'area mediterranea.

Le tendenze negative dei profili del $\delta^{13}\text{C}$ nelle GV1 e GV3 possono essere interpretate come il progressivo aumento dell'attività di degradazione batterica nel suolo in un contesto di disponibilità d'acqua illimitata.

Le osservazioni petrografiche sembrano confermare che la GV3 contenga una parte del Pleistocene Superiore assente nella GV1. In questa porzione più antica, si notano evidenze di un forte contrasto stagionale, marcato da lamine con detrito e materia organica. Queste impurità probabilmente provenivano dal suolo in formazione durante episodi di dilavamento. La nostra ipotesi è in accordo con quanto predetto dalle periodicità del forzante orbitale, per cui alla fine del Pleistocene e all'inizio dell'Olocene la Terra era in perielio durante l'estate dell'emisfero settentrionale, con conseguente aumento dell'insolazione e del contrasto stagionale (Bradley *et al.* 2003). Per il restante Olocene, l'indagine tessiturale delle due concrezioni indica una diminuzione del contrasto stagionale e la deposizione in un contesto di disponibilità d'acqua praticamente illimitata e flusso delle acque di percolazione costante. Queste informazioni ci sembrano coerenti con il quadro climatico attuale delle Apuane, caratterizzato da una piovosità distribuita durante tutto l'anno, con temporali estivi in grado di ricaricare

l'accumulo sottocutaneo dell'epicarso anche nella stagione più secca. Tuttavia, non si esclude che la natura del substrato roccioso possa omogeneizzare il segnale stagionale. In conclusione, malgrado la scarsa risoluzione dei profili isotopici, i fenomeni di cinetica nella GV3, e le datazioni problematiche, possiamo dire che gli speleotemi della Grotta del Vento registrano i trend climatici globali dell'Olocene e, quindi, sarebbero potenzialmente utilizzabili anche per ricostruzioni più dettagliate della variabilità climatica in una zona strategica per le riserve idriche della penisola italiana.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il personale della Grotta del Vento di Fornovolasco, e in particolare Vittorio e Marco Verole Bozzello, per aver permesso il prelievo dei campioni e per l'indispensabile aiuto nella scelta dei punti in cui eseguire i carotaggi. 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.
- Bigazzi G., Di Pisa A., Gattiglio M., Meccheri M., Norelli P., 1988 - La struttura cataclastico-milonitica di Foce di Mosceta, Alpi Apuane sud-orientali (M. Corchia, Gruppo delle Panie). *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., s. A*, 95: 105-116.
- Bradley R.S., Briffa K.R., Cole J., Huges M.K. & Osborn T.J., 2003 - The climate of the Last Millennium. In: Alvenson K.D., Bradley R.S. & Pedersen T.F. (a cura di), *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Springer, Berlin-Heidelberg: 105-141.
- Carmignani L. & Giglia G., 1984 - Autoctono Apuano e Falda Toscana: sintesi dei dati e interpretazioni più recenti. *Soc. Geol. Ital., vol. Giubil.*: 199-214.
- Carmignani L. & Kligfield R., 1990 - Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex. *Tectonics*, 9, 6: 1275-1303.
- Carmignani L., Conti P., Disperati L., Fantozzi P.L., Giglia G. & Meccheri M., 2000 - Carta geologica del Parco delle Alpi Apuane. 1:50.000. Se.l.ca, Firenze.
- 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.

- Frisia S., 2005 - 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., Preton 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.
- 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.
- Hays P.D. & Grossman E.L., 1991 - Oxygen isotopes in meteoric calcite cements as indicators of continental paleoclimate. *Geology*, 19: 441-444.
- Jaraud E., 1996 - Les traces glaciaires exceptionnellement basses d'une moyenne montagne méditerranéenne: les Alpes Apuanes (Toscane, Italie Centrale). *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, 38-39: 71-81.
- 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., 2005 - 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.
- Nardi R., 1961 - Geologia della zona tra la Pania della Croce, Galliciano e Castelnuovo Garfagnana (Alpi Apuane). *Boll. Soc. Geol. It.*, 80: 257-334.
- Piccini L., 1992 - I fenomeni carsici delle Alpi Apuane e il loro sviluppo in rapporto all'evoluzione paleogeografia. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze (inedita).
- Piccini L., 1994 - Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana - Italia). *Natura Bresciana*, 30: 45-85.
- Piccini L., 1998 - Evolution of karst in the Alpi Apuane (Italy): Relationships with the morphotectonic history. *Suppl. Geogr. Fis. Din. Quat.*, III, t. 4: 21-31.
- Piccini L., 2002 - Acquiferi carbonatici e sorgenti carsiche delle Alpi Apuane. Atti Conv. "Le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo", Forno (Massa), 22 Giugno 2002: 41-76.
- Piccini L., Pranzini G., Tedici L., Forti P. (1999) - Le risorse idriche dei complessi carbonatici del comprensorio apuo-versiliese. *Quad. Geol. Appl.*, 6-1: 61-78.
- Shopov Y.Y. & Stoykova D., 2005 - Luminescence of Speleothems in Italian Caves (in questo volume).
- Tuccimei P. & Borsato A., 2004 - Il metodo $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ applicato alla datazione degli speleotemi. Evoluzione delle tecniche analitiche (in questo volume).