

Variabilità climatica nel Tardiglaciale e nell'Olocene da dati di speleotemi lungo una traversa N-S in Italia

Ugo SAURO^{1*}, Andrea BORSATO², Silvia FRISIA², Giuliana MADONIA³, Leonardo PICCINI⁴, Paola TUCCIMEI⁵, Dario CAMUFFO⁶, Franco CUCCHI⁷, Paolo FORTI⁸, Tommaso MACALUSO[†], Renza MIORANDI², Mauro PALADINI⁴, Roberto SALZANO⁵, Yavor SHOPOV¹⁰, Christoph SPÖTL⁹, Diana STOYKOVA¹⁰ & Luca ZINI

¹Dipartimento di Geografia, Università di Padova, Via del Santo 26, I-35123 Padova

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

³Dipartimento di Geologia e Geodesia, Università di Palermo, Corso Tukory 131, I-90134 Palermo

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

⁵Dipartimento di Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", L.go S.L. Murialdo 1, I-00146 Roma

⁶Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Corso Stati Uniti 4, I-35127 Padova

⁷Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università di Trieste, Via Weiss 2, I-34127 Trieste

⁸Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 67, I-40126 Bologna

⁹Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck (Austria)

¹⁰Faculty of Physics, University of Sofia, James Baucher 5, Sofia 1164, Bulgaria

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: ugo.sauro@unipd.it

RIASSUNTO - *Variabilità climatica nel Tardiglaciale e nell'Olocene da dati di speleotemi lungo una traversa N-S in Italia* - Sono presentati e discussi alcuni dei principali risultati del progetto di ricerca nazionale (PRIN). Speleotemi di alcune grotte scelte dell'Italia settentrionale, centrale e meridionale sono stati studiati con diverse tecniche e datati in spettrometria di massa con il metodo U/Th. In generale, la velocità di accrescimento dopo aver raggiunto una massima velocità durante la prima parte dell'Olocene decresce sensibilmente. Si può notare come esista un'interrelazione tra temperatura media della grotta e velocità di accrescimento. I cambiamenti del $\delta^{13}\text{C}$ mostrano un trend generalmente negativo, soprattutto durante il Tardiglaciale e la prima parte dell'Olocene. Soltanto durante gli ultimi 2 ka si nota un'inversione verso valori tendenzialmente positivi. I cambiamenti nel $\delta^{18}\text{O}$ degli speleotemi delle grotte Savi (TS) e Frasassi (AN) mostrano un trend prevalentemente positivo durante l'Olocene (valori compresi tra -5 e -10 ‰); al contrario il trend della stalagmite delle Grotte di Carburangeli (PA) è negativo. La luminescenza eccitata da laser degli speleotemi della grotta Savi mostra i suoi massimi nella prima parte dell'Olocene, probabilmente in relazione con lo sviluppo di suoli forestali. I valori più bassi sono quelli degli ultimi 1,5 ka. Da uno sguardo d'insieme, i dati sono in accordo con le conoscenze sui cambiamenti climatici in Italia durante il Tardiglaciale e l'Olocene. Emergono tuttavia alcuni dati problematici che suggeriscono ulteriori ricerche.

SUMMARY - *Climatic changes in Italy during the Lateglacial and Holocene from speleothems records: a North-South traverse* - Some of the main result of a national research project (PRIN) are here presented and discussed. The speleothems of some selected caves of northern, central and southern Italy have been studied with different techniques and dated by U/Th mass spectrometry. In general, the growth rate shows a decrease during the middle and upper Holocene in all caves. A relationship between the annual growth rate and the cave mean annual temperatures seems evident. The $\delta^{13}\text{C}$ changes show a generally negative trend, with a main slope during the Lateglacial and the first part of Holocene. Only during the last 2 ka an inversion towards more positive values is occurring. The $\delta^{18}\text{O}$ changes of the speleothems from Savi (TS) and Frasassi (AN) cave, show a mainly positive trend during the Holocene (range of values between -5 and -10‰); on the contrary the trend of Carburangeli cave (PA) stalagmite is negative. The laser induced luminescence of the speleothems of Savi cave shows the highest values during the first part of the Holocene probably influenced by the soil and forest development. The lowest values are those of the last 1.5 ka. From an overall view, these data seem to fit with the present day knowledge of the climatic and environmental changes of Italy. Nevertheless some problematic aspects arise suggesting further research work.

Parole chiave: speleotemi, datazioni U/Th, paleoclima, Olocene, isotopi stabili, Italia

Key words: speleothems, U/Th dating, paleoclimate, Holocene, stable isotopes, Italy

1. INTRODUZIONE

I risultati emersi dalla ricerca 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” (vedi Borsato *et al.* 2005; Madonia *et al.* 2005; Piccini *et al.* 2005; Stoykova *et al.* 2005; Tuccimei *et al.* 2005, Camuffo *et al.* 2005) permettono di effettuare una prima ricostruzione regionale dell’evoluzione climatica nel corso del Tardiglaciale-Olocene in Italia, e costituiscono una base di partenza per ulteriori sviluppi della ricerca paleoclimatica nel Mediterraneo. I dati della ricerca nel loro insieme formano un *database* importante a disposizione non solo degli studiosi di clima e modellistica climatica, ma anche di coloro che si occupano di gestione del territorio a vari livelli, incluso l’aspetto economico. Si tratta di molte migliaia di dati di tipo numerico e di un gran numero di immagini di sezioni di concrezioni fotografate in condizioni di luce diversa, anche di luminescenza eccitata da fasci laser, provenienti da speleotemi dalle grotte Savi (TS), Grotta del Vento (LU), Grotta di Frasassi, (AN), e Grotta di Carburangeli (PA) (Fig. 1).

I dati, nell’insieme, rivelano un quadro simile per quanto riguarda l’andamento del clima dal Tardiglaciale a oggi a scala pluri-millennaria dal



Fig. 1 - Ubicazione delle grotte studiate.
Fig. 1 - Location of the studied caves.

nord al sud della Penisola, mentre a scala secolare si possono notare risposte diverse, possibilmente legate a fattori locali, compresi quelli connessi al tipo di uso del suolo.

Il quadro di riferimento che si può ricavare dall’analisi della bibliografia è certamente complesso. Molti lavori affrontano il tema delle variazioni climatiche durante l’Olocene in Italia e nel Mediterraneo. Ci limitiamo qui a sintetizzare il quadro che emerge da un lavoro recente (Nicole Petit Maire 2004) che tratta in modo articolato il tema. Secondo questo studio dopo l’ultima deglaciazione, attorno a 9ka BP inizia in Europa e nel Vicino Oriente una fase di attività fluviale e di deposizione alluvionale molto intensa, connessa con il cambiamento climatico. Questo periodo più mite e umido dura circa 3 ka e fornisce condizioni molto favorevoli allo sviluppo delle comunità umane che iniziano a stabilire insediamenti evoluti e stabili. Fino a circa 7 ka BP il clima del Nord Africa è decisamente meno arido che nel presente, con fiumi stagionali e laghi con ricche comunità biologiche. Tra 6 e 4 ka BP si instaura la fase di aridità nel Nord Africa e nel Vicino Oriente, con possibili estensioni sino al Mediterraneo Centrale, e, quindi, alla Sicilia, che raggiunge un culmine tra 4 e 3,5 ka BP circa. Siccità e carestie possono essere alla base delle ondate migratorie verso territori climaticamente migliori, in grado di fornire sostentamento anche a nuove popolazioni, e del collasso di alcune società che si erano andate strutturando in una organizzazione statale complessa, quale l’impero Accadico. In questo stesso periodo nella Penisola Arabica l’influenza del monzone dell’Oceano Indiano si attenua, a causa, probabilmente, della diminuita insolazione; di conseguenza alcune culture pastorali accentuano il nomadismo. Questo clima secco e caldo si spinge anche verso l’Italia, dove i pollini arborei si riducono fortemente attorno 3,7 ka BP e i corsi d’acqua e i laghi segnano un minimo di livello attorno 2,5 ka BP. Tuttavia, fra le cause di queste variazioni climatiche e ambientali non è sempre facile separare quelli che sono gli agenti forzanti del clima di tipo naturale da quelle che sono le conseguenze dell’impatto umano sugli ecosistemi. Così gli effetti dell’inaridimento tra circa 4 e 3,5 ka BP potrebbero essere stati accentuati dall’impatto umano sugli ecosistemi naturali della regione Medio Orientale e Mediterranea. Infatti, in quel periodo la foresta mediterranea fu estensivamente bruciata per destinare i suoli alla pastorizia e all’agricoltura.

Tenuto conto di questo complesso quadro di riferimento, il presente articolo sintetizza i risultati emersi in questa prima ricerca sulla variabilità climatica nell’Olocene, ricostruita da stalagmiti per tutta l’Italia, e propone possibili sviluppi futuri.

2. DATAZIONI RADIOMETRICHE E VELOCITÀ DI ACCRESCIMENTO ASSIALE

Le datazioni costituiscono la base di partenza della ricostruzione paleoclimatica da stalagmiti. Le datazioni U/Th, usate per ottenere la cronologia dell'evoluzione dei dati indiretti (*proxy*) ricavati dalle stalagmiti, sono state problematiche a causa del bassissimo contenuto medio di uranio, che solamente per la stalagmite della grotta Savi supera le 100 ppb (FR3: 26,9±9 ppb; GV3: 37,4±12 ppb; CR1: 53,5±12 ppb; SV1: 174,8±19 ppb). Inoltre, tutte le concrezioni hanno manifestato problemi di contaminazione più o meno intensa da Th detritico che hanno reso necessarie correzioni talora significative. Dal basso contenuto in uranio sono derivati anche problemi di apertura del sistema, come nel caso della Grotta di Frasassi dove le inversioni di età sembra possano essere spiegate con fenomeni di mobilizzazione dell'uranio (Tuccimei *et al.* 2005). Per la parte più recente, a questi problemi si è unito il fatto che le velocità di accrescimento negli ultimi 5000 anni sono solitamente molto ridotte, ad ec-

Tab. 1 - Velocità medie di accrescimento assiale (mm/ka) delle stalagmiti delle grotte di Carburangeli (CR1), Frasassi FR3, Grotta del Vento (GV1), Savi (SV1). È riportata anche la velocità di accrescimento della stalagmite ER76 della Grotta di Ernesto in Trentino (McDermott *et al.* 1999). In grassetto è evidenziato il tasso di crescita più elevato di ciascuna stalagmite. ⁽¹⁾ Inizio a 9737 anni BP; ⁽²⁾ inizio a 9080 anni BP; ⁽³⁾ inizio a 9670 anni BP.

Tab. 1 - Mean axial growth rates (mm/ka) for the four studied stalagmites from Grotta di Carburangeli (CR1), Grotte di Frasassi (FR3), Grotta del Vento (GV1) e Grotta Savi (SV1) and for the stalagmite ER76 from Grotta di Ernesto in Trentino (McDermott *et al.* 1999). In bold the maximum axial growth rates for each stalagmite. ⁽¹⁾ Growth started at 9737 years BP; ⁽²⁾ growth started at 9080 years BP; ⁽³⁾ growth started at 9670 years BP.

Intervallo temporale	Stalagmiti				
	CR1	FR3	GV1	SV1	ER76
0-2 ka	61.5	30.5	12.5	10.4	18.8
2-4 ka	182.0	27.7	12.5	13.1	29.3
4-6 ka	0.0	34.4	12.5	20.1	50.0
6-8 ka	191.7	57.7	54.4	14.6	60.1
8-10 ka	57.5 ⁽¹⁾	120.0	74.1 ⁽²⁾	38.0	31.1 ⁽³⁾
10-12 ka		73.3		14.7	
12-14 ka				6.2	
14-16 ka				9.7	
Media nel periodo 0-10 ka	98.4	54.0	26.4	19.2	36.8

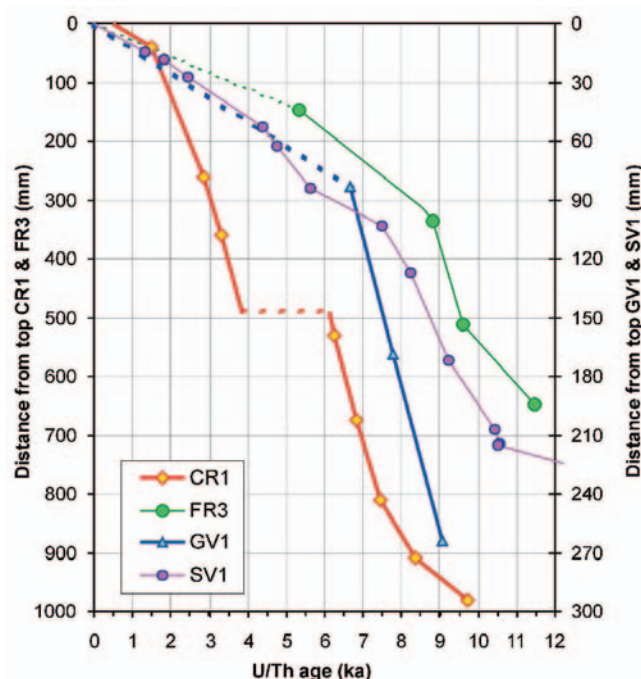


Fig. 2 - Velocità di accrescimento assiale delle stalagmiti delle grotte di Carburangeli CR1(PA), Frasassi FR3 (AN), del Vento GV1 (LU) e Savi SV1 (TS). Gli indicatori di ciascuna serie rappresentano le datazioni U/Th, mentre le linee tratteggiate evidenziano periodi di non crescita (CR1) o intervalli di tempo per i quali le poche datazioni disponibili non permettono una ricostruzione precisa dei tassi di accrescimento (GV1 e FR3).

Fig 2 - Axial growth rates for the stalagmites from Grotta di Carburangeli (CR1), Grotte di Frasassi (FR3), Grotta del Vento (GV1) e Grotta Savi (SV1). The symbols in each curve represent the U/Th samples, while the dotted lines mark periods of non-deposition (CR1) or intervals with poor age constraints (GV1 and FR3).

cezione della stalagmite della Grotta di Carburangeli (vedi Tab. 1), e ciò ha comportato una scarsa risoluzione per le serie isotopiche.

2.1. Età e velocità di accrescimento assiale

Nelle grotte oggetto di studio, dopo l'ultima glaciazione, il concrezionamento è ripreso nell'Olocene inferiore, come osservato anche nel sito prealpino della Grotta di Ernesto in Trentino (McDermott *et al.* 1999). Solamente le stalagmiti delle grotte Savi e Frasassi registrano una parte del Tardiglaciale, (Fig. 2, Tab. 1) probabilmente a causa della loro minor sensibilità alle condizioni climatiche più severe nell'intervallo tra 17 e 11,5 ka.

La stalagmite più antica è quella della Grotta Savi (SV1) che iniziò a formarsi 16,8±0,51 ka B.P (Borsato *et al.* 2005). La sua crescita assiale è rimasta molto bassa, solitamente al di sotto di 10 µm/anno, fino a 10,67±0,22 ka. Nell'intervallo tra ~10,67 e ~7,59 ka

si registrarono i tassi di crescita più elevati, compresi tra 30 e 44 $\mu\text{m}/\text{anno}$. Un secondo episodio di crescita veloce (tra 23 e 29 $\mu\text{m}/\text{anno}$) avvenne tra ~5,71 e ~4,44 ka, dopodiché la crescita è rallenta per assestarsi, nell'ultimo intervallo, intorno a 11 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

Non si conosce invece con esattezza l'inizio della formazione della stalagmite FR3 delle grotte di Frasassi, in quanto la parte basale della concrezione non si è potuta datare, in quanto alterata (Tuccimei *et al.* 2005). Certamente la crescita iniziò prima di 12 ka, con una fase di accrescimento veloce (227 $\mu\text{m}/\text{anno}$) tra 9,63 \pm 1,06 e 8,84 \pm 0,49 ka. Quindi, si verificò una 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 seguirono tassi di crescita tra 23 e 31 $\mu\text{m}/\text{anno}$ per i restanti 5350 anni.

Nella stalagmite della Grotta del Vento (GV1) la prima fase di crescita tra 9,08 \pm 1,95 e 6,66 \pm 0,48 ka ebbe accrescimento assiale di 74,8 $\mu\text{m}/\text{anno}$ cui seguì una seconda fase tra 6,66 \pm 0,48 ka e oggi, con accrescimento assiale di soli 12,5 $\mu\text{m}/\text{anno}$ (Piccini *et al.* 2005). È probabile che questa seconda fase sia stata caratterizzata anche da momenti di non deposizione.

La stalagmite CR1 della Grotta di Carburangeli iniziò a formarsi poco dopo 10 ka (Madonia *et al.* 2005). La base della stalagmite, tra 9,74 e 8,35 ka, è caratterizzata da un tasso di crescita assiale ridotto, di soli 51 $\mu\text{m}/\text{anno}$, mentre l'accrescimento più elevato (tra 206 e 252 $\mu\text{m}/\text{anno}$) caratterizza l'intervallo tra 7,46 e 6,23 ka. Successivamente si verificò un lungo intervallo di non deposizione tra 6,1 e 3,85 ka. Tassi di accrescimento assiale intorno a 200 $\mu\text{m}/\text{anno}$ caratterizzarono l'intervallo tra 3,85 e 1,47 ka, dopodiché la crescita rallentò fortemente a meno di 50 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

Per tutte le stalagmiti si verifica, come già osservato per gli speleotemi studiati in precedenza, un notevole rallentamento nelle velocità di accrescimento durante l'Olocene inferiore o medio, a seconda delle concrezioni. Questa variazione dei tassi di accrescimento è probabilmente dovuta alla concomitanza di fattori climatici e antropici. Infatti, i cambiamenti determinati dall'impatto umano sugli ambienti carsici del bacino mediterraneo – consistenti nel disboscamento praticato prevalentemente con gli incendi e nell'uso del suolo per il pascolo degli ovini o per colture agrarie – ha portato in molte aree ad una forte erosione del suolo con conseguente desertificazione espressa da un aumento della rocciosità dei versanti. È noto che in ambiente forestale l'elevata produzione di CO_2 nel suolo favorisce la dissoluzione della roccia sottostante e la conseguente riprecipitazione del carbonato di calcio nelle grotte. La presenza di fitta vegetazione può anche influenzare la circolazione d'aria nella grotta, il tenore di umidità e la temperatura dell'aria che penetra nella cavità.

Per alcune grotte l'impatto umano sembra aver determinato una totale interruzione del concrezio-

namento, anche nell'ambito di intervalli cronologici piuttosto lunghi. È infatti difficile spiegare lacune importanti nel concrezionamento di oltre 2000 anni come quella osservata nella stalagmite CR1 solo sulla base di variazioni climatiche. In seguito al disboscamento, le "terre rosse" ricche di argilla, rappresentate da sedimenti di suolo o paleosuoli relitti sui quali si sono poi sviluppati molti dei suoli più recenti, possono essere state mobilizzate e aver in alcuni casi "sigillato" le fessure dell'epicarso, che in precedenza risultavano permeabili all'acqua grazie alle attività radicali degli alberi. A questo fenomeno di impermeabilizzazione dell'epicarso può essersi combinata la formazione di croste carbonatiche nell'ambito del suolo, le quali possono avere ulteriormente ostacolato l'infiltrazione dell'acqua.

2.2. Tassi medi di accrescimento assiale

Esaminati nel loro insieme, i dati evidenziano l'ampia variabilità nelle velocità di accrescimento assiale (GR) delle stalagmiti nell'Olocene e nel Tardiglaciale. Si va da massimi stimati di poco superiori ai 250 $\mu\text{m}/\text{anno}$ per le stalagmiti FR3 e CR1, a valori di soli 7 $\mu\text{m}/\text{anno}$ (minimo nell'ambito di un intervallo della stalagmite SV1). Se si considerano gli ultimi 10 ka, i valori medi di accrescimento variano da un massimo di 98 a un minimo di 19 $\mu\text{m}/\text{anno}$ (Tab. 1) con valori generalmente crescenti in funzione della temperatura media annua della grotta (Fig. 3). Questi valori tengono conto anche dei periodi di non deposizione che caratterizzano le stalagmiti CR1 e, verosimilmente, GV1.

La regressione lineare, costruita escludendo il dato della stalagmite ER76 della Grotta di Ernesto,

$$\text{GR} (\mu\text{m}/\text{anno}) = 8,8 T - 75,55 \quad (r^2 = 0,92)$$

definisce una temperatura teorica di 8,65 °C corrispondente a un tasso di crescita zero. È curioso notare che questo valore è uguale a quello calcolato in base ai tassi di crescita di stalagmiti europee attuali (Genty *et al.* 2001), sebbene il gradiente della regressione sia estremamente più elevato:

$$\text{GR} (\mu\text{m}/\text{anno}) = 193 T - 1670$$

Infatti, la temperatura della grotta è solo uno dei parametri che influenzano il tasso di crescita assiale delle stalagmiti (Kaufmann 2003), poiché la quantità di acqua è in molti casi il fattore limitante nella crescita degli speleotemi. Per la Grotta di Carburangeli, ad esempio, sappiamo che fenomeni cinetici (degassamento ed evaporazione) influenzarono la crescita (Madonia *et al.* 2005). Se la temperatura della grotta fosse il parametro più importante nel determinare enucleazione e crescita delle stalagmiti, nella Grotta

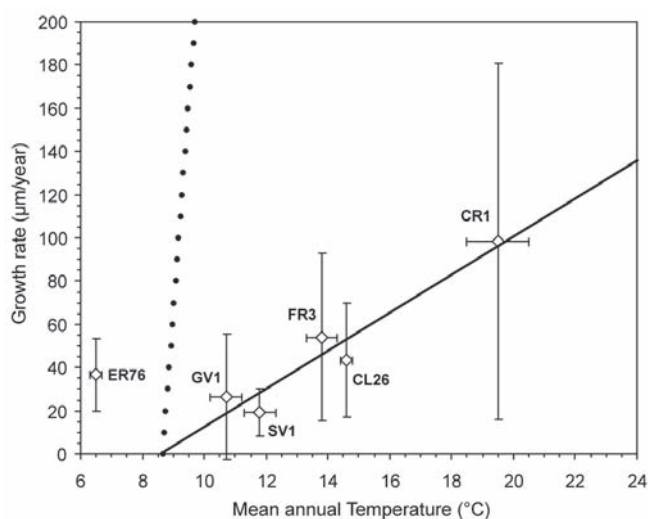


Fig. 3 - Tassi di crescita medi per gli ultimi 10 ka delle 4 stalagmiti studiate in funzione della temperatura media annua della grotta. Sono riportati anche i valori delle stalagmiti ER76 della Grotta di Ernesto e CL26 della Grotte de Clamouse nella Francia meridionale (entrambi i dati da McDermott *et al.* 1999). La linea continua rappresenta la regressione lineare (che non include il valore della ER76), mentre la linea punteggiata rappresenta i tassi medi di crescita di stalagmiti europee attuali (da Genty *et al.* 2001).

Fig. 3 - Mean axial growth rates during the last 10 ka for the four studied stalagmites as a function of the cave mean annual temperature. The growth rates of stalagmites ER76 from Grotta di Ernesto in Trentino and CL26 from Grotte de Clamouse in southern France are also reported (data from McDermott *et al.* 1999). The bold line represent the regression line (that does not include ER76 data), whereas the dotted line is the regression line reconstructed for present-day mean annual growth rates as a function of temperature from several European stalagmites (from Genty *et al.* 2001).

di Ernesto, dove la temperatura è di circa 6,7 °C non ci dovrebbe essere concrezionamento attuale, un fatto che è smentito dagli esperimenti di precipitazione nei siti dove furono rimosse alcune stalagmiti (Frisia *et al.* 2000).

3. VARIABILITÀ DEGLI ISOTOPI STABILI DAL TARDIGLACIALE AD OGGI

Nella presente sintesi prendiamo in considerazione solo le serie isotopiche delle tre stalagmiti per cui le datazioni hanno permesso di ottenere un modello di età affidabile (CR1, FR3 e SV1), mentre trascureremo la stalagmite della Grotta del Vento per la quale il modello di età non è sufficientemente robusto. Le serie isotopiche di CR 1, FR3 e SV 1 sono state confrontate con il *record* della Grotta di Ernesto in Trentino (McDermott *et al.* 1999) che costituisce, allo

stato attuale delle conoscenze, il caso di studio più settentrionale e di maggiore altezza s.l.m. per quanto riguarda la variabilità climatica dell'Olocene in Italia estratta dal dato *proxy* isotopi stabili contenuto nell'archivio stalagmiti. Per l'interpretazione del significato degli isotopi stabili si fa riferimento alla sintesi in Frisia (2005).

3.1. Variabilità temporale del $\delta^{13}\text{C}$

Per quanto riguarda la variabilità nel tempo del $\delta^{13}\text{C}$, il *trend* dal Tardiglaciale a oggi è prevalentemente negativo, con un gradiente maggiore nel Tardiglaciale e nella prima parte dell'Olocene; solo negli ultimi 2 ka l'andamento ha una inversione verso valori più positivi (Fig. 4).

La variabilità a scala millenaria è molto più accentuata nella stalagmite CR1 che in tutti gli altri speleotemi. Infatti, i valori del $\delta^{13}\text{C}$ per l'Olocene inferiore nella CR1 passano da circa -10 a circa -1‰ in poco più di mille anni, intervallo ampio se confrontato con la variabilità totale negli ultimi 11.000 anni nella stalagmite FR3 di circa 4‰, e di solo 1,5‰ per SV1. Pertanto, ad un primo esame, l'estrema variabilità del profilo del $\delta^{13}\text{C}$ nella stalagmite CR1, potrebbe essere spiegato come un fenomeno locale, legato a un sistema fisico-chimico instabile. Tuttavia, anche la stalagmite ER76 mostra un profilo del $\delta^{13}\text{C}$ caratterizzato da picchi verso valori più positivi (tra -9‰ e -6‰) nell'Olocene inferiore, e similmente accade per la Grotta di Soreq in Israele (Bar-Matthews *et al.* 1997). Per questo motivo, riteniamo che la variabilità del $\delta^{13}\text{C}$ agli inizi dell'Olocene registrata nella CR1 non sia un fenomeno locale, ma un evento alla scala del Mediterraneo che è stato amplificato e registrato in modo differente a seconda della "sensibilità" delle diverse grotte. Sia la Grotta di Carburangeli che la Grotta di Ernesto sono grotte superficiali che si sviluppano a una profondità di pochi metri dal suolo, con una distanza tra stalattite di alimentazione e stalagmite (CR1 e ER76) inferiore a 2 metri. Viceversa, le stalagmiti SV1 e FR3 si sviluppano alla profondità di diverse decine di metri, e le distanze tra stalattite di alimentazione e stalagmite superano i 30 metri.

La presenza di tessitura dendritica in entrambe le stalagmiti CR1 e ER76 ci permette di ipotizzare che l'instabilità climatica fosse più legata alla variabilità della disponibilità d'acqua che alla temperatura in zone dove il suolo forestale si formò relativamente tardi, e, forse, anche alla respirazione della grotta (che rimuove CO_2 dall'atmosfera interna permettendo la continuità del concrezionamento). Il confronto dei profili isotopici del $\delta^{13}\text{C}$ nelle 4 stalagmiti italiane evidenzia anche come lo *hiatus* che contraddistingue la CR1 sia, invece, imputabile a fenomeni locali, tuttavia collegati con il clima. La stalagmite E 76 presenta un cambiamento nell'andamento del profilo del $\delta^{13}\text{C}$ ver-

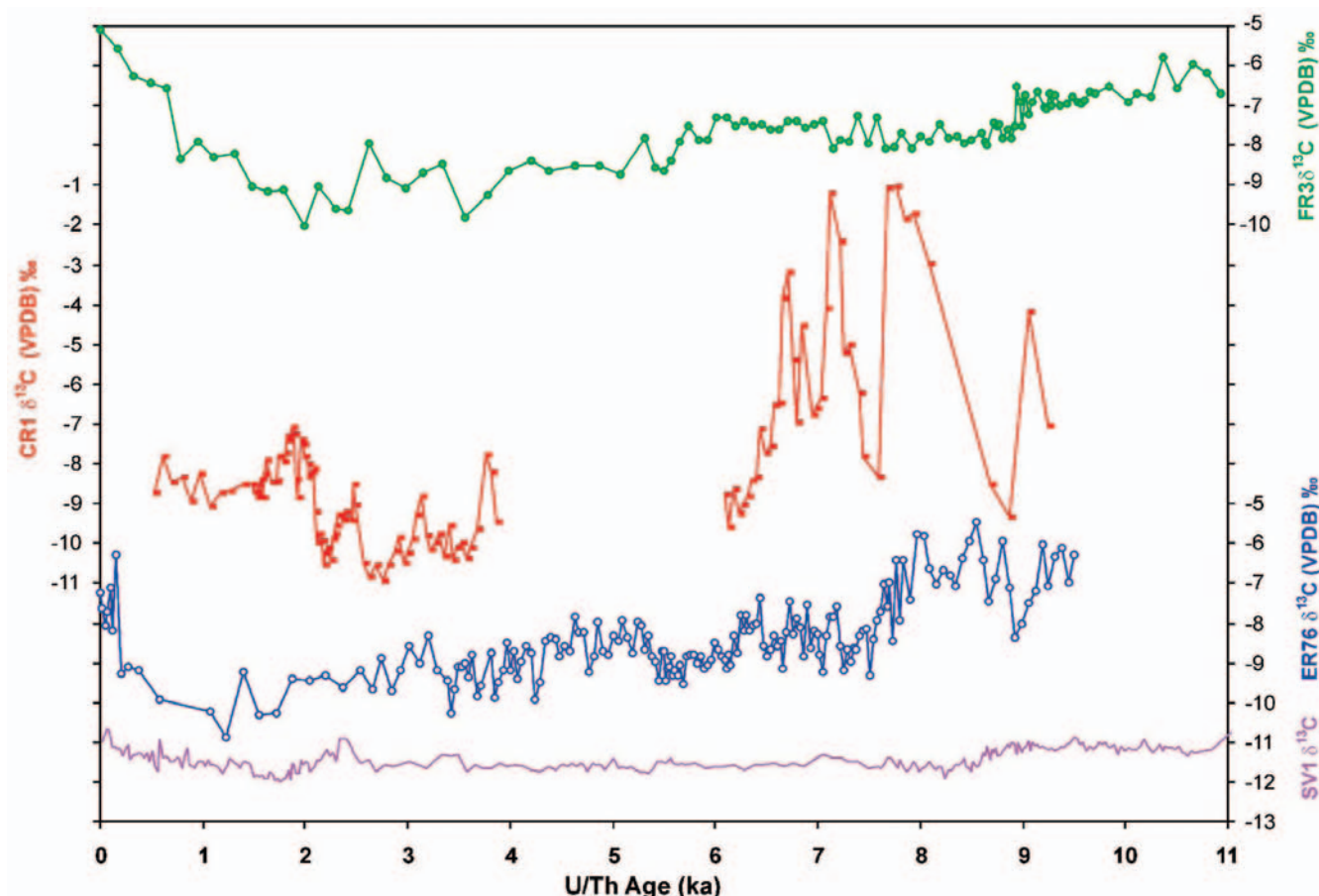


Fig. 4 - Serie isotopiche del $\delta^{13}\text{C}$ delle stalagmiti CR1, FR3 e SV1 confrontate con quella della stalagmite ER76 della Grotta di Ernesto (McDermott *et al.* 1999).

Fig. 4 - Carbon isotope profiles ($\delta^{13}\text{C}$) for stalagmites CR1, FR3 and SV1 compared with that for ER76 stalagmite from Grotta di Ernesto (McDermott *et al.* 1999).

so valori più positivi nel periodo in cui la deposizione cessa nella CR1, mentre FR3 e SV1 non mostrano sostanziali cambiamenti nell'andamento dei profili $\delta^{13}\text{C}$. Il periodo tra 6 e 5 ka BP circa corrisponde, nell'area alpina, a due brevi avanzate glaciali (Rotmoos I e II) che dovrebbero indicare condizioni climatiche relativamente fresche per il periodo estivo per il nord Italia, quindi si può ipotizzare che la durata dei mesi in cui il suolo era attivo fosse inferiore rispetto ai periodi immediatamente precedente e seguente.

Nell'area mediterranea, con clima confrontabile a quello della Piana di Carini, la stalagmite CL26 dalla Grotte de Clamouse è caratterizzata da un andamento verso valori più positivi del $\delta^{13}\text{C}$, tra circa 6 e 4 ka BP (McDermott *et al.* 1999). Quindi, le condizioni regionali indicherebbero un clima relativamente fresco verso nord e più caldo (e secco?) verso sud, ma non così secco da inibire il concrezionamento. I valori del ^{13}C per le stalagmiti provenienti da N e S d'Italia potrebbero, perciò, registrare un cambiamento nell'utilizzazione del territorio. In Sicilia l'interruzione del concrezionamento coincide con

l'apogeo della neolitizzazione, subito prima di un tracollo economico, mentre in Trentino, nello stesso periodo, ebbe inizio la Fase del Neolitico con influenze meridionali. Forse gli agricoltori neolitici si spinsero verso nord inseguendo la pioggia e le estati più fresche.

3.2. Variabilità temporale del $\delta^{18}\text{O}$

I profili del $\delta^{18}\text{O}$ ricostruiti per le stalagmiti SV1, FR3, e ER76 hanno un trend (con valori compresi fra -5 e -10‰) prevalentemente positivo nel corso dell'Olocene. Per la stalagmite CR1, invece, il trend è negativo (Fig. 5).

Per l'area mediterranea, in altri speleotemi provenienti dalla Grotta di Soreq in Israele (Bar-Matthews *et al.* 1997) e dalla Grotte de Clamouse l'andamento del $\delta^{18}\text{O}$ per l'Olocene è verso valori più positivi, quindi analogo a quello di SV1, FR3. Anche le stalagmiti dell'Oman presentano un andamento verso valori più positivi del $\delta^{18}\text{O}$ durante l'Olocene, che sono stati spiegati, come nel caso della Grotta di Soreq, con la

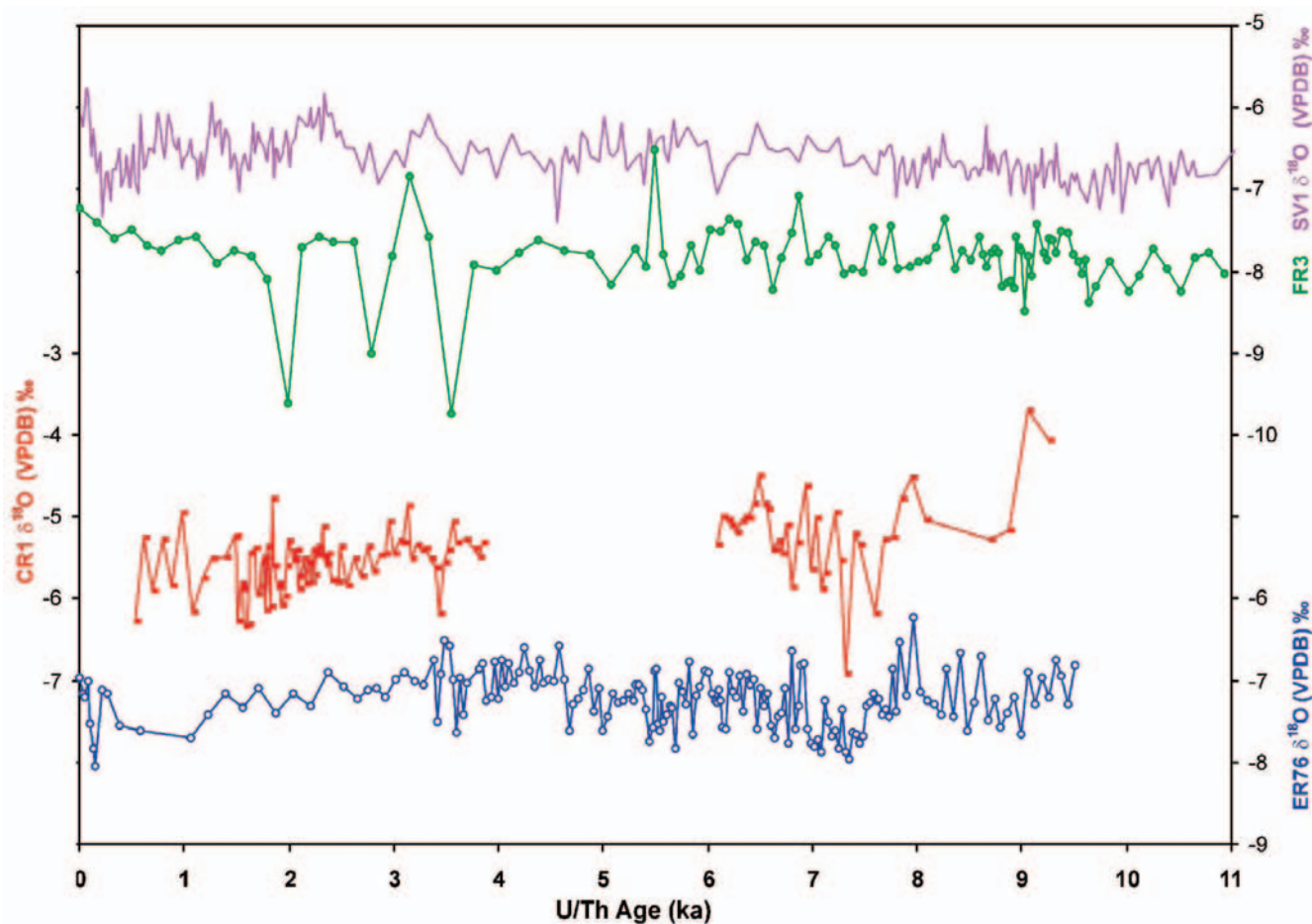


Fig. 5 - Serie isotopiche del $\delta^{18}\text{O}$ delle stalagmiti CR1, FR3 e SV1 confrontate con quella della stalagmite ER76 della Grotta di Ernesto (McDermott et al. 1999).

Fig. 5 - Oxygen isotope series of CR1, FR3 and SV1 stalagmites compared with the profile of ER76 stalagmite from Grotta di Ernesto (McDermott et al. 1999).

diminuzione della piovosità dovuta alla diminuzione dell'intensità del monzone indiano (Fleitmann *et al.* 2003).

Viceversa, una tendenza verso valori più negativi del $\delta^{18}\text{O}$ durante l'Olocene caratterizza stalagmiti del nord Europa (McDermott *et al.* 1999). Quindi, una delle possibili spiegazioni dei trend osservati nelle stalagmiti studiate è che la parte centro-settentrionale del Mediterraneo si trovasse sotto l'influenza di traiettorie provenienti da sud, con una prevalenza di vapore acqueo o mediterraneo o tropicale (Oceano Pacifico o Indiano), mentre il Mediterraneo sud occidentale (cioè la Sicilia) potrebbe essere stato influenzato dapprima da traiettorie di provenienza meridionale fino a circa 6 ka BP, e poi, a causa di fenomeni globali, con lo spostamento verso sud della ITCZ, abbia iniziato a ricevere gran parte della pioggia da traiettorie di origine atlantica.

Le differenze sia nei *trend* che nella struttura (picchi a scala secolare) tra le varie stalagmiti potrebbe riflettere anche differenze spaziali e stagionali di temperatura, già evidenziate nella ricostruzione delle

temperature oloceniche per l'Europa usando dati pollinici (Davis *et al.* 2003).

La stalagmite CR1 appartiene al settore europeo di sud-ovest di Davis *et al.* (2003), caratterizzato da anomalie negative rispetto alla temperatura tra circa 10 e 6 ka BP che sarebbero registrate da valori negativi del $\delta^{18}\text{O}$. La stalagmite SV1, il cui profilo di $\delta^{18}\text{O}$ è molto monotono, appartiene al settore centro occidentale, caratterizzato da un andamento quasi costante delle temperature tra 10 ka e oggi (Davis *et al.* 2003). Anche la ER76 si colloca nello stesso settore centro occidentale ed è da notare come il trend del profilo di $\delta^{18}\text{O}$ delle due stalagmiti SV1 e ER76 sia simile, e sia anche simile a quello delle anomalie della temperatura ricostruite dai pollini (Davis *et al.* 2003). Infine, la stalagmite FR3 sembrerebbe appartenere al settore sud-orientale, caratterizzato da anomalie di temperatura negative a circa 4, 3 e 2 ka BP, e da un'instabilità nelle temperature molto maggiore di quella del settore centro-occidentale, e quindi con un trend che non registra il costante riscaldamento del settore sud-occidentale.

Una delle problematiche più importanti rispetto all'interpretazione della variabilità col tempo dei valori del $\delta^{18}\text{O}$ è la relazione tra questo dato *proxy* e la temperatura (Frisia 2005). Se interpretassimo i dati solo in base all'equazione che lega alla temperatura il frazionamento acqua/calcite, per SV1, FR3 e ER76 l'andamento millenario del $\delta^{18}\text{O}$ indicherebbe un progressivo raffreddamento (Fig. 5). Le curve di anomalia di temperatura ricavate dai pollini sembrerebbero indicare per il settore centro occidentale un raffreddamento delle temperature estive, bilanciato, tuttavia, dalle temperature invernali con anomalie positive: quindi, non ci sarebbe stato un vero raffreddamento olocenico, che si nota solo per il nord Europa (Davis *et al.* 2003). Invece, per il settore sud occidentale ci sarebbe un trend millenario verso l'innalzamento delle temperature medie annue, che potrebbe spiegare l'andamento negativo del profilo del $\delta^{18}\text{O}$ nella CR1 a scala olocenica. Tuttavia, il trend millenario della CR1 è opposto a quello della Grotte de Clamouse, che appartarrebbe allo stesso settore, e, quindi, ci sarebbe una contraddizione o nella ricostruzione basata sui pollini o in quella basata sulle stalagmiti. Nella ricostruzione delle temperature da pollini di Davis *et al.* (2003) non ci sono dati per la Sicilia, per cui il record della CR1 potrebbe, in effetti, dare ulteriori indicazioni sulla complessità delle regioni climatiche europee differenziando ulteriormente le griglie di riferimento.

La complessità del clima Europeo, e Mediterraneo in particolare, è stata evidenziata anche da Magny *et al.* (2003) che hanno suddiviso l'Europa in zone diverse a seconda della risposta al raffreddamento intorno a 8,2 ka BP. Nelle stalagmiti da noi studiate, il periodo tra 8,4 e 8,1 ka BP circa nella ER76 è contraddistinto da valori più negativi del $\delta^{18}\text{O}$ rispetto agli intervalli di tempo precedente e seguente. Per questo periodo di tempo, che corrisponde a un aumento del livello dei laghi alpini in Svizzera, è stato calcolato un raffreddamento della temperatura media del mese più caldo di circa 2 °C (Magny *et al.* 2003). Questo ci confermerebbe che, a scala da decennale a secolare, lo spostamento verso valori più negativi del $\delta^{18}\text{O}$ corrisponde ad un raffreddamento, mentre per i trend a scala plurimillennaria, una influenza della temperatura non è da scartare *a priori*. Il raffreddamento a circa 8,4-8,2 ka BP si nota anche in SV1 e FR3, sebbene i tempi non siano coincidenti, ma un poco più antichi rispetto a ER76. La discrepanza potrebbe essere dovuta sia al modello di età, sia potrebbe evidenziare una reale risposta ambientale a un deterioramento climatico registrata prima nella zona orientale e poi nelle Alpi. Nella CR1, allo stato attuale dei nostri dati, non si nota un "evento 8,2". Magny *et al.* (2003) collocherebbero ER 76, SV1 e FR3 nella zona *mid-European*, più umida durante l'evento 8,2, mentre la Sicilia, a sud di questa fascia,

dovrebbe essere stata soggetta a un *budget* negativo di piovosità durante lo stesso evento, come il nord Europa. Ci sarebbe una forte dipendenza dalla latitudine della risposta della corrente a getto atlantica al gradiente termico tra alte e basse latitudini. L'anomalia del profilo del $\delta^{18}\text{O}$ della stalagmite CR1 sarebbe, quindi, un'indicazione ulteriore della complessità climatica latitudinale dell'area mediterranea in cui si sviluppa l'Italia.

4. ANALISI IN LUMINESCENZA DELLE STALAGMITE SV1

Lo studio in luminescenza eccitata con fasci di luce laser ha permesso di ricavare dalle sezioni lucidate delle concrezioni spettri che possono essere interpretati in chiave paleoambientale. Per la Grotta Savi (Stokyova *et al.* 2004) si è osservato come la luminescenza nel corso del Tardiglaciale e del primo Olocene aumenti di intensità sino a individuare una serie di massimi compresi fra circa 9 e 6 ka BP, per poi iniziare una rapida decrescita che ha un suo primo minimo intorno a 4,5 ka BP, quindi un periodo di crescita culminante in un picco fra circa 4 e 3,5 ka BP, infine una nuova decrescita che porta ad un periodo di minimo principale per l'Olocene comprendente gli ultimi 1500 anni. La curva dell'intensità della luminescenza suggerisce una relazione con le variazioni della copertura boschiva dell'area carsica sovrastante. Nel Carso durante l'ultimo massimo glaciale c'era certamente un ambiente di steppa fredda che nel Tardiglaciale si è trasformata dapprima in steppa arborata e quindi in bosco rado e successivamente in foresta. La foresta ha raggiunto il suo massimo sviluppo durante la prima parte dell'Olocene. Nel Neolitico sono arrivate popolazioni di agricoltori e pastori che hanno disboscato la regione favorendo l'erosione del suolo e la formazione di un paesaggio vegetale aperto. Gli intervalli a più bassa luminescenza potrebbero corrispondere a quelli di massima pressione antropica.

È molto interessante che il primo minimo di luminescenza sia incentrato intorno a circa 4,5 ka BP, quando si registra nel Mediterraneo una fase di inaridimento documentata sia nelle carote marine che nelle stalagmiti della regione arabica. Questo deterioramento climatico si è quindi propagato anche in Italia, con conseguenze sulla vegetazione visibili proprio dall'analisi in luminescenza. È anche interessante sottolineare che la diminuita intensità della luminescenza negli ultimi 3000 anni circa corrisponde molto bene con la diminuzione della velocità di crescita delle stalagmiti. Questo potrebbe essere un fenomeno di origine antropica legato ai disboscamenti e alla conseguente erosione del suolo. L'età "antropogenica" si sposterebbe viepiù all'indietro.

5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Il quadro che emerge sia dalla velocità di accrescimento degli speleotemi, sia dalle loro variazioni di composizione isotopica è in sostanziale accordo con le conoscenze sui cambiamenti climatici durante il Tardiglaciale e l'Olocene. L'insieme dei dati contribuisce tuttavia a delineare alcuni aspetti problematici di questi cambiamenti. Senza dubbio, uno dei risultati più importanti emersi dal presente studio è quello di avere individuato due settori distinti climaticamente, soprattutto per quanto riguarda la piovosità: la penisola italiana e la Sicilia. L'isola mediterranea sarebbe uno dei luoghi più sensibili per comprendere la modificazione delle traiettorie e della provenienza del vapore d'acqua in risposta a fenomeni globali, in quanto al limite tra una circolazione di tipo meridionale e la circolazione atlantica. Lo studio della variabilità climatica in Sicilia andrebbe quindi approfondito, in relazione ad altri siti, possibilmente nell'Africa del nord-ovest.

Altro risultato importante è costituito dai numerosi dati raccolti, che forniscono spunti per lo sviluppo di modelli e stimolo ad ulteriori ricerche. È stata qui evidenziata la complessità del sistema clima-ambiente in Italia, per cui la ricerca ha finito con il suscitare ulteriori interrogativi oltre a quelli che ci si era posti inizialmente. Un aspetto chiave meritevole di approfondimento è quello delle interrelazioni tra le attività umane, con particolare riferimento ai diversi tipi di impatto, e i cambiamenti climatico-ambientali, soprattutto quello dell'impatto antropico sul suolo, che è una delle componenti fondamentali dell'ambiente registrata nei parametri chimico-fisici delle stalagmiti. La nostra ricerca ha, infatti, evidenziato che, oltre ad essere archivi climatici, le stalagmiti sono potenziali archivi archeologici. Ulteriori approfondimenti sia in forma di indagini a più elevata risoluzione, sia attraverso lo studio degli speleotemi di altre grotte potranno via via rendere possibili ricostruzioni più dettagliate della zonazione regionale del clima e della sua evoluzione nel tempo, e fornire indicazioni sulla storia delle società storiche e protostoriche in relazione al clima.

RINGRAZIAMENTI

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 palaeoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq Cave, Israel. *Quaternary Research*, 47: 155-168.
- Borsato A., Cucchi F., Frisia S., Miorandi R., Paladini M., Piccini L., Potleca M., Sauro U., Spötl C., Tuccimei P., Villa I. & Zini L. 2005 - Ricostruzione climatica degli ultimi 17.000 anni da una stalagmite della Grotta Savi (Trieste, Italia) (in questo volume).
- Bradley R.S., Briffa K.R., Cole J., Huges M.K. & Osborn T.J., 2003 - Climate of the last millennium. In: Alverson K.D., Bradley R.S. & Pedersen T.F. (eds), *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 105-141.
- Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J. & Data Contributors, 2003 - The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1701-1716.
- Fleitmann D., Burns S., Mudelsee M., Neff U., Kramers J., Mangini A. & Matter A., 2003 -Holocene forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 300: 1737-1739.
- Frisia S., 2005 - Gli isotopi stabili negli speleotemi (in questo volume).
- Genty D., Baker A. & Vokal B., 2001. Intra- and inter-annual growth rate of modern stalagmites. *Chemical Geology*, 176: 191-212.
- Kaufmann G., 2003 - Stalagmite growth and palaeoclimate: the numerical perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 214: 251-266.
- Lambeck K., Antonioli F., Purcell A. & Silenzi S., 2004 - Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1567-1598.
- 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., Macaluso T., 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).
- Magny M., Bégeot C., Guiot J. & Peyron O., 2003 - Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1589-1596.
- McDermott F., Frisia S., Huang Y., 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 $\delta^{18}O$ and textural variations in speleothems. *Quaternary Science Reviews*, 18: 1021-1038.
- Nicole Petit Maire, 2004 - Climatic Crises and man in the Mediterranean Basin: the last 20,000 years. In: Briand F. (ed.), *Human records of recent geological evolution in the Mediterranean Basin - Historical and archeolo-*

- gical evidence*. CIESM Workshop Monographs n. 24, Monaco: 17-24.
- Piccini L., Borsato A., Frisia S., Paladini M., Salzano R., Sauro U. & Tuccimei P., 2005 - Concrezionamento olocenico e aspetti geomorfologici della Grotta del Vento (Alpi Apuane – Lucca): analisi paleoclimatica e implicazioni morfogenetiche (in questo volume).
- Sadori L. & Narcisi B., 2001 - The Post-glacial record of environmental history from Lago di Pergusa (Sicily). *The Holocene*, 11: 655-671.
- Spötl C., Mangini A., Frank N., Eichstädter R. & Burns S.J., 2002 - Start of the last interglacial period at 135 ka: Evidence from a high Alpine speleothem. *Geology*, 30: 815-818.
- Stoykova D., Shopov Y., Sauro U., Borsato A., Cucchi F. & Forti P., 2005 - High-resolution luminescence speleothem records from Savi Cave, Trieste, NE Italy (in questo volume).
- Tuccimei P., Borsato A., Forti P., Frisia S., Paladini M., Piccini L., Salzano R. & Sauro U., 2005 - Ricostruzione climatica dell'Olocene - Pleistocene Superiore da una stalagmite del sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Gola di Frasassi, Ancona, Italia) (in questo volume).