

Ricostruzione paleoclimatica attraverso l'analisi di uno speleotema nella Sardegna centro-orientale: risultati preliminari

SANDRO DE MURO(*), JO DE WAELE(*), ANTONIO LONGINELLI(**)

Summary. *This paper, carried out in the framework of a local project 60% «Pleistocene-Holocene palaeoclimate and palaeogeography reconstructions based on marine and continental deposits of Sardinia» (Resp. Prof. Sandro De Muro) and within a series of researches involving several bodies (Archaeological Superintendence of NU/SS, Universities of Parma and Cagliari) and caving associations (Gruppo Speleo Ambientale Sassari, Gruppo Speleo-Archeologico Giovanni Spano of Cagliari, Unione Speleologica Cagliaritano and Gruppo Archeo Speleo Ambientale Urzulei), reports the first results of a palaeo-climate study carried out on a stalagmite sampled in the Su Palu cave, Codula Ilune, Urzulei (Central-East Sardinia). This stalagmite has been subjected to radiometric U/Th dating and stable isotope $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ analysis. These isotopic data based on 139 samples showed a general increase in stable isotope ratios that would indicate a growth of the concretion in a period of global warming (Upper Pleistocene-Holocene?). The chronological setting by means of U/Th datings, unfortunately, did not allow to define the exact timeframe because of the presence of detrital Thorium. C^{14} analysis are under way to try to obtain information on the time during which the stalagmite grew.*

Riassunto. *In questo lavoro vengono riportati i primi risultati di uno studio paleoclimatico effettuato su una stalagmite campionata all'interno della grotta di Su Palu, Codula Ilune, Urzulei, Sardegna centro-orientale. Le ricerche sono state svolte nell'ambito di progetti locali, nazionali ed internazionali. In particolare rientrano nell'ambito del progetto 60% dell'Università di Cagliari «Ricostruzioni paleoclimatiche e paleogeografiche pleistocenico-oloceniche da sedimenti marini e continentali della Sardegna» (Resp. Prof. Sandro De Muro), progetti della Soprintendenza dei Beni Archeologici delle province di NU/SS, dell'Università degli Studi di Parma e di associazioni speleologiche quali: Gruppo Speleo Ambientale Sassari, Gruppo Speleo-Archeologico*

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Via Trentino 51, 09127 Cagliari.

(**) Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Scienze della Terra, Parco Area delle Scienze 157A, 43100 Parma.

Presentato il 17/01/2006.

Giovanni Spano di Cagliari, Unione Speleologica Cagliariitana e Gruppo Archeo Speleo Ambientale Urzulei. Questo speleotema è stato sottoposto a datazione radiometrica U/Th e ad analisi degli isotopi stabili $d^{18}O$ e $d^{13}C$. I dati isotopici di 139 campioni hanno messo in evidenza una generale positivizzazione nel tempo di tali valori, più marcata nel caso del Carbonio. L'andamento delle curve indica che la crescita dell'intera concrezione sia avvenuta in un periodo di progressivo riscaldamento (Pleistocene sup.-Olocene?). L'inquadramento cronologico attraverso quattro datazioni U/Th, invece, non ha permesso di definire in dettaglio la finestra temporale per la presenza di Torio detritico che ha fortemente disturbato i risultati delle analisi. Sono in corso di realizzazione nuove analisi radiometriche basate sul C^{14} per cercare di ottenere qualche indicazione cronologica.

INTRODUZIONE

Recentemente le ricerche paleoclimatiche hanno riscosso grande attenzione a causa delle importanti ricadute sulla previsione nel breve, medio e lungo periodo del riscaldamento globale. Attraverso la ricerca sui climi del passato si tenta di capire come avvengono i cambiamenti climatici, con quale frequenza e con quali effetti sull'ambiente per poter ipotizzare gli eventuali scenari futuri (sovrapposizione dell'effetto serra alla naturale evoluzione del clima e relativo e conseguente innalzamento del livello medio del mare, etc.) [1][2].

Nelle aree carsiche questo tipo di analisi risulta agevolato per la presenza di sistemi «conservativi» quali le grotte, con interessanti depositi fisici e chimici che possono, talvolta, consentire una ricostruzione delle condizioni ambientali esistenti durante la loro messa in posto (temperatura, piovosità). Queste informazioni, combinate con una datazione radiometrica, consentono di ricostruire i climi del passato e di inquadrare in precise finestre temporali gli eventuali cambiamenti climatici registrati nei sedimenti [3][4]. Lo studio degli isotopi nelle stalagmiti di varie grotte in tutto il mondo ha già portato ad importanti risultati negli ultimi 40 anni [5][6][7].

Gli isotopi più utilizzati nelle ricerche sul paleoclima sono l'ossigeno ($\delta^{18}O$) per le paleotemperature, il Carbonio ($\delta^{13}C$) per ottenere indicazioni sul tipo di vegetazione (correlabile a sua volta alla pluviometria ed alla temperatura), il radiocarbonio (C^{14}) e l'Uranio-Torio (U^{234} e Th^{230}) per le datazioni radiometriche [8][9][10].

Gli isotopi dell'ossigeno negli speleotemi vengono utilizzati dalla fine degli anni '70 per risalire alle temperature di epoche ed avvenimenti passati. Infatti, durante il processo di precipitazione del $CaCO_3$ la temperatura di una grotta profonda, pur pressoché costante, è funzione diretta della temperatura media annua esterna e tale temperatura determina la composizione isotopica dell'ossigeno nel $CaCO_3$, unitamente alla composizione isotopica dell'acqua dalla quale esso precipita. La composizione isotopica dell'acqua è, a sua volta, funzione diretta della temperatura media annua al suolo per cui il $\delta^{18}O$ del $CaCO_3$, ovviamente se precipita in condizioni di equilibrio isotopico, è rappresentativo delle condizioni climatiche esistenti all'atto della sua precipitazione. Questi studi, combinati con quelli eseguiti su depositi carbonatici marini, sono partico-

larmente importanti per la ricostruzione climatica nel corso delle glaciazioni, durante le quali le temperature ambientali potevano variare ampiamente anche nell'ambito di intervalli di tempo relativamente brevi.

In questo lavoro, del tutto preliminare, viene descritto uno studio paleoclimatico effettuato su un grande speleotema campionato in una importante cavità naturale della Codula Ilune, nella Sardegna centro-orientale.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

La Codula Ilune è il più importante canyon che attraversa da Sudovest a Nordest l'intera struttura carbonatica del Supramonte costiero di Urzulei-Baunei-Dorgali, nella parte centro-meridionale dell'ampio Golfo di Orosei (Sardegna orientale).

Nell'area affiorano rocce di differente natura ed appartenenti a diverse ere geologiche [11][12][13] (Fig. 1). Il basamento paleozoico è costituito prevalentemente da rocce

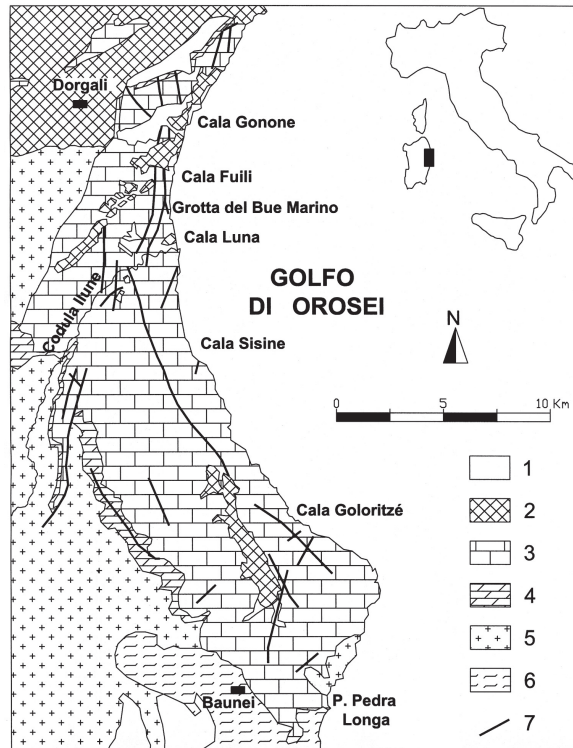


Figura 1. Carta geologica schematica del Golfo di Orosei: 1: Alluvioni e depositi di versante (Quaternario); 2: basalti (Plio-Pleistocene); 3: Calcari (Giura); 4: Dolomie (Giura); 5: Graniti (Paleozoico); 6: Scisti (Paleozoico); 7: Faglie (Modificato da [21]).

granitoidi erciniche, spesso fortemente arenizzate, sul quale poggia, in discordanza stratigrafica, la successione mesozoica composta dal basso verso l'alto da sedimenti fluvio-lacustri, seguiti da marne, dolomie e calcari del Giurese medio-Cretaceo inferiore [15]. Seguono conglomerati alluvionali (Pliocene?) spesso ben cementati, che precedono le colate basaltiche Plio-Pleistoceniche [12]. Queste ultime affiorano in varie località intorno alla Codula Ilune e sono state datate col metodo K/Ar a 3,5-2,0 milioni di anni fa [15].

Il rilievo carbonatico è percorso da numerose faglie, prevalentemente a direzione N-S, mentre subordinate appaiono le direzioni NE-SW e NW-SE [16].

Dalla loro emersione definitiva, avvenuta probabilmente già dal periodo Cretacico, ed in particolare negli ultimi 10 milioni di anni (dal Miocene medio) queste formazioni hanno subito una intensa erosione e corrosione che hanno determinato il paesaggio attuale, fortemente influenzato dalle caratteristiche strutturali e litologiche delle masse rocciose [17][18]. Nel profondo canyon della Codula Ilune si trova il sistema carsico sotterraneo più importante della Sardegna, esplorato dagli anni '80 ed attualmente lungo oltre 40 km [19]. Questo sistema carsico si sviluppa parzialmente lungo il contatto granito-dolomie ed è caratterizzato dalla presenza di due fiumi ipogei che confluiscono formando un unico collettore sotterraneo dalla portata di magra di una quarantina di litri al secondo. Il sistema è composto da almeno quattro livelli, di cui tre fossili, a quote variabili tra 15 e 200 m s.l.m., caratterizzati da condotte sia freatiche sia vadose con abbondanti depositi sedimentari contenenti frammenti carbonatici, granitici e basaltici, probabilmente corrispondenti a varie fasi climatiche quaternarie [20].

Le acque di questo sistema fuoriescono alla risorgente sottomarina di Cala Luna, circa 100 metri a Sud dell'omonima spiaggia, caratterizzata da un condotto, apparentemente di recente formazione, esplorato per circa 630 metri e profondo fino a 37 [22]. All'interno di questa risorgente si trovano resti di sedimenti eolici cementati che risalgono ad una fase climatica arida e fredda, quando il mare era più basso dell'attuale [23], mentre una piccola stalattite, campionata a 9 metri di profondità, ha dato un'età di 23000 ± 700 anni fa [24].

MATERIALI E METODI

Nell'ambito di un progetto di studio sul paleoclima è stata campionata una stalagmite nella grotta di Su Palu (Sistema carsico della Codula Ilune) ad Urzulei (Fig. 2).

La concrezione, alta 1,60 metri, è stata presa nella zona denominata «Le Canaglie», a quasi 1 km di distanza dall'ingresso della cavità, ad una quota di circa 100 m s.l.m. (profondità dall'ingresso – 85 m). Questa stalagmite era posta al centro di una grande sala su un grosso masso a fianco di un'altra concrezione alta 1,80 metri, ed ambedue erano in fase di accrescimento con un costante stillicidio che permaneva durante tutto l'arco dell'anno (Fig. 3). La stalagmite si trovava in area remota, lontano dai normali percorsi speleologici. Per estrarre e trasportare il campione è stato necessario dividerlo in due pezzi. Il campionamento ed il successivo trasporto della stalagmite ha richiesto l'inter-

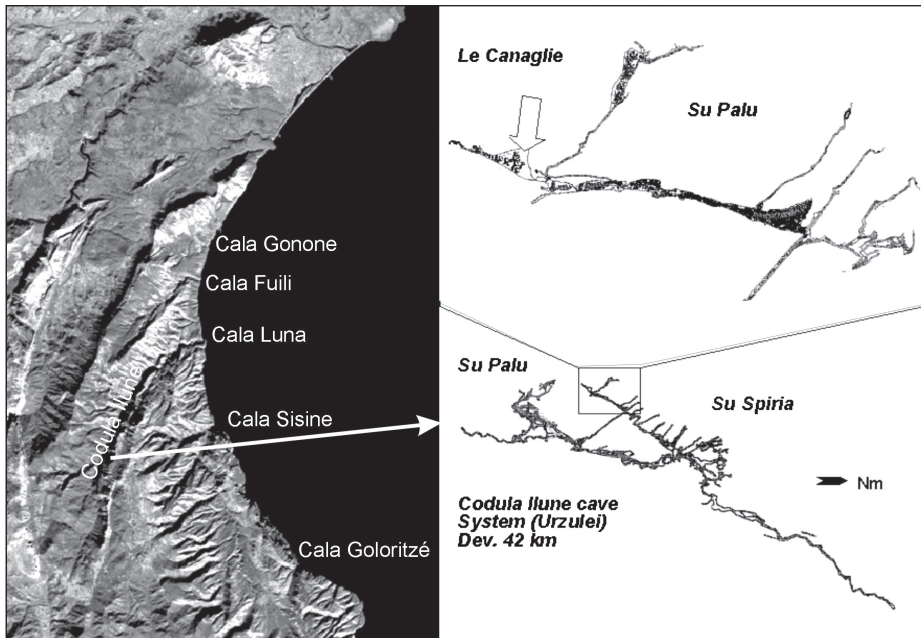


Figura 2. Immagine Landsat ETM+ con la localizzazione del Sistema carsico della Codula Ilune (sinistra), rilievo del sistema carsico (destra in basso) e luogo di campionamento della grande stalagmite (sopra a dx).

vento di 12 speleologi altamente qualificati, appartenenti a diverse associazioni speleologiche (Gruppo Archeo Speleo Ambientale Urzulei, Gruppo Speleo Ambientale Sassari, Gruppo Speleo-Archeologico Giovanni Spano, Unione Speleologica Cagliariitana). Per l'intera operazione, gestita come una manovra di soccorso speleologico, sono state necessarie 14 ore di permanenza sotterranea.

Per la taratura delle analisi degli isotopi stabili sono state campionate le acque di stillicidio attuali in diverse stagioni ed in tre punti differenti della grotta, oltre che nei pressi del luogo di campionamento della stalagmite. L'analisi geochemica di questi campioni ha fornito la composizione isotopica media delle acque attualmente circolanti nel sistema carsico.

La stalagmite è stata sezionata in lungo: una metà è stata sottoposta ad analisi sedimentologico-tessiture con una dettagliata descrizione di tutti gli strati di accrescimento (Fig. 3). L'altra metà invece è stata spedita al Laboratorio di Geochemica Isotopica dell'Università di Parma per le analisi isotopiche (O^{18}/O^{16} e C^{13}/C^{12}). Alcuni campioni, inoltre, sono stati spediti all'Università di Berna (CH) per le analisi radiometriche (datazioni con il metodo U/Th).

Metà della stalagmite si trova attualmente presso il Dipartimento di Scienze della Terra di Cagliari, mentre l'altra metà verrà esposta presso il Comune di Urzulei oppure

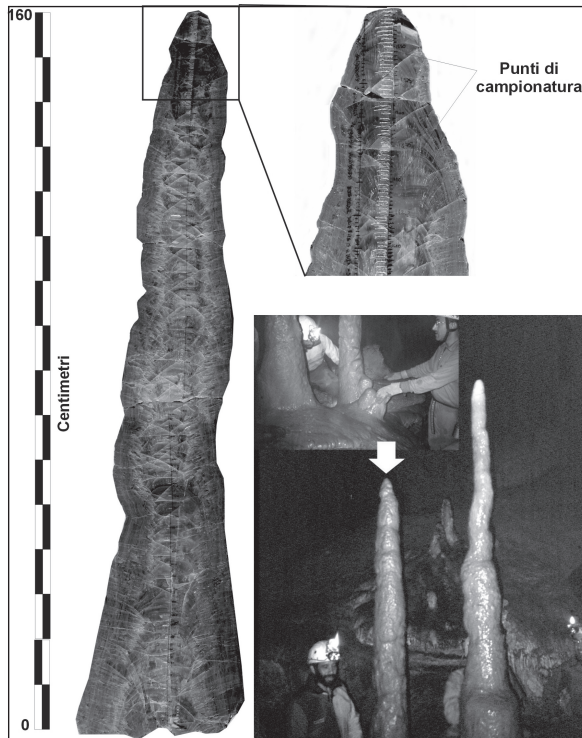


Figura 3. La grande stalagmite prima del campionamento (in basso a destra) e la sua sezione longitudinale (a sinistra). A destra in alto un dettaglio del top della stalagmite con le tracce dei campioni esaminati.

nella sede della nuova Provincia d'Ogliastra, provvista di una descrizione scientifica sul significato delle ricerche.

La misura della composizione isotopica di un carbonato, ed in particolare dei campioni di una concrezione, viene effettuata secondo procedure standard che ormai tutti i ricercatori coinvolti in studi di questo genere utilizzano. I singoli campioni (ciascuno del peso di qualche milligrammo) vengono prelevati mediante un trapano diamantato da dentista a distanze variabili l'uno dall'altro. Nel nostro caso è stata effettuata una prima campionatura con spaziatura di circa venti millimetri tra un campione e l'altro per avere un primo quadro generale dell'andamento lungo i 1600 mm della concrezione. Successivamente si è proceduto ad infittire il campionamento: uno ogni 10 mm, poi uno ogni 5 mm e così via, arrivando ad un dettaglio di un mm. Complessivamente sono stati misurati 139 campioni. La polvere di carbonato di calcio ottenuta da ogni campione viene fatta reagire sotto vuoto spinto (circa 10^{-4} mm di Hg) con acido fosforico 100% (per evitare scambi isotopici tra acqua presente nell'acido e la CO_2 che si forma nella reazione) per circa 12 ore (sei in realtà sarebbero sufficienti) alla temperatura costante di 25°C

(temperatura convenuta internazionalmente per questo tipo di misure). La CO_2 prodotta viene estratta dal dito di reazione e purificata (sempre sotto vuoto spinto), introdotta in un portacampioni e portata poi allo spettrometro di massa (Finnigan Delta-S nel nostro caso) per la misura isotopica che viene effettuata per confronto con una CO_2 standard a composizione isotopica nota: tale standard di laboratorio è stato ottenuto da marmo di Carrara estremamente puro ed il suo valore isotopico viene periodicamente confrontato con gli standard internazionali (NBS-19 e NBS-20). Il sistema del confronto viene utilizzato per la misura isotopica in quanto gli spettrometri di massa danno misure relative estremamente accurate mentre darebbero misure assolute non altrettanto precise.

RISULTATI PRELIMINARI

L'analisi al microscopio della stalagmite ha evidenziato la presenza di notevoli quantità di impurità in vari strati della concrezione ed una parziale ricristallizzazione in diversi punti lungo l'asse di accrescimento. Quest'ultima può in parte essere legata ad una precipitazione discontinua caratterizzata da fasi di accrescimento veloce alternati a fase di inattività. Inoltre, le impurità sono indicatrici della probabile presenza di torio detritico, confermata poi dalle analisi U/Th.

I risultati ottenuti sugli isotopi stabili fino ad ora hanno evidenziato una marcata positivizzazione dei valori del carbonio nel terzo superiore della lunghezza (variazione totale circa 5 per mille). Dalla base fino a due terzi della lunghezza si hanno limitate oscillazioni che in un caso isolato raggiungono il valore di circa tre per mille ma il valore medio, almeno lungo il primo metro, rimane abbastanza costante, intorno a -6 . Questo è un valore abbastanza comune in queste concrezioni ed implica un certo apporto di

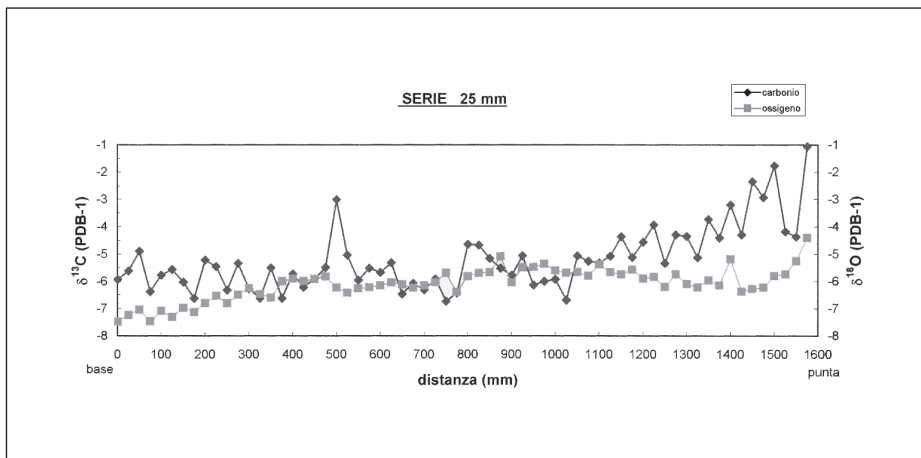


Figura 4. Curva degli isotopi stabili dell'Ossigeno e del Carbonio sull'intera lunghezza della stalagmite.

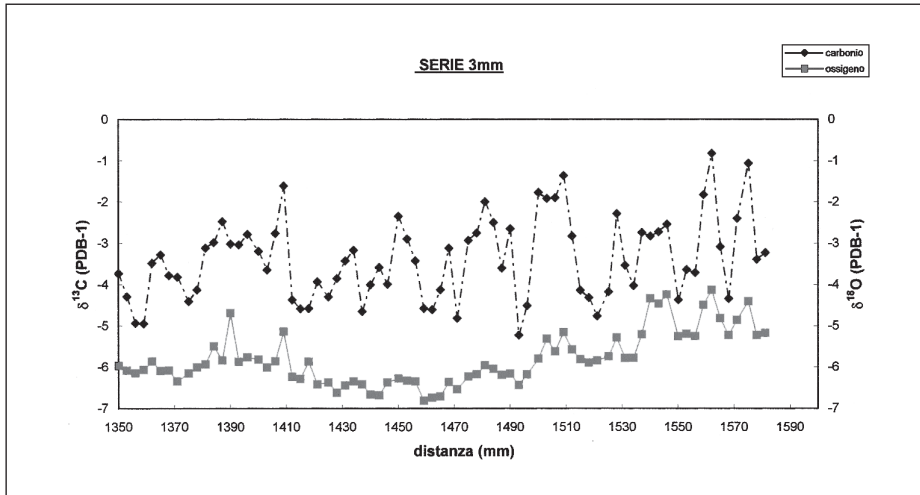


Figura 5. Curva degli isotopi stabili dell'Ossigeno e del Carbonio sugli ultimi 25 cm della stalagmite.

specie carbonatiche di origine biogenica (humus e simili). L'evoluzione dei valori del $\%^{13}\text{C}$ nel terzo superiore della stalagmite indica un apporto decrescente di CO_2 biogenica che si annulla totalmente nelle ultimissime fasi di deposizione. Per quanto riguarda l'ossigeno si ha alla base una modesta evoluzione verso valori più positivi (circa 1,5 per mille in circa 500 mm) poi una lunga serie di dati senza variazioni molto marcate ed infine, verso il top ed in accordo con la variazione del carbonio, una marcata positivizzazione di circa il 2 per mille. Dall'esame del grafico appare evidente una correlazione tra $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ almeno nel terzo superiore della stalagmite, e questo dovrebbe indicare una precipitazione del CaCO_3 fuori da condizioni di equilibrio isotopico (Figg. 4-5).

Le datazioni U/Th eseguite alla base, a 71 cm, a 112 cm e sulla cima (160 cm) della stalagmite hanno dato rispettivamente le seguenti età radiometriche: $134,8 \pm 6,1$, $106,1 \pm 4,7$, $101,5 \pm 3,8$ e $72,9 \pm 2,3$ mila anni fa. Dopo correzione arbitraria, ponendo $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th} = 1$, queste date diventano rispettivamente 98 ± 4 ; 94 ± 4 ; 94 ± 3 e $2,9 \pm 1,2$ mila anni fa, dimostrando chiaramente l'esistenza di una notevole quantità di torio detritico che rende le datazioni inutilizzabili.

CONCLUSIONI

Per la prima volta vengono pubblicati i risultati di uno studio paleoclimatico avviato in un'area tettonicamente stabile della Sardegna centro-orientale. Tale lavoro è inserito nelle attività di ricerca di «punta» nazionali ed internazionali in collaborazione con università italiane ed europee.

È stata studiata una stalagmite, alta 1,60 metri, campionata all'interno del più importante sistema carsico della Sardegna, in Codula Ilune (Urzulei). Dalle analisi degli

isotopi stabili, effettuate lungo l'asse di crescita della stalagmite, si dovrebbe concludere che essa si è depositata in un periodo tendente complessivamente ad una fase di riscaldamento. Queste analisi, tuttavia, mostrano una correlazione tra $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ almeno nel terzo superiore della stalagmite, indicando che la calcite, con ogni probabilità, si è depositata in condizioni di non equilibrio isotopico, rendendo non del tutto affidabile un ragionamento paleoclimatico quantitativo.

I dati ottenuti dalle datazioni radiometriche U/Th non sono del pari affidabili ed evidenziano che questo metodo non è compatibile con le condizioni di formazione dello speleotema. Queste difficoltà sembrano dovute alla presenza di materiale detritico, che ha apportato torio estraneo durante la crescita dello speleotema. La contaminazione potrebbe essere stata causata dalla presenza di litotipi, tra i quali graniti ercinici e basalti pleistocenici, che abbastanza frequentemente possono contenere concentrazioni non trascurabili di Torio. Dall'altezza (1,60 metri), presupponendo una crescita costante nel tempo (quindi continuo gocciolamento) e con una crescita media di 1 cm ogni 100 anni, si potrebbe stimare l'età della stalagmite in 16.000 anni. Questo valore teorico deriva da semplici considerazioni basate sullo studio della crescita media delle stalagmiti nel Mediterraneo ed è quindi da considerarsi non certo.

In assenza di datazioni affidabili, sulla base delle considerazioni precedentemente riportate e tenendo conto del fatto che la stalagmite era probabilmente attiva sino ai nostri giorni, si potrebbe attribuire la concrezione al periodo di riscaldamento post-ultimo glaciale (Pleistocene sup.-Olocene).

La prosecuzione delle ricerche vedrà come prioritaria la verifica della finestra temporale nella quale si è depositata la stalagmite mediante datazioni C^{14} ed il reperimento di nuovi campioni nelle aree carsiche della Sardegna.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata effettuata nell'ambito del Progetto 60% «Ricostruzioni paleoclimatiche e paleogeografiche pleistocenico-oloceniche da sedimenti marini e continentali della Sardegna» (Responsabili Prof. Sandro De Muro). Gli autori ringraziano gli speleologi del Gruppo Speleo Ambientale Sassari, del Gruppo Speleo-Archeologico Giovanni Spano di Cagliari, dell'Unione Speleologica Cagliaritano e del Gruppo Archeo Speleo Ambientale Urzulei per l'indispensabile e ardua compito di aver portato fuori dalla grotta l'enorme campione stalagmitico. Le datazioni radiometriche U/Th sono state effettuate da Prof. Igor Villa dell'Università di Berna (CH).

BIBLIOGRAFIA

- [1] ANTONIOLI F., BORSATO A., FRISIA S., SILENZI S., *L'uso degli speleotemi per ricostruzioni paleoclimatiche e variazioni del livello del mare*. Il Quaternario 11(1), pp. 122-139 (1998).
- [2] ANTONIOLI F., FRISIA S., FORTI P., SAURO U., *I depositi concrezionali di grotta: archivi*

- dell'evoluzione paleoclimatica e ambientale regionale dei geo-ecosistemi carsici*. In: Biancotti A., Motta M. (Eds.) *Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali*, Briganti, Genova, p. 31-55 (2003).
- [3] QUINIF Y., GENTY D., MAIRE R., *Les spéléothèmes: un outil performant pour les études paléoclimatiques*. Bulletin de la Société Géologique de France 165(6), pp. 603-612 (1994).
- [4] GENTY D., QUINIF Y., *Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites - importance for palaeoclimatology*. Journal of Sedimentary Research 66(1), pp. 275-288 (1996).
- [5] BROECKER W.S., OLSON E.A., ORR P.C., *Radiocarbon measurements and annual rings in cave formation*. Nature 185, pp. 93-94 (1960).
- [6] MING T., XIAO GUANG Q., TUNGSHENG L., *Climatic records from annual layers and stable isotopes of a stalagmite in Beijing over the last 2,300 years*. Journal of Chinese Geography 7(3), pp. 16-25 (1997).
- [7] BURNS S.J., MATTER A., FRANK N., MANGINI A., *Speleothem-based paleoclimate record from northern Oman*. Geology, 26, 6, pp. 499-502 (1998).
- [8] HARMON R.S., SCHWARCZ H.P., FORD D.C., *Stable isotope geochemistry of speleothems and cave water from the Flint Ridge-Mammoth Cave System Kentucky: implications for terrestrial climate change during the period 230,000 to 100,000 years B.P.* Journal of Geology 86, pp. 373-384 (1978).
- [9] 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 BORGH C., VERHEYDEN S., SELMO E., *Holocene climate variability in Europe. Evidence from $\Delta^{18}O$, textural and extension-rate variations in three speleothems*. Quaternary Science Reviews 18, pp. 1021-1038 (1999).
- [10] DRYSDALE R., ZANCHETTA G., HELLSTROM J.C., FALICK A.E., ZHAO J.X., ISOLA I., BRUSCHI G., *Palaeoclimatic implications of the growth history and stable isotope ($\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$) geochemistry of a Middle to Late Pleistocene stalagmite from central-western Italy*. Earth and Planetary Science Letters 227, pp. 215-229 (2004).
- [11] VARDABASSO S., *Il Mesozoico epicontinentale della Sardegna*. Acc. Naz. Lincei (s.8) 27(5), pp. 178-184 (1959).
- [12] AMADESI A., CANTELLI C., CARLONI G.C., RABBI E., *Ricerche geologiche sui terreni sedimentari del Foglio 208 «Dorgali»*. Giornale di Geologia 28, pp. 59-92 (1960).
- [13] ASSORGIA A., BENTINI L., BIONDI P.P., *Caratteristiche strutturali delle Assise carbonatiche mesozoiche del Golfo di Orosei (Il Sopramonte di Orgosolo-Urzulei)*. Memorie Società Geologica Italiana 13/2, pp. 209-219 (1974).
- [14] DIENI I., MASSARI F., *Mesozoic of Eastern Sardinia*. In: Cherchi, A. (ed.) 19th European Micropaleontological Colloquium-Guide Book, AGIP Sardinia, 1-10 October 1985, pp. 66-78 (1985).
- [15] SAVELLI C., PASINI G.C., *Preliminary results of K-Ar dating of basalts from Eastern Sardinia and the Gulf of Orosei*. Giornale di Geologia 39(1), pp. 303-312 (1973).
- [16] PASCI S., *Tertiary transcurrent tectonics of North-Central Sardinia*. Bulletin de la Société Géologique de France, 168, pp. 301-312 (1997).
- [17] DE WAELE J., *Geomorphologic evolution of a coastal karst: the Gulf of Orosei (Central-East Sardinia, Italy)*. Acta Carsologica, 33(2) pp. 37-54 (2004).
- [18] DE WAELE J., FORTI P., *Estuari sotterranei*. In «Grotte Marine: cinquant'anni di ricerca in Italia», a cura Cicogna F., Nike Bianchi C., Ferrari G. & Forti P., finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, pp. 91-104 (2003).
- [19] DE WAELE J., *Complesso sotterraneo di Codula Ilune, Sardinia, Italy*. International Caver 20,

- pp. 3-10 (1997).
- [20] FORTI P., ROSSI G., *Idrogeologia ed evoluzione carsica della Codula di Luna (Sardegna)*. Atti e Memorie della Commissione «E. Boegan» 30, pp. 53-79 (1991).
- [21] CARMIGNANI L., OGGIANO G., BARCA S., CONTI P., SALVADORI I., ELTRUDIS A., FUNEDDA A., PASCI S., *Geologia della Sardegna. Note illustrative della Carta Geologica della Sardegna a scala 1:200.000*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia 60, pp. 1-283 (2001).
- [22] HOVORKA J., *Cave diving exploration on Sardegna*. Czech Speleological Society 30, pp. 30-36 (1993).
- [23] ANTONIOLI F., FERRANTI L., *Geomorfologia costiera e subacquea e considerazioni paleoclimatiche sul settore compreso tra S. Maria Navarrese e Punta Goloritzé (Golfo di Orosei, Sardegna)*. Giornale di Geologia 54(2), pp. 66-89 (1992).
- [24] ALESSIO M., ALLEGRI L., ANTONIOLI F., BELLUOMINI G., FERRANTI L., IMPROTA S., MANFRA L., PROPOSITO A., *Risultati preliminari relativi alla datazione di speleotemi sommersi nelle fasce costiere del Tirreno centrale*. Giornale di Geologia 54(2), pp. 165-193 (1992).

