

Monitoraggio di aria e acqua di percolazione in alcune grotte del Trentino

Renza MIORANDI*, Andrea BORSATO, Silvia FRISIA & Michele ZANDONATI

Sezione di Geologia, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, 38100 Trento, Italia

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

RIASSUNTO - *Monitoraggio di aria e acqua di percolazione in alcune grotte del Trentino* - Il monitoraggio dell'ambiente di grotta permette di documentare con precisione le condizioni attuali del concrezionamento e costituisce un essenziale punto di partenza nell'interpretazione dei dati paleoclimatici ricavati da speleotemi. Nell'ambito del Progetto AQUAPAST è stato svolto un monitoraggio in continuo dei parametri di temperatura dell'aria, di conducibilità elettrica e temperatura dell'acqua in 4 grotte di particolare interesse paleoclimatico, dislocate sul territorio Trentino. Ciò che emerge è un andamento stagionale di tutti i parametri indagati con una forte influenza degli eventi infiltrativi sia sulla conducibilità elettrica che sulla temperatura di aria e acqua. La risposta agli eventi piovosi e di disgelo risulta, in genere, ritardata in relazione all'entità degli eventi d'infiltrazione. L'escursione termica annua dei punti monitorati è molto variabile. Sono stati individuati 3 diversi comportamenti: 1) diramazioni poste in prossimità degli ingressi o percorse da correnti d'aria a tubo di vento che mostrano una deviazione standard elevata superiore a 1 °C; 2) rami percorsi da deboli correnti d'aria con deviazione standard compresa tra 1 e 0,1 °C; 3) grotte prive di correnti d'aria sensibili che mostrano una deviazione standard inferiore ai 0,1 °C. Su queste 3 categorie si inserisce anche il comportamento termico di acque correnti ipogee che, oltre a mostrare un'alta escursione termica annuale (dev. st. maggiore di 0,1 °C), evidenziano un'alta variabilità termica interannuale dovuta al regime idrico dell'annata e pertanto legata all'entità delle precipitazioni e della fusione nivale.

SUMMARY - *Cave air and seepage water monitoring in some Trentino caves* - The monitoring of cave environment is fundamental for the interpretation of palaeoclimate data from speleothems. Moreover, it gives a precise knowledge of actual precipitation conditions. Within the frame of the AQUAPAST project, 4 caves in Trentino province were continuously monitored, for at least one year interval, for air and water temperature and electrical conductivity. All the monitored parameters show a seasonal trend and seem to be controlled by infiltration events. Usually, cave parameters record a delay in comparison with rainfall and melting events depending by the quantity of infiltration. The annual temperature excursion is very different and could be summarized in 3 different behaviours: 1) areas located near entrance or affected by wind-tube air circulation, that show a temperature standard deviation higher than 1 °C; 2) areas affected by feeble air current that show a temperature standard deviation between 1 and 0,1 °C; 3) lateral branches without measurable air current with a standard deviation lower than 0.1 °C. The thermal behaviour of ipogean water streams shows a standard deviation higher than 0.1 °C and a large interannual fluctuation due to the meteorological interannual variability.

Parole chiave: monitoraggio, temperatura, conducibilità elettrica, grotte, Trentino

Key words: monitoring, temperature, electrical conductivity, caves, Trentino

1. INTRODUZIONE

Da oltre un decennio i ricercatori del Museo Tridentino di Scienze Naturali svolgono studi sul microclima ipogeo in grotte del Trentino, indagando vari aspetti quali le variazioni di temperatura di aria e acqua in relazione alla quota e alla distanza dall'ingresso (Borsato 1996, 2001a), i flussi d'aria in cavità caratterizzate da circolazione a tubo di vento (Borsato 2003), le variazioni della concentrazione di biossido di carbonio

in funzione della quota di ingresso della cavità e delle diverse stagioni (Borsato & Miorandi 2003), le condizioni di formazione e ablazione dei depositi di ghiaccio ipogeo (Borsato *et al.* 2006). Sono stati effettuati, inoltre, studi idrogeologici e idrochimici per comprendere i meccanismi di circolazione dell'acqua di percolazione e della falda freatica all'interno dei sistemi carsici (Borsato 1996, 1997, 2001b, 2004; Borsato *et al.* 2007).

All'interno del Progetto di ricerca "AQUAPAST: Acque e concrezioni di grotta quali strumenti per rico-

struire ad alta risoluzione i cambiamenti climatici del passato in Trentino” finanziato dalla PAT e coordinato dal Museo Tridentino di Scienze Naturali, si sono estesi i monitoraggi del microclima ipogeo in 4 grotte del Trentino che rivestono un particolare interesse per studi paleoclimatici (Fig. 1). Infatti, il monitoraggio delle attuali condizioni di temperatura dell’aria, di conducibilità elettrica e temperatura dell’acqua costituiscono un essenziale punto di partenza nell’interpretazione dei dati paleoclimatici ricavati da speleotemi e permettono, inoltre, di documentare con precisione le condizioni attuali del concrezionamento.



Fig. 1 - Profilo della Provincia Autonoma di Trento (PAT) con la collocazione delle 4 grotte studiate.

Fig. 1 - Trentino Province with the location of the 4 monitored caves.

2. MATERIALI E METODI

Per il monitoraggio microclimatico sono stati uti-

lizzati *datalogger* che consentono la registrazione dei dati secondo un intervallo di tempo preimpostato, generalmente di 1 o 2 ore. Gli strumenti utilizzati sono di due tipi (Tab. 1):

- a due canali (Logotronic) per la registrazione in contemporanea di temperatura e conducibilità elettrica dell’acqua tramite sonda esterna;
- monocanale (Hanna Instruments e Onset Optic Stow Away) per la misura della temperatura.

Questi strumenti sono composti da un corpo unico stagno che comunica tramite una porta seriale a infrarossi col PC.

3. RISULTATI¹

3.1. Grotta di Aladino

Il monitoraggio all’interno della Grotta di Aladino è stato effettuato per il solo parametro di temperatura dell’acqua del torrente sotterraneo (Fig. 2), l’emissario del Lago Casinei, che dopo un percorso aereo di soli 700 m sparisce in un inghiottitoio e da quel punto comincia il suo percorso sotterraneo che lo porta a intercettare la cavità alla profondità di 250 m (Rivadossi 1995), dove è stato posizionato il *datalogger* di temperatura Onset Optic Stow Away con un tempo di registrazione di 2 ore. Lo strumento ha registrato a partire dal 2 settembre 2001 per un periodo di poco inferiore all’anno. Nel grafico riportato di seguito (Fig. 3) i dati raccolti sono stati confrontati con i dati medi giornalieri delle precipitazioni e temperature dell’aria della stazione meteorologica PAT di Malga Bissina a quota 1792 m s.l.m.

¹ Per la descrizione morfologica estesa delle grotte che verranno di seguito prese in esame si rimanda a Borsato *et al.* (2007) in questo stesso volume.

Tab. 1 - Specifiche tecniche degli strumenti utilizzati.

Tab. 1 - Technical characteristics of the utilized datalogger.

Strumento	Temperatura	Conducibilità elettrica (riferita a 20 °C)
Logotronic Gealog-Mini con sonda WTW TetraCon 325 (capacità misure = 22.500)	Range: -5 ÷ +100 °C Risoluzione: 0,01 °C Precisione: ±0,2 °C	Range: 1 µS cm ⁻¹ ÷ 2 S cm ⁻¹ Risoluzione: 0,3 µS cm ⁻¹ Precisione: ±2 µS cm ⁻¹
Hanna Instruments, serie HI 140 GH (capacità misure = 7.600)	Range: -0,5 ÷ +15 °C Risoluzione: 0,1 °C Precisione: ±0,3 °C	
ONSET Optic Stow Away (capacità misure = 7.944)	Range: -15 ÷ +37 °C Risoluzione: 0,15 °C Precisione: ±0,2 °C	

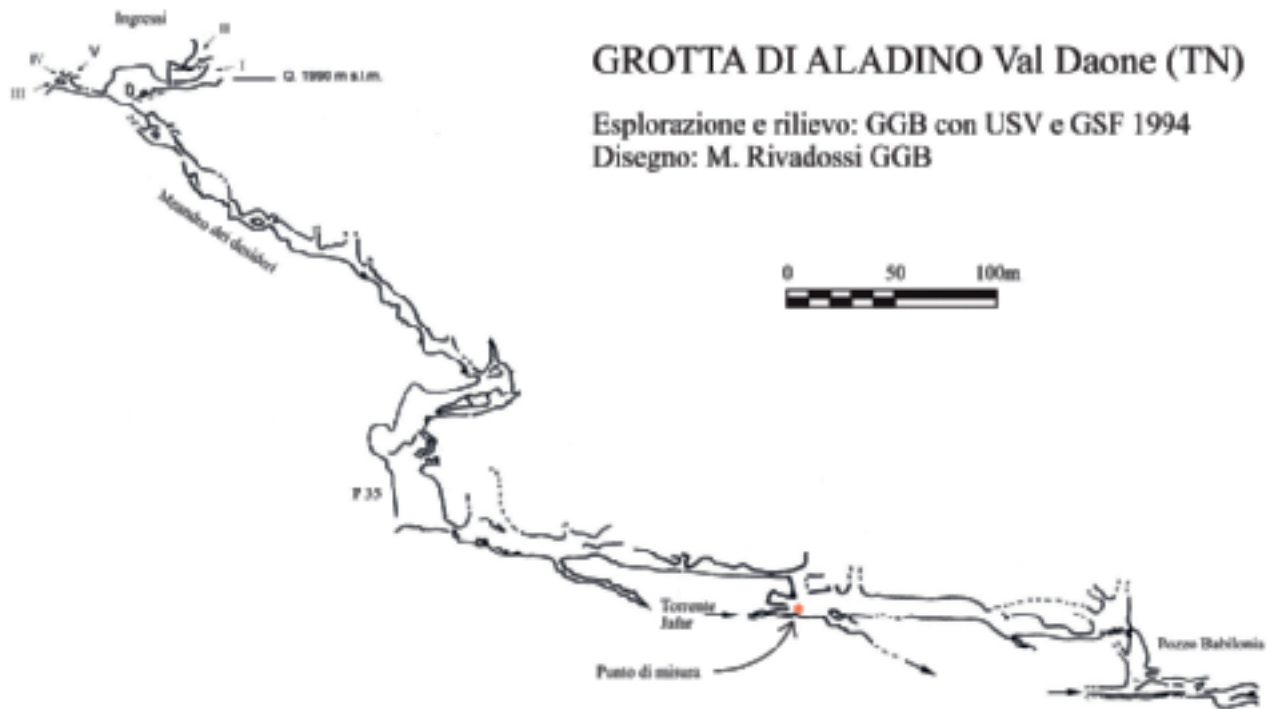


Fig. 2 - Sezione parziale della Grotta di Aladino. L'asterisco indica il punto di misura. Rilievo semplificato da Rivadossi (1995).
 Fig. 2 - Partial cross section of Grotta di Aladino. The star indicates the measuring point. Simplified map from Rivadossi (1995).

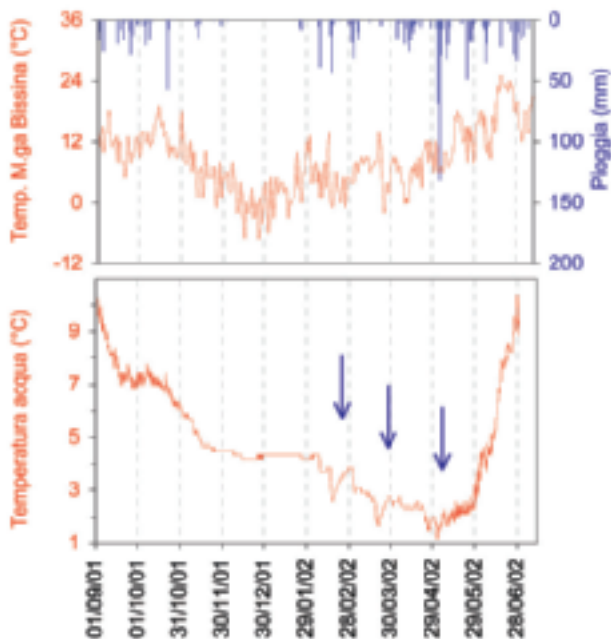


Fig. 3 - Temperatura del torrente interno della Grotta Aladino (sotto) confrontata con la temperatura dell'aria e le precipitazioni registrate alla stazione meteorologica PAT di Malga Bissina (sopra). Le frecce blu indicano i principali eventi infiltrativi connessi alla fusione nivale.

Fig. 3 - Grotta di Aladino stream temperature (below) compared with air temperatures and precipitations from Malga Bissina station (PAT network). Blue arrows indicate the main infiltration events triggered by the snowmelt.

3.1.1. Andamento annuale

La temperatura del torrente sotterraneo mostra una spiccata stagionalità con una forte escursione termica annuale di 9,22 °C. La temperatura minima di 1,16 °C viene raggiunta tra fine aprile e inizio maggio in corrispondenza del periodo di massima fusione della neve, mentre i valori massimi di oltre 10 °C si registrano tra giugno e settembre. Dopo il periodo di fusione della neve le temperature mostrano una brusca risalita verso i valori massimi e ricominciano a scendere con settembre, quando anche le temperature esterne mostrano una flessione. Nel periodo invernale, tra metà novembre e febbraio quando l'infiltrazione dall'esterno è minima, la temperatura si stabilizza intorno a 4,55 ±0,5 °C. Questo valore è di poco inferiore alla media annuale che, tenendo conto della mancanza delle misure estive, dovrebbe risultare intorno ai 5,6 °C.

3.1.2. La fusione della neve

Durante il periodo del disgelo, che inizia in modo discontinuo a febbraio e si conclude entro la metà di maggio, sono evidenti i principali eventi di fusione che determinano un repentino abbassamento delle temperature del torrente. La fusione nivale viene innescata da giornate particolarmente calde, come nel caso del 21 marzo, ovvero da precipitazioni superiori ai 20 mm di pioggia giornaliera, come per i picchi dell'8 e 16 febbraio e per quello dell'11 maggio. A inizio stagione,

i picchi negativi di temperatura del torrente sotterraneo mostrano un andamento asimmetrico con brusche diminuzioni dei valori anche superiori a 1 °C e una più lenta ripresa verso i parametri precedenti l'evento. Con maggio questi repentini abbassamenti di temperatura si fanno più ravvicinati, con una forma più simmetrica e con una minore ampiezza dell'evento che mostra valori di circa 0,5 °C.

3.1.3. Cicli circadiani di temperatura

Terminata la fusione di maggior parte della copertura nevosa, le temperature del torrente ipogeo si assestano momentaneamente sui 2,3 °C per poi risalire

verso i valori massimi estivi. Questo periodo è caratterizzato dalla presenza di cicli circadiani di temperatura che rispondono al riscaldamento esterno subito dalle acque del Lago Casinei. Inizialmente, dall'11 al 29 maggio, il riscaldamento esterno, pur visibile nei cicli circadiani, non è sufficiente a innalzare le temperature del torrente sotterraneo: ciò è dovuto al fatto che il lago riceve ancora un contributo in acqua dalla fusione di chiazze di neve residue. Col progredire della stagione, invece, l'apporto delle acque fredde di fusione si esaurisce e le temperature del torrente ipogeo cominciano ad aumentare in maniera sensibile (Fig. 4a)

Rispetto alle oscillazioni giornaliere di temperatura esterna, i cicli termici presentano un ritardo che

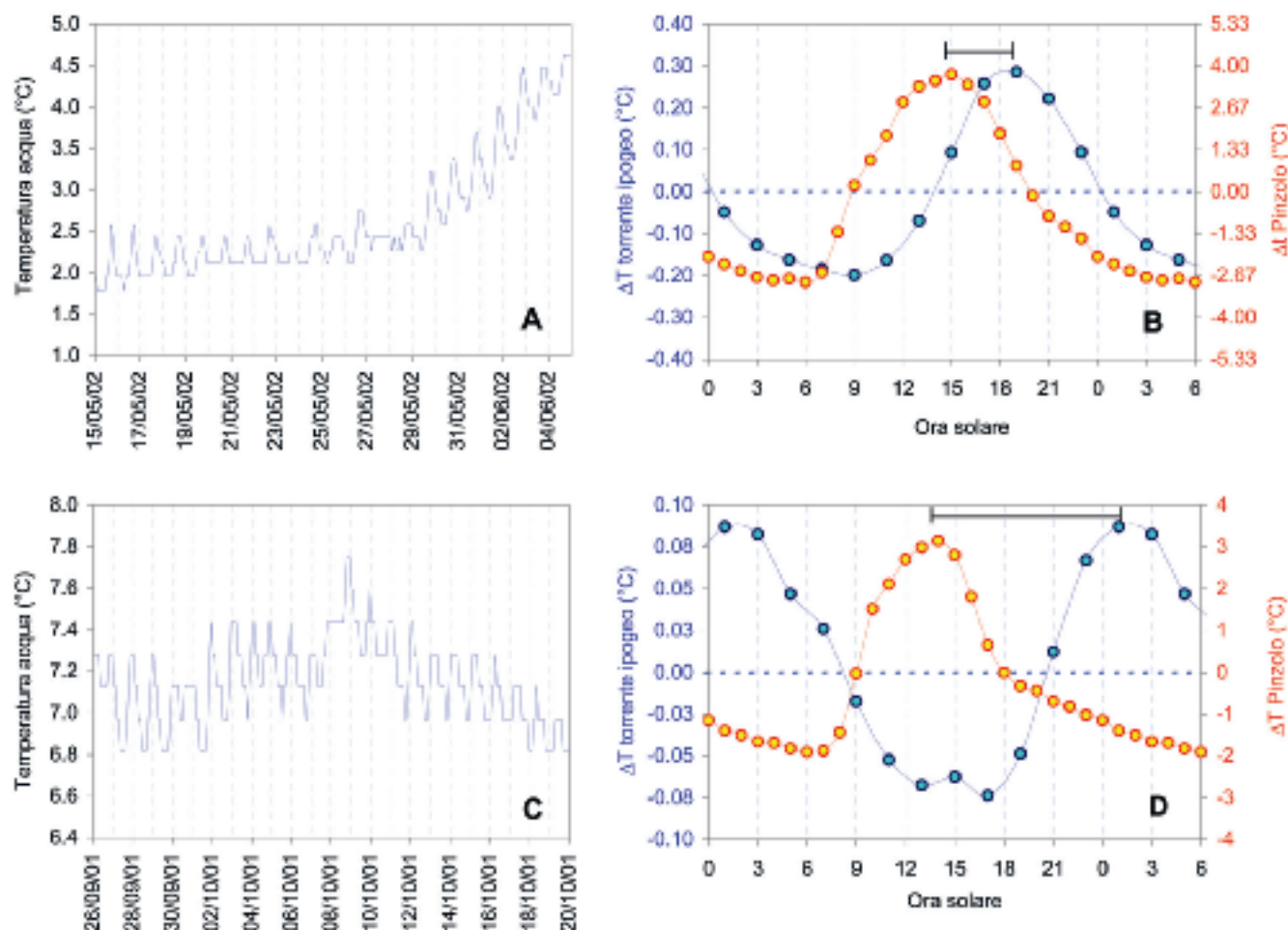


Fig. 4 - Cicli circadiani di temperatura del torrente ipogeo della Grotta di Aladino in periodo primaverile (A) e autunnale (C). Nei grafici B e D sono stati confrontati gli scarti dei valori medi orari delle temperature del torrente sotterraneo e delle temperature esterne dell'aria per il periodo primaverile (B) e autunnale (D). Il ritardo tra temperature ipogee ed esterne, visualizzato dalla barra nella parte superiore del grafico, è di 4,2 ore tra il 15.05.2002 e il 05.06.2002 (B) e 12,2 ore tra il 26.9.2001 e il 26.10.2001 (D).

Fig. 4 - Daily water temperature oscillation in Aladino cave stream during spring (A) and autumn (C). In graphics B and D are compared the hourly mean values deviation of cave river temperature and external air temperature during spring (B) and autumn (D). The delay between ipogean and external temperatures, shown by the line in the upper part of the graphics, is 4.2 hours, in the period from 15th of May to 5th of June 2002 (B) and 12.2 hours in the period from 26th of September to 26th of October 2001 (D).

si fa progressivamente più accentuato col progredire dell'estate. Ad esempio, nel periodo immediatamente successivo alla fusione nivale, dal 15 maggio al 5 giugno, il ritardo è minimo e varia tra le 2 e le 4 ore (Fig. 4b) con temperature massime registrate alle 19:00 e minime alle 9:00, e con un'escursione di $\pm 3,3$ °C rispetto al valore medio del periodo. Viceversa, a giugno si hanno ritardi maggiori, fino a 12 ore; con l'estate, infatti, il livello del lago diminuisce causando la riduzione della portata dell'emissario e di conseguenza del torrente ipogeo, e quindi della sua velocità di scorrimento. Il minor volume d'acqua in transito comporta una minore capacità termica, aumenta la possibilità di scambio termico con le pareti della grotta e determina, pertanto, una riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni termiche circadiane.

I cicli si mantengono anche in autunno fino alla metà di ottobre quando si arrestano (Fig. 4c). A partire da settembre, le temperature cominciano a scendere e il ritardo rispetto alle temperature esterne diviene massimo raggiungendo le 16 ore. Poco prima dell'interruzione delle oscillazioni, l'andamento discendente si attenua mostrando un periodo con temperature costanti dal 21 settembre al 22 ottobre (Fig. 3). Successivamente, le temperature calano ancora e i cicli circadiani si fanno sempre meno ampi e più ritardati fino scomparire definitivamente entro la metà di novembre, quando il lago comincia a ghiacciare e le temperature del torrente raggiungono i valori stabili invernali.

I cicli termici circadiani, quindi, si evidenziano durante tutto il periodo estivo-autunnale con andamento ascendente durante l'estate e discendente in autunno. Su questo trend si inserisce l'effetto degli eventi piovosi che, a seconda del periodo, possono provocare un abbassamento o un innalzamento delle temperature. Si nota, infatti, che gli eventi piovosi al di sopra dei 20 mm in estate portano a un improvviso calo delle temperature – come per il 6 e il 26 giugno – e durante l'autunno causano, invece, un picco positivo come per il 25 settembre e il 21 ottobre. Inoltre, sia in estate che in autunno, le precipitazioni possono portare a una riduzione del ritardo tra i cicli esterni e ipogei; è quanto avviene, ad esempio, con le piogge del 26 giugno quando si passa da un ritardo di 12 a uno di 6 ore. In questo caso, l'evento piovoso causa un aumento di portata del torrente con conseguente riduzione dei tempi di percorrenza nel sottosuolo e maggiore velocità di propagazione dell'onda termica. In ogni caso, le anomalie dovute alle precipitazioni sono di durata molto breve rispetto alla flessione termica connessa alla fusione nivale.

3.2. Abisso di Val del Parol

Il monitoraggio è stato eseguito, per i parametri di temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua di ruscellamento, tramite un *datalogger* Logotronic

collocato alla profondità di circa -120 m alla base del pozzo P56 (Fig. 5). La grotta si presenta asciutta fino alla profondità di circa 60 m rispetto all'ingresso; da quel punto in poi è sempre presente un abbondante stillicidio che diviene scorrimento d'acqua in occasione di abbondanti piogge o durante il disgelo. Alla base del P56 è presente un deposito di fango spruzzato da un abbondante stillicidio che forma alcune pozze d'acqua dove è stato collocato il *datalogger*. La portata in questo punto, durante il periodo invernale, è stata stimata di circa $0,5 \text{ l min}^{-1}$. Lo strumento è stato lasciato in loco per un periodo di un anno, dal 16 ottobre 2001 al 10 novembre 2002. I dati registrati sono stati successivamente raffrontati con i dati di precipitazione e di temperatura media giornaliera dell'aria della stazione meteorologica IASMA situata in località Polsa di Brentonico a 1300 m di quota s.l.m. All'interno della cavità sono stati collocati anche due *datalogger* Hanna Instruments per la misura della temperatura dell'aria nel meandro iniziale a una profondità di circa 20 m e alla profondità di -130 m all'interno del Ramo Fossile, che costituisce una diramazione laterale cieca rispetto al condotto principale che conduce al fondo (Fig. 5).



Fig. 5 - Sezione semplificata dei primi 150 m del Pozzo di Val Parol (rilievo: Gruppo Grotte Rovereto, 2001).

Fig. 5 - Partial and simplified cross section of Pozzo di Val Parol (survey: Gruppo Grotte Rovereto, 2001).

3.2.1. Andamento annuale

Nel grafico (Fig. 6) è riprodotto l'intero periodo di registrazione dei dati (Tab. 2), che presentano un chiaro andamento stagionale. I valori minimi di conducibilità elettrica (EC) vengono raggiunti a inizio marzo in corrispondenza della fusione primaverile ($159,7 \mu\text{S cm}^{-1}$), successivamente al periodo invernale caratterizzato da valori stabili attorno a $200 \mu\text{S cm}^{-1}$. Dopo aprile, i valori di EC si alzano gradualmente fino a raggiungere, tra metà luglio e metà settembre, i valori massimi di circa $280 \mu\text{S cm}^{-1}$. L'andamento ascendente è caratterizzato da improvvisi picchi positivi con sbalzi dai 20 ai $40 \mu\text{S cm}^{-1}$, che sono da mettere in relazione coi principali eventi piovosi, come discusso in seguito.

Anche la temperatura dell'acqua mostra un *trend* stagionale, sebbene l'escursione totale sia di soli $0,15^\circ\text{C}$, con massimi nel tardo autunno seguiti da una graduale diminuzione fino a raggiungere valori minimi di $4,7^\circ\text{C}$ da metà gennaio a metà febbraio. Da questo

momento in poi le temperature crescono rapidamente, con occasionali picchi negativi coincidenti con quelli positivi di EC.

Per quanto concerne invece la temperatura dell'aria, la risoluzione degli strumenti utilizzati non è sufficiente per analizzare in dettaglio il ciclo termico nella parte interna della cavità (Ramo Fossile: escursione massima di $0,2^\circ\text{C}$), che, comunque, mostra un andamento analogo a quello della temperatura dell'acqua dove i minimi di temperatura vengono registrati durante il periodo invernale, prima del disgelo (Fig. 6).

Il termometro posizionato nel meandro iniziale presso l'ingresso della cavità mostra un chiaro andamento stagionale correlato con le temperature dell'aria esterna, come evidenziato dal confronto con i dati della stazione meteorologica della Polsa (Fig. 7). Dal grafico si può notare che, in inverno, la curva delle temperature del meandro iniziale è ritardata di circa un mese rispetto alle temperature esterne e presenta escursioni massime di $4,4^\circ\text{C}$, rispetto ai $31,2^\circ\text{C}$ di escursione registrati all'esterno.

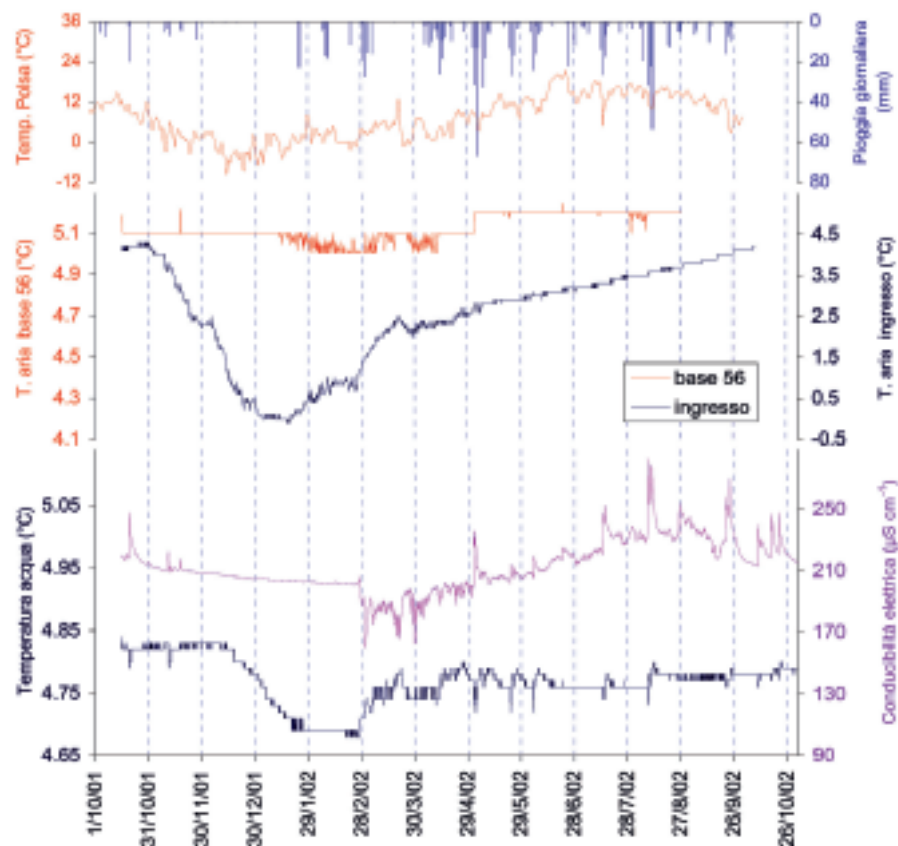


Fig. 6 - Andamento della conducibilità elettrica (EC) e della temperatura (T) dell'acqua di stillicidio del P56 raffrontate con le temperature dell'aria presso l'ingresso e alla base del P56 e con la variabilità delle temperature e precipitazioni esterne (Stazione meteorologica Polsa di Brentonico – IASMA) per il periodo dal 16.10.2001 al 10.11.2002.

Fig. 6 - Plot of the infiltration water electrical conductivity and temperature in P56 shaft compared with air temperature near the entrance of the cave and at the base of P56, and with external temperature and precipitation (Polso di Brentonico meteorological station – IASMA network). Data were recorded from 16.10.2001 to 10.11.2002.

Tab. 2 - Statistica dei dati registrati nell'Abisso di Val del Parol durante il periodo 16.10.2001 - 15.10.2002.

Tab. 2 - *Abisso di Val del Parol data statistics from 16.10.2001 to 15.10.2002*

Parametro	Media	Max	Min
Conducibilità elettrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	216 \pm 6,4	247,9	159,7
Temperatura acqua ($^{\circ}\text{C}$)	4,82 \pm 0,01	4,98	4,79
Temperatura aria ingresso ($^{\circ}\text{C}$)	2,6 \pm 1,27	4,3	-0,1
Temperatura aria ramo fossile ($^{\circ}\text{C}$)	5,1 \pm 0,06	5,2	5,0



Fig. 7 - Confronto tra l'andamento delle temperature presso l'ingresso della grotta e le variazioni esterne di temperatura.

Fig. 7 - *Comparison between air temperature at the cave entrance and external air temperature.*

3.2.2. La fusione della neve

Analizzando in dettaglio l'andamento della conducibilità elettrica (EC) durante il periodo della fusione (da inizio marzo a inizio maggio), si può notare una relazione inversa con le temperature dell'aria in superficie. Questo è dovuto all'arrivo dell'acqua di fusione, che è meno mineralizzata rispetto all'acqua invernale caratterizzata da un maggiore tempo di residenza nell'acquifero.

A partire dall'8 marzo i cicli giornalieri delle temperature esterne, con valori massimi tra le 12:00 e le

15:00 e minimi tra le 4:00 e le 5:00, si riflettono in oscillazioni di EC, che mostrano un andamento circadiano per tutto il periodo della fusione, dall'8 marzo al 2 maggio, con brevi interruzioni dovute al ritorno delle temperature a regimi invernali. In particolare, i minimi di EC risultano correlati con i massimi della temperatura esterna, sebbene i cicli di EC siano ritardati di alcune ore rispetto e quelli esterni (Fig. 8). Ciò è dovuto al tempo che l'acqua impiega per attraversare lo strato di neve, suolo e roccia. Pertanto, col progredire della fusione diminuisce il tempo di attraversamento della coltre nevosa e di fatto si riduce anche il ritardo registrato dal sistema. Infatti, ad inizio fusione il ritardo è di circa 12 h, mentre a fine aprile è di sole 3 h (Fig. 8). A partire dal 22 marzo i cicli giornalieri di EC si interrompono bruscamente a causa di una ricaduta delle temperature esterne al di sotto dello zero per circa una settimana. Successivamente si verifica un nuovo riscaldamento con ripresa della fusione in superficie e ripresa dei cicli circadiani di EC.

Col proseguire della fusione, i cicli di EC si fanno sempre meno ampi fino a scomparire: il completamento della fusione in superficie avviene entro inizio maggio.

La temperatura di questo stillicidio mostra durante il periodo di fusione un comportamento anomalo, in quanto con l'inizio del disgelo i valori cominciano a salire, indicando l'arrivo di acqua più calda quando ci si aspetterebbe un ulteriore abbassamento delle temperature a causa dell'acqua fredda di fusione. Bisogna supporre che in occasione del disgelo lo stillicidio del P56 venga interessato da un collettore laterale che si attiva solo in occasione di portate cospicue. Probabilmente, l'acqua mobilitata è di qualche decimo di grado più calda rispetto all'altra, tanto che la temperatura risultante dal mescolamento delle due determina un innalzamento dei valori di temperatura.

3.2.3. Le piene autunnali

Terminata la fusione della neve, i valori di conducibilità elettrica risalgono al di sopra dei valori invernali fino a raggiungere i valori massimi ad inizio autunno. Il trend di innalzamento della curva è interessato da bruschi picchi positivi – legati a eventi piovosi superiori a 20 mm nelle 24 ore – dell'entità di 20-40 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e di 0,02 $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 6). Questi picchi sono preceduti da brevi abbassamenti di valore dell'ordine di 2-3 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e di 0,04 $^{\circ}\text{C}$. Tale risposta agli eventi piovosi fa supporre che nel punto monitorato convergano due acque con caratteristiche chimico-fisiche differenti: una, con portata minima, che risponde più velocemente agli eventi esterni e che presenta una minore temperatura e conducibilità, e un'altra, con portata maggiore, che si attiva successivamente. Quest'ultima, caratterizzata da temperatura e conducibilità più alte della prima, è il risultato del pistonamento di acque vecchie, che hanno avuto tempi di residenza maggiori nell'acquifero (Borsato 2001b).

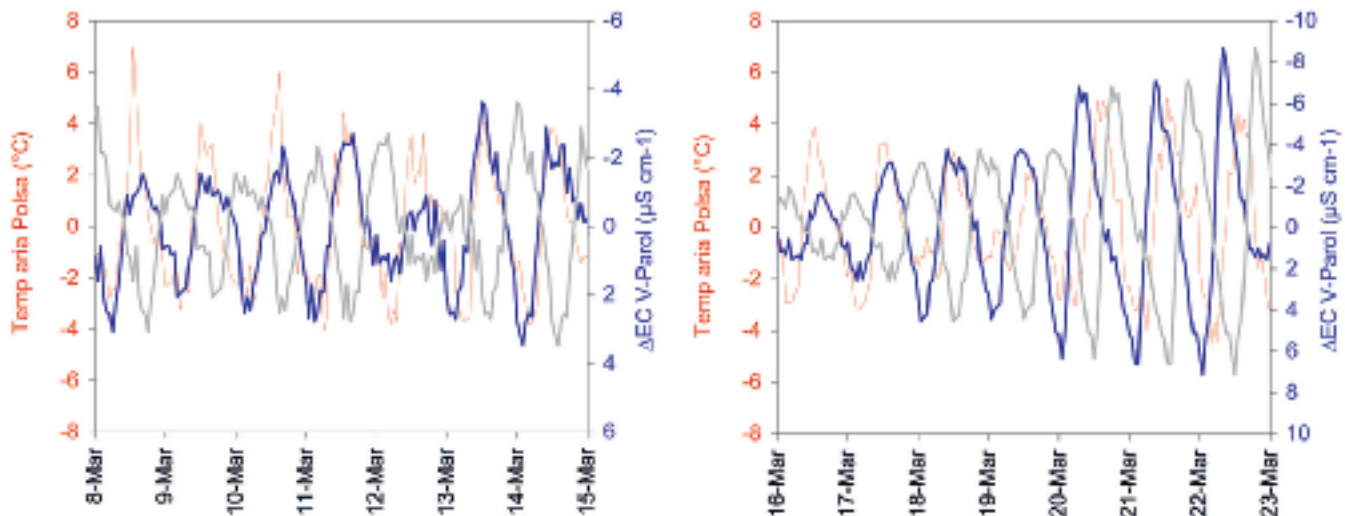


Fig. 8 - Raffronto tra le oscillazioni orarie della temperatura in superficie presso la stazione meteorologica (IASMA) della Polsa (in rosso) e le oscillazioni orarie della conducibilità elettrica presso il P56 in due diversi periodi del monitoraggio (in grigio). Ai fini del confronto, da entrambe le variabili è stato tolto il trend. In blu sono riportati i cicli di conducibilità elettrica che sono anticipati di 12 ore (grafico di sinistra) e di 11 ore (a destra) per ottenerne la sincronizzazione con i cicli della temperatura esterna.

Fig. 8 - Hourly air temperature oscillation (red line) at the Polsa surface meteorological station compared with hourly electrical conductivity oscillation (grey line) at P56 shaft in two different period. In order to compare the two variable, from each one was removed the trend. The electrical conductivity curve (blue line) was anticipated of 12 hours (left graphic) and of 11 hours (right) to obtain the synchronization with external temperature.

In altre grotte, come nel caso della stalattite G2 nella Grotta di Ernesto (Borsato1997), gli eventi infiltrativi legati a forti piogge estivo-autunnali portano, infatti, alla registrazione di valori negativi di conducibilità, in quanto l'acqua piovana determina un aumento della portata degli stillicidi e una maggiore velocità di infiltrazione con conseguente minore mineralizzazione delle acque (Borsato 1997, 2001b). Pertanto, il comportamento dello stillicidio di Val del Parol va a supportare l'ipotesi dell'arrivo di acqua proveniente da un collettore laterale, già proposta per l'anomalia di temperatura registrata durante la fusione primaverile, nonché dell'esistenza di un epicarso ben sviluppato in grado di annullare i possibili picchi negativi di temperatura e EC legati all'acqua di neoinfiltrazione.

Da un'osservazione in dettaglio dei dati, si è notato un ritardo dei valori di EC e T rispetto agli eventi temporaleschi. Lo sfasamento tra l'evento piovoso e l'inizio del picco negativo di conducibilità e temperatura è stato calcolato di circa 8-10 h.

3.3. Grotta Paroi

La grotta è costituita da un'unica galleria ascendente con un dislivello complessivo di circa 130 m

(Fig. 9). Oltre all'ingresso principale posto a 631 m s.l.m., presenta altri due accessi che immettono alla galleria tramite condotti artificiali che sono stati scavati alle quote di 677 m e 778 m s.l.m. (Ischia 1991).

All'interno della grotta è stato posizionato un datalogger Onset Optic Stow Away per la misura della temperatura dell'acqua di stillicidio, collocato dopo una strettoia situata poco più a monte del secondo accesso alla grotta. Il punto di misura si trova in corrispondenza di un tratto sifonante della grotta ed è quindi influenzato dalla vicinanza di acque correnti, specialmente nei mesi di fusione nivale. Lo strumento è stato ritirato dopo un periodo di un anno e mezzo.

I dati sono stati raffrontati con i valori medi giornalieri delle precipitazioni e temperature dell'aria dalla stazione meteorologica IASMA di Tione a quota ~570 m s.l.m.

3.3.1. Andamento annuale

I valori di temperatura all'interno della cavità (Fig. 10) mostrano un andamento stagionale inverso rispetto alle temperature esterne, con massimi di 8,01 °C nei mesi invernali da metà novembre a fine marzo, e minimi di 6,76 °C in estate tra luglio e agosto. Durante

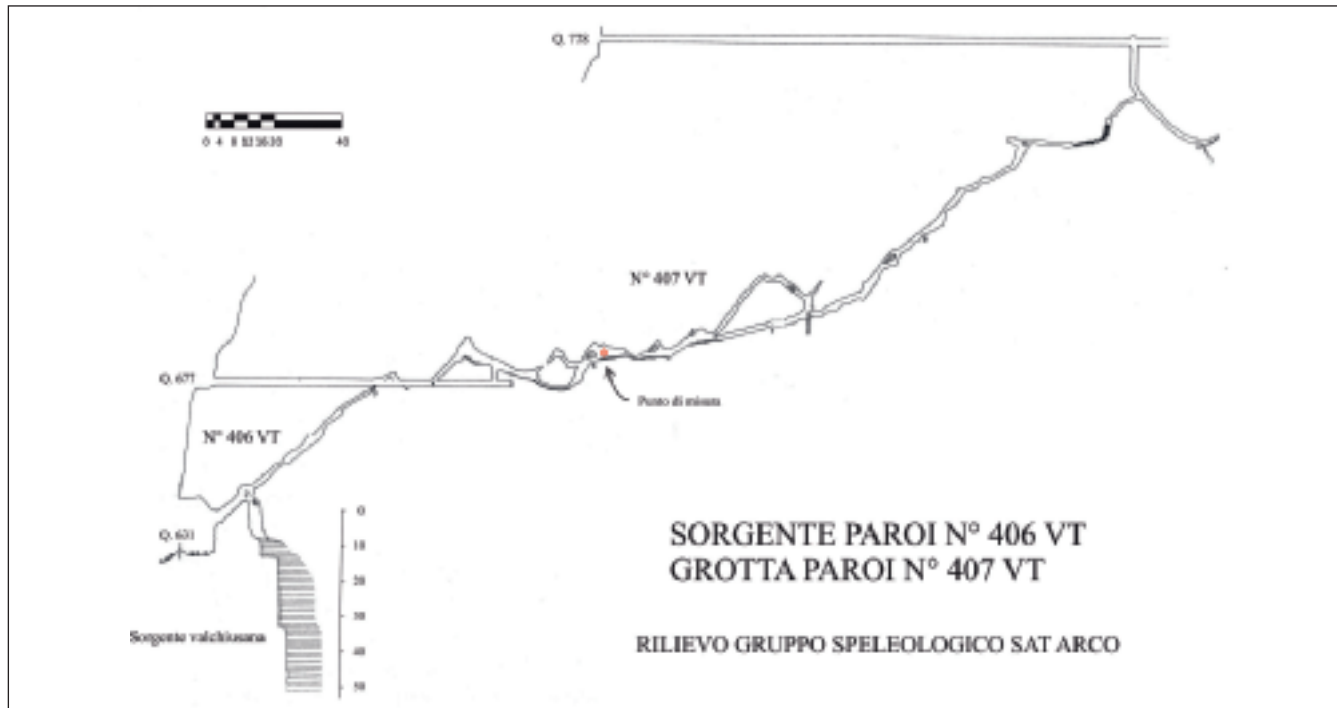


Fig. 9 - Sezione longitudinale della Grotta Paroi con indicati i 3 ingressi. L'asterisco indica il punto dove è stato collocato il datalogger (rilievo da Ischia 1991)

Fig. 9 - Grotta Paroi vertical section with the 3 entrances signed. The star indicates the place where the data-logger was installed (survey by Ischia 1991).

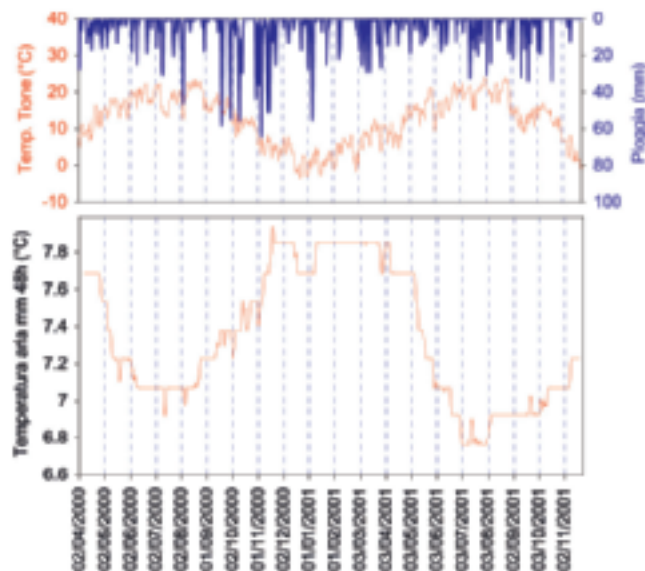


Fig. 10 - Andamento della temperatura media (T) dello stillicidio della Grotta Paroi (media mobile sulle 48 ore) per il periodo da aprile 2000 a novembre 2001, raffrontato con la variabilità delle precipitazioni e temperature esterne (Stazione meteorologica IASMA di Tione).

Fig. 10 - Mean Paroi cave water temperature (moving average over 48 hours) compared with external air temperature and precipitation at Tione station (IASMA network) for the period April 2000 - November 2001.

l'inverno le temperature sono pressoché stabili con variazioni inferiori a 0,2 °C; tale stabilità termica è dovuta alla riduzione dell'infiltrazione a seguito del congelamento del suolo.

Ad inizio marzo le temperature esterne si alzano al di sopra degli 0 °C, mentre in grotta si verifica un graduale abbassamento dei valori, connesso all'infiltrazione di acque di fusione, fino a raggiungere tra luglio e settembre i valori minimi di 6,76 °C. Nonostante la grotta si sviluppi a bassa quota, risulta influenzata da acque di fusione che derivano da quote molto più elevate; infatti, nella zona dell'ingresso naturale è attiva la sorgente Paroi di tipo valchiusano il cui bacino di alimentazione comprende anche aree con quote superiori ai 2000 m s.l.m. (Ischia 1991). Questo spiega il prolungarsi fino ad inizio luglio della curva discendente delle temperature ipogee.

Il trend ascendente autunnale, che inizia a metà settembre, è interessato da alcuni picchi in relazione con le precipitazioni, superiori ai 20 mm di pioggia giornaliera, che possono determinare sia un aumento che una diminuzione delle temperature ipogee, a seconda dello scarto di temperatura tra l'aria esterna e quella interna alla grotta. Infatti, nel mese di luglio 2000 si registra una diminuzione delle temperature sotterranee in relazione all'evento piovoso dell'11 luglio, mentre nello stesso periodo del 2001 le piogge del 13 luglio causano un lieve riscaldamento all'interno della grotta.

3.4. Cogola Grande di Giazzera

La grotta (1025 m s.l.m.) si presenta come una grande caverna dalla quale parte un laminatoio lungo circa 20 m che conduce a una sala finale collocata a 30 m di profondità rispetto al piano di campagna (Frisia *et al.* 2007). Il monitoraggio, svolto in questa sala finale, ha preso in considerazione i parametri di conducibilità elettrica (EC) e temperatura dell'acqua di stillicidio tramite l'utilizzo di un *datalogger* Logotronic che è stato lasciato sul posto per le annate 2002 e 2003 (Miorandi *et al.* 2005). La sonda dello strumento è stata posizionata all'interno di una boccetta collegata tramite un tubicino a un barattolino che raccoglieva l'acqua di percolazione di una stalattite a cannuccia (corrispondente al punto di campionamento A in Borsato *et al.* 2007). Contemporaneamente sono state effettuate delle visite mensili alla cavità durante le quali venivano prese le misure di portata e conducibilità elettrica dello stillicidio tramite un conduttimetro portatile WTW Multiline P3.

3.4.1. Andamento annuale

In figura 11 sono confrontati i dati di EC e temperatura dell'acqua di percolazione con le misure mensili di portata, e con la temperatura e piovosità della stazione meteorologica di Terragnolo (quota 800 m s.l.m.). Mentre la temperatura mostra dei valori costanti durante le due annate, gli altri parametri hanno un andamento diverso tra il 2002 e il 2003. Questo fatto è da ricondurre alle particolari condizioni meteorologiche dell'inverno 2002-2003 che è stato particolarmente secco con precipitazioni nevose molto scarse a seguito delle quali è venuta a mancare completamente la ricarica primaverile dell'acquifero (Fig. 11). La portata mostra un andamento stagionale con ricarica dell'acquifero in due momenti precisi dell'anno: in occasione della fusione nivale in primavera (marzo 2002, quasi assente nel 2003) e in occasione delle abbondanti piogge autunnali (novembre 2002 e novembre 2003). Durante l'estate invece, la grotta si presenta piuttosto secca con pochi stillicidi attivi che mostrano una forte riduzione di portata a causa dell'evapotraspirazione in superficie.

Nel corso dell'estate 2002, comunque, si sono verificate anche delle ricariche minori dovute a eventi piovosi superiori ai 20 mm di pioggia giornaliera, mentre nel corso del 2003 si riscontra una diminuzione pressoché continua del gocciolamento fino all'autunno, quando si raggiunge il valore minimo di 0,02 ml min⁻¹. La quasi totale assenza di precipitazioni nevose durante l'inverno e la situazione di siccità verificatasi durante l'estate hanno determinato la ridotta ricarica dell'acquifero nel periodo tra marzo e maggio e l'assenza di ricarica in estate.

Osservando l'andamento della conducibilità è evidente un *trend* stagionale che segue quello della portata, in quanto in concomitanza dei momenti di ricarica dell'acquifero la EC mostra dei sensibili aumenti di valore dell'ordine di circa 40-90 $\mu\text{S cm}^{-1}$ seguiti da una graduale diminuzione. I picchi, eccettuato quello di marzo 2002 legato alla fusione nivale, sono dovuti a eventi piovosi superiori ai 15 mm di pioggia giornaliera come quello del 5 maggio 2002 e quello del 19 maggio 2003. Tra l'inizio dell'aumento di EC e il momento medio dell'evento piovoso si registra un ritardo che varia a seconda dell'intensità dell'evento piovoso e della sua distribuzione nel tempo. Infatti, per piogge intense concentrate in poche ore, come quella del 7 settembre 2002, il ritardo è inferiore alla giornata (0,8 giorni), mentre nel caso di eventi piovosi di media intensità e di medio-lunga durata il ritardo può raggiungere i due giorni e mezzo come nel caso delle piogge del 16 novembre 2003 (Fig. 12). In entrambi i casi il picco massimo di EC si registra dopo circa 4 giorni e mezzo dal punto medio dell'evento piovoso. Nel corso del 2003, a conferma della corrispondenza diretta con la portata, anche la EC subisce, a partire da gennaio, delle nette riduzioni dei valori fino a raggiun-

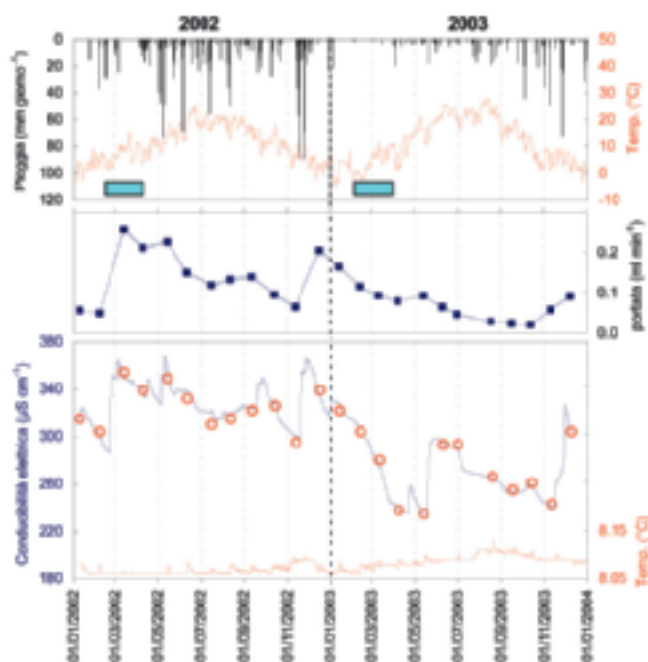


Fig. 11 - Cogola di Giazzera: monitoraggio di EC, T e portata nel corso di due anni. I dati sono confrontati coi valori di temperatura e piovosità della stazione meteorologica PAT di Terragnolo. I dati di portata sono stati misurati mensilmente; i cerchi rossi rappresentano le misure di EC effettuate in occasione dei sopralluoghi mensili.

Fig. 11 - Cogola di Giazzera: electrical conductivity, temperature and discharge monitoring during two years. Data are compared with temperature and precipitation at Terragnolo meteorological station (PAT network). Discharge monitoring was made monthly; red circles are the electrical conductivity measurements made during monthly visits at the cave.

Tab. 3 - Statistica delle due annate di monitoraggio nella Cogola Grande di Giazzera.
 Tab. 3 - Statistics of the two years monitoring at Cogola Grande di Giazzera.

Parametro	Media 2002	Media 2003	Max 2002-03	Min 2002-03
Conducibilità elettrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	$330 \pm 17,7$	$285 \pm 26,9$	367,5	234,2
Temperatura acqua ($^{\circ}\text{C}$)	$8,07 \pm 0,01$	$8,09 \pm 0,01$	8,15	8,05
Portata (ml min^{-1})	$0,14 \pm 0,07$	$0,07 \pm 0,04$	0,24	0,02

gere a fine ottobre la misura di $242,5 \mu\text{S cm}^{-1}$, che è tra le più basse registrata in tutto il periodo (Tab. 3).

In assenza di eventi infiltrativi si verifica una graduale diminuzione di portata degli stillicidi e un abbassamento di EC che testimonia la riduzione delle specie carbonatiche Ca^{2+} e HCO_3^- (cfr. Borsato *et al.* 2007). La diretta correlazione tra portata ed EC è dovuta alla precipitazione di calcite a monte del punto di campio-

namento (*prior calcite precipitation* cfr. Fairchild *et al.* 2000). La precipitazione di calcite, legata all'aumento dello stato di saturazione a causa del maggior tempo di residenza e, quindi, tempo di degassamento della soluzione, sottrae Ca^{2+} e HCO_3^- alla soluzione e ne diminuisce la EC. Ciò può avvenire sia all'interno dell'acquifero in fratture e micro-cavità, sia all'interno della cavità sulla volta e in corrispondenza delle stalattiti.

Pertanto, i valori più elevati di EC ($\sim 360 \mu\text{S cm}^{-1}$) rappresentano la composizione iniziale dell'acqua, mentre i valori più bassi testimoniano la progressiva precipitazione di calcite nel sistema ipogeo. Infatti, gli eventi di infiltrazione spingono l'acqua che risiede nell'acquifero impedendo la deposizione di calcite all'interno del circuito come, invece, avviene per piogge inferiori ai 15 mm giornalieri.

Questo comportamento della EC è l'esatto opposto di quello registrato per il punto di gocciolamento veloce G2 della Grotta di Ernesto, dove in occasione di forti piogge si verifica una brusca diminuzione della conducibilità di $20-50 \mu\text{S cm}^{-1}$. In questo caso il picco negativo è dovuto alla veloce infiltrazione di acque poco mineralizzate derivanti dalle precipitazioni (Borsato 1997). La maggiore velocità di gocciolamento e il minore grado iniziale di saturazione della calcite sono alla base del diverso comportamento dello stillicidio della Grotta di Ernesto.

L'andamento della temperatura dell'acqua di stillicidio non denota variazioni sensibili nel corso delle due annate, e la curva è compresa in un intervallo di $0,1^{\circ}\text{C}$. Le variazioni di temperatura registrate sono inferiori alla precisione della sonda e non è pertanto possibile effettuare un'interpretazione di dettaglio. I bruschi picchi positivi seguiti da un graduale ritorno della temperatura ai valori pre-evento sono dovuti alle visite mensili alla grotta.

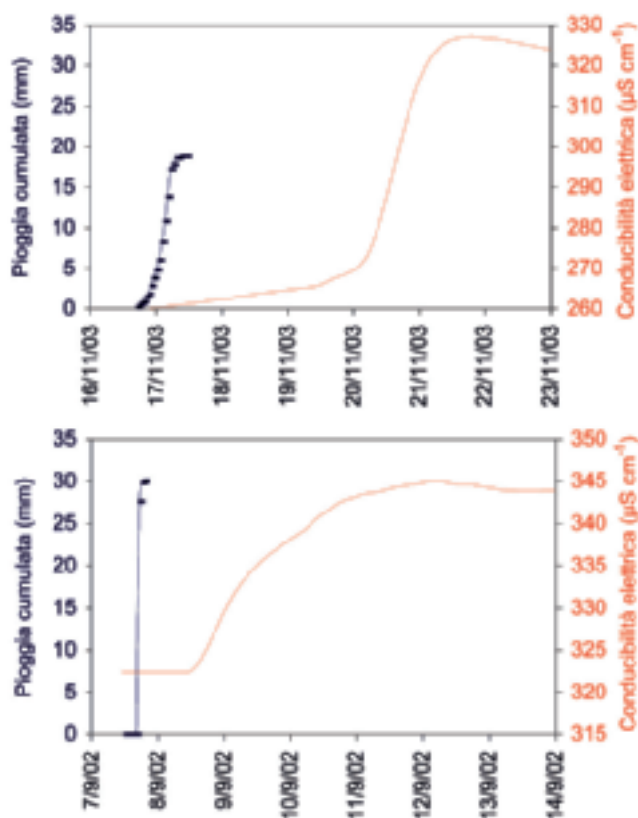


Fig. 12 - Cogola di Giazzera: brusco innalzamento dei valori di EC in relazione a precipitazioni superiori ai 15 mm. L'incremento di EC mostra un ritardo che è tanto maggiore quanto più la pioggia è distribuita uniformemente nel tempo.

Fig. 12 - Cogola di Giazzera: the two graphics show the EC abrupt increase due to two main precipitation events. The EC increase shows a delay that is bigger when rainfall is uniformly distributed.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

In figura 13 sono riportati gli andamenti termici delle 3 grotte monitorate (Val Parol, Paroi e Aladino), che mostrano una sensibile escursione annuale. Nella figura è stato inserito anche il grafico delle temperature dell'acqua del sifone terminale del Bus della Spia (Borsato 2004; Borsato *et al.* 2007), come ulteriore ele-

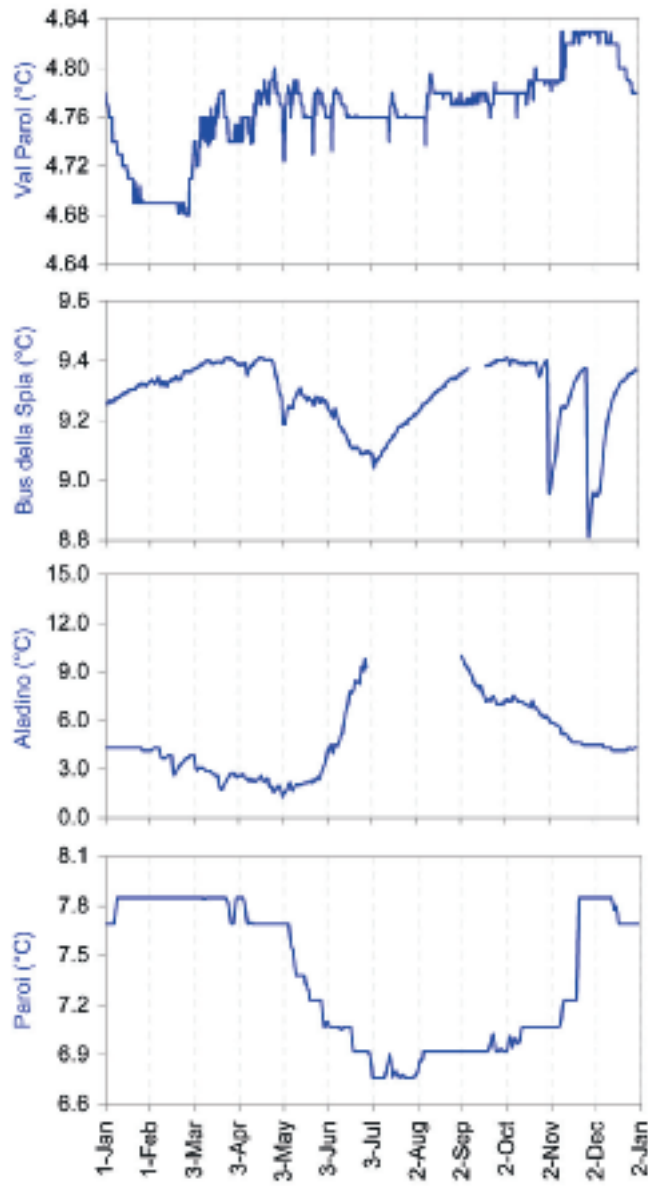


Fig. 13 - Ricostruzione dell'andamento annuale della temperatura dell'acqua nelle grotte Aladino (annata 2002), Val Parol (annata 2002), Paroi (annata 2001), confrontato con le temperature del sifone terminale del Bus della Spia (annata 2003).

Fig. 13 - Annual trend of water temperature for the following caves: Aladino (year 2002), Val Parol (year 2002), Paroi (year 2001). Comparison with water temperature of Bus della Spia siphon (year 2003).

mento di confronto. Per rendere immediato il raffronto, le serie sono state adattate all'anno solare, sebbene i monitoraggi si riferiscano talora ad annate differenti.

L'andamento annuale delle 4 grotte appare piuttosto diverso, ma sono comunque riscontrabili alcune analogie. Infatti, escluso il caso particolare del punto di stillicidio di Val del Parol, le cavità registrano i minimi di temperatura in concomitanza con il termine del periodo

di disgelo, che a seconda della grotta varia tra maggio e luglio in relazione alla quota dell'area di infiltrazione. Generalmente, terminato l'apporto delle acque fredde di fusione della neve, si verifica una ripresa dei valori che è ben attestata dalla Grotta di Aladino e dal Bus della Spia; nel caso della Grotta Paroi, invece, si nota una certa inerzia termica che dura fino ai primi di ottobre, quando finalmente le temperature si alzano.

La grotta di Val del Parol che, come abbiamo visto, si comporta in maniera anomala, registra i minimi di temperatura immediatamente prima dell'inizio della fusione. Quest'ultima, infatti, contrariamente a quanto avviene nelle altre grotte, provoca un innalzamento termico a causa dell'arrivo di acqua più calda e più mineralizzata, da un collettore laterale.

La maggiore differenza nell'andamento delle temperature delle 4 grotte in figura 13 si riscontra nella posizione relativa assunta dai valori invernali rispetto a quelli dell'intera annata.

Generalmente, durante l'inverno, la temperatura all'interno delle grotte tende a stabilizzarsi, infatti il suolo ghiacciato al di sopra delle cavità impedisce la ricarica dell'acquifero e l'ambiente ipogeo non viene perturbato dall'arrivo di masse d'acqua che non siano in equilibrio termico con la roccia. La Grotta Paroi e il

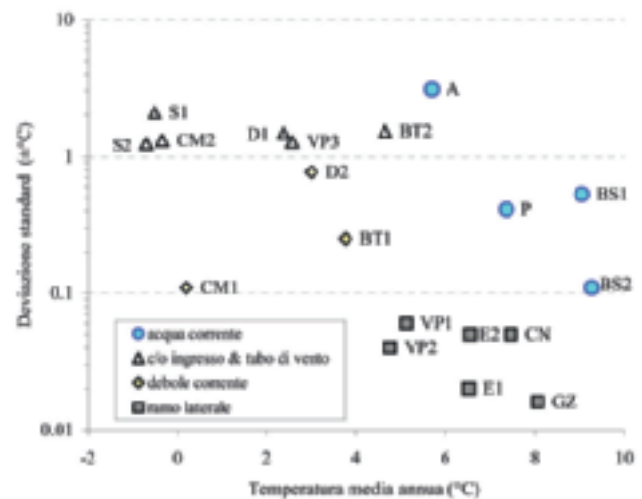


Fig. 14 - Confronto tra la temperatura media annua e la relativa deviazione standard (DS) di alcuni punti di monitoraggio di aria e acqua in grotte del Trentino. Vengono individuati 3 comportamenti microclimatici: microtermico $DS < 0,1$ °C; mesotermico $0,1 < DS < 1$ °C e macrotermico $DS > 1$ °C. Le iniziali a lato dei punti fanno riferimento alla colonna 3 di tabella 4.

Fig. 14 - Comparison between mean annual temperature and its standard deviation (SD) for some air and water monitoring points in Trentino caves. Three different microclimatic behaviour are identified: microthermic $SD < 0.1$ °C, mesothermic $0.1 < SD < 1$ °C and macrothermic $SD > 1$ °C. The labels near the points refer to column 3 in table 4.

Bus della Spia registrano, durante il periodo invernale, le temperature massime dell'annata, che vengono destabilizzate dall'arrivo di nuovi eventi infiltrativi durante il disgelo. Viceversa, nelle grotte, o nei rami, fortemente influenzati da correnti d'aria invernali in entrata (circolazione a tubo di vento presso gli ingressi bassi), dove l'influenza esterna è alta, l'inverno registra i valori minimi. È ciò che avviene per la Grotta di Val del Parol presso l'ingresso. In questa cavità, a causa dell'anomalia spiegata, lo stesso avviene anche presso lo stillicidio del P56. Diversa ancora la situazione della Grotta di Aladino, dove le temperature invernali rappresentano una media delle misure annuali.

Un altro aspetto che emerge dal grafico di figura 13 è la differente escursione termica annua: si passa dai quasi 12 °C di escursione del torrente ipogeo della Grotta di Aladino ai ~0,15 °C di Val del Parol.

Questo aspetto viene analizzato con maggior dettaglio nel grafico di figura 14, che mette a confronto la temperatura media annua con la deviazione standard di alcune grotte trentine, di cui si posseggono dati annua-

li. Nel grafico i punti di misura delle 19 grotte prese in esame vengono classificati sulla base della circolazione d'aria presente nel punto di monitoraggio: zone vicine agli ingressi o con correnti d'aria a tubo di vento, zone con deboli correnti e zone prive di correnti d'aria sensibili. A questa classificazione è stata aggiunta l'ulteriore distinzione di acque correnti per misure effettuate in torrenti o in sifoni con frequenti variazioni di livello, o in punti comunque influenzati dallo scorrimento d'acqua (Grotta Paroi). Sulla base di questa classificazione, dal grafico emerge che le temperature misurate nei rami privi di circolazione d'aria hanno una deviazione standard (DS) inferiore ai 0,1 °C e la temperatura media annua è piuttosto alta compresa tra i 5 e gli 8 °C. Viceversa, la maggiore deviazione standard si verifica nei pressi degli ingressi delle grotte o dove si ha circolazione a tubo di vento. In questi punti la deviazione standard è superiore al grado centigrado, poiché l'influenza delle variazioni termiche esterne è elevata. Spostandosi verso le zone più interne della cavità questo condizionamento va progressivamente diminuendo anche se l'intensità delle

Tab. 4 - Sintesi dei monitoraggi in continuo di temperatura dei punti di misura delle temperature di acqua e aria all'interno di alcune grotte in Trentino. I numeri nell'ultima colonna fanno riferimento alle seguenti fonti: 0 = presente lavoro; 1= Borsato 2003; 2= Borsato *et al.* 2006; 3= Borsato 1996; 4= Borsato 1997; 5= Borsato 2002; 6= dati inediti. Le frecce presenti nella penultima colonna indicano che la misura è stata effettuata vicino all'ingresso basso (freddo ↓) o all'ingresso alto (caldo ↑).
Tab. 4 - Summary of the temperature continuous monitoring in some Trentino caves. The numbers in the last column refer to the following sources: 0= present work; 1= Borsato 2003; 2= Borsato *et al.* 2006; 3= Borsato 1996; 4= Borsato 1997; 5= Borsato 2002; 6= unpublished data. The arrows in the 8th column indicate that the measure was done near the lower (cold) entrance (↓) or the upper (warm) entrance (↑).

Distanza ingresso (m)	Grotta	Sigla	Punto misura		Quota misura (m)	Temp. (°C)	Circolazione aria/acqua	Biblio.
207	Calgeron	CN	still. Marighetti	acqua	482	7,47 ±0,05	ramo laterale	3
280	Bus della Spia	BS1	sifone	acqua 2002	560	9,06 ±0,53	sifone oscillante	5
280	Bus della Spia	BS2	sifone	acqua 2003	560	9,28 ±,011	sifone oscillante	6
150	Paroi	P	sifone	aria	687	7,37 ±0,41	debole corrente	0
50	Cogola di Giazzera	GZ	termine	acqua	1025	8,07 ±0,016	ramo laterale	0
51	Ernesto	E1	scrigno	acqua	1150	6,52 ±0,02	ramo laterale	6
31	Ernesto	E2	Sala Grande	acqua	1160	6,55 ±0,05	ramo laterale	4
222	Val del Parol	V1	ramo fossile	aria	1480	5,12 ±0,06	ramo laterale	0
180	Val del Parol	V2	P 56	acqua	1480	4,76 ±0,04	ramo laterale	0
39	Val del Parol	V3	fessura c/o ingresso	aria	1580	2,58 ±1,27	debole corrente	0
50	Dosson	D1	saletta 50 m	aria	1600	2,38 ±11,49	tubo di vento ↓	1
100	Dosson	D2	vaschetta 100 m	acqua	1600	3,00 ±0,77	tubo di vento ↓	1
549	Aladino	A	torrente ipogeo	acqua	1740	5,70 ±3,09	torrente	0
210	Battisti	BT2	3° Pozzo	aria	1790	4,65 ±11,53	tubo di vento ↑	1
165	Battisti	BT1	Duomo	aria	1855	3,76 ±10,25	debole corrente	1
37	Specchio	S2	Pozzo ghiaccio	aria	1910	-0,70 ±1,24	tubo di vento ↓	2
15	Specchio	S1	strettoia c/o ingresso	aria	1930	-0,51 ±2,10	tubo di vento ↓	2
125	Castelletto di Mezzo	CM1	base Duomo	aria	2385	0,20 ±0,11	debole corrente	2
20	Caselletto di Mezzo	CM2	Bivio	aria	2425	-0,33 ±1,31	tubo di vento ↓	2

correnti d'aria rimane. È quanto avviene, ad esempio, nella Grotta del Dosson (D1 e D2), dove la deviazione standard è tanto maggiore quanto più il punto di misura è vicino all'ingresso (D1= 50 m), mentre spostandosi verso l'interno l'aria tende a equilibrarsi con la temperatura della grotta smorzandone le oscillazioni (D2= 100 m) (Borsato 2003).

Questi due gruppi di grotte, quelle con DS <0,1°C e quelle con DS >1°C, si dispongono agli estremi opposti del grafico, mostrando una temperatura media annua molto differente. Ciò è dovuto soprattutto alle diverse quote d'ingresso delle cavità esaminate, ed è enfatizzato dal fatto che in diversi casi di circolazione a tubo di vento la misura è stata eseguita in prossimità dell'ingresso basso (o ingresso freddo).

Una deviazione standard intermedia, compresa tra 0,1 e 1 °C, caratterizza invece le grotte percorse da deboli correnti d'aria, come nella Grotta del Castelletto di Mezzo dove l'ampia Sala del Duomo innesca correnti barometriche (cfr. Badino 1995).

Infine, le misure di temperatura effettuate su acque correnti mostrano una deviazione standard superiore a 0,1 °C e un'elevata variabilità interannuale (Tab. 4). Quest'ultima è in funzione dell'idrologia e risente del regime meteorologico; lo dimostrano chiaramente i due punti BS1 e BS2 che rappresentano rispettivamente le misure di temperatura del sifone del Bus della Spia nelle annate 2002 e 2003. Come si è già visto, nell'inverno 2002-2003 le precipitazioni nevose sono state molto scarse e l'estate successiva è stata piuttosto secca. Pertanto, la ridotta ricarica dell'acquifero ha determinato la bassa deviazione standard che si contrappone al valore più alto dell'annata 2002, che presenta una variabilità maggiore.

In conclusione, è possibile suddividere il comportamento termico dell'acqua ipogea in funzione della deviazione standard delle misure di temperatura di un'intera annata in 3 diverse classi:

- 1) microtermica, con deviazione standard inferiore a 0,1 °C, per porzioni di grotta prive di correnti d'aria;
- 2) mesodermica, con valori compresi tra 0,1 e 1 °C, per aree dove siano presenti moderate correnti d'aria e/o in saloni interessati da circolazione barometrica;
- 3) macrotermica, con deviazione standard maggiore di 1 °C, per le zone vicine agli ingressi o interessate da circolazione a tubo di vento.

BIBLIOGRAFIA

Badino G., 1995 - Fisica del clima sotterraneo. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, 7, serie 2: 137 pp.
 Borsato A., 1996 - Analisi chimico-fisiche e monitoraggio di acque di percolazione nella Grotta del Calgeron (Valsugana): primi risultati e implicazioni idrogeologiche. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 70 (1993): 79-94.

Borsato A., 1997 - Dripwater monitoring at Grotta di Ernesto (NE-Italy): a contribution to the understanding of karst hydrology and the kinetics of carbonate dissolution. 6th Conference on limestone hydrology and fissured media, La Chaux-de-Fonds, Switzerland 1997. *Proceeding*, Vol. 2: 57-60.
 Borsato A., 2001a - Misure di temperatura in grotte del Trentino. Associazione Gruppi Speleologici Piemontesi: Atti del XVIII Congresso Nazionale di Speleologia, Chiusa di Pesio, ottobre, 1998: 151-154.
 Borsato A., 2001b - Characterisation of a high-altitude alpine karst aquifer by means of temperature, conductivity and discharge monitoring (Centonia spring, Brenta Dolomites, N-Italy). In: Mudry J. & Zwahlen F. (eds), *Proceedings of 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*. Besançon (France), 20th-22nd September 2001: 51-54.
 Borsato A., 2003 - Meteorologia ipogea in cavità della Paganella (Trentino). Atti 19° Congresso Nazionale di Speleologia, Bologna, 27-31 Agosto 2003: 157-168.
 Borsato A., 2004 - Monitoraggio idrologico del sistema Bus de la Spia - sorgente Acquasanta (Gruppo di Brenta): primi risultati. Atti XII° Conv. Reg. di Spel. Trent.-A. Adige, Selva di Grigno, 2002. *Quaderni della Biblioteca della Montagna*, 7: 33-42.
 Borsato A. & Miorandi R., 2003 - Concentrazione di CO₂ e O₂ in cavità del Trentino. Atti 19° Congresso Nazionale di Speleologia, Bologna, 27-31 agosto 2003: 169-176.
 Borsato A., Miorandi R. & Flora O., 2006 - I depositi di ghiaccio ipogei della Grotta dello Specchio e del Castelletto di Mezzo (Dolomiti di Brenta, Trentino): morfologia, età ed evoluzione recente. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 81 (2004): 53-74
 Borsato A., Miorandi R., Corradini F. & Frisia S., 2007 - Idrochimica delle acque ipogee in Trentino: specie, variabilità stagionale, gradiente altitudinale e implicazioni per gli studi climatico-ambientali da speleotemi. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 82 (2005): 123-150.
 Fairchild I.J., Borsato A., Tooth A., Frisia S., Hawkesworth C.J., Yiming H., Mcdermott F. & Spiro B., 2000 - Control on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave water: implications for speleothem climatic records. *Chem. Geol.*, 166: 255-269.
 Frisia S., Borsato A., Richards D.A., Miorandi R. & D'Avanzo S., 2007 - Variazioni climatiche ed eventi sismici negli ultimi 4500 anni nel Trentino meridionale da una stalagmite della Cogola Grande di Giazzera. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 82 (2005): 205-223.
 Ischia N., 1991 - Il complesso carsico delle Moline (S. Lorenzo in Banale, Gruppo di Brenta). 9° Conv. Reg. Spel. Trent. - A. Adige: 13-19 novembre 1989. *Natura alpina*, 42: 79-90.
 Miorandi R., Borsato A., Frisia S. & Corradini F., 2005 - Dripwater monitoring in a superficial Alpine cave (Cogola di Giazzera, Trentino, NE Italy). 14th International Congress of Speleology, Athens-Kalamos, 21-28 August 2005.
 Rivadossi M., 1995 - ...dalla lampada di Aladino. *Speleologia*, 32: 7-16.