



**BOLETÍN INFORMATIVO DE LA
COMISIÓN DE GEOSPELEOLOGÍA**
Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe -FEALC-

*[Geospeleology Commission Newsletter,
Speleological Federation of Latin America and the Caribbean -FEALC-]*

No. 30, Diciembre 2002

Coordinador: Prof. Dr. Franco Urbani
Sociedad Venezolana de Espeleología. Apartado 47.334, Caracas 1041A, Venezuela.
Telefax: (58)-212-272-0724, Correo-e: urbani@cantv.net

Este Boletín es de carácter informal -no arbitrado- preparado con el objetivo de divulgar rápidamente las actividades geoespeleológicas en la región de la FEALC. Sólo se difunde por vía de correo electrónico. Es de libre copia y difusión y explícitamente se solicita a quienes lo reciban que a su vez lo reenvíen a otros posibles interesados, o lo incluyan en páginas web. Todos los números anteriores están disponibles. Igualmente se pide que obtengan copias en papel para las bibliotecas de sus instituciones. Se solicitan contribuciones de cualquier tipo y extensión para su divulgación.

Índice

La misurazione dell'impatto umano sul clima delle grotte: problemi aperti.
Giovanni BADINO

1-6

LA MISURAZIONE DELL'IMPATTO UMANO SUL CLIMA DELLE GROTTI: PROBLEMI APERTI

Giovanni BADINO

Dip.to Fisica generale – Università di Torino
Associazione La Venta

Abstract

The measure of human impact on caves climate: open problems

Environmental cave monitoring is acquiring an increasing interest in order to improve the knowledge of caves sensitivity to external inputs, but the use of instrumentations designed for external measures creates big technical and epistemological difficulties as long as the requested accuracy increases. It is done a general analysis of problems connected with the data acquisition underground, to estimate future instrumental developments that will allow obtaining much other information about the caves climate and shapes.

Riassunto

La crescente importanza delle monitorazioni ambientali delle grotte per determinare la loro sensibilità agli impatti ambientali si scontra con dei limiti fondamentali della strumentazione, sviluppata per misurare i parametri del clima esterno. Viene condotta un'analisi delle varie strumentazioni esistenti e eventuali sviluppi futuri per quantificare in futuro un vasto insieme di parametri, attualmente nascosti, che permetteranno di ottenere molte altre informazioni sul clima e la forma delle grotte.

Introduzione

Il controllo dell'impatto umano sull'ambiente di grotta sta assumendo sempre più importanza via via che si scopre che adattamenti turistici apparentemente accurati hanno causato danni irreversibili al bene che si desiderava proteggere o mostrare, e che ci si rende conto che anche l'attività speleologico-esplorativa può indurre, e di fatto ha indotto, gravi danni all'ambiente sotterraneo [Badino, 2002].

Per questo motivo da molti anni è stato attivato un vasto lavoro di monitoraggio ambientale delle grotte turistiche, le più esposte al danno economico, che sta cominciando a produrre importanti serie temporali dei parametri ambientali.

Grazie a queste ricerche e alle analisi teoriche attualmente in corso va delineandosi però una difficoltà fondamentale: gli strumenti che utilizziamo per le misure climatiche degli ambienti ipogei sono poco adatti al loro lavoro e il livello teorico dell'interpretazione dei dati è ancora troppo poco sviluppato. In questo articolo ci limiteremo all'analisi del primo problema, l'insufficienza strutturale degli strumenti "esterni" nell'analisi degli ambienti ipogei.

Risoluzione, accuratezza e altri problemi

Per risoluzione di uno strumento intendiamo la minima differenza che può essere apprezzata sulla sua scala. Per accuratezza intendiamo invece la massima differenza fra il dato che esso misura e il valore vero.

Gli ambienti di grotta sono dominati dal fattore tempo. In pratica gli effetti che li dominano, costruendoli o distruggendoli, sono di bassissima intensità ma protratti su tempi enormi. Le strumentazioni con le quali li monitoriamo, progettate per ambienti esterni, sono intrinsecamente inadeguate perché finalizzate a monitorare i parametri a livelli di risoluzione tali da indurre su sistemi esterni o di laboratorio effetti misurabili in tempi brevi.

Facciamo un esempio: è ben noto che il clima terrestre non è stabile ma soggetto a fluttuazioni che, permettendo immensi sviluppi delle calotte glaciali, ne hanno condizionato il paesaggio.

Se noi misurassimo la temperatura media del pianeta con un termometro con una risoluzione 10°C non ci accorgeremmo affatto né delle ere glaciali, né dei riscaldamenti globali: saremmo sensibili solo ad eventi catastrofici, che in realtà hanno una importanza abbastanza delimitata (Fig. 1 da [Houghton, 1990]). La differenza di temperatura che, in decine di migliaia di anni, finisce per coprire il Canada e le Alpi con una calotta di due chilometri di spessore è di circa 8°C . Il punto chiave è che si tratta di 8°C protratti nel tempo, cioè su periodi sufficienti a far sì che l'atmosfera e la superficie del pianeta assumano una nuova configurazione di equilibrio, svuotando gli oceani per decine di metri e coprendo di ghiaccio immense superfici.

La situazione attuale della monitoraggio ambientale delle grotte ci pare abbastanza analoga. Vediamo in dettaglio.

Termometria

La misura della temperatura è una operazione apparentemente semplicissima ma in realtà è irta di problemi metodologici.

Intanto, la sua definizione. Essa è (utilizziamo la definizione tradizionale) la misura della energia cinetica media di traslazione del centro di massa delle molecole costituenti un gas ideale (molecole puntiformi e non interagenti) in stato di equilibrio (in cui cioè i parametri macroscopici non variano nel tempo e all'interno del sistema).

Il guaio è che i gas ideali non esistono e nessun sistema reale è in equilibrio.

Noi dunque estrapoliamo la misura di un parametro (volume di un liquido o resistività di una sostanza, ad esempio) ad una situazione ideale mediante varie correzioni, e inoltre assumiamo che il parametro misurato abbia significato per il sistema in oggetto, cioè che sia definibile e non sia variabile da un punto ad un altro del sistema o durante la misura.

L'operazione di acquisizione della temperatura è apparentemente semplice, ma in realtà spesso essa perde di significato. La misura di una temperatura esterna, ad esempio, è una operazione standardizzata con cura (due metri dal suolo su una superficie erbosa di almeno $6 \times 9 \text{ m}^2$, lontana da edifici, con accuratezza 0.5°C e risoluzione 0.1°C) ed è sostanzialmente convenzionale.

Il gas aria è in generale ben lontano dall'equilibrio e soprattutto il gas di radiazione che gli è frammisto ha una temperatura, i) mal definibile e, ii) comunque molto diversa da quella dell'aria. Dunque accade che la misura della temperatura venga a dipendere strettamente dalla forma dello strumento (peso relativo dell'energia del gas o della radiazione) e dalle modalità di acquisizione. Per questo da secoli i meteorologi hanno adottato criteri uniformi di acquisizione e le misure che ottenute hanno perciò soprattutto un valore comparativo e convenzionale.

Ad esempio, quello che da secoli chiamano la "temperatura media giornaliera" non è la temperatura media durante il giorno (cosa che richiederebbe ogni giorno l'acquisizione di molti dati a intervalli regolari) ma la media fra la temperatura massima e quella minima del giorno. Essa è assolutamente diversa da una vera media, e si allinea ad essa solo con cicli di misure di vari anni e comunque entro 0.5°C .

Questa relativa convenzionalità del dato climatico esterno è un punto di estrema importanza per la climatologia delle grotte dato che esse tendono ad avere la temperatura media della località in cui si aprono, ma dato che agiscono esse stesse da "termometro", il confronto della loro temperatura con quella "media esterna" fornita dalla World Meteorological Organization non può prescindere da un'analisi della modalità di acquisizione (Fig. 2 da [Pinna, 1977])

Detto questo entriamo sottoterra. Immediatamente scopriamo che l'ambiente è, i) notevolmente più vicino all'equilibrio di quanto avvenga all'esterno e, ii) il gas di radiazione presente ha una temperatura definibile e sostanzialmente uguale a quella dell'aria.

Si tratta dunque di una situazione quasi ideale in cui possiamo spingere le misure molto oltre quanto si può fare all'esterno (si noti che scriviamo "si può" non nel senso strumentale, ma di principio) eccetto che ci scontriamo col fatto che gli strumenti non sono adatti.

Le variazioni di temperatura che pilotano gli scambi termici all'interno di una cavità hanno una ampiezza che dipende dalla cavità stessa ma sono ben al di sotto di 0.1°C .

Termometri esterni che riescano ad essere accurati a quel livello praticamente non esistono: questo in particolare vuol dire che un termometro che ha segnato una certa temperatura, una volta che venga portato a temperatura diversa e poi riportato a quella iniziale segnerà quella iniziale $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, cioè la sua accuratezza intrinseca.

In condizioni ipogee però la situazione è più favorevole, dato che si tratta di sistemi praticamente isoterma. In quelle condizioni l'affidabilità del dato ottenuto da un sensore PT100 è alta anche a risoluzioni molto spinte (0.01°C ?) e in tal caso i dati in uscita potrebbero essere credibili per monitorare variazioni rapide dell'ordine del centesimo di grado. Il primo problema da affrontare è dunque:

1) *valutazione della oggettività delle microvariazioni di temperatura segnate da un sensore standard in condizioni quasi isoterme*; ad esempio immettendo nel sistema "grotta" quantità note di energia.

Il secondo punto chiave è che, pur se ammettiamo che le microvariazioni siano misurabili, non possiamo essere certi di nulla riguardo a derive lente della temperatura, che non possiamo attribuire alla grotta se non possiamo escludere completamente una deriva elettronica. Il secondo problema è dunque:

2) *messa a punto di sistemi di taratura termometrica su tempi dell'ordine dell'anno*; è un problema gravissimo che può essere risolto con l'acquisizione di dati su almeno due canali paralleli, uno elettronico e l'altro con una tecnologia completamente diversa, ad esempio al mercurio.

Non basta. Abbiamo detto che il sistema grotta è abbastanza in equilibrio, ma in realtà esso fluttua incessantemente attorno ad uno stato di equilibrio con ampiezze dell'ordine del centesimo di grado o meno. Senza toccare i problemi teorici né gli effetti speleogenetici dovuti a questo, dobbiamo dire che questo rende difficile definire, ad esempio, la temperatura di una galleria, dato che essa varia nel tempo su ampiezze piccole.

D'altra parte, cosa ancora più grave, essa varia anche nello spazio a causa della sedimentazione termica dei gas; insomma, l'aria calda tende a concentrarsi in alto.

I gradienti che abbiamo misurato fra pavimento e soffitto sono in genere piccolissimi, ma occasionalmente possono essere notevoli. Nella grotta della Mottera (grotta di tipo alpino in Piemonte) in una diaclasi ventilata (circa 1 ms^{-1}) alta venti metri ("Pastiglie Valda") abbiamo misurato 5.1°C a 10 m, 5.0°C a 6 m e 4.8 a un metro di altezza. Questo corrisponde ad un gradiente di $0.03^{\circ}\text{C m}^{-1}$. Pare poco ma non lo è affatto: per misurare un riscaldamento di uguale ampiezza (ottenuto a diversi livelli di una galleria alta dieci metri), in genere bisogna spostarsi nella montagna per un centinaio verso il basso.

Nelle condizioni effettivamente eccezionali (Cueva Hundida, Cuatro Ciènegas, stato di Coahuila) di una grotta nel deserto del Messico settentrionale abbiamo misurato 18.6°C sul pavimento, ma 19.9°C tre metri più in alto, un gradiente di 0.4°C m⁻¹! Per ottenere un simile aumento di temperatura occorre in genere scendere di 300 metri di dislivello nella grotta...

E' chiaro che un effetto di sedimentazione del genere può rendere problematica l'interpretazione dei dati, sempre giocata su valori di scala del gradiente di 10⁻³°C m⁻¹. Dunque occorre:

3) *realizzazione di misure sistematiche dei profili di temperatura in una stessa sezione di galleria con risoluzione spinte*; questo tipo di misure va protratto su tempi lunghi, almeno un anno.

Umidità

L'umidità è un altro parametro bizzosissimo. E' arcinoto che la capacità "dell'aria" di contenere vapor d'acqua è legata alla temperatura e questo ha fatto introdurre il concetto di "aria satura", dalle singolari capacità di confondere le idee.

In un recente testo fondamentale sulla termodinamica dell'atmosfera [Bohren, 1998] leggiamo:

L'aria sale e si raffredda e visto che l'aria fredda non può contenere così tanto vapor d'acqua quanto quella calda, il vapore condensa e si formano le nuvole. Questa spiegazione, progettata per quelli cui è diretta per evitar loro il fardello di pensare, si è sparsa come un incendio bruciando la capacità di pensare dovunque sono arrivate le fiamme. Adesso è praticamente impossibile trovare qualcuno che non sia fermamente convinto che l'aria sia una sorta di spugna con una capacità variabile che cresce con la temperatura. Termini malamente scelti come "pressione di saturazione del vapore" hanno rafforzato questa credenza.

Di fatto non esiste nessuna saturazione: le molecole si staccano dal liquido con una probabilità che dipende dalle caratteristiche della superficie e dalla loro energia, e quindi dalla temperatura: si noti che parliamo di *caratteristiche del liquido*. Vi tornano con una probabilità che dipende dalla pressione e temperatura del *gas sopra la superficie*. Il rateo di uscita delle molecole dal liquido e quello del loro rientro sono sostanzialmente indipendenti, e relativi a due sistemi diversi. Quel che accade in sistemi chiusi o semi-chiusi è che i due processi avanzano sino a raggiungere l'equilibrio: i due ratei divengono uguali. L'evaporazione è cessata? Per nulla, anzi, è al suo valore massimo: il fatto è che lo stesso vale per la condensazione, che le è esattamente uguale, e dunque non osserviamo variazioni nel livello del liquido.

Possiamo fare una similitudine: un serbatoio in cui fluisca acqua con una portata P (a rappresentare la temperatura dell'acqua) e che poi esce alla base da una apertura (che rappresenta la evaporazione). E' ben noto che la velocità di deflusso dipende dalla profondità a cui è il tubo, e dunque al crescere del livello dell'acqua aumenta la velocità di deflusso (l'evaporazione). Il livello dell'acqua nel serbatoio (la pressione di vapore sopra la superficie) dunque va a stabilizzarsi ad un determinato livello per il quale il deflusso diventa uguale a P, livello che varia a seconda del valore di P. Bene, quel livello lo possiamo pensare come il valore di "saturazione" dell'aria, di fatto una condizione di equilibrio fra due processi indipendenti.

Il guaio è che, naturalmente, si tratta di processi statistici che a ben vedere fluttuano attorno a valori di equilibrio. Anzi, è stato dimostrato [Wylie, 1962] che se si va a misurare con estrema raffinatezza la fase di inizio della condensazione quando raffreddiamo un gas prossimo all'equilibrio (saturazione...) non si trova un valore preciso, ma un intervallo piuttosto ampio (dell'ordine di 0.1°C) in cui iniziano i processi condensativi, intervallo che rende vana la speranza di poter spingere le misure di umidità relativa alle frazioni del per cento, soprattutto in vicinanza del valore di equilibrio.

I sensori attualmente in produzione sono di due tipi: psicrometri a bulbo secco-umido e psicrometri capacitivi. I primi fanno fluire aria sui bulbi di due termometri, uno dei quali è tenuto umido: a seconda di quanto l'aria è lontana dal valore di equilibrio (saturazione) essa induce evaporazione e dunque raffreddamento: dalla differenza di temperatura misurata dai due termometri è possibile dedurre (tenendo conto di molte, molte correzioni, per la verità) l'umidità relativa dell'aria.

Essi dunque necessitano di un operatore esperto, sono adatti a misure locali ed occasionali, ma sono di fatto gli unici affidabili. Essendo misure di temperature sono soggette a quanto detto più sopra.

I misuratori elettronici si basano sul fatto che la molecola dell'acqua è fortemente polare e dunque la sua presenza in forma di gas fra le armature di un condensatore ne fa variare la costante dielettrica e

dunque la tensione. Ma sono intrinsecamente poco accurati e, ad alti valori di umidità, si tende a creare condensazione sulle armature con il che lo strumento diventa un generatore di numeri casuali, né può essere più considerato uno strumento di misura sino a che non venga portato fuori della grotta e nuovamente calibrato.

Sta di fatto che i primi hanno una massima accuratezza di $\pm 1\%$, i secondi di $\pm 2\%$, entrambi limitati sino a 98 o 99%.

D'altra parte i dati psicrometrici generati da entrambi questi tipi di strumenti sono praticamente privi di significato: la massima parte delle atmosfere ipogee contiene vapor d'acqua all'equilibrio (in quasi tutte le grotte si potrebbero tarare gli psicrometri al punto "100%") ma per quanto detto a quel livello le differenze tendono a perdere significato fisico.

Quel che in realtà importa, ed importa in modo straordinario, è stimare se l'aria sia sovra- o sotto-satura di umidità se cioè tenda a sottrarre o depositare su superfici idriche libere. Il guaio serio è che le sovrasaturazioni, legate alla presenza di aerosol (da frammentazione di getti d'acqua o da risalita di aria umida), sono dell'ordine dello 0.01-0.1% e dunque almeno due ordini di grandezza al di sotto del limite strumentale.

E' dunque evidente che la misura istantanea di umidità è impossibile, ma è pure chiaro che non ci serve. Quel che serve, molto, in grotta, è misurare se un'aria sia sovra- o sotto-satura se cioè crei condensazione o evaporazione sulle superfici piane esposte. Questo si può ottenere con evaporimetri [Panzanaro, 2002] e quindi:

4) *sviluppo di un evaporimetro (a bilancia?) con accuratezza $10^4 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; cosa che dovrebbe essere ottenibile con bilance a 1/100 g;*

5) *sviluppo di tecniche di taratura di simili strumenti su tempi dell'ordine dell'anno; cosa che pare molto più complicata. Va detto che, per fortuna, la misura più importante sarà quella della variazione relativa dello stato di equilibrio e questo non richiede tarature estreme.*

Velocità dell'aria

La presenza di correnti d'aria è di gran lunga il maggiore indicatore esplorativo utilizzato dagli speleologi per localizzare grotte inesplorate o loro diramazioni sconosciute.

D'altra parte in altri lavori [Badino, 1989] [Badino, 1995] abbiamo mostrato che il flusso d'aria rappresenta la maggiore fonte di energia per il sistema sotterraneo (il flusso d'acqua in genere *sottrae* energia alla montagna). Ad esempio un flusso di $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ di aria in caduta attraverso 1000 m di grotta (riscaldamento medio 3.5°C invece dei 6°C che dovrebbero essere tipici di un trasferimento adiabatico) vengono a cedere una potenza di circa 2500 W.

Questo significa da una parte che vengono impiegati in processi carsici concentrati sui punti di rilascio (le strettoie) e che d'altra parte queste correnti d'aria, invertendo stagionalmente, creano pure un'inversione nella cessione di energia e quindi *introducono nascostamente le stagioni in quelli che appaiono mondi immutabili*. La loro misura è perciò di importanza fondamentale.

Non solo. Da parecchio tempo è noto che certe masse d'aria interne alle montagne possono entrare in oscillazione (Oscillatore di Helmholtz, [Cigna, 1967]). L'idea è stata generalizzata recentemente a tutte le masse d'aria [Badino, 1995]: ne dovrebbe risultare che le correnti d'aria dentro alle montagne contengono modulazioni a bassa frequenza, legate alla struttura geometrica della grotta, e sono quindi di grande interesse.

La misura accurata e continua delle correnti d'aria è dunque molto importante ma nella massima parte dei casi irrealizzabile, sempre per il motivo di inadattabilità alle grotte di strumenti pensati per l'esterno.

Gli anemometri attualmente in commercio sono di due famiglie: a ventola e a filo caldo. Nei primi il flusso d'aria aziona una ventolina di cui si misura la velocità di rotazione. Hanno il grosso difetto di non permettere un'acquisizione automatica ma soprattutto di richiedere un velocità abbastanza alta ($>0.5 \text{ m s}^{-1}$) per funzionare. Come se non bastasse questa corrente d'aria minima per azionarli è ovviamente maggiore di quella minima sotto la quale avviene arresto, il che introduce asimmetrie nella misure. Infine e soprattutto è assurdo ipotizzare che uno strumento meccanico sia in grado di mantenere *caratteristiche costanti* se lasciato per mesi in grotta.

Negli anemometri a filo caldo viene fatta la misura della corrente necessaria a mantenere in temperatura un filo esposto alla corrente d'aria. Il valore minimo di corrente che viene risolto è adeguatamente basso ma il loro funzionamento richiede un grosso dispendio di energia, inattuabile su lunghi periodi lontano da alimentazione di rete. Appare inoltre arduo tarare nuovamente lo strumento dopo una lunga esposizione.

Tutti questi anemometri presentano soprattutto un enorme difetto: misurano la corrente d'aria strettamente locale, che invece varia fortemente sulla sezione di una galleria, in modo complesso e dipendente dalla velocità e dal regime di moto. Non solo, su piccole sezioni e basse velocità lo strumento stesso può perturbare il campo di velocità. Dunque abbiamo poche speranze di misurare il flusso attraverso una sezione posizionando lo strumento senza un'estrema attenzione sia nella scelta della galleria sia nella posizione locale.

Le accuratezze che devono essere raggiunte in monitoraggi ambientali sono di $\pm 0.05 \text{ m s}^{-1}$ da 0 a 5 m s^{-1} per le velocità dell'aria, per poter sperare di misurare i flussi con precisioni relative dell'ordine di 0.1 e cercare di misurare in modo sistematico fluttuazioni di bassa frequenza nelle correnti d'aria.

Abbiamo già sviluppato prototipi di anemometri sonici specifici per grotta che rispondono alle esigenze di basso consumo, acquisibilità elettronica del dato, stabilità, misurazione della corrente d'aria in una intera zona non circostante lo strumento. Occorre però:

6) *sviluppo e ingegnerizzazione dell'anemometro sonico da grotta*; a questo punto la cosa appare fattibile a breve termine.

Aerosol

La presenza di aerosol è una costante negli ambienti sotterranei, ma il loro ruolo è stato poco studiato. Le ricerche sino a questo punto li indicano come elementi decisivi nella formazione del carsismo profondo a causa della sovrasaturazione che essi inducono nell'aria circostante.

Paiono avere origine per due canali, che dovrebbero essere nettamente distinti per la differenza di diametro delle goccioline: i) formazione da sovrasaturazione dell'aria (ad esempio in arie in migrazione verso l'alto) e, ii) frammentazione di acque in caduta.

Proprio per questo occorre misurare sia il numero di goccioline per unità di volume sia il loro diametro. Gli strumenti di misura paiono poco adeguati, ma per ora occorre:

7) *analisi di fattibilità di uno studio degli aerosol d'acqua in grotta*.

Conclusioni

Abbiamo visto che il valore dell'umidità relativa non fornisce praticamente altro che informazioni sullo stato dello strumento stesso e dunque crediamo sia bene misurarlo solo nel caso di grotte con umidità relativa lontana dal 100%.

Il dato di temperatura è invece estremamente utile, perché anche a bassa risoluzione ed accuratezza permette di quantificare il livello di interazione della grotta con l'esterno, e difatti è un dato estesamente usato proprio per questo motivo. Naturalmente, trattandosi di un dato correntemente e correttamente utilizzato, non lo abbiamo commentato.

Riteniamo però che affrontando i (gravi) problemi tecnici e metodologici dell'acquisizione ad alti livelli di risoluzione possa permettere l'analisi di trasferimenti termici locali e lo studio della sedimentazione termica nelle grotte.

L'analisi del dato della temperatura media di una grotta ad alta accuratezza permetterà inoltre lo studio da una parte di eventuali connessioni della grotta con altre ad altre quote, dall'altra l'analisi di stati "patologici" della grotta dovuti a rilasci anomali di energia o da parte dell'uomo (grotte turistiche di vecchio adattamento) o di flussi geotermici. La stima della temperatura naturale della grotta non è però ovvia: la temperatura esterna è affetta da problemi metodologici ed è a bassa risoluzione. Una via potrebbe essere il confronto con la temperatura di grotte site nelle vicinanze, ma questo implicherà studi complessivi sul sistema e correzioni che attualmente non appaiono semplici.

La misurazione protratte delle correnti d'aria nel doppio senso di, i) misurazione della portata e, ii) misurazione della velocità del vento, è assolutamente fondamentale e appare fattibile nel breve termine.

Più arduo appare misurare le caratteristiche degli aerosol in grotta, ma è un problema che va affrontato in una prospettiva a medio termine.

Bibliografia

- BADINO G. (1989) - *Speleogenesi da Correnti d'Aria* - Grotte, Boll. GSP-CAI UGET, 99
- BADINO G. (1990) - *Microclima ed Energetica* - in "Il Complesso Di Piaggia Bella", AGSP
- BADINO G. (1995) - *Fisica del Clima Sottterraneo* - Mem. dell'Ist. Italiano di Speleologia, 7, serie II
- BADINO G. (2002) - *L'attività Speleologica e gli Adattamenti Turistici Individuali delle Grotte* - Le Grotte d'Italia, V, 3 in stampa
- BOHREN C.F., ALBRECHT B.A. (1998) - *Atmospheric Thermodynamics* - Oxford Univ. Press
- CIGNA A. (1967) - *An Analytic Study of Air Circulation In Caves* - Int. J. Spelol. 3
- HOUGHTON J.T. *et al.* (1990) - *Climate Change* - Cambridge Univ. Press
- PANZANARO M. (2002) - La Rete di Monitoraggio delle Grotte di Stiffe - Le Grotte d'Italia, V, 3, in stampa
- PINNA M. (1997) - *Climatologia* - Utet
- WILIE R.G. *et al.* (1963) - *The Basic Process of the Dew-Point Hygrometer* - in "Humidity and moisture", Wexler