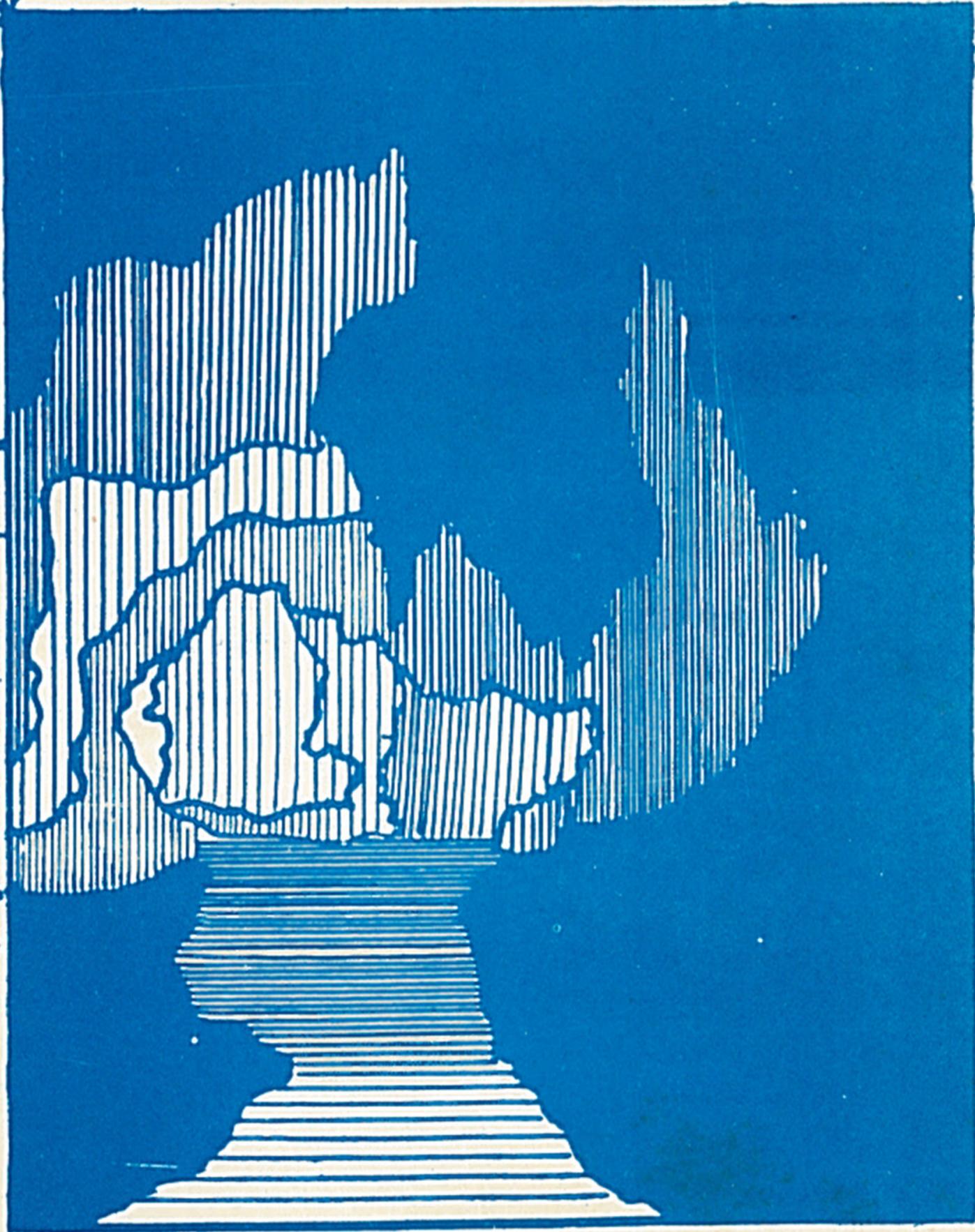


GUIDA DIDATTICA N. 2

Supplemento alle « Memorie dello Speleo Club Chieti »

ARRIGO CIGNA

CENNI
DI METEOROLOGIA IPOGEA



Chieti 1975

GUIDA DIDATTICA N. 2

Supplemento alle « Memorie dello Speleo Club Chieti »

ARRIGO CIGNA

C E N N I
DI METEOROLOGIA IPOGEA

Publicato con il contributo della Regione Abruzzo

Chieti 1975

INTRODUZIONE

La meteorologia delle grotte è quella branca della scienza che studia il clima delle grotte insieme a tutti quei fenomeni che lo determinano.

Benchè si abbia a che fare con un ambiente molto limitato (in confronto a quello esterno) la meteorologia delle grotte studia un numero considerevole di fenomeni con la complicazione, rispetto alla consorella maggiore che si occupa dell'ambiente esterno, del limitato intervallo di variabilità dei parametri che interferiscono. Ciò significa, in pratica che, date le piccole variazioni della temperatura, dell'umidità, della pressione, ecc. occorre effettuare misurazioni con un margine di errore piuttosto contenuto. In caso contrario le variazioni dovute ai fenomeni che si intendono studiare sarebbero, per così dire, mascherate dall'errore proprio della misura e non si potrebbe rilevare alcunchè. Inoltre, date le interazioni così strette tra aria e acqua nelle grotte, occorre tener conto anche di molte caratteristiche dei corsi d'acqua che, all'esterno, vengono solitamente studiate più propriamente dall'idrologia.

Verranno ora esposti alcuni cenni sulla strumentazione più comunemente impiegata in questo genere di ricerche, sulle tecniche di misura e sui parametri in gioco, cercando di mettere in evidenza alcune peculiarità che sono proprie dell'ambiente sotterraneo.

STRUMENTAZIONE

Termometro

Attualmente lo strumento più comunemente usato per le misure di temperatura è il termometro a mercurio. Sono molto diffusi i termometri con scala da -10° a $+50^{\circ}$ C divisa in quinti di $^{\circ}$ C perchè uniscono una sufficiente precisione di misura con una lunghezza dello stru-

mento accettabile per l'uso in grotta. Soltanto in casi particolari si impiegano termometri con scale più suddivise.

Si cominciano anche ad usare termometri elettronici dotati di elemento termosensibile e di opportuno circuito di alimentazione e di lettura.

Qualunque sia lo strumento adoperato occorre provvedersi di una taratura dello stesso affinché i valori rilevati possano essere confrontabili con quelli rilevati da altri.

In generale questa taratura viene effettuata confrontando la temperatura indicata dal termometro in esame (e sia x °C) con quella vera ottenuta da un termometro campione (y °C) e ripetendo l'operazione in modo da avere il confronto per almeno due punti della scala. Si può allora calcolare la retta di taratura:

$$\text{Temp. vera} = (\text{Temp. letta}) : b + c$$

dove il coefficiente b è calcolato dal rapporto:

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

ed il valore di c è dato dalla relazione:

$$c = y_1 - bx_1$$

Si intende che x e y rappresentano, come si è prima detto, le temperature rispettivamente letta sul termometro in esame ed ottenuta da quello campione, per due punti (1 e 2) della scala.

Per effettuare misure di temperature dell'aria in grotta converrà provvedersi anche di un sostegno al quale fissare il termometro in modo che il bulbo risulti il più lontano possibile dal sostegno stesso.

Nella pratica si è visto che un leggero cavalletto da macchina fotografica risulta molto conveniente. Il fissaggio del termometro può essere fatto mediante degli elastici col vantaggio di evitare un accoppiamento rigido pericoloso in casi di urti.

Qualora si dovessero misurare temperature durante la discesa di un pozzo o, comunque, in posizioni ove non fosse possibile avvalersi del cavalletto, converrà impugnare il termometro con una mano, tenendo il braccio steso lontano dal corpo e agitandolo nell'aria in modo da facilitare il raggiungimento dell'equilibrio termico.

Quando si effettua una misura di temperatura il termometro, in generale, segnerà all'inizio una temperatura diversa da quella del mezzo in esame. Occorrerà pertanto attendere per un tempo sufficiente

affinchè il termometro assuma la stessa temperatura del mezzo. Una volta posto il termometro nel sito prescelto per la misura, si leggerà la temperatura dopo qualche minuto prendendo mentalmente nota del valore.

Dopo un breve intervallo, per esempio un minuto, si ripeterà la lettura: occorrerà ripetere questa procedura finchè i due valori letti consecutivamente coincideranno. Questo valore verrà allora assunto come corrispondente alla temperatura del mezzo in contatto col termometro. Può talvolta accadere che, specie in prossimità di imbocchi, vi siano correnti d'aria irregolari e che la temperatura dell'aria interna oscilli intorno ad un valore medio. In questo caso, ed in qualunque altro caso analogo, se si segue la procedura descritta prima si osserverà come i valori delle letture successive, invece di essere sempre crescenti (o sempre decrescenti) e ravvicinati tra loro, oscillino per cui risultano talvolta superiori e talvolta inferiori alla lettura precedente.

Soltanto in questa evenienza si deve assumere, quale valore corrispondente alla temperatura dell'aria, la media di un certo numero di osservazioni (per esempio: cinque).

Sarà opportuno prendere nota anche dell'intervallo di oscillazione dei valori letti. Durante il prelievo di temperature, occorre evitare la presenza di fonti di calore ad alta temperatura (quali ad esempio le lampade ad acetilene) in prossimità del termometro. In caso contrario si potrebbero avere errori anche considerevoli nelle letture. In particolare bisogna anche evitare che la presenza dell'osservatore influenzi la misura stessa (Cigna 1957). Ciò potrebbe verificarsi, in particolare, negli ambienti di ridotte dimensioni (come cunicoli e laminatoi). In questi casi conviene porre in stazione il termometro e procedere alla lettura da alcuni metri di distanza (sottovento, se vi sono correnti d'aria) per mezzo di un cannocchiale e di una torcia elettrica, per illuminare la scala durante la lettura.

Quando invece si procede alla lettura nel modo consueto per osservazione diretta, conviene trattenere il fiato onde evitare, anche in questo caso, di influenzare l'equilibrio termico del bulbo.

Per le misure di temperatura dell'acqua si può semplicemente immergere il termometro (possibilmente tutta la colonnina di mercurio e non soltanto il bulbo) evitando che il bulbo stesso tocchi la parete rocciosa.

Nel caso di laghi si potrà rilevare la temperatura superficiale dotando il termometro di un adeguato galleggiante (ad esempio: un tappo di sughero nel quale si infila il termometro dall'estremità opposta a quella del bulbo). Per misure in profondità si può adoperare un termometro a rovesciamento sospeso ad un cavetto lungo il quale scorre

un peso (il « messaggero ») che comanda il meccanismo che, capovolgendo il termometro, ne blocca la colonnina consentendo così il recupero e la successiva lettura. In mancanza di questo strumento si può calare un comune termometro alla profondità voluta mantenendolo entro un contenitore (barattolo metallico) sospeso ad un cavetto. Esso dovrà essere lasciato in sito per un tempo abbastanza lungo perchè si raggiunga l'equilibrio termico (per esempio: mezz'ora) e poi, una volta ritirato velocemente in superficie, si effettuerà la lettura nel minor tempo possibile.

Psicrometro

Lo strumento più adatto per la misura dell'umidità dell'aria in grotta è lo psicrometro costituito da due termometri (con le stesse caratteristiche di quello indicato nel paragrafo precedente), l'uno col bulbo asciutto, l'altro col bulbo fasciato da una calza in cotone bagnata d'acqua.

Esso può assumere in pratica varie forme. La più semplice è quella dello psicrometro a fionda (Fig. 1). Esso può essere facilmente costruito anche con mezzi molto semplici tenendo presenti alcuni accorgimenti: il telaio deve essere il più leggero possibile compatibilmente con le necessarie doti di robustezza ed i bulbi devono trovarsi ad una trentina di centimetri dall'asse di rotazione. In tal modo la corrente d'aria che investe i bulbi, quando la velocità di rotazione è di almeno un paio di giri al secondo, è maggiore di 3-4 m/sec., garantendo così una condizione di equilibrio per l'evaporazione dell'acqua sul bulbo bagnato. Se la velocità dell'aria fosse inferiore non si potrebbero più usare le tavole standard e, ciò che è più grave, si avrebbe una considerevole incertezza nella misura.

L'inconveniente che accompagna l'uso di questo tipo di psicrometro è dato dalla fatica fisica dell'operatore e dalla facilità di rottura dei termometri per urto contro ostacoli in grotta.

Si può allora ovviare con psicrometri ad aspirazione (Fig. 2) dotati di un motorino elettrico e di una ventola.

Quando non vengano reperiti in commercio e vengano invece auto-costruiti occorre sempre curare che l'aria lambisca i bulbi ad una velocità maggiore di 3-4 m/sec. Naturalmente è possibile utilizzare una coppia di termometri elettronici invece dei soliti a mercurio, a parte le complicazioni che comportano per l'alimentazione e la lettura.

Dopo un tempo opportuno, che si determina con le stesse regole

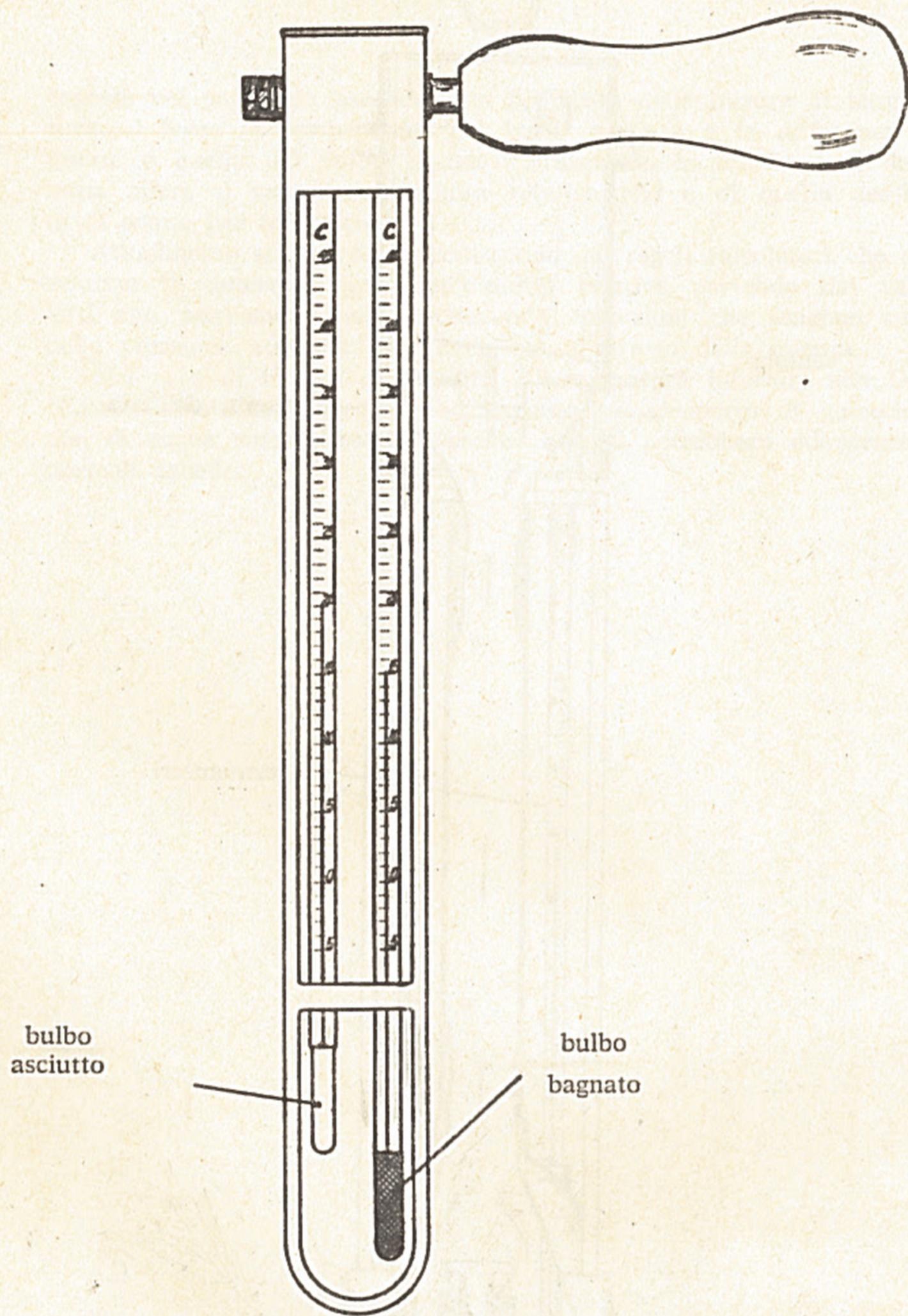


Fig. 1 — Psicrometro a fionda

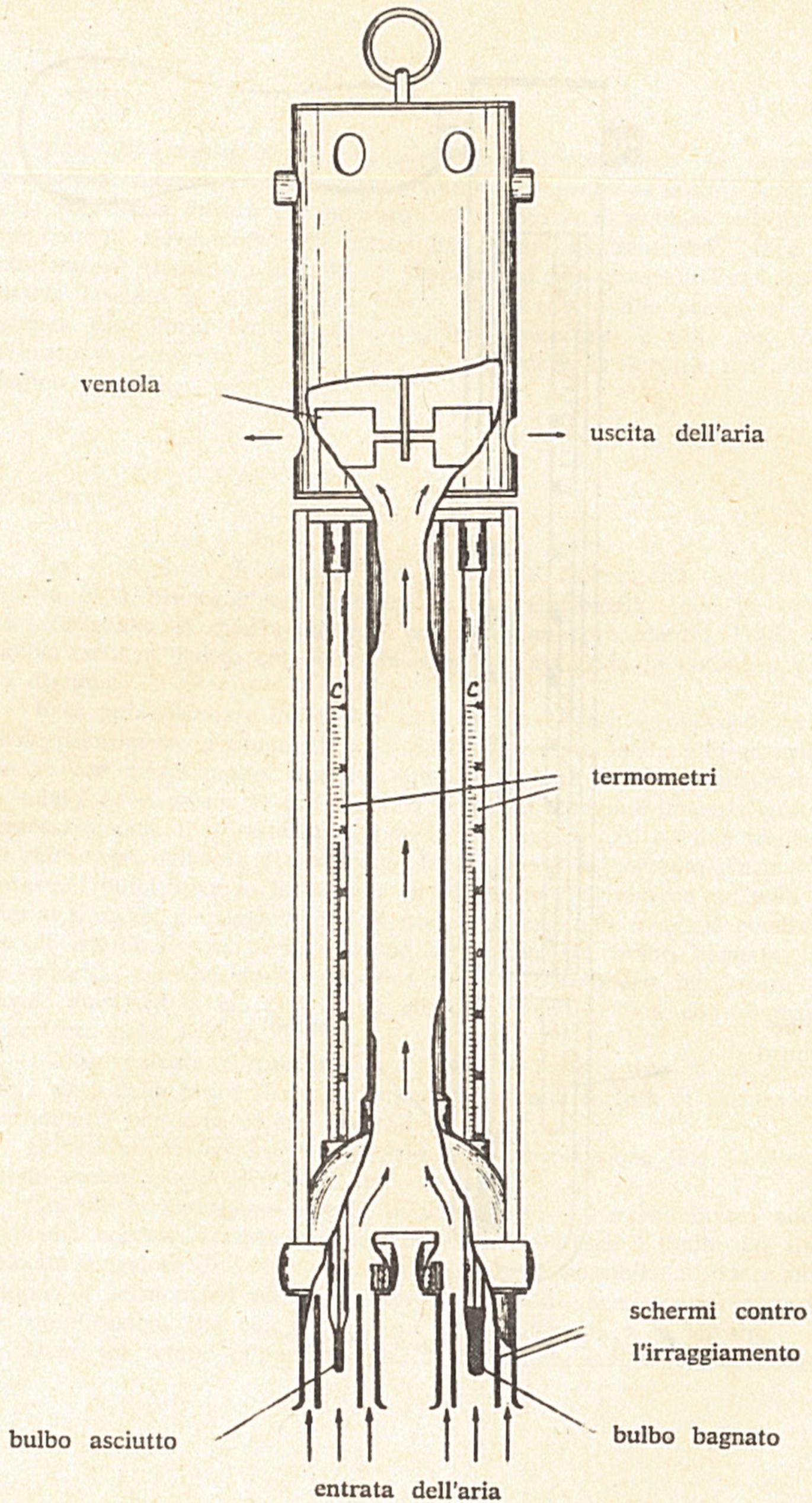


Fig. 2 — Psicrometro Assmann

esposte nel paragrafo precedente a proposito delle misure di temperatura, si legge la temperatura del bulbo asciutto e la differenza tra questa e quella del bulbo bagnato. Utilizzando la tabella 1 si determina allora il valore dell'umidità relativa (%) e di quella assoluta (g di acqua per m³ d'aria).

Attualmente si trovano in commercio dei regoli calcolatori che consentono la determinazione dell'umidità relativa partendo dai valori letti allo psicrometro ed introducendo correzioni che tengono conto della pressione atmosferica e della quota all'atto della misura.

Nel caso di misure di umidità a temperatura inferiore allo 0 °C occorre assicurarsi che il bulbo bagnato sia ricoperto di ghiaccio e non di acqua sottoraffreddata perchè non si potrebbero adoperare le normali tabelle.

21.5	100	19.0	18.2	17.3	16.5	15.6	14.8	14.1	13.2	12.4	11.7	10.8	10.2	9.5	8.7	8.0	7.3	6.7	6.0	5.3	4.7	4.1	3.4	2.8	2.2	1.9
22	100	96	18.7	17.7	17.0	16.0	15.3	14.5	13.7	12.8	12.0	11.3	10.4	9.8	9.1	8.3	7.6	7.0	6.3	5.7	5.0	4.4	3.6	3.0	2.5	1.9
22.5	100	95	18.4	17.5	16.6	15.7	14.9	14.1	13.3	12.5	11.7	11.0	10.2	9.5	8.7	8.0	7.3	6.6	6.0	5.3	4.6	4.0	3.1	2.5	2.0	
23	100	96	19.0	18.1	17.3	16.4	15.5	14.7	13.9	13.1	12.3	11.5	10.8	10.0	9.2	8.5	7.8	7.1	6.4	5.8	5.1	4.4	3.8	3.2	2.5	
23.5	100	96	19.5	18.5	17.7	16.8	15.9	15.1	14.2	13.4	12.6	11.8	11.0	10.2	9.4	8.7	8.0	7.3	6.6	6.0	5.3	4.6	4.0	3.4	2.8	
24	100	96	20.4	19.5	18.6	17.7	16.8	15.9	15.1	14.2	13.4	12.5	11.7	10.9	10.1	9.4	8.7	8.0	7.3	6.6	6.0	5.3	4.6	4.0	3.4	
24.5	100	96	20.9	19.9	19.0	18.1	17.2	16.3	15.5	14.6	13.8	13.0	12.2	11.4	10.6	9.8	9.0	8.3	7.6	6.9	6.2	5.5	4.8	4.1	3.4	
25	100	96	21.3	20.4	19.5	18.5	17.6	16.7	15.8	14.9	14.1	13.2	12.5	11.7	10.9	10.1	9.4	8.7	8.0	7.3	6.6	5.9	5.2	4.5	3.8	
25.5	100	96	21.9	21.2	20.3	19.2	18.4	17.5	16.6	15.7	14.9	14.0	13.2	12.4	11.6	10.8	10.0	9.2	8.5	7.7	7.0	6.3	5.6	4.9	4.0	
26	100	96	22.7	21.7	20.7	19.7	18.7	17.8	16.9	16.0	15.1	14.2	13.4	12.6	11.8	11.0	10.2	9.4	8.6	7.8	7.0	6.2	5.4	4.6	3.8	
26.5	100	96	23.6	22.5	21.5	20.5	19.5	18.5	17.5	16.6	15.6	14.6	13.6	12.6	11.6	10.6	9.6	8.6	7.6	6.6	5.6	4.6	3.6	2.6	1.9	
27	100	96	24.0	22.9	21.9	20.9	19.9	18.9	17.9	16.9	15.9	14.9	13.9	12.9	11.9	10.9	9.9	8.9	7.9	6.9	5.9	4.9	3.9	2.9	2.0	
27.5	100	96	25.5	24.5	23.4	22.5	21.5	20.5	19.5	18.5	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5	12.5	11.5	10.5	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	
28	100	96	26.2	25.2	24.1	23.1	22.1	21.1	20.0	19.0	18.0	17.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	
28.5	100	96	27.0	25.9	24.8	23.8	22.8	21.7	20.6	19.5	18.5	17.4	16.3	15.2	14.1	13.0	11.9	10.8	9.7	8.6	7.5	6.4	5.3	4.2	3.1	
29	100	96	27.8	26.6	25.4	24.4	23.4	22.3	21.2	20.1	19.0	17.9	16.8	15.7	14.6	13.5	12.4	11.3	10.2	9.1	8.0	6.9	5.8	4.7	3.6	
29.5	100	96	28.6	27.3	26.2	25.1	24.0	22.9	21.8	20.7	19.6	18.5	17.4	16.3	15.2	14.1	13.0	11.9	10.8	9.7	8.6	7.5	6.4	5.3	4.2	
30	100	96	29.3	28.1	26.9	25.8	24.7	23.6	22.5	21.4	20.3	19.2	18.1	17.0	15.9	14.8	13.7	12.6	11.5	10.4	9.3	8.2	7.1	6.0	4.9	
30.5	100	96	30.1	28.9	27.7	26.6	25.5	24.4	23.3	22.2	21.1	20.0	18.9	17.8	16.7	15.6	14.5	13.4	12.3	11.2	10.1	9.0	7.9	6.8	5.7	
31	100	96	30.9	29.7	28.5	27.4	26.3	25.2	24.1	23.0	21.9	20.8	19.7	18.6	17.5	16.4	15.3	14.2	13.1	12.0	10.9	9.8	8.7	7.6	6.5	
31.5	100	96	31.8	30.6	29.4	28.3	27.2	26.1	25.0	23.9	22.8	21.7	20.6	19.5	18.4	17.3	16.2	15.1	14.0	12.9	11.8	10.7	9.6	8.5	7.4	
32	100	96	32.6	31.3	29.9	28.8	27.7	26.6	25.5	24.4	23.3	22.2	21.1	20.0	18.9	17.8	16.7	15.6	14.5	13.4	12.3	11.2	10.1	9.0	7.9	
32.5	100	96	33.5	32.1	30.7	29.6	28.5	27.4	26.3	25.2	24.1	23.0	21.9	20.8	19.7	18.6	17.5	16.4	15.3	14.2	13.1	12.0	10.9	9.8	8.7	
33	100	96	34.4	33.0	31.6	30.5	29.4	28.3	27.2	26.1	25.0	23.9	22.8	21.7	20.6	19.5	18.4	17.3	16.2	15.1	14.0	12.9	11.8	10.7	9.6	
33.5	100	96	35.3	33.8	32.4	31.3	30.2	29.1	28.0	26.9	25.8	24.7	23.6	22.5	21.4	20.3	19.2	18.1	17.0	15.9	14.8	13.7	12.6	11.5	10.4	
34	100	96	36.3	34.7	33.3	32.2	31.1	30.0	28.9	27.8	26.7	25.6	24.5	23.4	22.3	21.2	20.1	19.0	17.9	16.8	15.7	14.6	13.5	12.4	11.3	
34.5	100	96	37.2	35.6	34.2	33.1	32.0	30.9	29.8	28.7	27.6	26.5	25.4	24.3	23.2	22.1	21.0	19.9	18.8	17.7	16.6	15.5	14.4	13.3	12.2	
35	100	96	38.1	36.5	35.1	34.0	32.9	31.8	30.7	29.6	28.5	27.4	26.3	25.2	24.1	23.0	21.9	20.8	19.7	18.6	17.5	16.4	15.3	14.2	13.1	

Barometro

Vengono correntemente impiegati barometri-altimetri aneroidi attualmente disponibili sul mercato in versioni abbastanza leggere e robuste che consentono, d'altra parte, letture sufficientemente precise.

La scala altimetrica è impiegabile, praticamente, soltanto all'esterno in quanto la colonna d'aria interna di una grotta si differenzia troppo per le sue caratteristiche da quelle standard impiegate per la taratura dello strumento stesso. Si ricorda come occorra sempre tarare l'altimetro ad una quota possibilmente non troppo distante dalla località ove si intende fare la misura. Inoltre occorre lavorare in condizioni di tempo stabili per ridurre al minimo la possibilità di variazioni della pressione atmosferica in zona durante l'intervallo di tempo tra la taratura e la misura. E' ovvio come le operazioni di taratura debbono essere ripetute, indicativamente almeno una volta al giorno, sempre per limitare gli errori dovuti ai cambiamenti di pressione.

L'unità di misura della pressione atmosferica è il Torr equivalente alla pressione esercitata da una colonna di Hg alta 760 mm. In meteorologia si usa anche (e prevalentemente) un'altra unità il bar, pari a 750 mm di Hg. (1 millibar = $3/4$ di mm di Hg).

Anemometro

Si usano vari tipi di anemometri in funzione dell'intervallo di velocità dell'aria che si desidera misurare.

Per velocità superiori a 1 m/sec. si possono adoperare gli anemometri a mulinello di corrente impiego in meteorologia. Al di sotto di tale velocità questi anemometri hanno una inerzia troppo grande che non consente di effettuare misure attendibili.

In questo caso si possono usare anemometri elettronici, basati sulla dissipazione del calore di un elemento sensibile da parte della corrente d'aria, oppure mezzi di fortuna.

Tra questi ultimi si possono citare: il fumo di sigaretta (avendo cura di osservarne gli spostamenti ad una certa distanza dalla sigaretta per evitare che il moto sia influenzato dalla differenza di temperatura rispetto all'aria ambiente) e certi dispositivi basati sullo scostamento dalla verticale di una sottile lamina metallica (qualche dm² di superficie) appesa e capace di oscillare liberamente. Naturalmente occorre procedere ad una taratura di un simile dispositivo in una galleria del vento.

Questi mezzi di fortuna consentono perlopiù delle stime piuttosto

che delle misure vere e proprie. Occorre tuttavia rilevare come, molto sovente, tali stime siano sufficienti a fornire notizie utili sia per lo studio meteorologico della cavità sia per eventuali applicazioni pratiche.

La permanenza di un gruppo di persone (per esempio durante una sosta) in un certo punto di una galleria può talvolta provocare la formazione di una leggera nebbia a causa della condensazione del vapor d'acqua in condizioni di soprassaturazione. In questi casi lo spostamento del fronte di nebbia può consentire la stima di velocità molto basse di correnti d'aria determinando il tempo impiegato a percorrere un tratto di galleria (a sezione abbastanza costante!) di lunghezza nota.

PARAMETRI METEOROLOGICI

Temperatura

Si tratta senz'altro del parametro più frequentemente misurato tanto che, talvolta, qualcuno può esser erroneamente indotto ad identificare le ricerche di meteorologia ipogea con la raccolta di misure di temperatura dell'aria e dell'acqua delle grotte. In generale il valore della temperatura dell'aria in una grotta si aggira intorno al valore della temperatura media annua corrispondente al sito ove è localizzata la grotta. Ovviamente questo è un criterio grossolano ed ha soltanto un carattere indicativo in quanto si possono riscontrare numerose influenze locali dovute a peculiarità della grotta in questione. La diminuzione della temperatura media dell'aria (gradiente termico verticale) è di circa $-0,6$ °C per ogni aumento di 100 metri di quota. Partendo dalle isoterme medie annue ridotte al livello del mare (Fig. 3) si può calcolare la temperatura media annua di una località, nota l'altitudine.

Anche la temperatura dell'acqua si aggira intorno allo stesso valore. A causa però della maggiore densità quest'ultima si sposta in generale con velocità sensibilmente superiori a quelle dell'aria. Così all'interno di un sistema carsico l'acqua che si incontra di un certo punto può provenire da quote abbastanza più elevate in un tempo piuttosto breve. Ciò significa che i bacini di alimentazione possono essere localizzati in zone montane sensibilmente più fredde e pertanto l'acqua può conservare il «ricordo» della sua origine mostrando una temperatura inferiore a quella che ci si potrebbe aspettare. D'altra parte

per il primo principio della termodinamica si ha una trasformazione del lavoro (compiuto dall'acqua nella sua caduta da una quota più elevata ad una inferiore) in calore. Questo comporta un aumento della temperatura dell'acqua di 0,234 °C per ogni 100 metri di acqua.

Quest'ultimo fenomeno è stato rilevato sperimentalmente da alcune misure effettuate in sistemi carsici italiani e francesi i cui risultati sono riassunti in tabella 2.

Tabella 2

Aumento della temperatura dell'acqua in alcuni sistemi carsici per la trasformazione del lavoro in calore (Trombe 1952, pagg. 119; Cigna 1958)

Sistema carsico	Dislivello m	Aumento temperatura °C	
		calcolato	trovato
Grotta di Bossea	140	0,33	0,4
Trou du Glaz - Grotte de Guiers Mort	300	0,70	0,5
Gouffre de la Henne Morte - Hount deras Hechos	350	0,82	3,0
Gouffre Martel - Grotte de la Gigalère	450	1,05	1,2
Grotte de Riusec - Source de Lac Bleu	700	1,64	2,0

Come si può osservare l'accordo è in generale buono; soltanto nel caso del Gouffre de la Henne-Morte si ha una certa discordanza dovuta agli scambi termici notevoli che avvengono tra l'acqua e la roccia in corrispondenza di un livello dolomitico molto fessurato. Tenendo conto delle caratteristiche morfologiche del corso d'acqua, della situazione idrogeologica e delle temperature osservate è possibile allora ottenere informazioni sulla localizzazione del bacino di alimentazione.

All'imbocco delle grotte si ha la cosiddetta «zona termovariabile» ove la temperatura dell'aria interna è influenzata dalla temperatura dell'aria esterna.

Questa influenza può avvenire per conduzione (cioè per trasmissione del calore attraverso l'aria), per convezione (cioè per spostamento di masse d'aria a diversa temperatura) o per tutti e due i fenomeni.

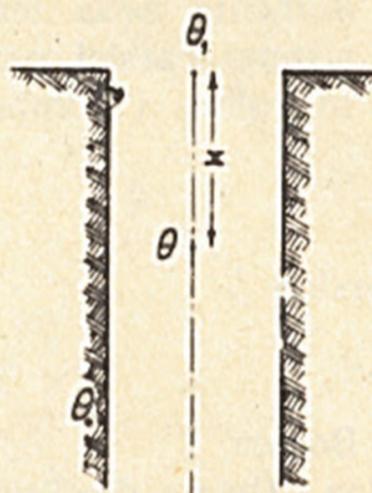
Il primo caso, piuttosto raro, si riscontra soltanto in corrispon-

denza di pozzi con atmosfera in equilibrio ed in condizioni di quiete anche all'esterno. La zona termovariabile si riduce allora a pochi metri. Si noti inoltre come questo caso sia possibile soltanto quando la temperatura esterna è maggiore di quella interna (cioè, in generale, nei mesi estivi). Infatti, in caso contrario, l'aria più fredda, (e quindi più densa) soprastante sposterebbe quella più leggera all'interno del pozzo rompendo le condizioni di equilibrio cui si era fatto cenno.

Nel caso del pozzo con aria in equilibrio la distribuzione delle temperature in funzione della profondità (Fig. 4) è data (Cigna 1961 a) dalla seguente equazione:

$$\Theta(x) = (\Theta_1 - \Theta_0)\exp(-x\sqrt{\beta}) + \Theta_0$$

Fig. 4 — Pozzo con aria ferma



dove $\Theta(x)$ (in °C) è la temperatura dell'acqua alla profondità x (in m), Θ_1 è la temperatura dell'aria esterna, Θ_0 è la temperatura delle pareti all'interno della zona di transizione (cioè di quella zona di passaggio della temperatura esterna a quella di equilibrio entro il pozzo) e β è una costante dipendente dalle caratteristiche termodinamiche dell'aria e della grotta che può essere, tuttavia, determinata sperimentalmente da tre misure di temperatura dell'aria Θ^I , Θ^{II} , Θ^{III} , prese, rispettivamente, alle profondità $x-a$; x ; $x+a$ (espresse in metri), con la formula:

$$\beta = \left[\frac{\cosh^{-1} \left(\frac{\Theta^I + \Theta^{III}}{2\Theta^{II}} \right)}{a} \right]^2$$

Il secondo ed il terzo caso sono i più comuni e si ritrovano all'imbocco di grotte ove, almeno in una parte della sezione trasversale, vi sia una corrente d'aria diretta verso l'interno. Se invece tale corrente, fosse sempre sempre rivolta verso l'esterno la temperatura dell'aria

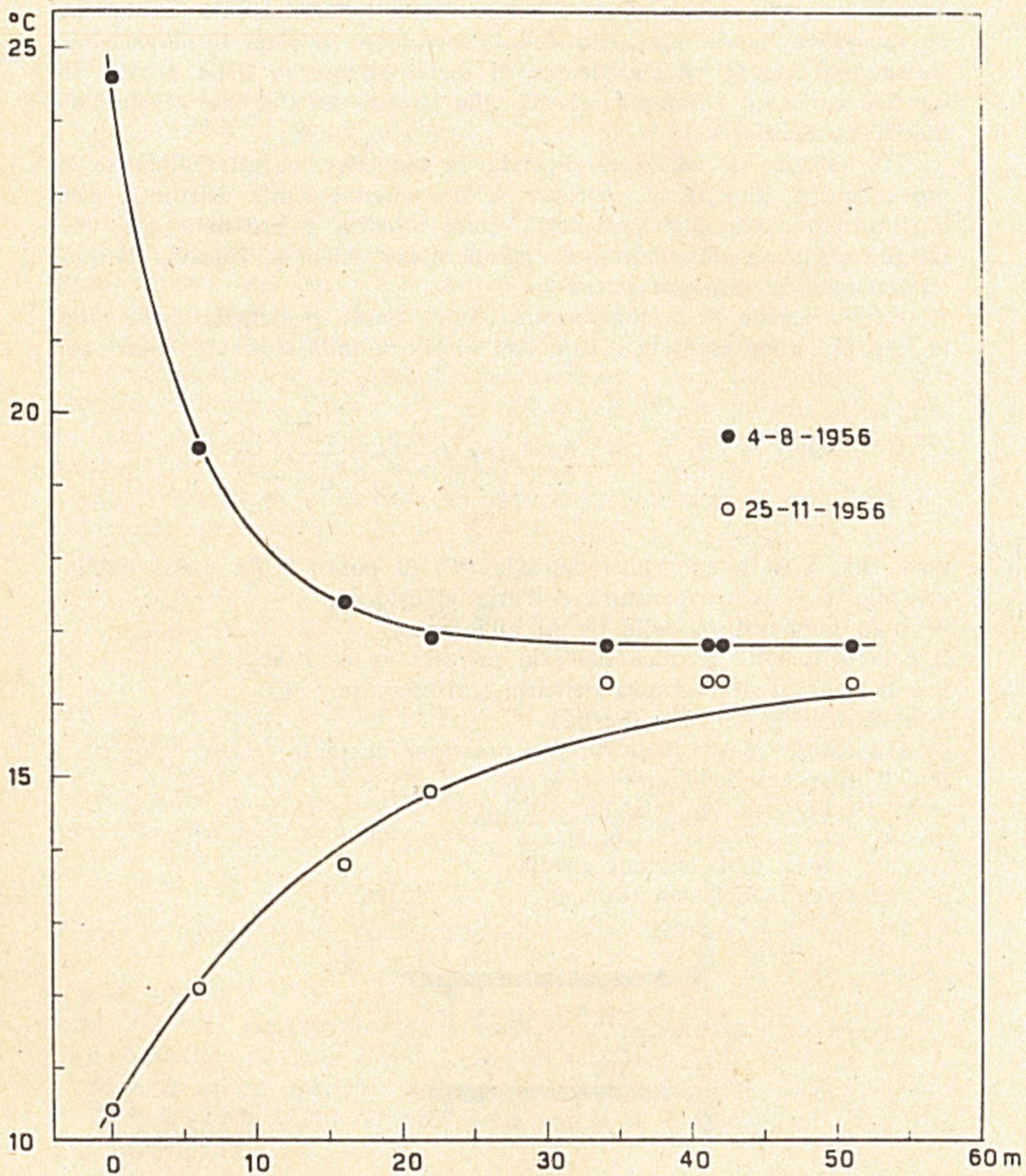


Fig. 5

Andamento della temperatura dell'aria nella Grotta dei Colombi in funzione della distanza dall'imbocco. Le misure sperimentali sono state indicate con punti (regime estivo) e cerchi (regime invernale). Le linee continue indicano le temperature teoriche calcolate in base alla formula indicata nel testo.

sarebbe costante e non vi sarebbe una zona termovariabile. Solitamente, quando si ha il fenomeno della convezione, la zona termovariabile si estende fino ad alcune decine di metri all'interno della grotta. In fig. 5 è riportato l'esempio relativo alla Grotta dei Colombi (Isola Palmaria, La Spezia).

L'estensione di tale zona dipende da numerose caratteristiche della grotta quali: dimensioni, portata della corrente d'aria entrante, ecc. E' intuitivo come altri parametri, quali umidità e pressione, possano influire anche sensibilmente sulla temperatura dell'aria. Tuttavia di questi fenomeni si dirà più avanti.

La variazione della temperatura lungo l'asse principale della grotta (Fig. 6) è rappresentata (Cigna 1961 a) allora dalla seguente equazione:

$$\Theta(x) = (\Theta_1 - \Theta_0) 0,692 \exp\left(-23,136 \frac{Dx}{d^2u}\right) + \Theta_0$$

dove $\Theta(x)$ è la temperatura dell'aria ($^{\circ}\text{C}$) al punto x (in metri dall'ingresso), Θ_1 è la temperatura dell'aria all'esterno,

Θ_0 è la temperatura delle pareti all'interno,

D è la diffusività termica dell'aria (m^2/sec) $= \frac{\Gamma}{k c_p}$

Γ è la conduttività termica dell'aria ($\text{cal}/\text{sec} \cdot \text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

k è la densità dell'aria (kg/m^3)

c_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante ($\text{cal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}$)

d è il diametro della grotta (m) $=$

$= 4 \cdot \frac{\text{perimetro della sezione media}}{\text{area della sezione media}}$

u è la velocità dell'aria (m/sec).

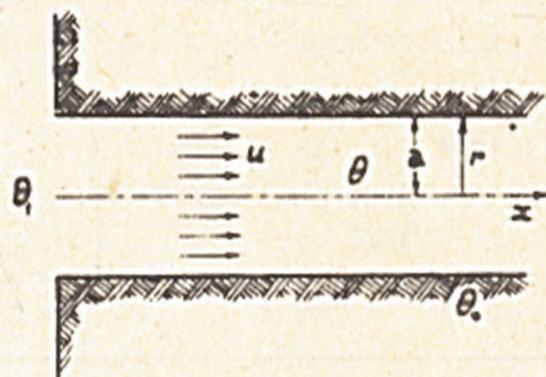


Fig. 6 — Galleria con corrente d'aria entrante

Ha un certo interesse esaminare in dettaglio la propagazione sul suolo della cosiddetta «onda termica». Infatti nel caso di esistenza di oscillazioni della temperatura esterna queste si propagano nel sottosuolo, attenuandosi e con un certo ritardo di fase.

La velocità di propagazione di quest'onda (Moore e Nicholas 1964) nel sottosuolo per passare da una certa profondità ad un'altra è proporzionale alla differenza di temperatura tra i due punti. Poichè però, queste differenze diminuiscono con l'aumentare della profondità a causa dell'attenuazione, anche la velocità di propagazione si riduce progressivamente. Nel caso di massiccio calcareo, alla profondità di una quindicina di metri l'onda arriva con un ritardo di circa 6 mesi e con una riduzione dell'ampiezza dell'oscillazione di fattore prossimo a 200. Per profondità ancora maggiori sono necessari tempi molto lunghi, superando facilmente il secolo o il millenio: accurate misure effettuate in profondità dovrebbero mettere in evidenza le fluttuazioni di temperatura «fossili» dovute alle glaciazioni.

Se la temperatura dell'aria in prossimità del suolo (Desio 1959, p. 391) varia con la legge:

$$\Theta(t) = \Theta^1 \cos \left(2\pi \frac{t}{\tau} \right)$$

dove Θ^1 è la massima escursione in °C rispetto alla temperatura media
 t è il tempo in ore

τ è la durata di un periodo in ore

Nel caso in cui la trasmissione del calore fra aria e suolo e viceversa avvenga per convezione, vale la seguente formula:

$$\Theta(x) = \Theta^1 A \exp \left(-x \sqrt{\frac{\pi \rho c}{\Gamma \tau}} \right) \cos \left[2\pi \frac{t}{\tau} - \left(2\pi B + x \sqrt{\frac{\pi \rho c}{\Gamma \tau}} \right) \right]$$

dove $\Theta(x)$ è la temperatura della roccia alla profondità di x metri

ρ è la densità della roccia in kg/m³ (calcare: 2500)

c è il calore specifico della roccia in Cal/kg (calcare: 0,2)

Γ è la conducibilità termica della roccia in Cal/ora · m · °C (calcare: 1,1).

A e B sono dei coefficienti funzione di $\frac{\alpha^2 \tau}{\Gamma \rho c}$, i cui valori sono

riportati nella Tabella 3.

α è il coefficiente di trasmissione del calore dell'aria al suolo che si può assumere, in media, pari a 10 Cal/ora m² °C e gli altri simboli hanno lo stesso significato indicato per l'equazione precedente.

Tabella 3

$\frac{\alpha^2 \tau}{\Gamma \rho c}$	A	B
0	0,000	0,125
0,001	0,012	0,124
0,002	0,017	0,124
0,005	0,028	0,122
0,1	0,039	0,121
0,2	0,054	0,119
0,5	0,084	0,116
0,1	0,116	0,112
0,2	0,159	0,107
0,5	0,232	0,099
1	0,304	0,091
2	0,388	0,081
5	0,510	0,072
10	0,603	0,055
20	0,689	0,044
50	0,784	0,033
100	0,843	0,024
200	0,883	0,018
500	0,925	0,012
1000	0,945	0,008
∞	1000	0,000

Si tenga comunque presente, tuttavia, che, in pratica, questi calcoli sono soggetti ad una certa approssimazione in quanto la conduzione del calore nel suolo dipende da numerosi fattori (Carslaw & Jaeger 1959, p. 82) tra i quali anche la presenza dell'acqua. Questa, d'altra parte, è soggetta a fluttuazioni sia per questioni idrologiche che per le stesse variazioni di temperatura, cosicchè il problema si complica ulteriormente.

Umidità

Come si è già accennato all'inizio, l'umidità relativa (cioè il rapporto, generalmente espresso in percento, tra la massa di vapor d'acqua esistente in un certo volume dell'ambiente e la massa che dovrebbe esservi per renderlo saturo) nelle grotte è frequentemente prossima alla saturazione.

Soltanto in prossimità di aperture comunicanti con l'ambiente esterno l'umidità relativa tende a diminuire sensibilmente. La presenza di corsi d'acqua o, più semplicemente, di acqua di percolazione è sufficiente a portare l'ambiente ipogeo in condizioni prossime alla saturazione. Occorre precisare come si possano facilmente verificare situazioni di supersaturazione, cioè di situazioni di equilibrio instabile in cui la massa di vapor d'acqua esistente in un certo volume dell'ambiente è maggiore di quella che, in condizioni di equilibrio stabile, vi dovrebbe essere per rendere tale volume saturo.

A causa dell'atmosfera particolarmente pulita ed alla mancanza, quindi, di nuclei di condensazione il vapore stesso rimane allo stato gassoso e non si condensa in goccioline d'acqua. Tuttavia è sufficiente la presenza di persone o di fiamme (per esempio lampade ad acetilene) per provocare la rapida insorgenza di nebbia dovuta alla precipitazione dell'eccesso di vapore che si condensa intorno ai nuclei di condensazione immessi nell'ambiente.

Il fatto che l'atmosfera delle grotte si trovi in condizioni prossime alla saturazione fa sì che si possa verificare con evidente facilità il fenomeno della condensazione. In numerose occasioni questa può giocare un ruolo tutt'altro che trascurabile nell'apporto di acqua in una determinata parte dell'ambiente ipogeo. Occorre inoltre sottolineare come tale acqua, che si deposita sulle pareti e che non contiene all'origine sali disciolti, risulti particolarmente aggressiva e sia quindi in grado di corrodere le superfici calcaree (roccia viva o concrezioni).

Il fenomeno della condensazione si verifica ad esempio nella stagione estiva quando dell'aria calda esterna penetra in una cavità ove, per raffreddamento, raggiunge condizioni di saturazione. In Tabella 1 (che viene anche utilizzata per la determinazione dell'umidità con lo psicrometro, come si è già visto) sono riportati i valori di umidità relativa (espressi in %) e della corrispondente umidità assoluta (espressa come acqua in g/m^3), in funzione di alcuni valori correnti della temperatura dell'aria.

Si supponga, ad esempio, che dell'aria esterna alla temperatura di 30°C e con umidità relativa del 75% entri in un sistema carsico per

effetto di un meccanismo di circolazione dell'aria che verrà descritto più avanti in dettaglio.

La temperatura all'esterno del sistema sia di 15 °C. In tal caso si può calcolare facilmente l'apporto dell'acqua di condensazione. Infatti l'aria a 30 °C con il 75% di umidità relativa contiene 22,9 g di acqua per m³; a 15 °C ed alla saturazione se ne possono avere soltanto 12,8. Pertanto la differenza di 10,1 g di acqua per m³ d'aria rappresenta l'apporto di acqua di condensazione. È ovvio che si tratta di quantità assolutamente non trascurabili ed in grado di dare origine a vistosi fenomeni di corrosione.

Naturalmente la condensazione di vapor d'acqua porta alla liberazione di una certa quantità di calore (540 Calorie/kg) che può talvolta modificare la distribuzione di temperatura calcolata basandosi su fenomeni di conduzione o di convezione in assenza di qualsiasi cambiamento di stato.

Pressione

La pressione dell'aria all'interno di una cavità dipende essenzialmente dalla pressione atmosferica esistente nella località ove si apra la grotta. Vi è tuttavia un effetto, che si potrebbe definire perturbatore, e che dipende dal peso della colonna d'aria di sezione unitaria e di altezza pari al dislivello tra l'imbocco presso il quale si misura la pressione esterna e il punto interno della grotta al quale si fa riferimento. Il calcolo deve essere effettuato, ovviamente, attribuendo all'aria di tale colonna un valore medio ponderato della temperatura ed umidità che si riscontrano nel tratto di grotta in questione. Tale calcolo benchè teoricamente possibile (Pipan 1956) non riesce in pratica nè agevole nè affidabile: è questa la ragione per cui non si adoperano gli altimetri per le livellazioni sotterranee. Inoltre si possono avere altre perturbazioni, ben più difficili da valutare, dovute ad effetti dinamici del vento attraverso eventuali ingressi del sistema carsico. Un particolare interesse offrono le cavità barometro cioè quelle cavità costituite da uno o più sistemi di concamerazione piuttosto vaste in comunicazione con l'ambiente esterno attraverso una apertura relativamente modesta.

Si consideri una di tali cavità (Fig. 7).

Se la pressione esterna varia passando dal valore p_1 al valore p_2 il volume iniziale V_1 dell'aria interna varierà di conseguenza ed assumerà il valore V_2 . Ovviamente la corrente d'aria attraverso l'entrata

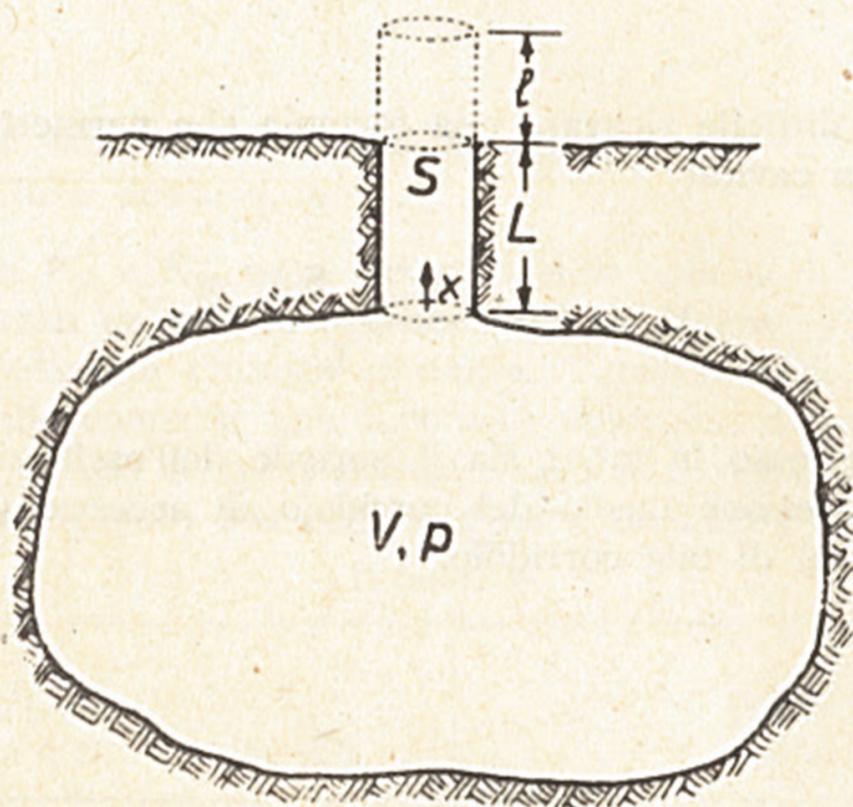


Fig. 7 — Cavità barometro

sarà diretta verso l'interno se la pressione aumenta o diretta verso l'esterno se la pressione diminuisce.

E' facile dimostrare (Cigna 1967) che vale allora la formula:

$$V_1 = V = \frac{p_2 \cdot S \cdot l}{(p_1 - p_2)}$$

dove V_1 che, come si è detto, è il volume iniziale dell'aria contenuta dalla grotta, coincide con il volume V della grotta; p_1 e p_2 sono le pressioni iniziali e finali misurate in condizioni di equilibrio (cioè in assenza di correnti d'aria attraverso l'ingresso); S ed l sono rispettivamente la sezione dell'ingresso e la lunghezza del cilindro immaginario di base pari alla sezione S e contenente l'aria passata attraverso l'ingresso. Tale lunghezza corrisponde anche al « vento filato » misurato da un sensibile anemometro.

Rimane così possibile la misura del volume di una cavità anche senza doverla esplorare al di là del corridoio di accesso.

Questa misura è possibile anche mediante un altro metodo. La cavità, infatti, può essere considerata anche come un gigantesco risuonatore accordato su una frequenza tipica. Allora soltanto le oscillazioni microbarometriche aventi tale frequenza verranno amplificate e si avrà una sorta di « respiro » ritmico della cavità. Anche per questo

fenomeno non è difficile ricavare una formula che permetta di ricavare il volume V della cavità:

$$V = 2930 \frac{t^2 S}{L}$$

quando V sia espresso in m^3 , t sia il periodo dell'oscillazione espresso in secondi, S la sezione media del corridoio di accesso (in m^2) ed L la lunghezza (in m) di tale corridoio.

Moto dell'aria

La circolazione dell'aria all'interno delle grotte è dovuta a cause differenti che possono essere raggruppate in due grandi classi: le cause statiche e le cause dinamiche (Cigna 1967).

Tra le prime vi sono le differenze di densità tra l'aria interna e quella esterna che, a loro volta, dipendono da vari parametri. Il più importante di questi, nel senso che si tratta di quello che più frequentemente gioca un ruolo importante, è la temperatura.

È noto infatti che l'aria calda è meno densa di quella fredda e pertanto tende a galleggiare su quest'ultima. Non è invece altrettanto noto che l'aria umida è meno densa dell'aria secca e perciò anch'essa può dare origine a correnti convettive. Poiché, come si è detto, la densità dell'aria dipende da vari fattori sarebbe troppo complicato riportare in tabella i valori della densità per tutte le possibili combinazioni degli altri parametri (temperatura, pressione ed umidità). Si riporta allora la seguente formula (Cigna 1967) che serve a calcolare il valore della densità dell'aria, K :

dove:

$$K = 0,464678 \frac{p - Mp_w}{273,13 + \Theta} + MK_w$$

K = densità dell'aria in kg/m^3

p = pressione atmosferica in Torr (mm Hg) corretta a 0 °C.

M = umidità relativa dell'aria (aria secca $M = 0$; aria satura $M = 1$).

P_w = pressione parziale del vapor d'acqua in Torr, corretta a 0 °C.

K_w = densità del vapor d'acqua in kg/m^3 .
 Θ = temperatura dell'aria in $^{\circ}\text{C}$.

I vapori di P_w e K_w sono riportati sulla tabella 4, mentre tutti gli altri son ricavati da misure sperimentali. In generali l'aria atmosferica ha una composizione chimica costante. Tuttavia nelle grotte, in particolare in quelle connesse con fenomeni vulcanici, si possono rinvenire delle sorgenti di gas (come l'anidride carbonica nella notissima Grotta del Cane presso Napoli) con densità diverse da quella dell'aria standard.

Tabella 4

$^{\circ}\text{C}$	P_w (Torr) at 0°C	k_w (kg/m^3)	$^{\circ}\text{C}$	P_w (Torr) at 0°C	k_w (kg/m^3)
-11	1.95	0.00217	10	9.21	0.00941
-9	2.13	0.00236	11	9.8	0.0100
-8	2.32	0.00256	12	10.5	0.0107
-7	2.53	0.00278	13	11.2	0.0114
-6	2.76	0.00301	14	12.0	0.0121
-5	3.01	0.00327	15	12.8	0.0128
-4	3.28	0.00354	16	13.6	0.0137
-3	3.57	0.00384	17	14.5	0.0145
-2	3.88	0.00415	18	15.5	0.0154
-1	4.22	0.00448	19	16.5	0.0163
0	4.58	0.00484	20	17.5	0.0173
1	4.93	0.00520	21	18.6	0.0183
2	5.29	0.00557	22	19.8	0.0194
3	5.69	0.00596	23	21.1	0.0206
4	6.10	0.00637	24	22.4	0.0218
5	6.54	0.00681	25	23.8	0.0231
6	7.01	0.00726	26	25.3	0.0245
7	7.51	0.00776	27	26.8	0.0258
8	8.05	0.00828	28	28.4	0.0273
9	8.61	0.00883	29	30.1	0.0288

Anche in questi casi, meno comuni dei precedenti, si possono provocare delle correnti, dovute allo spostamento verso le parti più basse delle cavità, delle masse d'aria a densità maggiore. Infine le variazioni della pressione atmosferica possono contribuire anch'esse a turbare le condizioni di equilibrio dell'aria all'interno delle grotte provocando così dei fenomeni di circolazione. In generale si distinguono due tipi principali di circolazione dell'aria: quella a « sacco d'aria » (Fig. 8) e quella a « tubo di vento » (Fig. 9).

Questa distinzione equivale a suddividere le cavità a seconda che abbiano una o più aperture a quote differenti.

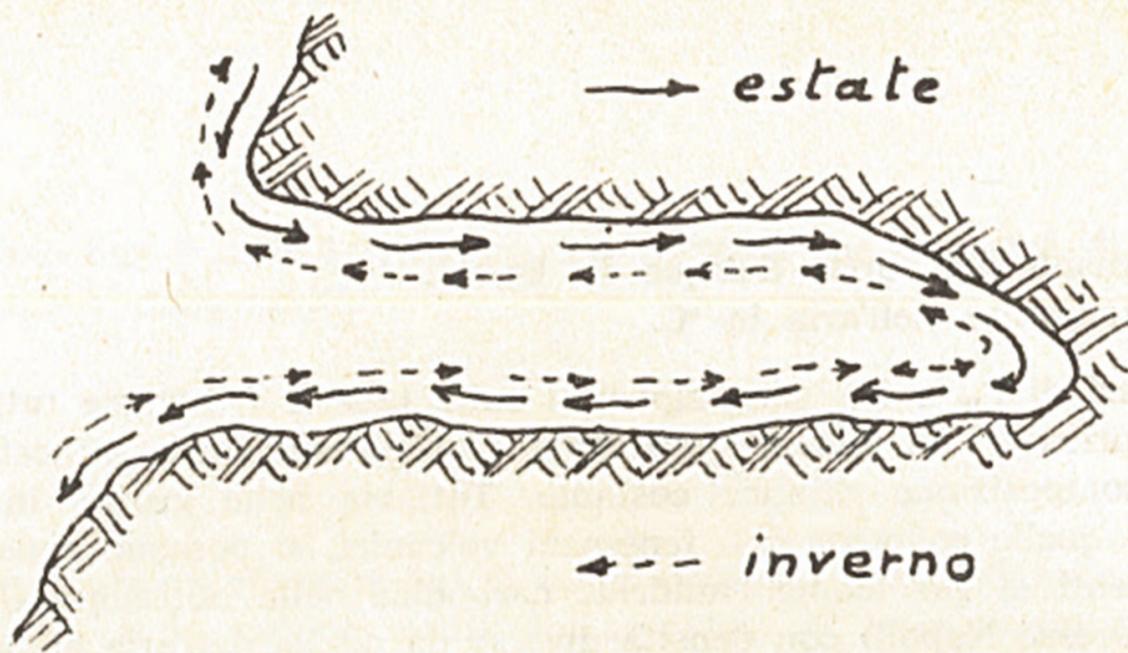


Fig. 8- Schema di cavità orizzontale con circolazione a « sacco d'aria ».

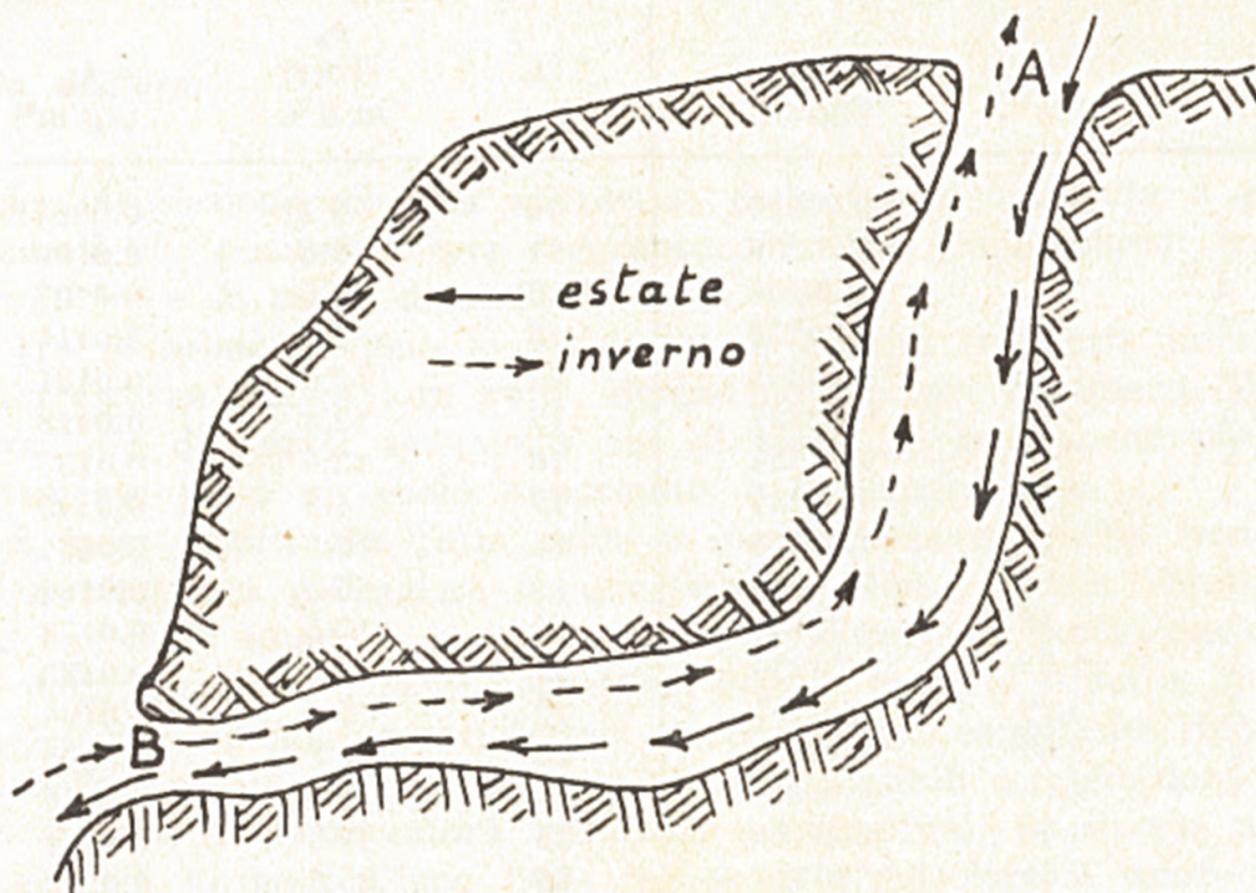


Fig. 9- Schema di cavità con due ingressi e con circolazione a « tubo di vento ». La temperatura dell'aria nel punto A (« bocca calda ») è sempre più elevata di quella nel punto B. Il verso della circolazione viene determinato dal segno della differenza di temperatura esistente tra l'interno della cavità e l'ambiente esterno.

Nelle cavità del primo tipo, con un solo imbocco, si ha infatti circolazione a « sacco d'aria » con l'aria che, d'estate, entra lambendo il soffitto, si raffredda ed esce lambendo il pavimento.

D'inverno essendo la grotta a temperatura più elevata di quella esterna, il verso si inverte e l'aria esce riscaldata. Ciò vale però per le cavità a sviluppo prevalentemente orizzontale; nel caso di pozzi si verifica il fenomeno della trappola ad aria fredda, per cui si conserva,

talvolta a lungo, l'aria fredda che vi penetra nel periodo invernale, mentre in estate cessa ogni circolazione perchè si verifica una stratificazione dell'aria con quella più fredda (e più pesante) al fondo e quella più calda (e più leggera) in superficie. Gli scambi termici sono dovuti allora soltanto alla conduzione attraverso l'aria che, essendo un buon isolante, li riduce a livelli molto bassi.

Se si hanno cavità oblique con l'apertura in basso si verifica il fenomeno analogo della trappola ad aria calda, dove si accumula appunto l'aria calda estiva mentre, d'inverno, cessa ogni circolazione.

La circolazione a « tubo di vento » si riscontra, invece, nelle cavità con due o più aperture; il meccanismo è altrettanto semplice: l'aria, per esempio, più calda all'interno durante l'inverno, essendo più leggera di quella esterna alla stessa quota, tende a salire uscendo dall'apertura superiore (bocca calda) richiamando nel contempo altra aria dall'esterno attraverso l'apertura inferiore (bocca fredda). Anche in questo caso si osserva l'inversione del ciclo nella stagione opposta, cioè d'estate. E' interessante osservare due cose: innanzi tutto non è detto che entrambe le aperture siano praticabili dall'uomo. Il caso più comune, anzi, è che una di esse sia costituita da un insieme di crepacci attraverso i quali filtra soltanto l'aria. Secondariamente anche con l'inversione del ciclo la bocca calda rimane sempre l'apertura superiore e quella fredda l'inferiore, in che equivale a dire in linguaggio matematico che il gradiente di temperatura all'interno di una cavità con circolazione a « tubo di vento » è sempre di segno positivo (in quanto l'asse lungo il quale sono misurate le quote è orientato dal basso verso l'alto, per convenzione).

I due tipi di circolazione possono essere distinti, (Cigna 1967), dal punto di vista analitico, dal valore del seguente integrale che dà il flusso d'aria che attraversa una sezione trasversale della grotta:

$$\int_S u ds \quad \left\{ \begin{array}{l} = 0 \text{ (sistema con una sola entrata)} \\ \neq 0 \text{ (sistema con due o più aperture verso l'esterno)} \end{array} \right.$$

dove u è la velocità media dell'aria e ds è un elemento di superficie, essendo l'integrale esteso a tutta la sezione S .

Nel primo caso (sistema con una sola entrata) è alquanto difficile misurare il valore della pressione motrice prodotta dalla differenza di densità dell'aria a causa sia dei valori assoluti molto bassi, sia della notevole infleunza della forma della grotta sulla circolazione dell'aria.

Ricordando l'equazione scritta prima che dava la variazione di tem-

peratura lungo l'asse principale di una grotta, si ricordi che è possibile calcolare il valore di d^2u dagli altri parametri che possono essere ottenuti da misure sperimentali. Se è nota anche la velocità dell'aria u , è possibile calcolare il valore del diametro equivalente, d_e , della grotta. Questo diametro è definito come il diametro del condotto immaginario, contenuto nella grotta, attraverso il quale fluisce il solo flusso entrante di aria. Nel caso, invece, di una grotta con due ingressi posti a quote diverse (Fig. 10) è possibile trattare la circolazione dell'aria in un modo più quantitativo.

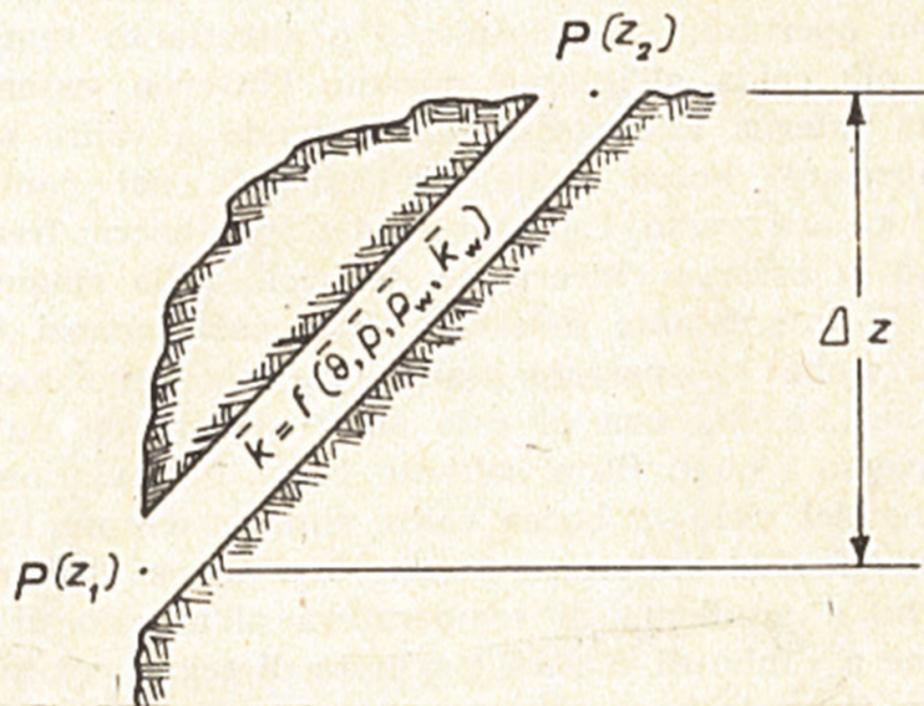


Fig. 10 — Cavità con due ingressi posti a quote differenti

Infatti la differenza di densità tra la colonna d'aria interna e la corrispondente colonna d'aria esterna genera una spinta. Il valore di tale spinta (in Torr) è dato dalla relazione:

$$(0,464678 \frac{\bar{p}^* - \bar{M}p_w}{273,15 + \bar{\theta}} + \bar{M} : \bar{K}_w) \Delta z - 13,596491 \cdot \Delta p \geq 0$$

dove i simboli hanno lo stesso significato indicato all'inizio di questo paragrafo ricordando però che si deve adoperare il loro valore mediato lungo tutta la grotta, mentre Δz e Δp rappresentano rispettivamente la differenza di quota (in metri) e di pressione (in Torr) tra le due entrate della grotta. Ovviamente la relazione prima scritta vale per l'atmosfera con la composizione chimica standard. In caso contrario oc-

corre ricalcolare i coefficienti tenendo conto della reale densità dell'aria a 0 °C e 760 Torr.

Tra le cause dinamiche del moto dell'aria sono da considerarsi l'influenza dei fluidi, a loro volta in movimento, sia all'interno che all'esterno della grotta. Si è parlato in modo generico di fluidi perchè sia l'aria che l'acqua in movimento possono provocare il trascinamento di masse d'aria in determinate condizioni. In particolare una corrente, che si potrà definire primaria, d'aria o d'acqua attraverso una strettoia può provocare una corrente d'aria indotta in un cunicolo che sia connesso in corrispondenza della strettoia. Le caratteristiche di questa aspirazione dipendono strettamente dalle caratteristiche geometriche delle gallerie e non è quindi possibile svolgere una trattazione matematica rigorosa del problema.

CONCLUSIONE

I brevi cenni sulla meteorologia ipogea qui esposti non intendono certamente rispondere a tutti gli interrogativi che possono sorgere nel corso di una ricerca.

Il loro scopo è semplicemente quello di raccogliere alcune informazioni sulla strumentazione in uso per queste ricerche, sull'impiego di tale strumentazione nonchè sui parametri in gioco.

Non si intende, in questa sede, esaurire il problema fornendo esempi dettagliati di applicazione delle metodologie esposte.

Chi intendesse dedicarsi a ricerche di meteorologia ipogea dovrà, innanzitutto, impraticarsi sull'uso della strumentazione nelle reali situazioni che si possono riscontrare in natura.

Contemporaneamente potrà approfondire le proprie conoscenze studiando lavori specifici quali, ad esempio, quelli riportati in bibliografia.

Sarà allora più facile identificare dei particolari argomenti di studio che, potranno essere sviluppati successivamente. E' opportuno comunque richiamare qui l'attenzione sul fatto che le ricerche in questo campo sono il frutto di lunghe e pazienti raccolte di dati, ripetute in varie stagioni. Non ci si aspetti, quindi, un brillante risultato a coronamento di poche ed affrettate osservazioni: le perturbazioni dovute alle interferenze delle variazioni climatiche locali possono sovente falsare certi risultati. Soltanto il confronto con analoghe serie di osservazioni condotte in un arco di tempo sufficientemente esteso (per

comprendere almeno una stagione fredda ed una calda) può consentire l'acquisizione di dati sicuri.

Lo studio del regime dei moti dell'acqua e della distribuzione delle temperature all'interno di una grotta può sovente fornire informazioni molto preziose su importanti caratteristiche morfologiche di una cavità.

La raccolta di alcune serie di misure in un buon numero di cavità (oltre che la raccolta di lunghe serie in alcune cavità-laboratorio) potranno fornire delle utili notizie sull'intervallo di variabilità di certe grandezze. Sarà allora più facile distinguere delle vere anomalie da semplici variazioni casuali.

Come già stato detto in altra sede (Cigna 1961 b) è facile notare come la meteorologia delle grotte faccia da sottofondo per così dire a tante altre disciplin. Spiegherà tante forme al geomorfologo, sarà d'aiuto all'entomologo in quanto egli potrà definire già a priori degli habitat particolari, agli speleologi in generale rivelerà passaggi e darà informazioni utili su imbocchi inaccessibili di gallerie.

Basta un termometro, un po' di matematica e molta pazienza.

Nota

Nel 1971 è stata pubblicata una direttiva del Consiglio della Comunità Economica Europea sull'impiego delle unità di misura del Sistema Internazionale (SI). In seguito a ciò, a partire dal 31-XII-1977 sarà vietato l'uso di certe unità come il Torr, la caloria, ecc. Non si è ritenuto, tuttavia, di aggiornare questa nota in base alla direttiva sopra citata, in quanto l'impiego delle vecchie unità permette più facili confronti con i dati raccolti negli anni scorsi.

BIBLIOGRAFIA

- CARSLAW H. S., JAEGER J. C., 1959 — *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford: 1-510.
- CIGNA A., 1957 — *Sulla perturbazione dovuta alla presenza dell'operatore nelle misurazioni termometriche ipogee*. *Rass. Spel. Ital.*, 9 (2): 159-164.
- CIGNA A., 1958 — *Prime ricerche meteorologiche nella Grotta di Bossea (Cuneo)*. *Atti VIII Congr. Naz. Speleol. Como 1956, Mem. IV, Rass. Spel. It.* 2; 191-201.
- CIGNA A. A., 1961 a — *Air temperature distributions near the entrance of caves*. *Atti Simp. Int. Spel. Varenna 1960 Mem. V Rass. Spel. It.*, 2: 159-267.
- CIGNA A. A., 1961 b — *La meteorologia nelle grotte*. - *Atti Conv. di Spel. «Italia '61» Torino*: 89-98.
- CIGNA A. A., 1967 — *An analytical study of air circulation in caves*. In. *Journal Speleology*, 3 (1+2): 41-54.
- DESIO A., 1959 — *Geologia applicata all'ingegneria*. Hoepli, Milano 1-1058.
- MOORE G. W., NICHOLAS G., 1964 — *Speleology*. D. C. Heath and Co., Boston: 1-120.
- PIPAN L., 1956 — *Sulla ricerca della temperatura media per le livellazioni barometriche sotterranee*. *Atti VI Congr. Naz. di Speleologia, Trieste 1954*: 219-224.
- TROMBE F., 1952 — *Traité de Spéléologie*. Payot, Paris: 1-376.

