

Dott. ARRIGO A. CIGNA

## LA METEOROLOGIA NELLE GROTTE

Qualcuno si sarà forse meravigliato sentendo parlare di meteorologia delle grotte. Se si pensa alla meteorologia come a quella scienza che ci fornisce i bollettini del tempo, la meraviglia è giustificata, in quanto nuvole, grandine, cicloni, sottoterra non si vedono.

In realtà meteorologia è un termine generico che comprende numerosi campi di ricerca. Per quanto riguarda le grotte sarebbe più esatto parlare di micrometeorologia data la scala in cui si considerano i fenomeni.

Inoltre, chi si interessa di meteorologia ipogea non può non occuparsi di questioni più propriamente concernenti la idrologia, la chimica-fisica, la speleomorfologia ed altre ancora. Una definizione abbastanza esatta può essere data, parlando della meteorologia ipogea, come di quella scienza che studia il clima delle grotte insieme a tutti quei fenomeni che lo determinano.

È abbastanza curioso il fatto che mentre la maggior parte degli speleologi (intendendo con questo termine quella categoria di persone che va in grotta con scopi scientifici) compie misurazioni termometriche dell'aria e dell'acqua nelle grotte che visita, ben pochi si occupano poi di correlare i dati, studiarne il significato, prevedere i risultati.

Così la meteorologia ipogea si riduce in tante opere « classiche » di speleologia ad una sommaria descrizione di categorie di cavità suddivise in base ai modi di circolazione dell'aria al loro interno. Anche le ricerche, tolte le misurazioni termometriche, si limitavano, in un passato ben poco remoto, ad osservazioni qualitative e nient'altro.

È chiaro che, con premesse di questo genere, molti non si sentano incoraggiati a tirare delle conclusioni dalla messe di dati, talvolta addi-

rittura cospicua, raccolti durante anni, non avendo a disposizione una teoria ben definita, al lume della quale poter lavorare.

Terminata questa introduzione che dovrebbe servire a inquadrare meglio i problemi che ora ci interessano, passiamo ad osservare da vicino quali strumenti si impiegano e cosa succede nelle grotte.

Il tradizionale termometro rimane senz'altro lo strumento di impiego più comune, anche se non sempre usato nel modo più corretto. Attualmente si adoperano di preferenza termometri con suddivisioni al 1/5 di °C che uniscono ad una precisione sufficiente, una dimensione ridotta ed una costruzione robusta.

Particolarmente utili per l'impiego in grotta sono gli psicrometri a bulbo bagnato con aspirazione meccanica. Hanno purtroppo una limitazione dovuta al prezzo che ne esclude la larga diffusione. Le correnti d'aria sono rivelate e misurate o con anemometri molto sensibili o, più semplicemente, seguendo il fumo di una sigaretta, per esempio. Bisogna però fare attenzione, in quest'ultimo caso, che il moto osservato sia dovuto effettivamente al moto dell'aria e non a differenze di densità tra fumo e aria. Altre misure rivestono un carattere di eccezionalità e pertanto non considereremo ora i relativi strumenti.

Abbiamo prima accennato all'impiego del termometro effettuato talvolta in modo scorretto. È abbastanza semplice evitare simili inconvenienti ricordando semplicemente che la lettura deve essere eseguita quando il termometro ha assunto la stessa temperatura dell'ambiente. Quindi, dopo aver posto lo strumento in stazione, si eseguiranno osservazioni a qualche minuto l'una dall'altra. Le temperature lette si avvicineranno via via ad un valore, finché, ad un certo momento, lo raggiungeranno rimanendo poi costanti. Il valore da registrare come misura non è quindi la media di tutte le osservazioni bensì il valore uguale delle due ultime osservazioni.

Passiamo ora all'ambiente dove si svolgono queste misure, per completare questa rapida escursione nel campo della meteorologia delle grotte.

L'aria, all'interno di una cavità può essere in equilibrio statico o dinamico o in regime di transizione.

Condizione necessaria perchè si abbia equilibrio statico è che la densità dell'aria all'interno della grotta diminuisca o al massimo rimanga costante con il crescere della quota. Così per esempio all'interno di un pozzo verticale l'aria vicino all'imbocco dovrà essere meno densa di quella in fondo: l'equilibrio sarà tanto più stabile quanto più questa

differenza di densità sarà mancata. In linguaggio matematico questo equivale a dire: quanto più il gradiente di densità sarà negativo al crescere della quota (fig. 1).

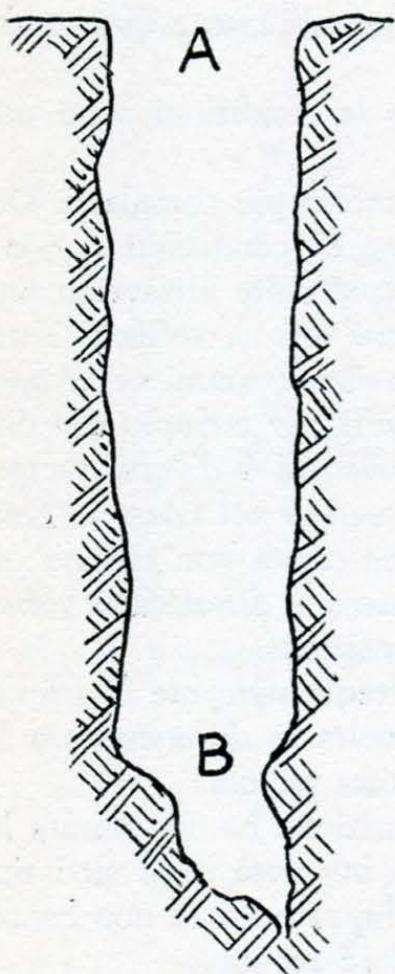


Fig. 1 - Affinchè l'aria all'interno del pozzo si trovi in condizioni di equilibrio statico, la densità nel punto A deve essere minore di quella nel punto B.

La densità dell'aria dipende dalla pressione (che a sua volta è funzione della quota), dall'umidità e dalla temperatura. Dal momento che la pressione, alla quale la densità è direttamente proporzionale, diminuisce col crescere della quota, non la prenderemo in considerazione, limitandoci ad esaminare le altre due variabili (umidità e temperatura), in questo caso molto più interessanti.

L'aria umida è meno densa di quella secca e quella calda lo è pure, come è ben noto, rispetto a quella fredda. Se ci riferiamo allora all'esempio di prima, dal momento che all'interno del pozzo l'aria sarà più umida che all'esterno, perchè si verifichino le condizioni di equilibrio sarà necessario che l'aria interna sia più fredda di quella esterna.

Ricorrendo ad una espressione analoga a quella adoperata poco fa, possiamo dire che è necessaria l'esistenza di un gradiente positivo di temperatura al crescere della quota.

Se il gradiente è nullo, invece, (cioè la temperatura dell'aria interna è uguale a quella esterna) l'umidità dovrà essere maggiore all'esterno o al più uguale dentro o fuori del pozzo. La variazione di densità dovuta alla variazione della pressione con la quota, è in genere molto piccola, salvo il caso di pozzi profondi e non modifica sensibilmente quanto abbiamo detto.

Per quanto riguarda l'equilibrio dinamico le condizioni sono differenti.

Infatti i fenomeni che intervengono sono molto più complessi. Definito questo tipo di equilibrio come l'insieme di condizioni per cui l'aria all'interno di una cavità si muove uniformemente attraverso una sua sezione trasversale, possiamo dire che perchè esso si verifichi è necessario che le forze provocanti il moto dell'aria siano costanti nel tempo. Così se la corrente d'aria in una galleria è dovuta per esempio alla differenza di densità dell'aria ai suoi estremi, trovantis a diverse temperature, è sufficiente che tali temperature non varino nel tempo. Ogni qualvolta una corrente d'aria all'interno di una cavità non rimane costante, per la durata di tempo in esame, in intensità, direzione e verso, la circolazione all'interno viene definita in transizione.

Quest'ultima condizione si verifica molto frequentemente in primavera ed in autunno e in particolare ognqualvolta la differenza tra la temperatura esterna o quella interna è abbastanza piccola.

In pratica la circolazione in regime di transizione ha una durata limitata nel tempo e pertanto non ha lo stesso interesse degli altri tipi di circolazione. Per questo motivo le teorie sviluppate finora non hanno ancora preso in considerazione questo particolare regime.

Fin dai primi lavori concernenti i modelli di circolazione, le cavità sono state suddivise in due grandi categorie: quelle con circolazione a « sacco d'aria » (fig. 2) e quelle con circolazione « tubo di vento » (fig. 3).

Approssimativamente questo equivale a suddividere le cavità a seconda che abbiano una o più aperture a quote differenti.

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, in estate, si verificano quelle condizioni richieste per l'equilibrio statico, cui si è fatto prima cenno, e cessa ogni circolazione. Quest'ultimo caso si differenzia sensibilmente dagli altri, come risulta dallo studio della distribuzione della tempera-

tura dell'aria lungo l'asse della cavità. Tralasciamo qui i dettagli per i quali si rimanda a lavori specializzati.

La circolazione a « tubo di vento » si riscontra, come abbiamo detto, nelle cavità con due o più aperture; il meccanismo è altrettanto semplice: l'aria, per esempio, più calda all'interno, durante l'inverno, es-

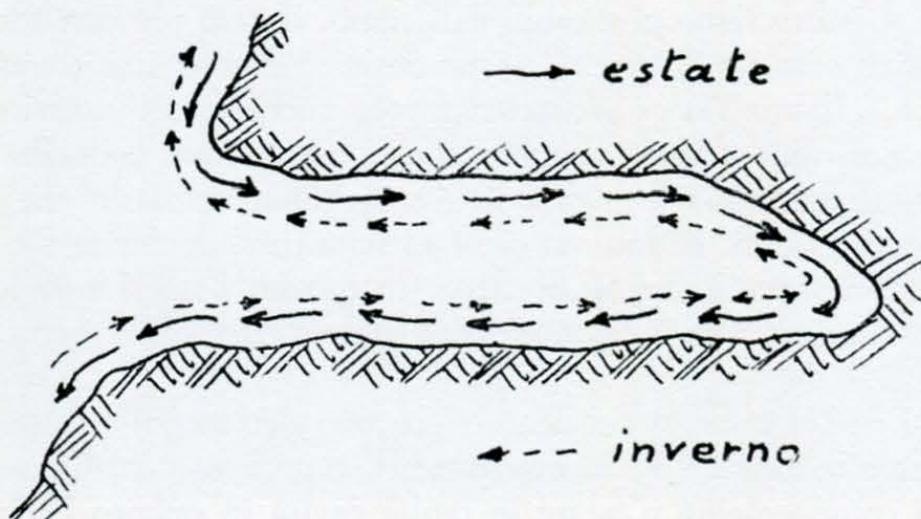


Fig. 2 - Schema di cavità orizzontale con circolazione a « sacco d'aria ».

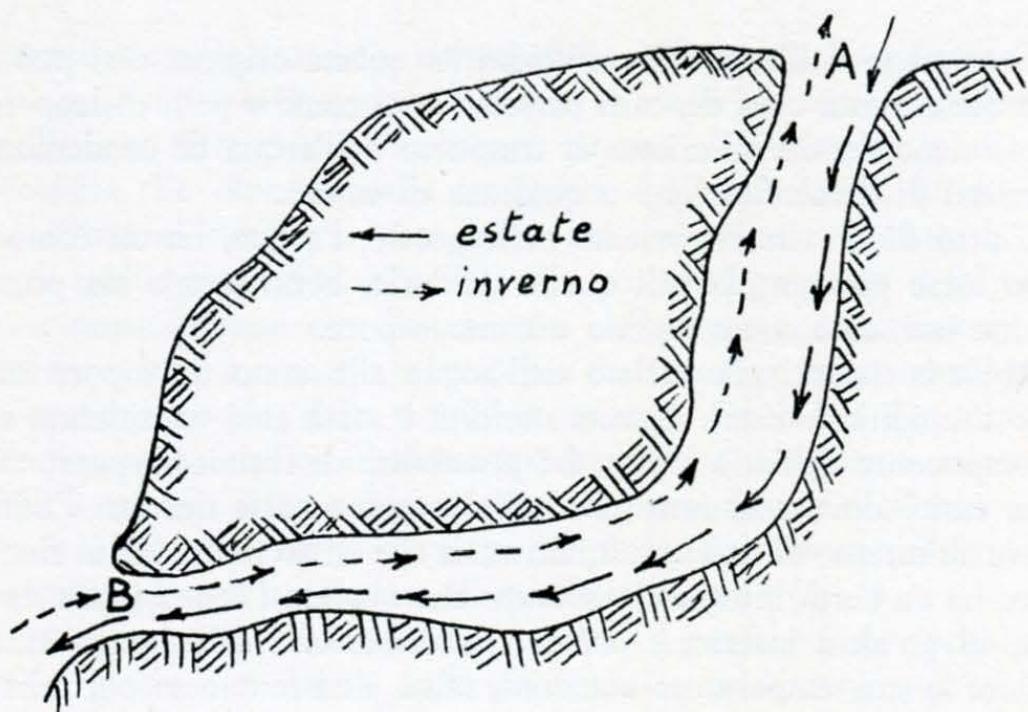


Fig. 3 - Schema di cavità con due ingressi e con circolazione a « tubo di vento ». La temperatura dell'aria nel punto A (« bocca calda ») è sempre più elevata di quella nel punto B. Il verso della circolazione viene determinato dal segno della differenza di temperatura esistente tra l'interno della cavità e l'ambiente esterno.

sendo 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.

È interessante osservare due cose: anzitutto 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, il 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 moti dell'aria finora considerati possono dar luogo a fenomeni di saturazione e conseguente condensazione di vapore acqueo. Questo caso si verifica comunemente d'estate in molte cavità in quanto l'aria calda esterna penetrando nella grotta si raffredda e può succedere che la sua umidità relativa salga a tal punto da aversi una condensazione sulle pareti.

Gran parte dell'acqua di stallicidio ha questa origine, e si può supporre che sovente quei depositi parietali noti come «pelli di leopardo» (fig. 4) siano dovuti all'azione di trasporto dell'acqua di condensazione su residui di decalcificazione o qualcosa di simile.

L'altro fluido che ritroviamo nelle grotte, l'acqua, ha un comportamento forse più semplice di quello dell'aria, benchè esso sia presente con due fasi, cioè come liquido e come vapore.

Abbiamo infatti già parlato dell'acqua allo stato di vapore esaminando l'umidità dell'aria. Questa umidità è stata anzi considerata come un componente dell'aria stessa. La possibilità di trattare separatamente le due fasi è dovuta al fatto che nella maggior parte dei casi l'umidità relativa all'interno di una cavità non varia che entro limiti molto ristretti. Invece ha un certo interesse osservare che quando l'acqua passa da una quota ad un'altra inferiore, per la trasformazione dell'energia cinetica in calore la sua temperatura aumenta, salvo altri fenomeni perturbatori, di  $0,234^{\circ}\text{C}$  ogni 100 m di caduta. In generale, poi, l'acqua ha una funzione termoregolatrice all'interno di una cavità dato il suo calore specifico molto più elevato di quello dell'aria. L'effetto è tanto più evidente quanto più è vasta la superficie di contatto tra aria e acqua, come nel caso di bacini, laghi, ecc.



Fig. 4 - « *Pelli di leopardo* » nella galleria di ingresso alla Grotta di Bossea (gennaio 1959).

Sempre a proposito della temperatura delle grotte, possiamo ricordare come sovente esse siano già di per sé degli ambienti termostabili. Le oscillazioni termiche dell'ambiente esterno si propagano infatti con una velocità che dipende dalla frequenza dell'oscillazione. In particolare, oscillazioni rapide si propagano più velocemente all'interno del suolo, di oscillazioni lente. D'altra parte, mentre l'ampiezza delle prime decresce sensibilmente con l'aumentare dello spessore attraversato, le oscillazioni lente sono ancora rilevabili a distanze non trascurabili, anche se pur sempre piccole, dalla superficie esterna. Tanto per dare un'idea, mentre l'ampiezza dell'oscillazione termica diurna si riduce a valori trascurabili a qualche decina di centimetri di profondità, l'oscillazione termica annua ad una decina di metri di profondità ha ancora una ampiezza dell'ordine di un decimo di quella all'esterno (fig. 5).

Tuttavia, a causa della piccola velocità di propagazione (pochi centimetri al giorno), si hanno degli sfasamenti considerevoli per cui, per esempio, il minimo invernale può arrivare in un punto del sottosuolo quando, all'esterno, è giunta l'estate!

Lo sfasamento delle stagioni, dovuto ad altri motivi, si riscontra anche in talune cavità, soprattutto verticali ed aprentesi ad alta quota, ove per l'accumulo della neve ed il suo lento scioglimento, esse risul-

tano praticabili soltanto nel tardo autunno quando la neve dell'inverno e primavera precedenti si è ormai sciolta e le nuove nevicate non hanno ancora avuto inizio.

Un problema particolarmente interessante la speleogenesi è costituito dall'insieme dei fenomeni chimico-fisici che si svolgono nella zona vadosa.

In seguito a questi fenomeni si formano le « microgrotte », i « fusi » e, via via, le altre forme più complesse che portano alla costituzione di un completo sistema carsico.

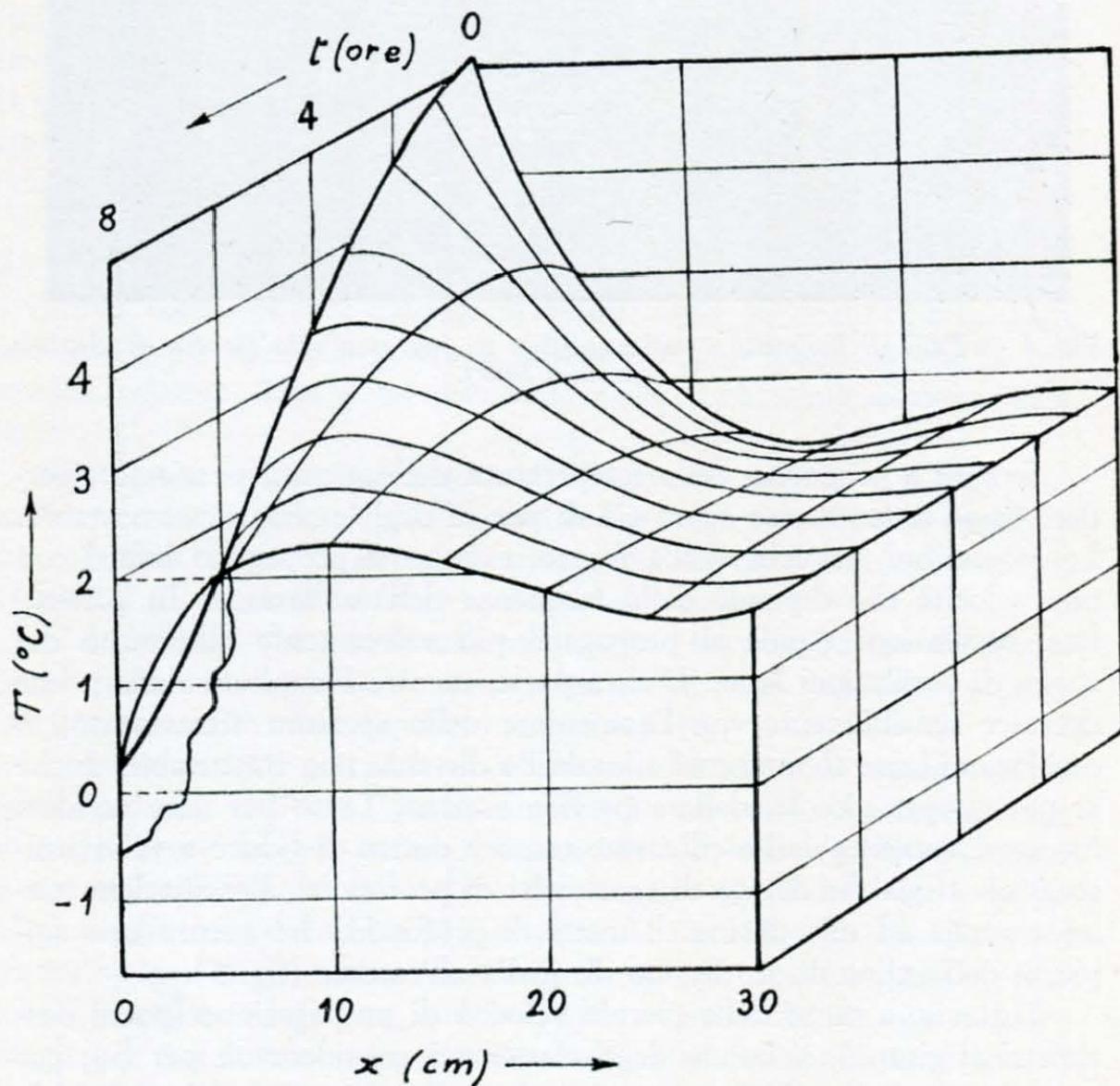


Fig. 5 - Propagazione di un'oscillazione termica diurna nel suolo. Si notano la rapida attenuazione e lo sfasamento dell'oscillazione che aumenta con l'aumentare della distanza dalla superficie esterna. (Da: P. J. Scheider, « Conduction Heat Transfer » - Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Reading, Mass. U.S.A.; modificato).

Ora, uno degli interrogativi più importanti è questo: perchè le grotte si formano in certi punti e non in altri, cioè, in altre parole, perchè in certi punti l'acqua corrode il calcare ed in altri deposita concrezioni?

Una risposta a questa domanda può essere data osservando anzitutto che l'acqua, perchè possa circolare, ha bisogno di un passaggio preesistente. Passaggi di questo genere sono forniti in abbondanza nelle rocce carsogene dai piani di stratificazione e dalle innumerevoli fratture.

Nei pressi della superficie esterna però, le acque trascinano ogni sorta di particelle in sospensione per cui la corrosione del calcare viene praticamente impedita. È facile pensare che questo fenomeno sia dovuto alla proprietà delle interfacce. Senza scendere in particolari osserveremo solo che in corrispondenza delle superfici di separazione tra fasi differenti l'asimmetria delle forze agenti porta a delle condizioni chimico-fisiche del tutto particolari.

Nel caso in questione la superficie di separazione *acqua-fase solida* è praticamente costituita dalla superficie delle particelle sospese, essendo trascurabile, in confronto, quelle della roccia calcarea nelle pareti della microfrattura. Così, si può pensare che le acque vadose, all'inizio del loro tragitto, si trovino in un ambiente inadatto allo svolgimento di una efficace azione corrosiva nei riguardi della roccia. Al di sotto di una data profondità le acque, filtrate dagli strati soprastanti e quindi non più impedite dalla presenza di particelle in sospensione, possono attaccare la roccia procedendo così all'allargamento delle microfratture iniziali.

La successiva evoluzione della cavità la lasciamo agli speleomorfolologi, in quanto esula dagli scopi della meteorologia ipogea. Tuttavia vale la pena di osservare le cause che portano alla formazione di concrezioni.

L'anidride carbonica gioca un ruolo preminente nell'equilibrio del sistema *carbonato di calcio-bicarbonato di calcio-acqua*. È noto infatti che la solubilità del secondo è maggiore di qualche ordine di grandezza addirittura, rispetto al primo. D'altra parte il bicarbonato si forma nell'acqua quando essa contenga disciolta dell'anidride carbonica. Così al variare della quantità di  $\text{CO}_2$  che può esistere nell'acqua, variano le condizioni di solubilità del calcare. Non tutta l'anidride carbonica, però, si trova nell'acqua combinata sotto forma di bicarbonato. Vi sono infatti reazioni di equilibrio tra la parte che è semplicemente disciolta e quella combinata chimicamente.

La pressione parziale dell'anidride carbonica dipende dalla temperatura, dalla pressione totale e da numerosi altri fattori per cui, alla brusca variazione di uno di questi, corrisponde un altrettanto brusco

passaggio dalle condizioni di concrezionamento a quelle di corrosione o viceversa.

In particolare, tanto per fare un esempio tra i molti possibili, consideriamo lo sbocco di una microfrattura in una galleria, ove l'aria circoli liberamente. All'interno della frattura siamo in presenza di due sole fasi: quella liquida dell'acqua che percola e quella solida costituita dalle pareti. Non vi è una differenza della pressione parziale dell'anidride carbonica tra le due fasi e questa pertanto rimarrà in equilibrio e l'acqua potrà disciogliere una certa quantità di carbonato di calcio.

Quando l'acqua giunge nella cavità aerata, l'anidride disciolta si separerà per ristabilire l'equilibrio con la pressione parziale notevolmente più bassa nella fase gassosa. Conseguentemente tutto l'equilibrio del sistema si sposterà e si verificherà una deposizione di carbonato di calcio.

Questo non è che uno tra i molti casi di concrezionamento che si possono avere per la variazione di altri parametri.

Dalla rapida esposizione ora fatta è facile notare come la meteorologia delle grotte faccia da sottofondo, per così dire, a tante altre discipline. 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...