

BOSSEA MMIII

CONVEGNO NAZIONALE

# L'AMBIENTE CARSICO E L'UOMO

MANIFESTAZIONE CELEBRATIVA UFFICIALE DEL CAI  
PER IL "2003: ANNO INTERNAZIONALE DELL'ACQUA DOLCE"

LABORATORIO DIDATTICO DEL COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE DEL CAI  
LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO  
GROTTE DI BOSSEA (FRABOSA SOPRANA- CN) 5-8 SETTEMBRE 2003

## ATTI

STAZIONE SCIENTIFICA DI BOSSEA - CAI CUNEO  
PROVINCIA DI CUNEO

# CONCENTRAZIONE ATMOSFERICA DI <sup>222</sup>RN NELLA GROTTA DI BOSSEA E RELAZIONI CON IL REGIME DEI FLUSSI IDRICI INTERNI

Giovanni Agnesod<sup>1</sup>, Guido Peano<sup>2-3</sup>, Ezechiele Villavecchia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ARPA Valle d'Aosta; <sup>2</sup>Stazione Scientifica di Bossea; <sup>3</sup>Comitato Scientifico Centrale del CAI

## RIASSUNTO

*Presso il Laboratorio della Stazione Scientifica di Bossea è stata effettuata, dal marzo 1999 al dicembre 2000, una misura in continuo della concentrazione di radon in aria. Essa fa seguito a precedenti campagne di misura rivolte alla conoscenza dei livelli medi sul lungo periodo di concentrazione di radon in diversi punti della grotta, con l'uso di rivelatori passivi. La campagna 1999-2000 è stata condotta utilizzando un sistema di misura a camera di ionizzazione (AlphaGUARD). Essa ha permesso di studiare la correlazione tra i livelli di concentrazione di radon interni alla grotta e le variazioni della portata, contemporaneamente monitorata, del torrente sotterraneo, soggetto, nel periodo in questione, ad eventi di piena particolarmente rilevanti. Anche la concentrazione di radon disciolto nelle acque interne della grotta è stata soggetta a ripetute misure puntuali, nell'arco del periodo di studio. L'insieme dei dati acquisiti, e qui presentati, permette di formulare ipotesi sulle dinamiche di sviluppo di radon nell'ambiente interno della grotta, in relazione alle condizioni del sistema acquifero della grotta.*

## ABSTRACT

*The atmospheric concentration of <sup>222</sup>Radon in the Bossea cave were continuously detected from march 1999 to december 2000 with a ionization chamber (Alpha GUARD): the research follows up a program of foregoing scattered measures, achieved with passive data collectors, necessary to detect the range of radon concentration along the cave.*

*The study allowed to observe correlations of the radon levels with the stream flow fluctuations; the concentration of dissolved radon was also measured during the same period and the set of data presented in the study allows to formulate hypotheses about the radon dynamics in the cave.*

## L'AMBIENTE ALLO STUDIO

### Morfologia

La grotta di Bossea costituisce il settore terminale di un complesso sistema carsico che si estende sulla sinistra idrografica della Val Corsaglia, dall'abitato di Bossea fin oltre lo spartiacque con la valle Maudagna, raggiungendo la Conca di Prato Nevoso. Si tratta di un vasto acquifero carsico drenante un bacino imbrifero esterno di almeno 6 km<sup>2</sup> di area. La cavità è percorsa da un torrente di rilevante portata costituente il collettore principale del sistema, che ha ormai ricevuto, in questa zona, tutti i principali apporti idrici provenienti da punti diversi del massiccio.

In base alle attuali conoscenze la grotta ha uno sviluppo spaziale di quasi 3 km. ed un dislivello di 199 m. La galleria d'ingresso introduce alla zona inferiore, lunga complessivamente circa 1 km con forte dislivello ascendente (115 m); una successione di giganteschi saloni porta al Lago di Ernestina e alla grande cascata, ove termina la parte turistica della cavità. Questa zona della grotta presenta morfologia aspra e scoscesa, caratterizzata da altezze vertiginose, strapiombi, dirupi, clasti ciclopici e soffitti intagliati a spigoli vivi. Tutto ciò si alterna con un ricco ed imponente concrezionamento calcareo. Nel torrente che discende la cavità si alternano rapide, cascate e piccoli bacini lacustri.

Oltre la cascata inizia la zona superiore della grotta, costituita dal canyon del torrente e dalle sovrastanti gallerie fossili.

Il canyon, lungo 400 m, molto alto e stretto, ha sviluppo orizzontale; presenta aspetti pittoreschi e suggestivi. La sua parte terminale è occupata dal Lago Loser, di 120 m di lunghezza, navigabile con un canotto. Le acque del torrente scaturiscono da un complesso sifone, esplorato dagli speleosub per 150 m di sviluppo e 55 metri di profondità. I rami fossili costituiscono un vasto reticolo di condotti idrici ormai inattivi, a sviluppo orizzontale o inclinato.

Le indagini scientifiche esperite inducono a ritenere che la zona sommersa abbia grande estensione, ben superiore alla parte finora esplorata dai subacquei. E' possibile che ai livelli superiori esistano importanti reti di gallerie aerate, tuttavia non raggiungibili per quanto oggi noto. Per l'abbondanza e l'energia delle acque correnti e percolanti, Bossea si presenta come vera e propria grotta vivente, percorsa da flussi idrici impetuosi, in cui i processi di formazione e modellamento sono tuttora pienamente attivi.

### **Idrogeologia**

L'acquifero di Bossea si sviluppa entro i litotipi appartenenti alla serie del Brianzonese Ligure, e più precisamente nell'Elemento Navonera-Bossea-Prel (Vanossi, 1974), limitato da imponenti linee tettoniche con direzione approssimativa E-W (linea di Fontane e linea del Prel) e caratterizzato da una zona fortemente compressa, a pieghe e scaglie originariamente vergenti a nord e successivamente raddrizzate, interessata da faglie subverticali.

La struttura idrogeologica comprendente il sistema carsico di Bossea è costituita da una fascia di rocce carbonatiche (calcari dolomitici e dolomie triassiche, calcari marmorei giurassici, calcari scistosi localmente arenacei del Cretaceo) orientata all'incirca WNW-ESE, limitata da importanti linee tettoniche sub-verticali e compresa fra i litotipi basali della serie (quarziti e porfiroidi) che la fiancheggiano a N e a S. La serie carbonatica, fratturata e ben carsificata, conferisce all'acquifero una elevata capacità di ingestione e di trasporto delle acque. I litotipi del basamento si presentano localmente (in corrispondenza delle principali discontinuità) intensamente fratturati e cataclasati.

Nella grotta, dopo la galleria iniziale scavata nei calcari dolomitici, i grandiosi saloni che ne costituiscono la parte inferiore, fino al Lago di Ernestina, sono impostati lungo un complesso contatto tettonico fra le rocce carbonatiche ed i porfiroidi del basamento che presenta andamento moderatamente inclinato o suborizzontale: tale contatto, spesso mascherato da colate concrezionali, è tuttavia visibile prima sulla sinistra e poi sulla destra idrografica quasi per l'intero sviluppo di questo settore della cavità.

I porfiroidi sono quasi ovunque intensamente cataclasati e laminati e presentano scarsa compattezza e consistenza con presenza all'interno della massa rocciosa di estese fratture e superfici di discontinuità che sembrano addentrarsi notevolmente in profondità. Ciò ha permesso alle acque del torrente ed ai materiali trasportati una facile erosione, con approfondimento ed ampliamento della grotta in questi litotipi. Pertanto i grandi saloni risultano scavati prevalentemente o interamente nei porfiroidi.

La zona superiore della grotta (canyon del torrente e gallerie fossili sovrastanti), impostata su una serie di fratture subverticali, è scavata interamente nei calcari o nelle dolomie triassiche.

Il torrente ha generalmente portate oscillanti fra i 50 l/s ed i 1200 l/s, con punte che possono raggiungere i 1500 l/s, ed alta escursione annua fra minime e massime. Nell'anomalo episodio alluvionale dell'ottobre 1996, la portata raggiunse tuttavia un eccezionale livello valutato oltre i 4000 l/s.

Il corso d'acqua riceve nell'ambito della grotta una serie di apporti di acque di percolazione provenienti dal complesso reticolo di fratture sovrastante la cavità. Fra questi si annoverano due afflussi più consistenti costituiti dalla Polla delle Anatre, situata poco a monte del Lago di Ernestina nella parte superiore della cavità e la Polla dell'Orso ubicata nell'omonimo salone della zona inferiore. I due recapiti idrici hanno portate massime finora registrate prossime rispettivamente a 3000ml/s ed a 500 ml/s. Le caratteristiche fisico-chimiche delle rispettive acque, pur provenienti da zone diverse, fanno ritenere assai probabile un loro percorso in esteso contatto con i porfiroidi del basamento, assai prossimi alle due scaturigini. Ciò pare trovare conferma nelle concentrazioni del Radon in tali acque, assai superiori, come si potrà constatare nel proseguo, a quelle nelle acque del torrente provenienti invece dai litotipi della serie carbonatica.

## Meteorologia

La situazione meteorologica della cavità appare piuttosto complessa e di non facile interpretazione. La temperatura presenta variazioni notevoli, anche largamente superiori al grado centigrado, da zona a zona, indipendentemente dalla distanza dall'ingresso o dalla quota. Il movimento dell'aria risulta generalmente piuttosto modesto e diffuso in modo relativamente omogeneo in tutti i principali ambienti. Non sono state ancora completamente chiarite le modalità della circolazione aerea grotta-ambiente esterno.

Allo stato attuale delle conoscenze la cavità non risulta possedere altri punti di accesso all'infuori dell'ingresso abituale e non sembra presentare altri collegamenti apprezzabili con l'ambiente esterno, se non tramite le fratture sovrastanti che formano reticoli assai estesi ma hanno larghezza molto limitata. Tali fratture sono abitualmente occupate in minor o maggior misura dalle acque che vi scorrono o che vi ristagnano.

La presenza delle acque impedisce perciò la circolazione aerea in queste fratture per tutto l'anno, ad esclusione, forse, dei periodi di particolare siccità del sistema carsico conseguenti ad assenze assai prolungate di precipitazioni.

La circolazione aerea grotta-ambiente esterno sembra perciò rientrare nell'intero arco dell'anno, o almeno nella sua grandissima maggioranza, nella tipologia del "sacco d'aria", ovvero dell'entrata e dell'uscita dell'aria tramite l'unico orificio esistente, con scorrimento dei flussi di opposta direzione rispettivamente a livello del pavimento e del soffitto del corridoio d'ingresso, ed alternanza dei medesimi legata alla successione stagionale. Tale situazione trova conferma nella totale assenza di forti correnti d'aria nella cavità, se non in vicinanza delle rapide e delle cascate, e nella scarsa velocità dei flussi aerei in tutta la grotta ad eccezione di pochi punti particolari. In alcune zone periferiche, corrispondenti a diverticoli che sembrano diramarsi verso l'esterno si avvertono flussi d'aria più percettibili, che indurrebbero a ipotizzare una modesta circolazione locale a "tubo di vento" con ingresso ed uscita dell'aria da punti diversi.

Dalle osservazioni pluriennali effettuate si è potuto tuttavia constatare che il microclima ed il movimento dell'aria nella cavità sono regolati prevalentemente dal regime del collettore idrico che, tramite gli scambi di calore roccia-acqua-atmosfera e tramite la ventilazione indotta dalle cadute e dalle turbolenze delle acque, determina le variazioni dei principali parametri meteorologici. La direzione della circolazione dell'aria in tutta la zona dei grandi saloni (parte inferiore della grotta) appare, ad esempio, svincolata dalla variazione delle temperature esterne e legata invece al movimento dell'acqua.

Fra l'altro le differenze di temperatura rilevate fra le diverse zone della grotta sono legate in modo evidente alla maggiore o minore distanza dalle acque correnti o precipiti, mentre a forti incrementi della portata del torrente corrisponde un marcato aumento della ventilazione in prossimità delle cascate e delle rapide ed un aumento più modesto ma già rilevante in tutta la grotta.

La velocità dell'aria, in vicinanza delle cadute d'acque, può variare fra 1-2 m/s in condizioni di bassa portata fino a 7-8 m/s ed oltre, in condizioni di piena; nei diversi saloni, ove le correnti aeree sono soggette ad una forte dispersione, sono state finora misurate velocità varianti fra 4-5 cm/s e 60-70 cm/s. Nel complesso il movimento delle acque mantiene una circolazione e un ricambio d'aria permanenti ed apprezzabili in tutte le zone della grotta. Ciò comporta una diffusione relativamente uniforme dei gas atmosferici nella cavità, con differenze non molto marcate fra la zona superiore e la zona inferiore, come constatato anche dalla misurazione della concentrazione del CO<sub>2</sub>.

La situazione cambia marcatamente nelle nicchie più basse e meno aerate scavate prevalentemente o totalmente nei porfiroidi, ed ancor più nelle fratture entro i porfiroidi, aventi comunicazioni limitate e scambi abitualmente ridotti con il restante ambiente di grotta, ove ha luogo un ristagno ed un'alta concentrazione del gas pesante ivi emanato. Queste sacche d'aria possono essere tuttavia mobilizzate dalla spinta (pistonaggio) esercitata da correnti aeree originate dall'aumento della massa e della velocità delle acque o dalle stesse acque invadenti in condizioni di grande piena siti abitualmente asciutti, miscelandosi con l'atmosfera della grotta ed inducendo un assai rilevante aumento della concentrazione del Radon in tutta la cavità.

Differenti condizioni idrodinamiche e meteorodinamiche possono dunque determinare forti variazioni della presenza del <sup>222</sup>Rn nell'atmosfera della grotta nei diversi periodi dell'anno, rilevabili ed analizzabili tramite misurazioni continuative dei parametri interessati.

Tab. 1 - Livelli di concentrazione in aria di Rn222 rilevati a Bossea, 1994-1995.

Punto di misura Rif. fig. 1	Concentrazione Rn222 Bq/m <sup>3</sup>
1	803
2	734
3	824
4	720
5	810
6	836
7	962
8	913
9	899
10	926
11	839
12	783

## PRECEDENTI CAMPAGNE DI MISURA DELLE CONCENTRAZIONI DI RADON NELLA GROTTA DI BOSSEA

La prima campagna di misura di concentrazioni di radon nella grotta di Bossea fu compiuta nel 1994-1995. Essa fu rivolta alla mappatura dei livelli di concentrazione di radon in aria in diversi punti della grotta, lungo tutto il suo sviluppo, come indicato in figura 1. La campagna fu condotta con l'utilizzo dei dosimetri passivi utilizzati nella campagna nazionale ENEA-ISS per la valutazione della radioattività naturale indoor (7). Essi sono basati su rivelatori a tracce nucleari su film sottile (LR115). I dosimetri vennero esposti per la durata di un mese, dal 17/12/94 al 15/01/95.

I valori di concentrazione rilevati (6) sono riportati in tabella I. Il punto di misura 3 corrisponde al Laboratorio principale della Stazione Scientifica di Bossea (nel seguito chiamato Laboratorio). In sintesi, si osserva che le concentrazioni sono relativamente omogenee, con valori più elevati nella parte centrale della grotta (punti di misura 7, 8, 9, 10).

Al fine di studiare le eventuali variazioni temporali della concentrazione di radon fu progettata e realizzata una seconda campagna, con l'utilizzo di un sistema a cella di scintillazione a diffusione passiva con contatore Pylon AB-5 per la misura in continuo delle concentrazioni (8). Il sistema di misura venne posizionato presso il Laboratorio e mantenuto in funzionamento continuo per 10 mesi, dall'agosto 1996 al maggio 1997. I dati venivano memorizzati in forma di concentrazioni medie per intervalli consecutivi di 6 ore. Il tracciato ottenuto è riportato in Fig.2. Il fatto nuovo e molto importante che questa campagna di misura permise di rilevare fu che l'andamento delle concentrazioni di radon in aria è segnato da aumenti di grande entità, e relativamente rapidi, in correlazione con gli eventi di piena idrografica. In particolare, si nota l'aumento in corrispondenza all'evento alluvionale dell'ottobre 1996, che provocò anche la disattivazione del sistema di alimentazione elettrico del Laboratorio, e la conseguente perdita dei dati relativi alla fase di picco delle concentrazioni di radon. In questa occasione fu raggiunta la portata di 4000 l/sec, che rappresenta il valore massimo mai rilevato nella Grotta di Bossea.

GROTTA DI BOSSEA  
da Calleris, Elia; 1988

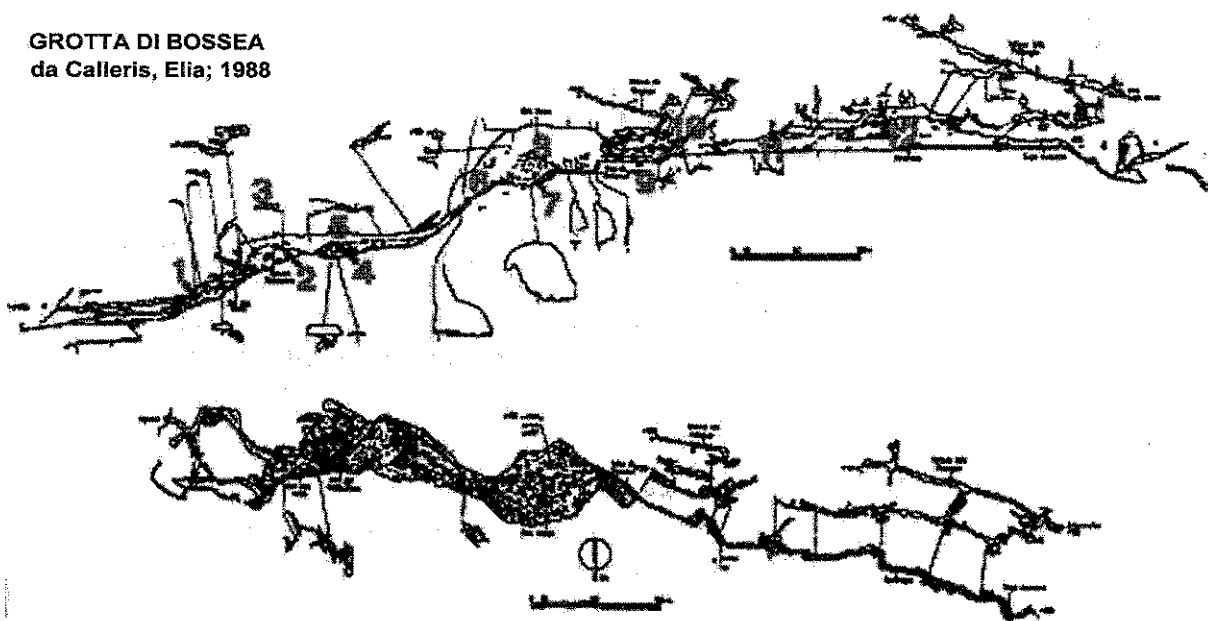


Fig.1 - Grotta di Bossea e punti di misura della concentrazione di Rn222 in aria, campagna 1994-1995.

Perfettamente documentata è la crescita in relazione ad un successivo evento di piena, nel mese di novembre 1996, così come si evidenziano variazioni lente e di modesta entità nelle concentrazioni di radon negli altri periodi, non interessati da eventi di piena. Una seconda interruzione di funzionamento dello strumento, meno importante per la caratterizzazione dell'andamento della concentrazione di radon, si evidenzia nel corso del mese di marzo 1997.

Va anche sottolineato che la concentrazione media complessiva sull'intero periodo di misura è risultata essere di 792 Bq/m<sup>3</sup>, del tutto compatibile con quelle rilevate nel corso della campagna precedente, vedi in particolare i punti 2, 3, 4 e 5. Naturalmente, il significato di questa concordanza non va sopravvalutato, tenuto conto che i rilievi della prima campagna si erano protratti per un periodo di un solo mese, e che proprio la misura prolungata ha messo in evidenza la possibilità di notevoli variazioni nella concentrazione di radon in aria.

Concentrazione media sull'intero periodo di misura: 792,4 Bq/m<sup>3</sup>

Grotte di Bossea - Laboratorio  
concentrazione Rn222 agosto 1996 - maggio 1997

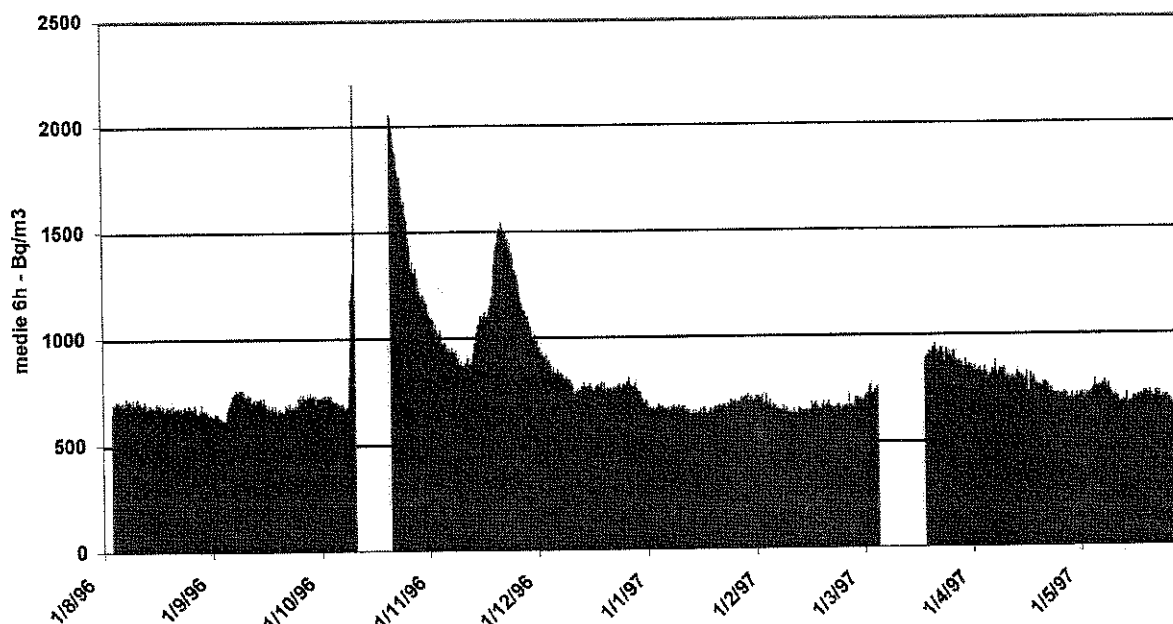


Fig. 2 - Andamento della concentrazione di Rn222 in aria per il periodo di 10 mesi agosto 1996 - maggio 1997. Postazione di misura: Laboratorio.

### LA CAMPAGNA DI MISURA 1999 - 2000

L'evidente dipendenza delle concentrazioni di radon dalla portata del torrente sotterraneo ha portato alla progettazione e realizzazione di una nuova campagna di misura, nella quale il rilievo in continuo delle concentrazioni di radon fosse accompagnato, oltre che dal rilievo in continuo delle portate del torrente, da misure periodiche di concentrazioni di radon disciolto nelle acque della grotta.

### Strumenti e metodi di misura

Per questa campagna, i cui risultati sono l'oggetto principale di questa relazione, il punto di misura in continuo di radon venne mantenuto presso il laboratorio principale della Grotta, con l'utilizzazione però di uno strumento diverso: il misuratore a camera a ionizzazione AlphaGUARD (Genitron Instruments GmbH), collegato a un gruppo di continuità per far fronte a brevi episodi di interruzione di alimentazione elettrica. Lo strumento era predisposto per una elaborazione e memorizzazione dei dati acquisiti in forma di medie orarie.

Il monitoraggio della portata del torrente è stato effettuato con l'idrometrografo posizionato nel ramo superiore della grotta. I rilievi di portata sono stati effettuati ad intervalli di 6 ore.

Le misure di radon disciolto nelle acque sono state effettuate a diverse riprese durante il rilievo in continuo con tecnica di campionamento e degassamento in loco dell'acqua in celle a scintillazione (celle di Lucas Pylon), e successivo conteggio con sistema di fotorivelazione e conteggio Pylon AB5.

I rilievi in continuo si sono protratti per una durata di 22 mesi, dal marzo 1999 al dicembre 2000.

### Misura in continuo della concentrazione di radon in aria

In Fig. 3 sono riportati, sullo stesso grafico, gli andamenti della concentrazione di radon nell'aria della grotta, al laboratorio principale, e la portata del torrente.

Concentrazione media sull'intero periodo di misura: 794,3 Bq/m<sup>3</sup>

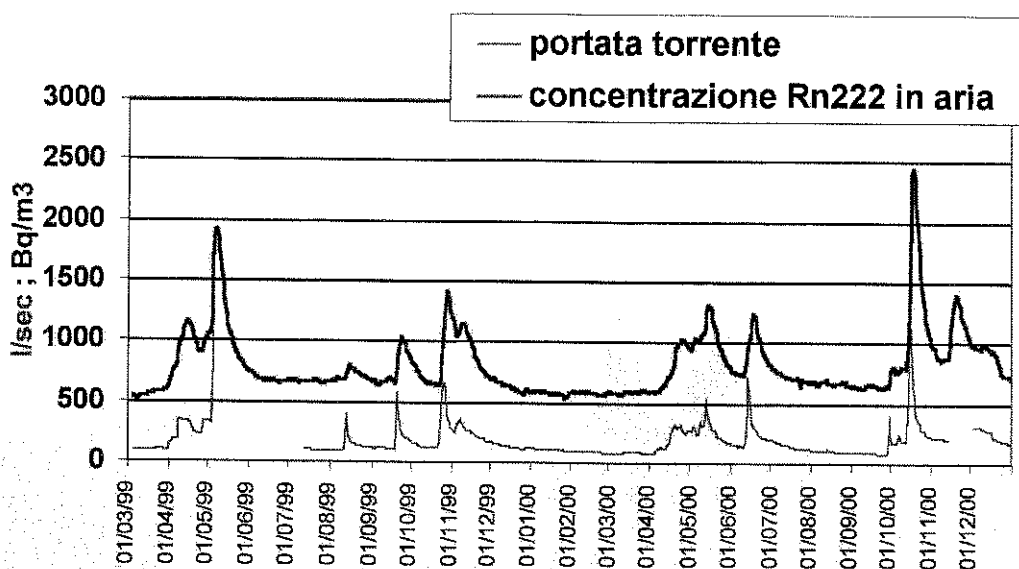


Fig. 3 - Andamento della concentrazione di Rn222 in aria per il periodo di 22 mesi marzo 1999 – dicembre 2000, postazione di misura: Laboratorio (tracciato superiore, spesso). Andamento della portata del torrente nel medesimo periodo (tracciato inferiore, sottile).

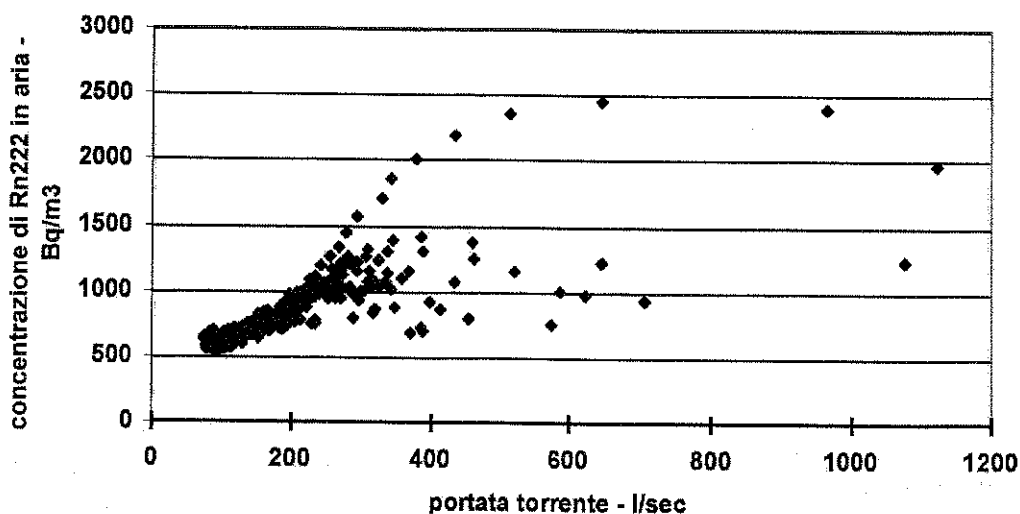


Fig. 4 - Correlazione concentrazione Rn222 in aria / portata torrente.

Il confronto tra gli andamenti dei due tracciati dà un'immediata conferma visiva della corrispondenza tra gli eventi di piena, e in generale tra la portata del torrente, e la concentrazione di radon nell'aria della grotta. E' anche sorprendente la concordanza tra il valore medio di concentrazione di radon sull'intero periodo rilevato nel corso di questa campagna di misura e di quella precedente.

L'analisi della correlazione tra concentrazione di radon in aria e portate del torrente porta tuttavia ad una configurazione un po' più complessa (Fig. 4) di quanto ci si potrebbe aspettare dalla concordanza qualitativa dei profili temporali. Essa evidenzia fenomeni di sfasamento tra la variazione della portata del torrente negli eventi di piena e la variazione della concentrazione di radon in aria. Essi saranno oggetto di analisi nel paragrafo successivo.

### Misure di concentrazione di radon nelle acque della grotta.

L'interpretazione della dinamica del radon all'interno della grotta di Bossea non può prescindere da una attenta considerazione delle concentrazioni di radon nelle acque della grotta, e delle loro variazioni.

I punti di prelievo delle acque oggetto di misura sono indicati in Fig. 5. Ogni punto è stato oggetto di diverse misure, in diverse condizioni di portata del torrente. Nel riquadro sono indicati i campi di variazione dei valori di concentrazione rilevati nei diversi punti.

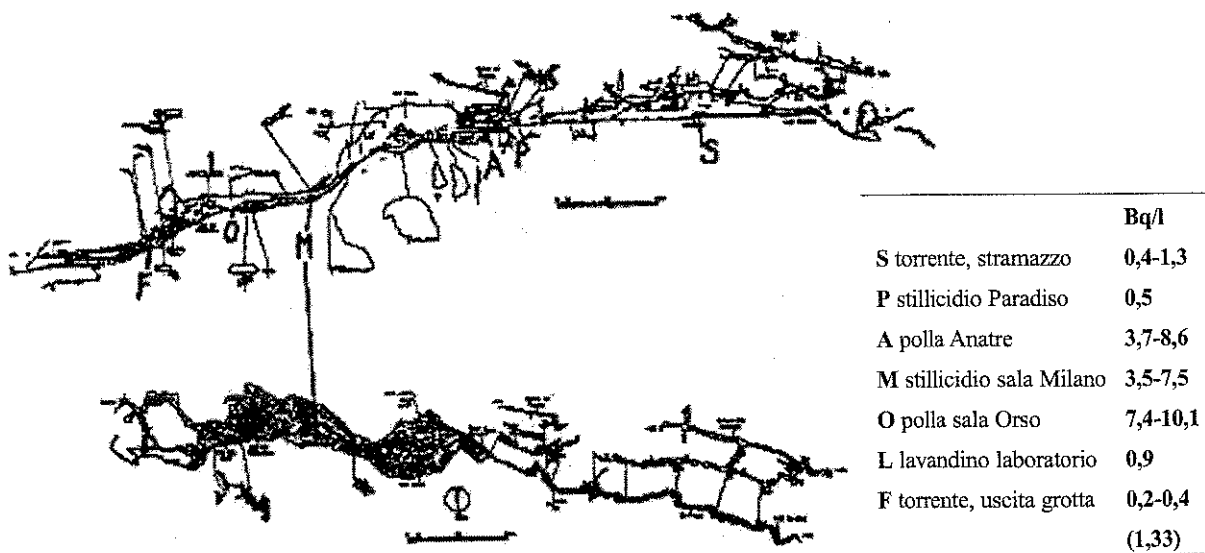


Fig. 5 - Grotta di Bossea e punti di misura della concentrazione di Rn222 nelle acque, con indicazione del campo di valori rilevati nei diversi rilievi (riquadro a destra).

Come si vede, i valori di concentrazione di radon nelle acque sono piuttosto modesti. Le diverse concentrazioni rilevate nelle varie risorgenze (punti A, O) e infiltrazioni (punti P, M) sono interpretabili con riferimento ai percorsi seguiti dalle acque nei diversi casi, e alla prossimità rispetto ai porfiroidi e porfiroscisti del basamento della grotta. Si tratta in ogni caso di apporti quantitativamente assai modesti al sistema idrologico ipogeo, dominato dal torrente sotterraneo di Bossea. Le concentrazioni nelle acque del torrente sono state rilevate, a più riprese, all'ingresso (punto S - stramazzo) e all'uscita del torrente medesimo dalla grotta (punto F, sala Frane), e su questi valori di concentrazione, in grassetto nel riquadro di Fig. 5, sono basate le considerazioni sviluppate al paragrafo seguente. Anche le acque al lavandino laboratorio (punto L) sono derivate, attraverso apposita canalizzazione, dal torrente.



## INTERPRETAZIONE DEI DATI RILEVATI

### Condizioni di equilibrio tra radon disciolto nelle acque del torrente e radon nell'aria della grotta

I valori di concentrazione di radon disciolto nelle acque del torrente misurati all'ingresso del medesimo nella Grotta (punto S) mostrano una stretta correlazione lineare con la portata del torrente stesso. Questo fatto è illustrato nel grafico di Fig. 6. I valori di concentrazione nelle acque coprono il campo di variazione indicato per il punto in esame in Fig. 5, e sono espressi in Bq/m<sup>3</sup> (valori 1000 volte superiori a quelli indicati nel riquadro di Fig. 5).

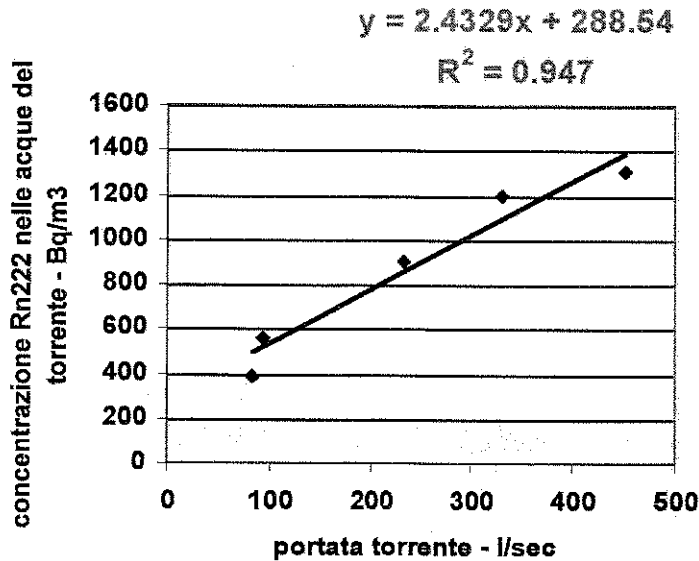


Fig. 6 - Correlazione tra la portata del torrente e la concentrazione di radon nelle acque del torrente medesimo.

I prelievi e le misure su campioni di acqua sono stati effettuati in condizioni di portata che vanno dalla magra spinta fino a condizioni di portata elevata, ma mai in condizioni di grande piena in atto (cfr. Fig. 3), anche per evidenti problemi di difficoltà di accesso al punto di prelievo in tali situazioni.

Il motivo di tale correlazione potrebbe essere individuato nel fatto che condizioni di maggiore portata del torrente implicano maggiore permeazione da parte delle acque ipogee della rete interna di condotti e fessurazioni, e conseguente maggior assunzione, in soluzione, del radon che può essere ivi presente per emanazione dal substrato di rocce di tipo porfiroide.

A loro volta, le concentrazioni di radon nell'aria della grotta sembrano essere, in condizioni di stabilità o graduali variazioni di portata del torrente, in equilibrio con le concentrazioni misurate nell'acqua. Questo fatto emerge dal grafico di Fig. 7, in cui sono poste a confronto le concentrazioni calcolate in aria supposte condizioni di equilibrio con le concentrazioni misurate nelle acque del torrente all'uscita dalla grotta - punto F (asse orizzontale), con le concentrazioni effettivamente misurate nell'aria della grotta nello stesso momento (asse verticale). Ricordiamo che il radon è un gas solubile in acqua, e che il suo Coefficiente di solubilità, inteso come rapporto all'equilibrio tra la concentrazione del radon in acqua e la concentrazione del radon in aria, espresse nella stessa unità di misura (es. Bq/m<sup>3</sup>), è fortemente dipendente dalla temperatura dell'acqua, e, nelle condizioni di Bossea, con temperature dell'acqua variabili da 7 a 8 °C (#), vale 0,45 (9):

$$0,45 = (\text{Conc. Rn222 in H}_2\text{O}) / (\text{Conc. Rn222 in aria})$$

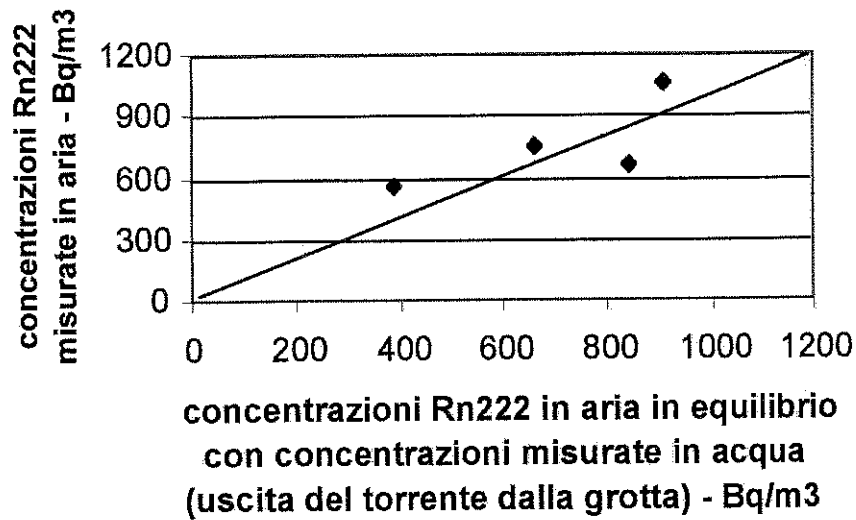


Fig. 7 - Tendenziale equilibrio tra le concentrazioni di radon in aria e nelle acque del torrente. La retta rappresenta le condizioni di equilibrio.

Le misure considerate in Fig. 7 in uscita dalla grotta si riferiscono tutte a condizioni di portata bassa o normale. Non stupisce a questo punto, dalle osservazioni riassunte in Fig. 6 e in Fig. 7, la correlazione lineare riscontrabile, in condizioni di variazione graduale di portata del torrente, tra la portata medesima e la concentrazione di radon nell'aria della grotta, illustrata in Fig. 8. Il campo di portate considerato, da 120 a 200 l/sec, esclude sia gli episodi acuti di piena, sia i periodi di magra spinta. E' inoltre interessante osservare che la pendenza della retta di Fig. 8, costruita su moltissimi punti sperimentali, è la stessa della retta di Fig. 6. In condizioni di variabilità graduale del regime idrico sotterraneo sembra dunque essere mantenuta una condizione di sostanziale equilibrio tra le concentrazioni di radon in aria e nell'acqua del torrente.

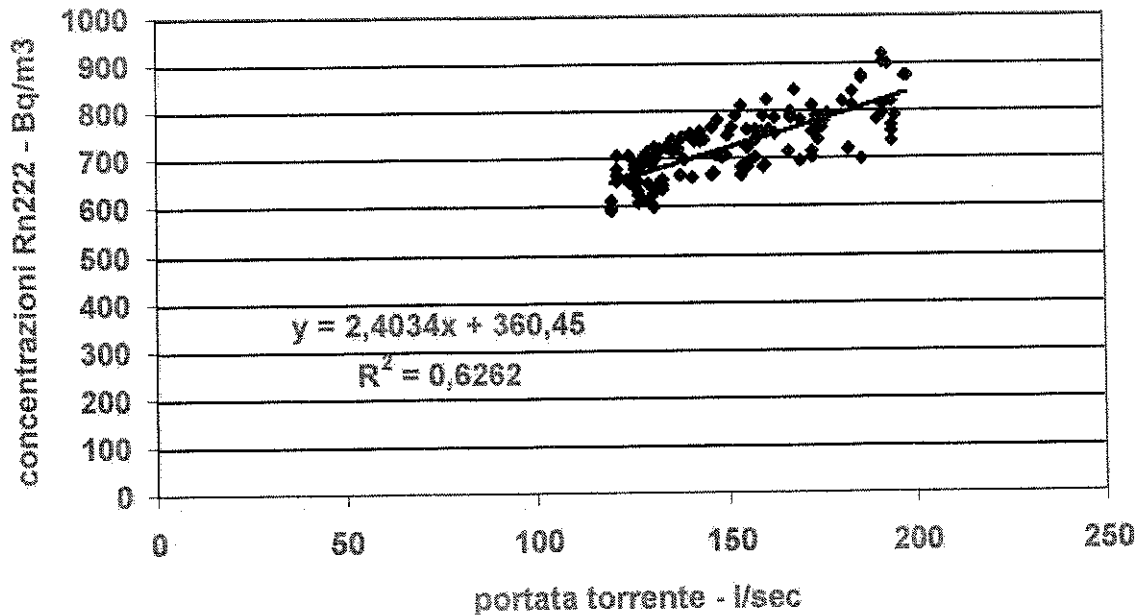


Fig. 8 - Correlazione lineare tra la portata del torrente e la concentrazione di radon nell'aria della Grotta di Bossea. Condizioni di variazione graduale della portata, escludenti piene e periodi prolungati di magra spinta

## Episodi di piena

La correlazione lineare concentrazione radon in aria / portata torrente viene meno nelle fasi acute dei periodi di piena, come mostrato in Fig. 9.

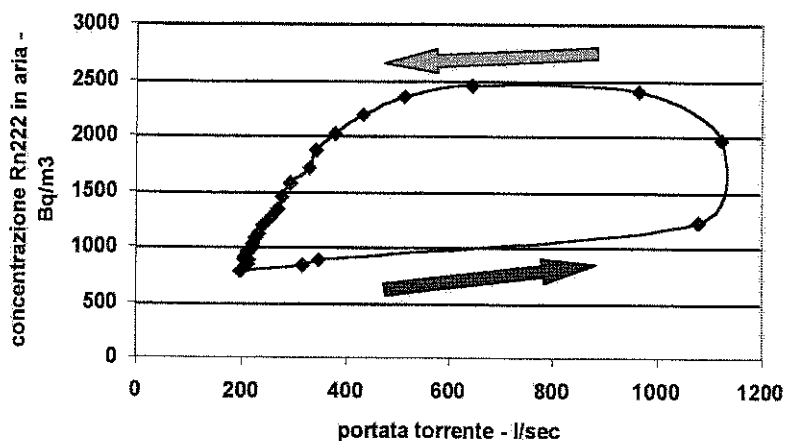
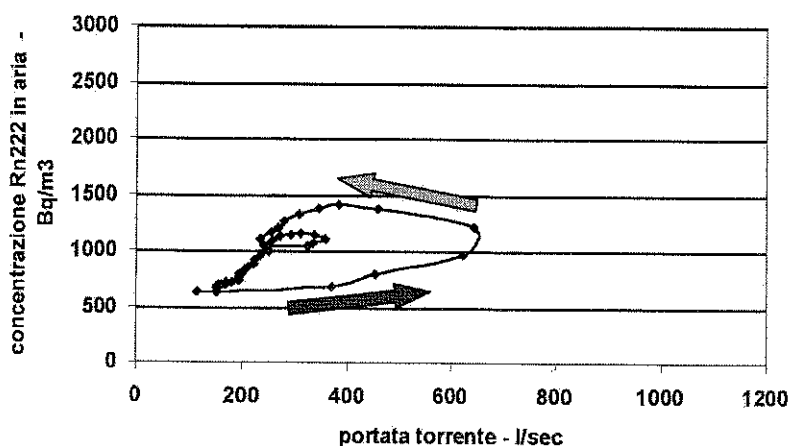


Fig. 9 - Correlazione tra la portata del torrente e la concentrazione di radon nell'aria della grotta negli eventi di piena.

◀ (9/a) Piena ottobre 2000



◀ (9/b) Piena novembre-dicembre 1999

In questi casi, l'ondata di piena precede la crescita di concentrazione di radon nell'aria della grotta. Le concentrazioni di radon in aria continuano a crescere per 12 - 18 ore anche in condizioni di portata già in fase di regresso. La concentrazione di radon in aria inizia poi una fase di regolare diminuzione, che però è più lenta di quanto il semplice decadimento radioattivo del radon (tempo di dimezzamento 91,7 ore) può da solo spiegare (vedi Fig. 10).

Si può ritenere che, all'arrivo dell'onda di piena, abbiano luogo sia un rapido allagamento di cavità e diaclasi sature di radon, in contatto con le rocce di tipo porfiroide del basamento della grotta, sia l'attivazione di forti correnti aeree ad opera delle ingenti masse idriche in rapido movimento, con effetto, in ambedue i casi, di pistonaggio dell'aria delle predette cavità negli ambienti ipogei sovrastanti.

Il ritardo nella crescita di concentrazione di radon in aria rispetto all'aumento della portata può essere dovuto al tempo necessario perché si stabilisca equilibrio, nei vasti saloni che caratterizzano la grotta di Bossea, tra il radon mobilizzato e l'aria ambiente.

La fase graduale di decrescita delle concentrazioni di radon in aria ha l'aspetto di un ritorno all'equilibrio dell'atmosfera ipogea carica di radon con le acque del torrente.

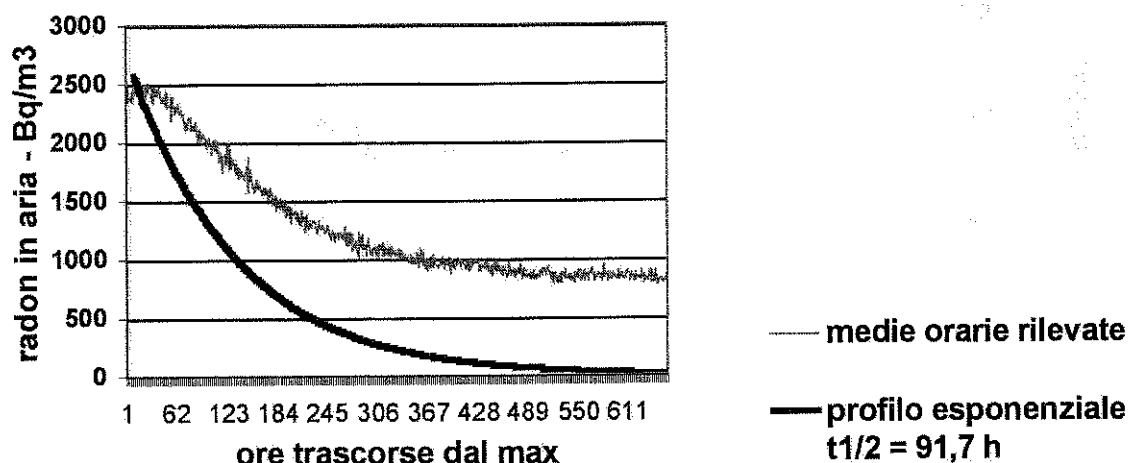


Fig. 10 - Il decadimento radioattivo non basta a spiegare la dinamica di decrescita del radon in aria, a seguito degli eventi di piena. Dati tratti da piena ottobre 2000.

### Le condizioni di magra spinta

Restano da considerare le condizioni di prolungata stabilità della portata del torrente su livelli minimi, in corrispondenza ai prolungati periodi di alta pressione estiva o invernale. In questi casi, caratterizzati da portate inferiori a 120 l/min, e corrispondenti all'estremità inferiore sinistra della distribuzione di punti di Fig.4, si osserva una sostanziale indipendenza della concentrazione di radon in aria dalla portata del torrente, peraltro soggetta a variazioni molto contenute. Tende invece ad emergere un'interessante effetto di stagionalità. Le concentrazioni di radon appaiono infatti più elevate durante i periodi prolungati di alta pressione estiva rispetto a quelli invernali. Questo fatto è descritto nel grafico di correlazione della Fig. 11 dallo sdoppiamento della distribuzione dei punti sperimentali, con il ramo inferiore relativo ai mesi invernali, e quello superiore relativo ai mesi estivi (cfr. anche Fig. 3).

In considerazione del tipo di circolazione aerea a "sacco d'aria" che, in base alle osservazioni finora effettuate, si ritiene presente nella maggior parte della grotta ed in particolare nei grandi saloni della zona inferiore (dove viene effettuata la misura), questi dati non possono trovare spiegazione nel ben noto "effetto camino", riportato da altri autori come causa determinante dei livelli di concentrazione del radon in grotta su scala stagionale, nelle cavità con circolazione a "tubo di vento".

In condizioni di circolazione a "sacco d'aria" la maggior concentrazione del radon nella stagione estiva si potrebbe spiegare con il posizionamento dello strumento di misura a livello del pavimento della cavità, atto ad intercettare la corrente d'aria fredda e pesante, e più ricca di radon, che dalle zone più interne della grotta fluisce in tale stagione verso l'esterno.

L'effettiva collocazione dell'apparecchio in un punto del laboratorio prossimo al soffitto dell'altissima Sala del Tempio, dove dovrebbe invece fluire, nella stagione estiva, una corrente aerea proveniente dall'esterno più povera di radon, induce a pensare alla presenza di altri fattori determinanti della situazione in oggetto, quale ad esempio un movimento d'aria locale indotto dalla temperatura più elevata dell'atmosfera del laboratorio rispetto all'ambiente di grotta, che potrebbe attirare, in tale stagione, aria più ricca di radon dalle zone più basse della cavità, tramite moti convettivi.

La prossima collocazione dell'apparecchio di misura in zona esterna al laboratorio potrà probabilmente chiarire, in futuro, la situazione.

Ancora in relazione alle dinamiche di trasporto diretto di masse d'aria tra l'interno e l'esterno della grotta, va osservato che in nessun caso è stato possibile evidenziare variazioni diurne di concentrazione di radon, neppure analizzando giorni medi su periodi prolungati di condizioni di stabilità.

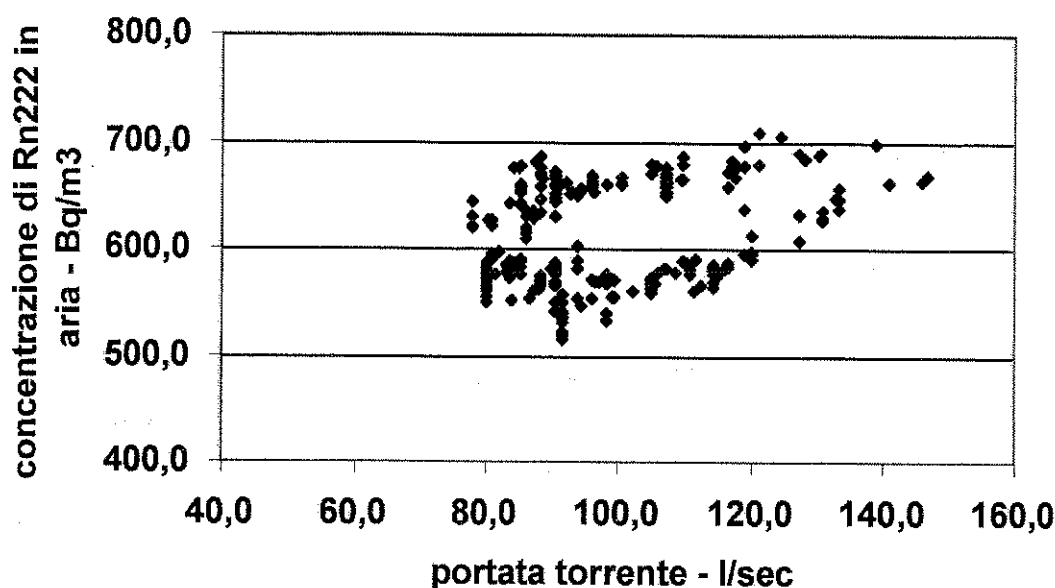


Fig. 11 - Variabilità stagionale dei livelli di concentrazione di radon nei periodi prolungati di bassa portata del torrente.

## CONCLUSIONI

La campagna di monitoraggio delle concentrazioni di radon nell'aria della Grotta di Bossea, condotta per un periodo di 22 mesi continuativi da marzo 1999 a dicembre 2000, unitamente al monitoraggio della portata del torrente sotterraneo e a misure ripetute di concentrazione di radon disciolto nelle acque della grotta, e in particolare del torrente, hanno portato ad una caratterizzazione dell'ambiente ipogeo di Bossea dal punto di vista delle dinamiche del radon.

Per questi aspetti, la Grotta di Bossea si presenta come un ambiente fortemente disaccoppiato rispetto all'esterno: gli effetti generati dalle condizioni meteorologiche esterne, che sono predominanti addirittura su scala giornaliera in altre grotte, qui non producono che influenze stagionali limitate, e solo in particolari condizioni.

In questo ambiente interno "separato" appare fondamentale il ruolo giocato dal sistema idrologico ipogeo, e in particolare dal torrente di Bossea. Le concentrazioni nelle acque del torrente sono modeste, e tendono a mantenersi in equilibrio con le concentrazioni di radon nell'aria ambiente, che assumono a loro volta valori non trascurabili.

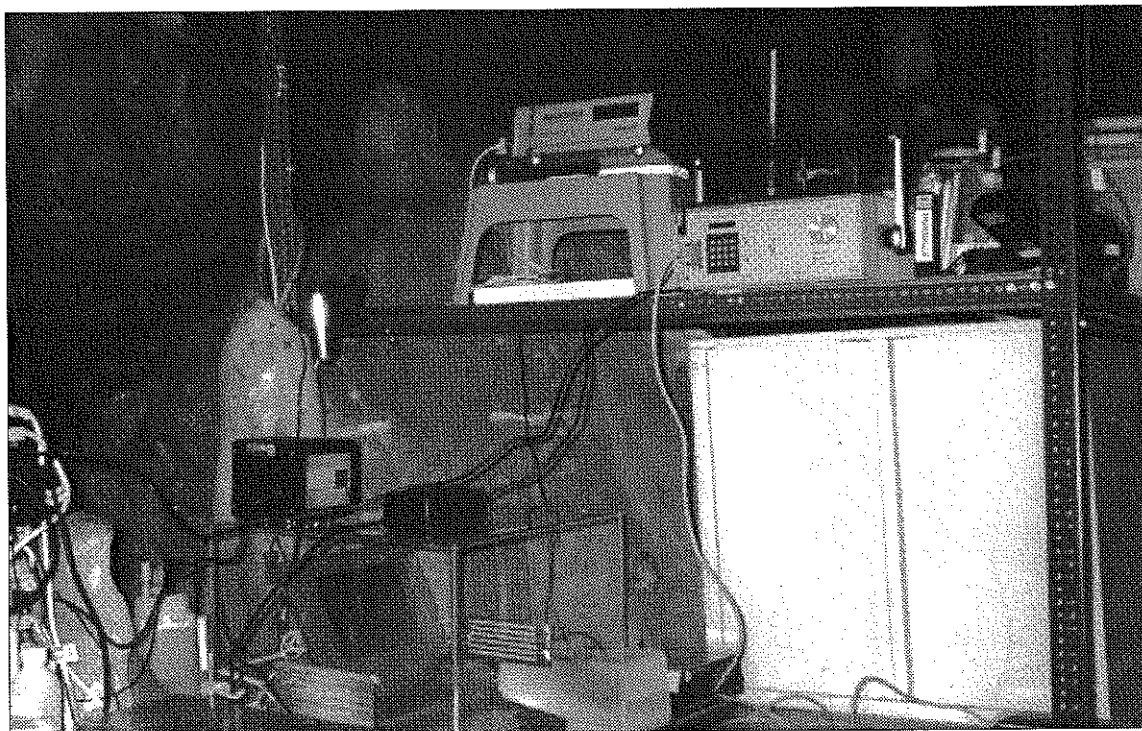
Gli eventi di piena improvvisi mobilitano elevate concentrazioni di radon presenti in cavità profonde della grotta, a contatto con le rocce del basamento porfirioide a maggior tenore di radioattività naturale, dando luogo ad importanti aumenti della concentrazione di radon nell'aria.

Questo fenomeno è probabilmente collegato con un effetto meccanico di spinta delle masse d'aria degli interstizi profondi da parte delle acque, o delle correnti aeree da queste attivate, verso l'esterno, costituito dalle grandi sale ipogee.

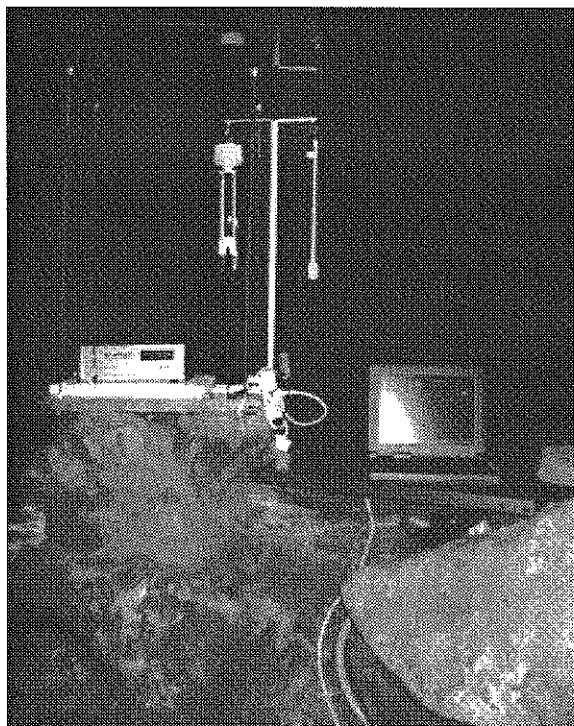
A conferma di queste tesi, occorrerà affiancare il monitoraggio in continuo delle concentrazioni di radon in aria, reso permanente, e il rilevamento in continuo della portata del torrente, con ulteriori rilievi sistematici di radon disciolto nelle acque.

## BIBLIOGRAFIA

- CIVITA M., GREGORETTI F., MORISI A., OLIVERO G., PEANO G., VIGNA B., VILLAVECCHIA E. & VITTONI F., 1991 - "Atti della Stazione Scientifica della Grotta di Bossea" Gruppo Spel. Alpi Marittime CAI Cuneo - Dip. Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino, Savigliano (1 - 136).
- PEANO G., VIGNA B., 1996 - "Le cavita' naturali come via privilegiata per lo studio delle acque sotterranee: i rilevamenti effettuati nella Stazione Scientifica della Grotta di Bossea" - Atti Simposio Internazionale Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale, 1995 (editi a cura della Stazione Scientifica di Bossea) (333 - 356).
- CIVITA M., PEANO G., VIGNA B., 1999 - "Primi risultati dello studio dell'insaturo carbonatico nel sistema di Bossea" - Atti del 3° Convegno Nazionale sulla Protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio, (Parma) - Quaderni di geologia applicata (1127 - 11379).
- G. AGNESOD E G. PEANO "Misure di concentrazione di radon 222 nell'atmosfera e nelle acque della Grotta di Bossea: prime acquisizioni", Atti del Simposio internazionale "Grotte turistiche e monitoraggio ambientale", Frabosa Soprana, editi a cura della Stazione Scientifica di Bossea, 1996, 183 - 192.
- F. BOCHICCHIO, G. CAMPOS VENUTI, C. NUCCETELLI, S. PIERMATTEI, S. RISICA, L. TOMMASINI E G. TORRI "Results of the representative italian national survey on radon indoors", Health Physics vol.71, n.5, novembre 1996, 741 - 748.
- G. PEANO "Il monitoraggio ambientale nella Grotta di Bossea: problemi tecnici e soluzioni adottate", Le Grotte d'Italia, 3, 2002, 75 - 86.
- L. TOMMASINO "Radon determination", Encyclopedia of analytical science, Academic Press, 4359 - 4368.
- F. TROTTI, N. GIAROLA, M. LANCIANI, P. MOZZO, F. PREDICATORI, M. ROSA E A. TACCONI "Misure di concentrazione di radon 222 in alcune grotte del Veneto", Atti del 1° Convegno Nazionale di Fisica dell'Ambiente, Brescia, 15-17 dicembre 1993, 359 - 366.

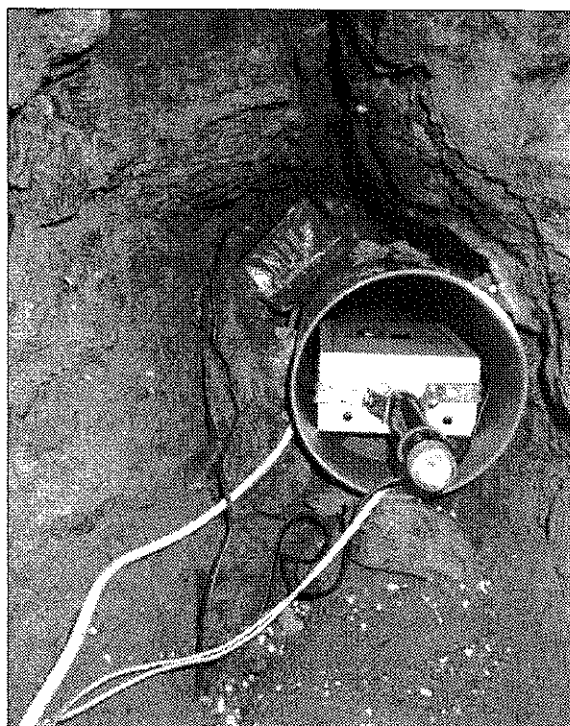


▲ Foto 1  
Rilevamento isocrono del  $^{222}\text{Rn}$  atmosferico, dei suoi prodotti di decadimento e delle caratteristiche del particolato atmosferico nella Grotta di Bossea, nel corso di un'indagine preliminare sulla diffusione e permanenza dei prodotti suddetti nell'atmosfera della cavità.



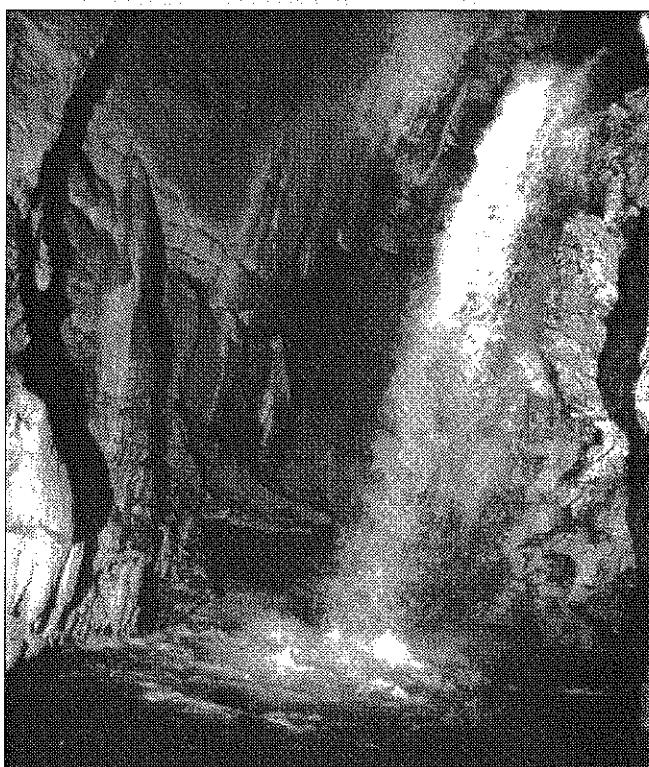
▲ Foto 2

La nuova stazione di misura del radon atmosferico installata presso il laboratorio principale, nell'anno 2004: il radon-Monitor AlphaGuard consente di affiancare al monitoraggio del  $^{222}\text{Rn}$  il rilevamento continuativo dei parametri atmosferici temperatura, pressione ed umidità relativa, controllati anche tramite misurazioni puntuali effettuate con strumentazione manuale di precisione.



▲ Foto 3

La recente installazione per il rilevamento della concentrazione del radon atmosferico entro le cavità confinate della formazione dei porfiroidi del basamento, in cui sono scavati fino in prossimità del soffitto i grandi saloni della parte inferiore della grotta. Un apparecchio portatile Sun Nuclear è stato collocato entro un'estesa frattura dell'ammasso roccioso, opportunamente allargata, per un breve tratto, per il contenimento dell'apparato di misurazione ed accuratamente tamponata verso l'esterno.



◀ Foto 4

Le forti variazioni della concentrazione atmosferica del radon nella Grotta di Bossea, sono strettamente legate alle oscillazioni di portata del collettore del sistema carsico. E' qui raffigurata la cascata del Lago di Ernestina, in situazione di magra del corso d'acqua ( $Q \sim 100 \text{ l/s}$ ), che può raggiungere nei massimi di piena una portata di circa  $1500 \text{ l/s}$ . Marcati aumenti della portata e della velocità delle acque correnti e precipiti mobilitano correnti aeree consistenti che diffondono in misura progressivamente crescente il radon emanato dai porfiroidi del basamento nell'atmosfera dell'intera cavità, con raggiungimento di concentrazioni assai più elevate rispetto ai valori di magra.