

Monitoraggio del radon atmosferico nella grotta di Bossea tramite dosimetri passivi

G.PEANO(*), E.VILLAVECCHIA(*), M. FAURE RAGANI(**), M.DUCOURTIL(**), G.AGNESOD(**),

E.CHIABERTO(°), E.SERENA(°), R.TRIPODI(°), A.PRANDSTATTER(°), M.MAGNONI(°)

*LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO DI BOSSEA - CLUB ALPINO ITALIANO

**ARPA VALLE D'AOSTA

°ARPA PIEMONTE - DIPARTIMENTO RADIAZIONI

RIASSUNTO

A partire dal 2012 si è intrapreso un monitoraggio del radon atmosferico all'interno della grotta di Bossea con l'utilizzo di dosimetri passivi a tracce. Come messo in evidenza da studi precedenti^[1,2,3,4] le fluttuazioni temporali della concentrazione all'interno della grotta dipendono fortemente dall'andamento delle piene e dalle portate del torrente collettore del sistema carsico. Alcuni studi erano stati condotti con monitori in continuo, che consentivano però la misurazione in un numero assai limitato di punti.

Con questo nuovo monitoraggio che prevede l'utilizzo di dosimetri passivi, si è potuto estendere il monitoraggio lungo tutto lo sviluppo della grotta. Le misure si protrarranno nel tempo e avranno una durata minima di un paio d'anni, con periodi di campionamento ravvicinati. In questo lavoro preliminare che conta al momento quattro periodi di misura è stato possibile avanzare solo alcune prime ipotesi sulle influenze che le caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche e litologiche della grotta hanno sulle concentrazioni del gas radon. La presenza di ampi volumi e restringimenti, cadute d'acqua, correnti d'aria e variazioni litologiche lungo il percorso possono, infatti, influire sulle variazioni spaziali e temporali del radon.

Allo scopo si è adottata una metodologia che mette in campo strumenti avanzati di indagine statistica (ANOVA *ANALYSIS OF VARIANCE*, *analisi di correlazione*, *cluster analysis*).

KEY WORDS: *Dosimetri passivi a tracce, radon, ANOVA*

INTRODUZIONE

La molteplicità dei fattori che intervengono nella regolazione della concentrazione atmosferica del radon nei differenti siti della grotta rende notevolmente complessa una precisa correlazione della stessa con i parametri ambientali del sistema carsico quali l'idrodinamica del collettore e delle percolazioni, la meteorologia, la litologia, la geomorfologia, la tettonica, la geometria e la volumetria. Lo scopo di questo lavoro è evidenziare il comportamento del gas radon lungo tutto lo sviluppo della grotta di Bossea utilizzando dosimetri passivi a tracce.

La disponibilità dei valori di concentrazione derivanti da una rete capillare di dosimetri potrà contribuire in modo forse determinante al conseguimento di una conoscenza esauriente

delle dinamiche del radon in tutta la grotta che sono già state individuate nelle grandi linee dalle ricerche pregresse, ma che necessitano ancora di approfondimenti, precisazioni e di sicure convalide. Al momento la modesta quantità dei dati finora acquisiti e la breve durata del rilevamento (di poco superiore ai nove mesi) non consentono una sicura correlazione con molti dei parametri ambientali in gioco, consentendo soltanto di avanzare alcune ipotesi. La futura disponibilità di rilevazioni dosimetriche più prolungate e di una quantità di dati molto maggiore, e la validazione delle correlazioni individuate tramite l'analisi statistica consentirà probabilmente in avvenire una conoscenza più completa della situazione.

Morfologia della grotta

La Grotta di Bossea costituisce la parte terminale di un sistema carsico molto esteso che veicola volumi idrici assai consistenti, lunga complessivamente quasi 3 km. È articolata in due differenti settori: un ramo principale, percorso dal torrente collettore del sistema carsico, esteso per circa 1500 metri, suddiviso in una zona inferiore costituita da una serie di giganteschi saloni posti in forte dislivello ascendente, e in una zona superiore, a sviluppo sub orizzontale, costituito essenzialmente da una lunga ed altissima forra (Canyon del torrente) e dal lago terminale (Lago Loser). Un esteso complesso di gallerie fossili, sovrasta il ramo attivo mentre all'estremità del lago terminale ha inizio la zona sommersa del sistema carsico, esplorata dagli speleo sub in modesta parte (250 metri di sviluppo x 54 di profondità), ma estesa probabilmente per qualche chilometro.

Geologia, litologia ed idrogeologia del sistema carsico di Bossea

Il sistema carsico che alimenta il collettore principale che scorre nella Grotta di Bossea (il Torrente Mora) ed i numerosi apporti secondari che confluiscono nel drenaggio principale (Polla delle Anatre, Polla dell'Orso, Polletta ecc.) è impostato nei litotipi appartenenti alla serie del Brianzonese Ligure (Vanossi, 1974). Tale successione è costituita da un basamento

metamorfico con meta-vulcaniti a grana minuta o a grossi cristalli di kfeldspato, localmente molto laminati (Permiano medio-Carbonifero sup.), quarziti e meta conglomerati dello Scitico – Permiano sup. e da una copertura carbonatica. Nella successione carbonatica si riconoscono alla base delle dolomie, calcari dolomitici e calcari del Trias medio, seguiti poi da calcari marmorei a grana grossolana, localmente micacei del Giurassico e da calcari arenacei molto scistosi del Cretaceo. I rapporti tra il basamento e la copertura carbonatica sono molto complessi: nella prima parte della grotta di Bossea si riconosce un'importante superficie di scollamento con le meta-vulcaniti altamente fratturate che vengono direttamente a contatto con i calcari-dolomitici triassici.

Nell'intera area di alimentazione del sistema di Bossea la successione carbonatica si trova, invece, a contatto con le rocce del basamento attraverso una serie di importanti faglie sub-verticali con direzione prevalente WNW-ESE che danno origine ad una serie di scaglie e zone altamente deformate. La struttura carbonatica principale è quindi costituita da una fascia con una larghezza media compresa tra 500 e 1000 m, confinata dalle meta-vulcaniti e dalle quarziti. Tale assetto strutturale condiziona pesantemente la circolazione idrica superficiale e sotterranea. Il reticolo idrografico dell'area è caratterizzato dalla presenza di una serie di piccoli corsi d'acqua che scorrono in valloni profondamente incassati con direzione prevalente verso NE. Le acque ruscellano sulle rocce a bassa permeabilità del basamento metamorfico e quando incontrano l'ammasso carbonatico vengono assorbite da una serie di inghiottitoi posti in prossimità dei principali contatti tettonici, dai quali le acque raggiungono il collettore di Bossea in tempi piuttosto rapidi compresi tra 24 e 120 ore. Nell'ambito dell'acquifero ipogeo la velocità del flusso idrico è compresa tra i 150 e i 1500 m/giorno per le circolazioni idriche impostate nei dreni principali, mentre nel reticolo delle fratture che caratterizzano gran parte dell'ammasso roccioso le velocità di flusso sono molto più ridotte, inferiori anche a 5 m/giorno. La portata del collettore, nell'ambito della grotta, può variare nel corso dell'anno da 50 a 1200 l/sec, fatta eccezione per qualche raro evento alluvionale in cui possono essere raggiunti 3000-4000 l/sec. La temperatura delle acque del torrente può variare, nel corso dell'anno fra 7,2 e 7,9°C (stazione idrometrica del Lago delle Anatre). La temperatura dell'acqua delle percolazioni è compresa fra 8,5 e 10°C.

Un'aliquota della circolazione idrica sotterranea interessa anche l'ammasso metamorfico ed in particolar modo le fasce cataclastiche impostate in corrispondenza dei contatti tettonici o delle superfici di scollamento tra le meta-vulcaniti e le rocce carbonatiche. Tali modalità di circolazione idrica sono anche ben visibili nella Grotta di Bossea: in corrispondenza del contatto basamento-copertura carbonatica sono presenti numerosi circuiti idrici, con portate in genere molto ridotte, che vanno ad alimentare i diversi apporti secondari (Polla delle Anatre, Polletta, Polla Orso, ecc.) che confluiscono poi nel collettore principale.

Meteorologia della grotta

La situazione meteorologica della grotta è regolata sostanzialmente del regime del torrente ed in misura molto più

modesta da quello delle percolazioni. All'aumento delle portate corrispondono in genere riduzioni delle temperature atmosferiche, ed incrementi del movimento dell'aria, dell'umidità relativa e della condensazione. I valori della temperatura dell'aria possono variare fra 7,6 e 9,2° C, a seconda dei siti di misura, con escursioni massime di 6-7 decimi di grado per un singolo sito. Il movimento dell'aria è assai lento, ma diffuso in tutta la grotta, con velocità abitualmente comprese fra i 6 ed i 45 cm/s, in rapporto alla portata del torrente ed alla morfologia della grotta. In vicinanza delle cascate possono essere tuttavia raggiunte velocità di 5-6 m/s o più ancora. La direzione del flusso aereo, da quanto finora risulta, subisce l'inversione stagionale, tipica delle grotte con un solo ingresso, solo nel corridoio iniziale, mentre, per l'effetto di trascinarsi da parte del torrente, appare costantemente orientata verso l'esterno a livello del pavimento e verso l'interno a livello del soffitto.

L'umidità relativa generalmente è intorno al 97- 98 %, ma in alcune zone della grotta, in particolari situazioni di piena del torrente o di forte stillicidio, può raggiungere la saturazione. L'evapocondensazione annovera alternanze dei due contrastanti processi nelle zone più prossime al torrente ed evaporazione costante in quelle più lontane e meno soggette all'influenza delle acque correnti. Nella zona turistica della grotta tutti i parametri meteorologici sono però influenzati, almeno temporaneamente, dal calore prodotto dall'accensione dei fari.

Le conoscenze attuali sul radon nella grotta di Bossea

Il radon nelle grotte di Bossea è studiato già a partire dagli anni 90. Una prima campagna di misura fu compiuta nel 94-95 con l'utilizzo di dosimetri passivi. Da tale studio^[1] risultò che le concentrazioni erano piuttosto omogenee all'interno della grotta con valori più elevati nella parte centrale. Successivamente sono proseguite misure in continuo, prima in aria e poi in acqua, che hanno messo in evidenza la correlazione tra le fluttuazioni temporali della concentrazione radon, all'interno della grotta, con l'andamento delle piene e dalle portate del torrente collettore del sistema carsico^[2,3,4]. Gli studi condotti finora, con monitori in continuo, hanno, di fatto, consentito valutazioni approfondite che rimarcano importanti legami con le caratteristiche ambientali del sistema grotta. Tali studi evidenziano la necessità di approfondire eventuali peculiarità e specifiche correlazioni tra il radon e i diversi micro ambienti che si incontrano nelle profondità in cui si sviluppa la grotta.

Gli studi fin'ora effettuati portano a ritenere che la concentrazione atmosferica del gas è ascrivibile a due fenomeni concomitanti: l'emissione dai porfiroidi cataclastici che delimitano praticamente fino al soffitto calcareo tutta la parte inferiore della grotta e il trasporto ed il trasferimento all'atmosfera da parte delle acque del torrente collettore e delle percolazioni, che si arricchiscono di radon durante il prolungato contatto con le meta vulcaniti (soprattutto porfiroidi) in zone di deflusso situate a monte della grotta.

Mentre nella maggior parte dell'anno i due fenomeni di apporto di radon nell'atmosfera della grotta sembrano

bilanciarsi, nel periodo primaverile (marzo-maggio) e talora in un breve periodo di piena autunnale, con gli ingenti incrementi di portata che spesso si verificano (figura 1), i dati finora acquisiti sembrano indicare una netta prevalenza del trasferimento dalle acque anche nella parte inferiore della grotta, dove, di riflesso, viene incrementata, ad opera del pistonaggio delle acque invadenti, e delle correnti aeree da esse originate, anche l'emissione del radon dalle fratture e dalle discontinuità dei porfiroidi cataclastici. Non è al momento dato di sapere in quali proporzioni si bilancino di volta in volta gli apporti delle due fonti d'origine. A riguardo il grafico di figura 2 mostra, inoltre, la continua diminuzione del radon in acqua che progressivamente si libera in atmosfera.

della grotta. Ciò è imputabile alla volumetria che è molto maggiore nei giganteschi saloni della parte inferiore della cavità, rispetto alle forre ed alle gallerie della zona superiore.

Nella zona inferiore della grotta sono inoltre presenti circolazioni di aria che mescolano l'atmosfera interna con quella esterna e consentono una maggior diluizione del radon. La sua concentrazione diminuisce in ogni caso con la progressiva lontananza dalle sue fonti di origine.

L'effetto della diffusione del radon e della sua dispersione ad opera, anche, di deboli correnti aeree, non appare da sottovalutarsi ove si considerino le fortissime differenze della sua concentrazione atmosferica misurate ad esempio in due punti contigui della Sala del tempo, ubicati rispettivamente

Grotta di Bossea 01.01.2010--30.06.2010: Concentrazione Radon in atmosfera e Portata torrente

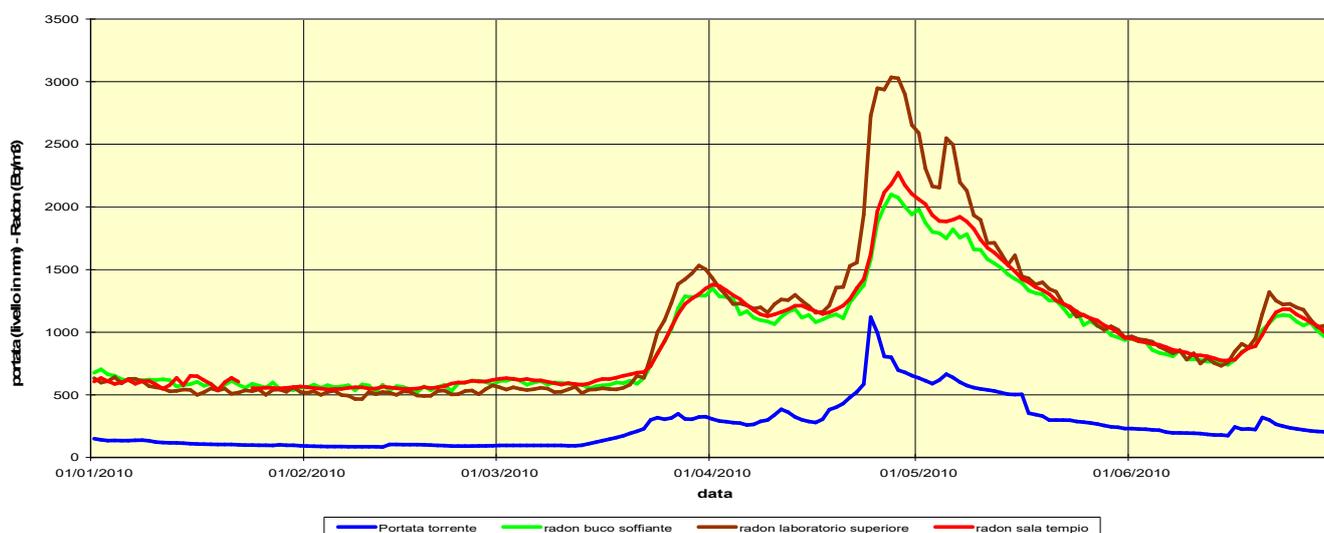


Fig. 1 – Concentrazione del radon in atmosfera misurate in continuo in diverse zona della grotta e portata del torrente

entro una frattura completamente racchiusa fra i porfiroidi (Buco del radon) ed immediatamente al suo esterno, espresse mediamente da un rapporto 9/1.

Come risulta dai rilevamenti in continuo la concentrazione media del radon è quasi sempre minore nella zone inferiore

Grotta di Bossea: Concentrazione idrica del radon nel collettore in funzione della quota interna Anno 2006

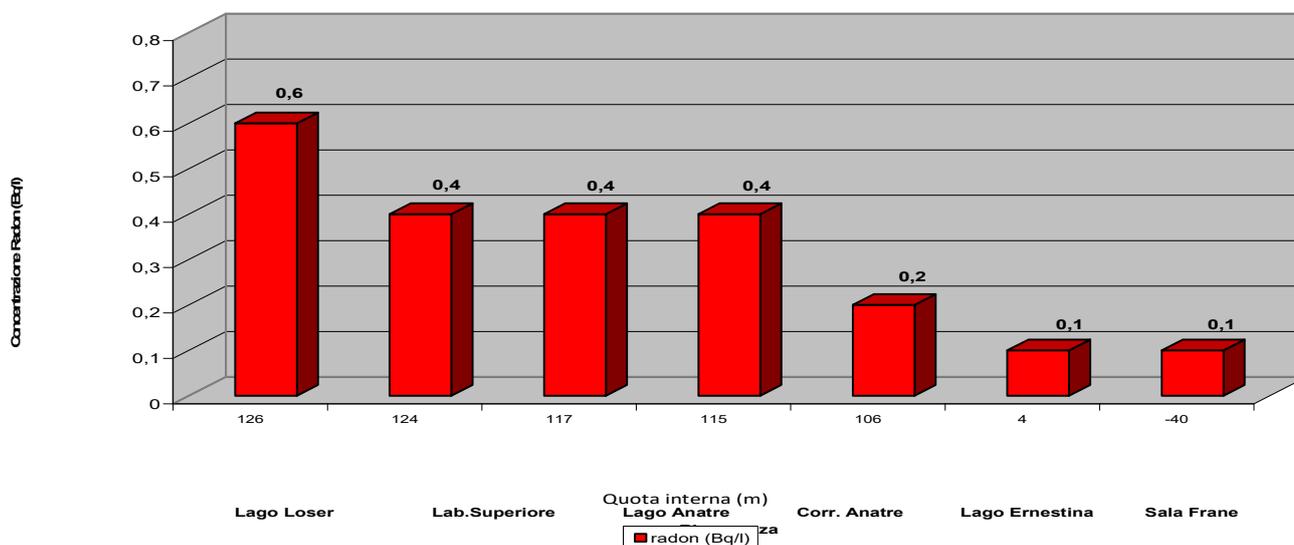


Fig. 2 – Concentrazione del radon nell'acqua misurata in diversi punti della grotta.

MATERIALI E METODI

Con l’obiettivo di misurare in grotta il radon in modo esteso e non disponendo di un numero elevato di strumenti attivi che in ogni caso comportano elevati costi di gestione, si è scelto di utilizzare dosimetri passivi a traccia, a vantaggio di un numero più elevato di punti di misura. I dosimetri scelti (figura 3) sono particolarmente adatti all’utilizzo in ambiente ipogeo perché non risentono dell’elevato tasso di umidità presente nella grotta. Il rivelatore interno al dosimetro è, infatti, racchiuso in un sacchetto di polietilene permeabile al radon, ma che non lascia passare l’umidità e rende il dispositivo immune alle condizioni ambientali durante il periodo di esposizione.



Fig. 3 – Dosimetri passivi a tracce con rivelatori LR115 (a sinistra) e CR39 (a destra)

Tabella 1 – Punti in cui sono stati posizionati i dosimetri passivi a tracce

Punti di misura	
punto di misura	sito
1	Sala frane cascata
2	Sala tempio
3	Sala Milano centr.
4	Term. Sala Garelli
5	Torre sella
6	Lago Ernestina
7	Polla anatre
8	Lago anatre
9	Griglia captazione
10	Laboratorio superiore
11	Sifone Lago Loser
Ulteriori punti in fase di valutazione	
Idrometrografo	
Buco soffiante S.G.	
Sala Milano canalino	
Buco porfiroidi esterno	

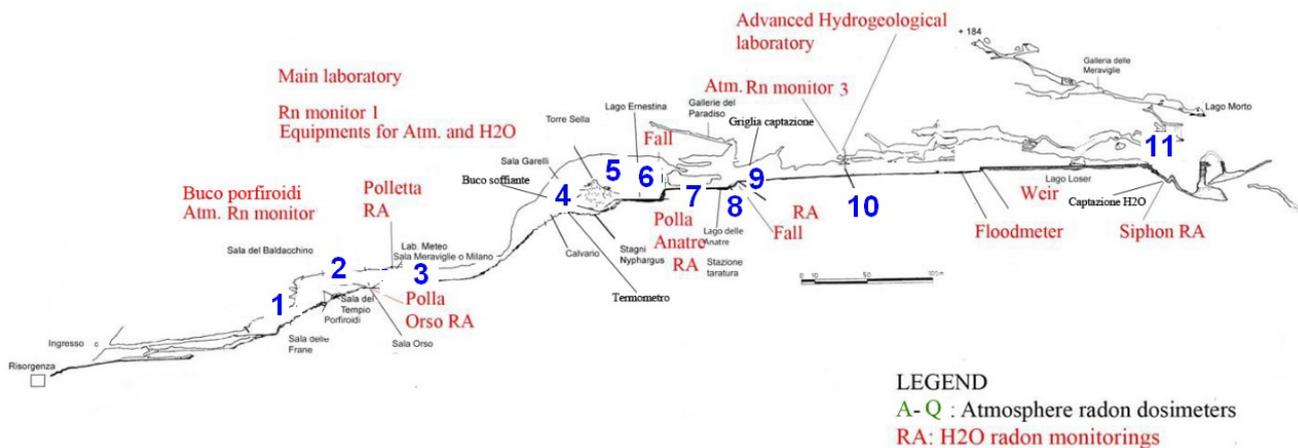


Fig. 4 – Siti di misura e profilo della grotta di Bossea

Per seguire l’andamento temporale del radon in ogni sito, si è scelto di suddividere il tempo in periodi di misura di pochi mesi (2-3 mesi). Al termine del monitoraggio la cui durata si prevede di almeno due o più anni, si disporrà di un numero sempre crescente di misure che mostreranno l’andamento del radon in funzione di due variabili: il tempo e lo spazio.

Il numero di siti scelti è al momento di undici, come mostrato in tabella 1 e in figura 4, anche se potrà essere utile infittire il monitoraggio con nuovi siti, per una miglior comprensione delle dinamiche del radon in grotta .

Una volta raccolti i dati delle concentrazioni di radon degli undici siti sui quattro periodi si ottiene una matrice di 11 punti spaziali per 4 periodi temporali su cui effettuare una serie di analisi statistiche. Una prima analisi di tipo ANOVA (*ANalysis Of VAriance*) è utile per confrontare la variabilità della concentrazione di radon al cambiare dei siti all’interno dei periodi con la variabilità del radon al cambiare dei periodi all’interno dei siti. Una seconda analisi di *correlazione* serve per verificare eventuali correlazioni tra gli andamenti temporali delle concentrazioni di radon nei diversi siti. Una terza analisi effettuata è la *cluster analysis* che ha permesso la creazione di alcuni raggruppamenti di siti “omogenei”, cioè di siti in cui la

concentrazione di radon ha un andamento temporale simile.

Con gli strumenti di analisi statistica utilizzati si potrà disporre di indicazioni utili a cercare con maggior rigore la specificità morfologica, geologica e litologica che porta all'evidenza delle relazioni tra il sito e la concentrazione di radon.

Questo tipo di approccio viene incontro alla difficoltà di formulare ipotetici legami tra le caratteristiche dei microambienti e le misure del radon, che come già detto in precedenza varia di poco da una posizione all'altra. L'indagine statistica ha il potere di accettare o rifiutare determinate ipotesi di correlazione ad un prestabilito livello di confidenza ed inoltre essa si irrobustisce all'aumentare della numerosità dei dati raccolti.

ANALISI DEI RISULTATI

Risultati e prime ipotesi qualitative

Al momento attuale per l'analisi si dispone di quattro periodi di misura, durante i quali sono state registrate le concentrazioni medie riportate in tabella 2. Come si può notare da subito, osservando i dati, le concentrazioni all'interno di ogni periodo sono piuttosto omogenee, mentre variano da periodo a periodo. La diversità stagionale è sicuramente attribuibile alle diverse condizioni di portata del torrente carsico, come mostrato in precedenti lavori [1,2,3,4].

Tabella 2 – Concentrazioni radon per siti e periodi di misura (l'incertezza di misura ad un livello di confidenza del 68% è pari a 20%)

pto	sito	1° periodo	2° periodo	3° periodo	4° periodo
		18/8/12 19/9/12 Bq/m ³	12/10/12 28/12/12 Bq/m ³	28/12/12 8/3/13 Bq/m ³	8/3/13 30/5/13 Bq/m ³
1	Sala frane cascata	778	636	636	1253
2	Sala tempio	833	704	611	1211
3	Sala Milano centrale	813	793	589	1215
4	Term. Sala Garelli	730	731	577	1255
5	Torre sella	726	732	557	1255
6	Lago Ernestina	742	761	596	1248
7	Polla anatre	835	876	673	1755
8	Lago anatre	797	822	643	1772
9	Griglia captazione	737	843	599	1647
10	Laboratorio superiore	830	755	560	1521
11	Sifone Lago Loser	750	743	559	1391

Diversa e più complessa è invece l'interpretazione dei dati dal punto di vista spaziale. Come si può osservare in figura 5 è difficile, in prima battuta, dalla semplice osservazione dei valori di concentrazione radon, definire delle correlazioni con la morfologia e litologia della grotta.

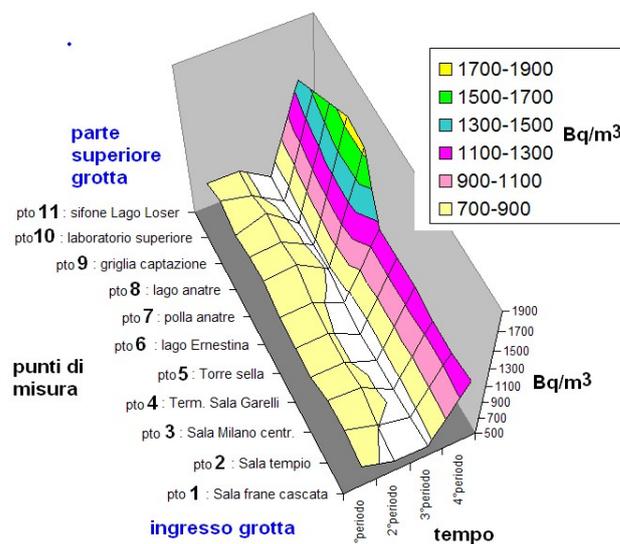


Fig. 5 – Andamento spazio-temporale della concentrazione radon lungo la sezione longitudinale nella Grotta di Bossea

Le differenze riscontrate tra le concentrazioni di radon da punto a punto lungo lo svilupparsi della grotta sono, infatti, piccole e confrontabili con l'incertezza di misura che si attesta al 20% ad un livello di confidenza del 68%.

Dal quadro sia pur limitato dei dati finora acquisiti tramite l'impiego dei dosimetri emergono già alcune evidenze meritevoli di enunciazione, che permettono di formulare le prime ipotesi interpretative.

Un'ipotesi è che la liberazione progressiva del radon dall'acqua all'atmosfera sia il fenomeno dominante che influenza le variazioni del radon misurate. Durante il 4° periodo (8/3 – 30/5/2013), caratterizzato da alte portate e da eventi di piena, si notano concentrazioni più elevate nei siti dove si verificano i primi importanti rimescolamenti delle acque del torrente, rispetto a quelle rilevate nei siti della zona inferiore.

Ci si attende, quindi, che l'analisi statistica fornisca in futuro un'ulteriore conferma dello stretto collegamento tra il forte incremento della concentrazione del radon in tutta la grotta e il trasferimento dall'acqua all'atmosfera.

I massimi valori misurati si sono poi verificati tendenzialmente sempre negli stessi tre siti (Polla Anatre, Lago Anatre e Griglia captazioni), situati in relativa vicinanza fra loro in un tratto della zona superiore della grotta caratterizzato da una volumetria ancora notevolmente ristretta. Anche se le differenze di concentrazione nei confronti dei restanti siti nel secondo e nel terzo periodo di misurazione sono alquanto ridotte, tuttavia colpisce la ripetitività della situazione segnalata che, ove fosse confermata dai rilevamenti futuri e dall'analisi statistica, convaliderebbe l'ipotesi già formulata che un grande trasferimento di radon dalle acque all'atmosfera nella zona della grotta compresa fra il laboratorio superiore e la cascata del Lago di Ernestina, che in concomitanza con una volumetria

ambientale ancora piuttosto ridotta determinerebbe la presenza di concentrazioni atmosferiche più elevate.

In aiuto alla formulazione delle suddette ipotesi si hanno in figura 1 e 2 i grafici forniti da alcuni cicli di misurazioni atmosferiche in continuo, effettuate negli anni passati rispettivamente nel laboratorio superiore e all'interno del Buco soffiante (in Sala Garelli) e le serie di misurazioni della concentrazione idrica del radon in diversi punti del torrente.

Analisi statistica

Come prima analisi statistica è stata condotta l'ANOVA (*ANalysis Of VAriance*) ad un fattore, considerando che le misure non sono indipendenti, in quanto ripetute negli stessi siti. L'analisi è stata eseguita raggruppando i dati prima per periodo di esposizione e successivamente per sito, ponendo un livello di confidenza pari a 5%, con l'ipotesi nulla equivalente ad una non significativa differenza tra le medie dei gruppi. Lo studio serve per verificare se il periodo e/o il sito influenzano la concentrazione di radon, andando a studiare quale componente della variabilità totale riescono a spiegare i due fattori (sito e periodo). La prima indicazione risultata dall'analisi conferma che, con ottima certezza, almeno una media delle concentrazioni sui periodi differisce significativamente da quella degli altri periodi (Test di Fischer: $\Pr(>F)=10^{-16}$) e, con debole certezza, almeno una media per sito è significativamente diversa da quella degli altri siti ($\Pr(>F)=0,0423$).

Come seconda elaborazione statistica dei dati è stata condotta un'analisi di correlazione costruendo il correlogramma tra tutti i punti monitorati rispetto alla variabile concentrazione radon. Il correlogramma, mediante diagrammi a torta, evidenzia con il grado di colorazione il valore dell'indice r di correlazione ($r=1$ - massima correlazione - equivale ad una torta completamente colorata, mentre $r=0$ - assenza di correlazione - equivale ad una torta senza colore). L'elaborazione ha restituito il grafico riportato in figura 5 da cui si apprezza una reciproca influenza tra le concentrazioni di radon tra i punti vicini, in particolar modo tra quelli posti nella parte centrale della grotta. Tale correlazione non è, invece, evidente tra i punti vicini all'ingresso della grotta e i restanti punti più interni.

Analizzando i diagrammi in figura 6 che riportano le diverse concentrazioni di radon, per ciascun sito di misura, al variare del periodo, risulta verosimile ipotizzare una correlazione tra le concentrazioni di radon e i periodi di misura, influenzati dalle diverse condizioni climatiche stagionali. Meno evidente è, invece, una eventuale correlazione tra le concentrazioni e i siti, al variare del periodo di misura, come si deduce dalla figura 7.

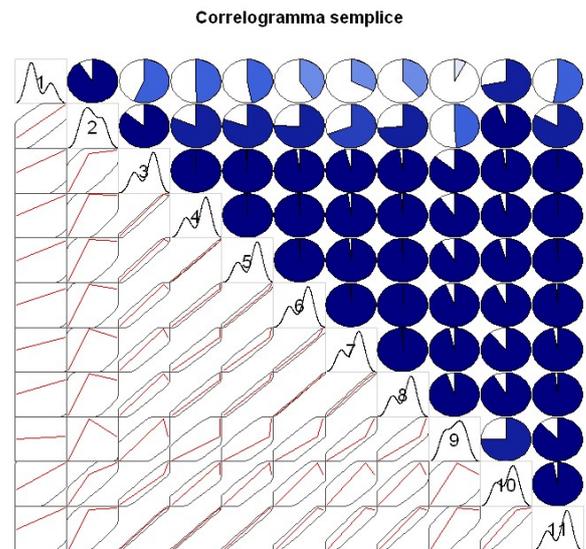


Fig. 5 – Correlogramma tra gli andamenti delle concentrazioni di radon nei diversi siti (l'indice di correlazione $r=1$ implica la torta completamente colorata; $r=0$ implica una torta bianca). Vengono anche riportati i diagrammi di dispersione e lungo la diagonale la stima della funzione di densità di probabilità.

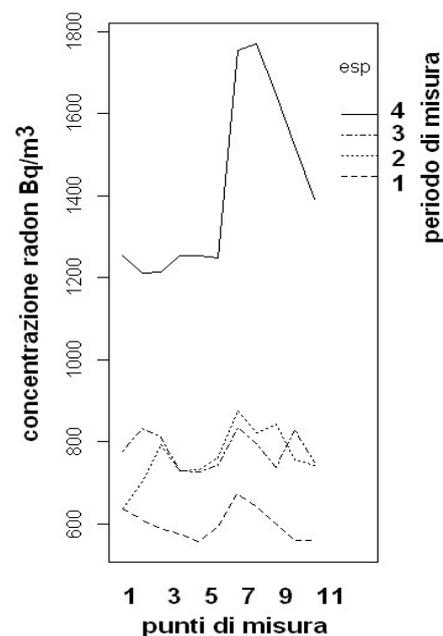


Fig. 6 – Concentrazioni per sito al variare del periodo

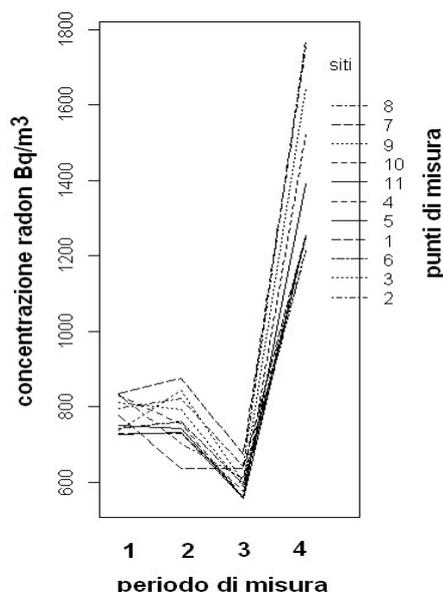


Fig. 7 – Concentrazioni di radon per ogni sito al variare del periodo di misura

In una fase successiva si è utilizzato una tecnica multivariata, la *cluster analysis*, che permette di organizzare i siti in gruppi in cui le concentrazioni di radon hanno un comportamento simile. Le tecniche di *clustering* si basano su misure relative alla somiglianza tra gli elementi concepite in termini di “distanza” in uno spazio multidimensionale.

In questa prima fase dello studio si è scelta una definizione

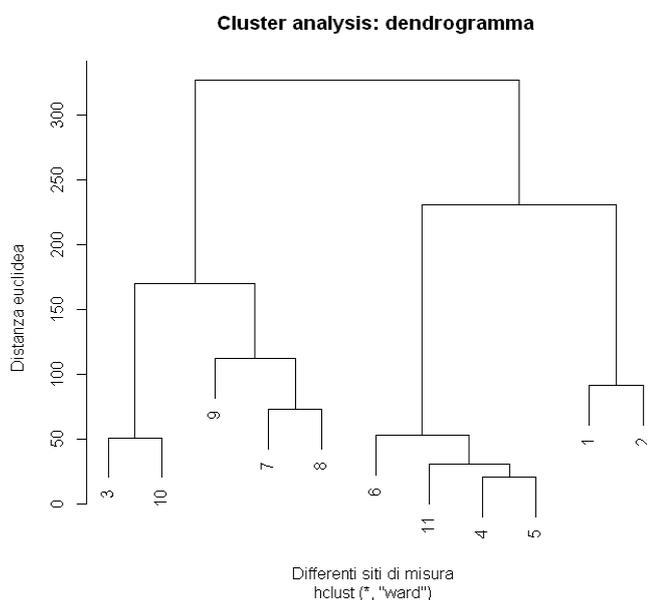


Fig. 8 – Dendrogramma: indica la forza delle relazioni esistenti tra i siti in base alla distanza che intercorre tra l'origine e la linea orizzontale più vicina che connette le linee verticali corrispondenti ai due elementi considerati.

euclidea di distanza e per il raggruppamento si è adottato il criterio di Ward basato sulla minimizzazione delle varianze.

Dall'analisi dei possibili raggruppamenti tra siti si evidenziano (figura 8) alcune similitudini tra i punti 1 e 2 che tendono a fare gruppo a sé, probabilmente per la vicinanza all'ingresso. I punti 4 e 5 con l'11 e il 6 formano un gruppo, mentre i punti 7,8,9 sono simili per vicinanza. I siti 3 e 10, benché lontani, hanno un comportamento simile.

CONCLUSIONI

Dall'analisi dei dati al momento disponibili si può apprezzare dal punto di vista statistico un'evidente legame tra le concentrazioni di radon ed i periodi di misura. Una relazione ancorché meno significativa può essere individuata anche tra siti diversi di misura. Per confermare tale risultato sarà necessaria l'acquisizione di un numero maggiore di dati. Tuttavia è plausibile credere che gli effetti sul radon dovuti agli aspetti morfologici e litologici saranno messi in evidenza con il prosieguo dei monitoraggi grazie ai quali si indagherà l'importanza dei molteplici aspetti alla base delle dinamiche del radon nella grotta di Bossea: le variazioni di volume e i restringimenti, le correnti d'aria e i soffioni, la presenza di porfiroidi piuttosto che la prevalenza di calcari, sifoni e cascate che liberano in maggior quantità il radon disciolto in acqua e altre caratteristiche morfologiche e geo-litologiche.

OPERE CITATE

1. AGNESOD G. & PEANO G. (1996) – *Misure di concentrazione del radon 222 nell'atmosfera e nelle acque della Grotta di Bossea: prime acquisizioni*. Proceedings of Symposium – Show caves and environmental monitoring. Scientific Station of Bossea;
2. AGNESOD G., PEANO G. & VILLAVECCHIA E. (2003) – *Concentrazione atmosferica di radon 222 nella Grotta di Bossea e relazioni con il regime dei flussi idrici interni*. Proceedings of Symposium – Karst environment and man-Scientific Station of Bossea;
3. PEANO R.G., PEANO G., VIGNA B. & VILLAVECCHIA E. (2005) – *Concentrazione atmosferica di radon 222 nella Grotta di Bossea*. Proceedings of Symposium – Karst environment : research in Italy at the beginning of the 21st century - Scientific Station of Bossea;
4. PEANO G., VIGNA B., VILLAVECCHIA V., & AGNESOD G. (2011) - *Radonexchange dynamics in a karst system investigated by radon continuous measurements in water: first results*. Radiation Protection dosimetry Vol145, No2-3,pp173-177.