

Determinazione del livello di radon nella grotta della Zinzulusa, Castro (LE)

Alessandro Buccolieri¹, Francesco Adduci², Giovanni Buccolieri^{1,*},
Alfredo Castellano¹, Nini Ciccicarese³, Vincenzo Nassisi⁴

¹ Università del Salento, Dipartimento di Scienza dei Materiali, via Monteroni, Lecce

² Università di Bari, Dipartimento di Fisica, via Amendola, Bari

³ Gruppo Speleologico Talentino, Maglie (LE)

⁴ Università del Salento, Dipartimento di Fisica, Laboratorio di Elettronica Applicata e Strumentazione, via per Arnesano, Lecce

Abstract

In questo lavoro sono riportati i risultati sperimentali delle determinazioni di radon in acqua e in aria effettuate nella grotta della Zinzulusa (Castro, Lecce). Tale campagna di misura ha consentito di valutare i livelli di questo importante gas radioattivo in un famoso e suggestivo luogo turistico del Salento. I dati ottenuti, per la prima volta nella grotta, possono essere confrontati con i valori delle normative vigenti in materia di sicurezza sul posto di lavoro. Questo risultato è di basilare importanza per la salute dei turisti, delle guide e di tutti coloro che operano nella grotta.

INTRODUZIONE

Grotta della Zinzulusa

La maestosa volta della grotta della Zinzulusa si apre nel territorio di Castro Marina (Lecce, Italia), lungo le coste del Canale d'Otranto, là dove la costa si fa alta e profondamente incisa da ampie falesie. Essa rappresenta una delle più spettacolari grotte carsiche del Mediterraneo, censita nel Catasto delle grotte al Pu 107, latitudine N: 40° 00' 41", longitudine E: 18° 25' 49".

Essa, originata a seguito dei fenomeni di erosione marina che interessarono l'intera Penisola Salentina durante il Pliocene (Tirreniano) e della successiva intensa attività carsica, ancora oggi conserva al suo interno le tracce delle remote frequentazioni di animali e uomini preistorici.

Attualmente, l'ambiente di grotta Zinzulusa s'impone all'attenzione in quanto grotta turistica di grande attrazione (aperta al pubblico fin dagli anni 50) e per la presenza, al suo interno, di un gran numero di specie animali, molte delle quali di rilevante interesse scien-

tifico. La grotta riceve più di cento mila visitatori l'anno e la gestione è a cura dell'Amministrazione Comunale di Castro).

Attualmente, l'ingresso in grotta Zinzulusa avviene mediante una passerella, scavata nella roccia, che costeggia il mare, al di sotto della imponente volta ad arco (larga più di 80 metri e alta più di 40 metri) che costituisce l'avangrotta marina.

Dall'alto, simili a enormi stracci appesi, pendono sul mare fitti fasci di stalattiti. Da questi ultimi sembrerebbe derivare il nome "Zinzulusa", cioè "stracciona" nel dialetto locale.

Il percorso turistico interno si sviluppa per circa 150 metri, con poche brevi diramazioni, non percorribili dai visitatori. La prima parte del corridoio principale attraversa calcari dell'Eocene e la parte più profonda si sviluppa nei calcari del Cretaceo.

Sono da segnalare tre affioramenti interni della falda acquifera: i laghetti Conca e Cocito e la zona "paludosa" dello Stige (Figura 1).

Fu esplorata e segnalata per la prima volta nel 1793 da Monsignor Francesco Antonio Duca, ultimo vescovo di Castro, Matematico e Fisico, membro corrispondente dell'Accademia di Francia e della Reale Accademia di Napoli [1].

Il Monsignore cercò di richiamare l'attenzione di Ferdinando IV, di Borbone (Re di Napoli e delle due Sicilie) sulla grotta Zinzulusa che riteneva potesse essere un antichissimo tempio dedicato alla Dea Minerva.

Fino ai primi anni del 900, esplorazioni, citazioni e descrizioni più o meno dettagliate, si devono a T. Monticelli (1807), G. Brocchi (1821), U. Botti (1870-1874), C. De Giorgi (1874) e A. Perotti (1904).

Molto più tardi, a partire dal 1922 e sino al 1958, la grotta è stata oggetto di numerose visite ed esplorazioni a cui seguirono pubblicazioni scientifiche riguardanti i diversi aspetti, storici, geologici, etnologici e biologici (Bottazzi 1924, De Lorentiis 1924, Müller 1938, Parenzan 1938, Stammer 1938, Lazzari

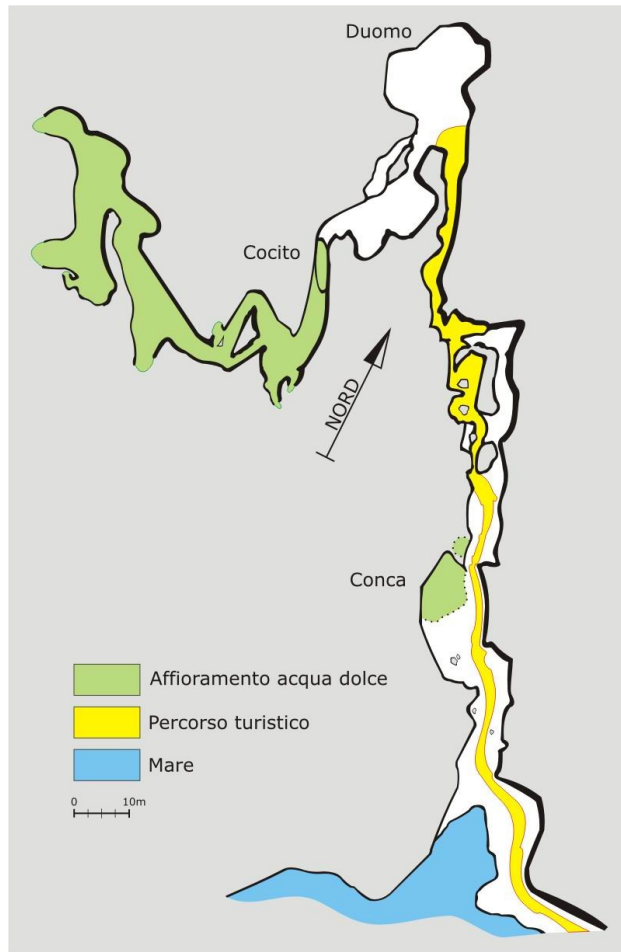


Fig. 1. Planimetria della grotta

1947, Ruffo 1947-1958, Anelli 1951, Pasa 1953, Cardini 1958, Blanc 1958).

Dati ambientali e geologici furono raccolti e pubblicati da F. Bottazzi, P. Parenzan e A. Lazzari.

A Ruffo, si deve, tra l'altro, la prima organica e ancora attuale trattazione della fauna, sia terrestre che acquatica, della grotta (*Spelaeomysis bottazzii*, *Typhlocaris salentina*, *Hadzia minuta*, *Monodella stygicola*, *Mixtacandona stammeri*, *Nitocrella stammeri*, *Esola spelaea*, *Psyllocamptus monacus*, *Metacyclops subdolos*, *Metacyclops stammeri*), di antichissima origine (paleomediterranea) ed endemiche per la Zinzulusa o per la penisola Salentina.

Infine, nella primavera 1996, durante un'apposita campagna di esplorazione speleosubacquea, sono stati scoperti nuovi percorsi completamente sommersi, oltre il bacino del Cocito. Inoltre, sono stati scoperti nella grotta anellidi policheti, l'anfipode *Salentinella gracillima*, il misidaceo *Stygiomysis hydruntina*, il copepode *Nitocra reducta* e, dato ancora più sorprendente, una nuova spugna troglobia *Higginsia*

ciccaresei (Pansini e Pesce, 1998). Questi ultimi dati, oltre al loro indubbio valore scientifico, confermano l'eccezionale diversità biologica della grotta Zinzulusa.

La grotta rimane aperta al pubblico, mare permettendo, tutti i giorni dell'anno. La visita turistica alla parte interna della grotta viene effettuata con l'accompagnamento di guide e dura circa 15 minuti, oltre l'eventuale attesa.

Radon

Il radon rappresenta un'importante fonte d'inquinamento radioattivo dell'ambiente e, pertanto, esso è stato oggetto, specie negli ultimi lustri, di numerosi e importanti studi volti ad indagare le cause e le modalità di diffusione di questo elemento per l'organismo umano [2, 3].

Il radon è un gas radioattivo scoperto all'inizio del 1900. Durante i primi studi, fu notato che emanazioni gassose radioattive erano associate a diversi elementi radioattivi. Il gas associato all'uranio e al radio fu chiamato radon. Successivamente il termine radon fu utilizzato per indicare l'elemento chimico che, nella tavola periodica è rappresentato dal simbolo Rn con numero atomico 86.

Il radon, gas nobile, incolore, inodore e chimicamente inerte, è solubile in acqua e, quindi, può essere assorbito da quest'ultima sia in falda che in superficie. La sua solubilità dipende dalla temperatura dell'acqua: un aumento della temperatura provoca una diminuzione della sua solubilità.

Confrontato agli altri gas nobili, il radon è il più pesante e ha il più alto punto di fusione, di ebollizione, più alti valori di temperatura critica e di pressione critica.

Gli isotopi del radon conosciuti sono 26, ma di questi solo tre risultano apprezzabilmente abbondanti in natura:

- ^{222}Rn (radon)
- ^{220}Rn (toron)
- ^{219}Rn (actinon)

Il ^{222}Rn appartiene alla serie di decadimento dell' ^{238}U , il ^{220}Rn alla serie del torio (^{232}Th) e il ^{219}Rn alla serie dell' ^{235}U .

Di questi tre isotopi, solo il ^{222}Rn ha un tempo di dimezzamento sufficientemente lungo (3.82 giorni) da consentirne il rilascio dal suolo e dalle rocce, dove si è generato. La brevità del tempo di dimezzamento consente il suo trasporto solo a brevi distanze dal punto di formazione per pura diffusione. Alternativa-

mente il radon fuoriuscito dalla roccia, per convenzione, può essere trasportato a molti metri sia nell'aria esterna che negli ambienti interni.

Il ^{220}Rn che raggiunge l'atmosfera è in quantità minore del ^{222}Rn a causa del suo breve tempo di dimezzamento (55.6 sec) che limita la distanza che può percorrere prima del decadimento. Anche il contributo del ^{219}Rn può essere ignorato interamente a causa del suo breve tempo di dimezzamento (3.96 sec).

Il radon viene generato continuamente da alcune rocce della crosta terrestre e in modo particolare da lave, tufi, pozzolane, alcuni graniti, ecc.. Sebbene sia lecito immaginare che le concentrazioni di radon siano maggiori nei materiali di origine vulcanica spesso si riscontrano elevati tenori di radionuclidi anche nelle rocce sedimentarie come marmi e simili.

Come gas disciolto viene veicolato anche a grandi distanze dal luogo di formazione ove sia presente nelle falde acquifere. Infine è nota la sua presenza in alcuni materiali da costruzione. In spazi aperti, è diluito dalle correnti d'aria e raggiunge solo basse concentrazioni. Al contrario, in un ambiente chiuso, come può essere quello di una grotta o di una semplice abitazione, si accumula più facilmente.

La crosta terrestre è il luogo di origine del radon prodotto per cause naturali. In essa, infatti, è presente sin dall'epoca della sua formazione il capostipite della famiglia radioattiva di cui il radon fa parte, ossia l' ^{238}U . Questo elemento, avente un tempo di dimezzamento pari a $4.47 \cdot 10^9$ anni, ha dato origine, nel corso delle ere geologiche, a tutti gli altri stadi del processo di decadimento di cui il radon fa parte. Le concentrazioni di questo gas nobile nella crosta terrestre variano molto a seconda del tipo di roccia e del sito geologico e non sempre i progenitori del radon risultano essere in equilibrio secolare in tutti i campioni di roccia esaminati. La roccia con elevate concentrazioni di uranio è il granito, roccia ignea metamorfosata, e le argilliti, con concentrazioni medie di circa $50\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Nelle rocce arenarie uranifere, le concentrazioni di uranio possono raggiungere valori intorno a $5 \cdot 10^5 \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Il fenomeno del carsismo può creare una fitta rete di diffusione sotterranea del radon che, trasportato da acqua o gas, può percorrere grandi distanze prima di essere liberato. La presenza di faglie crea delle zone preferenziali per la fuoriuscita di gas nell'atmosfera. In questo caso anche rocce con un contenuto relativamente basso di ^{238}U , come sono i calcari, possono liberare quantità notevoli di radon.

Da alcuni studi condotti in un'indagine geologica negli Stati Uniti d'America è risultato che le quantità di radon che fuoriescono dal terreno in piccole zone

variano ampiamente e non sono ben correlate con la quantità di radio del terreno.

Il radon si forma nelle rocce in seguito al decadimento del ^{226}Ra . Elevate concentrazioni di radon nei gas del suolo e del sottosuolo si riscontrano però solo quando questo elemento può essere espulso dal reticolo cristallino dei minerali che lo contengono.

Il decadimento di un atomo di ^{226}Ra in uno di ^{222}Rn provoca la formazione di una particella α avente una data velocità. Per il principio di conservazione della quantità di moto, il nucleo venutosi a creare in seguito al decadimento, assume una quantità di moto di eguale modulo e di segno opposto rispetto a quella della particella α . Ciò provoca l'espulsione dell'atomo di radon dal reticolo cristallino (espulsione per rinculo) e, se tale fenomeno avviene sulla superficie del corpo solido (o a pochi raggi atomici al di sotto di essa), l'atomo di gas nobile viene emesso direttamente nell'ambiente esterno.

Nel momento in cui l'espulsione avviene in profondità, l'atomo di radon, a causa della sua inerzia chimica, non può legarsi agli atomi costituenti il reticolo cristallino, e può quindi diffondersi in mezzo a essi. Tuttavia, tale diffusione è contrastata dalla repulsione coulombiana che si instaura fra gli elettroni orbitali dell'atomo di radon e degli atomi formanti il reticolo. La traiettoria seguita dal ^{222}Rn diviene quindi tortuosa e lunga, e l'atomo di gas nobile può decadere per emissione α prima di raggiungere la superficie, cosa che, si stima, avvenga in circa il 90 % dei casi.

Al contrario, il tragitto verso la superficie risulta facilitato qualora il materiale presenti al suo interno delle cavità (pori) in quantità ed estensione più o meno grandi.

Se si suppone che i pori del materiale siano riempiti d'acqua, un atomo di radon incontra una maggiore resistenza nel diffondere attraverso il poro, rispetto al caso in cui questo sia pieno d'aria o di un altro gas. In questo caso, la presenza dell'acqua ostacola la diffusione del gas nobile attraverso il mezzo, e l'emanazione nell'ambiente esterno sarà minore rispetto al caso in cui il materiale risulta secco (Figura 2a). D'altra parte, qualora un atomo di radon espulso dal reticolo cristallino per rinculo in seguito al decadimento, abbia attraversato un poro privo d'acqua e si sia poi bloccato nella posizione successiva del reticolo, il successivo riempimento di acqua del poro in questione potrà favorire l'erosione del reticolo danneggiato dall'interazione con l'atomo espulso, con la conseguente liberazione dell'atomo stesso (Figura 2b). Pertanto, l'umidificazione di un campione inizialmente secco produrrà un aumento dell'emanazione osservata, essendo il radon solubile

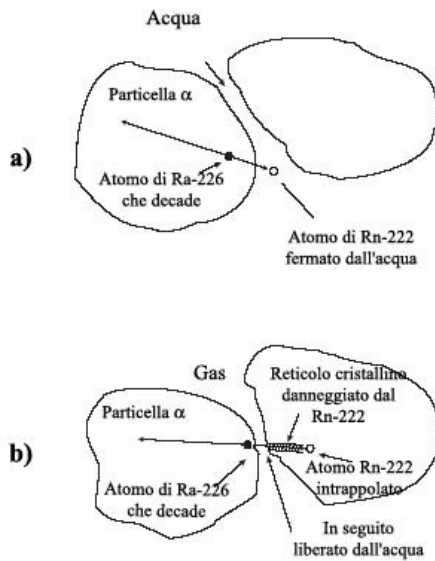


Fig. 2. Schema di formazione del radon

in acqua.

Le concentrazioni di radon nelle acque superficiali risultano essere molto basse, soprattutto nelle sorgenti d'acqua che vengono usate come fonti di acqua potabile.

I due metodi utilizzati per abbassare la concentrazione di radon in acqua potabile coinvolgono l'uso di aerazione e di carbone attivo granulare. Una buona aerazione riesce a rimuovere il 95 % del radon contenuto.

La concentrazione di radon nelle acque di superficie è generalmente molto bassa. Ci sono tre sorgenti di Radon per le acque superficiali:

- Radon generato per decadimento del ^{226}Ra presente in soluzione e/o sospensione;
- Radon proveniente dagli strati di acqua sottostante;
- Radon diffuso dai sedimenti.

Le concentrazioni di radon nelle acque di superficie normalmente sono molto basse e inferiori a $1 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($27 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$).

Le concentrazioni in acque freatiche variano da 1 a $50 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($27\div 1350 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$) per acque provenienti da falde acquifere di rocce sedimentarie e da $100 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ a $50000 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ($2700\div 1.35\cdot 10^6 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$) per acqua di falda da roccia cristallina.

Le concentrazioni più elevate di solito sono associate a elevate concentrazioni di uranio nelle rocce. Una delle caratteristiche delle concentrazioni di radon nelle acquifere rocciose è la variabilità: in una zona con caratteristiche rocciose abbastanza uniformi alcuni pozzi presentano concentrazioni molto al di sopra della media per la regione.

Il radon presente nell'approvvigionamento idrico per uso domestico può causare un'esposizione radioattiva umana attraverso ingerimento e/o inalazione. Il Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli effetti delle radiazioni atomiche (CSNUERA), in una relazione del 1993, ha ritenuto che la dose efficace impegnata da inserimento di radon presente nell'acqua è $10^{-8} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ per un adulto e un po' più elevata per i bambini e i lattanti.

Nel 1998, il National Research Council, un comitato statunitense, ha presentato un fattore di conversione di $0.35\cdot 10^{-8} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$. Oltre al fattore di conversione, la dose ingerita dipende anche dal consumo annuale di acqua. Le stime sulla dose efficace impegnata annuale assorbita da un adulto mediante inserimento di acqua contenente $1000 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ variano fra $0,2 \text{ mSv}$ e 1.8 mSv , a seconda del consumo annuale di acqua e della gamma dei fattori di conversione utilizzata. Sia il CSNUERA, che il National Research Council ritengono che $1000 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ di radon nell'acqua delle condotte aumenterà in media la concentrazione di radon nell'aria di $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

E' possibile controllare il radon nell'acqua potabile sia da un punto di vista fisico che a livello ingegneristico. Per questo sono stati messi a punto metodi efficaci per eliminare il radon.

Nel caso in cui l'alimentazione idrica faccia parte di una rete commerciale o pubblica, come le condotte idriche, il consumatore non può controllare la dose ricevuta come potrebbe fare il proprietario di una rete di alimentazione individuale. Quindi, per quanto riguarda la fornitura d'acqua della rete idrica pubblica o commerciale, è giustificata l'adozione di una strategia di controllo più severa, ivi compreso un livello di riferimento inferiore a quanto non sia fissato per un'alimentazione individuale. Se nell'acqua sono presenti concentrazioni di radon inferiori a $100 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ non è necessario adottare azioni correttive, se però le concentrazioni di radon sono superiori $1000 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, allora si possono adottare delle azioni correttive in base a criteri di protezione dalle radiazioni.

La normativa italiana (Decreto Legislativo n. 241 del 26 Maggio 2000) [4] ha stabilito un livello di riferimento per l'esposizione al radon, in aria, negli ambienti di lavoro di $500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (corrispondenti a 3 mSv per anno di dose).

Per quanto riguarda le concentrazioni di radon in acqua, non esiste in Italia una normativa specifica. Per il controllo del radon nelle acque esiste una raccomandazione della commissione europea EURATOM, notificata nel Dicembre del 2001, che riguarda la tutela della popolazione contro l'esposizione al radon nell'acqua potabile.



Fig. 3. Misuratore di radon impiegato nel lavoro

MATERIALI E METODI

Lo strumento usato nel presente lavoro per misurare la concentrazione di radon è il RAD7 prodotto dalla DURRIDGE Company (Figura 3). Esso è un rivelatore elettronico capace di misurare la concentrazione di radon in aria, in acqua e nel terreno.

Il RAD7 utilizza un rivelatore alfa a stato solido.

Un importante vantaggio del RAD7 è quella di determinare l'energia di ciascuna particella alfa e quindi di stabilire con esattezza quale radioisotopo (^{218}Po , ^{214}Po , ecc.) ha prodotto la radiazione mediante "spettrometria α ". Il nucleo di ^{222}Rn , che decade all'interno del rivelatore, lascia il nucleo risultante, ^{218}Po , come ione carico positivamente. Un campo elettrico presente all'interno del RAD7 spinge questo ione verso il rivelatore depositandolo sulla superficie.



Fig. 4. Foto di una fase di misurazione

Nel momento in cui il nucleo di ^{218}Po decade produce la particella α da 6 MeV che genera un segnale elettrico proporzionale in intensità all'energia della particella α .

I successivi decadimenti dello stesso nucleo producono particelle β , che non sono rilevate, o particelle α di differente energia. Isotopi differenti hanno energia alfa differente e producono segnali elettrici di differente intensità nel rivelatore.

Il RAD7 rivela le particelle α di energia compresa tra 0 e 10 MeV, discriminandole in funzione della loro energia, e fornendo, a fine acquisizione, lo spettro di

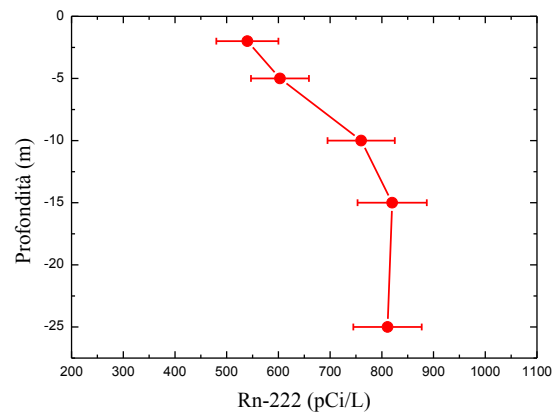


Fig. 5. Concentrazione di radon in funzione della profondità

energia.

Figura 4 mostra una fase di misurazione.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Figura 5 mostra il profilo della concentrazione di radon in un pozzo del Salento (coordinate UTM x 2795511 x, 4470040 y) in funzione della profondità di campionamento (misurata dal livello piezometrico).

Il pozzo analizzato mostra un livello piezometrico pari a 39 metri. Sono state eseguite diverse misure a varie profondità per valutare l'andamento della concentrazione di attività in funzione della profondità di campionamento.

Come si evince dalla figura 5, all'aumentare della profondità si vede che la concentrazione di ^{222}Rn aumenta per poi mantenersi, entro le incertezze sperimentali, a un valore quasi costante.

Spesso il radon si determina misurando le particelle α che emette (o dai suoi figli). Il radon è un gas, ma suo

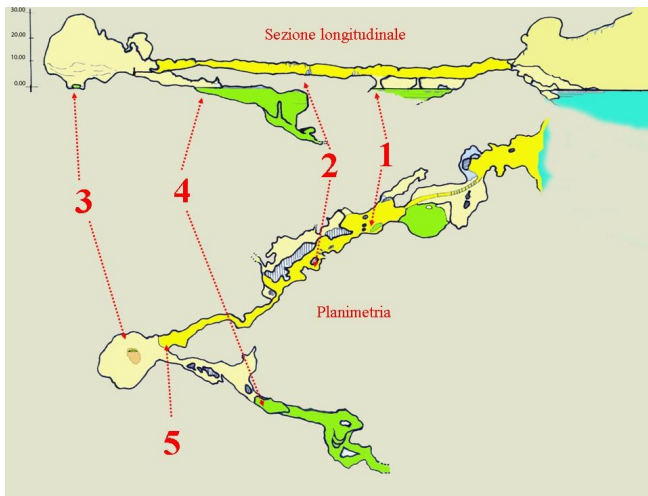


Fig. 6. Planimetria con i punti di misura

“figlio” polonio è un metallo e, quindi, esso può depositarsi sul particolato atmosferico o su una qualsiasi superficie.

Per il ^{222}Rn si analizzano le particelle α (6 MeV) emessi dal ^{218}Po : equilibrio secolare di circa 15 minuti. In alternativa, si possono analizzare le particelle α (7.69 MeV) emessi dal ^{214}Po : equilibrio secolare di circa 3 ore.

Per il ^{220}Rn (thoron) si analizzano le particelle α (6.78 MeV) emessi dal ^{216}Po : equilibrio secolare di circa 45 secondi.

Figura 6 mostra i cinque punti di misura scelti nella

$$500 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \cdot 2000 \text{ h} \cdot 3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Sv}}{\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \text{ h}} = 3 \text{ mSv}$$

grotta.

Come già descritto in precedenza, le sorgenti di acqua sono presenti nella grotta solo nelle postazioni 1 (laghetti Conca), 3 (la zona “paludosa” dello Stige) e 4 (laghetti Cocito) e pertanto il valore di Rn in acqua è stato determinato solo in queste regioni.

Postazione	^{222}Rn in aria ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	^{222}Rn in acqua ($\text{pCi} \cdot \text{dm}^{-3}$)
1	280 ± 50	60 ± 20
2	540 ± 90	
3	1280 ± 110	170 ± 30
4	860 ± 90	160 ± 30
5	830 ± 190	

Tabella 1. Risultati delle misure di radon in grotta

La tabella 1 riassume i valori di radon determinati sia in aria che in acqua.

I campioni d’acqua sono stati prelevati a 20 cm dalla superficie.

Relativamente alla sicurezza per persone del pubblico e addetti ai lavori, il livello di azione per le persone del pubblico è fissato in 0.3 mSv per anno di dose, mentre il livello di azione per gli addetti ai lavoro è fissato in 3 mSv per anno di dose.

Il fattore convenzionale di conversione è fissato a $3 \cdot 10^{-9}$ di dose efficace per unità di esposizione espressa in $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$.

Un ambiente a $500 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, frequentato per 2000 ore lavorative, produce una dose efficace pari a:

I visitatori permangono in grotta al più quindici minuti. Nelle condizioni peggiori (quindici minuti nel Cocito), la dose è pari a 10^{-3} mSv: ossia 300 volte inferiore al limite previsto dalle legge.

Relativamente alle guide, si raggiunge la dose di 3 mSv restando nel Cocito per 780 ore anno, ossia 65 ore al mese. In Agosto, mese di massima affluenza, ogni guida entra in grotta tra le 5 e le 10 volte al giorno passando nel Cocito circa 5 minuti per un totale di ore compreso tra 11 e 22. Tali valori risultano decisamente inferiori ai limiti previsti dalla legge vigente.

REFERENCES

- [1] Ciccarese G. e Pesce G.L., 1999. “La Zinzulusa: 200 anni dopo”, Thalassia Salentina, Lecce, suppl. al n. 23: 79-88.
- [2] Cothorn C.R. e Smith Jr.J.E., 1987. “Environmental radon”, PLENUM PRESS.
- [3] P. Belloni et al., 1995. “Optimization and comparison of three different methods for the determination of Rn-222 in water”. The Science of the Total Environment, 173/174, 61/67.
- [4] Decreto Legislativo n. 241 del 26 Maggio 2000. “Attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti”. Gazzetta Ufficiale n. 153 Serie Generale (4 Luglio 2001).