

Atti Mus. Civ. St. Nat. Trieste	62	2021	5-32	X 2021	ISSN: 0335-1576
---------------------------------	----	------	------	--------	-----------------

DIOSSIDO DI CARBONIO, RADIOATTIVITA' E RADON NELLA CAVERNA GENERALE RICORDI (CARSO CLASSICO, COMUNE DI DOBERDO' DEL LAGO)

GRAZIANO CANCIAN – DAMIANO CANCIAN

Via Monte Calvario, 48/a Gorizia – Email: gcancian@tin.it

Abstract – Carbon dioxide, radioactivity and radon in the Generale Ricordi cave (Classic Karst, municipality of Doberdò del Lago).

The research examined the General Ricordi Cavern that opens in the western sector of Italian Classic Karst. It began in December 2019 and ended in January 2021. Four parameters were monitored: temperatures, CO₂ in the air, radioactivity and radon activity. In the first 4 months, until March 2020, CO₂ concentrations were slightly higher than external ones, with maximum values up to about 550 ppm while the radioactivity was even lower than the external one, which on average is around 0.10 µSv/h. After the lockdown of April, due to health restrictions (Covid 19), in May, at the bottom of the cave, a significant increase in CO₂ was noted, which in the following six months has continuously exceeded 9999 ppm. The same phenomenon was observed for radioactivity: 0.36 µSv/h in May, to reach 0.46 µSv/h in July. Following this event, radon was also taken into consideration, immediately finding an average activity of around 55,000 Bq/m³, with a peak up to 66,840 Bq/m³. These are among the highest, if not the greatest, values among those so far documented in caves of the Karst between Trieste and Gorizia. All these parameters gradually declined until October. In November, however, there was a new and unexpected increase in radon, thus demonstrating that in addition to the typical seasonal trend (low values in the cold months and high in the warm months), there may be other variations, sometimes rapid and large, not easily correlated to others events. With the arrival of winter, the radon activity dropped to 206 Bq/m³.

Using a gamma spectrometer, radionuclides ²¹⁴Bi and ²²⁶Ra were identified, which confirm the origin of radon from the decay of ²²⁶Ra and therefore from the ²³⁸U chain. The origin of CO₂, on the other hand, when it reaches very high concentrations together with radon, could be, in part, also of endogenous origin.

Key word: carbon dioxide, radioactivity, radon, Generale Ricordi cave, Classical Karst, Italy.

Riassunto - La ricerca ha preso in esame la Caverna Generale Ricordi che si apre nel settore occidentale del Carso Classico italiano. E' iniziata nel dicembre 2019 e si è conclusa nel gennaio 2021. Sono stati monitorati quattro parametri: temperature, CO₂ nell'aria, radioattività e attività del radon. Nei primi 4 mesi, fino a marzo 2020, le concentrazioni di CO₂ erano di poco superiori a quelle esterne, con valori massimi fino a circa 550 ppm mentre la radioattività era addirittura inferiore a quella esterna, che mediamente è attorno a 0,10 µSv/h. Dopo la pausa di aprile, dovuta alle restrizioni sanitarie (Covid 19), in maggio, nel fondo della caverna, si è notato un notevole aumento della CO₂ che nei sei mesi successivi ha continuamente superato i 9999 ppm. Lo stesso fenomeno è stato osservato per la radioattività: 0,36 µSv/h in maggio, per arrivare a 0,46 µSv/h in luglio. In seguito a questo evento, si è preso in considerazione anche il radon, riscontrando subito un'attività media attorno a 55.000 Bq/m³, con un picco orario fino a 66.840 Bq/m³. Si tratta di valori tra i più alti, se non i maggiori, tra quelli finora documentati in grotte del Carso fra Trieste e Gorizia. Tutti questi parametri sono gradualmente calati fino a ottobre. In novembre, però, si è verificato un nuovo e inaspettato aumento del radon, dimostrando così, che accanto al tipico andamento stagionale (valori bassi nei mesi freddi e alti nei mesi caldi), si possono avere altre variazioni, talora rapide e ampie, non facilmente correlabili ad altri eventi. Con l'arrivo dell'inverno l'attività del radon è scesa fino a 206 Bq/m³.

Tramite uno spettrometro gamma sono stati identificati i radionuclidi ²¹⁴Bi e ²²⁶Ra, che confermano l'origine del radon dal decadimento del ²²⁶Ra e quindi dalla catena del ²³⁸U. La provenienza della CO₂, invece, nei momenti in cui raggiunge concentrazioni molto elevate assieme al radon, potrebbe essere, in parte, anche di origine endogena.

Parole chiave: diossido di carbonio, radioattività, radon, caverna Generale Ricordi, Carso Classico, Italia.

1. – Descrizione della grotta e inquadramento geologico

La Caverna Generale Ricordi 455/1064 VG si apre nel Carso tra Monfalcone e Jamiano, in comune di Doberdò del Lago. Questi sono i dati che compaiono nel Catasto Speleologico Regionale del FVG:

- latitudine: 45° 48' 22,3481''
- longitudine: 13° 34' 29,1991''
- quota ingresso: 59 m
- sviluppo planimetrico: 120 m
- profondità: 31 m



Fig. 1: carta geologica della zona e posizione dell'ingresso della grotta. La caverna si sviluppa verso SSO. CCS: Calcari di Monte Coste (Aptiano inf. p.p. - Albiano sup.). MRP: Formazione di Monrupino (Cenomaniano medio/sup.). AUR: Calcari di Aurisina (Cenomaniano sup. - Turoniano p.p. - Senoniano inf.). Figura tratta dalla Carta Geologica del Carso Classico (CUCCHI F. & PIANO C. 2013).

Fig. 1: Geological map of the area and location of the cave entrance. The cavern develops towards SSW. CCS: Limestones of Monte Coste (Aptiano lower p.p. - Albiano upper). MRP: Monrupino Formation (middle / upper Cenomanian). AUR: Limestones of Aurisina (upper Cenomanian - Turonian p.p. - lower Senonian). Figure taken from the Geological Map of the Classic Karst (CUCCHI F. & PIANO C. 2013).

In sintesi, si tratta di una galleria inclinata, adattata a ricovero militare durante la prima guerra mondiale. L'Esercito Italiano vi sistemò un Comando al quale era preposto il generale Ricordi, che trovò la morte proprio nei pressi dell'ingresso. Dopo la rotta di Caporetto, l'esercito austriaco prese nuovamente possesso della grotta e una lapide, tuttora esistente, sopra l'ingresso, riporta la scritta "P.T.M. Fillinger" a ricordo del loro comandante.

Durante gli anni '70 furono costruiti dei muri e la grotta fu chiusa poiché qui furono sistemati dei sismografi dall'Università di Trieste.

La parte relativamente naturale è il tratto finale che si presenta concrezionato, con massi di crollo sul fondo. Parte delle pareti è ricoperta da sottili incrostazioni scure di idrossiapatite, probabilmente dovute a una passata attività biologica dei pipistrelli. La grotta si sviluppa interamente entro i calcari grigio scuri dei "Calcari di Monte

Coste – Formazione di Povir" (Cretacico medio- inf.), seguendo spesso l'inclinazione degli strati, che sono immersi verso SSO.

Le acque di fondo si trovano presumibilmente attorno ai 4 - 5 m s.l.m. e provengono dalle zone del Lago di Doberdò. In definitiva, dovrebbero trovarsi a circa 23 metri dal fondo della grotta.



Fig. 2: rilievo della Caverna Generale Ricordi con i punti in cui sono state eseguite le misure (figura tratta dal Catasto Speleologico Regionale del FVG ed elaborata).

Fig. 2: Survey of the General Ricordi Cave with the points where the measurements were carried out (figure taken from the Regional Speleological Cadastre of FVG and elaborated).

2. – Impostazione delle ricerche e strumentazioni usate

La descrizione di questa ricerca, iniziata nel dicembre 2019 e terminata nel gennaio 2021, oltre a fornire i dati raccolti, è anche una sorta di diario poiché, durante il suo svolgimento, sono avvenute delle evenienze inaspettate. Tra queste va ricordata l'emergenza sanitaria (Covid 19), con le sue restrizioni che hanno pesantemente condizionato i momenti in cui è stato possibile raccogliere i dati.

Poiché era previsto un lungo monitoraggio dentro una grotta, le strumentazioni dovevano avere questi requisiti: facilmente trasportabili, non ingombranti, non troppo costose ma sufficientemente precise, almeno per quanto riguarda gli scopi della ricerca.

Le temperature sono state misurate con un termometro digitale, provvisto di sonda, modello Checktemp 1 (Hanna), la cui precisione è stata confrontata, più volte, con un termometro a mercurio da laboratorio. Le concentrazioni di CO₂, invece, sono state rilevate tramite lo strumento AZ 7755, con scala fino a 9999 ppm, risoluzione 1 ppm e precisione +/- 5% nell'intervallo 0 – 5000 ppm.

Per le misure di radioattività è stato usato un contatore geiger digitale Lagand BR9B (sensibile a radiazioni β , γ e raggi X), che fornisce sia la misura immediata sia la media dei valori memorizzati. Noi abbiamo sempre usato la media dei valori registrati in 7-10 minuti. All'inizio, tutto ciò sembrava sufficiente poiché, nei primi mesi, nella grotta non si erano registrati valori anomali di radioattività, anzi, erano addirittura più bassi rispetto all'esterno. Con l'arrivo dei mesi più caldi, però, la radioattività interna si è innalzata in maniera inaspettata e repentina. Per questo motivo si è deciso di estendere la ricerca anche al radon, utilizzando l'apparecchio Radex MR107. Questo strumento memorizza l'attività del radon in aria (EEVA) a cadenza oraria, a partire dalla quarta ora in cui viene acceso. Si è visto, però, che i valori precisi si ottengono dopo ulteriori quattro o cinque ore, quando lo strumento si stabilizza anche con la temperatura. Di ciò se n'è tenuto conto. La batteria interna ha una durata di 140 ore e i dati memorizzati possono essere trasferiti ed elaborati su pc. Avendo trovato subito dei valori notevolmente alti, si è ritenuto opportuno fare qualche altro controllo, validato, tramite rilevatori Fidotrack CR39 della Niton, mentre, per la determinazione dei radionuclidi è stato utilizzato lo spettrometro gamma Ludlums700, gentilmente messo a disposizione dalla Multiprojects di Gorizia.

La raccolta dei dati è avvenuta mensilmente, tranne che in aprile a causa delle restrizioni sanitarie. Le misure venivano fatte prima nella superficie sovrastante l'ingresso e poi in sette punti della caverna, sempre a circa un decimetro da terra, poiché CO_2 e radon sono più pesanti dell'aria.

Va precisato, infine, che il monitoraggio è stato svolto soltanto da due persone, in maniera da alterare il meno possibile i parametri ambientali.



Fig. 3: L'ingresso della caverna.

Fig. 3: the entrance to the cave.

3. – Temperature e movimenti dell'aria

L'unica notizia certa, sulle temperature della grotta in anni passati, risale al 1988 (ZORZENON, CANCIAN 1993). Purtroppo non sono disponibili i valori mensili, ma solo le medie annue. Quella riguardante l'aria fu di $11,9^\circ\text{C}$ (min. $11,3^\circ\text{C}$ – max. $12,9^\circ\text{C}$) e quella riguardante la roccia fu $11,6^\circ\text{C}$ (min. $11,4^\circ\text{C}$ – max. $11,9^\circ\text{C}$). Il monitoraggio fu eseguito nella grande sala. In quest'occasione, invece, le temperature sono state rilevate nello stretto passaggio che si trova nel fondo della stessa sala (punto 6). In questo caso, non è possibile fornire l'esatta media annua poiché mancano i dati del mese di aprile 2020, tuttavia, se non si considera questo mese, la media sarebbe di $11,87^\circ\text{C}$, quindi non molto diversa da quella registrata in precedenza.

In ottobre, novembre e gennaio 2021, le temperature sono state raccolte due volte nello stesso mese, poiché erano avvenuti dei cambiamenti. In particolare, in ottobre si è verificato un calo termico nel giro di pochi giorni, in novembre si è avuto un nuovo innalzamento della radioattività e in gennaio c'è stata la temperatura più bassa di tutto il monitoraggio.

data	esterno	1	2	3	4	5	6	7	roccia
dic 2021	7,6	7,7	9,6	10,6	11,3	11,8	11,8	11,9	11,8
gen 2020	5,8	4,6	6,0	8,2	9,7	11,1	11,2	11,6	11,7
feb 2020	10,1	8,4	7,9	8,9	10,2	11,3	11,4	11,8	11,7
mar 2020	17,4	10,2	8,5	9,7	10,7	11,6	11,7	11,9	11,8
apr 2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-
mag 2020	25,4	13,2	11,2	10,7	11,4	12,1	12,0	12,1	11,8
giu 2020	24,0	13,8	11,5	12,1	12,3	12,4	12,1	12,2	11,8
lug 2020	23,4	15,1	11,2	11,9	11,8	12,0	12,1	12,1	11,9
ago 2020	28,4	16,8	12,2	11,5	12,2	12,1	12,0	12,0	11,9
set. 2020	27,3	17,0	12,4	11,6	12,0	12,3	12,1	12,1	11,9
9 ott 2020	20,4	14,5	12,0	11,8	11,9	12,0	12,0	12,1	11,9
12 ott 2020	13,8	12,3	11,8	11,8	11,8	12,1	12,0	12,0	11,9
2 nov 2020	14,9	12,1	11,5	11,4	11,7	12,0	12,0	12,1	11,9
7 nov 2020	12,7	11,4	10,4	11,0	11,6	11,9	12,0	12,0	11,9
dic 2020	7,6	8,1	8,2	9,8	11,1	11,8	11,9	11,9	11,8
7 gen 2021	5,7	5,7	6,8	9,4	11,3	11,9	11,9	12,0	11,8
12 gen 2021	0,9	2,5	3,4	7,8	11,8	11,8	11,8	11,9	11,8

Tab. 1: Temperature dell'aria, all'esterno e in 7 punti della caverna. La temperatura della roccia è stata determinata tramite una sonda inserita per una quindicina di centimetri in una fessura, presso il punto 6.

Tab. 1: Air temperatures, outside and in 7 points of the cave. The temperature of the rock was determined by means of a probe inserted about fifteen centimeters into a rock fissure, at point 6.

Nelle grotte discendenti, come quella in esame, il modello teorico prevede un ricambio d'aria durante la stagione fredda. In questo periodo, infatti, l'aria fredda, più pesante, entra nella grotta lungo il pavimento, poi, arrivata verso il fondo, si riscalda, sale verso il soffitto ed esce. Nel periodo caldo, invece, i movimenti d'aria sono limitati solo al primo tratto e nel fondo si forma una sacca, che tende a permanere (fig. 4). A grandi linee, ciò accade anche nella Caverna Ricordi, come dimostrato da qualche semplice prova con fumi, però questi movimenti sono irregolari e più complessi a causa della presenza dei muri con buchi che restringono le sezioni. Per questo motivo, qui, anche in inverno, nei tratti compresi tra due muri e nel tratto finale, si possono formare delle momentanee sacche d'aria con scarsi movimenti.



Fig. 4: Modello teorico di circolazione dell'aria nelle grotte discendenti, nei periodi freddi e caldi. Nella Caverna Ricordi, tuttavia, questo modello è più complesso a causa dell'antropizzazione che ha modificato la cavità.
Fig. 4: Theoretical model of air circulation in the descending caves, in cold and hot periods. In the Ricordi cave, however, this model is more complex due to the anthropization that has modified the cavity.

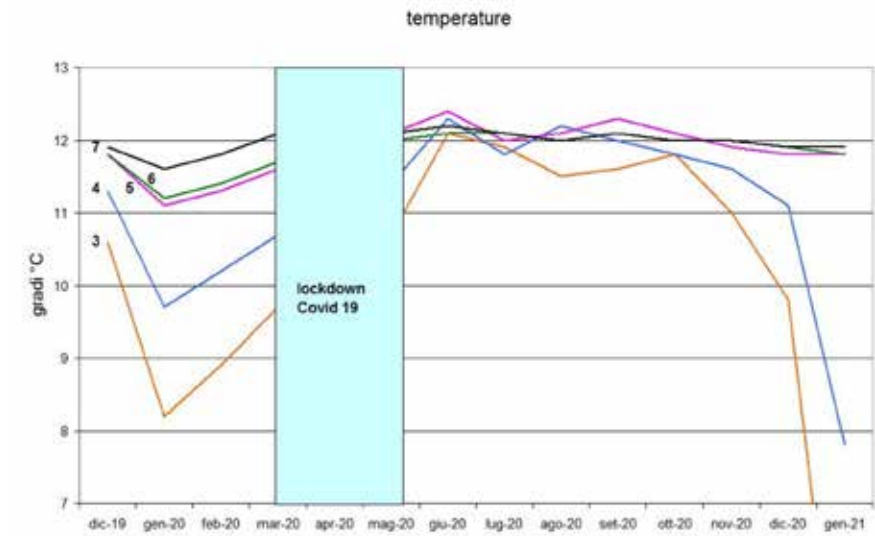


Fig. 5: Temperature nei vari punti della caverna, misurate a poca distanza da terra. Nei tratti più interni tendono ad appiattirsi attorno ai 12°C.
Fig. 5: Temperatures in the various points of the cave, measured at a short distance from the ground. In the innermost sections they tend to flatten around 12°C.



Fig. 6: Uno dei muri (punto 4) che restringono la sezione della galleria, influenzando sulla circolazione dell'aria.
Fig. 6: One of the walls (point 4) that narrow the section of the gallery, affecting air circulation.

Nei primi dieci mesi del monitoraggio, lo stillicidio è stato molto scarso e in certi periodi praticamente assente. Solo nel punto 4 era sempre presente (fig. 6), anche se in misura variabile. E' stato significativo, invece, nell'ottobre 2020, poi abbondante nel successivo mese di dicembre e un po' meno nel gennaio 2021. Nel tratto terminale della caverna, però, lo stillicidio è stato scarso anche in questi mesi.

Nel dicembre 2020, che è stato il più piovoso, a Gorizia furono registrati 279 mm di pioggia (<http://www.meteogo.it/>) e a Ronchi dei Legionari 340 mm (<http://my.meteonetwork.it/station/fvg055/statistiche>).

4. – Diossido di carbonio – CO₂

Il diossido di carbonio (anidride carbonica - CO₂) è un parametro molto importante nel carsismo, poiché la sua presenza nelle acque di percolazione e nell'aria è fondamentale per i processi di corrosione della roccia o di formazione delle concrezioni calcitiche.

Gli studi sulla sua presenza nelle grotte del Carso sono ancora pochi oppure spesso riportano solo dati puntuali. Importanti informazioni compaiono nella tesi di laurea di S. DAMBROSI (relatore L. ZINI, correlatore F. COREN - 2015). Nella Lipišca jama, che si apre tra Lokva e Sežana, l'autore ha constatato che la percentuale di CO₂ aumenta con la profondità. Il valore iniziale, presso l'ingresso, era di 0,04% ma nel fondo, alla profondità di 250 metri, raggiungeva addirittura il 3,05%. La stessa situazione era stata notata nella Grotta Skilan: 0,03% in superficie e 3,33% alla profondità di 220 metri. Diversi altri dati furono raccolti nell'Abisso di Trebiciano, dove erano stati posti due sensori/trasmittitori a 45 e 100 m di profondità. Nel primo, a 45 m, dove era possibile intercettare le correnti d'aria, i valori variarono tra 0,75 % e 1,6 % mentre nel secondo, situato in una sacca non interessata da flussi d'aria, le concentrazioni risultarono più alte, tra 2,0 % e 2,3%. Si notò, inoltre, che le variazioni sono influenzate dalle correnti d'aria dovute alle piene del Timavo.

Altre ricerche sono state eseguite anche all'estero, dimostrando che questo gas è presente in misura molto variabile nell'aria, sia da grotta a grotta, sia nella stessa cavità, ma in momenti diversi. Va precisato, tuttavia, che le concentrazioni del diossido di carbonio sono influenzate da numerosi fattori, fra i quali quelli geografici, geologici e specialmente climatici, che sono diversi caso per caso.

Una grotta della Cina è stata monitorizzata per due anni (MIN CAO et al. 2019) e si è notato un andamento stagionale con massimi in estate (> 6000 ppm) e minimi in inverno (< 1000 ppm). Nella Nerja Cave, una grotta turistica della Spagna, invece, le concentrazioni sono risultate molto più basse e più stabili: 525 ppm in autunno/inverno e 750 ppm in primavera/estate (LINAN et al. 2008). Ritmi stagionali si sono notati anche nella grotta Sainte Anne Belgio, con massimi attorno a 7500 ppm in agosto/settembre (EK & GEWELT 1985), mentre nella Meirvellerieuse Cave si sono stati registrati 14000 ppm in estate e 900 ppm in inverno (EK & GEWELT M. 2014). Una ricerca effettuata nella Ballynamindra Cave in Irlanda, infine, conferma che la pCO₂ nell'aria aumenta con la profondità, fino ad arrivare a un massimo di 1700 ppm (BALDINI et al. 2006).

Sulla scorta dei dati riportati dalla letteratura e dal fatto che la Caverna Ricordi è una grotta modesta, per le misure della CO₂ si era ritenuto sufficiente l'uso di uno strumento con scala fino a 9999 ppm. In effetti, nei primi quattro mesi i valori massimi erano arrivati soltanto attorno a 550 ppm. Dopo il lockdown del mese di aprile, però, con la ripresa del monitoraggio, si è notato un rapido aumento. In maggio, nel fondo della grotta, i valori erano arrivati a 8150 ppm e nei mesi successivi, hanno iniziato ad andare fuori scala, inizialmente verso il fondo (punto 7), ma poi, gradualmente, anche nei tratti superiori della grotta. In settembre, lo strumento segnava valori fuori scala addirittura a soli 23 metri dall'ingresso.

Sembrava, quindi, che la grotta fosse come un contenitore che si stava riempiendo, di mese in mese, dal fondo verso l'ingresso. A conferma di questo modello, i successivi cali sono iniziati in settembre procedendo in senso inverso, cioè dall'ingresso verso il fondo.

Considerata la mancanza di dati in grotte di questo specifico settore del Carso, si è voluto vedere se, nei mesi caldi, sono presenti alti valori di CO₂ in qualche altra caverna. Il 28 maggio si è presa in esame la vicina Grotta dell'Infermeria 424/1065VG (sviluppo 77 m) ed è stato registrato un valore di 6466 ppm nel tratto terminale. Il 26 giugno, invece, le misure sono state eseguite nell'Antro di Casali Neri 326/450VG (sviluppo 55 m), che si trova a 7,6 km di distanza in linea d'aria. Questa volta le concentrazioni variarono da 2539 ppm presso l'ingresso a 7580 ppm verso il fondo.

	DIOSSIDO DI CARBONIO - CO ₂ - ppm							
	esterno	1	2	3	4	5	6	7
dic. 2019	389	390	421	448	479	547	554	550
gen 2020	427	410	458	464	490	490	461	495
feb. 2020	431	437	444	450	470	543	449	472
mar. 2020	430	453	456	474	472	478	475	495
apr. 2020	-	-	-	-	-	-	-	-
mag. 2020	424	1615	1666	1770	1900	2080	2059	8150
giu. 2020	411	2733	2820	3175	3592	3871	3727	> 9999
lug. 2020	417	4792	4852	5586	6126	> 9999	> 9999	> 9999
ago. 2020	420	8390	9540	> 9999	> 9999	> 9999	> 9999	> 9999
set. 2020	412	3300	6320	> 9999	> 9999	> 9999	> 9999	> 9999
ott. 2020	414	558	708	1100	>9999	>9999	>9999	>9999
nov. 2020	424	565	674	768	2024	> 9999	>9999	> 9999
dic. 2020	394	416	472	644	600	613	750	770
gen. 2021	418	425	432	456	629	625	479	555

Tab. 2: Concentrazioni del diossido di carbonio nei vari punti della caverna.

Tab. 2: Carbon dioxide concentrations in the various points of the cavern.

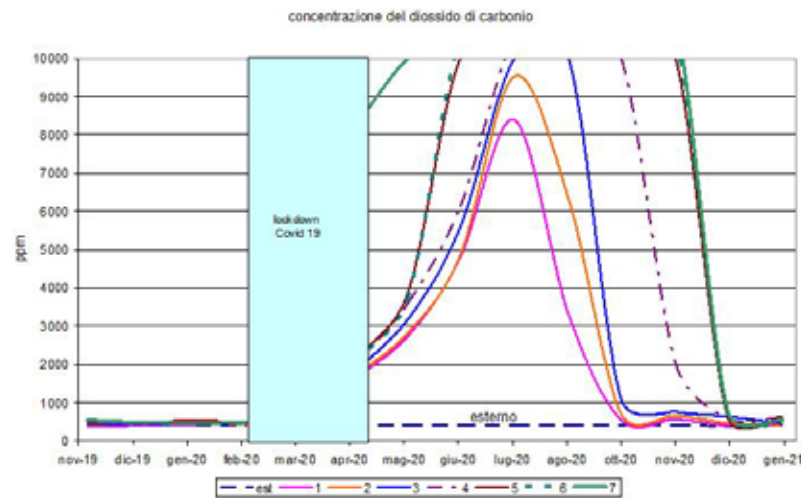


Fig. 7: Concentrazione di CO₂ all'esterno e nella caverna. Tranne che nei punti 1 e 2, tra giugno e novembre 2020, gli altri valori sono andati fuori scala dello strumento (>9999 ppm), iniziando dal punto 7, che è più profondo.
Fig. 7: CO₂ concentration outside and in the cave. Except in points 1 and 2, between June and November 2020, the other values went off the instrument's scale (> 9999 ppm), starting from point 7, which is deeper.



Fig. 8: Misure del diossido di carbonio e della temperatura nel punto 3, nel luglio 2021.
Fig. 8: Carbon dioxide and temperature measurements at point 3, July 2020.

L'origine della CO₂ nell'aria delle grotte è generalmente attribuita al suolo sovrastante, all'epicarso, al degassamento delle acque di stillicidio e alla ventilazione. In questi anni, però, stanno aumentando le ipotesi di contributi endogeni, anche se una delle prime osservazioni fu eseguita da ATKINSON ancora nel 1977. Studiando le acque sorgive nelle Mendip Hills (Inghilterra), egli notò che mostravano una pCO₂ costante, mentre quella dell'aria e del suolo variava stagionalmente, inoltre era comunemente inferiore a quella delle sorgenti. Ciò gli permise di stabilire l'esistenza di una fonte di CO₂ nella zona insatura, probabilmente dovuta alla decomposizione della materia organica dilavata dal suolo.

Un'altra osservazione simile, più recente, ha riguardato le grotte di Gibilterra (MATTEY et al. 2016). Nel loro studio, questi autori affermano che la CO₂ nell'aria non è direttamente correlata a quella che proviene dal suolo o dalla zona epicarsica. Dipende, invece, dal decadimento della materia organica nella zona insatura più profonda, con CO₂ contenuta nei vuoti più piccoli del substrato roccioso. Anche BERGEL et al. (2017), occupandosi di alcune grotte del Texas ammettono un contributo di CO₂ dal substrato roccioso e così pure altri autori. Per quanto riguarda l'Italia, particolarmente interessante è un recentissimo studio di CHIODINI et al. (2020) che, oltre a segnalare emissioni di CO₂ profonda nell'Appennino, dimostra una correlazione tra questo gas ed eventi sismici.

La presenza, anche abbondante, di CO₂ nel sottosuolo carsico è stata confermata tramite una perforazione presso la Grotta di Nerja, dove sono state riscontrate concentrazioni crescenti con la profondità e con valori medi di ben 40.000 ppm (VADILLO et al. 2010).

5. – Radioattività

All'inizio della ricerca, considerata la natura calcarea del sito e la mancanza di dati sulla radioattività γ nelle grotte della zona, ritenevamo che la radioattività naturale entro la caverna fosse bassa e che non si discostasse di molto da quella esterna ($\sim 0,10 \mu\text{Sv/h}$). Per questo motivo, quasi per curiosità, avevamo voluto verificare se la roccia soprastante schermasse, in parte, le radiazioni cosmiche. In effetti, nei primi mesi dell'anno 2020, nel fondo della caverna, la radioattività era mediamente più bassa di quella esterna. Allo scopo si utilizzò un semplice contatore geiger digitale. Dopo il periodo del lockdown, in cui non si poteva uscire dal proprio Comune, in maggio sono riprese le misure, ma questa volta si è notato che la radioattività sul fondo era salita a $0,36 \mu\text{Sv/h}$, arrivando, poi, in agosto, a $0,46 \mu\text{Sv/h}$ nel punto 7 (il più profondo) e addirittura $0,66 \mu\text{Sv/h}$ nel punto 6. A partire da questo mese, i valori sono scesi gradualmente, fino a $0,09 \mu\text{Sv/h}$ in ottobre, tornando quindi, almeno apparentemente, a quelli iniziali. In maniera inaspettata, però, all'inizio del successivo mese di novembre, la radioattività è balzata di nuovo a valori alti, vicini ai massimi registrati in estate, per poi calare fino a $0,06 \mu\text{Sv/h}$ in dicembre.

	RADIOATTIVITA' (β + γ) - μSv/h					
	esterno	1	tra 3 e 4	5	6	7
dic 2019	0,10		0,09			0,09
gen 2020	0,11					0,07
feb 2020	0,10					0,07
mar 2020	0,11		0,09			0,06
apr 2020	-					-
mag 2020	0,10		0,21		0,25	0,36
giu 2020	0,11	0,11	0,12	0,23		0,32
lug 2020	0,10		0,16		0,65	0,46
ago 2020	0,09		0,23		0,56	0,41
set 2020	0,12	0,11	0,15		0,36	0,23
9 ott 2020 12 ott 2020	0,10 0,10		0,11	0,17	0,19	0,13 0,09
2 nov 2020 7 nov 2020	0,11		0,09		0,28 0,19	0,35 0,43
dic 2020	0,09		0,07		0,07	0,06
gen 2021	0,11		0,07		0,08	0,07

Tab. 3: Misure di radioattività dentro la caverna.
Tab. 3: Radioactivity measurements inside the cave.

A questo punto, è interessante ricordare un'esperienza, successa, anni prima, a dei ricercatori che si erano occupati della Grotta della Vaccamorta in Abruzzo (MORETTI et al. 2004). Anche loro, infatti, avevano rilevato dosi di radiazione γ , nell'interno della grotta, a volte superiori a 60 $\mu\text{R}/\text{h}$ (che corrispondono a 0,60 $\mu\text{Sv}/\text{h}$). Nella loro relazione compaiono queste parole:

“All'uscita della nostra breve permanenza nell'interno (circa due ore) abbiamo anche rilevato una notevole contaminazione delle nostre tute in nylon (60-80 $\mu\text{R}/\text{h}$ al contatto con lo strumento) e delle parti esposte del nostro corpo (mani, capelli,

alito), da attribuire a fenomeni di attrazione elettrostatica esercitata dalla tuta stessa sugli ioni radioattivi presenti nell'aria.”

Ebbene, lo stesso fenomeno era successo pure a noi. Va precisato, però, che la nostra permanenza in grotta, quando avevamo constatato l'aumento della radioattività, non superava mai l'ora e che il tempo dedicato alla raccolta dei dati nell'ultimo tratto della caverna, dove le radiazioni erano più intense, si aggirava sui 20 minuti. Nonostante ciò, nei mesi di giugno, luglio e agosto 2020, subito dopo essere usciti all'aperto, lo strumento, posto a contatto con i vestiti o con le mani, segnava solitamente tra 0,25 e 0,30 $\mu\text{Sv}/\text{h}$. In seguito a questa constatazione, nel successivo mese di settembre avevamo deciso di indossare in grotta le stesse mascherine usate per l'emergenza Covid 19, con lo scopo di limitare la respirazione del particolato radioattivo. Appena tornati all'esterno, si è posto lo strumento sopra la mascherina della persona che era scesa fino nel fondo della caverna (punto 7) e si è visto che segnava addirittura 2,48 $\mu\text{Sv}/\text{h}$, cioè ben 25 volte superiore la normale radioattività del luogo (fig. 9). Nella mascherina che era stata indossata dall'altra persona, che si era fermata nella grande sala (punto 6), lo strumento segnava ugualmente un valore alto: 2,13 $\mu\text{Sv}/\text{h}$. Questi valori si sono dimezzati dopo circa 50 minuti.



Fig. 9: Lo strumento posto sulla mascherina che era stata indossata in grotta il giorno 8 settembre 2020, segna un valore medio di 2,48 $\mu\text{Sv}/\text{h}$.

Fig. 9: The instrument placed on the mask that was worn in the cave on 8 September 2020, shows an average value of 2.48 $\mu\text{Sv}/\text{h}$.

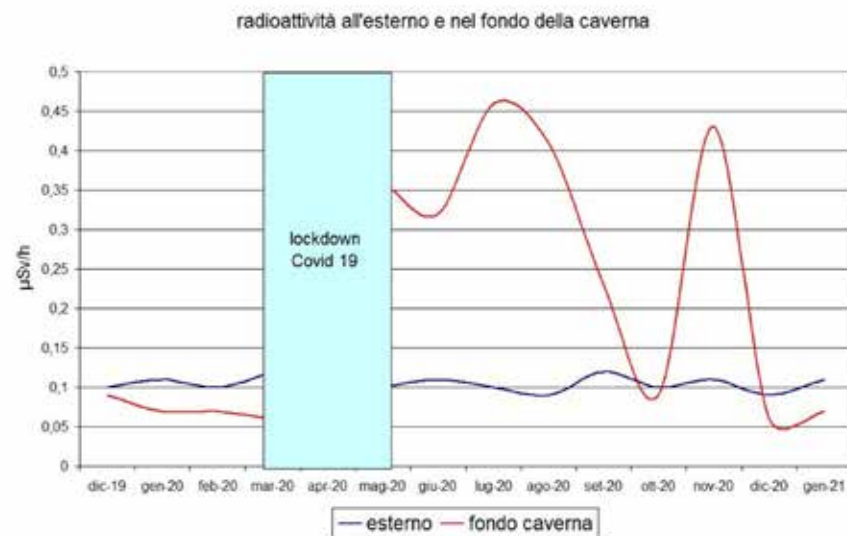


Fig. 10: Radioattività ($\beta + \gamma$) all'esterno (linea blu) e nel tratto terminale della caverna, punto 7 (linea rossa).
 Fig. 10: Radioactivity ($\beta + \gamma$) outside (blue line) and in the terminal section of the cave, point 7 (red line).

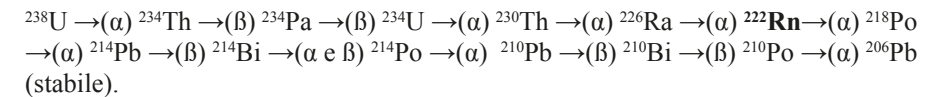
6. – Radon

Dopo aver constatato l'aumento della radioattività, si è deciso di implementare la ricerca con misure riguardanti specificatamente il radon.

La presenza di questo gas nelle grotte del Carso è nota, anche se le sue segnalazioni sono ancora discontinue e talvolta limitate solo a una misura per singola grotta. Si era appurato, tuttavia, che le sue concentrazioni hanno un ampio grado di variabilità, con valori più comuni tra 300 e 9000 Bq/m³, ma con diverse eccezioni. Ad esempio, in un elenco disponibile su internet, sono riportati dei valori più alti, fino a 10000 ± 3 Bq/m³ nella Grotta delle Perle 569/2699 VG (prof. 109 m, svil. 317 m) e 13400 ± 2 Bq/m³ nella Grotta Skilan 5070/5720 VG. (prof. 378 m, svil. 6400 m) (<https://www.boegan.it/2009/10/radon-e-grotte-turistiche/>). Nella Divaska Jama (Slovenia) sono state segnalate concentrazioni di 19300 ± 2500 Bq/m³ (MERLAK 2020), mentre in un passaggio delle Grotte di Postumia, non aperto al pubblico, è stata segnalata una media annua di 25020 ± 12653 Bq/m³ con valori massimi che superavano i 40.000 Bq/m³ (GREGORIC et al. 2013). Interessante, poi, è stata una ricerca nella Grotta Gigante, dove, in una diramazione laterale, prossima alla superficie, il radon variava da < 100 Bq/m³ in inverno a 35000 Bq/m³ in estate (DEL MASCHIO et al. 2011). Altri dati sulla presenza di questo gas in Friuli Venezia Giulia sono forniti da GIOVANI et al. (2007, 2012, 2013), da CUCCHI et al. (1996) e da VASCOTTO et

al. (1998).

Sull'origine del radon nelle grotte esiste un'abbondante letteratura (ARPA 2001, CIGNA 2005, 2016) ed è stata dimostrata pure una sua correlazione con l'andamento climatico, perciò non ci soffermiamo sull'argomento. Ricordiamo soltanto che l'isotopo più stabile è il ²²²Rn e che deriva, come punto di partenza, dal decadimento dell'uranio, secondo questa sequenza e con emissione di radiazioni α e β :



Nella caverna Ricordi, il monitoraggio è stato eseguito tramite lo strumento Radex MR107, posto nel tratto terminale (punto 7), con l'avvertenza che si è potuto lasciarlo in loco solo in certe occasioni, poiché rimaneva non sorvegliato, in una facile grotta accessibile a chiunque. In totale, comunque, sono state eseguite otto rilevazioni in altrettanti momenti diversi. L'acquisizione in continuo durava da due a cinque giorni, con dati a cadenza oraria. Nella prima rilevazione, nel luglio 2020, si è registrata una media inaspettata, attorno a 55000 Bq/m³, ben superiore a quelle che comunemente sono state segnalate in altre grotte. Il picco massimo raggiunse addirittura 66840 Bq/m³ il giorno 7 alle ore 05:11.

Rare sono le segnalazioni di valori così alti in grotta. Tra i maggiori ricordiamo un picco di 83009 in una grotta della Romania (MARGINEANU 2019), 60159 Bq/m³ in una grotta del Messico (ESPINOSA et al. 2013), mentre nel sistema del Peck District (Inghilterra) sono stati rilevati addirittura 155000 Bq/m³ (HYLAND & GUNN 1994).

Data l'importanza di quest'osservazione, nei mesi successivi sono stati posti dei rilevatori FidoTrack CR39 della Niton, sempre nel tratto terminale della caverna (attorno al punto 7). Gli scopi erano due: avere una conferma certificata delle alte e inusuali concentrazioni e verificare la corrispondenza con i dati raccolti con l'altro strumento. È opportuno ricordare, però, che con i rilevatori CR39 si ottiene solo la media riguardante i giorni in cui sono esposti.

In particolare, i primi due CR39 sono stati lasciati in loco per 12 giorni, quando il radon stava calando. Nonostante ciò, sono stati registrati dei valori ancora alti: 37534 Bq/m³ per quello posto a maggiore profondità (28 metri) e 28895 Bq/m³ per quello situato un po' più in alto (25 metri).

data	Radioattività ($\gamma + \beta$) $\mu\text{Sv/h}$	Radon Bq/m^3	Strumento
6 - 7 lug 2020	0,46	55266 (± 6973) (min. 54317, max. 66844)	Radex MR107
13 - 15 lug 2020	0,41	48067 (± 3194) (min. 40506, max. 53087)	Radex MR 107
28 - 29 lug 2020	0,34	37059 (± 1226) (min. 34981, max. 37962)	Radex MR107
13 - 24 ago 2020	0,37 0,27	37534 ($\pm 10\%$) 28895 ($\pm 10\%$)	FidoTrack CR39
8 - 10 set 2020	0,23	15802 (± 332) (min. 13182, max. 16328)	Radex MR107
9 - 12 ott 2020	0,13	5009 (± 440) (min. 4294, max. 5880)	Radex MR107
12 ott - 2 nov 2020	0,09 - 0,34	18840 ($\pm 10\%$)	FidoTrack CR39
2 nov - 7 nov 2020	0,35	39100 (± 1857) (min. 30878, max. 51582)	Radex MR107
10 dic./2020 - 07 gen 2021	0,06 - 0,10	614 ($\pm 17\%$)	Fido Track CR-39
10 - 15 dic 2020	0,06	276 (± 29) (min. 209, max. 364)	Radex MR 107
8 - 12 gen 2021	0,07	206 (± 53) (min. 118, max. 304)	Radex MR 107

Tab. 4: Radioattività $\gamma + \beta$ e contemporanee concentrazioni dell'attività del radon.

Tab. 4: Radioactivity $\gamma + \beta$ and simultaneous concentrations of radon activity.



Fig. 11: Il rilevatore CR39 collocato nel punto 7 della grotta il 13 agosto 2020 e recuperato il 24 agosto 2020.

Fig. 11: the CR39 detector placed in point 7 of the cave on 13 August 2020 and recovered on 24 August 2020.

Fino a ottobre 2020, radon e CO_2 nell'aria hanno seguito lo stesso andamento stagionale osservato in diverse altre grotte, come indicato dalla letteratura: bassi valori nei mesi freddi e alti nei mesi caldi. Nei primi giorni di novembre, però, un inaspettato aumento dell'attività del radon, non accompagnato da un parallelo aumento della CO_2 , è uscito da questo schema, raggiungendo un picco di 47743 Bq/m^3 (fig. 12).

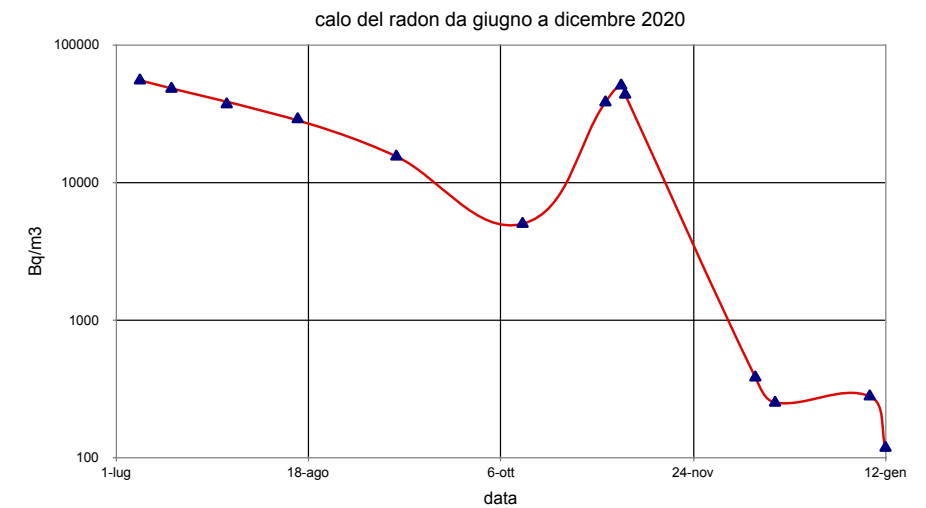


Fig. 12: Il calo del radon, dal massimo di giugno 2020 al minimo di gennaio 2021, non è stato regolare poiché, nei primi giorni di novembre si è verificato un nuovo aumento.

Fig. 12: The decrease in radon, from the maximum in June 2020 to the minimum in January 2021, was not regular since a new increase took place in the first days of November.

Questo secondo aumento non è facilmente spiegabile. Tra l'altro, non si può escludere che, più semplicemente, si tratti di radon che si era accumulato nella sala (tra i punti 5 e 6) e che poi sia sceso più in basso (punto 7). In effetti, tra il 2 e il 7 novembre, nella sala la radioattività era scesa da $0,29$ a $0,19 \mu\text{Sv/h}$, mentre nel tratto sottostante era salita da $0,35$ a $0,43 \mu\text{Sv/h}$.

Come accennato in precedenza, ogni volta che sono state eseguite le misure del radon, si è determinata anche la radioattività $\gamma + \beta$. Ciò ha permesso di osservare una buona correlazione tra le due grandezze (fig. 13).

A questo proposito, si ricorda che BERENS et al. (2017) avevano già dimostrato, che le emissioni γ - in determinate circostanze - hanno una relazione diretta con ^{226}Ra , che è a sua volta correlato con il ^{222}Rn . Correlazioni tra ^{222}Rn terrestre e radiazioni γ sono state descritte anche da SZEGVARY et al. (2007).

Quest'osservazione ha un'utilità pratica poiché lo speleologo può avere un primo indizio sull'eventuale presenza del radon, in quantità nocive, semplicemente facendo una misura tramite un contatore geiger.

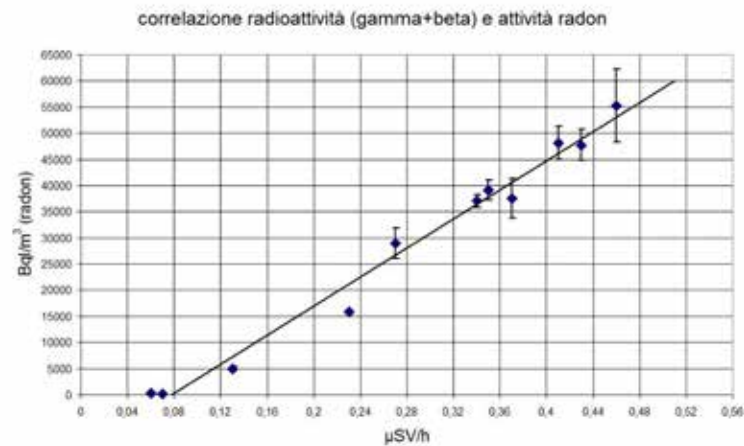


Fig. 13: Nella Caverna Ricordi si è osservata una buona correlazione tra radioattività ($\gamma + \beta$), misurata col contatore geiger e attività della concentrazione del radon, misurata in Bq/m³.
Fig. 13: In the Ricordi Cave a good correlation was observed between radioactivity ($\gamma + \beta$), measured with the geiger counter and the activity of the radon concentration, measured in Bq/m³.



Fig. 14: Alcune misure sono state eseguite anche in superficie, nei pressi della caverna. Nella foto, in luglio si rilevano la concentrazione di CO₂ e la radioattività in una frattura della roccia, che continua con un vuoto sotterraneo, al momento non accessibile. I valori di CO₂ erano continuamente fluttuanti, mediamente tra 600 e 700 ppm e con un massimo fino a 1025 ppm. La radioattività era 0,21 µSv/h.

Fig. 14: Some measurements were also carried out on the surface, near the cave. In the photo, in July the concentration of CO₂ and radioactivity are detected in a fracture of the rock, which continues with an underground void, currently not accessible. The CO₂ values were continuously fluctuating, on average between 600 and 700 ppm and with a maximum of up to 1025 ppm. Radioactivity was 0.21 µSv/h.

Le modalità di assunzione dei dati hanno consentito di analizzare nel dettaglio l'attività durante tre momenti autunnali: dal 9 al 12 ottobre, dal 2 al 7 novembre, dal 10 al 15 dicembre.

a) periodo: 9 -12 ottobre 2020

Nello specifico, in questo periodo, l'attività presenta dei minimi attorno a 4300 Bq/m³ e dei massimi attorno a 5300 - 5800 Bq/m³. Gli innalzamenti sono più rapidi degli abbassamenti, infatti, i primi durano circa 6-8 ore e i secondi circa 12 ore. Da notare che, durante la fase di discesa c'è anche un leggero innalzamento. L'andamento del radon non mostra un collegamento diretto con la situazione meteo esterna, caratterizzata prima da sole e poi da nuvolosità crescente fino ad arrivare a piogge con vento nel giorno 11. Solo l'ultima giornata è stata nuovamente soleggiata, ma sempre con vento.



Fig. 15: Attività del radon, dalle ore 23:15 del 9 ottobre, alle ore 14:15 del 12 ottobre 2020.
Fig. 15: Radon activity, from 11.15 pm on 9 October to 2.15 pm on 12 October 2020.

b) periodo: 2 – 7 novembre 2020

Dopo una fase iniziale tra 36000 e 42000 Bq/m³, il 4 novembre il radon si è abbassato fino a 30878 Bq/m³, seguito, subito dopo, da un innalzamento fino a 50789 Bq/m³. Dopo questo momento l'andamento è stato altalenante, seguito da una discesa negli ultimi due giorni.

Il 4 novembre, quando si sono verificati sia l'abbassamento sia l'innalzamento del radon, si è avuto un netto cambiamento meteo. Le giornate precedenti, infatti, erano caratterizzate da cielo coperto, forte umidità e foschia, mentre nelle seguenti è comparso il vento che ha sgomberato foschia e nuvolosità, con calo termico.



Fig. 16: Concentrazioni dell'attività del radon, dalle ore 22:42 del 2 novembre, alle ore 9:42 del 7 novembre 2020.
Fig. 16: Concentrations of radon activity, from 10:42 pm on November 2, to 9:42 am on November 7, 2020.

c) periodo: 10 – 15 dicembre 2020

Il periodo 10-15 dicembre è stato particolarmente interessante per quattro motivi:

- La concentrazione del radon si era notevolmente abbassata;
- Nel primo giorno, in cui è stato collocato lo strumento, si è avuto il massimo dello stillicidio durante l'anno, dovuto alle abbondanti piogge dei giorni precedenti.
- Il vicino lago di Doberdò era in massima piena.
- Il 13 dicembre, alle ore 13:26, si è verificata una scossa sismica di magnitudo 1,3, con epicentro a circa tre chilometri e mezzo di distanza.

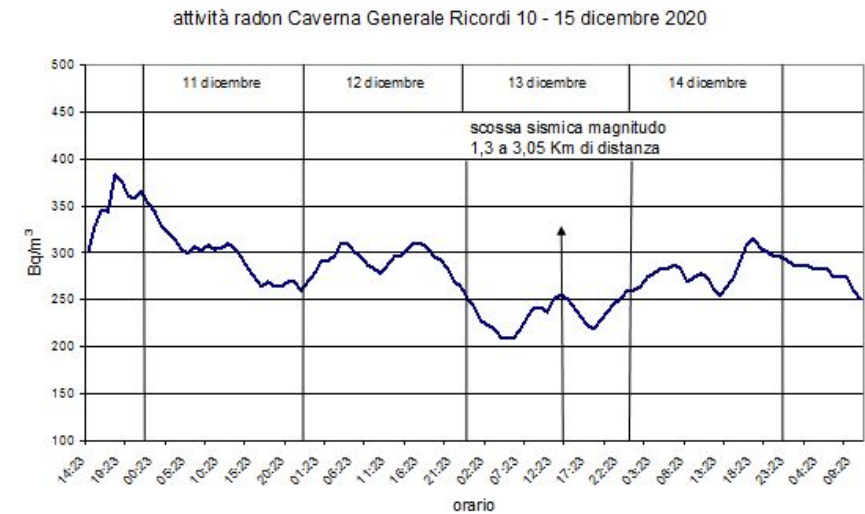


Fig. 17: Concentrazioni dell'attività del radon, dalle ore 14:23 del 13 dicembre alle ore 10:23 del 15 dicembre.
Fig. 17: Concentrations of radon activity, from 14:23 on 13 December to 10:23 on 15 December.

Non si è notata alcuna correlazione tra questi eventi e andamento del radon, che ha avuto le sue normali fluttuazioni. Le condizioni meteo esterne sono state caratterizzate prima da cielo nuvoloso, poi da sole e alla fine di nuovo abbondante nuvolosità.

Un approfondimento della ricerca è stato eseguito il 1° ottobre 2020, tramite lo spettrometro gamma Ludlums 700, gentilmente messo a disposizione dalla Multiproject di Gorizia. Gli scopi erano due: determinare i radionuclidi e verificare le misure di radioattività riscontrate tramite il contatore geiger. Le operazioni sono state eseguite prima all'esterno e poi in alcuni punti della grotta, fino alla grande sala. I risultati compaiono in tab. 5.

località	radioattività ($\mu\text{Sv/h}$)	radionuclidi
sentiero per arrivare alla grotta	0,13	$^{40}\text{K} - ^{214}\text{Bi}$
superficie sopra la grotta	0,10	$^{40}\text{K} - ^{226}\text{Ra}$
ingresso grotta	0,13	$^{40}\text{K} - ^{214}\text{Bi} - ^{226}\text{Ra}$
grotta tra punto 3 e 4	0,17	$^{40}\text{K} - ^{214}\text{Bi} - ^{226}\text{Ra}$
sala finale, punto 5	0,22	$^{40}\text{K} - ^{214}\text{Bi} - ^{226}\text{Ra}$
sala finale, punto 6	0,18	$^{40}\text{K} - ^{214}\text{Bi} - ^{226}\text{Ra}$

Tab. 5: Radioattività e radionuclidi, determinati in data 1 ottobre 2020 lungo il percorso per arrivare alla grotta e dentro la cavità.

Tab. 5: Radioactivity and radionuclides, determined on 1 October 2020 along the pathway to reach the cave and inside the cavity.



Fig. 18: Ricerca dei radionuclidi tramite uno spettrometro gamma nel punto 6 della caverna.

Fig. 18: Research of radionuclides using a gamma spectrometer at point 6 of the cave.

I radionuclidi trovati (^{214}Bi e ^{226}Ra) confermano l'origine del ^{222}Rn radon dalla catena di decadimento dell' ^{238}U uranio. L'isotopo radioattivo ^{40}K , invece, è naturalmente presente in natura e decade a ^{40}Ca e ^{40}Ar .

9. – Ipotesi sull'origine del diossido di carbonio e del radon nella Caverna Generale Ricordi

Per formulare delle ipotesi sull'origine di radon e CO_2 , i due gas devono essere presi in esame assieme poiché, per buona parte del monitoraggio, hanno dimostrato lo stesso comportamento.

Per quanto riguarda la CO_2 nell'aria delle grotte calcaree, come si è visto in precedenza, esistono due modelli. Il primo indica nelle acque di percolazione – e quindi dal suolo e dall'epicarso – la fonte principale. Eventuali concentrazioni molto elevate nel fondo delle cavità sono spiegate col fenomeno dell'accumulo, dovuto al fatto che CO_2 è più pesante dell'aria.

Il secondo, invece, ammette anche la possibilità di contributi di origine profonda. Nella Caverna Ricordi, sicuramente vi è un apporto dall'aria esterna, dal suolo e dalle acque di percolazione ma ciò non ci sembra sufficiente per spiegare certe concentrazioni elevate che si sono mantenute a lungo. Ad esempio, nel fondo della caverna, la CO_2 è stata costantemente molto alta (> 9999 ppm) per sei mesi di seguito, ma, in questo periodo, qui lo stillicidio era molto scarso o addirittura assente. Durante gli unici due mesi piovosi, (dicembre 2020 e gennaio 2021), invece, quando lo stillicidio era abbondante in tutta la grotta, la concentrazione di CO_2 è arrivata soltanto a 770 ppm e 550 ppm.

Per questi motivi, almeno a livello di prima ipotesi, riteniamo che non si possa escludere del tutto qualche contributo di origine profonda, anche perché le più alte concentrazioni di CO_2 si sono avute quando anche l'attività del radon era altrettanto alta. A questo proposito, diversi autori ammettono che la CO_2 possa svolgere la funzione di "carrier" per veicolare il radon verso le superfici (ETIOPE & LOMBARDI 1995, CHYI et al. 2010, CASTELLUCCIO et al. 2012, ecc).

Bisogna aggiungere, poi, che le emissioni del radon sono maggiori in vicinanza di faglie, deformazioni e importanti fratture della roccia. La Caverna Gen. Ricordi si trova proprio in una zona con queste caratteristiche, tuttavia sarà compito delle future ricerche stabilire con maggiore precisione l'esatta fonte di provenienza dei due gas.

10. – Conclusioni

La ricerca si era prefissa lo scopo di studiare il comportamento temporale di alcuni parametri ambientali della Caverna Generale Ricordi e in particolar modo della concentrazione di CO_2 , radioattività e radon. Per questo motivo, il monitoraggio si è protratto per 14 mesi. Allo scopo sono stati usati degli strumenti portatili e di facile uso.

Si è visto così che le concentrazioni di CO_2 e di radon seguono un ritmo stagionale,

con minimi nei mesi freddi e massimi nei mesi caldi. Nel caso del radon, però, c'è stata un'eccezione, infatti, nel novembre 2020 si era verificato un altro considerevole rialzo.

In particolare, per tutti i parametri considerati, i valori più alti si sono ottenuti da giugno a novembre e i più bassi da gennaio a marzo.

In tab. 6 si riporta la sintesi dei parametri misurati nel fondo della caverna Ricordi, che è il punto più significativo, poiché, oltre a essere il più profondo, non è stato alterato da interventi umani e poi, proprio qui sono stati osservati i valori più alti di diossido di carbonio e di radon.

punto 7 Caverna Generale Ricordi		
parametri misurati	valore minimo	valore massimo
temperatura aria	11,6° C (gen. 2020)	12,2° C (giu. 2020)
temperatura roccia	11,7° C (gen. e feb. 2020)	11,9° C (da lug. a nov. 2020)
diossido di carbonio	472 ppm (feb. 2020)	> 9999 ppm (da giu. a nov. 2020)
radioattività	0,06 µSv/h (mar. 2020)	0,46 µSv/h (lug. 2020)
radon	118 Bq/m ³ (12 gen. 2021)	66840 Bq/m ³ (7 lug. 2020)

Tab. 6: Sintesi dei parametri misurati durante il monitoraggio nel tratto terminale della caverna (punto 7).

Tab. 6: Summary of the parameters measured during monitoring in the terminal section of the cavern (point 7).

In passato, alti valori di CO₂ e di radon erano già stati segnalati in grotte del Carso Classico, ma solitamente in cavità grandi o profonde. Mancavano, inoltre, i dati riguardanti le grotte dell'estremo settore nord-occidentale (Carso di Monfalcone e di Doberdò). In questo caso la ricerca ha dimostrato che si possono verificare alte concentrazioni di entrambi i gas anche in cavità semplici e di dimensioni modeste, come la Caverna Generale Ricordi. In particolare, il 7 luglio era stato registrato un picco massimo di radon di 66844 Bq/m³, probabilmente il maggiore - o tra i maggiori - finora segnalati in letteratura nel Carso Classico italiano.

In qualche momento, anche la radioattività $\gamma + \beta$ ha raggiunto valori alti (0,65 µSv/h nel punto 6 nel luglio 2020) tali da invitare gli eventuali visitatori a non soffermarsi a lungo entro la grotta.

Per tutti questi motivi si ritiene opportuno che il mondo speleologico ripeta queste esperienze in altre cavità del Carso Classico italiano, in modo da avere un quadro significativo del comportamento di CO₂ e radon, nonché della radioattività, nelle cavità a galleria. La disponibilità odierna delle strumentazioni, in grado di monitorare con continuità diversi parametri, rende possibili studi articolati in questo senso.

Lavoro consegnato il 11/06/2021

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano la Multiproject di Gorizia per aver messo a disposizione lo spettrometro gamma utilizzato in questa ricerca. In particolare ringraziano il dr. Franco Varisco e il dott. Fulvio Bisiani per il supporto, i consigli e le consulenze.

BIBLIOGRAFIA

ARPA 2001 - Radiazioni non ionizzanti e ionizzanti, capitolo 3.8. *Rapporto sullo stato dell'ambiente*. Anno 2001, Regione FVG.

ATKINSON T.C. 1977 – Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestones. *Journ. of Hydrology*, 35(1-2): 11-123.

BALDINI J.U.L., BALDINI L.M. McDERMOTT F. & CLIPSON N. 2006 – Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra Cave, Ireland. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 68, no. 1, p. 4–11.

BERENS A.S., DIEM J., STAUBER C., DAI D., FOSTER S. & ROTHENBERG R. 2017 – The use of gamma-survey measurements to better understand radon potential in urban areas. *Sci Total Environ*, 2017 dec 31, 607-698: 888-899. Published on line 2017 Jul 27.

BERGEL S.J., CARLSON P.E., LARSON T.E., WOOD T.C., JOHNSON K.R., BANNER J.L. & BRECKER D.E. 2017 – Constraining the subsoil carbon source to cave-air CO₂ and speleothem calcite in central Texas. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 217 (2017): 112.127.

CAO M., JIANG Y., LEI J., HE Q., FAN J. & ZENG Z. 2019 - Constraining the soil carbon source to cave-air CO₂: evidence from the high-time resolution monitoring soil CO₂, cave-air CO₂ and its $\delta^{13}C$ in Xueyudong, Southwest China. *Biogeosciences Discussions*, march 2019.

CASTELLUCCIO M., GIANNELLA G., LUCCHETTI C., MORONI M. & TUCCIMEI P. 2012 – La classificazione della pericolosità radon nella pianificazione territoriale finalizzata alla gestione del rischio. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2:2012, Sapienza Univ. Editr.

CHIODINI G., CARDELLINI C., DI LUCCIO F., SELVA J., FRONDINI F., CALIRO S., ROSIELLO A., BEDDINI G. & VENTURA G. 2020 – Correlation between tectonic CO₂ Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines, Italy. *Sciences Advances*, 26 aug. 2020, v. 6, n. 35, eabc 2938.

CHYI L.L., QUICK T.J., YANG T.F. & CHEN C.H. 2010 – The experimental investigation of soil gas radon migration mechanism and its implication in earthquake forecast. *Geofluids* (2010) 10: 556-563.

CIGNA A. 2005 – Radon in caves. *International Journal of Speleology*, v. 34(1-2), 2005.

CIGNA A. 2016 - Alcune considerazioni sul radon in grotta. *Atti Conv. Naz. "La ricerca carsologica in Italia"*, 22-23 giugno 2013, Lab. carsologico sotterraneo di Bossea, Frabosa Soprana, pp. 221-228.

CUCCHI F., GIACOMICH R., COSLOVICH C., GIACOMICH P. & VASCOTTI M. 1996 – Il radon nei calcari e nelle cavità del Carso Triestino. Stato delle conoscenze. *Boll. Soc. Adriatica di Scienze*, vol. LXXVII (1996), pp. 31-47.

CUCCHI F., & PIANO C. a cura di. 2013. Carta geologica del Carso Classico (tratta dalla Carta di sintesi geologica alla scala 1:10.000 – Progetto GEO-CGT) e Brevi Note Illustrative della Carta Geologica del Carso Classico Italiano, con F. Fanucci, N. Pugliese, G. Tunis, L. Zini. Ed. Direzione centrale ambiente energia e politiche per la montagna, Servizio Geologico, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Trieste. <http://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/tutela-ambiente-gestione-risorse-naturali/FOGLIA201/FOGLIA9/>

DAMBROSI S. 2015 – Indagine sulla presenza di diossido di carbonio in alcune cavità naturali del Carso Classico. Tesi di laurea, anno accademico 2014-2015, Univ. di Trieste, Dip. di Matem. e Geoscienze.

DEL MASCHIO F., GIOVANI C., GARAVAGLIA M. & PICCINI L. 2011 – Anomalie di Radon in Grotta Gigante (Radon in Giant Cave, Trieste, Italy). Conference AIRP, Convegno Nazionale di Radioprotezione (National Radioprotection Conference). Conference paper. Reggio Calabria, Italy, ott. 2011.

EK C. & GEWELT M. 1985 – Carbon dioxide in cava atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 173-187.

EK C. & GEWELT M. 2014 – Carbon dioxide in cave air and soil air in some karstic areas of Belgium. A prospective view. *Geologica Belgica*, 17/1: 102-106.

ESPINOSA G., GOLZARRI J.I., VEGA-ORIHUELA E. & MORALES-MALACARA J.B. 2013 – Indoor radon concentration levels in Mexican caves, using nuclear track methodology, and the relationship with living habits of the bats. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 296: 43-48,

ETIOPE G., LOMBARDI S. 1995 – Evidence for radon transport by carrier gas through faulted clays in Italy. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Articles 193, 291-300.

GIOVANI C., CUCCHI F. & NADALUT B. 2007 – La distribuzione della concentrazione di radon indoor in Friuli Venezia Giulia: aspetti geologici. Airp, *Convegno Nazionale di Radioprotezione: Sicurezza e qualità in radioprotezione*. Vasto Marina, 1-3 ottobre 2007. ISBN 88-88648-06-2.

GIOVANI C., GARAVAGLIA M., PIVIDORE S., CUCCHI F. & ZINI L. 2012 – Uso dei sistemi informativi territoriali per lo studio della distribuzione della concentrazione di radon e dei parametri ad essa correlati in Friuli Venezia Giulia. In: *Atti del V Convegno Nazionale "Il controllo degli agenti fisici: ambiente, salute e qualità della vita"*, Novara 6-7-8 giugno 2012, ISBN 978-88-7479-118-7.

GIOVANI C., GARAVAGLIA M., PIVIDORE S., CUCCHI F. & ZINI L. 2013 – Sistemi informativi territoriali: studio dei parametri correlati alla distribuzione di radon indoor in Friuli Venezia Giulia. In: *Bollettino Associazione Italiana di Radioprotezione*, agosto 2013, pp. 29-36.

GREGORIČ A., VAUPOTIČ J. & GABROVŠEK F. 2013 - Reasons for large fluctuation of radon and CO₂ levels in a dead-end passage of a karst cave (Postojna Cave, Slovenia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 287-297, 2013.

HYLAND R. & GUNN J. 1994 – *Health Physics*. August 1994: 176-179

LINAN C., VADILLO I. & CARRASCO F. 2008 – Carbon dioxide concentration in air within the Nerja Cave (Malaga, Andalusia (Spain)). *International Journal of Speleology* (ediz. ital.), 37(2): 99-106, July 2008.

MARGINEANU R.M. 2019 – Radon measurement in underground mines and caves from several European countries. AIP Conference Proceedings 2076, 050004.

MATTEY D.P., ATKINSON T.C., BARKER J.A., FISHER R., LATIN J.P., DURREL R. & AINSWORTH M. 2016 - Carbon dioxide, ground air and carbon cycling in Gibraltar karst. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 184: 88-113.

MERLAK E. 2020 – Radon e speleonauti. *Sopra e Sotto il Carso*. Rivista on-line, a. IX, n. 7, luglio 2020, pag. 20-25, www.seppenhofer.it.

MORETTI A., FERRINI G., DI SABATINO D. & SCIOCCHETTI G. 2004 - La radioattività nella Grotta di Vaccamorta (Tornimparte, Abruzzo). *GNGTS, Atti 23° Conv. Naz.*, Roma 14-16 dic., pp. 425-428.

RIGGIO A. & SANTULIN M. 2015 – Earthquake forecasting: A review of radon as seismic precursor. *Boll. di Geofis. Teor. e Appl.*, 56(2): 95-114.

SZEGVARY T., LEUENBERGER M.C. & CONEN F. 2007 – Predicting terrestrial 222Rn flux using gamma dose rate as a proxy. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Europ. Geosc. Union, 7(1): 1877-1892.

VADILLO I., BENAVENTE J., CARRASCO F., SOLER A. & LIÑAN C. 2010 - Isotopic (13C) Signature of CO₂ Sources in the Vadose Zone of a Mediterranean Karst (Nerja Cave Site, Southern Spain). In: *Andreo B., Carrasco F., Durán J., LaMoreaux J. (eds) Advances in Research in Karst Media*. Environmental Earth Sciences, Springer, pp. 463-468.

VASCOTTO M., CUCCHI F., GIACOMICH R. & GIACOMICH P. 1998: Radioattività naturale sul Carso Triestino. *Alpi Giulie*, 92/1, pp. 39-54.

ZORZENON G., & CANCIAN G. 1993 – Le acque di percolazione nel Carso Goriziano: chimismo, temperatura e stima della dissoluzione dei calcari. *Le Grotte d'Italia*. Atti XVI Congr. Naz. di Speleol. (4) XVI, 1992-1993, pp. 225-236.

