



SCUOLA DOTTORALE IN
GEOLOGIA DELL'AMBIENTE E DELLE RISORSE
XXVI CICLO

SEZIONE GEOLOGIA DELL'AMBIENTE E GEODINAMICA

**Valutazione dell'influenza di cavità sotterranee e
campi di fratturazione sulle concentrazioni di radon e
thoron nel suolo in aree idrotermali e perivulcaniche
della Regione Lazio**

Tutore
Prof.ssa Paola Tuccimei

Co - Tutori
Dr. Michele Soligo; Dr. Mauro Castelluccio

Coordinatore
Prof. Claudio Faccenna

Candidato
Dr. Carlo Lucchetti

AA 2013 – 2014

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1 – Radon ed effetti sulla salute	
1.1 Il radon.....	3
1.2 Radiazioni ionizzanti.....	5
1.3 Sorgenti di radiazioni ionizzanti.....	7
1.3.1 Radioattività naturale.....	8
1.3.2 Radioattività artificiale.....	9
1.4 Parametri della radioattività.....	10
1.5 Rischio radon per la salute.....	12
Capitolo 2 – Rischio radon indoor e pianificazione territoriale	
2.1 Sorgenti	15
2.2 Meccanismi di trasporto e di accumulo	16
2.3 Fattori di controllo	17
2.4 Tecniche di misura.....	17
2.4.1 Dispositivi attivi.....	18
2.4.2 Dispositivi passivi.....	19
2.5 Normative di riferimento.....	19
2.6 Mappatura del rischio radon.....	20
2.6.1 Individuazione delle aree a pericolo potenziale per emissioni di radon (studio di primo livello).....	24
2.6.2 Protocollo per il rilievo di radon nel suolo a scala di cantiere (studio di secondo livello).....	27
Capitolo 3 – Elementi di controllo delle concentrazioni di radon nel suolo	
3.1 Contenuto in elementi precursori.....	30
3.2 Processo di alfa recoil e coefficiente d’emanazione.....	32
3.2.1 Granulometria.....	33
3.2.2 Porosità.....	33
3.2.3 Contenuto d’acqua e temperatura.....	33
3.3 Fattori di controllo sul movimento del radon nel suolo.....	34
3.3.1 Permeabilità.....	34

3.3.2 Fratture e discontinuità strutturali.....	36
3.3.3 Presenza di cavità sotterranee.....	37
3.4 Meccanismo di trasporto diffusivo.....	37
3.5 Meccanismo di trasporto avvertivo.....	38
3.6 Principali caratteristiche dell'anidride carbonica.....	39
3.7 Principali caratteristiche dell'acido solfidrico.....	41
3.8 Variabilità spaziale e temporale del radon nel suolo (<i>soil radon</i>).....	42

Capitolo 4 – Obiettivo della ricerca e stato dell'arte del monitoraggio di gas nel suolo nelle indagini geologiche

4.1 Obiettivo della ricerca e scelta delle aree di studio.....	44
4.2 Applicazioni dello studio dei gas nel suolo.....	47
4.3 Gas endogeni in corrispondenza di faglie attive.....	48
4.4 Studio dei gas del suolo per individuare potenziali sistemi geotermici.....	49
4.5 Emanazioni tossiche.....	50

Capitolo 5 – Inquadramento geologico delle aree monitorate

5.1 Le aree di studio di Valle della Caffarella e Tor Marancia.....	52
5.1.1 L'attività vulcanica dei Colli Albani.....	53
5.1.2 Inquadramento geomorfologico del Parco Regionale dell'Appia Antica.....	59
5.1.3 Caratteri idrogeologici del Parco.....	60
5.1.4 La presenza di cavità sotterranee.....	61
5.1.5 Le unità geologiche affioranti nel territorio del Parco.....	64
5.2 Inquadramento geologico del distretto Ciampino – Marino.....	66
5.2.1 Unità litologiche affioranti nell'area di Vigna fiorita.....	70
5.3 Inquadramento geologico dell'area termale della Ficoncella (Civitavecchia –RM).....	72
5.3.1 Caratteri idrogeologici dell'area della Ficoncella.....	74
5.3.2 Unità litologiche affioranti nell'area termale della Ficoncella.....	76
5.4 Inquadramento geologico dell'area di Fiumicino (RM).....	76
5.4.1 Unità litologiche affioranti nell'area di Fiumicino.....	81
5.4.2 Caratteri idrogeologici dell'area di Fiumicino.....	82

Capitolo 6 – Sistemi di misura del radon e dei parametri correlati

6.1 Sistema di misura del radon nel suolo.....	83
6.2 Il radonometro RAD7.....	85

6.2.1 Sistema di misura dei flussi di radon dal suolo.....	88
6.2.2 Sistema di misura dei tassi d'essalazione su campioni di suolo e roccia...	90
6.3 Sistema di misura della concentrazione di CO ₂ e H ₂ S.....	91
6.4 Sistema di misura della permeabilità intrinseca del suolo.....	92
6.4.1 Nuovo sistema di misura della permeabilità intrinseca.....	93
6.5 Sistema di misura del contenuto di ²²⁶ Ra e ²³² Th in campioni di suolo e roccia.....	94

Capitolo 7 – Elaborazione dei dati

7.1 Concentrazioni di radon e thoron nel suolo.....	96
7.2 Determinazione in laboratorio dei tassi d'essalazione	98
7.3 Determinazione dei flussi di radon e thoron dal suolo.....	99
7.4 Calcolo dell'errore associato.....	100
7.5 Determinazione della permeabilità intrinseca	101

Capitolo 8 – Valutazione delle possibili relazioni tra concentrazioni di radon nel suolo e presenza di cavità

8.1 Il sito di indagine della tenuta di Tor Marancia.....	103
8.1.1 Misure di radon e thoron all'interno della cavità sotterranea.....	106
8.1.2 Misure di soil radon in superficie.....	109
8.1.3 Variabilità del soil radon nel settore principale della cavità.....	112
8.1.4 Relazione tra spessori della volta e concentrazioni di soil radon lungo l'asse principale della cavità.....	115
8.2 Il sito di indagine della Valle della Caffarella, Roma.....	121
8.2.1 Risultati dei monitoraggi nelle stazioni fisse presenti nella Valle della Caffarella.....	123
8.2.2 Influenza delle precipitazioni sulle concentrazioni di soil radon.....	125
8.2.3 Influenza del contenuto d'acqua, della temperatura e della permeabilità intrinseca sulle concentrazioni di soil radon.....	128
8.3 Variabilità del soil radon su un settore interessato dalla presenza di una cavità sotterranea.....	130
8.3.1 Confronto tra le stazioni di misura RPS3, C1_80 e CV3 situato al di sopra della cavità sotterranea.....	139

Capitolo 9 – Influenza della presenza di faglie con risalita di fluidi profondi sulle concentrazioni di radon e thoron nel suolo

9.1 Il sito di indagine delle Terme della Ficoncella, Civitavecchia (RM).....	142
9.1.1 Risultati del monitoraggio nelle stazioni fisse TFF1 e TFF2.....	144
9.1.2 Influenza del vento sulle concentrazioni di radon nel suolo in TFF1 e TFF2.....	147
9.1.3 Misure nell'area limitrofa la zona termale della Ficoncella.....	148
9.1.4 Mappatura della concentrazione di attività del ^{222}Rn nel suolo nella zona interessata dalla risorgenza termale.....	153
9.1.5 Altre indagini effettuate nell'area della Ficoncella.....	155
9.1.6 Variabilità del soil radon lungo la faglia presente a nord dell'area termale della Ficoncella.....	156
9.2 Il sito di indagine di Vigna Fiorita, Ciampino (RM).....	163
9.2.1 Risultati dei monitoraggi nelle stazioni fisse VF1 e VF2.....	165
9.2.2 Misure di concentrazione indoor di ^{222}Rn , CO_2 e H_2S	168
9.2.3 Il monitoraggio del pozzo presente nei pressi della stazione VF1.....	169
9.2.4 Mappature ottenute nella zona giardino dell'area di indagine.....	171
9.2.5 Variabilità del soil radon lungo la faglia presunta in corrispondenza della via del Sassone.....	175
9.3 Il sito di indagine di Fiumicino (RM).....	183
9.3.1 Mappature ottenute nella rotonda interessata dalla polla.....	186
9.3.2 Mappatura del gas nel suolo nel terreno a nord della rotonda (terreno circo).....	189
9.3.3 Misure di ^{222}Rn in aria nella polla.....	191

Capitolo 10 –Determinazione del meccanismo di trasporto del radon nel suolo e coefficiente di arricchimento

10.1 Valutazione del contenuto degli elementi precursori.....	193
10.1.1 Valutazione dei tassi d'esalazione di radon e thoron in campioni di suolo.....	196
10.2 Considerazioni sulla mappatura di soil radon nell'area termale della Ficoncella, alla luce del contenuto di ^{226}Ra riscontrato in alcuni campioni di suolo dell'area.....	197
10.3 Valutazione del meccanismo di movimento del ^{222}Rn nelle aree indagate.....	199

10.3.1 Valle della Caffarella – Tor Marancia.....	199
10.3.2 Consorzio di Vigna Fiorita.....	200
10.3.3 Vigna Fiorita, Arcieri del Falco.....	201
10.3.4 L'area termale della Ficoncella.....	203
10.3.5 Profili lungo la faglia a N dell'area termale della Ficoncella.....	205
10.3.6 L'area di Fiumicino interessata dalla presenza delle polle.....	207
10.3.7 Terreno circo nell'area di Fiumicino.....	208
10.4 Il Coefficiente di Arricchimento del radon.....	208
Conclusioni.....	212
Bibliografia.....	214
Sitografia.....	228
Allegati.....	229

Introduzione

L'obiettivo principale di questa ricerca è stato quello di indagare le dinamiche che entrano in gioco dal momento di generazione del radon nel suolo, al tipo di trasporto (diffusivo o avvevativo) durante la risalita in superficie, in aree caratterizzate dalla presenza di cavità sotterranee e sistemi di faglie o fratture presenti all'interno della Regione Lazio. La prospezione dei gas presenti in un suolo (in questo caso radon, thoron, CO₂ e H₂S), accoppiata dalla determinazione della sua permeabilità intrinseca, rappresenta un potente strumento per investigare le caratteristiche geologiche e strutturali del basamento. La concentrazione dei gas dipende infatti dalla natura delle rocce del substrato, ma è influenzata anche dalla permeabilità dell'ammasso roccioso, sia primaria che secondaria. La presenza di fratture, faglie e cavità sotterranee poco profonde condiziona fortemente i valori del soil gas e in particolare il rapporto tra i due isotopi principali del radon, il ²²²Rn (detto semplicemente radon) e il ²²⁰Rn (noto anche come thoron), in virtù dei diversi tempi di dimezzamento dei due nuclidi: 3,8 giorni circa per il radon e solo 55 secondi per il thoron. Questo determina un decadimento rapido del thoron che, si riduce molto nelle aree limitrofe al punto in cui viene generato, al contrario di quanto avviene per il radon. La presenza però di elementi strutturali e vuoti nel suolo, favorisce la risalita dei gas da zone profonde aumentando il rapporto isotopico ²²²Rn/²²⁰Rn che può superare anche il rapporto di attività dei nuclidi genitori (²²⁶Ra/²³²Th). In questo senso l'arricchimento relativo del radon è un segnale della presenza di sistemi di fatturazione e faglie o cavità sotterranee. In tali condizioni, generalmente caratterizzate da permeabilità intrinseca dei siti elevata e presenza di notevoli concentrazioni di CO₂, che agisce come *gas carrier*, il tipo di trasporto che presenta il radon è prevalentemente avvevativo, cioè legato a gradienti di pressione e temperatura. L'aspetto interessante di questo progetto di ricerca è quindi senz'altro rappresentato dall'attenzione particolare che è stata rivolta all'analisi dell'isotopo thoron, che viene invece trascurata in molti lavori sulla determinazione delle concentrazioni di radon per indagini geologiche. Le aree individuate per valutare come la misura congiunta dei parametri menzionati possa dare indicazioni efficaci per lo studio del sottosuolo, si trovano all'interno della regione Lazio e sono caratterizzate da differenti condizioni geologiche e idrogeologiche al contorno, in particolare:

- 1) la Valle della Caffarella-Tenuta di Tor Marancia (Roma), dove affiorano i prodotti vulcanici emessi dai Colli Albani e localmente sono presenti cavità artificiali;
- 2) le Terme della Ficoncella e zone limitrofe (Civitavecchia), dove è presente una sorgente termale e alcuni sistemi di discontinuità;
- 3) l'area di Vigna fiorita (Ciampino), area perivulcanica di alto strutturale, caratterizzata da intenso degasamento e alcune faglie;
- 4) la zona di Fiumicino (Roma), dove si è creato un vulcanetto di fango, in seguito ad una perforazione che ha attraversato i livelli impermeabili che confinano i gas presenti nel sottosuolo.

Nelle prime tre aree è stato effettuato un monitoraggio a cadenza mensile delle concentrazioni di radon, thoron, anidride carbonica e permeabilità intrinseca grazie all'installazione di stazioni fisse nel suolo, correlandoli con le variabili meteo – climatiche (piovosità e direzione del vento) e con i dati di temperatura e contenuto d'acqua del suolo in modo da apprezzare la variabilità stagionale dei gas indotta dal clima. La quarta area rappresentata dalla zona di Fiumicino, è stata presa in considerazione soltanto nell'ultimo periodo del dottorato di ricerca, dopo il verificarsi dell'incidente che ha portato alla creazione del vulcanetto di fango. In tutti i siti sono state realizzate mappature e transetti, volti a valutare la variabilità spaziale dei parametri di studio, proprio in relazione alla presenza di zone di fatturazione, cavità sotterranee, risalita di fluidi profondi e tipo di trasporto del radon nel suolo.

Capitolo 1

Radon ed effetti sulla salute

1.1 Il Radon

Il radon è un elemento del gruppo VIIIA della tavola periodica: è un gas nobile, pertanto non reagisce con altri elementi chimici. E' il più pesante dei gas conosciuti (densità 9,72 g/l a 0 °C, 8 volte più denso dell'aria). E' incolore, inodore, insapore e presente naturalmente nel suolo. E' un elemento radiogenico (deriva dal decadimento del ^{226}Ra) e radioattivo (decadimento diretto in ^{218}Po). I suoi 26 isotopi, compresi tra il ^{219}Rn e ^{226}Rn , fanno parte delle catene di decadimento dell'uranio e del torio (figura 1). Solo tre di essi si riscontrano in natura:

il ^{219}Rn (actinon), capostipite serie di decadimento ^{235}U , prodotto finale ^{207}Pb ;

il ^{220}Rn (thoron), capostipite serie di decadimento ^{232}Th , prodotto finale ^{208}Pb ;

il ^{222}Rn (propriamente detto radon), capostipite serie di decadimento ^{238}U , prodotto finale ^{206}Pb (Bourdon et al., 2003). I decadimenti avvengono con emissione di particelle α o β e di radiazioni γ .

Il ^{219}Rn deriva dal decadimento del ^{223}Ra e a sua volta decade in ^{215}Po .

Il ^{220}Rn deriva dal decadimento del ^{224}Ra e a sua volta decade in ^{216}Po .

Il ^{222}Rn deriva dal decadimento del ^{226}Ra e a sua volta decade in ^{218}Po .

La principale sorgente del radon è rappresentata da suoli o rocce superficiali che contengono radio. Il radon può giungere in superficie anche nelle zone dove vi sono emissioni di gas profondi (CO_2 , CH_4). In spazi aperti viene diluito dalle correnti d'aria e raggiunge basse concentrazioni, mentre in un ambiente chiuso, come può essere quello di un'abitazione, il radon può accumularsi raggiungendo concentrazioni elevate, pericolose per la salute umana.

	SERIE URANIO-238					SERIE TORIO-232					SERIE URANIO-235						
U	238																U
Pa	↓	↗ 234	↓									↓	↗ 231	↓			Pa
Th	234		230			232		↗ 228	↓			231	↓	↗ 227			Th
Ac			↓			↓	↗ 228	↓					227	↓			Ac
Ra			226			228		224						223			Ra
Fr			↓					↓						↓			Fr
Rn			222					220						219			Rn
At			↓					↓						↓			At
Po			218		↗ 214			216		↗ 212				215			Po
Bi			↓	↗ 214	↓	↗ 210		↓	↗ 212	↓				↓	↗ 211		Bi
Pb			214	↓	210	↓		212	↓	208				211	↓	207	Pb
Tl				210		206			208						207		Tl

Figura 1: Serie di decadimento dell'Uranio e del Torio.

Per quanto riguarda le concentrazioni naturali dei tre isotopi del radon si può fare riferimento alla concentrazione media nella crosta terrestre degli isotopi capostipiti [1].

^{235}U 0,02 ppm (1,5 Bq/kg)

^{232}Th 8,5 ppm (34 Bq/kg)

^{238}U 2,7 ppm (33 Bq/kg)

L' ^{238}U costituisce il 99,27% del complesso isotopico dell'uranio.

Va anche considerata la vita media dei tre isotopi del radon, espressa dal parametro emivita:

parametro emivita.

^{219}Rn 3,92 secondi

^{220}Rn 54,5 secondi

^{222}Rn 3,825 giorni.

Ne deriva che il ^{219}Rn ha concentrazioni molto basse in natura ed è considerato quindi di scarsa importanza.

Il ^{220}Rn (thoron) non è facilmente rilevabile nell'ambiente a causa della sua breve emivita, nonostante l'isotopo ^{232}Th , che lo genera, sia relativamente abbondante in natura. In ogni caso la distanza che il thoron può percorrere fuoriuscendo dal materiale sorgente è minima.

Il ^{222}Rn ha un'emivita consistente ed è costantemente presente nell'ambiente. È considerato il più importante degli isotopi del radon e ci si riferisce abitualmente ad esso con il termine radon. La gran parte degli studi sul radon e sui suoi effetti sulla salute umana si sono concentrati sull'isotopo ^{222}Rn .

1.2 Radiazioni ionizzanti

Le radiazioni vengono divise in *non ionizzanti* e *ionizzanti*. Le radiazioni non ionizzanti sono causate da campi elettrici e magnetici dovuti a:

- elettrodi per la distribuzione della potenza elettrica. La frequenza di questo tipo di radiazioni è 50 Hz e per questa ragione è detta di Bassa Frequenza.
- antenne e telefonini. Queste radiazioni hanno una frequenza molto più elevata, pari a 1,8 GHz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$).

La pericolosità delle radiazioni non ionizzanti è stata investigata mediante molti esperimenti, ma al momento essa non è mai stata dimostrata. Quindi il modo più corretto per inquadrarle, dal punto di vista della loro incidenza come agenti cancerogeni, sta nel dire che “ è possibile che siano deboli agenti cancerogeni, ma anche un debole effetto di questo tipo non è mai stata provato”.

Con la denominazione radiazioni ionizzanti si identifica il passaggio nella materia di particelle (corpuscoli) o fotoni con conseguente ionizzazione della stessa [2].

Il processo di ionizzazione è dovuto alla cessione di energia da parte della radiazione alla materia mentre la attraversa. La particella proiettile con energia E urta uno degli elettroni atomici e gli cede una parte dell' energia δE , strappandolo all'atomo (figura 2).

La particella incidente riemerge con energia $E - \delta E$, mentre l' elettrone atomico acquisisce energia pari a circa δE . A partire dall' atomo complessivamente neutro si vengono ad avere quindi due particelle cariche (a prescindere dalla particella proiettile che rapidamente si allontanerà): l' elettrone con carica -1 e lo ione con carica $+1$. Con il termine di ionizzazione si intende quindi la separazione di un elettrone dall' atomo a cui appartiene. In alcuni casi questo processo può innescare la rottura dei legami fra atomi che sono normalmente legati nella stessa molecola.

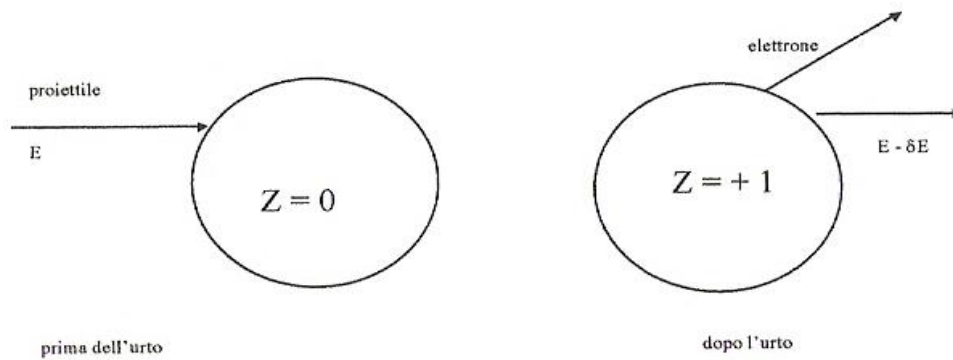


Figura 2: Schematizzazione di un urto: una particella urta un elettrone atomico e lo strappa dall'atomo creando una coppia elettrone-ione.

Si può allora intuire come le radiazioni ionizzanti possano essere pericolose per le cellule di esseri viventi: infatti se l'energia ceduta da una particella mentre attraversa la cellula rompe il legame molecolare di una delle catene di DNA, la cellula può morire oppure autonomamente ripararsi. In questa operazione può anche accadere che il codice genetico venga re-interpretato in modo sbagliato innescando un processo pericoloso.

I principali processi di danno cellulare sono di due tipi:

- danno diretto al DNA mediante la rottura di legami molecolari dovuti alla ionizzazione;
- ionizzazione di una molecola di H_2O , di cui il corpo umano è ricco, e conseguente produzione di radicali liberi che vanno ad attaccare le molecole della cellula.

In sintesi il passaggio di particelle attraverso la materia provoca la ionizzazione di atomi rompendo cioè legami elettrone-atomo. I processi di ionizzazione dipendono dal tipo di particella proiettile. Il risultato netto è comunque che il numero di ionizzazioni dipende dall'energia depositata. Nella materia vivente le ionizzazioni possono provocare un danno nella catena del DNA. Il danno può essere autonomamente riparato ovvero, con probabilità trascurabile, può portare a un difetto biologico permanente.

1.3 Sorgenti di radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti si possono dividere in naturali e artificiali cioè prodotte da attività umane. Nella figura 3, vengono riportati in un grafico a torta, i contributi di radioattività in ambiente, che vengono così riassunti:

- circa il 73% da sorgenti naturali;
- circa il 27% da diagnostica medica;
- 0,11% da test nucleari;
- 0,04 dall' incidente di Chernobyl;
- 0,004 dall' industria nucleare.

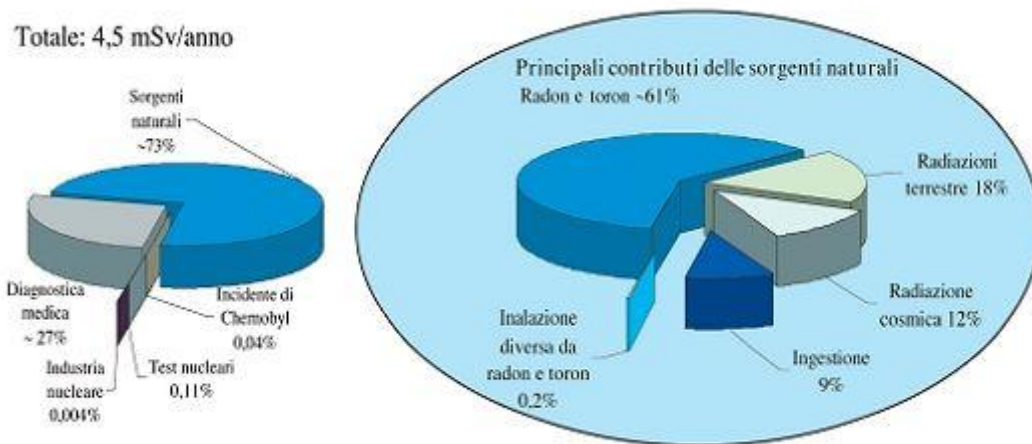


Figura 3: Contributi di radioattività in ambiente [3].

I principali contributi delle sorgenti naturali, possono essere così sintetizzati:

- circa il 61% da Radon e Thoron;
- 18% da radiazioni terrestri;
- 12% da radiazioni cosmiche;
- 9% da ingestione;
- 0,2% da inalazione diversa da Radon e Thoron.

1.3.1 Radioattività naturale

La radioattività naturale è dovuta essenzialmente a raggi cosmici e a decadimenti di elementi radioattivi presenti in natura. Con il termine raggi cosmici si intendono particelle cariche ad alta energia che arrivano dallo spazio. All'ingresso dell'atmosfera i raggi cosmici sono costituiti per lo più da protoni (86%) e da nuclei di elio (13%). A livello del mare i raggi cosmici sono principalmente costituiti da muoni, μ . Hanno uno spettro energetico che, sempre a livello del mare, è centrato attorno a 2 GeV e possono arrivare fino a 10^{20} eV. Il numero approssimativo di raggi cosmici che arrivano al suolo è di circa 1 particella/($\text{cm}^2 \cdot \text{min}$). Quindi una persona sarà attraversata da circa 1200 particelle/minuto. I decadimenti spontanei di elementi radioattivi naturali costituiscono una preponderante frazione della radioattività naturale a cui si è soggetti. L'elemento più comune è il Radon.

Le radiazioni da decadimenti di elementi radioattivi sono note come particelle α , β e γ :

- le radiazioni α sono costituite da quattro nucleoni, due neutroni e due protoni (equivalenti ad un atomo di elio, He). Vengono emesse principalmente da Uranio e Radio con energie basse, tali per cui possono percorrere soltanto pochi decimi di mm in acqua. Sono pericolose soltanto se ingerite poiché altrimenti verrebbero fermate dai vestiti;
- la peculiarità di questo decadimento sta nel fatto che nel nucleo non esistono elettroni liberi, ma solo protoni e neutroni. Quindi il decadimento β non implica semplicemente emissione di nucleoni, ma comporta trasformazioni interne alle specie nucleoniche (Pisent, 1986). Le radiazioni β sono elettroni emessi per lo più da Trizio (isotopo dell'idrogeno) e mediamente possono attraversare alcuni cm prima di fermarsi;
- la radioattività γ ha caratteristiche diverse rispetto alla radioattività α e β . Essa può riguardare anche un nucleo stabile, che per qualche perturbazione esterna è stato eccitato, e quindi si trova ad avere energie in eccedenza rispetto al suo modo di essere "usuale". Se ciò succedesse, esso tende a tornare allo stato "normale", emettendo l'energia in eccedenza sotto forma di radiazione γ , che è radiazione elettromagnetica, come le onde radio, la luce ed i raggi X. La meccanica quantistica dà di questi 4 oggetti (onde radio, luce, raggi X, raggi γ) una descrizione duale, corpuscolare – ondulatoria. Si possono quindi associare a

queste 4 radiazioni, delle particelle in movimento, di massa a riposo nulla ed energia crescente (dalle onde radio ai raggi γ), oppure onde elettromagnetiche di frequenza crescente. Le radiazioni γ sono emesse da molti tipi di decadimenti e possono penetrare per molti cm.

1.3.2 Radioattività artificiale

Con il termine di radioattività artificiale si intendono tutte le radiazioni ionizzanti prodotte dall'attività umana. La più importante è l'irradiazione medica a fini diagnostici e la radioterapia (raggi X e TAC); il suo contributo all'irradiazione totale può variare di molto, essendo dipendente dalle pratiche mediche di ogni Paese.

Altre sorgenti di radioattività artificiale sono:

- elementi radioattivi entrati in atmosfera in seguito a esperimenti atomici, che sono cessati nella metà degli anni settanta del secolo scorso;
- effluenti dell'industria delle polveri nucleari e da centri di ricerca;
- rilascio di radioattività da centrali nucleari (in alcune regioni d'Europa vi sono i residui dell'incidente di Chernobyl, 1986).

Oggi il contributo all'esposizione a radioattività dovuta alla presenza nell'ambiente di contaminazione radioattiva artificiale è molto piccolo, trascurabile rispetto alle sorgenti naturali. L'evento responsabile della maggior parte della contaminazione ambientale prodotto da radionuclidi artificiali è stata la dispersione a grande raggio di sostanze radioattive emesse nell'incidente di Chernobyl. In Italia settentrionale le maggiori ricadute radioattive si ebbero nella prima settimana del maggio 1986, e furono particolarmente intense in concomitanza con le piogge e in alta quota con le neviccate, che esercitarono nei confronti del pulviscolo atmosferico radioattivo una vera e propria azione di dilavamento e trasporto al suolo. Ancora oggi in Bielorussia, su 360000 km², 2200 km² sono radioattivi:

- il 20% dei boschi è contaminato;
- ben 257000 ettari di terreno agricolo sono inutilizzabili;
- vi è un alto tasso di mortalità infantile.

In sintesi, il monitoraggio costante della radioattività artificiale in ambiente è di fondamentale importanza perché rende possibile la tempestiva segnalazione, la valutazione e l'informazione di ogni evento anomalo.

1.4 Parametri della radioattività

Emivita ($t_{1/2}$)

Ogni isotopo radioattivo è caratterizzato da un suo tempo di dimezzamento o emivita. Rappresenta il tempo occorrente perché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo decadano in un altro elemento. È indice della stabilità dell'isotopo.

Vita media

È il tempo medio che deve trascorrere prima che il nucleo decada. Il concetto è molto simile a quello di tempo di dimezzamento al quale è legato dalla semplice relazione:
vita media = $t_{1/2} / \ln 2$.

Costante di decadimento λ

È la probabilità che ha ogni singolo nucleo di decadere nell'unità di tempo. Quindi maggiore è il valore di λ , maggiore è il numero di decadimenti nell'unità di tempo. È specifica per ogni nuclide e determina la velocità del processo di trasformazione. Ha unità di misura t^{-1} . È legata all'emivita dalla relazione: $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

Energia della radiazione

Energia caratteristica della radiazione ionizzante (particelle α o β , radiazione γ).
Espressa in elettronvolt (eV).

Attività

È il numero di disintegrazioni nell'unità di tempo. Questa grandezza è collegata al numero di nuclidi N , ad un istante generico, dalla relazione $A = \lambda N(t)$. $N(t)$ è a sua volta collegato alla diminuzione nel tempo del numero di nuclidi, attraverso l'equazione del decadimento radioattivo: $\lambda N = -dN/dt$ (Bourdon et al., 2003). L'unità di misura utilizzata nel sistema S.I. è il Becquerel (Bq), corrispondente ad una disintegrazione al secondo.

Concentrazione di attività

È l'attività nell'unità di volume ed è misurata in Bq m^{-3} . Nei paesi anglosassoni si usa il picocurie al litro (pCi L^{-1}): $1 \text{ pCi L}^{-1} = 37 \text{ Bq m}^{-3}$. Indica la presenza dell'isotopo nell'ambiente. Per indicare invece la concentrazione di attività in una massa di materiale si utilizza abitualmente il Bq kg^{-1} .

Emanazione, migrazione ed esalazione di radon

Questi parametri si riferiscono all'emissione di radon dal suolo o da un qualsiasi materiale. L'emanazione è il rilascio di atomi di radon dai granuli minerali nei pori e nelle fratture del materiale, dovuto essenzialmente all'effetto di *recoil* legato al decadimento α (Morawska & Phillips, 1993). La migrazione è il movimento degli atomi di radon all'interno del materiale.

L'esalazione è il passaggio del radon dal materiale all'atmosfera.

Coefficiente di emanazione

Rapporto fra il numero di atomi di radon che lasciano il materiale solido e la quantità generata dal campione. Il numero di atomi che lasciano la parte solida è sempre minore del numero di atomi generati (De Martino et al., 1998).

Affinché da un minerale comune possa verificarsi emanazione di radon, esso deve formarsi entro i primi $0,02 \div 0,07 \mu\text{m}$ dalla superficie. Tale è la distanza di *recoil* di un atomo di radon all'istante della sua formazione da un atomo di radio. Il radon che si forma più in profondità rimane imprigionato e decade sul posto nei suoi sottoprodotti solidi (Sasaki et al., 2004).

Il coefficiente di emanazione dipende principalmente dalle caratteristiche naturali del materiale, quali ad esempio porosità (Morawska & Phillips, 1993). e contenuto in acqua (Menetrez & Mosley, 1996).

Tasso di esalazione

Fornisce la misura del radon liberato dall'interno all'esterno del campione, cioè in atmosfera. Viene misurato in Bq h^{-1} . Il suo valore dipende dall'emanazione e dal gradiente di concentrazione tra interno ed esterno del campione (De Martino et al., 1998). Di conseguenza è fortemente influenzato dalle condizioni ambientali (condizioni meteorologiche, pressione, temperatura). Il tasso di esalazione può essere espresso come

mass exhalation rate, misurato in $\text{Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, o ancora come *surface exhalation rate*, misurato in $\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Flusso di radon dal suolo

Definisce la quantità di radon che viene rilasciata dal suolo in atmosfera nell'unità di tempo (passaggio all'interfaccia suolo-atmosfera). Si tratta quindi di un tasso di esalazione per unità di superficie e può essere espresso in $\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

1.5 Rischio radon per la salute

I prodotti di decadimento del radon sono particelle solide, dotate di carica elettrostatica e chimicamente reagenti. Sono attivi quanto più il valore dell'emivita è piccolo. Una parte del radon può venire inalata direttamente e decadere all'interno del corpo umano. La restante parte decade esternamente ed i suoi prodotti di decadimento si vanno a fissare ad oggetti esterni e al pulviscolo atmosferico. Solo quelli fissati al pulviscolo possono essere inalati. Si definisce *rapporto di equilibrio ER* la frazione dei prodotti di decadimento che sono sospesi in aria e quindi inalabili e misurabili, rispetto al totale dei prodotti di decadimento creati. ER varia abitualmente tra 0,3 e 0,7 e dipende da condizioni ambientali quali ventilazione, presenza di polvere, fumo, utilizzo di filtri di aerazione, etc. (ICRP 65, 1994).

Le particelle α emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento (gli isotopi del polonio sono α -emettitori) possono causare una notevole ionizzazione della materia rispetto alle particelle β e alla radiazione γ . Se esposti a radiazioni ionizzanti, le cellule ed i tessuti subiscono danni irreversibili. L'energia della radiazione reagisce con qualsiasi materia venga in contatto. A livello cellulare e molecolare, tali radiazioni causano trasformazione della cellula, variazioni nella struttura cromosomica e mutazioni genetiche (Jostes, 1996). Il carcinoma (cancro epiteliale) polmonare è la malattia associata più diffusa. La valutazione del rischio di cancro provocato dal radon nelle persone si fonda sugli studi effettuati (dalla metà degli anni sessanta) sui minatori di uranio esposti a grosse dosi di radon per lunghi periodi. Da questi studi e successivi è emerso che il radon è la seconda causa di morte per cancro polmonare dopo il fumo e che l'effetto combinato delle due cause è molto maggiore della somma dei due effetti (Darby et al., 2005).

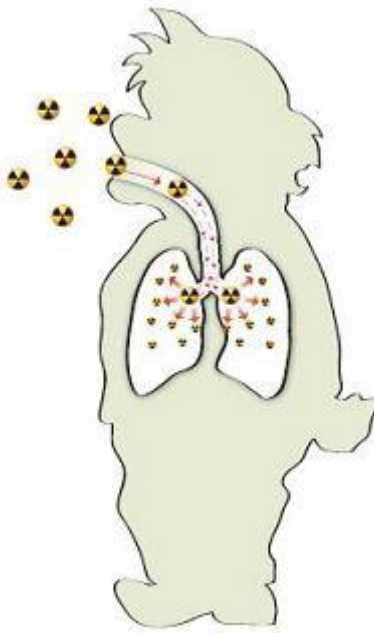


Figura 4. Parte del radon viene inalata direttamente e decade all'interno del corpo umano. La restante parte decade esternamente ed i suoi prodotti di decadimento vengono inalati quando si fissano al pulviscolo atmosferico [4].

Per quantificare il danno biologico delle radiazioni sugli organismi sono state introdotte delle unità di misura che definiscono la *dose assorbita D*, cioè l'energia depositata dalla radiazione nel materiale irradiato per unità di massa. La corrispondente unità di misura nel S.I. è il Gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

Ma l'effetto delle radiazioni, anche a parità di energia, dipende dal tipo di radiazione.

Perciò si è introdotto il *fattore di qualità della radiazione Q*. La grandezza che si considera è detta *equivalente di dose H*, che è legata alla dose assorbita D dalla relazione:

$$H = Q \times D$$

Per elettroni, raggi X e raggi γ , $Q = 1$

Per neutroni e protoni, Q varia da 5 a 20

Per le particelle α , $Q = 20$

Infine si deve tenere conto anche della diversa sensibilità dei vari tessuti e organi alla radiazione. È per questo che viene introdotto il concetto di *dose efficace DE*. L'unità di misura di H e di DE è il sievert (Sv): $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ (ICRP 60, 1990).

Sulla base dei danni osservati nei lavoratori delle miniere, la probabilità di insorgenza di

cancro per esposizione al radon (*fattore di rischio*) viene valutata pari a $4,4 \cdot 10^{-7}$ per ora di esposizione a concentrazione di radon pari a 1000 Bq/m³, in equilibrio con i figli del decadimento (ICRP 65, 1994).

La probabilità del danno conseguente all'esposizione ad una determinata concentrazione di radon nell'aria è dipendente da:

- concentrazione di attività del radon (Bq/m³);
- tempo di esposizione;
- valore del rapporto di equilibrio ER.

La formula generale per calcolare la probabilità di insorgenza di cancro per esposizione al radon [5], al variare dei diversi parametri, è la seguente:

(fattore di rischio) x (tempo di esposizione in h) x (rapporto di equilibrio)

Esempio:

- Concentrazione di attività di radon: 500 Bq m⁻³;
- Tempo di esposizione: 80000 h (vita lavorativa);
- Rapporto di equilibrio: 0,6 (ambiente poco aerato);
- Fattore di rischio $2,2 \cdot 10^{-7}$ (1h);
- Probabilità insorgenza cancro = $2,2 \cdot 10^{-7} \cdot 80000 \cdot 0,6 = 0,01056 = 1,056\%$.

Capitolo 2

Rischio radon indoor e pianificazione territoriale

2.1 Sorgenti

La concentrazione di radon in atmosfera varia da 0,37 a 16 Bq m⁻³ (Dick, 1974), ed è considerata mediamente pari a 8 Bq m⁻³ nelle aree continentali (Harley, 1975). All'interno degli edifici l'aria tende ad avere un maggiore ristagno ed il radon può raggiungere concentrazioni anche molto elevate: il rischio per la salute pubblica è correlato all'esposizione al gas radon in ambiente *indoor*.

La sorgente principale del radon presente in ambiente *indoor* è il suolo sul quale la struttura è costruita (Wiegand, 2001). Il radon penetra attraverso le spaccature che si formano con il tempo, lungo le tubature o attraverso le giunture tra i muri. Gli ambienti seminterrati o al pianterreno sono particolarmente interessati dal fenomeno. Una parte del gas può avere origine direttamente dai materiali da costruzione utilizzati; è possibile definire i tassi di esalazione di radon dei materiali da costruzione, tramite misure di laboratorio (Tuccimei et al., 2009). Anche l'acqua di uso domestico, se arricchita in radon, può rappresentare un pericolo rilevante. Il radon è moderatamente solubile in acqua: il suo coefficiente di solubilità (rapporto della concentrazione del radon in acqua rispetto a quella in aria) a 20 °C è circa 0,25 e aumenta al diminuire della temperatura (Tommasino, 1998).

Secondo un rapporto dell'UNSCEAR (UNSCEAR, 2000), il contributo di radon indoor emesso dal suolo può essere stimato intorno al 60÷70%, mentre quello dai materiali edili è valutato intorno al 15÷20%. Questi valori sono stati ottenuti dall'UNSCEAR con modelli matematici e nell'ipotesi che il contenuto di radioattività dei materiali sia equivalente ai valori medi mondiali (circa 50 Bq kg⁻¹).

2.2 Meccanismi di trasporto e accumulo

Sulla base di studi dettagliati Nero (1989) ha attribuito essenzialmente tutto l'eccesso di radon *indoor*, rispetto al livello *outdoor*, al contributo del suolo. Vengono individuati diversi meccanismi per il trasporto e accumulo di radon in ambiente *indoor*:

- flussi avvevivi (Nazaroff & Nero, 1988);
- diffusione (Nazaroff & Nero, 1988);
- termodiffusione (Minkin & Shapovalov, 2008).

Abitualmente si ritiene che il meccanismo base che porta il gas dal suolo all'interno dell'ambiente *indoor*, sia la differenza di pressione tra l'ambiente interno e quello esterno (è sufficiente una differenza di pochi Pascal): si genera un flusso d'aria (avvezione) da un'area a più alta pressione ad una a più bassa. Normalmente l'interno di un'abitazione è in condizione di depressione rispetto all'esterno; questa depressione è causata soprattutto da due fenomeni: "l'effetto camino" e "l'effetto vento". L'effetto camino è dovuto alla differenza di temperatura tra interno (più caldo) ed esterno della casa, in funzione della quale si genera una differenza di pressione: la depressione interna fa sì che venga richiamata dal terreno aria fredda contenente radon. L'effetto vento è dovuto alla differenza della velocità dell'aria tra esterno ed interno della casa: viene esercitata su una parete una pressione che è funzione della velocità del vento. Inoltre anche il funzionamento di stufe, camini, impianti di condizionamento dell'aria, sistemi d'aspirazione nei bagni e nelle cucine, può far variare le condizioni di pressione e quindi incidere sull'accumulo del gas radon.

Il meccanismo di diffusione invece spiega il movimento del radon in base ad un gradiente di concentrazione del gas tra interno ed esterno dell'abitazione.

Minkin e Shapovalov (2008) sostengono che la differenza di pressione come meccanismo principale di trasporto del radon, è un'ipotesi che non ha sufficienti evidenze scientifiche ed è confutata da numerosi dati sperimentali. I due autori sostengono che un meccanismo dominante può essere la termodiffusione: il movimento del gas radon all'interno di un mezzo poroso non è né viscoso, né diffusivo, ma principalmente un flusso in regime molecolare libero; un gradiente termico induce un trasporto di massa verso l'alto e causa infiltrazione di radon in ambiente *indoor*.

2.3 Fattori di controllo

In relazione a quanto finora esposto risulta evidente che i valori di concentrazione di radon in ambiente *indoor* sono influenzati da una serie di fattori (Tommasino, 1998), che possono essere sintetizzati come segue:

- contributo dal suolo (tipo di substrato geologico) e dai materiali di costruzione, in funzione del loro contenuto in elementi precursori e permeabilità;
- condizioni climatiche (pressione atmosferica, temperatura, vento) e microclimatiche (interno dell'abitazione);
- caratteristiche costruttive, modo d'uso degli edifici, posizionamento dei rivelatori all'interno di essi (piano di misura), condizioni di isolamento dei locali;
- numero di occupanti e abitudini di vita (ventilazione dei locali).

Un fattore importante che può far variare sensibilmente le concentrazioni di radon indoor è la presenza di uno strato superficiale a bassa permeabilità, situazione nella quale il flusso di radon dal suolo è ostacolato mentre viceversa la sua fuga è favorita laddove questo strato superficiale impermeabile non sia presente. Una condizione di questo genere si può verificare naturalmente per la presenza di materiale superficiale a bassa permeabilità o per la formazione stagionale di terreno ghiacciato o copertura nevosa, oppure può essere indotta artificialmente come nel caso della messa in opera di manto stradale.

A ragione dei molti parametri che contribuiscono alla presenza del radon e della loro interazione, la concentrazione in ambiente *indoor* presenta caratteristiche di elevata variabilità sia spaziale (concentrazioni che possono essere molto diverse in abitazioni anche molto vicine o in locali posti a diversi piani di uno stesso edificio), sia temporale (possibilità di differenze tra livelli diurni e notturni e di variazioni stagionali).

2.4 Tecniche di misura

Esistono diverse tecniche per la misura delle concentrazioni di radon. Sono diversi gli isotopi coinvolti e i tipi di radiazione, quindi si possono sfruttare metodi capaci di misurare sia particelle α o β , sia radiazione γ .

La concentrazione è un parametro che può presentare notevoli fluttuazioni legate al ciclo stagionale delle condizioni climatiche, pertanto, nel caso in cui si voglia fare una misura significativa ai fini della valutazione del rischio reale associato all'esposizione, è necessaria la rilevazione di valori mediati su lunghi periodi o almeno la ripetizione delle misure diverse volte in un arco di tempo di almeno un anno. La normativa prevede la misura del valore di concentrazione media annua.

In alcuni casi può essere utile lo studio dell'andamento temporale o un'analisi di dettaglio della distribuzione spaziale delle concentrazioni, come nel caso in cui si vogliono identificare sorgenti o vie di accesso del gas. In questi casi è necessario l'utilizzo di strumentazione che consenta misure rapide e puntuali.

Si possono distinguere i dispositivi di misura in due grandi categorie: attivi e passivi. I dispositivi attivi misurano in modo diretto la radiazione, sono in genere dotati di sistemi di conteggio elettronici, interazione e rivelazione avvengono contemporaneamente. I dispositivi passivi misurano gli effetti prodotti dal decadimento su un materiale atto alla rivelazione con un metodo indiretto, interazione e rivelazione avvengono in fasi distinte. I dispositivi attivi permettono un monitoraggio continuo e quindi una valutazione di dettaglio dell'andamento temporale; i dispositivi passivi consentono misure su tempi molto più lunghi (fino a diversi mesi), fornendo un unico valore di concentrazione integrata sull'intero intervallo di misura.

2.4.1 Dispositivi attivi

Rivelatori allo stato solido (semiconduttori)

La misura è effettuata tramite la raccolta elettrostatica sul rivelatore dei prodotti di decadimento del radon.

Camere a ionizzazione

Sfruttano la capacità delle particelle α emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento di ionizzare l'aria presente in una camera all'interno della quale si genera un campo elettrico.

Camere a scintillazione

L'interno della cella è ricoperto di un materiale (solfuro di zinco nel caso della cella di Lucas) che colpito dalle particelle α emette un certo numero di fotoni, successivamente trasformati in impulsi elettrici e conteggiati.

2.4.2 Dispositivi passivi

Canestri a carboni attivi

Si basano sul processo di adsorbimento del radon sul carbone ed utilizzano la radiazione γ . Possono essere usati per misure di durata inferiore alla settimana.

Dosimetri a termoluminescenza (TLD)

Si basano sulla proprietà di un solido cristallino isolante di emettere luce visibile quando viene riscaldato, dopo essere stato esposto a radiazione ionizzante.

Rivelatori ad elettrete

Sfruttano la capacità delle particelle α emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento di ionizzare l'aria presente in una camera contenente un disco di teflon caricato elettricamente in precedenza, il quale raccoglie gli ioni prodotti e varia la sua carica complessiva.

Rivelatori di tracce nucleari a stato solido (SSNTD)

Questi dosimetri sono costituiti da film di materiali sensibili all'interazione con le particelle α del radon e dei suoi figli di decadimento, che ionizzano le molecole del materiale provocando un danneggiamento fisico (traccia di decadimento). I rivelatori *LR115* utilizzano come materiale il nitrato di cellulosa, i rivelatori *CR39* un polimero plastico appartenente alla classe dei poliesteri. Dopo l'esposizione, il film viene sviluppato, cioè trattato con un processo chimico o elettrochimico, in modo da rendere maggiormente evidenti le tracce. Quindi viene fatto il conteggio delle tracce mediante metodologie ottiche o elettrostatiche. La densità delle tracce permette di risalire, tramite un fattore di calibrazione, al valore della concentrazione di radon integrata sul tempo di esposizione.

2.5 Normative di riferimento

La *Raccomandazione 90/143/Euratom* della Comunità Europea ha fissato due livelli di riferimento di concentrazione media annua del radon *indoor*, superati i quali sono raccomandate azioni di risanamento: 400 Bq m^{-3} per edifici esistenti e 200 Bq m^{-3} (quale parametro di progetto) per edifici da costruire. La concentrazione di radon negli

ambienti domestici non è oggetto di alcuna norma italiana. In materia esistono solo alcune disposizioni regionali.

Il *D. L.vo 230/1995* come modificato dai *D. L.vo 241/2000* e *D. L.vo 257/2001* (recepimento della *Direttiva 96/29/Euratom*) introduce per la prima volta in Italia una disciplina in materia di radioattività naturale. Vengono tutelati gli ambienti di lavoro, gli asili nido, le scuole materne e le scuole dell'obbligo elementare e medie (se ubicati anche in parte in luoghi sotterranei) fissando un livello d'azione pari a 500 Bq/m³ di concentrazione media annua di radon. Viene imposto ai datori di lavoro di misurare il radon in tutti i locali interrati. Inoltre il *D. L.vo 241/2000* impone alle Regioni di giungere entro il 2005 all'individuazione di aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di radon (le *radon-prone areas* definite dalla *Direttiva 96/29/Euratom*), nelle quali l'obbligo della misura si estende anche ai locali non interrati. Le misure devono essere eseguite da un laboratorio idoneamente attrezzato e le valutazioni di dose per le persone devono essere fatte da un esperto qualificato della radioprotezione.

Per quanto riguarda la Regione Lazio, il riferimento è dato dalla *Legge Regionale n. 14 del 31/03/2005 – Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon*. Viene previsto un Piano regionale di prevenzione e riduzione dei rischi connessi all'esposizione al gas radon (art. 2), per il quale la Regione si avvale del supporto tecnico-scientifico dell'ARPA, con l'eventuale collaborazione di enti di ricerca, pubblici o privati, con specifica competenza in materia. I principali interventi previsti dal Piano riguardano: delimitazione delle aree e individuazione degli edifici ritenuti a rischio per la salute della popolazione, prescrizioni e accorgimenti *radon-safe* per l'edificazione su aree a rischio, predisposizione di progetti di recupero e risanamento degli edifici a rischio (ad opera dei Comuni, secondo quanto stabilito dall'art. 4), informazione e divulgazione tra la popolazione dei rischi connessi all'esposizione al gas radon.

2.6 Mappatura del rischio radon

La pianificazione territoriale, attraverso la conoscenza degli elementi di pericolo esistenti in una data area, consente la predisposizione di strumenti urbanistici idonei ad assicurare la salvaguardia della salute pubblica, l'incolumità delle persone e dei beni presenti. Tale impostazione vale per il rischio idrogeologico, sismico, vulcanico,

industriale ecc., non trovando però applicabilità nei confronti del rischio naturale causato dalle emanazioni radioattive del gas radon e dai suoi prodotti di decadimento.

Attualmente il problema dell'inquinamento indoor da radon, nel nostro Paese, è seguito essenzialmente da due figure professionali: il fisico per le misure ed il medico per l'aspetto sanitario. In questo modo non vengono tenute in considerazione tutti gli aspetti legati alla geologia.

Il principale riferimento per le misure di radon *indoor* in territorio italiano è rappresentato da un'indagine svolta nelle 21 regioni dal 1989 al 1998 (Bochicchio et al., 2005), che ha visto coinvolti l'Istituto Superiore di Sanità (ISS), l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le diverse Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (ARPA).

Sono state monitorate un totale di 5361 abitazioni, distribuite in 232 città, posizionando i rivelatori solitamente nella camera da letto principale. Ogni misura ha avuto durata totale di un anno, suddiviso in due periodi di sei mesi: primavera/estate e autunno/inverno. La concentrazione media annua nazionale (media pesata per la popolazione di ogni regione) è $70 \pm 1 \text{ Bq m}^{-3}$. I valori medi più alti sono stati trovati in Lazio, Lombardia, Friuli-Venezia Giulia e Campania (tabella 1). La differenza tra le regioni è da mettere in relazione alla naturale variabilità spaziale del fenomeno, dovuta principalmente al diverso contenuto di uranio nelle rocce e nei suoli e alla loro differente permeabilità cioè a fattori geologici. Un basso livello medio non esclude l'esistenza di aree limitate con alta concentrazione di radon.

Regione	Numero abitazioni	Rn-222 (Bq/m ³) concentrazione media annua	St. error (Bq/m ³)	Abitazioni > 200 Bq/m ³ (%)	Abitazioni > 400 Bq/m ³ (%)
Piemonte	421	69	3	2.1	0.7
Valle d'Aosta	24	44	4	0	0
Lombardia	820	111	3	8.4	2.2
Alto Adige	35	70	8	5.7	0
Trentino	79	49	4	1.3	0
Veneto	364	58	2	1.9	0.3
Friuli-Venezia Giulia	229	99	8	9.6	4.8
Liguria	186	38	2	0.5	0
Emilia-Romagna	369	44	1	0.8	0
Toscana	315	48	2	1.2	0
Umbria	73	58	5	1.4	0
Marche	239	29	2	0.4	0
Lazio	304	119	6	12.2	3.4
Abruzzo	103	60	6	4.9	0
Molise	28	43	6	0	0
Campania	786	95	3	6.2	0.3
Puglia	308	52	2	1.6	0
Basilicata	50	30	2	0	0
Calabria	167	25	2	0.6	0
Sicilia	337	35	1	0	0
Sardegna	124	64	4	2.4	0
MEDIA (pesata per la popolazione regionale)		70	1	4.1	0.9
Totale abitazioni	5361				

Tabella 1: Risultati dell'indagine nazionale (1989 - 1998) sulla concentrazione di radon nelle abitazioni, con suddivisione per regione (Bochicchio et al., 2005). Medie regionali e frazione di abitazioni che in ogni regione supera i due livelli di riferimento indicati dalla Commissione Europea.

I rivelatori sono stati collocati a diversi piani di altezza rispetto al piano campagna. La tabella 2 sintetizza i dati distinti in base al piano di misura. Risulta evidente che la concentrazione media diminuisce dal basso verso l'alto. Gli autori affermano che l'effetto del suolo come sorgente di emissione del radon può essere chiaramente riconosciuto. Inoltre al piano terra la concentrazione media di 89 Bq m⁻³ sale a 104 Bq m⁻³ se non si considerano i casi in cui sono presenti piani interrati nell'edificio, scende a 80 Bq m⁻³ nel caso opposto. Tuttavia talvolta sono state misurate concentrazioni elevate anche a piani più alti del primo o del secondo. Questo può indicare un significativo contributo dei materiali da costruzione, come nei casi in cui, soprattutto nell'Italia centrale, sono stati utilizzati blocchetti di tufo.

Piano	interrato	terra	1°	2°	3°	4°	≥ 5°	totale
Rn-222 (Bq/m ³) concentrazione media	108	89	73	63	56	55	51	71
St. error (Bq/m ³)	14	3	2	2	2	3	2	1
Numero abitazioni	34	1058	2041	1080	473	236	306	5228
Numero abitazioni / totale abitazioni (%)	1	20	39	21	9	5	6	100
Numero abitazioni > 200 Bq/m ³	4	72	95	24	9	4	0	208
Abitazioni > 200 Bq/m ³ (%)	12	7	5	2	2	2	0	4.0
Numero abitazioni > 400 Bq/m ³	0	22	19	3	2	0	0	46
Abitazioni > 400 Bq/m ³ (%)	0	2	1	0	0	0	0	0.9

Tabella 2: Concentrazioni di radon nelle abitazioni suddivisi per piano di misura, indagine nazionale 1989-1998 (Bochicchio et al., 2005).

Le misure di radon indoor permettono di individuare gli edifici con concentrazioni elevate e quindi, dove è opportuno intervenire con adeguate azioni di rimedio.

Nella scelta della soluzione più idonea è importante conoscere la tecnica costruttiva dell'edificio, se la costruzione è a platea (a diretto contatto con il suolo) oppure se vi è la presenza di un vespaio. Le tecniche di riduzione della concentrazione di radon indoor maggiormente utilizzate sono [6]:

- *Sigillatura delle vie d'ingresso*: Con questo metodo si tenta di chiudere tutte le possibili vie di ingresso al gas. La sigillatura può riguardare le fessure, le giunzioni pavimento – parete, le condotte idrauliche e termiche, oppure totale, cioè rivestendo l'intera superficie di contatto con il suolo con membrane di materiale plastico impermeabile al radon.
- *Pressurizzazione dell'edificio*: In questo caso si cerca di incrementare la pressione interna dell'edificio, in modo da contrastare la risalita del radon dal suolo. E' richiesto l'ausilio di un buon impianto di ventilazione.
- *Depressurizzazione del suolo*: È la tecnica maggiormente consigliata nel caso di concentrazione molto elevata. Si tratta di realizzare sotto la superficie dell'edificio un pozzetto (in depressione rispetto al suolo) per la raccolta del gas radon, che viene poi allontanato dall'edificio tramite uno o più canali di aspirazione.
- *Ventilazione del vespaio*: Questo metodo è utilizzato quando è presente un vespaio al di sotto dell'edificio. Aumentando la ventilazione del vespaio si diluisce il radon, riducendone l'afflusso nell'edificio.

- *Tecnica della parete ventilata* [7]: Quando esiste un'intercapedine tra i muri interni ed esterni, i movimenti convettivi naturali o forzati di aria permettono l'allontanamento del gas.

Le misure di radon indoor individuano gli edifici che sono esposti a reali condizioni di rischio. Resta il problema di come individuare il pericolo per le abitazioni di futura realizzazione. Questo problema può essere affrontato mediante approcci di tipo geologico, attraverso l'analisi della geologia locale (litologia, permeabilità dei suoli, copertura e del suolo), misure di concentrazione del radon (e della CO₂) nel suolo e di flusso di gas nel sito dove sorgerà la futura edificazione. L'obiettivo è quello di determinare la pericolosità del radon in base alla concentrazione delle sue emanazioni in ambiente aperto, attraverso studi di primo e di secondo livello. Questi studi preventivi consentono oltre alla classificazione di pericolosità dell'area, anche la predisposizione di interventi tecnici in fase di progettazione di e di cantiere per ridurre l'esposizione al radon indoor, con risparmio significativo rispetto a costo degli interventi di riduzione delle concentrazioni di radon in edifici già costruiti.

2.6.1 Individuazione delle aree a pericolo potenziale per emissioni di radon (studio di primo livello)

Questo studio permette la definizione a piccola scala delle zone esposte al pericolo di emissione di radon, ed è utile per la redazione di un nuovo piano urbanistico comunale o intercomunale. La base di partenza geologica in questo studio è la suddivisione delle aree secondo i tipi di rocce affioranti (unità di roccia). A tal proposito si può citare lo studio avviato dall'ANPA (ANPA, 2000) e denominato PERS (Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo). L'Unità di Roccia viene individuata in base alla litologia, alla geometria (andamento della superficie e spessore), alla presenza di elementi tettonici importanti, alle caratteristiche strutturali e tessiturali, alla fratturazione, porosità, permeabilità e caratteristiche idrogeologiche, e al contenuto di elementi radioattivi (²²⁶Ra) (tabella 3).

PARAMETRO	CONTRIBUTO AL PERS	SUDDIVISIONE	RACCOLTA DATI
1. Litologia (Unità di Roccia, Udr)	Non rientra direttamente nel calcolo del PERS.	È stata suddivisa in Udr in base a genesi e composizione, considerando in particolare quei caratteri che possono influenzare la presenza di ^{238}U e ^{226}Ra .	Rielaborazione della cartografia geologica presente in bibliografia.
2. Concentrazione di isotopi radioattivi nelle rocce	Parametro fondamentale poiché gli elementi radioattivi (in particolare il ^{226}Ra) costituiscono la sorgente da cui è emanato il radon.	3 classi in base al contenuto di ^{226}Ra .	Analisi chimiche di campioni raccolti nelle diverse Udr e confronto con i dati bibliografici.
3. Spessore della Unità di Roccia	Definisce i volumi di roccia in gioco e le quantità totali di elementi radioattivi presenti.	4 classi di spessore.	Rielaborazione della cartografia e delle sezioni geologiche bibliografiche.
4. Fratturazione delle rocce	Parametro importante poiché influenza sia la capacità di esalazione del radon dalla roccia, sia la capacità di migrazione dei gas attraverso un ammasso roccioso.	4 classi , tenendo conto di meso-fratturazione e macro-fratturazione geometria e distribuzione delle fratture. Le classi rappresentano la fratturazione efficace riguardo alla migrazione di un gas in un ammasso roccioso.	Analisi di terreno; analisi di foto aeree; analisi qualitativa della relazione tra reologia dei materiali e distribuzione delle faglie e della deformazione.
5. Carsismo	Parametro importante poiché i reticoli di cavità sotterranee creano vie preferenziali per la migrazione di gas e perché la dissoluzione dei carbonati può concentrare gli elementi radioattivi presenti nelle impurità insolubili.	3 classi in base all'intensità del processo.	Analisi di foto aeree; dati di censimenti delle aree carsiche.
6. Faglie	Parametro importante poiché, in funzione delle sue caratteristiche, può creare vie preferenziali di risalita di gas, può essere sede di migrazione di fluidi, è sempre associata a zone fortemente fratturate e deformate; tutti elementi che influenzano la presenza di radon in superficie.	Le faglie vengono distinte in base al tipo (sovraccorrimiento e faglia diretta o trascorrente) e all'importanza (principale-secondaria). Tali caratteristiche, unitamente ad alcuni parametri del territorio circostante, determinano intorno alla faglia una area di influenza in cui si ha contribuito al PERS.	Analisi di foto aeree; rielaborazione della cartografia geologica e strutturale e controllo con analisi puntuali di terreno.
7. Mineralizzazioni uranifere	Parametro di interesse locale, ma importante poiché ^{238}U e ^{226}Ra costituiscono la sorgente da cui è emanato il radon.	Sono circondate da una area di influenza in cui si ha un contributo al PERS.	Bibliografia.
8. Manifestazioni gassose	Parametro importante perché la circolazione di fluidi ad alta temperatura favorisce la mobilità di ^{238}U e ^{226}Ra e la migrazione di gas verso la superficie.	Vengono distinte in base alle caratteristiche chimiche dei fluidi e sono circondate da una area di influenza in cui si ha un contributo al PERS valutato.	Bibliografia.
9. Sorgenti calde ($T > 20^\circ\text{C}$)	Parametro importante perché la circolazione di fluidi ad alta temperatura favorisce la mobilità di ^{238}U e ^{226}Ra e la migrazione di gas verso la superficie.	Vengono distinte in base alle caratteristiche chimiche dei fluidi e sono circondate da una area di influenza in cui si ha un contributo al PERS valutato.	Bibliografia.
10. Gradiente geotermico	Parametro importante perché nelle aree ad alto gradiente si ha una forte mobilità di fluidi che possono trasportare in superficie il radon formatosi in profondità, se le rocce profonde hanno alto contenuti in elementi radioattivi.	3 classi in base alla variazione della temperatura con la profondità.	Bibliografia.

Tabella 3: Parametri geologici considerati nell'algoritmo per il calcolo del Potenziale di Esalazione di Radon dal Suolo (ANPA, 2000).

Il PERS definisce le Unità di Roccia presenti in tutto il territorio nazionale e attraverso l'utilizzo di Sistemi Informativi Territoriali permette di ricavare elaborati cartografici che individuano e delimitano le aree a rischio potenziale radon.

In uno studio svolto nel Lazio settentrionale (Votaggio et al., 2006), viene proposta una metodologia per la valutazione del massimo flusso potenziale diffusivo di radon dal suolo, da utilizzare per la realizzazione di specifiche mappe. Per la determinazione del flusso di radon (J), vengono utilizzate le seguenti equazioni:

$$J = \eta \cdot \rho_p (1 - \varphi) \cdot {}^{226}\text{Ra} \cdot \sqrt{\lambda_{\text{Rn}} \cdot D_{0,\text{Rn}} \cdot e^{-(6\varphi \cdot R_s + 6R_s^{14}\varphi)}} \quad (1)$$

$$\eta = 0.0154 \cdot \frac{{}^{226}\text{Ra}}{{}^{40}\text{K}} \cdot \varphi + 0.0365 \quad (2)$$

$$R_s = \rho_p (1 - \varphi) \left(\frac{w}{\rho_w \cdot \varphi} \right) \quad (3)$$

in cui:

η = coefficiente di emanazione di radon;

${}^{226}\text{Ra}$ e ${}^{40}\text{K}$ = concentrazioni di attività misurate in spettrometria γ ;

φ = porosità del suolo;

ρ_p = densità della frazione minerale del suolo;

λ_{Rn} = costante di decadimento del radon;

$D_{0,\text{Rn}}$ = coefficiente di diffusione del radon in aria (0,864 m²/d);

R_s = grado di saturazione (in acqua) del suolo;

ρ_w = densità dell'acqua;

w = frazione in peso di acqua nel suolo

Il massimo flusso potenziale diffusivo di thoron dal suolo può essere calcolato allo stesso modo.

In Svezia dal 1982 la *Swedish Radiation Protection Authority* ha introdotto una raccomandazione per la classificazione dei terreni in tre categorie di rischio radon, per ognuna delle quali sono richieste tecniche costruttive diverse (tabella 4).

Classe di rischio	Concentrazione di soil radon (Bq/m ³)	Tecniche costruttive richieste
<i>High risk</i>	>50000	<i>Radon safe construction</i> (fondazione in calcestruzzo più spessa e rinforzata o ventilazione al di sotto della fondazione)
<i>Normal risk</i>	10000-50000	<i>Radon protective construction</i> (nessuna fessura o apertura evidente nella fondazione)
<i>Low risk</i>	>10000	Tradizionali

Tabella: 4: Raccomandazione della *Swedish Radiation Protection Authority* per la classificazione dei terreni in base al rischio radon indoor.

La profondità di riferimento per la concentrazione di radon nel suolo è $0.8 \div 1$ m (Dubois, 2005).

2.6.2 Protocollo per il rilievo di radon nel suolo a scala di cantiere (studio di secondo livello)

Gli studi di secondo livello definiscono la pericolosità in termini di rilascio del radon dal suolo, con una scala di maggior dettaglio rispetto agli studi di primo livello. E' stato proposto un metodo per la classificazione dei siti di costruzione tramite un cosiddetto indice radon (Neznal et al., 2004).

Il *radon index (RI)* fornisce un'indicazione del potenziale rilascio di radon dal suolo di un determinato sito di costruzione, ed è numericamente definito tramite un altro parametro, il *radon potential (RP)*, dalla seguente relazione:

$$RP = \frac{C_A - 1}{-\log k - 10} \quad (4)$$

in cui:

C_A : concentrazione di attività del radon nel suolo (kBq m^{-3}), alla profondità di 0,8 m

k : permeabilità intrinseca (m^2), misurata alla profondità di 0,8 m.

Se $RP < 10$ il *RI* è basso, se $10 \leq RP < 35$ il *RI* è medio, se $RP \geq 35$ il *RI* è alto.

Ad ogni edificio di futura realizzazione è attribuito un *radon index of the building (RB)*, che esprime il grado di protezione dalle radiazioni di cui l'edificio necessita. Tale grado di protezione dipende dalle caratteristiche del suolo e dal tipo di fondazione.

Viene indicato che per un'area di estensione pari o minore di 800 m^2 , sono necessari almeno 15 punti di misura della concentrazione di radon nel suolo. Per un'area di maggiore estensione il campionamento deve avvenire con una griglia di 10×10 m. In aree ad elevata concentrazione di radon è raccomandato un campionamento con griglia di 5×5 m.

La classificazione del sito di costruzione è basata sui valori di concentrazione di radon misurati e sulla loro distribuzione. Per ogni sito si deve ottenere un unico valore di riferimento del *soil radon*: viene utilizzato il metodo del terzo quartile (75% del *data set*). Avendo a disposizione un *data set* di N misure di *soil radon* effettuate, ordinate per

valore crescente, il terzo quartile corrisponde al valore della misura $N_{75} = (0,75 N + 0,25)$, con approssimazione di N_{75} al vicino numero intero più basso. Se il *data set* non è omogeneo, il sito può essere diviso in aree più piccole ognuna con un *data set* omogeneo e per ognuna delle quali si ottiene un valore di *soil radon* con il metodo del terzo quartile. All'intero sito deve essere alla fine attribuito il valore corrispondente al terzo quartile più alto. Il metodo del terzo quartile diminuisce l'influenza di un valore fuori scala o di anomalie locali. La permeabilità intrinseca è misurata negli stessi punti e alla stessa profondità del *soil radon*. Per ottenere il valore di riferimento della permeabilità per l'intero sito di costruzione, si segue lo stesso procedimento illustrato per la concentrazione di radon (metodo del terzo quartile). Nel caso non sia possibile la misura diretta, la permeabilità può essere stimata (descrizione macroscopica del profilo del suolo, stima della frazione fine) distinguendola in bassa, media, alta.

Permeabilità alta	$k > 4,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
Permeabilità media	$4,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \geq k \geq 4,0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$
Permeabilità bassa	$k < 4,0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

Tabella 5: Classi di permeabilità intrinseca (Neznal e Neznal, 2005).

Se si dispone di valori numerici misurati, sia per la concentrazione di radon nel suolo, sia per la permeabilità intrinseca, si può calcolare il valore di *RP* del sito di costruzione tramite l'equazione (4), usando i valori ottenuti con il metodo del terzo quartile. Nel caso in cui la permeabilità intrinseca sia solo stimata, viene valutato il *RI* usando la tabella 6, in cui il valore di concentrazione di radon nel suolo è ottenuto con il metodo del terzo quartile.

Categoria di <i>RI</i>	Concentrazione di radon (C_A) nel suolo (kBq/m^3)		
	basso	$C_A < 30$	$C_A < 20$
medio	$30 \leq C_A < 100$	$20 \leq C_A < 70$	$10 \leq C_A < 30$
alto	$C_A \geq 100$	$C_A \geq 70$	$C_A \geq 30$
	bassa	media	alta
	permeabilità intrinseca		

Tabella 6: Valutazione del radon index (*RI*) con permeabilità intrinseca stimata (Neznal et al., 2004).

Avendo a disposizione un *data set* di misure per una determinata area, è anche possibile utilizzare il valore di *RP* calcolato per ogni punto di misura, per creare una mappatura che consenta di visualizzare la distribuzione spaziale del parametro.

I valori di radon nel suolo (*Soil Radon*) e della permeabilità intrinseca sono influenzati dalla fluttuazione stagionale dei parametri meteo – climatici, in primis dal contenuto d'acqua nel suolo. Si rende necessaria una normalizzazione dei dati alle condizioni medie annue. Si cita in merito un lavoro dove viene suggerito di moltiplicare per 2 gli indici *RP* ottenuti per le misure estive (svolte nei mesi di luglio e agosto) e per 1,5 quelli di giugno e settembre (Castelluccio et al., 2012). In questo modo si evita di sottostimare le concentrazioni di radon nel suolo e relativi indici in questi periodi, rispetto alle concentrazioni medie annue o ai massimi invernali e permette di effettuare le indagini di terreno in qualsiasi periodo dell'anno.

Capitolo 3

Elementi di controllo delle concentrazioni di radon nel suolo

3.1 Contenuto in elementi precursori

Natura del substrato geologico

Il primo fattore che determina il contributo di radon che una roccia, o un suolo che deriva dalla sua alterazione, siano in grado di fornire, è rappresentato dal contenuto in elementi precursori del radon, quindi in uranio e torio, capostipiti delle serie di decadimento radioattivo, e radio, precursore diretto del radon (Sundal et al., 2004). Tale contenuto è determinato in primo luogo dalla natura del substrato geologico e successivamente da tutti quei processi di alterazione delle rocce e trasporto ad opera delle acque, che influenzano la mobilità degli elementi in questione.

Solitamente i litotipi magmatici hanno un maggiore contenuto in elementi precursori del radon. Uranio e torio sono elementi incompatibili e si arricchiscono nel liquido magmatico al procedere della cristallizzazione. Si concentrano nelle fasi minerali di segregazione tardiva. Quindi se ne riscontra una maggiore abbondanza nei graniti e nelle rocce eruttive acide. Nelle rocce piroclastiche le concentrazioni possono variare molto in funzione del chimismo dei magmi originari, essendo sempre maggiore nei magmi evoluti.

Per quanto riguarda i litotipi sedimentari, è soprattutto la mobilità geochimica di uranio e torio nell'ambiente di formazione delle rocce che determina la loro concentrazione. L'uranio tende ad essere insolubile in ambiente riducente, questo fa sì che si determinino concentrazioni elevate in rocce ricche in sostanza organica, come le torbe, e negli ambienti anossici in generale, come i depositi lacustri e palustri. Valori elevati di uranio si rinvencono anche in rocce contenenti fosfati, idrocarburi o in alcuni tipi di rocce originate da fanghi marini.

Nelle rocce sedimentarie che si formano da disgregazione di rocce preesistenti e nelle rocce metamorfiche, le concentrazioni di uranio, torio e radio sono influenzate dai contenuti delle rocce originarie [8].

Mobilità geochimica di uranio, torio e radio

La mobilità geochimica dei radionuclidi delle serie di decadimento dell'uranio e del torio dipende dal loro frazionamento durante i processi di alterazione delle rocce. Si possono produrre, nei suoli e nelle acque superficiali, arricchimenti o impoverimenti di radio (disequilibri radioattivi) rispetto agli altri elementi delle serie di decadimento (Gascoyne, 1992). Le proprietà termodinamiche di uranio e torio nelle soluzioni acquose sono state abbondantemente studiate (Grenthe et al. 1992; Langmuir & Herman, 1980). In condizioni ambientali normali (25°C e 1 atm) l'uranio si presenta in due diversi stadi di ossidazione: U^{4+} e U^{6+} . Sotto condizioni riducenti, l'uranio è nella sua forma tetravalente fortemente insolubile e tende a precipitare in uraninite (ossido di uranio). Contrariamente, in condizioni ossidanti l'uranio si trova nel suo stadio di maggior ossidazione U^{6+} , formando in ambienti acquosi lo ione UO_2^{2+} , facilmente complessato con il carbonato e l'idrossido, e inoltre con il fosfato e il fluoruro. Poiché il carbonato è presente nella maggior parte dell'acqua di superficie, il complesso carbonato di uranio $U(CO_3)_3$ diventa il più comune veicolo di trasporto dell'uranio in natura [9]. La formazione di complessi (di tipo organico e inorganico) dell'uranio aumenta significativamente la sua solubilità e la sua mobilità in superficie e nelle acque sotterranee. Il pH è un importante fattore di controllo.

Il torio si trova in natura solo come catione tetravalente ed è considerato molto insolubile ed immobile, per lo meno a $pH > 3-4$. La mobilità e la solubilità del torio può comunque significativamente aumentare attraverso la formazione di complessi di tipo sia organico che inorganico.

Questi frazionamenti e i differenti disequilibri radioattivi sono anche influenzati dall'adsorbimento dei radionuclidi sulle superfici dei minerali e dalla loro reazione con la materia organica, microrganismi e colloidali. L'adsorbimento dei radionuclidi sulla superficie dei minerali è molto importante e può essere un fattore che limita la mobilità dei radionuclidi in superficie e nelle acque sotterranee.

Molti studi confermano la forte affinità della materia organica con i legami dell'uranio e del torio. Tra gli acidi organici nei suoli, l'acido citrico è un legame più debole rispetto agli acidi umici e fulvici. Esistono numerosi meccanismi di accumulo di uranio ad opera dei batteri (Lovley et al., 1991).

3.2 Processo di *alfa recoil* e coefficiente di emanazione

Durante la formazione di radon a partire dal decadimento radioattivo di radio, viene emessa una particella α (equivalente ad un nucleo di He). L'atomo appena formato è spinto in direzione opposta rispetto all'emissione della particella α . Questo fenomeno prende il nome di *alfa recoil*. Il radon percorre una certa distanza che dipende dal mezzo all'interno del quale si muove. Con il termine di emanazione si intende appunto il rilascio di atomi di radon dai granuli minerali, ai pori e fratture del materiale.

Affinché da un minerale contenente radio possa verificarsi emanazione di radon, esso deve formarsi entro i primi $0,02 \div 0,07 \mu\text{m}$ dalla superficie del granulo (Sasaki et al., 2004).

Se l'atomo di radio viene a trovarsi in prossimità della superficie del granulo e il radon viene proiettato verso l'esterno, esso percorrerà una certa distanza all'interno del poro, pari ad un valore medio di $63 \mu\text{m}$ in aria libera (Sasaki et al., 2004). Il radon che si forma più in profondità rimane imprigionato nel granulo decadendo al suo interno.

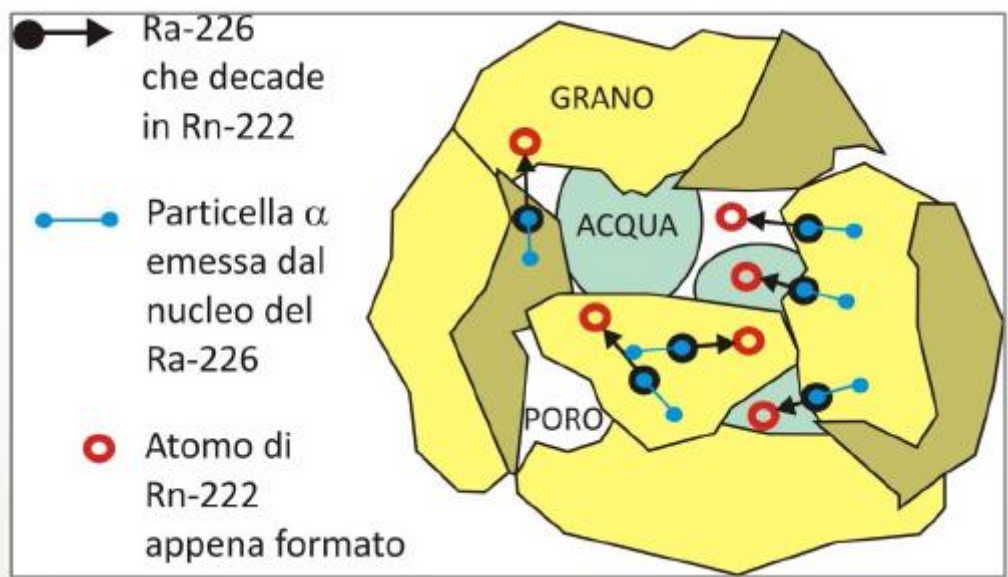


Figura 5: Processo di *alfa recoil*

Il coefficiente di emanazione rappresenta proprio il rapporto tra numero di atomi di radon che lasciano il materiale solido e quantità generata dal campione. E' influenzato da alcuni parametri fondamentali tra cui il contenuto d'acqua, granulometria, porosità efficace e temperatura (Morawska e Phillips, 1993)

3.2.1. Granulometria

Tra la granulometria e il coefficiente di emanazione di radon di un materiale, esiste una correlazione inversa. Infatti le particelle più piccole hanno una superficie di contatto con i pori intergranulari maggiore rispetto a particelle di dimensioni maggiori, a parità di volume occupato (Tuccimei et al., 2006).

In questo modo la probabilità che un atomo di radio si trovi in prossimità della superficie del granulo aumenta. Aumentando di conseguenza il coefficiente di emanazione di radon.

3.2.2 Porosità

La porosità è un parametro che condiziona fortemente il coefficiente di emanazione. Dato che la distanza percorsa dal radon all'interno del poro intergranulare è in media pari a 63 μm in aria libera, diventa importante la dimensione del poro. Se il suo diametro è inferiore a 63 μm c'è una buona probabilità che l'atomo di radon attraversi l'intero spazio del poro e venga inglobato in un granulo adiacente. Inoltre il radon per potersi muovere ha bisogno di spazi comunicanti tra loro: il parametro di riferimento è la porosità efficace.

3.2.3 Contenuto d'acqua e temperatura

La presenza di acqua nei pori di un materiale fa aumentare la probabilità per un atomo di radon di rimanere nello spazio del poro. L'acqua comporta una diminuzione parziale dell'energia di recoil. La distanza media di recoil nei pori con acqua è pari a circa 0,1 μm (Sasaki et al., 2004), rispetto ai 63 μm in aria libera citati nei paragrafi precedenti. Dati sperimentali mostrano come un materiale umido presenta un valore maggiore di tasso d'esalazione di radon rispetto allo stesso in condizione anidre (Tuccimei et al., 2006). Misure di tassi d'esalazione su campioni di suoli essiccati, individuano una correlazione di tipo diretta tra potere emanante e temperatura del suolo (Iskandar et al., 2004). Una possibile spiegazione può essere dovuta al fatto che l'aumento di

temperatura favorisce la diminuzione di adsorbimento del radon sulla superficie dei minerali (Stranden et al., 1984).

3.3 Fattori di controllo sul movimento del radon nel suolo

Nei paragrafi precedenti sono stati descritti tutti quei parametri che regolano la formazione del radon nel sistema suolo a livello microscopico. Una volta formato, il radon si diffonde attraverso i pori e le fratture del suolo e può essere trasportato da correnti d'aria o di gas, o dall'acqua nella quale è solubile (coefficiente di solubilità circa 0,25 a 20 °C). La solubilità del radon in acqua è funzione della temperatura: più è fredda l'acqua, maggiore è la solubilità del radon. A livello macroscopico i fattori che più influenzano la migrazione del gas radon (in generale per qualsiasi tipo di gas di origine naturale) sono: la permeabilità del mezzo all'interno del quale il radon si muove, la presenza di fratture e discontinuità strutturali e la presenza di cavità nel sottosuolo. L'interazione di uno o più di questi fattori può dar luogo a due tipi di movimento di gas nel suolo:

- movimento di tipo diffusivo
- movimento di tipo avveztivo.

Per entrambi i tipi di movimento le concentrazioni dei gas risentono di una certa variabilità stagionale, regolata dai parametri atmosferici (variazioni di temperatura, pressione atmosferica e precipitazioni).

3.3.1 Permeabilità

La permeabilità del mezzo all'interno del quale il radon si muove è parametro fondamentale nel determinare la mobilità del gas (Neznal & Neznal, 2005). In funzione della permeabilità del mezzo, a parità di quantità di radon emanata dalle rocce, può variare notevolmente il flusso dal suolo e di conseguenza la concentrazione di *soil radon* (figura 6). La permeabilità di rocce e suoli è determinata dalla porosità interconnessa e dalla granulometria (permeabilità primaria) e può essere incrementata dalla presenza di fratture, discontinuità strutturali, fenomeni carsici (permeabilità secondaria). Avendo a che fare con la mobilità di un gas, la permeabilità è condizionata

in modo significativo anche dal contenuto d'acqua (acqua all'interno dei pori interconnessi) del suolo, a sua volta determinato da una serie di fattori tra cui intensità e distribuzione delle piogge e oscillazione del livello di falda acquifera. L'aumento del contenuto d'acqua di un suolo causa un aumento della concentrazione di radon (incidenza sul coefficiente di emanazione), ma avvicinandosi al livello di saturazione si può verificare un improvviso decremento nei valori di concentrazione misurati, causato dalla brusca diminuzione del valore di permeabilità del suolo (Menetrez & Mosley, 1996).

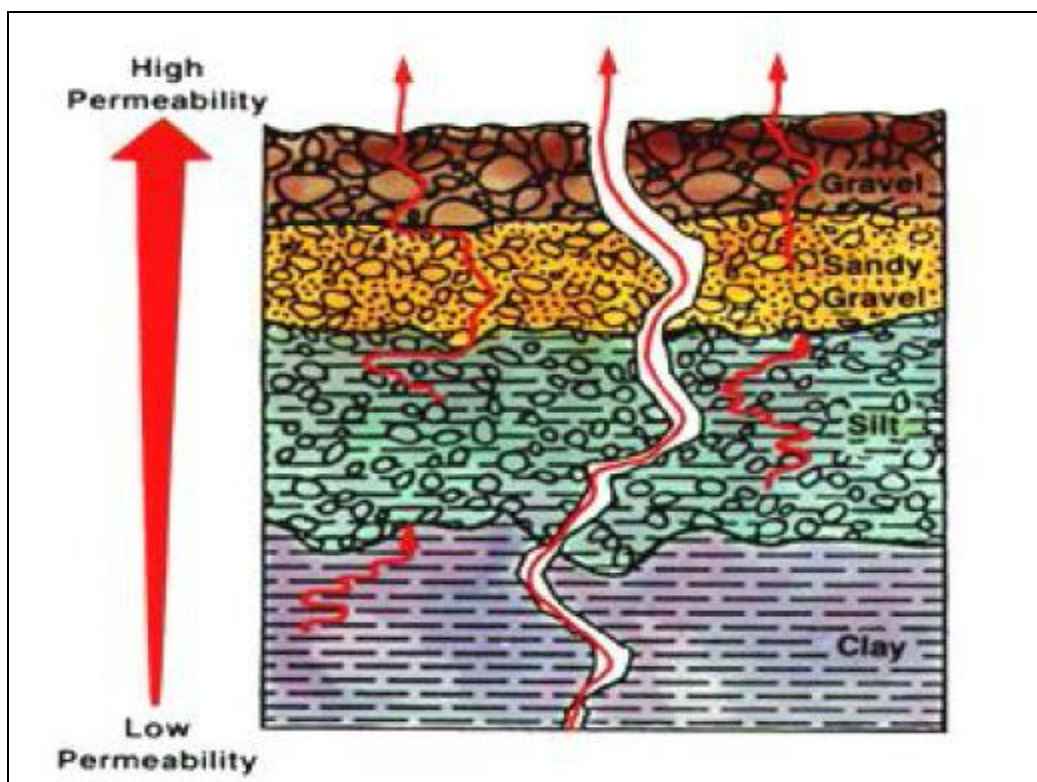


Figura 6: Migrazione del radon in funzione della permeabilità del mezzo attraversato

Molto importante è la permeabilità della porzione più superficiale di suolo (Johner & Surbeck, 2001). La presenza di uno strato superficiale a bassa permeabilità crea una condizione prossima a quella di un sistema chiuso: flusso di radon all'interfaccia suolo atmosfera ridotto al minimo e quindi maggiore possibilità di accumulo del gas all'interno del sistema suolo (Castelluccio, 2010). La caratteristica di bassa permeabilità superficiale può essere dovuta a diverse cause, che vanno dalle proprietà intrinseche del materiale (ad esempio presenza di uno strato argilloso), ad un contenuto d'acqua

prossimo al livello di saturazione, alla presenza di terreno ghiacciato, alla copertura nevosa, di cemento o asfalto (Wiegand, 2001).

Il parametro di interesse, considerando la mobilità di un gas in un mezzo poroso, è la permeabilità intrinseca (k , espressa in m^2), definita come proprietà del mezzo indipendente dalle caratteristiche peculiari del fluido che lo attraversa. Il coefficiente di permeabilità assoluta (K , espresso in m/s) o conducibilità idraulica, parametro usato nella pratica idrogeologica, è legato alla permeabilità intrinseca dalla relazione (Civita, 2005):

$$K = \frac{k \cdot \gamma}{\mu} \quad (5)$$

in cui:

γ : peso specifico dell'acqua (N/m^3)

μ : viscosità dell'acqua ($Pa \cdot s$)

Poiché nelle normali condizioni di giacitura dell'acqua all'interno di un acquifero, γ e μ variano in maniera trascurabile, si può generalmente assimilare K a k (Civita, 2005).

3.3.2 Fratture e discontinuità strutturali

La presenza di fratture e discontinuità strutturali dà luogo ad un trasporto diverso del gas rispetto al lento movimento attraverso i pori del materiale: in questo caso il radon risale con maggiore velocità verso l'interfaccia con l'atmosfera. Inoltre si può verificare un incremento nei valori di radon sia in termini di concentrazione nel suolo, sia di flusso superficiale: infatti la presenza di discontinuità può rendere possibile un apporto di radon proveniente da aree più profonde. Su tali basi è opinione comune considerare le faglie e le fratture come le vie migliori di risalita dei gas verso la superficie. Negli anni settanta alcuni autori riscontrarono che il radon poteva migrare per lunghe distanze, mostrando concentrazioni anomale anche lontano dalla sorgente (Fleischer et al., 1978). Affinché il radon possa raggiungere la superficie terrestre prima di decadere, il suo movimento deve essere legato alla presenza di altri gas (geogas), quali anidride carbonica (CO_2), acido solfidrico (H_2S) e metano (CH_4) che possono fungere da *gas carrier* per il radon. La presenza di anomalie nei suoli di radon e di altri gas è

ampiamente nota in corrispondenza di discontinuità tettoniche (Ciotoli et al., 1993; Etiope e Lombardi, 1995; Kouznetsov et al., 1994 ecc), in aree caratterizzate da attività idrotermale e manifestazioni vulcaniche tardive, dove aumenta la possibilità di circolazione e risalita di fluidi profondi (Carapezza et al., 2010), o in aree caratterizzate dalla presenza di serbatoi geotermici e petroliferi (Cox,1980; Bertrami et al., 1990; Jones e Drozd, 1983; Leythaeuser et al.,1982).

3.3.3 Presenza di cavità sotterranee

La presenza di cavità nel sottosuolo, di origine sia naturale, sia antropica, può incidere in diversi modi sulle dinamiche del gas radon. Innanzitutto un volume vuoto può permettere uno spostamento più veloce del radon; inoltre le cavità possono rappresentare situazioni di elevato accumulo. D'altra parte in prossimità di una cavità potrebbe anche verificarsi una diminuzione dei valori di concentrazione di radon, sia perché si ha una minor quantità di materiale sorgente, sia perché la cavità potrebbe costituire una via di fuga che allontana il gas; il risultato dipende quindi anche dalla morfologia della cavità.

3.4 Meccanismo di trasporto diffusivo

Con il termine di *diffusione* ci si riferisce ad un processo di migrazione dei gas la cui forza motrice è rappresentata da gradienti di concentrazione. Esso avviene perché la massa gassosa tende ad uniformare la concentrazione nello spazio a disposizione (Voltattorni, 2000).

Questo fenomeno è regolato dalla legge di Fick, secondo la quale un costituente di una massa gassosa fluisce nella direzione opposta a quella in cui aumenta il gradiente di concentrazione.

La legge di Fick regola il flusso diffusivo mettendolo in relazione con il gradiente di concentrazione attraverso una costante.

$$f = -D \cdot \frac{dC}{dz} \quad (6)$$

dove:

- f = intensità del flusso diffusivo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$);
- D = coefficiente di diffusione molecolare ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$). Costante propria del gas, varia con la temperatura, pressione e natura del mezzo attraversato;
- dC = variazione della concentrazione del gas nel mezzo attraversato (m^3/m^3) lungo un tratto dz (m).

Considerando che il radon ha un coefficiente diffusivo nei calcari pari a $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Fleischer et al., 1979) è stato stimato che a 15 m dalla sorgente non è più possibile distinguere il radon della sorgente da quello di *background* presente nelle rocce (sorgente nell'intorno del punto di misura). Quindi concentrazioni elevate di radon lontano dalla sorgente, devono essere imputate ad un altro meccanismo di migrazione.

3.5 Meccanismo di trasporto avveztivo

L'avvezione è riferibile ad uno spostamento di materia sotto l'effetto di un gradiente di pressione. Il gas da una zona d'accumulo, posta a non grandi profondità, può migrare verso la superficie attraverso microfratture o ampie fratture, dando origine ad un flusso lungo una colonna continua. Per formare un flusso lungo una colonna continua, un gas deve avere a disposizione, in un certo volume e un certo istante, un numero di atomi elevato. I gradienti di pressione agiscono solo su quei gas che si presentano in concentrazioni sufficientemente elevate, tali da formare un *gas domain* (Gold e Soter, 1980). Per il radon, presente nei suoli con concentrazioni dell'ordine dei ppm, è da escludere la possibilità che risponda da solo ad un gradiente di pressione. Per questo il trasporto avveztivo è collegato alla presenza di *carrier gas*, presenti in maggiori quantità, come: CO_2 , CH_4 , H_2S , H_2O (Richon et al., 2011). Nei suoli, quindi, l'avvezione può essere riferita ad un *geogas*, una miscela gassosa formata da gas primari (*carrier gas*) e da componenti secondari (*trace gases*). La velocità del flusso di un gas lungo una colonna subverticale che satura rocce permeabili, viene stimata utilizzando la legge di Darcy.

$$v = k \cdot \frac{(-\Delta p + \gamma_g)}{\mu} \quad (7)$$

dove:

- v = velocità del gas (m s^{-1});
- k = permeabilità del mezzo (m^2);
- μ = viscosità dinamica del gas (kg ms^{-1});
- Δp = variazione di pressione lungo la verticale z (m);
- γ_g = densità del gas (kg m^{-3}).

Con un meccanismo di trasporto del radon di tipo advettivo, prevale il contributo di sorgenti profonde e le variazioni delle concentrazioni, durante l'anno, possono essere minime (Richon et al., 2011).

3.6 Principali caratteristiche dell'anidride carbonica

L'anidride carbonica è contenuta nell'atmosfera in misura dello 0,035%; risulta essere più abbondante nei suoli, nelle acque sotterranee e nei fluidi di origine profonda. Può avere diverse origini:

- origine organica:
 - attività batterica (decomposizione di sostanza organica)
 - respirazione delle piante.
- origine inorganica:
 - dissoluzione dei carbonati da parte dell'acqua piovana
 - dissoluzioni dei carbonati da parte di acidi prodotti dall'ossidazione di solfuri
 - ossidazione di CH_4 e CO di origine endogena
 - degassamento del mantello e di magmi intrusi nella crosta
 - Reazioni termometamorfiche di decarbonatazione.

L'anidride carbonica è, dopo l'acqua, il volatile principale disciolto nei magmi profondi e, a causa della sua bassa solubilità nei liquidi silicatici a pressioni medio-basse (Gerlach & Graeber, 1985; Pan et al., 1991; Papale et al., 2006), viene rilasciato prima e

in maggior quantità rispetto agli altri volatili. A causa della sua scarsa reattività, la CO₂ raggiunge facilmente la superficie.

La risalita di gas dalla sorgente profonda (magmatica o geotermica) alla superficie avviene attraverso faglie e fratture, ma non sempre produce manifestazioni riconoscibili, in particolare se vi sono acquiferi freddi superficiali che tamponano il flusso di calore dal basso, determinano la condensazione del vapore e dissolvono i volatili più solubili. Le prospezioni del rilascio diffuso di CO₂ dal suolo sono in questi casi preziose, perché la distribuzione delle anomalie di flusso permette di individuare facilmente le principali strutture degassanti. Inoltre è ampiamente accertato il ruolo di *carrier gas* della CO₂ su gas presenti in minori quantità nei suoli (²²²Rn, He, CH₄ tra i principali).

La CO₂ emessa dal suolo può facilmente entrare all'interno di edifici presenti nelle aree interessate da risalita di gas endogeni. Si vengono così a creare seri problemi di salute pubblica anche perché la CO₂ è un gas inodore e insapore più denso dell'aria. Gli effetti sulla salute delle concentrazioni di CO₂ sono riportati in tabella 7, tratta da IVHHN Gas Guidelines sulla base dei dati di Niosh 1981, Faivre – Pierret e Le Guern 1983, Baxter 2000.

Limite di esposizione vol.% in aria	Effetti sulla salute
2-3	Inavvertiti in condizioni di riposo; marcato accorciamento del respiro sotto sforzo
3-5	Accelerazione del ritmo respiratorio; esposizione prolungata provoca cefalea, sudorazione e pulsazione irregolare
7,5	Battito cardiaco accelerato, cefalea, sudorazione, vertigini, respiro affannoso, debolezza muscolare, perdita di capacità mentali, sonnolenza, ronzio negli orecchi
8-15	Cefalea, capogiro, vomito, perdita di conoscenza e possibile morte se non viene immediatamente somministrato ossigeno
10	Sofferenza respiratoria con perdita di conoscenza in 10-15 minuti
15	Concentrazione letale; esposizione a questi livelli intollerabile
≥ 25	Convulsioni e perdita di conoscenza dopo pochi respiri, morte

Tabella 7: Effetti sulla salute dell'esposizione a respirazione di CO₂. Tratto da IVHHN Gas Guidelines.

A differenza del radon indoor che rappresenta un pericolo a lungo termine per la salute pubblica, la CO₂ è evidentemente un pericolo a breve termine.

3.7 Principali caratteristiche dell'acido solfidrico

Lo zolfo costituisce circa lo 0,05% della litosfera; si trova sotto forma di composti nei numerosissimi solfuri e solfati naturali, nei carboni fossili ed è presente negli organismi viventi (Voltattorni, 2000). L'acido solfidrico H_2S (conosciuto anche con il nome di idrogeno solforato) è presente nelle aree geotermiche, termali e in zone interessate da degassamento profondo. E' un acido debole, gas incolore, infiammabile e fortemente tossico. Ha un meccanismo d'azione sull'uomo simile al cianuro, bloccando il trasporto mitocondriale dell'ossigeno nelle cellule determinando così asfissia cellulare, con danni precoci sul sistema nervoso centrale, polmoni e occhi (Balletta et al., 2011). Concentrazioni relativamente basse, dell'ordine dei ppm, possono provocare seri danni a persone che inalano questo gas, come riportato in tabella 8.

Limite di esposizione (ppm)	Effetti sulla salute
0,008-0,2	Soglia olfattiva – Odore di uova marce avvertibile
20	Perdita della capacità di avvertire l'odore del gas. Concentrazione tollerata per alcune ore senza danno
20-50	Irritazione agli occhi e alle vie respiratorie
50	Esposizione prolungata può causare faringiti e bronchiti
60	Esposizione prolungata può causare congiuntiviti e dolore agli occhi
150	Irritazione del tratto respiratorio superiore. Perdita dell'olfatto
250	Edema polmonare con rischio di morte
500	Molto pericoloso. L'evacuazione deve avvenire ben prima di raggiungere questo livello
1000	Perdita di conoscenza; paralisi respiratoria
1000-2000	Intossicazione acuta: perdita di conoscenza, coma e paralisi respiratoria
> 2000	Immediata perdita di conoscenza seguita da morte

Tabella 8: Effetti sulla salute dell'esposizione a respirazione di H_2S . Si ricorda che i sintomi di intossicazione all' H_2S sono: cefalea, vertigini, perdita di equilibrio, diarrea, affezioni gastrointestinali e del tratto respiratorio. Tratto da IVHHN Gas Guidelines, sulla base dei dati di Amore & Hautala 1983, Baxter 2000, Faivre-Pierret & Le Guern 1983, NIOSH 1981, Sax & Lewis 1989, Snyder et al. 1995.

3.8 Variabilità spaziale e temporale del radon nel suolo (*soil radon*)

L'emanazione, la migrazione e l'esalazione del radon nel sistema suolo sono dipendenti dalle numerose variabili illustrate nei paragrafi precedenti, che nella maggior parte dei casi agiscono contemporaneamente, mascherando a vicenda il loro effetto. Ne deriva che la concentrazione di radon nel suolo è un parametro che presenta una significativa variabilità sia nello spazio, sia nel tempo.

Per quanto riguarda la variabilità spaziale, un primo importante elemento è la distanza dall'interfaccia con l'atmosfera, laddove si verifica il rilascio del gas. Trascurando l'influenza di tutti gli altri fattori, l'aumento della distanza dall'interfaccia suolo-atmosfera fa registrare di solito un incremento nei valori di concentrazione. L'influenza della dispersione del radon in atmosfera e l'aumento del valore di *soil radon* ad essa dovuta, si manifestano fino ad una profondità di almeno $1.5 \div 2$ m dal piano campagna. Menetrez e Mosley (1996) stimano che, a causa dell'esalazione in atmosfera, il valore di concentrazione di radon nel suolo subisca una riduzione del 75% nel suolo superficiale e del 35% alla profondità di 2 m. La variabilità areale del *soil radon* è notevole: due punti posti a breve distanza possono avere valori di concentrazione molto differenti, a parità di substrato geologico e condizioni atmosferiche di influenza. Oliver e Badr (1995), utilizzando un approccio di tipo geostatistico, individuano variazioni sostanziali del *soil radon* ad un intervallo di campionamento inferiore ai 20 m. Winkler et al. (2001), usando una griglia di campionamento di 20 x 20 m, determinano un coefficiente di variazione del 26% a 0,5 m di profondità, e del 13% a 1 m.

Neznal et al. (1996) riscontrano un'elevata variabilità per punti di campionamento distanti tra loro 2 m. Questo evidenzia ancora una volta come i molti fattori di controllo e l'estrema eterogeneità naturale di rocce e suoli influenzino pesantemente le concentrazioni di radon.

La variabilità temporale nei valori di concentrazione di *soil radon* è legata ai parametri atmosferici e di conseguenza alle condizioni del suolo, quali contenuto d'acqua e temperatura, che incidono a loro volta sul grado di compattazione e quindi sulla permeabilità. Risulta pertanto evidente che l'entità della variazione nel tempo della concentrazione di radon è funzione della velocità e del grado con cui variano nel tempo i parametri di influenza. La variabilità del *soil radon* può essere significativa già su un intervallo di pochi giorni ed è generalmente considerevole a scala stagionale.

Schubert e Schulz (2002) hanno studiato le variazioni a breve termine (giornaliere) del *soil radon*, in funzione del gradiente di temperatura suolo-atmosfera, della velocità del vento e della pressione atmosferica (contenuto d'acqua del suolo costante). Variazioni significative di *soil radon* sono state rilevate nello strato più superficiale di suolo in funzione dell'inversione del gradiente di temperatura suolo-atmosfera, mentre le variazioni all'interfaccia suolo - atmosfera sono giustificate dall'interazione del gradiente di temperatura con la velocità del vento. Non è stata osservata nessuna influenza della pressione atmosferica. A 30 cm dal piano campagna e a profondità maggiori le variazioni giornaliere di *soil radon* sono trascurabili.

Capitolo 4

Obiettivo della ricerca e stato dell'arte del monitoraggio di gas nel suolo nelle indagini geologiche

4.1 Obiettivo della ricerca e scelta delle aree di studio

Il focus principale di questa ricerca è quello di studiare tutte le dinamiche che entrano in gioco dal momento della generazione del radon nel suolo, al tipo di trasporto (diffusivo o avvertivo) durante la sua risalita in superficie, in aree caratterizzate dalla presenza di cavità sotterranee e sistemi di faglie o fratture. Assieme alle concentrazioni di radon del suolo, sono stati misurati una serie di parametri correlati come:

- ✓ concentrazioni nel suolo di thoron;
- ✓ rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$;
- ✓ tassi d'esalazione di radon e thoron da campioni di suolo e roccia;
- ✓ concentrazione e flussi di anidride carbonica e acido solfidrico;
- ✓ concentrazioni degli elementi precursori del radon e thoron (rispettivamente ^{226}Ra e ^{232}Th) nei suoli e rocce;
- ✓ permeabilità intrinseca e parametri meteo-climatici.

Tramite l'analisi e l'interpretazione dei parametri sopra elencati, in questo lavoro si vuole dare una valutazione complessiva sulle modalità di movimento del radon in relazione alle caratteristiche geologiche delle aree studiate. Inoltre si è dedicata un'attenzione particolare all'isotopo thoron (^{220}Rn), che viene invece trascurata in molti lavori sulla determinazione delle concentrazioni di radon per indagini geologiche. A nostro parere, invece, la concentrazione di ^{220}Rn può rappresentare una delle variabili discriminanti dei possibili meccanismi di trasporto del ^{222}Rn nel suolo. La marcata differenza dei tempi di dimezzamento dei due isotopi (3,825 giorni per il ^{222}Rn e 54,5 secondi per il ^{220}Rn) può infatti darci indicazioni utili sulla profondità della sorgente del gas. Un rapporto isotopico elevato, assieme alla presenza di alti valori di CO_2 , può far pensare ad una sorgente più profonda rispetto al punto di misura e suggerire quindi la presenza di un meccanismo di trasporto del ^{222}Rn di tipo avvertivo. Come vedremo nei

prossimi capitoli, il rapporto radon/thoron di per sé non è sufficiente per discriminare i meccanismi di trasporto del radon. Quindi è assolutamente necessario conoscere la quantità degli elementi precursori, rispettivamente ^{226}Ra per il ^{222}Rn e ^{232}Th per il ^{220}Rn .

In generale, la valutazione dei seguenti punti:

- concentrazioni di ^{222}Rn e ^{220}Rn ;
- rapporti isotopici $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$;
- variazioni stagionali del *soil radon* attraverso monitoraggi prolungati negli stessi punti;
- contenuto di ^{226}Ra e ^{232}Th in suoli e rocce;
- misura della permeabilità intrinseca (k , m^2),

permettono di discriminare i flussi advettivi di radon da meccanismi di tipo diffusivo.

Una volta riconosciuto il meccanismo di trasporto, lo studio è stato completato con la determinazione del *Coefficiente di Arricchimento (C.d.A.)*.

Per la definizione di questo coefficiente, si è partiti dal coefficiente d'emanazione dato dal rapporto fra il numero di atomi che lasciano il materiale solido e la quantità generata dal campione. In un sistema "chiuso" questo rapporto è al massimo uguale 1.

Se vi sono contributi "extra" di radon, proveniente da zone più profonde, si registrerà un arricchimento rispetto al valore di background in assenza di flussi advettivi.

Le aree individuate per il presente studio (figura 7) hanno tutte alcuni caratteristici elementi geologici, in particolare:

- Valle della Caffarella - Tor Marancia: sono aree verdi all'interno del territorio comunale di Roma e fanno parte del Parco Regionale dell'Appia Antica. Presentano diverse cavità sotterranee che sono state monitorate per verificarne l'influenza sulle concentrazioni dei gas in superficie.
- Vigna Fiorita: area nel territorio comunale di Ciampino, non lontana dalla zona di Cava dei Selci, interessata da un intenso degassamento profondo. In particolar modo le nostre indagini sono state rivolte alla conferma di una faglia sepolta, presente nella zona.
- Terme della Ficoncella: sistema termale all'interno del territorio comunale di Civitavecchia. Il substrato roccioso è rappresentato da travertino.

Durante l'ultimo anno di dottorato, si è considerato opportuno aggiungere alle tre aree precedentemente elencate, anche l'area di Fiumicino. Questa scelta si deve al fatto che,

durante l'estate del 2013, due perforazioni molto vicine effettuate per la messa a terra di un cavo elettrico nella zona di "Coccia di Morto" (confinante con la parte sud dell'aeroporto di Fiumicino) hanno causato la formazione di un piccolo vulcanetto di fango, con risalita di gas (principalmente anidride carbonica, con subordinati metano e acido solfidrico).

Questa zona di Fiumicino è stata quindi inserita nel progetto di ricerca, in quanto potrebbe dare altre informazioni sul movimento del radon e thoron, in relazione a risalita di gas profondi in situazioni puntuali. I monitoraggi effettuati in questa zona a partire da settembre 2013, sono stati effettuati nell'intorno del punto principale interessato dalla emissione di gas, situato in una rotonda stradale non pavimentata di circa 60 m di diametro. Altre indagini hanno riguardato un terreno a nord della rotonda. L'intento per il futuro è quello di ampliare il monitoraggio in altre zone di Fiumicino, dove già in passato si sono verificati incidenti di questo tipo (Barberi et al., 2007) in zone dove non si avevano notizie di emissione di gas profondi in superficie.



Figura 7: Aree di studio all'interno della Regione Lazio

In tutte le aree sono state posizionate stazioni fisse dove sono state eseguite misure con una cadenza mensile, in modo da apprezzare le variabilità stagionali dei parametri studiati.

Nei capitoli a seguire verranno descritti in modo dettagliato tutti gli studi effettuati nelle diverse aree con il relativo inquadramento geologico. Di seguito illustrerò invece alcuni esempi applicativi del monitoraggio dei gas del suolo in indagini geologiche.

4.2 Applicazioni dello studio dei gas nel suolo

La prospezione di gas nel suolo permette di ottenere informazioni utili alla comprensione di quei processi geologici che, nel sottosuolo, danno luogo alla produzione e migrazione dei gas. Uno degli aspetti più importanti di queste misurazioni consiste nel fatto che, data l'estrema mobilità dei gas, specie gassose di origine profonda possono pervadere i pori del suolo dando origine ad aloni di dispersione in superficie. I primi lavori sull'applicazione dello studio dei gas nel suolo, sono stati effettuati in Germania e nell'ex Unione Sovietica per la ricerca petrolifera (Laubmeyer, 1931). Negli anni a seguire questi studi hanno acquisito importanza sia nelle prospezioni petrolifere che in quelle minerarie. Basti pensare alla ricerca di uranio negli anni '50 e primi anni '60, basata sull'individuazione di radiazioni α dovute al decadimento radioattivo del radon (Tanner, 1969). In questi primi studi sono state inoltre riportate le prime osservazioni sulle modalità di migrazione del radon nel sottosuolo. Ad oggi la prospezione di una vasta gamma di specie gassose naturali (CO_2 , CO , O_2 , H_2S , CH_4 , N_2 , H_2 , He , Ar , ^{222}Rn , Xe ecc) viene utilizzata nelle ricerche geologiche applicate, come:

- ricerche geotermiche e minerarie (target su idrocarburi, uranio e solfuri metallici);
- studi idrogeologici (interpretazione di mixing tra acque appartenenti a circuiti differenti);
- ricerche rivolte alla valutazione della pericolosità sismica e vulcanica (studio dei fenomeni precursori, individuazione di faglie attive e zonazione sismica);
- indagini strutturali (rivolte all'individuazione di faglie sepolte);
- indagini ambientali.

Fanno parte di quest'ultimo punto l'individuazione di aree esposte al rischio di radon indoor, aree a rischio di emissioni nocive, aree a rischio inquinamento per migrazione di gas da discariche di rifiuti solidi urbani e per la presenza di serbatoi interrati di carburante. Lo studio dei gas nel suolo può essere condotto anche per l'individuazione di siti idonei per lo stoccaggio di rifiuti.

4.3 Gas endogeni in corrispondenza di faglie attive

I gas endogeni costituiscono un potente mezzo per lo studio di alcuni importanti fenomeni geologici che avvengono sulla Terra. Le discontinuità tettonite di carattere distensivo, rappresentano grandi canali di migrazione utilizzati da una quantità di fluidi e gas, per raggiungere la superficie terrestre. L'utilizzo della tecnica di prospezione dei gas nel suolo per l'individuazione di faglie e fratture è stata proposta sin dagli anni '30 e '40 (Illing, 1933; Muskat, 1946). Da allora sono molti gli autori che hanno dimostrato le relazioni esistenti tra i gas e i sistemi di faglie e fratture che agiscono come vie preferenziali per la loro fuga. L'analisi delle anomalie superficiali dei gas del suolo, può consentire di identificare le strutture responsabili della loro risalita e definirne l'attività, la geometria, l'area di influenza soprattutto nei casi di strutture non direttamente visibili in superficie. Il radon riveste sicuramente un ruolo fondamentale nelle prospezioni di gas nel suolo per indagini strutturali (Ambronn, 1921). Numerosi lavori hanno permesso di individuare anomalie di radon in corrispondenza di faglie profonde coperte da potenti coltri sedimentarie. A tal riguardo si può citare un lavoro di Ciotoli et alii del 1998, dove è stata studiata l'affidabilità del metodo di prospezione dei gas del suolo per l'individuazione di sistemi di faglie o fratture coperti da coltri di sedimenti incoerenti nella Piana del Fucino. La zona è caratterizzata dalla presenza di una fitta rete di fratture superficiali e sepolte, attive o riattivate durante il terremoto di Avezzano del 1915 (Ms 7,0). Tale studio ha permesso di dimostrare come le concentrazioni di radon delineano in maniera molto accurate le strutture più attive, che sono presenti nel settore orientale del Fucino, rispetto al settore più occidentale. Uno studio simile è stato effettuato anche nella Valle dell'Ofanto dove le principali anomalie di gas nel suolo (elio, radon e anidride carbonica) sembrano coincidere con le direzioni desunte statisticamente dall'analisi del campo di fratturazione della stessa area (Ciotoli et al., 1994).

4.4 Studio dei gas del suolo per individuare potenziali sistemi geotermici

Il flusso termico terrestre, che rappresenta il calore trasmesso per conduzione dalle parti profonde del mantello verso la superficie, è quasi costante sia sui continenti, sia sul fondo degli oceani. Esistono però zone in cui questo flusso è maggiore, come le dorsali oceaniche, dove è da quattro a sei volte più elevato, in relazione alla continua risalita di magmi basaltici. Sui continenti le anomalie di flusso termico si riscontrano in tutte le aree dove le masse magmatiche risalgono da zone profonde della crosta, o del mantello, arrivando in superficie (vulcani) o arrestandosi in prossimità di questa (intrusioni). Il calore del magma riscalda le rocce circostanti e i fluidi che circolano al loro interno. Nella risalita alla superficie i fluidi termali danno origine a sorgenti calde, geysers, soffioni e fumarole.

Molte volte l'arrivo in superficie dei fluidi caldi profondi è impedito almeno per una gran parte di essi, dalla presenza di coperture di rocce impermeabili; in questo caso i fluidi termali ristagnano in volumi sottostanti di rocce permeabili (serbatoi geotermici) dove possono sviluppare sistemi di convezione termica. Dalle faglie che connettono il serbatoio con la superficie, possono avvenire fughe di fluidi caldi che vengono a giorno mescolati con acque fredde di circolazione superficiale (Gisotti et al., 2004) ma che producono anomalie nell'emissione di gas. A tal proposito si cita un lavoro condotto dall'INGV di Roma (Voltattorni et al., 2003) che ha riguardato studi geochimici con misurazioni di concentrazioni e flusso di specie gassose (Rn, He, H₂, O₂, N₂, CO₂, CH₄ e H₂S) mirate all'identificazione di un sistema geotermico attivo, nell'area di Tetilan (Nayarit, Messico). Da precedenti studi l'area era considerata ospitare un possibile sistema geotermico nascosto, in quanto non erano presenti manifestazioni superficiali come fumarole o sorgenti termali. I risultati ottenuti hanno evidenziato una generale risalita dei gas controllati dalla presenza di faglie e fratture presenti nella zona. In questo modo è possibile anche discriminare zone a maggiore permeabilità da poter usare per lo sfruttamento del sistema geotermico.

4.5 Emanazioni tossiche

Il lento e continuo rilascio di specie gassose come CO₂, H₂S e radon in aree geologicamente attive, può rappresentare un pericolo per la salute delle persone che vivono in quelle zone. Possiamo fare riferimento al riguardo alla fascia tirrenica della regione Lazio, dove sono presenti quattro apparati vulcanici quaternari: i Colli Albani (o Vulcano Laziale), i Monti Sabatini, i Monti Cimini e i Monti Vulsini che contengono tutti zone note da tempo per la forte emissione di gas naturali di origine endogena. Il componente gassoso principale in queste aree è l'anidride carbonica, dove nei punti a maggiore emissione può raggiungere concentrazioni superiori al 90% in volume. Localmente le concentrazioni di idrogeno solforato (acido solfidrico) possono raggiungere concentrazioni elevate che rappresentano un serio pericolo per persone e animali a causa dei bassi valori delle concentrazioni pericolose di questo gas tossico (tabella 7, paragrafo 3.7). Il radon che è comunque presente di per sé nelle zone dove affiorano rocce di origine vulcanica, può raggiungere concentrazioni elevatissime nelle zone caratterizzate da flussi elevati di CO₂ dal suolo vista la funzione di *carrier gas* dell'anidride carbonica. Oltre ai punti caratterizzati da emissioni discrete di gas (fumarole, sorgenti termali, acque fredde con bolle di gas) facilmente identificabili, il pericolo può essere elevato anche nelle zone dove questi gas vengono rilasciati in modo diffuso, senza dar luogo a manifestazioni evidenti, eventualmente anche all'interno di centri urbanizzati. Una di queste aree è senza dubbio quella dell'abitato di Cava dei Selci (frazione del Comune di Marino), presente nel settore settentrionale dei Colli Albani. La zona è soggetta a continue emissioni di gas dal suolo o da pozzi, ovunque è stata rimossa o attraversata la copertura superficiale impermeabile (Carapezza et al., 2000, 2003, 2005, 2007, 2012; Annunziatellis et al., 2003; Beaubien et al., 2003). Il rilascio di gas dal suolo è in stretta correlazione con le crisi sismiche dell'area (Quattrocchi e Venanzi, 1989; Chiodini e Frondini, 2001; Funicello et al., 2002) ed il verificarsi di incidenti mortali a persone e animali ha richiesto un monitoraggio continuo delle specie gassose in atmosfera, nel suolo e all'interno di abitazioni. I risultati ottenuti dai lavori effettuati dai diversi gruppi di ricerca, mettono in risalto il rischio a cui le popolazioni degli abitati di Cava dei Selci, di Santa Maria delle Mole e del consorzio Vigna Fiorita, sono soggette per la risalita di gas endogeni. E' importante differenziare il rischio a breve termine causato da CO₂ e H₂S, dal rischio a lungo

termine dovuto all'esposizione ad alte concentrazioni di radon. Inoltre gli abitanti locali e le amministrazioni devono avere una giusta comprensione dei meccanismi che guidano questi gas verso la superficie in modo da esercitare una migliore e più accurata gestione territoriale. Occorre anche avere consapevolezza di come il pericolo gas esista in tutte le costruzioni interrato, cavità sotterranee, pozzi e di come l'impermeabilizzazione di aree verdi nell'intorno di fabbricati può favorire l'accumulo dei gas al loro interno.

Oggi una vasta parte della zona è interessata da una regolamentazione della Regione Lazio (Determina n°920, 2012) per la realizzazione eventuale di nuovi edifici. Secondo la Determina prima di qualsiasi costruzione bisogna realizzare:

- una campagna di misure di flusso di anidride carbonica dal suolo, determinando il valore di fondo e le classi utilizzando metodi geostatistici;
- sulla base della campagna di flusso, una seconda campagna di misure di concentrazione di CO₂ nel suolo, ad una profondità compresa tra i 50 e gli 80 cm dal piano campagna.

Tralasciando la distribuzione spaziale delle misure, risultano discriminanti a livello costruttivo le concentrazioni di CO₂ nel suolo.

Per valori compresi tra 1 vol.% e 2 vol%, possono essere costruiti piani seminterrati opportunamente areati. Nelle zone con concentrazione di CO₂ compresa tra il 2 vol% ed il 5 vol%, gli edifici dovranno essere costruiti con tecniche a pilotis, senza piani interrati e seminterrati. Nelle zone con punti di misura di concentrazione di CO₂ maggiori del 5 vol%, è vietata qualsiasi edificazione. In ogni caso le tecniche edificatorie, dovranno garantire concentrazioni indoor di CO₂ inferiori allo 0,25 vol%. Le indagini appena descritte non comprendono misure delle concentrazioni di radon nel suolo. Se il radon fosse ricompreso nelle indagini preliminari sul suolo (come lo studio a livello di cantiere descritto nel sottoparagrafo 2.6.2), se ne potrebbe stabilire la pericolosità in termini di rilascio dal suolo, come viene fatto in altri Paesi come ad esempio nella Repubblica Ceca.

Capitolo 5

Inquadramento geologico delle aree monitorate

5.1 Le aree di studio di Valle della Caffarella e Tor Marancia

Le possibili relazioni esistenti tra concentrazioni di radon nel suolo e la presenza di cavità sotterranee, sono state investigate in due aree verdi presenti all'interno del territorio comunale di Roma. I siti fanno parte del Parco Regionale dell'Appia Antica e ricadono in una zona prossima al centro di Roma (figura 8), all'interno dell'elemento 374113 (scala 1:5000) del foglio Roma della Carta Tecnica Regionale del Lazio.

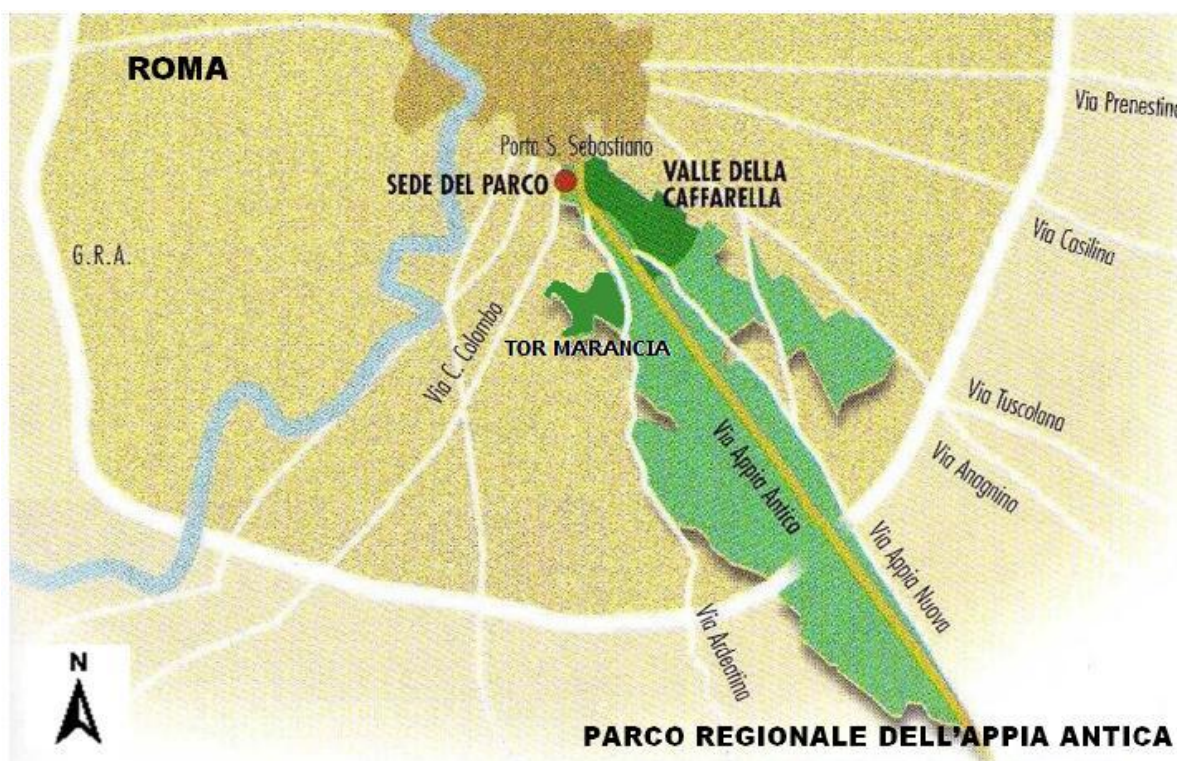


Figura 8: Parco Regionale dell'Appia Antica.

Essendo aree naturali protette, di facile accessibilità e ubicate all'interno di zone urbanizzate, rappresentano località particolarmente idonee allo svolgimento della ricerca. Inoltre nell'area della Caffarella sono disponibili una notevole mole di dati, a partire dal 2008, sulle concentrazioni di radon nel suolo in alcuni punti. In figura 9 si

riportano le concentrazioni di radon nel suolo misurate in una stazione fissa di monitoraggio, relazionati alla piovosità mensile dell'area. Questi dati sono stati utilizzati nella tesi di laurea dello scrivente e per un progetto di dottorato di ricerca (Castelluccio, 2010).

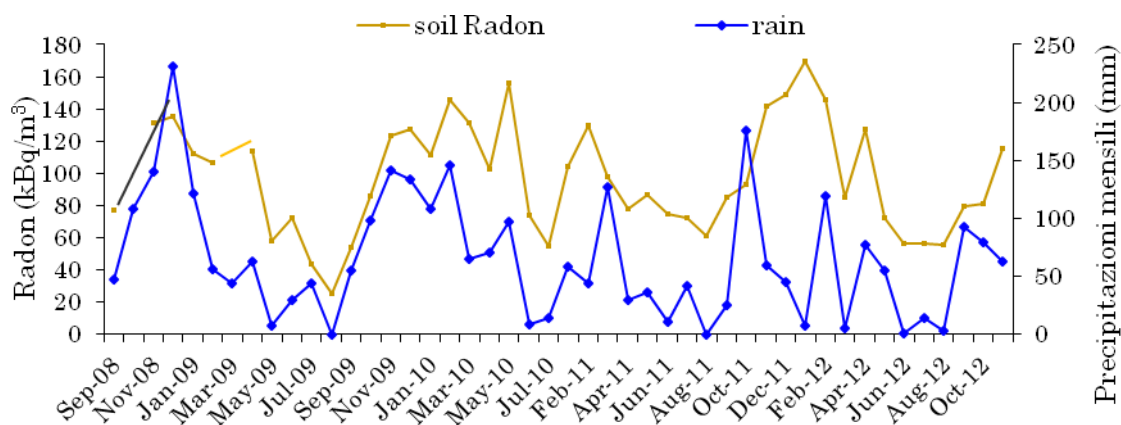


Figura 9: Variabilità temporale delle concentrazioni di radon nel suolo e della piovosità, in una stazione fissa (RPS3) di monitoraggio.

La geologia delle due aree è caratterizzata dalla presenza di prodotti dell'attività vulcanica dei Colli Albani e da depositi alluvionali recenti. Inoltre sono presenti diverse cave, aperte in passato sin da epoca romana e più recentemente utilizzate come fungaie, che rendono i due siti molto adatti per l'indagine sulle relazioni tra concentrazioni di radon nel suolo e presenza di cavità sotterranee poco profonde.

Nei paragrafi seguenti viene presentato un inquadramento geologico di queste aree, partendo dalla descrizione dell'attività vulcanica dei Colli Albani.

5.1.1 L'attività vulcanica dei Colli Albani

Il distretto vulcanico dei Colli Albani sorge a S delle unità meso-cenozoiche alloctone dei Monti della Tolfa, a N della piattaforma carbonatica mesozoica dei Monti Lepini ed in prossimità delle successioni meso-cenozoiche dei Monti Prenestini e Tiburtini.

La sua formazione è collegata allo sviluppo della catena appenninica a sua volta connesso all'apertura del bacino del Tirreno. Questo provocò un assottigliamento della crosta terrestre e la conseguente formazione di fratture nelle quali il magma poté risalire

fino a raggiungere la superficie. Lo stesso fenomeno era già avvenuto per la formazione dei complessi vulcanici dei monti Cimini, del lago di Vico, dei monti Vulsini e dei monti Sabatini. Il Vulcano Laziale aveva una base di 60 km di diametro ed emise circa 200 chilometri cubici di materiali, che contribuirono, insieme ai prodotti del Vulcano Sabatino (attivo in quello stesso periodo), a sbarrare il corso del Tevere (figura 10). A causa della formazione di questa diga naturale il fiume formò un grande lago di sbarramento e solo in seguito si aprì un nuovo percorso fra i materiali emessi dai due vulcani. Nel tempo si alternavano periodi di violenta attività eruttiva e modeste fasi effusive.

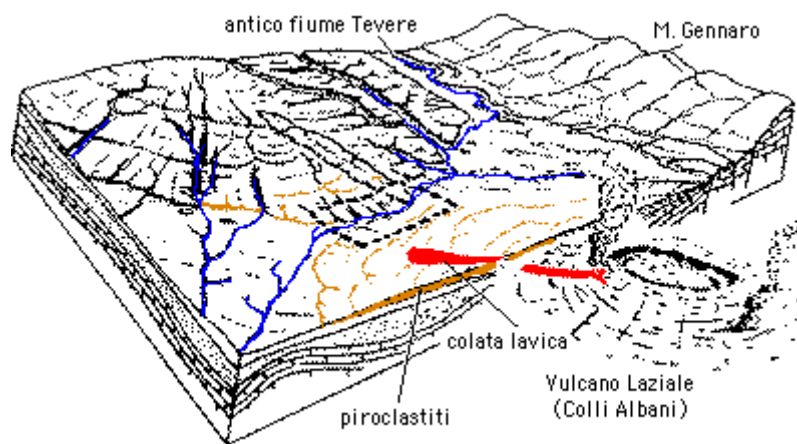


Figura 10: Nascita del Vulcano Laziale (disegno di M. Parotto)[4].

Il vulcano si è sviluppato al di sopra di un substrato sedimentario costituito da unità delle successioni pelagiche mesozoiche con testimonianze di una transizione esterna nelle parti più meridionali (Funiciello & Parotto, 1978). L'attività vulcanica dei Colli Albani o Vulcano Laziale, ha inizio circa 600 ka fa ed è attualmente in stato di quiescenza.

Il chimismo dei prodotti dei Colli Albani varia da magmi mafici, K-foidici, tefitici basalti, è fortemente ricco in potassio e sottosaturo in silice. Il vulcano ha avuto attività di tutti i tipi, da parossismo esplosivo pliniano, a eruzioni di tipo stromboliano e hawaiano, ad attività effusiva, includendo eventi freatomagmatici a grande e piccola scala.

Il primo periodo di attività, denominato periodo del "Vulcano Laziale", è durato da circa 600 ka a 355 ka. Durante questo periodo l'attività è stata in prevalenza esplosiva, con un tasso eruttivo medio di $1 \text{ km}^3/\text{ka}$. Almeno 7 ignimbriti di volume da medio a

grande, sono state eruttate e messe in posto su un'area maggiore di 1600 km². L'attività ha dato luogo all'edificio del Vulcano Laziale, costituito da una struttura ignimbritica dalla geometria a scudo e un complesso calderico di circa 8 x 8 km² e da (figura 11).

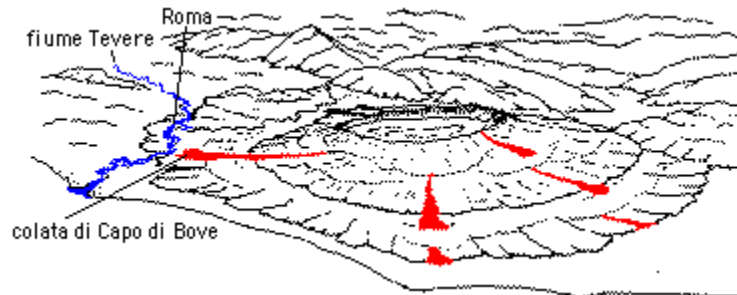


Figura 11: La caldera del Vulcano Laziale (disegno di M. Parotto)[4].

L'attività del Vulcano Laziale può essere suddivisa in una “successione dei Tufi Pisolitici” (circa 600 ÷ 500 ka), nella quale le ignimbriti sono dominate da un freatomagmatismo su larga scala, associato alla probabile presenza di un primo lago intracalderico, e in una sovrastante “successione di Pozzolane e Tufi”, nella quale le ignimbriti mostrano una dominante frammentazione magmatica, probabilmente come risposta al progressivo esaurimento del lago calderico. Le ignimbriti maggiori sono state eruttate con un intervallo medio di circa 40 ka. Dopo ogni eruzione parossistica, l'attività è stata in prevalenza effusiva con ridotta componente esplosiva e concentrata lungo sistemi di fratture peri-calderiche, formando un complesso di coni di scorie e dorsali di lava; eruzioni maggiormente esplosive sono avvenute da aperture intracalderiche (Giordano et al., 2010).

L'eruzione più importante del Vulcano Laziale ha portato alla messa in posto di un'imponente colata piroclastica (nota come “Pozzolane Rosse”), che raggiunge anche i 90 m di spessore, con un volume minimo di materiale emesso di circa 38 km³ (De Rita et al., 1988). L'ultima grande eruzione del Vulcano Laziale si è verificata circa 355 ka fa, con la messa in posto delle ignimbriti dell'unità di “Villa Senni”. In seguito a questa eruzione e al nuovo collasso dell'area calderica e peri-calderica, ha origine il complesso Tuscolano-Artemisio, grazie alla presenza di sistemi di fratture peri ed extracalderiche. Il complesso neformato è composto in prevalenza da coni di scorie, lave e da uno stratovulcano intracalderico denominato Faete (figura 12).

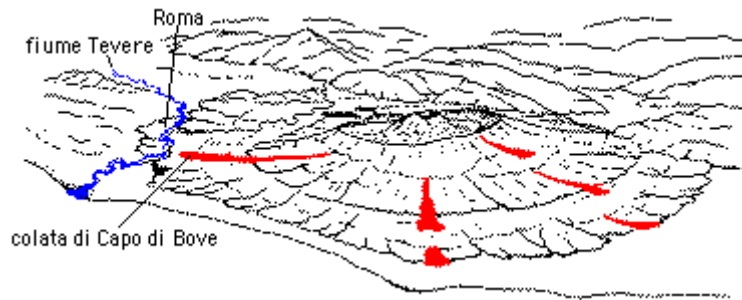


Figura 12: Formazione del complesso Tuscolano-Artemisio (disegno di M. Parotto)[4].

Questi edifici si sono messi in posto in un periodo che va da 355 ka a 180 ka, denominato “Tuscolano-Artemisio-Faete”, durante il quale si osserva una diminuzione del tasso eruttivo medio.

L’attività peri-calderica inizia lungo il sistema di fratture ad anello nel settore N ed E (Tuscolano- Artemisio), e a partire da circa 300 ka migra progressivamente verso N in area extracalderica (settore Pantano Borghese), e verso W nel settore delle fratture peri calderiche di S. Maria delle Mole.

A partire da circa 200 ka ha inizio il periodo di attività chiamato “Via dei Laghi”. L’attività vulcanica si concentra nel settore più a W dell’area peri-calderica e si verificano una serie di eruzioni freatomagmatiche di volume moderatamente ridotto (figura 13).

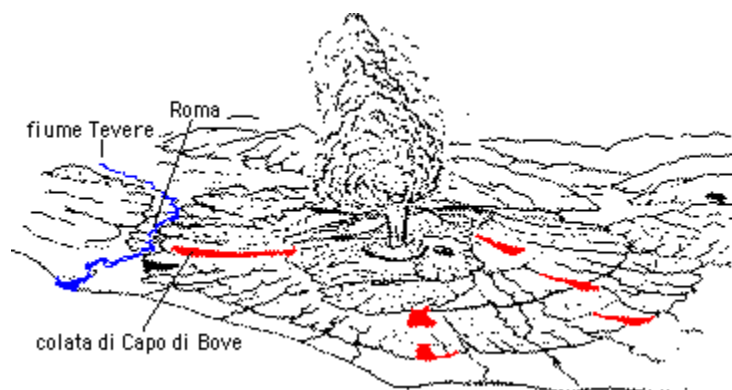


Figura 13: Esplosioni freatomagmatiche del periodo “Via dei Laghi” (disegno di M. Parotto)[4].

A questo periodo si collegano le formazioni di *maar* sia monogenici che poligenici, il più recente dei quali è il *maar* poligenico di Albano (formazione successiva a 70 ka) formato da almeno 7 eruzioni in migrazione da NW a SE lungo una frattura di circa 3,5 km. L’ultima eruzione del *maar* è datata 23ka.

Durante l'Olocene si verifica attività freatica, e formazione di *lahar* a causa di esondazioni del lago verificatesi fino a $6 \div 5$ ka. La formazione più importante di questo tipo è quella del Tavolato, spessa fino a 15 m che ha colmato le paleovalli dell'intera area di Ciampino-Capannelle. Probabilmente le esondazioni del Lago Albano sono da mettere in relazione alla forte attività di degassamento del fondo del lago, che ha prodotto fenomeni di *roll-over*, con meccanismi simili a quelle riscontrati in alcuni laghi craterici di vulcani attivi, come Nyos e Monoum in Cameroon.

Le esondazioni si sono verificate anche in epoca romana, fino alla realizzazione di un tunnel di drenaggio con lo scopo di mantenere costante il livello dell'acqua nel lago.

La recente revisione della cronologia del vulcano dei Colli Albani (Soligo & Tuccimei, 2010) dimostra la maggiore affidabilità delle datazioni con il metodo $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$. I più probabili *range* di età per le formazioni dei C.A. sono: $>600 \div 355$ ka per il litosoma IV (complesso calderico del Vulcano Laziale); $<355 \div ?180$ ka per il litosoma III (sistema di fratture peri-calderiche del Tuscolano-Artemisio); $<355 \div 250$ ka per il litosoma II (strato-vulcano intracalderico delle Faete); $<200 \div 26$ ka per il litosoma I (Via dei Laghi *maar field*).

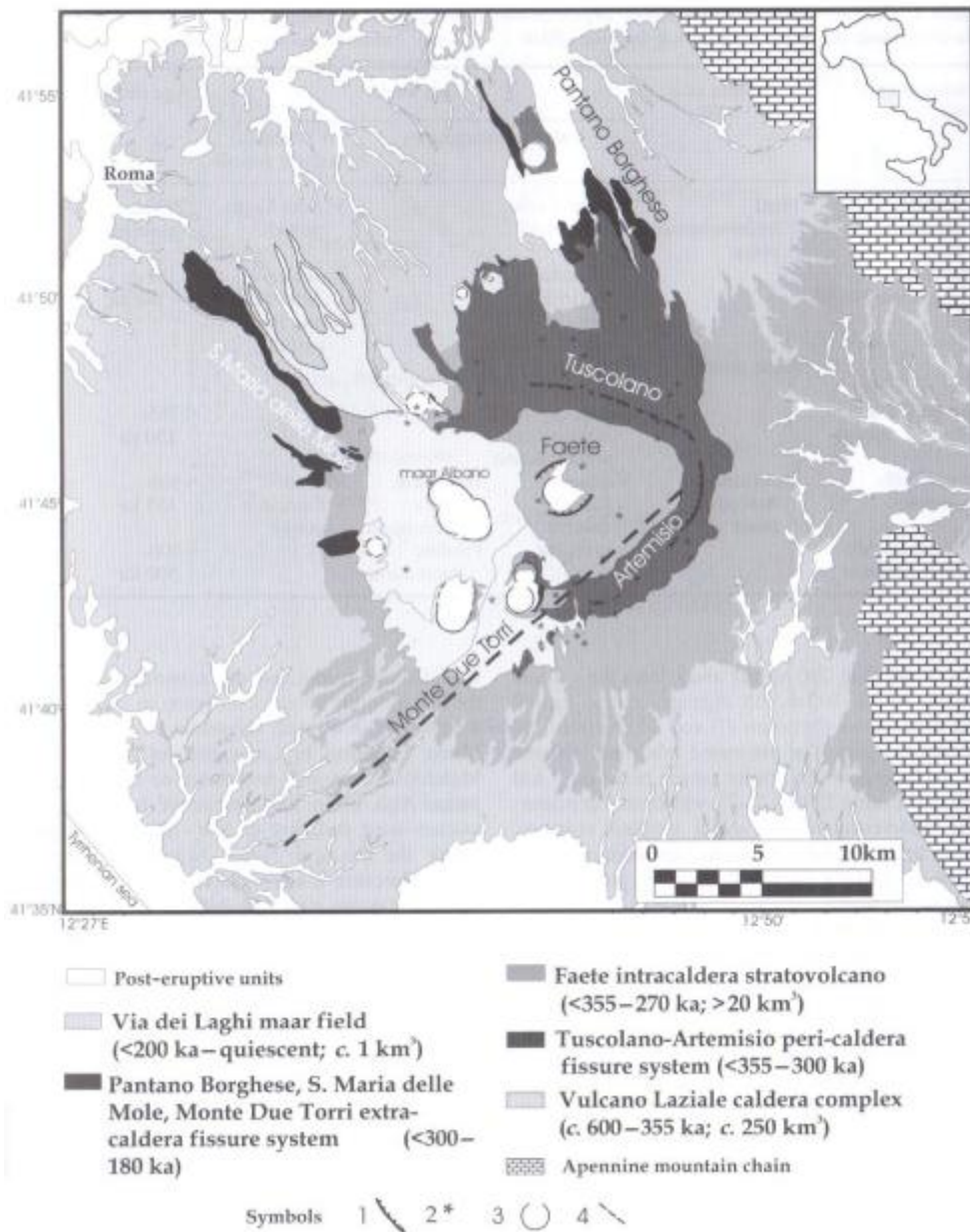


Figura 14: Mappa sintetica del vulcano Colli Albani con i principali edifici sviluppati tra 600 ka ad oggi (Giordano et al., 2010).

L'area di Albano è attualmente luogo di emissione di gas di probabile origine magmatica, di periodici fenomeni di sollevamenti del suolo e periodici sciame sismici poco profondi, fenomeni che possono indicare la presenza in profondità di un corpo magmatico ancora attivo.

5.1.2 Inquadramento geomorfologico del Parco Regionale dell'Appia Antica

La morfologia attuale del Parco è il risultato dell'attività del Vulcano Laziale, dell'azione modificatrice degli agenti atmosferici e degli interventi antropici. Un altro evento di certo non meno importante degli altri, che ha contribuito all'evoluzione morfologica della Valle, è rappresentato dal periodo glaciale del Würm (da 100.000 a 10.000 anni fa circa).

Un abbassamento della temperatura media di pochi gradi immobilizzò sui continenti grandi quantità di acqua allo stato solido in estese superfici ghiacciate, di conseguenza in quell'epoca tutti i fiumi diminuirono la loro portata d'acqua al mare che, non potendo compensare con acqua fluviale quella perduta per evaporazione, diminuì di livello. Questo abbassamento fu lento ma cospicuo, arrivando a più di 100 metri, tale che aumentò il dislivello fra le sorgenti e le foci dei fiumi e come conseguenza i fiumi iniziarono un'intensa opera di scavo del proprio alveo (Parotto, 1995). Questa maggiore capacità erosiva interessò anche l'antico tracciato del fiume Almona, uno dei corsi d'acqua che scendono a raggiera dai Colli Albani, determinando una profonda erosione delle piroclastiti del vulcano (figura 15).

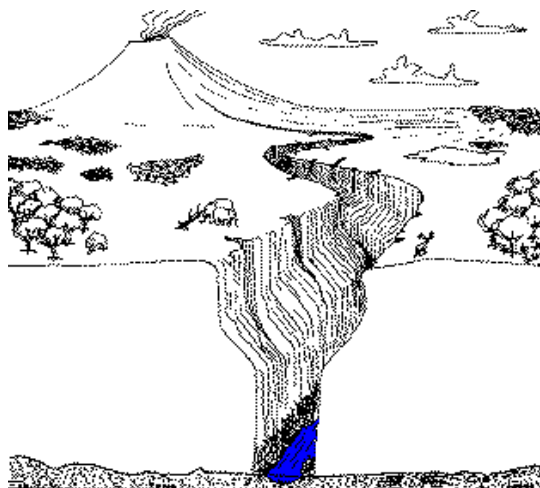


Figura 15: Il canyon durante la glaciazione del Würm (disegno di M. Parotto)[4].

L'erosione diede forma a profonde valli a "V" scavate nelle pozzolane e nei tuffi. Con lo scioglimento dei ghiacci (15 ka-10 ka) e in conseguenza del lento innalzamento del mare, tutti i fiumi italiani, compreso l'Almona, rallentarono la loro corsa e cominciarono a deporre i loro sedimenti. Nel caso specifico il fiume Almona iniziò ad allargare il

proprio corso scavando dei meandri, così che i fianchi della valle andavano via via allontanandosi l'uno dall'altro (figura 16).

La distanza tra i versanti non è però spiegabile con il fiumiciattolo che vediamo oggi, ma solo pensando a un clima post-glaciale, più freddo e piovoso di quello attuale.

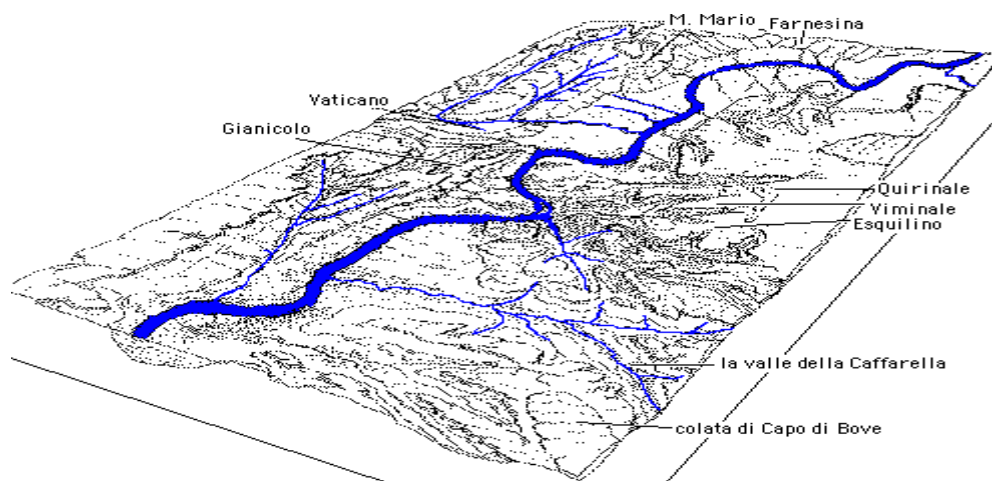


Figura 16: L'area romana prima dell'intervento dell'uomo (disegno di M. Parotto)[4].

All'opera dell'uomo si devono ulteriori modifiche al paesaggio della valle, a partire dall'epoca romana con la creazione di numerose cave per l'utilizzo dei prodotti vulcanici come materiali da costruzione. Altri interventi hanno riguardato la regimazione delle acque attraverso lo scavo di un alveo artificiale per il fiume e per le marrane, e la creazione di aree agricole.

Uno degli elementi morfologici dominante dell'area, è sicuramente la colata lavica leucitica di Capo di Bove (0,27 Ma). Il suo andamento è riconoscibile da Ciampino fino alla tomba di Cecilia Metella e in questo tratto l'Appia Antica ricalca l'andamento della colata poiché i romani ne hanno sfruttato la posizione favorevole e la disponibilità in loco di ottimo materiale da costruzione.

5.1.3 Caratteri idrogeologici del Parco

Il reticolo idrografico del Parco Regionale dall'Appia Antica presenta corsi d'acqua, fossi e marrane appartenenti al Bacino Idrografico del Tevere nel quale confluiscono anche attraverso opere di adduzione. Il fiume Almone

Il fiume Almone (uno dei corsi d'acqua che scendono a raggiera dai Colli Albani) all'interno della valle della Caffarella è articolato in un sistema di canali in terra che presentano tracce delle antiche opere di presa; prende il nome di Marrana della Caffarella in un'area di pianura a bassissima pendenza e con la falda posta a poca profondità dal piano di campagna, tale da provocare impaludamenti. I Romani furono i primi a bonificare l'area attraverso la realizzazione di pozzi assorbenti e canali sotterranei. Nei secoli successivi un fitto sistema di canali dai quali si dipartivano numerose opere di presa ha permesso di sfruttare la valle per scopi agricoli. Attualmente il reticolo idrografico della Marrana della Caffarella è rappresentato dall'asta principale del fiume Almone che scorre al centro della valle, e da due canali secondari che bordano i lati della piana alluvionale alimentati dalle numerose risorgive presenti in tutta la valle. La manutenzione dei piccoli canali che drenano le acque verso le marrane sia laterali che principale, un tempo necessaria per permettere lo sfruttamento agricolo della valle, non viene effettuata con regolarità, se non in piccoli tratti, di conseguenza nelle aree dove il flusso è scarso si stanno ricreando delle piccole aree umide di elevato valore naturalistico [10].

Il territorio del Parco è caratterizzato da un drenaggio sotterraneo radiale centrifugo rispetto all'edificio albano. La permeabilità delle pozzolane varia da alta a media, i tufi vanno da mediamente a poco permeabili (Ventriglia, 1990). I depositi alluvionali sono in genere poco permeabili, mentre i terreni di riporto tendono ad essere mediamente permeabili. Nel settore della Valle della Caffarella, il livello piezometrico (anno 2002) è compreso tra i 15 e i 20 m s.l.m., o poco oltre (Capelli e Mazza, 2005).

5.1.4 La presenza di cavità sotterranee

Nel territorio di Roma sono diffuse le cavità sotterranee; esse sono da ricondurre in primo luogo alle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio della città ed in secondo luogo alle attività antropiche che si sono sviluppate nel corso dei secoli (Piano del parco - geolitologia, 2002). Sia nel periodo etrusco e successivamente nel periodo repubblicano e imperiale, con l'espansione della città, vennero intrapresi i grandi lavori di realizzazione di condotti idrici sotterranei con intensivo sfruttamento del sottosuolo mediante lo scavo di cave per ricavare materiali da costruzione, soprattutto pozzolane e tufi litoidi. Vennero scavati infine, per esigenze di culto, cimiteri di vario tipo, molti dei

quali riutilizzavano vecchie cave abbandonate. Nel corso dei secoli le cavità vennero riutilizzate sia per attività estrattiva, sia poi, in tempi recenti, come rifugi d'emergenza e depositi militari durante il periodo bellico e successivamente come fungaie o depositi per attività industriali.

Lungo la strada Appia Antica si possono visitare le Catacombe di San Sebastiano e quelle di San Callisto, che rappresentano il cimitero più antico ufficialmente istituito a Roma. Il percorso di tali Catacombe è leggermente in salita perché segue la morfologia del plateau delle colate piroclastiche eruttate dal vulcano dei Colli Albani (Funicello et al., 2007). Le Catacombe di San Callisto sono scavate in queste piroclastici e furono istituite dal diacono Callisto nel 199 d.C. e poi ampliate quando egli divenne papa (217 – 222 d.C.); si sviluppano su quattro livelli, il più profondo dei quali è situato 20 metri sotto la superficie e sono composte di oltre 20 chilometri di strette gallerie lungo le quali si trovano, al di sopra del pavimento, i loculi (piccole nicchie scavate nel tufo). Le piccole gallerie sono strutture estremamente stabili con solo piccoli cedimenti manifestatisi durante le ultime migliaia di anni. La presenza di cavità storiche, ritrovate praticamente in tutto il territorio romano, ha condizionato le attività edilizie della città e, in alcune zone, si registrano interferenze fra le strutture di fondazione degli edifici e cavità sotterranee delle quali si era ormai dimenticata l'esistenza. In fase di realizzazione di opere sia pubbliche che private, nasce quindi l'esigenza di accertare la presenza di situazioni di rischio dovuto alla presenza di vuoti sotterranei.

Anche nel territorio del Parco sono state individuate numerose cavità sotterranee all'interno di diverse litologie. Alcune di esse sono ben visibili in superficie, altre sono individuabili in base a dissesti superficiali, altre ancora infine sono state individuate nelle campagne di sondaggi e indagini geognostiche in occasione di realizzazioni di opere pubbliche. La maggior parte delle cave presenti nel Parco si sviluppa nei livelli di pozzolane, caratterizzate da maggiore facilità di lavorazione e nei tufi litoidi. Gli strati di materiali con migliori caratteristiche tecniche venivano sfruttati principalmente con il metodo "per camere e pilastri" (Ventriglia et al., 1971), consistente nello scavo di una galleria principale di grandi dimensioni, dalla quale si dipartivano rami secondari laterali ortogonali.

Le dimensioni delle gallerie variavano a seconda della litologia interessata: nel caso delle pozzolane si scavava fino ad una larghezza di 23 metri e ad un'altezza di 35 metri.

Il procedere dello scavo faceva sì che rimanessero a sorreggere le volte dapprima grandi pilastri a sezione quadrata; successivamente, durante la fase di abbandono della cava, i pilastri venivano sensibilmente ridotti con il metodo della “quartatura” e si formavano sale e gallerie di maggiori dimensioni. Nel corso dei secoli, a seguito di cedimenti delle volte, si sono formate depressioni anche di grande estensione, ben visibili in alcune aree e ben rappresentate nella cartografia. La maggior parte della Valle della Caffarella e della Tenuta di Tor Marancia è notevolmente alterata da tali fenomeni.



Figura 17: Tipica voragine superficiale presente all'interno del territorio della Caffarella.



Figura 18: Entrata recintata di una cava abbandonata scavata nell'unità delle Pozzolane Rosse.

5.1.5 Le unità geologiche affioranti nel territorio del Parco

La descrizione delle unità geologiche più importanti che si trovano in affioramento nel Parco Regionale dell'Appia Antica, fa riferimento alla Carta Geologica del Comune di Roma volume I, scala 1:10000, (figura 19) a cura di R. Funicello e G. Giordano (2008).

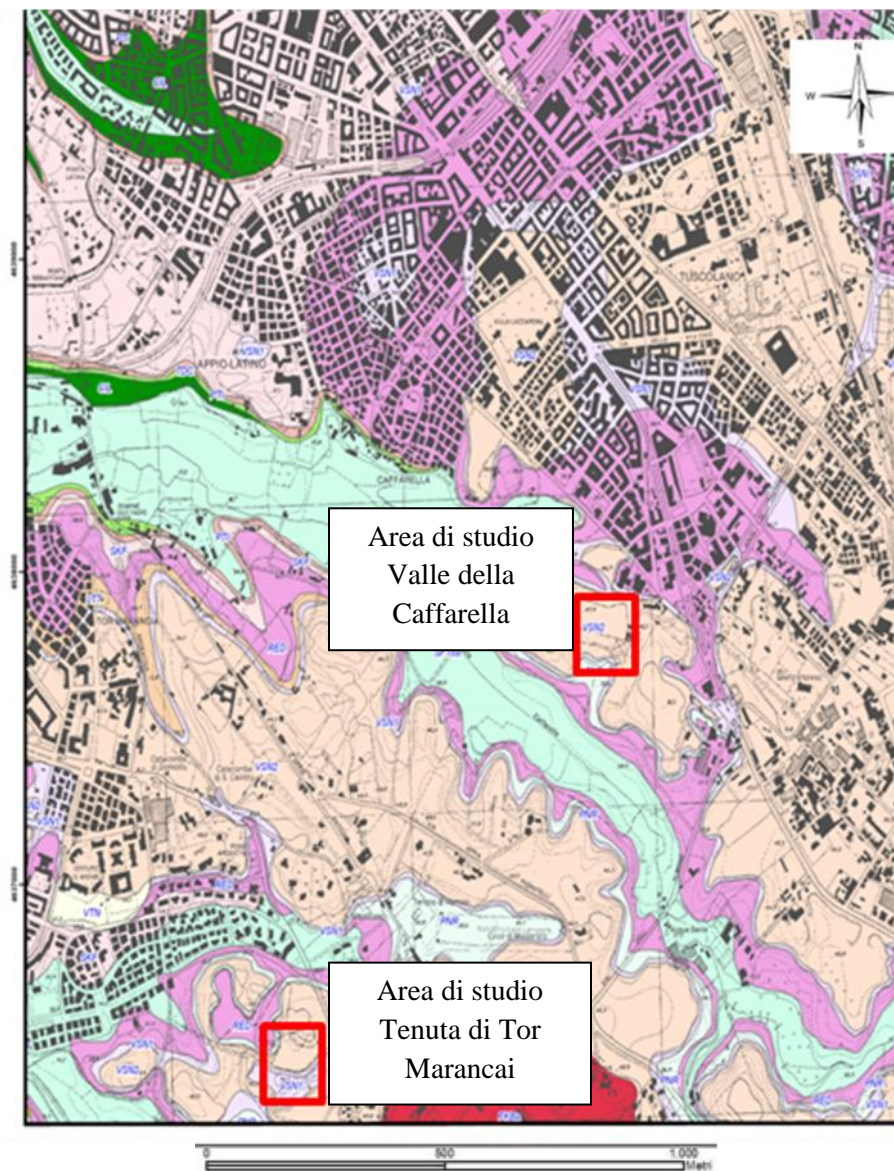



Figura 19: Stralcio della Carta Geologica del Comune di Roma (scala 1:10000), con l'ubicazione delle aree indagate della Valle della Caffarella e Tenuta di Tor Marancia.


Di seguito viene riportata la legenda geologica di tale carta dall'alto verso il basso.

 Depositi alluvionali recenti del fiume Almona (a2)

Depositi da sabbiosi ad argillosi derivanti perlopiù da rimaneggiamento di materiale vulcanico e ricchi in materia organica. Da analisi al diffrattometro le fasi mineralogiche principali risultano essere augite e leucite. Il suolo alluvionale presenta fenomeni di argillificazione (aumento della halloysite) e analcimizzazione. Dati di sondaggio indicano uno spessore massimo nel fondovalle di 10 ÷ 12 metri (Ventriglia, 2002).

 Membro delle “Pozzolanelle” (VSN2) dell’unità eruttiva di “Villa Senni” (VSEU)

Deposito massivo, litoide nell’area d’indagine, a matrice cineritico grossolana-lapillosa con litici lavici e cristalli ben formati (leucite e subordinati biotite e clinopirosseno), contenuto in scorie variabile. Denominato anche “tufo ad occhio di pesce” per l’elevato contenuto di cristalli di leucite; in realtà nell’area di indagine è stato riscontrato un maggior contenuto di analcime con scarsa leucite. Zeolitizzazione con presenza di phillipsite ed herschelite (litificazione). Alla base è stato osservato uno spessore di 20-30 cm di breccia vulcanica di colore grigio, da alcuni autori definito “Pozzolanelle”. Spessore in settore di indagine: 150 cm.

 Membro del “Tufo Lionato” dell’unità eruttiva di “Villa Senni”

Deposito massivo, litoide, a matrice cineritico-lapillosa, con scorie grigiastre e pomici gialloarancio, litici lavici e cristalli ben formati. Tipico colore fulvo. Evidente zeolitizzazione (soprattutto cabasite), argillificazione (abbondante halloysite) e analcimizzazione. Spessore in settore di indagine: 230 - 250 cm. Riscontrate due diverse *facies* in valle della Caffarella.

Facies litoide: evidenti scorie, macrocristalli di analcime (derivante da leucite), di pirosseno (augite) e biotite. *Facies* alterata: è un tufo molto alterato, le scorie tendono ad essere molto meno visibili; cabasite scomparsa, augite e halloysite in minor quantità, analcime completamente rimossa o quasi.

Unità delle “Pozzolane Nere” (PNR)

Unità piroclastica di colore nero, massiva e caotica, localmente con *gas-pipes*, a composizione tefrifonolitica (Trigila et al., 1995), costituita da un deposito a matrice scoriaceo-cineritica, nella quale sono dispersi scorie di dimensioni fino a 15 cm, litici lavici, piroclastici, olocristallini e sedimentari termometamorfosati di dimensioni fino a 10 cm e cristalli di leucite e clinopirosseno. Nei settori di indagine l'unità ha uno spessore estremamente ridotto (circa 1 m).

Unità delle “Pozzolane Rosse” (RED)

Unità piroclastica massiva e caotica, semicoerente, da rosso a viola vinaccia a grigio scuro, a matrice scoriacea povera della frazione cineritica, con scorie di dimensioni fino a 15 cm, litici lavici, sedimentari termometamorfosati e olocristallini di dimensioni fino a 20 cm e abbondanti cristalli di leucite, clinopirosseno e biotite. Composizione tefritico-leucitica (Fornaseri et al., 1963), spessore fino a 15 m in affioramento e 35 da dati di sondaggio. La geometria del deposito è tabulare. Al tetto sono localmente presenti fino a 3 m di depositi stratificati cineritici e scoriacei da ricaduta e rimaneggiati. L'unità è riferibile ad una eruzione ignimbratica di grande volume. (Pleistocene medio). Nelle aree indagate è presente una *facies* fortemente analcimizzata, con diminuzione del tenore di leucite.

Inoltre nell'area del Parco, si riscontra estesa presenza di terreni di riporto, che coprono litologie vulcaniche e alluvioni, e abbondanti soprattutto nel settore in prossimità della via Latina. Si tratta di materiali eterogenei, perlopiù a matrice vulcanica. Dati di sondaggio indicano in questo settore uno spessore di 4 ÷ 6 metri (Ventriglia, 2002).

5.2 Inquadramento geologico del distretto di Ciampino-Marino

Nell'intorno dei Colli Albani, sono presenti diverse aree interessate da emissioni di gas endogeni, come: Tivoli, distretto di Ciampino-Marino, Solfatara di Pomezia e Tor Caldara. Le manifestazioni gassose principali sono associate ad alti strutturali del basamento carbonatico mesozoico presente sotto la copertura vulcanica e flyschoidi

(Funciello e Parotto, 1978), caratterizzati da anomalie gravimetriche positive (Di Filippo e Toro, 1980)

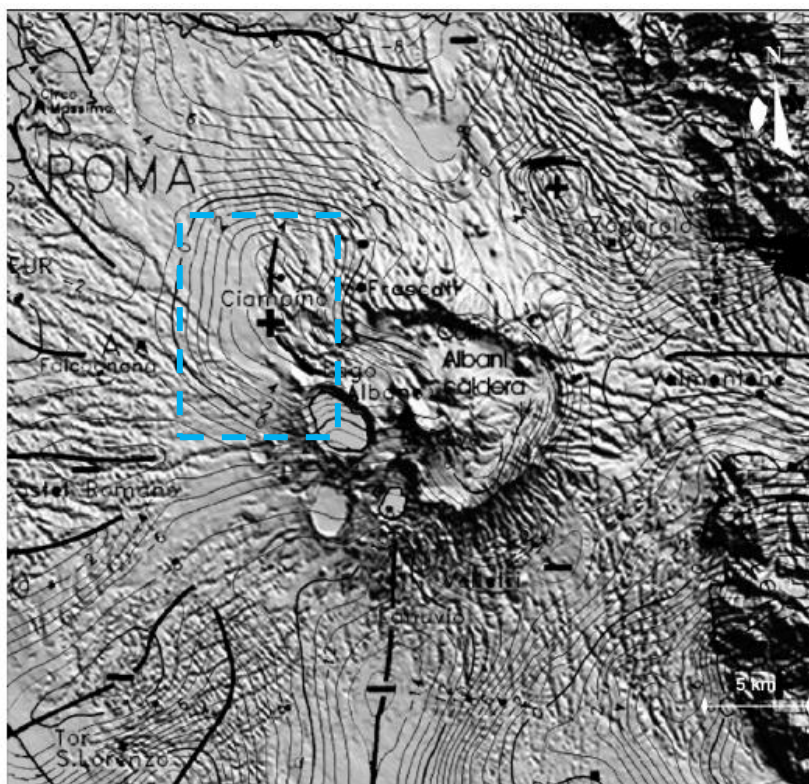


Figura 20: Carta delle anomalie di Bouguer (Di Filippo e Toro, 1980) su DEM (digital elevation model) del distretto vulcanico dei Colli Albani. Si nota l'alto gravimetrico presente nell'area di Ciampino (rettangolo azzurro).

Si tratta essenzialmente di manifestazioni fredde composte prevalentemente da CO_2 e minori quantità di H_2S , N_2 , CH_4 e ^{222}Rn che rappresentano un serio rischio per la salute degli abitanti di queste zone.

Il degassamento più intenso è presente nel distretto di Ciampino-Marino (Cava dei Selci, Santa Maria delle Mole, Vigna Fiorita) ed è anche quello con i rischi maggiori vista l'alta densità di popolazione della zona. La zona più pericolosa è quella di Cava dei Selci (frazione del Comune di Marino), dove nel passato sono avvenuti numerosi incidenti mortali a persone e animali e dove le abitazioni sono molto vicine alla manifestazione principale di gas.

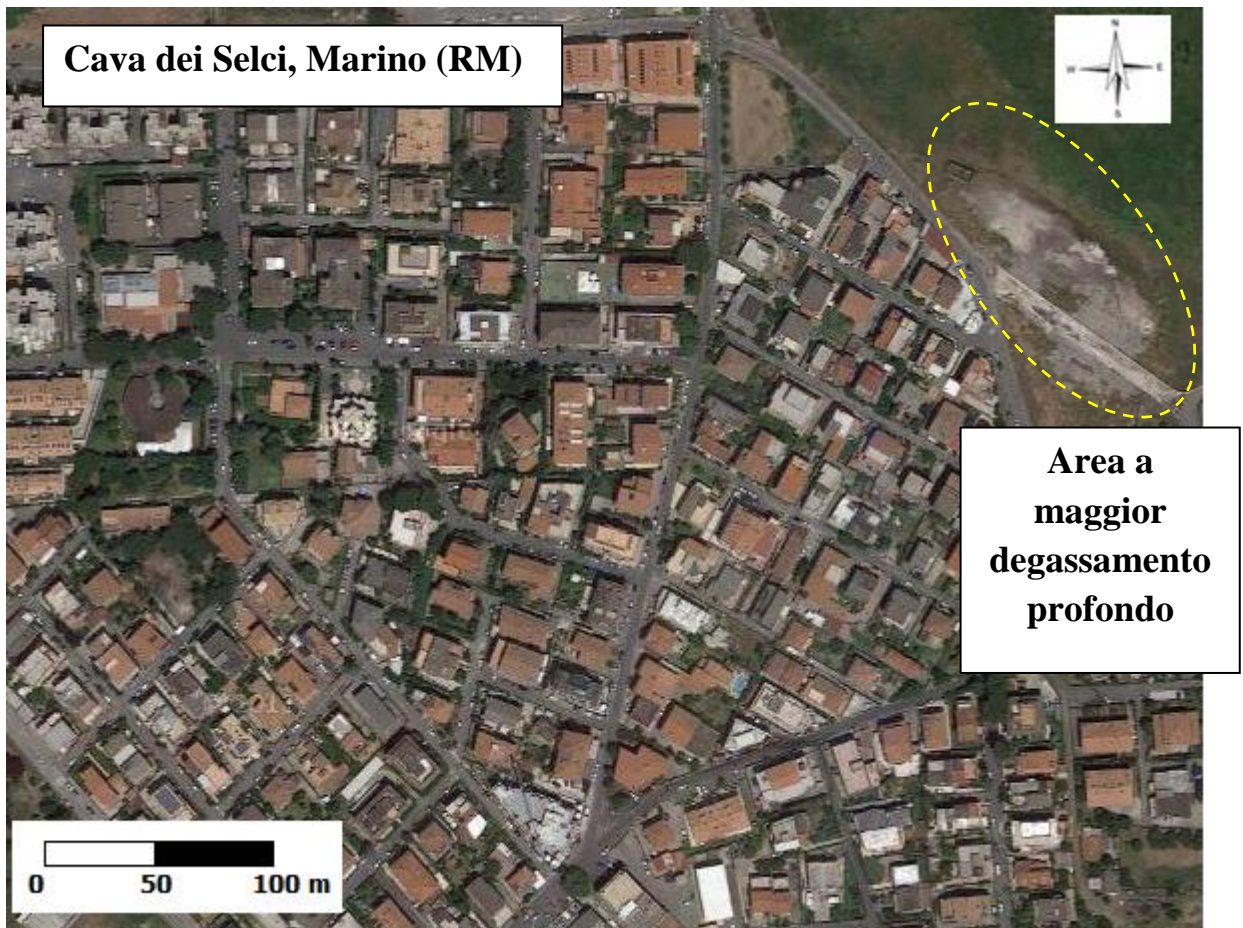


Figura 21: Immagine satellitare del centro abitato di Cava dei Selci (frazione del Comune di Marino), con l'ubicazione dell'area che presenta il maggior degassamento profondo della zona (immagine satellitare tratta da Google Maps).

Nella zona di Cava dei Selci fin dagli anni '70, era presente una cava di pietra lavica poi riempita con materiale di risulta incoerente. Nella parte centrale dell'area di cava era presente una polla d'acqua a carattere permanente. Con il depauperamento della falda, oggi la zona depressa si riempie d'acqua soltanto stagionalmente e questo permette l'osservazione di numerose bolle di gas. La composizione chimica dei gas emessi ne suggerisce un'origine da fluidi geotermici ospitati nelle rocce carbonatiche mesozoiche sepolte, modificati chimicamente e termicamente dalla risalita di gas magmatici profondi (Carapezza e Tarchini, 2007).

Il serbatoio geotermico è di bassa-media entalpia (Giggenbach et al., 1988; Zuppi et al., 1974) considerando che una temperatura di soli 41°C è stata misurata a 610 m di profondità nel pozzo di esplorazione geotermica Falcognana 1 (ENEL, 1990). La maggior parte delle indagini per questa ricerca, sono state svolte nella zona residenziale

di Vigna Fiorita situata nel Comune di Ciampino, appena ad E dall'area a maggior degassamento di Cava dei Selci.



Figura 22: Ubicazione del consorzio residenziale di Vigna Fiorita rispetto all'area di maggior degassamento profondo presso Cava dei Selci (ovale tratteggiato in giallo). I settori racchiusi dai rettangoli tratteggiati in bianco, indicano le zone indagate per lo svolgimento di questa ricerca (immagine satellitare tratta da Google Maps).

La forte emissione di gas è dovuta alla rimozione dello strato superficiale impermeabile, che è stata operata per la costruzione di nuove abitazioni o attraversato per la realizzazione di pozzi. L'area inoltre è caratterizzata dalla presenza di una faglia incerta o sepolta, come riportato nella Carta Geologica, foglio 387 Albano Laziale (scala 1:50000) di De Rita e Giordano, 2008 (figura 23).

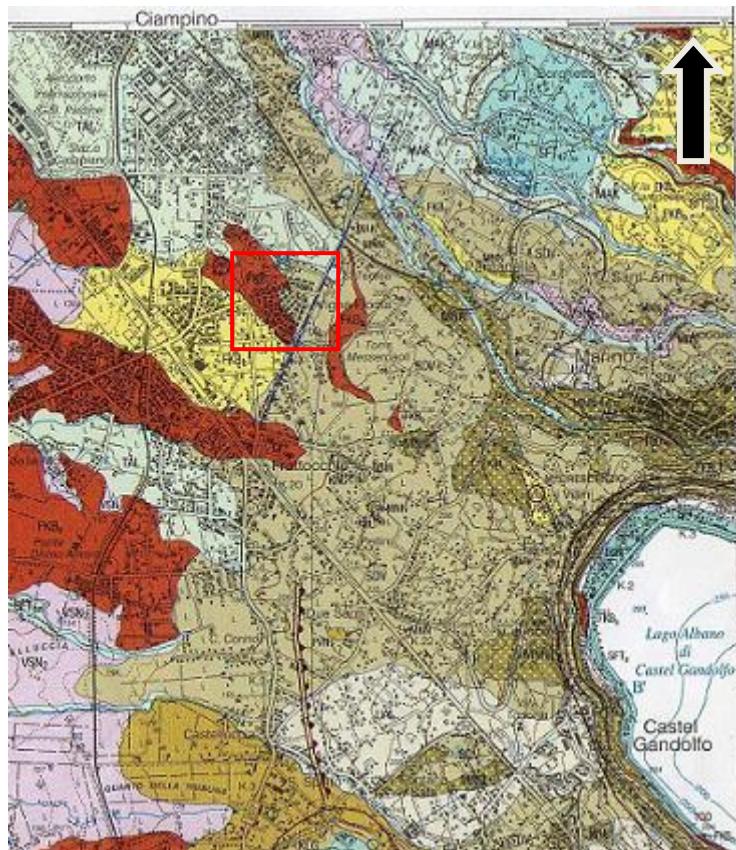


Figura 23: Stralcio della Carta Geologica foglio 387 Albano Laziale (scala 1:50000). Nel rettangolo in rosso si riporta l'area di studio di Vigna Fiorita.

5.2.1 Unità litologiche affioranti nell'area di Vigna Fiorita

Le unità litologiche più importanti che affiorano nella zona di Vigna Fiorita, vengono descritte riportando la legenda della Carta Geologica, foglio 387, Albano Laziale, scala 1:50000 (De Rita e G. Giordano, 2008).

Formazione del Tavolato (TAL):

Successione di depositi da massivi a mal stratificati, sabbioso-ghiaioso ad elementi vulcanici mediamente classati con lenti conglomeratico-grossolane, clasto-sostenute, da *debris flow* e da flusso iperconcentrato. I depositi si possono relazionare alla rimobilizzazione di materiale vulcanoclastico contemporanei e successivi alle ultime eruzioni freatomagmatiche del *maar* di Albano con meccanismi di deposizione da *lahar*. Al tetto la formazione è datata $5,8 \pm 0,1$ ka. Spessore massimo 15 m.

Pleistocene Superiore p.p. – Olocene.

Unità di Villa Doria (SDV):

Deposito piroclastico di colore grigio, costituito da livelli cineritici a stratificazione incrociata ricchi di armored lapilli, con cristalli di biotite, pirosseno e leucite, e con rari (< 1%) xenolitici lavici, carbonatici decarbonatati, olocristallini. Alla base può essere presente un livello di massimo 1 m di spessore, massivo, matrice-sostenuto, con litici lavici, carbonatici e olocristallini, litoide per zeolitizzazione. Spessore totale massimo di 6 m. La composizione è da K-foiditica a tefri-fonolitica. L'unità si può relazionare ad un'eruzione freatomagmatica del *maar* di Albano con meccanismi di deposizione prevalente da *base surge*.

Pleistocene Superiore p.p.

Formazione di Madonna degli Angeli

Litofacies lavica (FKB_a):

Lave grigio scure, da tefritiche a K-foidiche, da microcristalline a porfiriche, da compatte a vacuolari, con contenuto variabile di fenocristalli di leucite, spesso in individui centimetrici, clinopirosseno ed occasionalmente olivina; gli spessori massimi raggiungono 30 m. L'età radiometrica della colata di Capo di Bove, lungo l'Appia Antica è compresa tra 292 ± 6 ka e 277 ± 2 ka. Colate di Capo di Bove, di Santa Maria delle Mole, del Divin Amore (Quarto Palaverta), di Quarto S. Fiuma, di Pian Savelli, di Tenuta Cancelliera, di Roncigliano, di Campoleone.

Litofacies piroclastica (FKB_b):

Depositi classati di scorie in bancate e ceneri, da ricaduta e rimaneggiati, più o meno pedogenizzati, associati sia a coni di scorie ed apparati eccentrici sia all'edificio centrale delle Faete. Gli spessori, nel settore sud-est del Foglio, possono raggiungere i 20 m. Sono associati a questa litofacies i coni di scorie di Monte Giove, Castel Savelli e Monte Crescenzo.

Pleistocene Medio p.p.

5.3 Inquadramento geologico dell'area termale della Ficoncella (Civitavecchia-RM)

Le terme della Ficoncella si trovano all'interno del Comune di Civitavecchia, nel settore nord-orientale rispetto al centro cittadino. La morfologia è di tipo collinare, ma con forme piuttosto aspre. Le quote topografiche sono comprese tra i 100 m s.l.m. e i 450 m s.l.m. La geologia è riferibile al complesso quadro geologico-stratigrafico della regione tolfetano-sabatina (figura 24).

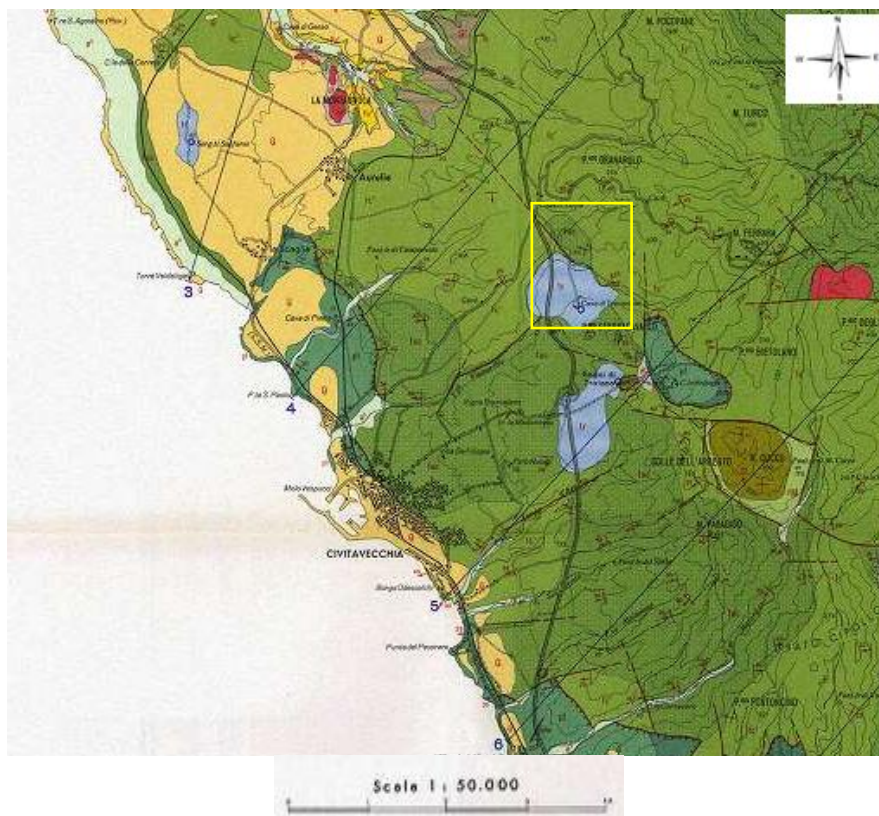


Figura 24: Stralcio della Carta Geologica dei Monti della Tolfa (scala 1:50000). Nel riquadro in giallo è riportata l'area termale della Ficoncella. (Fazzini et al., 1972).

I depositi sedimentari sono stati analizzati e cartografati da Fazzini et alii (1972). Gli autori li hanno raggruppati in tre complessi: “complesso basale”, “complesso alloctono” e “complesso neoautoctono”. Il “complesso basale” affiora in limitate finestre tettoniche nelle vicinanze dei corpi vulcanici dei Monti della Tolfa (De Rita et al., 1997); comprende le formazioni del Calcare Massiccio, dei Calcari Selciferi e della Scaglia Toscana, riferibili sia alla serie Toscana che a quella Umbro-Marchigiana.

Il “complesso alloctono” è costituito da diverse unità: Flysch argilloso-calcareo, Flysch calcareo e serie della Pietraforte (Bertini et al., 1970, Fazzini et al., 1972) depositate dal Cretacico sino al Paleogene. Questo complesso è quello maggiormente esteso ed è sovrapposto tettonicamente al “complesso basale”.

Il “complesso neoautoctono” comprende successioni sedimentarie per lo più argilloso - sabbiose depositate dal Miocene Superiore al Quaternario. I sedimenti Plio-Pleistocenici sono ricoperti, a loro volta, dalle formazioni vulcaniche legate all’attività del complesso Cerite-Tolfetano (4,2 – 2,3 Ma) e da depositi alluvionali recenti ed attuali. L’area vulcanica di Tolfa è occupata essenzialmente da domi lavici acidi associati ad ignimbriti da attività fissurale (figura 25).

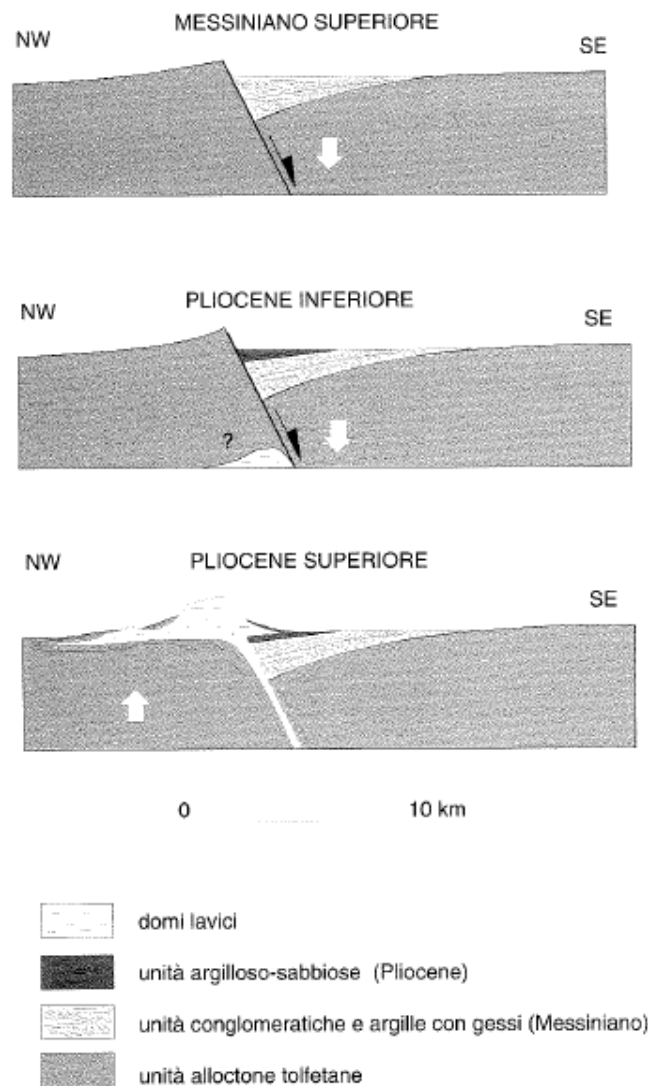


Figura 25: Evoluzione schematica del Bacino di Tolfa (immagine tratta da De Rita et al., 1997).

Al di sopra del “complesso neoautoctono” si ritrovano depositi continentali quaternari e depositi travertinosi, anche notevolmente estesi e discretamente potenti, che rappresentano l’evidenza della risalita di acque mineralizzate lungo fratture ben definite. Le placche travertinose più importanti si riscontrano in corrispondenza delle aree termali della Ficoncella e Bagni di Traiano.

5.3.1 Caratteri idrogeologici dell’area della Ficoncella

Il quadro idrogeologico locale è senza dubbio caratterizzato dalle emergenze termali della Ficoncella e Bagni di Traiano, collegate alla risalita di fluidi profondi, attraverso faglie che hanno dislocato il “complesso basale” carbonatico. Nella loro risalita in superficie queste acque calde e mineralizzate possono miscelarsi con quelle fredde di natura freatica, per cui si ha la presenza di tutta una serie di situazioni intermedie. Il drenaggio generale dell’area va da E verso W, con quote delle isopieze che passano da 200 m s.l.m. a 100 m s.l.m. (figura 26). Le sorgenti dell’area presentano portate modeste comprese tra 0,2 e 1,5 l/sec, così come i pozzi i quali intercettano un acquifero contenuto in orizzonti permeabili del complesso flyschoidale. Questo probabilmente dipende dalla presenza di terreni di copertura con permeabilità molto bassa, che incrementa in corrispondenza di locali fenomeni di fratturazione.

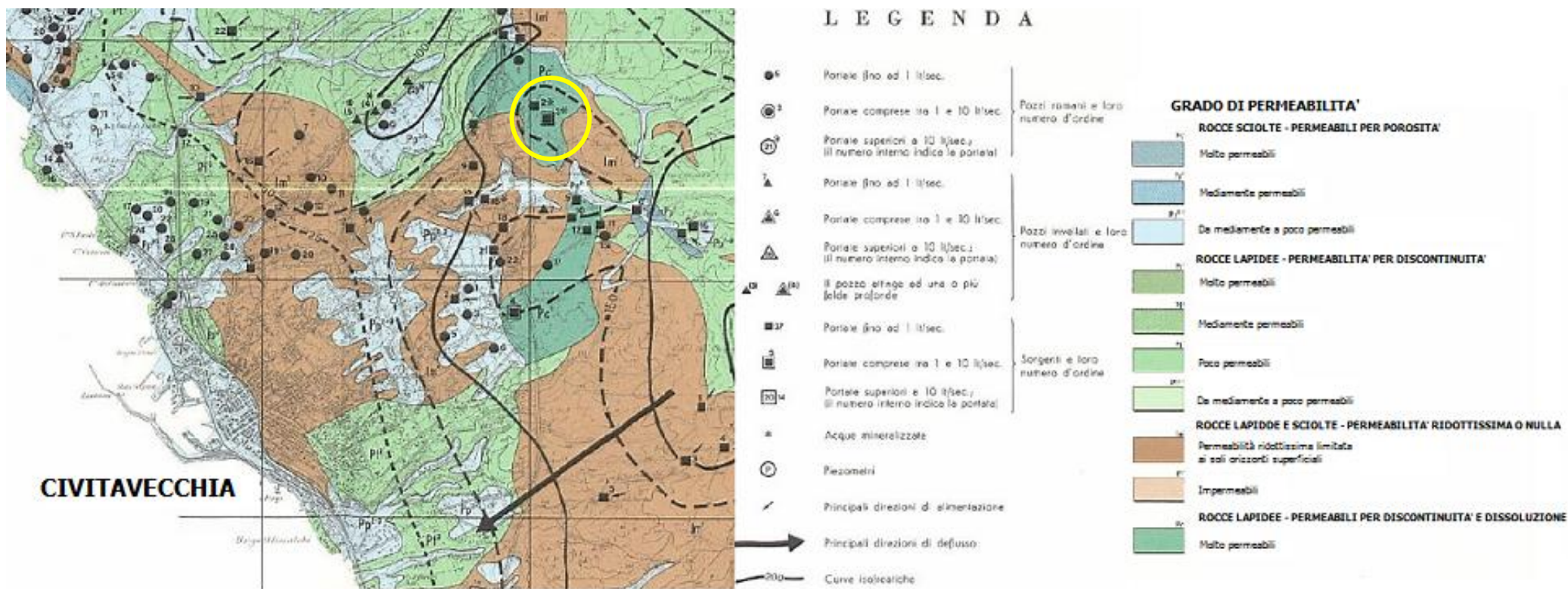


Figura 26: Stralcio della Carta Idrogeologica della Regione Tolfetana (scala 1:50000). Cerchiata in giallo viene evidenziata l'area termale della Ficoncella. (da "Idrogeologia della Provincia di Roma", Ventriglia, 1988)

5.3.2 Unità litologiche affioranti nell'area termale della Ficoncella

La descrizione delle unità geologiche più importanti che affiorano nell'area della Ficoncella, fa riferimento alla legenda della Carta Geologica dei Monti della Tolfa, scala 1:50000, a cura di P. Fazzini et al., (1972). Di seguito si riporta la descrizione delle varie unità.



Depositi travertinosi recenti (tr)

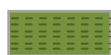
Olocene



Flysch calcareo (fc¹):

Calcari marnosi grigi e nocciola, sovente paesinizzati, marne e calcareniti grigie con intercalazioni pelitiche.

Cretaceo superiore – Paleocene.



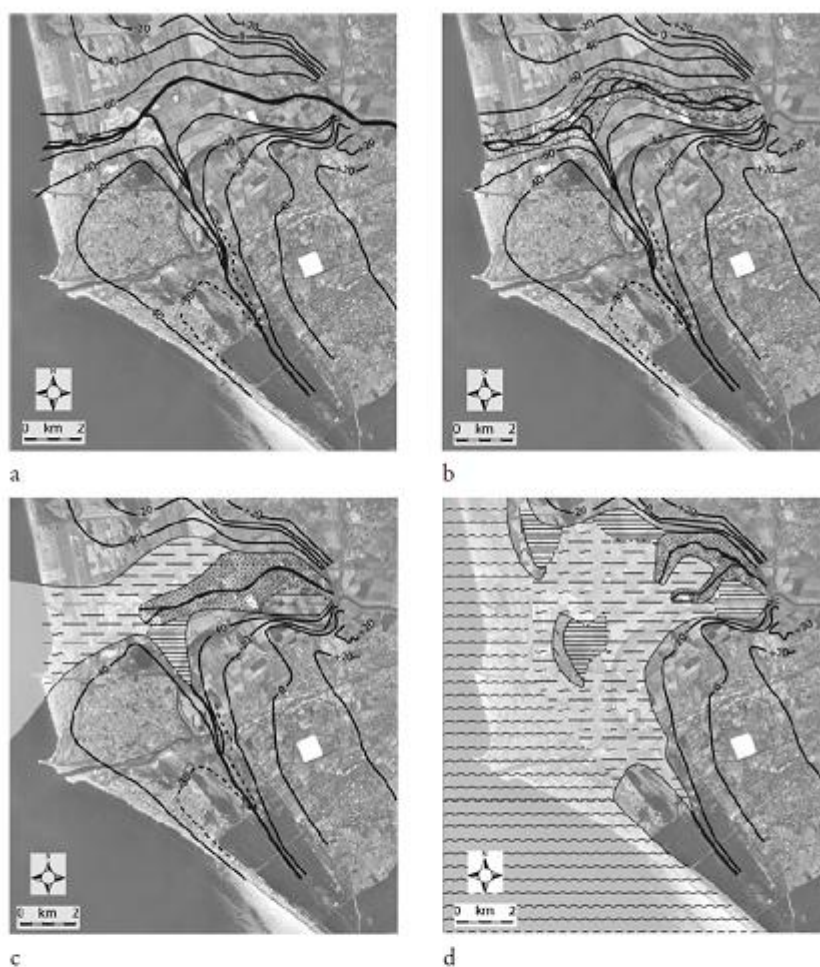
Flysch argilloso – calcareo (fac):

Argilloscisti grigi e bruni con passate varicolori, alternati a calcari marnosi, silicei, detritici e arenarie calcarifere. Scarse microfaune a Globigerinelle ed Heterohelix.

Cretaceo superiore.

5.4 Inquadramento geologico dell'area di Fiumicino (RM)

L'area di Fiumicino è ubicata nella fascia del delta del Tevere, che rappresenta l'elemento morfologico - geologico più importante di tale settore della costa laziale. Il delta del Tevere si è sviluppato a partire dal Pleistocene superiore fino all'Olocene (figura 27), interessando una superficie di circa 150 km². La piana deltizia è delimitata verso ovest dalla costa compresa tra Palo a nord e Tor Paterno a sud. Verso l'interno il corpo deltizio è definito dall'isoipsa 5 m che corre a destra del Tevere tra Palo e Ponte Galeria, al piede delle colline Pleistoceniche.



LEGENDA



Figura 27a: Evoluzione del delta del Tevere negli ultimi 20000 anni. (a) Paleovalle del Tevere durante l'ultima glaciazione (low stand del livello del mare) circa 18 Ka BP. (b) Paleovalle del Tevere circa 13 Ka BP. (c) Depositi di spiaggia interni che colmano la paleo valle dopo 13 Ka BP. (d) Massimo arretramento della foce del Tevere (9,5 Ka BP.). (Figura tratta da Bellotti et al., 2007).

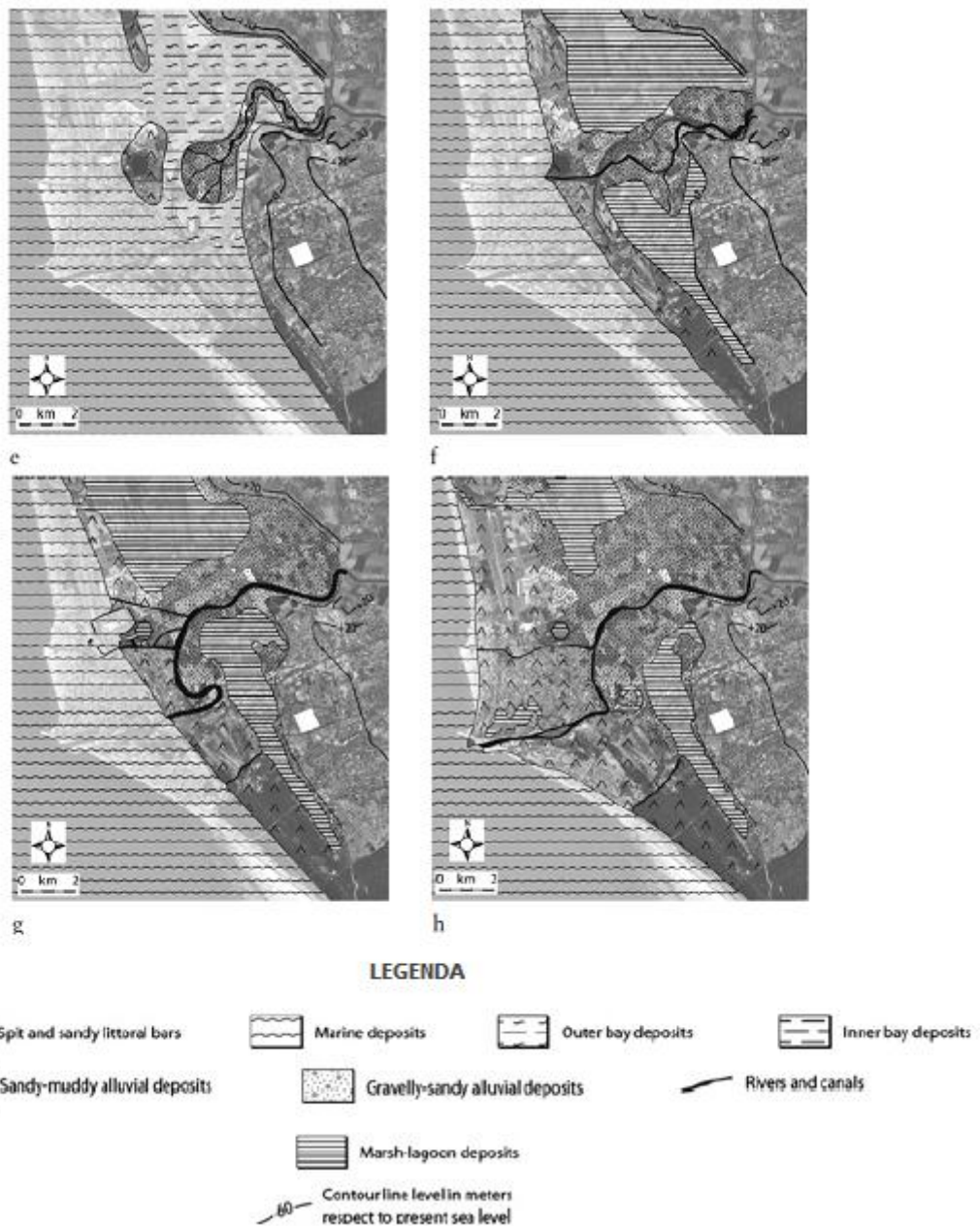


Figura 27b: Evoluzione del delta del Tevere negli ultimi 20000 anni. (e) Il territorio come appariva circa 7 Ka BP. con il massimo riempimento della paleo valle del Tevere. (f) Circa 4 Ka BP. il fiume Tevere fluiva direttamente nel Tirreno, con relativo sviluppo di un lido. (g) Territorio durante il Periodo Imperiale Romano, dove si mostra l'area del porto di Traiano e relativi canali (II secolo A.C.). (h) Come appariva il territorio agli inizi del '900, prima degli interventi di bonifica degli stagni interni. (Figura tratta da Bellotti et al., 2007).

Fino a circa 1 Ma, il fiume presumibilmente proseguiva verso il Lazio meridionale (figura 28, tratta da Faccenna et al., 1995). L'inizio della formazione dell'apparato

vulcanico del Colli Albani, ha costretto il Tevere ad una deviazione verso il Tirreno, con foce situata nell'attuale zona di Ponte Galeria (circa 0,8 Ma).

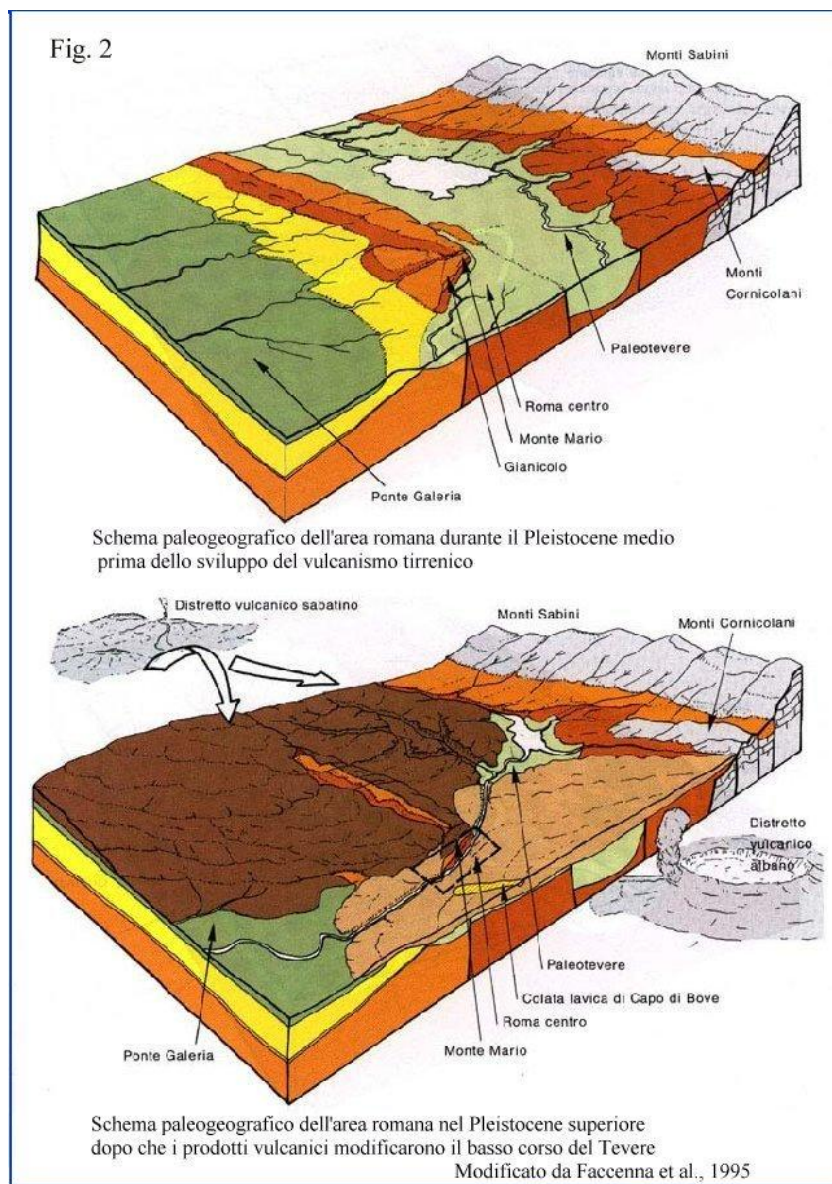


Figura 28: Deviazione del percorso del Paleotevere, dovuta alla formazione dell'apparato vulcanico dei Colli Albani (immagine tratta da Faccenna et al., 1995)

L'attuale conformazione morfologica della piana deltizia è il frutto dell'evoluzione avvenuta negli ultimi 4000-5000 anni, ossia dalla stabilizzazione del livello del mare al termine dell'ultimo ciclo glaciale - eustatico. Le oscillazioni del livello del mare conferivano al Tevere un maggior potere erosivo sulla valle per stazionamento basso del livello marino (periodi glaciali), alternati a periodi di colmamento della valle di

sedimenti per alto stazionamento marino (periodi caldi, scioglimento dei ghiacciai). Questi cicli del livello del mare sono denominati milankoviani e dipendono dai parametri orbitali terrestri (eccentricità, inclinazione dell'asse terrestre, precessione degli equinozi).

La piana deltizia del Tevere può essere divisa in 2 settori: piana deltizia superiore (P.D.S.) e piana deltizia inferiore (P.D.I.) (Bellotti et al., 1989, figura 29).

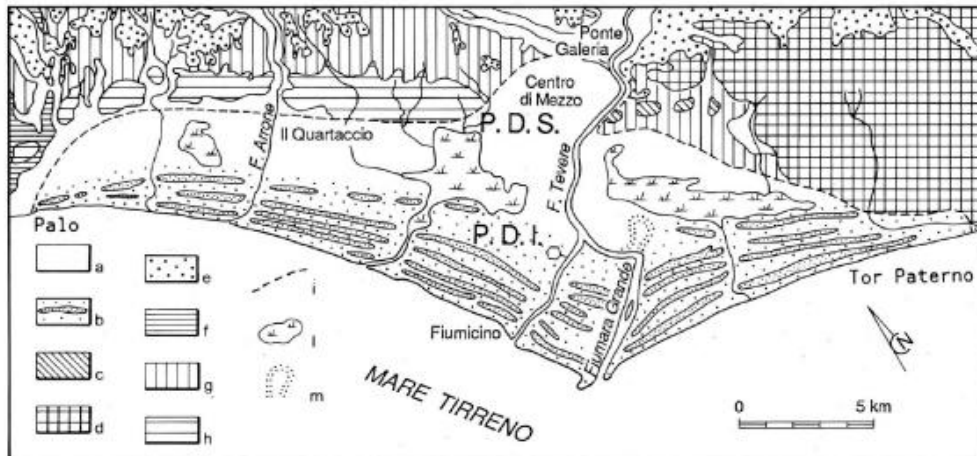


Figura 29: Principali elementi morfologici della piana deltizia del Tevere. (a) Alluvioni recenti. (b) Sedimenti dunari-interdunari recenti. (c) Alluvioni antiche. (d) Sabbie rossastre (dune antiche). (e) Piroclastiti pleistoceniche. (f) Travertini. (g) Argille, argille sabbiose, sabbie, lenti di ciottolame con malacofauna. (h) Ghiaie e ghiaie sabbiose. (i) Limite interno del delta. (l) Antichi stagni bonificati. (m) Canali fluviali fossili. (Bellotti et al., 1989).

La prima è caratterizzata da una morfologia pianeggiante (quote massime 5 m e minime -2m) In quest'area si sono sviluppati nel tempo una laguna e in seguito vari stagni, i terreni sono dunque prevalentemente argillosi - torbosi. La piana deltizia inferiore è interessata da un intenso sistema di cordoni dunari, accresciutisi parallelamente alla linea di costa, durante le fasi di progradazione. Gran parte dei cordoni dunari sono stati spianati per l'intensa urbanizzazione e uso agricolo della zona. L'area attuale dell'aeroporto di Fiumicino, era occupata fino a circa 1 secolo fa, dallo stagno più grande retrodunare. Oggi tutte le aree paludose sono state bonificate attraverso la costruzione di una fitta rete di canali e uso di idrovore.

Fino al VII secolo A.C. il Tevere sfociava in mare nell'attuale zona archeologica del Porto di Traiano che si trova a circa 4 km dall'attuale porto di Fiumicino (Giraudi et al., 2007), sintomo di un veloce accrescimento del sistema deltizio. Oggi invece si osserva il fenomeno opposto: le coste sotto l'azione dell'erosione marina, stanno

regredendo in maniera molto veloce, per la mancanza di apporti terrigeni del Tevere (Risorse RpR spa, 2007) causati dall'azione dell'uomo sul percorso del fiume.

5.4.1 Unità litologiche affioranti nell'area di Fiumicino

La descrizione delle unità geologiche affioranti nell'area di Fiumicino, fa riferimento alla Carta Geologica foglio 149 Cerveteri, scala 1:100000 (Dragonte et al., 1967), di cui in figura 30 si riporta uno stralcio.



Figura 30: Stralcio della Carta Geologica, foglio 149, Cerveteri scala 1:100000 (Dragonte et al., 1967). Nel quadrato in rosso si riporta l'area indagata.

Nell'area di studio (indicata dal riquadro rosso in figura 30), si trovano in affioramento sabbie incoerenti da medie a fini e depositi interdunari olocenici (II-XVIII secolo D.C.). Una stratigrafia di riferimento della zona viene riportata nell'immagine in basso, secondo l'interpretazione di Bellotti et al. (2007).

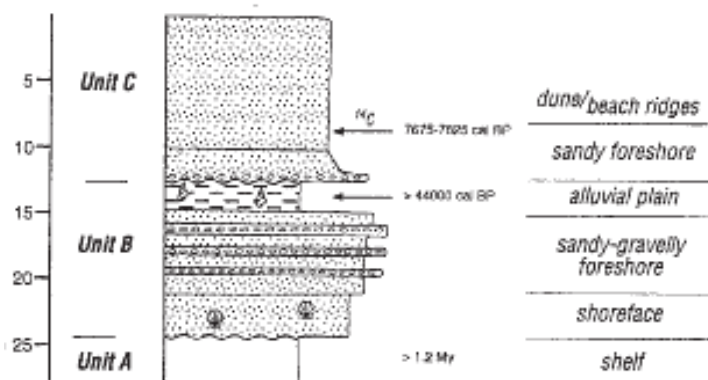


Figura 31: Stratigrafia rappresentativa dell'area studiata per i primi 25 m dal piano campagna (Bellotti et al., 2007).

5.4.2 Caratteri idrogeologici dell'area di Fiumicino

La serie sedimentaria deltizia del Tevere, è costituita da sedimenti eterogenici (argille, limi, sabbie e in subordine ghiaie) caratterizzati da valori di permeabilità differenti. La circolazione idrica si sviluppa nelle formazioni maggiormente permeabili, che possono essere semiconfinate da livelli argillosi impermeabili o libere, creando così un sistema multi falda complesso.

L'area pianeggiante risulta essere ricca in acqua con falda sub-affiorante (-1; -4 m dal p.c.) drenata lungo i principali canali. Nelle aree topograficamente depresse la falda è stagionalmente affiorante. Alcune zone, come parte del territorio all'interno dell'aeroporto di Fiumicino, hanno bisogno di idrovore, collegate ai canali di bonifica, per impedire l'impaludamento di vaste zone. Da analisi di conducibilità elettrica sulle acque sotterranee nella zona a sud di Fiumicino (Capelli et al, 2007), risulta che in alcuni campioni i valori superino 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con punti fino a 6600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Questi dati potrebbero essere spiegati con l'intrusione del cuneo salino dalla foce del Tevere verso le aree più interne, a causa del prelievo non controllato di acque dal suolo. Sempre secondo gli stessi autori, la presenza di pozzi con acque saline a poca distanza da altri caratterizzati da valori più bassi, sarebbe legata a risalita di fluidi endogeni prevalentemente gassosi, che farebbero così variare il chimismo delle acque.

Capitolo 6

Sistemi di misura del radon e dei parametri correlati

6.1 Sistema di misura del radon nel suolo

La misura della concentrazione nel suolo di radon (inteso come concentrazione di ^{222}Rn e ^{220}Rn) è effettuata con un sistema nel quale sono collegati in serie, tramite l'utilizzo di tubi in vinile, uno strumento con rivelatore di particelle α (radonometro RAD7 della *DurrIDGE Company Inc.*), un cilindro contenente materiale essiccante (drierite) e un'asta cava d'acciaio che viene inserita nel terreno. Il sistema è a circuito aperto e l'aria viene estratta dal suolo grazie alla pompa del radonometro, con portata nominale in aria libera pari a circa 1 l min^{-1} .



Figura 32: sistema di misura del soil radon.

L'asta viene inserita nel suolo, tramite l'utilizzo di una testa di battuta, alla profondità desiderata, nel nostro caso 80 cm dal piano campagna tranne nella zona C1 della Caffarella, dove sono state misurate concentrazioni anche a 30 cm di profondità. La sonda utilizzata è un'asta cava prodotta dalla "RADON v.o.s." di diametro interno pari a 6,5 mm, diametro esterno 11 mm, che termina con una punta d'acciaio a perdere di diametro pari a quello esterno dell'asta. Alla sommità si applica una testa di battuta che viene martellata per l'infissione fino alla profondità desiderata. Una volta terminata l'infissione, all'interno dell'asta se ne inserisce un'altra di diametro inferiore che, tramite l'utilizzo di un distanziatore, permette l'estrazione della punta (figura 33).



Figura 33: Sonda con punta a perdere, prodotta dalla "RADON v.o.s.".

Operando in questo modo la parete esterna dell'asta cava di misura aderisce completamente al suolo, impedendo il richiamo di aria atmosferica all'interno del sistema, fatto che si verificherebbe utilizzando aste con punta di diametro maggiore del resto dell'asta (figura 34), causando una diluizione delle specie gassose considerate.



Figura 35: Tipologia di aste con diametro maggiore del resto dell'asta.

Castelluccio (2010) ha stimato una riduzione delle concentrazioni del *soil radon* a 80 cm di profondità del 30 – 40% utilizzando aste con punta di diametro maggiore del resto dell'asta, rispetto alle misure con utilizzo delle aste "RADON v.o.s.". Il miglior risultato

dunque si ottiene usando aste con parete esterna aderente completamente al suolo al di sotto del piano campagna.

6.2 Il radonometro RAD7

Il radonometro, lo strumento utilizzato per la misura della concentrazione di attività del radon, è in grado di indagare le sole particelle α , utilizzando un rivelatore allo stato solido al silicio. È stato utilizzato un modello RAD7, prodotto da *Durridge Company Inc.*, il quale è in grado di misurare contemporaneamente la concentrazione di attività di ^{222}Rn e ^{220}Rn . Il radon e i suoi figli subiscono un decadimento radioattivo con generazione di particelle α : il rivelatore distingue le diverse specie isotopiche in base all'energia caratteristica della particella α . La cella interna del radonometro è una semisfera di 0,7 L, rivestita internamente da un conduttore elettrico, e al centro di essa è posto il rivelatore allo stato solido al silicio. Un alimentatore fornisce una corrente elettrica che genera una differenza di potenziale (2000 - 2500 V) tra cella interna e rivelatore. Si crea un campo elettrico che spinge le particelle cariche positivamente sul rivelatore, al quale si fissano. Il radonometro non misura direttamente il radon, gas elettricamente neutro, bensì i suoi prodotti di decadimento.

Quando l'isotopo decade, la sua particella α ha il 50% di probabilità di arrivare al rivelatore e generare un segnale elettrico proporzionale alla sua energia. I segnali elettrici generati sono successivamente amplificati, misurati, contati e convertiti in forma digitale. Lo spettro del RAD7 è una scala di energie della particella α da 0 a 10 MeV, suddiviso in 200 canali, ciascuno dei quali copre un intervallo di 0,05 MeV. Ogni particella α rivelata incrementa uno dei 200 canali di un'unità. In tal modo ogni isotopo che decade è associato ad un picco in corrispondenza dell'energia caratteristica della sua particella α . Il picco si presenta in realtà allargato, con una caratteristica coda ad energie minori, dovuta alle particelle α che colpiscono il rivelatore con bassi angoli di incidenza. Suddividendo ulteriormente i 200 canali in 8 finestre, il RAD7 è in grado di conteggiare separatamente e contemporaneamente i prodotti di decadimento di ^{222}Rn e ^{220}Rn , di considerare separatamente il contributo di un solo isotopo, di escludere dal conteggio il *background* dovuto agli isotopi a vita media più lunga.

	Isotopo	Emivita	Decadimento (energia)	Prodotto
RADON	^{222}Rn	3.825 d	α (5.49 MeV)	^{218}Po
	^{218}Po	3.05 m	α (6.00 MeV)	^{214}Pb
	^{214}Pb	26.8 m	β	^{214}Bi
	^{214}Bi	19.7 m	β	^{214}Po
	^{214}Po	164 μs	α (7.69 MeV)	^{210}Pb
	^{210}Pb	21.4 y	β	^{210}Bi
	^{210}Bi	5 d	β	^{210}Po
	^{210}Po	138.4 d	α (5.30 MeV)	^{206}Pb (stabile)
	THORON	^{220}Rn	54.5 s	α (6.29 MeV)
^{216}Po		0.158 s	α (6.78 MeV)	^{212}Pb
^{212}Pb		10.6 h	β	^{212}Bi
^{212}Bi		60.5 m	β 66%	^{212}Po
^{212}Bi		60.5 m	α (6.05 MeV) 34%	^{208}Tl
^{212}Po		0.3 μs	α (8.78 MeV)	^{208}Pb (stabile)
^{208}Tl		3.1 m	β	^{208}Pb (stabile)

Tabella 9: Caratteristiche del decadimento di radon e thoron.

Di interesse nell'analisi di ^{222}Rn e ^{220}Rn è il range di energie $6 \div 9$ MeV, in particolare 6,00 MeV per il ^{218}Po e 6.78 MeV per il ^{216}Po . Da evidenziare che a causa del decadimento composto del ^{212}Bi , per ogni 66 atomi di ^{212}Po se ne creano 34 di ^{208}Tl con emissione di particelle α di energia 6,05 MeV: questo rende necessaria una correzione, da parte dello strumento, del picco di 6,00 MeV del ^{218}Po . In tabella 9 sono riportati i parametri relativi al decadimento di ^{222}Rn , ^{220}Rn e prodotti successivi.

In un processo di decadimento radioattivo, se la costante di decadimento del nuclide figlio è molto maggiore rispetto a quella del padre (la differenza tra i tempi di dimezzamento è molto grande) l'attività del genitore non varia apprezzabilmente durante un intervallo di tempo corrispondente a diverse volte il tempo di dimezzamento del nuclide figlio. Con nuclide figlio inizialmente assente in un sistema chiuso (quale può essere considerato il volume della cella interna del radonometro), la sua attività cresce fino a raggiungere l'equilibrio di attività con il nuclide padre dopo un intervallo di tempo pari a circa 5 volte il tempo di dimezzamento del nuclide figlio. A questo punto le due attività possono essere considerate uguali e costanti su intervalli di tempo brevi rispetto al tempo di dimezzamento del nuclide genitore (condizione di "equilibrio secolare"). Per ogni atomo del nuclide figlio che decade, se ne forma uno nuovo a spese del nuclide genitore.

Quindi il principio di funzionamento del radonometro è quello di misurare la concentrazione di attività del radon tramite i suoi prodotti di decadimento, in condizione

di equilibrio di attività. Utilizzano la modalità di misura “*Sniff*” del RAD7, lo strumento misura ^{222}Rn e ^{220}Rn tramite il solo decadimento diretto in ^{218}Po e ^{216}Po rispettivamente, ignorando le emissioni α dei decadimenti successivi (con maggiori tempi di dimezzamento): questa modalità permette letture più rapide ed è quella utilizzata per tutte le misure di radon del presente lavoro. I tempi di risposta dello strumento sono pertanto funzione del tempo necessario al raggiungimento dell’equilibrio di attività tra ^{222}Rn e ^{218}Po , equivalente a circa 15 minuti. L’equilibrio tra ^{220}Rn e ^{216}Po è molto più rapido ed è raggiunto in meno di un secondo. La modalità “*Normal*”, includendo l’analisi di altri isotopi, aumenta il livello di precisione delle misure (errore minore), ma necessita di maggiori tempi di risposta. Il RAD7 è in grado di effettuare un monitoraggio in continuo delle concentrazioni di attività, con la possibilità di suddividere una misura in più intervalli di conteggio (cicli), dei quali si può impostare la durata. Alla fine di ogni ciclo, viene fornito il relativo valore di concentrazione. Lo strumento è fornito di una pompa aspirante che permette di far fluire l’aria dai pori del suolo all’interno del sistema di misura, fino alla cella del rivelatore. Effettuando una misura in continuo, a partire dall’istante iniziale con ^{218}Po assente all’interno del sistema, la concentrazione di attività aumenta fino a raggiungere il valore all’equilibrio con il ^{222}Rn , corrispondente alla concentrazione del gas presente nel suolo. La curva di crescita è definita dall’equazione:

$$C_t = C_{EQ} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (8)$$

dove:

C_t : concentrazione di attività misurata al tempo t ;

C_{EQ} : concentrazione all’equilibrio corrispondente alla concentrazione nel suolo;

λ : costante di decadimento del ^{218}Po .

La figura 36 mostra una curva di crescita della concentrazione di ^{222}Rn , ottenuta con dati sperimentali (in blu), il cui andamento si discosta leggermente dalla curva di crescita teorica (in rosso) a causa dell’influenza dei fattori ambientali e delle tecniche strumentali. Nelle misure di *soil radon* è stato stabilito di effettuare cicli della durata di 5 minuti, ripetuti fino al raggiungimento dell’equilibrio di attività.

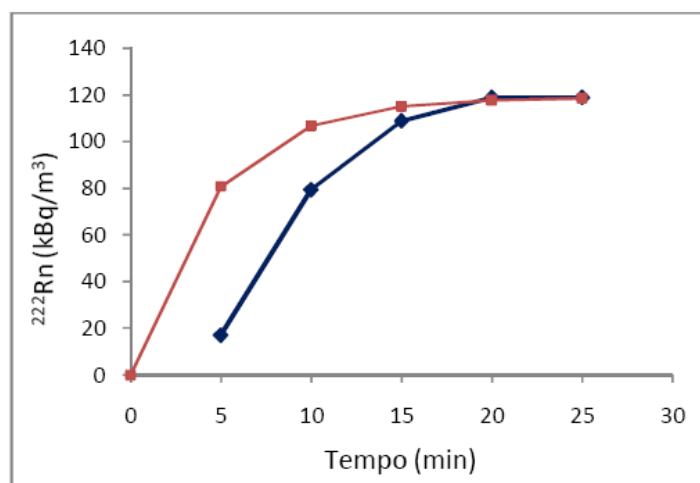


Figura 36: Curva di crescita teorica (in rosso) e sperimentale (in blu) della concentrazione di attività di ^{222}Rn all'interno del radonometro.

Discorso analogo può essere fatto per il ^{216}Po (per la misura del ^{220}Rn), ma in questo caso l'equilibrio di attività viene raggiunto in meno di un secondo, pertanto la curva di crescita non è visibile e i diversi cicli di misura mostrano un valore già all'equilibrio.

Il radonometro ha un *range* di rilevabilità della concentrazione di attività di $4 \div 400000$ Bq/m³ (con *background* vicino a zero la soglia minima di rilevabilità può essere inferiore al valore indicato). Il RAD7 fornisce, durante la misura, il valore di una serie di parametri strumentali di controllo, tra i quali temperatura e umidità relativa dell'aria nella cella interna in cui è alloggiato il rivelatore [11].

6.2.1 Sistema di misura dei flussi di radon dal suolo

Il sistema di misura per i flussi di radon e thoron dal suolo prevede l'utilizzo di tre parti distinte:

- una camera d'accumulo;
- un sistema essiccante (drierite);
- utilizzo di un radonometro RAD7.

La differenza con le misure del soil radon è data dalla camera d'accumulo utilizzata al posto dell'asta d'acciaio inserita nel terreno e nel fatto che il circuito è chiuso. La camera d'accumulo è una "pentola" aperta nella parte terminale, che viene poggiata sul suolo dove si accumula il gas esalato all'interfaccia suolo – atmosfera.

Sul coperchio ci sono due valvole: una di *outlet* e l'altra di *inlet*, collegate con tubi in vinile alla drierite e al RAD7 in modo da produrre un circuito chiuso (figura 37)



Figura 37: Sistema di misura dei flussi di radon e thoron dal suolo.

La camera d'accumulo è fornita di una ventola per favorire l'omogeneizzazione del gas e la circolazione all'interno del sistema. E' di fondamentale importanza assicurare la sigillatura delle diverse parti e dei collegamenti, in modo tale che il sistema sia effettivamente chiuso: non ci devono essere perdite (anche minime) del gas.

Il flusso di radon dal suolo viene calcolato tramite i valori di concentrazione di attività misurati all'interno del sistema chiuso. In questo caso l'equilibrio di attività si deve stabilire all'interno del sistema anche tra ^{226}Ra (contenuto nel mezzo sorgente suolo) e ^{222}Rn , e ciò avviene in circa 19 giorni. La curva di crescita della concentrazione di attività ha un andamento rettilineo nelle prime 24 ore, pertanto conoscendo lo *slope* della retta in questione e utilizzando opportune equazioni matematiche, è possibile calcolare la concentrazione di attività all'equilibrio. Per la costruzione della retta si ottengono i risultati migliori con cicli di misura di lunga durata (minore errore strumentale associato) e ripetuti più volte per ottenere un numero sufficiente di punti. Ne consegue che le misure di flusso di radon dal suolo richiedono un intervallo di tempo di diverse ore. I tempi di risposta del thoron sono molto più brevi e l'equilibrio tra ^{224}Ra e ^{220}Rn viene raggiunto in circa 5 minuti; pertanto la misura del flusso di radon dal suolo relativa a tale isotopo, può risultare più agevole rispetto al ^{222}Rn .

6.2.2 Sistema di misura dei tassi d'esalazione su campioni di suolo e roccia

La misura dei tassi d'esalazione di campioni di suolo o roccia delle aree investigate, è stata effettuata nel laboratorio di geochimica ambientale del nostro dipartimento. Queste misure sono particolarmente utilizzate per i materiali da costruzione in ottica di prevenzione dal rischio radon indoor (Carrera et al., 1997, 1999; Keller et al., 2001; Petropoulos et al., 2001). Il sistema adottato (figura 38), secondo le indicazioni di un lavoro di Castelluccio (2009), prevede l'utilizzo di:

- una pentola a pressione, opportunamente modificata, dove viene messo il campione da analizzare;
- un sistema essiccante (drierite);
- un radonometro RAD7;
- un bagno termostatico.

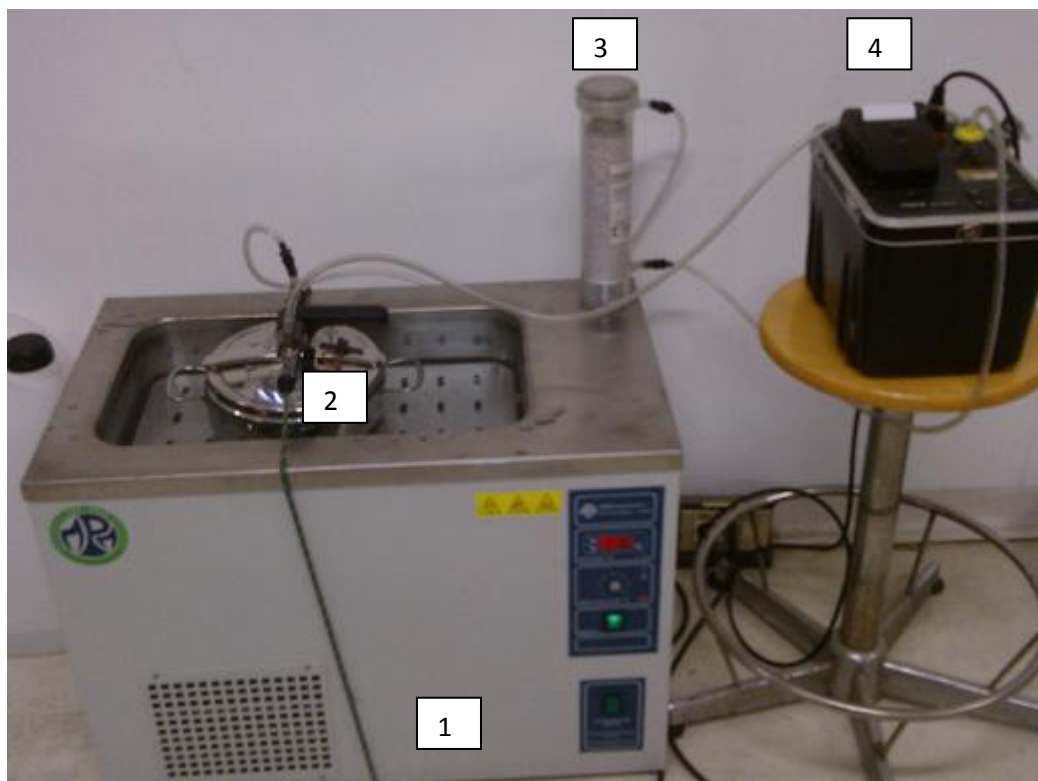


Figura 38: Sistema di misura dei tassi di esalazione di radon e thoron: 1) bagno termostatico; 2) pentola a chiusura ermetica contenente il campione da analizzare; 3) sistema essiccante (drierite); 4) radonometro RAD7.

Il campione da analizzare, circa 500 grammi in formato granulare, viene inserito all'interno della pentola a pressione, preventivamente essiccato in forno alla temperatura di 100 °C. La pentola viene alloggiata in un bagno termostatico alla temperatura di 60 °C. Sul coperchio della pentola sono presenti due valvole; una di *inlet* e l'altra di *outlet*. La prima viene collegata con tubi in vinile al sistema essiccante e quindi alla valvola d'ingresso del RAD7. Una volta analizzata dal rilevatore di quest'ultimo, l'aria in uscita viene rinviata all'interno della pentola, in modo da generare un circuito chiuso.

Gli esperimenti hanno avuto la durata di 24 ore, con cicli di misura di 2 ore ciascuno. Le misure dei tassi d'essalazione, nel nostro caso, forniscono informazioni che, assieme a tutti gli altri parametri considerati, discriminano ulteriormente il movimento del radon nel suolo da diffusivo o avvertivo.

6.3 Sistema di misura della concentrazione di CO₂ e H₂S

La misura della concentrazione di anidride carbonica e acido solfidrico nel suolo è stata eseguita utilizzando lo strumento Dräger X – am 7000 (figura 39). Equipaggiato con sensore ad infrarosso (fondo scala 100% in volume, sensibilità 0,2%) per la misura della CO₂ e con cella elettrochimica (fondo scala 500 ppm, sensibilità 0,5 ppm) per la misura dell' H₂S.



Figura 39: Strumento Dräger X – am 7000 [12].

Il collegamento con l'asta infissa nel terreno avviene tramite un tubo in vinile ed una mascherina la quale, una volta posizionata nella parte frontale, fa attivare una pompa interna permettendo l'estrazione di aria dal suolo e quindi la misura dei gas. La durata

della misura è in funzione delle concentrazioni dei gas nel suolo, di norma si attende che i valori visualizzati sul display siano stabili e ciò accade in media in 4 o 5 minuti. Lo strumento consente di effettuare misure per semplice diffusione delle specie da analizzare, senza l'utilizzo della mascherina che attivi la pompa interna. Tale metodo è particolarmente indicato per effettuare misure in ambienti *indoor*, con la possibilità di attivare degli allarmi visivi e sonori una volta superata una data concentrazione, precedentemente impostata dall'operatore.

6.4 Sistema di misura della permeabilità intrinseca del suolo

La permeabilità intrinseca (k , m^2) è uno dei parametri fondamentali per determinare la mobilità dei gas nel suolo. In questo lavoro essa è stata determinata utilizzando lo strumento RADON JOK prodotto dalla "RADON v.o.s.", appositamente per valutarne la correlazione con il gas radon.

La strumentazione permette l'aspirazione di aria dal terreno, per mezzo dell'asta cava, sfruttando l'azione gravitazionale di 1 o 2 pesi noti su una cella di gomma espandibile (figura 40).



Figura 40: Sistema di misura della permeabilità intrinseca; 1- asta cava inserita nel suolo, 2- cavo in gomma di collegamento, 3- cella di gomma espandibile, 4- pesi noti.

Il tempo di apertura della cella è direttamente proporzionale alla permeabilità intrinseca. Il RADON JOK ha una soglia di rilevabilità che va da un minimo di $5,4 \cdot 10^{-14}$, fino ad un massimo di $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$. L'asta cava inserita nel terreno è la stessa utilizzata per la determinazione delle concentrazioni del radon, anidride carbonica e acido solfidrico.

6.4.1 Nuovo sistema di misura della permeabilità intrinseca

Il RADON JOK si è rivelato uno strumento molto affidabile per la determinazione della permeabilità intrinseca. L'aspetto negativo è rappresentato dalla poca praticità nel trasportarlo in campagna, visto il suo elevato ingombro e peso di circa 20 kg. Durante il secondo anno di dottorato, assieme al mio gruppo di ricerca, abbiamo realizzato uno strumento più pratico, meno ingombrante del RADON JOK, con restituzione di dati di permeabilità intrinseca confrontabili con il primo.

La strumentazione denominata “*Permeometro RM3*” è composta da:

- a) una pompa da vuoto (portata nominale in aria $4,4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$);
- b) un vacuometro (range di misura $-210 \div 210 \text{ mmbar}$);
- c) un flussimetro analogico (range $0 \div 5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$);
- d) una batteria ricaricabile da 12 V;
- e) una serie di tubi in vinile per i vari collegamenti.

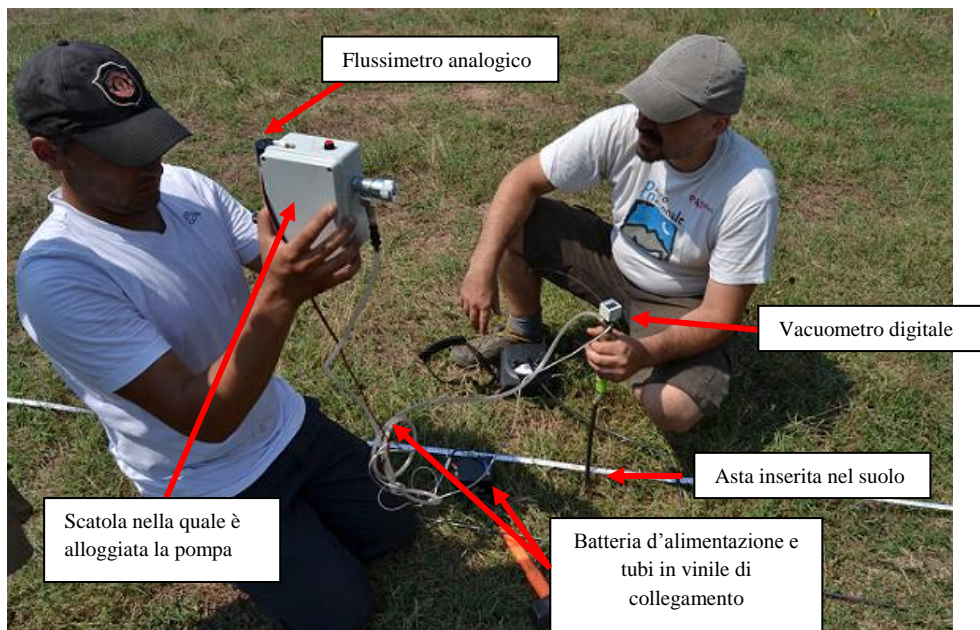


Figura 42: Utilizzo del permeometro RM3 durante una misura

Il vacuometro viene collegato alla testa dell'asta inserita nel suolo, da qui tubi in vinile trasportano l'aria del suolo, grazie all'utilizzo della pompa alloggiata nella scatola grigia visibile in figura 42, ad un flussimetro dove viene effettuata la lettura. La portata e la differenza di pressione misurata dal vacuometro, sono direttamente proporzionali alla permeabilità intrinseca del suolo.

Sostituendo nell'equazione 21, spiegata nel paragrafo 7.4, i valori di Q (espressa in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e ΔP (espressa in Pa) si ottiene il valore della permeabilità intrinseca del suolo espressa in m^2 .

6.5 Sistema di misura del contenuto di ^{226}Ra e ^{232}Th in campioni di suolo e roccia

La presenza di radionuclidi in campioni di suolo e roccia prelevati in campagna, è stata analizzata tramite lo spettrometro γ del nostro laboratorio. Lo strumento in questione ha un rivelatore semiconduttore al germanio iperpuro (HPGe). L'ottima risoluzione del germanio permette la distinzione di radionuclidi con energie molto vicine tra loro. Il rivelatore HPGe è racchiuso in un criostato collegato ad un *dewar* contenente azoto liquido. La funzione di quest'ultimo è quella di mantenere la temperatura bassa per minimizzare perdite di corrente del rivelatore e consentirne una migliore risoluzione. I segnali provenienti dal rivelatore e amplificati da un preamplificatore, vengono inviati all'apparato di misura. Il segnale viene quindi memorizzato da un analizzatore multicanale, generando uno spettro di emissione contenente informazioni sul numero di colpi registrati (figura 42).

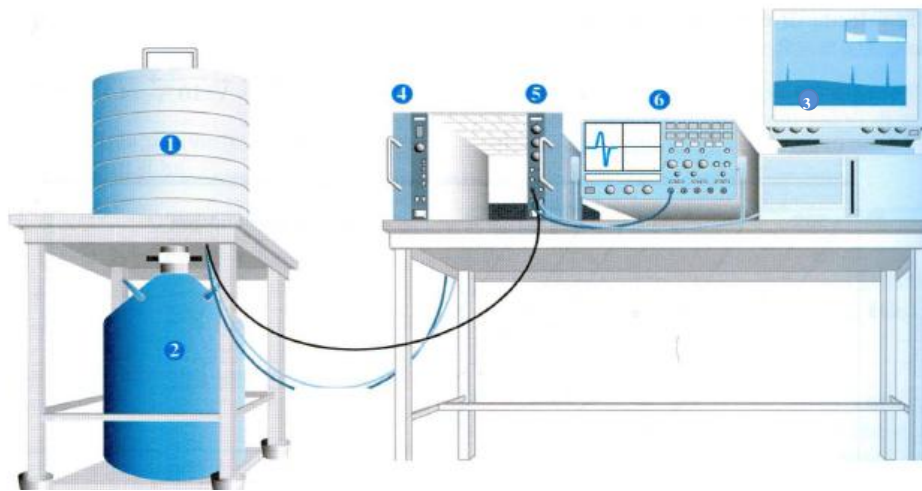


Figura 42: Rappresentazione schematica di uno spettrometro a raggi gamma; 1- rivelatore al germanio iperpuro con schermo protettivo in piombo, 2- vaso DEWAR contenente azoto liquido, 3- computer con software per analizzatore multicanale, 4- alimentazione del rivelatore, 5- amplificatore, 6- oscilloscopio (immagine tratta da Vanga, 2009).

Per ottenere la conversione da colpi registrati a disintegrazioni al secondo (esprimendo il contenuto di isotopi radioattivi in Bq/kg), si utilizzano opportuni *standard* di riferimento misurati sia in spettrometria γ che in spettrometria α .

Capitolo 7

Elaborazione dei dati

7.1 Concentrazione di radon e thoron nel suolo

Il radonometro RAD7, descritto nel capitolo 6, fornisce i dati di radon e thoron per mezzo di una piccola stampante, collegata con il sensore ad infrarosso dello strumento. Alternativamente i dati di ogni misura, archiviati dalla memoria interna, possono essere trasferiti su un computer in un secondo momento. Le concentrazioni di attività di ^{222}Rn e ^{220}Rn vengono espressi in termini di disintegrazioni per secondo per unità di volume (Bq/m^3). Ogni misura di *soil radon* ha una durata di 25 minuti, con cicli di 5 minuti ciascuno, fino al raggiungimento dell'equilibrio di attività tra il ^{222}Rn e il ^{218}Po . Il valore di ^{222}Rn nel suolo viene ottenuto mediando i valori degli ultimi 2 cicli di misura, quando la loro differenza è compresa tra $\pm 10\%$. Per quanto riguarda il ^{220}Rn , l'equilibrio di attività con il ^{216}Po viene raggiunto in meno di un secondo, pertanto già dopo il primo ciclo di misura i valori sono simili tra loro. Il calcolo della concentrazione di ^{220}Rn si effettua mediando i 4 cicli di misura e moltiplicando il valore ottenuto per un fattore di correzione. Quest'ultimo si rende necessario in quanto il thoron ha un tempo di dimezzamento molto breve (55,6 secondi) e tenendo conto del tempo di percorrenza del gas dal sottosuolo al rivelatore del RAD7, una quantità notevole di gas viene persa. Indicando con t il tempo che il gas impiega ad attraversare il sistema, esso può essere calcolato utilizzando una semplice equazione:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (9)$$

dove:

V = volume totale del sistema;

Q = portata della pompa del RAD7.

La portata della pompa del RAD7 è funzione della permeabilità intrinseca del sottosuolo, per cui è stata misurata ogni volta utilizzando un semplice flussimetro collegato alla valvola di *outlet* dello strumento. (figura 43).



Figura 43: Utilizzo del flussimetro per determinare la portata della pompa RAD7.

Considerando una concentrazione di attività iniziale (A_0) di thoron, corrispondente a quella presente nel suolo che si vuole misurare, lo strumento rileva una concentrazione di attività (A_t) al tempo t , necessario per trasportare il volume di aria dai pori del suolo alla camera di conteggio. Le due quantità sono legate dall'equazione del decadimento radioattivo:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Esprimendo l'equazione in funzione del parametro che si vuole calcolare, si ottiene:

$$A_0 = A_t \cdot e^{\lambda t} \quad (11)$$

Utilizzando la costante di decadimento del ^{220}Rn ($\lambda = 0,0124 \text{ s}^{-1}$) e il tempo calcolato grazie all'utilizzo del flussimetro, che misura la portata Q del RAD7, dall'equazione (10) si può ottenere il coefficiente di correzione da applicare alla concentrazione misurata di attività di ^{220}Rn . Per terreni poco permeabili il fattore di correzione sarà maggiore rispetto a quello per terreni permeabili.

7.2 Determinazione in laboratorio dei tassi d'esalazione

Il calcolo del tasso d'esalazione su campioni di suolo o roccia analizzati con il sistema descritto nel sottoparagrafo 6.2.2, viene effettuato partendo dall'equazione 12 (Petropoulos et al., 2001):

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda t} + \frac{E \cdot (1 - e^{-\lambda t})}{\lambda \cdot V} \quad (12)$$

dove:

C = concentrazione di attività del ^{222}Rn (Bq m^{-3});

C_0 = concentrazione iniziale del ^{222}Rn (Bq m^{-3}) al tempo $t = 0$;

λ = costante di decadimento del ^{222}Rn (h^{-1});

E = tasso d'esalazione del ^{222}Rn (Bq h^{-1});

t = tempo di durata dell'esperimento (h);

V = volume libero del sistema (m^3).

Risolviendo E dall'equazione 12, si ottiene:

$$E_{222} = \frac{(C - C_0 \cdot e^{-\lambda t}) \cdot \lambda V}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (13)$$

Semplificando ulteriormente l'equazione 13, possiamo calcolare il tasso d'esalazione del radon come:

$$E_{222} = (m + \lambda_{222} \cdot C_0) \cdot V \quad (14)$$

dove:

m = *slope* iniziale della curva di crescita della concentrazione di radon nel sistema espresso come ($\text{Bq m}^{-3} \text{h}^{-1}$).

In questo modo dividendo il valore di E_{222} (Bq h^{-1}) per la superficie esalante (m^2) e per la massa del campione (kg), otteniamo rispettivamente il tasso d'esalazione per unità di volume (*surface exhalation rate*; $\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e il tasso d'esalazione per unità di massa (*mass exhalation rate*; $\text{Bq kg}^{-1} \text{h}^{-1}$).

Per il calcolo del tasso d'esalazione del ^{220}Rn , è stata utilizzata l'equazione seguente:

$$E_{220} = (\lambda_{220} \cdot V_0) \cdot \frac{C_m}{e^{-\lambda t} (V_1/Q)} \quad (15)$$

dove:

λ_{220} = costante di decadimento del ^{220}Rn (h^{-1});

V_0 = volume della pentola (m^3);

C_m = concentrazione dell'attività del ^{220}Rn (Bq m^{-3});

Q = portata del sistema ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$).

L'equilibrio di attività per il thoron viene raggiunto dopo solo 272,5 secondi, quindi con il termine C_m si intende il valore medio della concentrazione di attività del ^{220}Rn per 24 h di misura. Come per il tasso d'esalazione del ^{222}Rn , se dividiamo il valore ottenuto con l'equazione 12 per la superficie esalante (m^2) e la massa del campione (kg) si ottengono i tassi d'esalazione per unità di superficie ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e per unità di massa ($\text{Bq kg}^{-1} \text{h}^{-1}$).

7.3 Determinazione dei flussi di radon e thoron dal suolo

Per il calcolo del flusso di radon dal suolo, la base di partenza è sempre l'equazione 12 di Petropoulos et al. (2001) da cui risolvendo il termine E si ottiene:

$$E_{222} = \frac{(m + \lambda_{222} \cdot C_0) \cdot V}{S} \quad (16)$$

dove:

E_{222} = flusso di radon dal suolo ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$);

V = volume libero del sistema (m^3);

λ_{222} = costante di decadimento del ^{222}Rn (h^{-1});

S = superficie di base della camera di accumulo, a contatto con il terreno (m^2);

m = *slope* iniziale della curva di crescita della concentrazione di radon nel sistema espresso come ($\text{Bq m}^{-3} \text{min}^{-1}$);

C_0 = concentrazione iniziale di attività di ^{222}Rn (Bq m^{-3}).

Siccome m è espresso come ($\text{Bq m}^{-3} \text{ min}^{-1}$), va moltiplicato per 60 per da ottenere il valore in ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$).

Visto che in ambiente *outdoor* la concentrazione di attività iniziale di ^{222}Rn è pari a 0, l'equazione 16 può essere ridotta a:

$$E_{222} = \frac{m \cdot 60 \cdot V}{S} \quad (17)$$

I flussi di thoron dal suolo sono stati calcolati utilizzando l'equazione di Lehmann et al., (2004):

$$E_{220} = \frac{Q + \lambda_{220} \cdot V_0 \cdot C_{eff}}{S} \quad (18)$$

dove:

Q = portata del RAD7 ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$);

λ_{220} = costante di decadimento del ^{220}Rn (h^{-1});

V_0 = volume della camera di accumulo (m^3);

C_{eff} = concentrazione reale all'interno della camera di accumulo (Bq m^{-3});

S = superficie di base della camera di accumulo, a contatto con il terreno (m^2).

Anche in questo caso, come per la misura dei tassi d'esalazione effettuati in laboratorio, il valore di ^{220}Rn all'equilibrio si ha già a partire dal primo ciclo di misura.

7.4 Calcolo dell'errore associato

Il calcolo dell'errore associato ad ogni valore di *soil radon* misurato, è stato effettuato utilizzando il metodo della propagazione dell'errore, considerando i diversi contributi che determinano l'incertezza del valore. Innanzitutto lo strumento di misura, il RAD7, fornisce per ogni valore di concentrazione di attività, un valore di incertezza 2σ (intervallo di confidenza al 95,45%) derivante da stime di precisione basate su conteggi statistici. Altro contributo all'errore è fornito dal procedimento di elaborazione del dato, che prevede l'utilizzo di un valore derivante da una media aritmetica. Quindi a tale valore medio può essere associata una deviazione standard (σ). Considerando questi due diversi contributi (a e b), e uniformando i valori ad un grado di incertezza σ (intervallo

di confidenza al 68,27%), per il calcolo dell'errore associato (u) è stata utilizzata la seguente equazione:

$$u = \sqrt{a^2 \cdot b^2} \quad (19)$$

7.5 Determinazione della permeabilità intrinseca

Per la misura della permeabilità intrinseca è stata utilizzata la strumentazione descritta nel paragrafo 6.4 (RADON JOK), dove il parametro k è direttamente proporzionale al tempo di aspirazione di un volume noto di aria dai pori del suolo, sotto l'azione di una differenza di pressione nota. Il valore di k si ottiene utilizzando l'equazione di Barnet et al. (2008):

$$k = \frac{V \cdot \mu}{F \cdot \Delta p \cdot t} \quad (20)$$

dove:

V: volume d'aria all'interno della cella espandibile (volume noto aspirato);

μ : viscosità dinamica dell'aria a 10°C (1,75E-5 Pa · s);

F: fattore di forma dell'asta cava infissa nel terreno (0,149 m);

Δp : differenza di pressione tra la superficie e la profondità di misura;

t: tempo di apertura della cella (tempo di aspirazione).

Il rapporto tra il volume e tempo equivale ad una portata Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), quindi l'equazione 20 può essere rappresentata come:

$$k = \frac{Q \cdot \mu}{F \cdot \Delta p} \quad (21)$$

Questa equazione viene utilizzata per le misure effettuate con il secondo sistema di misura (*Permeometro RM3*) illustrato nel sottoparagrafo 6.4.1 dove, inserendo i valori della portata e della differenza di pressione, possiamo ricavare il valore della permeabilità intrinseca.

Per classificare la permeabilità intrinseca, è stata utilizzata la tabella 5 (sottoparagrafo 2.6.2) proposta da Neznal e Neznal (2005).

Capitolo 8

Valutazione delle possibili relazioni tra concentrazioni di radon nel suolo e presenza di cavità sotterranee

8.1 Il sito di indagine della Tenuta di Tor Marancia, Roma

La Tenuta di Tor Marancia è situata nella parte nord-occidentale del Parco Regionale dell'Appia Antica, all'interno del territorio comunale di Roma (figura 44).



Figura 44: La Tenuta di Tor Marancia [13].

L'appellativo "Tenuta" è dovuto al fatto che quest'area è certamente uno dei tratti di campagna romana meglio conservati, a ridosso della città. Il paesaggio è collinare con un'alternanza di ampi pianori, tuttora coltivati, e zone umide che hanno consentito la permanenza di una elevata biodiversità. L'area, assieme a tutto il sistema Parco, svolge

un ruolo importantissimo nel mantenimento del corridoio biologico che unisce le pendici dei Colli Albani con il centro storico di Roma.

La caratteristica principale della zona, così come per gran parte del territorio del Parco, è legata alla presenza di numerose cave e cavità sotterranee (figura 45) di varia origine storica e dalle diverse funzioni.



Figura 45: Una delle tante cave di tufo presenti nell'area.

Lo sfruttamento intensivo del sottosuolo per ricavare materiale da costruzione (pozzolane e tufi in primis) è iniziato in epoca etrusca e successivamente nel periodo repubblicano ed imperiale, parallelamente all'espansione della città. Alcune delle cave poi vennero scavate per esigenze di culto e come cimiteri, basti pensare alle numerose catacombe presenti all'interno del Parco e nelle zone limitrofe. Molte delle cavità sono state riutilizzate nel corso dei secoli, sia per attività estrattiva o, in tempi più recenti, come fungaie, depositi militari e rifugi durante la seconda guerra mondiale ed attualmente anche come abitazioni di fortuna.

Alcune di queste cavità hanno imbocchi visibili dalla superficie, altre sono individuabili in base alla presenza di cedimenti superficiali ed altre ancora possono essere individuate in base a fonti bibliografiche.

Per questo progetto di ricerca è stata selezionata una cavità sotterranea di circa 80 m di lunghezza, la cui entrata, facilmente accessibile, si trova a non più di 3-5 m al di sotto del piano campagna (figura 46)

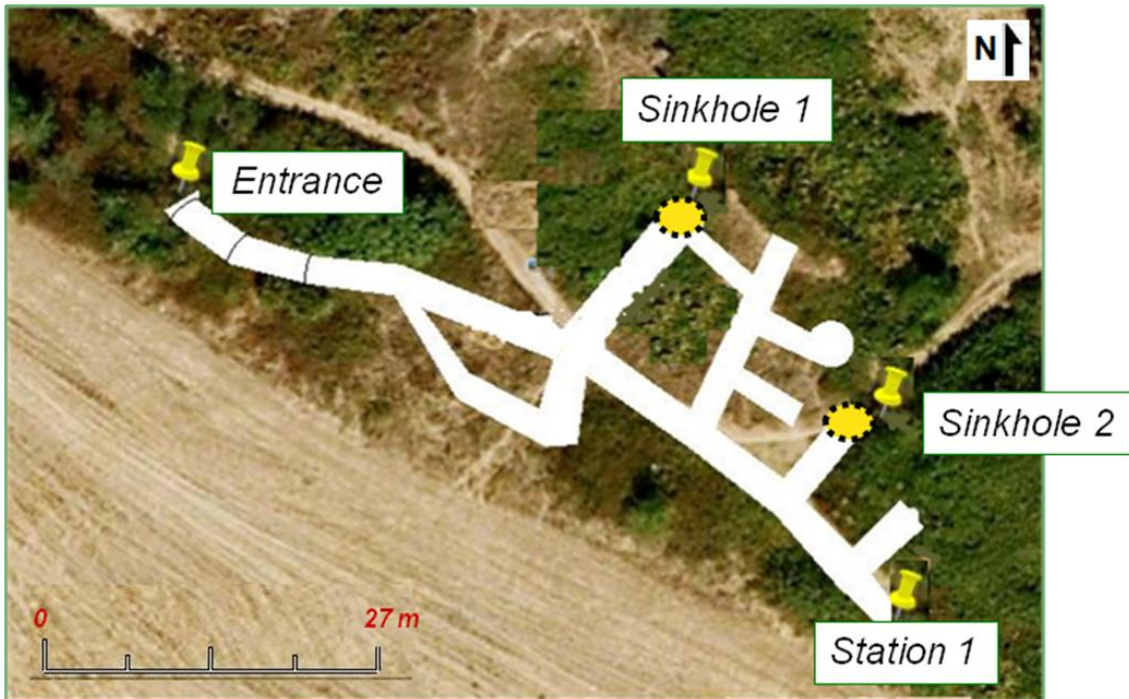


Figura 46: Planimetria della cavità studiata all'interno della Tenuta di Tor Marancia. Sono riportate: l'entrata, i due crolli superficiali e con il termine station 1 viene intesa la stazione fissa di misura di soil radon e CO₂ in superficie, per valutare la variabilità temporale delle concentrazioni dei gas.

La cavità si sviluppa lungo una direzione principale (3,5-4,0 m in larghezza e 2,3-3,0 m di altezza), interessata da rami minori laterali e scavata interamente nell'unità delle pozzolane rosse. Sono presenti anche due sinkhole formati per crolli della volta (figura 47)



Figura 47: Immagine dell'interno della cavità, con evidenziato il materiale crollato da uno dei rami laterali. Sono ancora evidenti i sacchi di terriccio utilizzati per la coltivazione di funghi.

Al fine di valutare l'influenza della presenza della cavità sotterranea sulle concentrazioni di radon e thoron nel suolo, sono state eseguite:

- misure di concentrazione di radon e thoron all'interno della cavità;
- misure di concentrazione di radon, thoron e CO₂ nel suolo al di sopra di dove si registra la presenza della cavità;
- misure di concentrazione di radon, thoron e CO₂ nel suolo dove non si registra la presenza della cavità.

I risultati ottenuti dalle indagini sopra descritte vengono illustrati nei paragrafi seguenti.

8.1.1 Misure di radon e thoron all'interno della cavità sotterranea

Le concentrazioni di radon e thoron indoor nella cavità, sono state effettuate in tre punti distinti: nella parte iniziale, parte mediana e finale del tunnel principale, come riportato in figura 48.

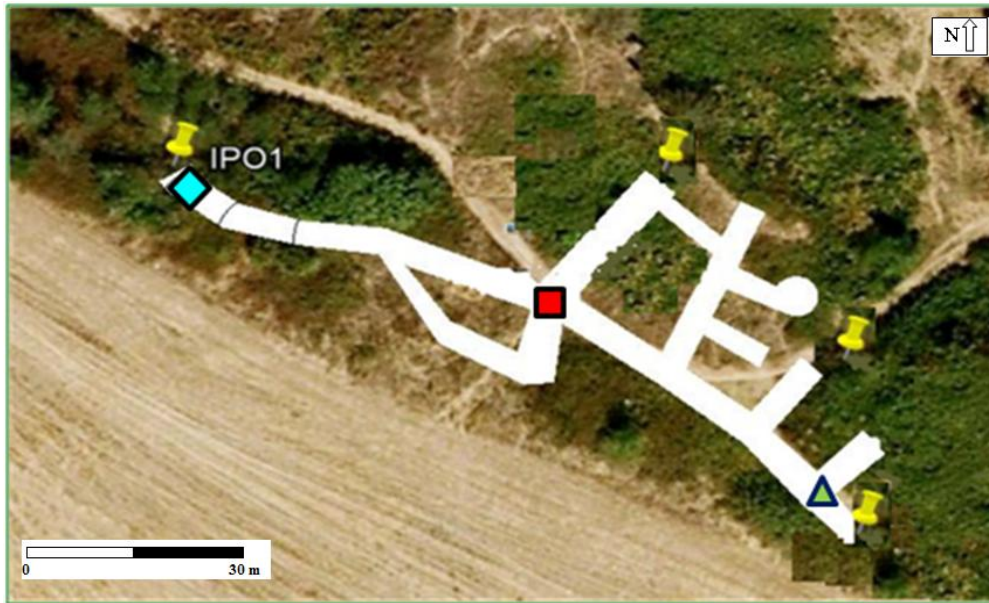


Figura 48: Posizione delle misure indoor di radon e thoron: \blacklozenge parte iniziale; \blacksquare parte mediana; \blacktriangle parte finale.

Per valutare le concentrazioni di radon e thoron nella cavità è stato utilizzato il radonometro RAD7 (descritto nel paragrafo 6.2) ed ogni misura ha avuto la durata di 2 ore. Le misure sono state effettuate in quattro periodi del 2012, più precisamente nei mesi di marzo, aprile, giugno e luglio. I valori ottenuti da questi monitoraggi sono riportati in tabella 10.

DATA	POSIZIONE MISURA	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore ^{222}Rn ± (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore ^{220}Rn ± (Bq/m ³)
MARZO 2012	parte iniziale	2800	750	740	320
	parte mediana	3000	760	850	240
	parte finale	4500	820	920	150
APRILE 2012	parte iniziale	4300	470	680	200
	parte mediana	4600	520	750	120
	parte finale	6900	550	800	240
GIUGNO 2012	parte iniziale	5400	420	910	410
	parte mediana	5700	440	1300	600
	parte finale	8600	650	1200	520
LUGLIO 2012	parte iniziale	7200	510	1100	510
	parte mediana	7800	560	1400	430
	parte finale	11600	700	1600	600

Tabella 10: Risultati delle misure di radon e thoron all'interno della cavità.

Il livello di radon indoor nell'aria della cavità è sempre più elevato nella parte terminale, dove si ha minor influenza della diluizione delle concentrazioni di radon da parte dell'aria atmosferica rispetto agli altri punti di misurazione iniziale e centrale. I valori di radon nella parte terminale oscillano tra 4,5 kBq/m³ e 11,6 kBq/m³. Risulta evidente in tutti i punti di misura come le concentrazioni di radon indoor aumentino nel periodo estivo, quando il gradiente di temperatura tra l'aria della cavità e l'aria esterna è più alto, come visualizzato nel grafico di figura 49.

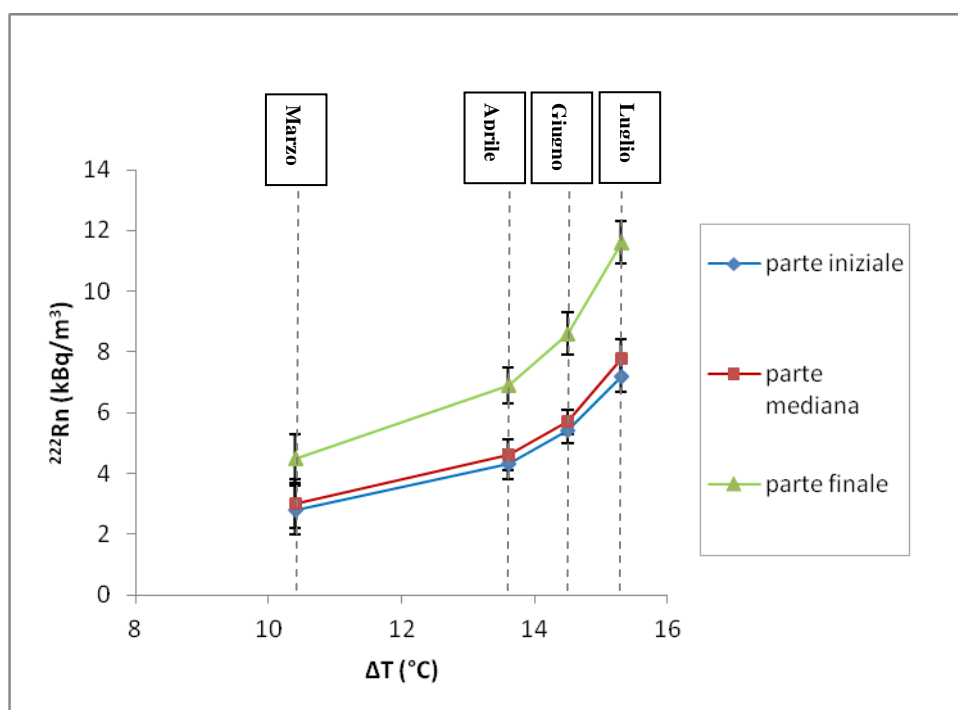


Figura 49: Andamento delle concentrazioni di radon indoor nella cavità nei tre punti di monitoraggio, in funzione del ΔT (°C) tra l'aria interna e l'aria atmosferica.

Questa relazione tra le concentrazioni di radon indoor nella cavità e gradiente di temperatura, è stata riscontrata in un lavoro simile effettuato in grotte carsiche della Slovenia (Hakl et al.,1996), dove le concentrazioni estive di radon sono molto superiori a quelle registrate durante i periodi invernali.

Quando il gradiente di temperatura tra l'aria indoor della cavità (AIC) e l'aria atmosferica aumenta, si genera un flusso d'aria che si muove dall'interno della cavità verso l'esterno. In questo modo viene impedito l'ingresso dell'aria atmosferica verso l'interno che andrebbe a diluire le concentrazioni di radon indoor, proprio come avviene quando il ΔT diminuisce.

Le concentrazioni di thoron nell'AIC rispecchiano l'andamento delle concentrazioni di radon nei tre punti di misura, come riportato nel grafico in figura 50.

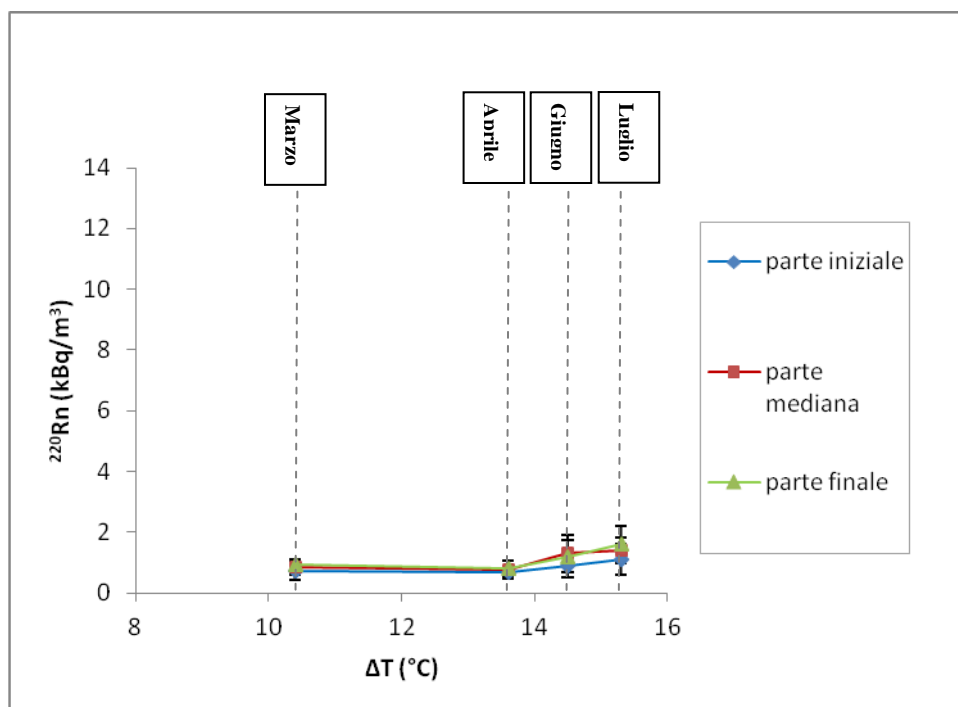


Figura 50: Andamento delle concentrazioni di thoron indoor nella cavità nei tre punti di monitoraggio, in funzione del ΔT (°C) tra l'aria interna e l'aria atmosferica.

Anche per il thoron i valori più alti si misurano nella parte terminale della cavità, con concentrazioni, sebbene molto inferiori a quelle di radon, che aumentano all'aumentare del ΔT tra AIC e aria atmosferica.

8.1.2 Misure di soil radon in superficie

L'area interessata dalla cavità sotterranea è stata investigata nel periodo primavera-estate 2012, con misure di concentrazione di radon, thoron e CO_2 nel suolo e valutazione della permeabilità intrinseca a 80 cm dal piano campagna, in alcuni punti sia al di sopra della cavità, sia dove la cavità non è presente. L'ubicazione dei punti di misura è riportata in figura 51.

Per controllare la variabilità stagionale di radon e thoron è stato indispensabile installare una stazione fissa di monitoraggio (station 1, st1). Questa accortezza ci ha permesso di determinare il fattore di correzione da applicare a tutti i dati, raccolti in un arco di tempo di diversi mesi. La stazione di riferimento rappresenta quindi un punto di controllo delle variazioni temporali del *soil radon* che consente di correlare i dati raccolti in un unico

periodo di tempo, nel nostro caso le condizioni iniziali di marzo, rendendo i valori ottenuti confrontabili tra loro.



Figura 51: Ubicazione dei punti di misura di soil radon in superficie: ● punti di misura dove non è presente cavità al di sotto; ● punti di misura con presenza di cavità al di sotto.

In appendice A sono riportate le coordinate (UTM) dei 24 punti di misura, con i valori delle concentrazioni di *soil radon*, di CO₂ e della permeabilità intrinseca. Il monitoraggio dalla stazione fissa (STM1) è stato effettuato come operazione preliminare di ognuna delle giornate di lavoro in campagna. I valori di ²²²Rn registrati in questa stazione (tabella 11), come ci si attendeva, mostrano una diminuzione fino al 63%: da 65 kBq/m³ di marzo fino a 24 kBq/m³ di luglio 2012. Diverso è il comportamento del ²²⁰Rn che subisce una bassa influenza delle condizioni fisiche del suolo, in quanto il valore registrato vale per l'immediato intorno del punto di misura (Schroeder et al., 1965).

STM1	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore ^{222}Rn ± (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore ^{220}Rn ± (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Marzo	65350	2070	251300	11850	1,4	1,7E ⁻¹¹
Aprile	50600	1940	477750	34000	1,5	2,4E ⁻¹¹
Giugno	24300	2200	279930	15220	0,8	3,0E ⁻¹¹
Luglio	24450	1100	269640	12370	0,9	2,5E ⁻¹¹

Tabella 11: Variabilità temporale del soil radon, CO₂ e permeabilità intrinseca nella stazione fissa di monitoraggio STM1.

Anche la concentrazione dell'anidride carbonica nel suolo subisce una certa variabilità, con valori più bassi misurati nei mesi di giugno e luglio. La permeabilità intrinseca misurata in questi mesi nella stazione STM1, attraverso l'utilizzo del RADON JOK (vedere paragrafo 6.4 per la spiegazione), risulta essere sempre alta ($k > 4,0\text{E}^{-12} \text{ m}^2$) con valori che tendono ad aumentare nel periodo più secco, corrispondente ad un contenuto minore di acqua nel suolo, ostacolando l'accumulo di gas nello stesso.

Il valore di concentrazione di radon nei punti di misura al di sopra della cavità, varia da un minimo di 25,2 kBq/m³ ad un massimo di 71,2 kBq/m³, con una media pari a 53 kBq/m³. Per i punti di misura posizionati dove non è presente la cavità nel sottosuolo, il radon varia da 35 kBq/m³ a 50 kBq/m³, con un valore medio di 42 kBq/m³.

Il thoron nei punti su cavità ha un valore medio di 185 kBq/m³, al cospetto di una media di 276 kBq/m³ dove non è presente alcuna cavità.

L'anidride carbonica nel suolo non sembra avere grosse differenze tra i due casi, con un valore medio di 1,1 vol.% sia per i punti con cavità, sia per quelli senza.

E' interessante l'analisi del dato medio del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$. Per i punti al di sopra della cavità esso è pari a 0,32. Viceversa nei punti senza cavità sotterranea è di 0,16. Questo rapporto riflette il contenuto superiore di radon e inferiore di thoron, misurati nel suolo con presenza di cavità. Tali risultati suggeriscono che la presenza di cavità sotterranee poco profonde, possono fornire un contributo extra di radon nella parte superiore di suolo.

8.1.3 Variabilità del soil radon nel settore principale della cavità

Lungo la direzione principale della cavità sono state effettuate 7 misure di *soil radon* in superficie per verificare la possibile influenza dell'aria atmosferica sulle concentrazioni dei gas misurati nel suolo sopra la volta della cavità. I punti di misura sono stati scelti con una spaziatura più o meno regolare a partire dal settore in prossimità dell'entrata della cavità, fino al punto finale rappresentato dalla stazione fissa STM1. L'ubicazione delle misure viene riportata in figura 52, ed in tabella 12 sono riportati i risultati delle misure di concentrazioni di radon, thoron CO₂ e permeabilità intrinseca ottenuti dal monitoraggio.

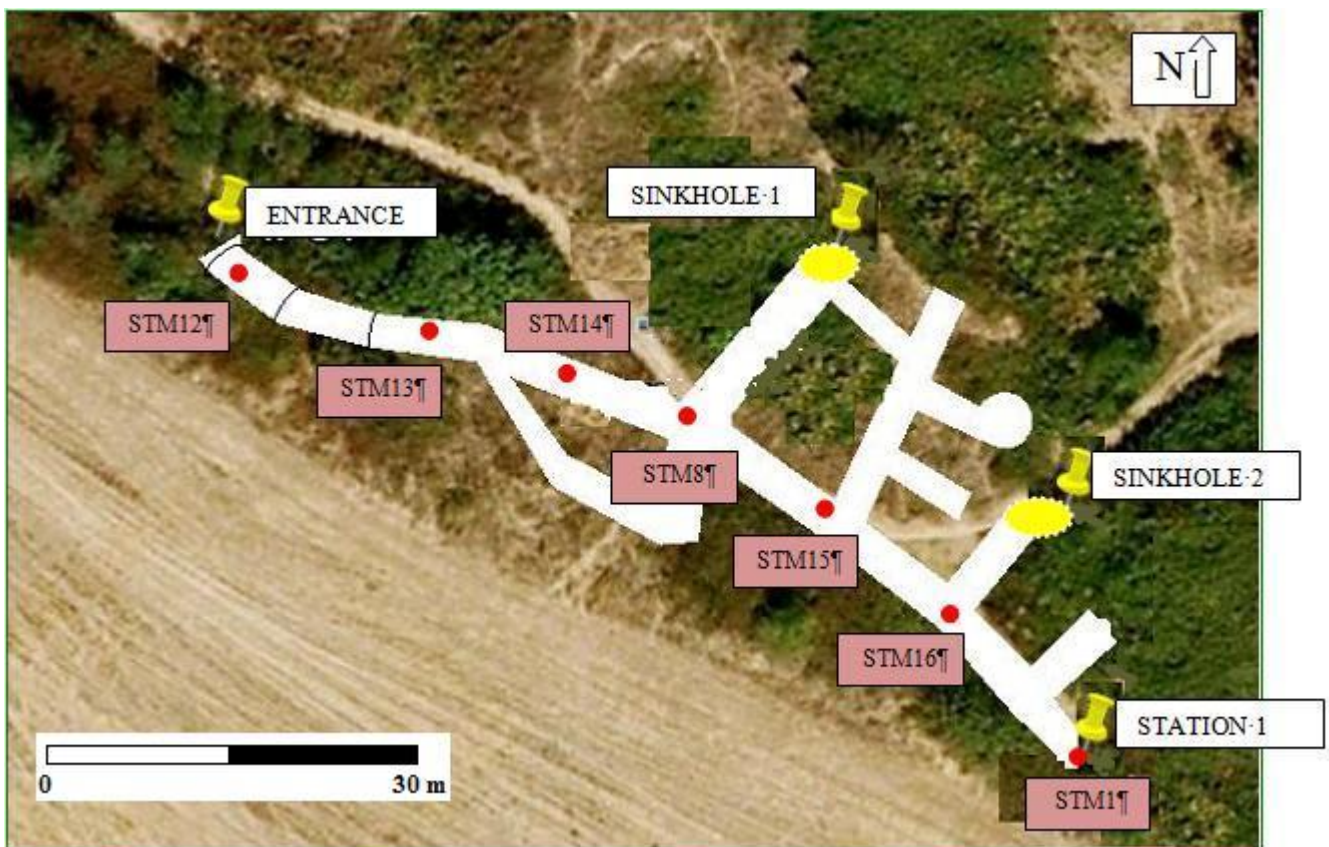


Figura 52: Ubicazione delle misure nel suolo, lungo la traccia della direzione principale della cavità (NW-SE).

Punto di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore ^{222}Rn ± (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore ^{220}Rn ± (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
STM12	28190	3600	195950	7460	0,6	2,0E ⁻¹¹
STM13	25200	1800	178890	7900	0,4	1,8E ⁻¹¹
STM14	37800	2340	183670	7650	0,6	1,1E ⁻¹¹
STM8	61200	3100	156670	10500	2,0	3,0E ⁻¹¹
STM15	62800	3870	181750	7600	1,2	2,5E ⁻¹¹
STM16	48150	4200	165130	11150	1,4	2,2E ⁻¹¹
STM1	65350	2070	251300	11850	1,4	1,7E ⁻¹¹

Tabella 12: Risultati delle misure posizionate direttamente sopra l'impronta principale della cavità, alla profondità di 80 cm dal piano campagna.

Le concentrazioni di radon tendono ad aumentare al crescere della distanza dei punti dall'entrata della cavità, come mostrato nel grafico in figura 53.

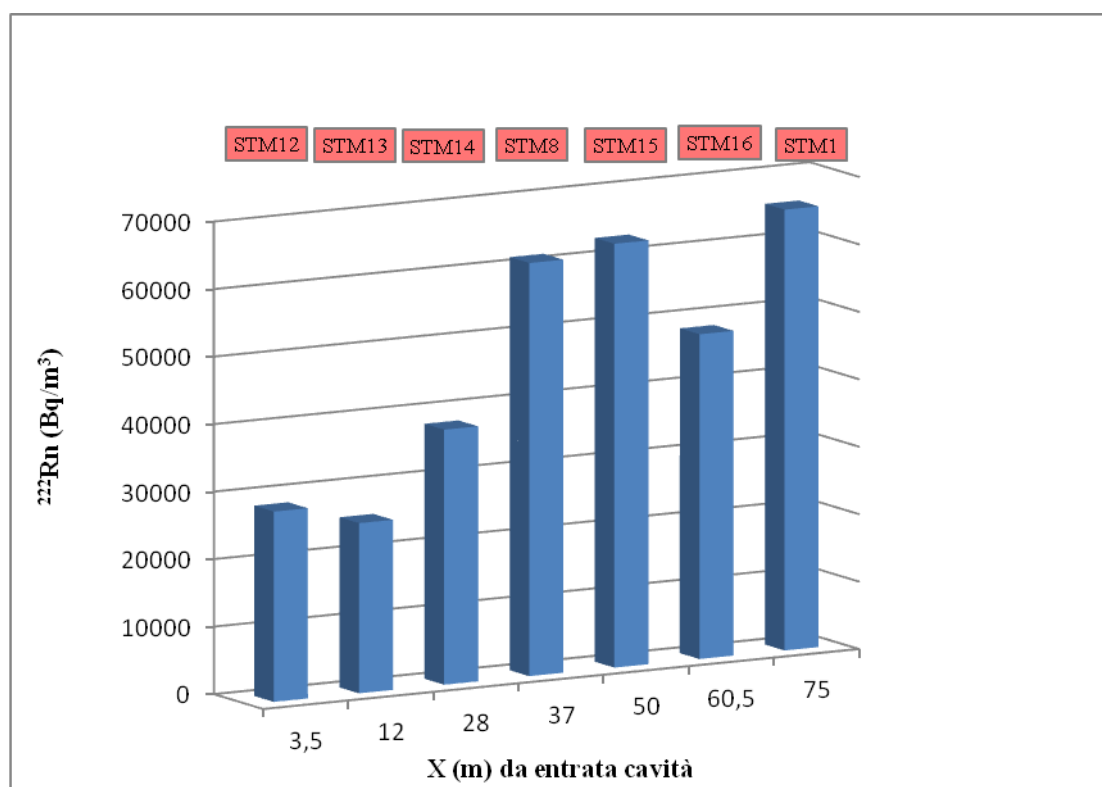


Figura 53: Andamento delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo, sulla direzione principale della cavità, in funzione della distanza dall'entrata della cavità.

Questo comportamento può essere spiegato con una maggiore influenza dell'aria atmosferica sullo strato superficiale della volta iniziale della cavità, che crea una

maggiore areazione del sottosuolo con conseguente diluizione del radon nel suolo. Una conferma di questa spiegazione può venire dall'interpretazione della concentrazione di radon (48 kBq/m^3) misurata nel punto STM16, compreso tra i punti STM15 (63 kBq/m^3) e STM1 (65 kBq/m^3). Vedendo l'ubicazione di STM16 in figura 52, si nota la sua vicinanza con il sinkhole 2 che rappresenta una via d'ingresso di aria atmosferica e conseguente diluizione della concentrazione di radon nel suolo. L'anidride carbonica nel suolo presenta una variabilità meno evidente rispetto al radon, come visualizzato nel grafico in figura 54, anche se è possibile notare una buona correlazione tra i dati, con le concentrazioni più basse di CO_2 misurate nei punti in prossimità dell'entrata della cavità.

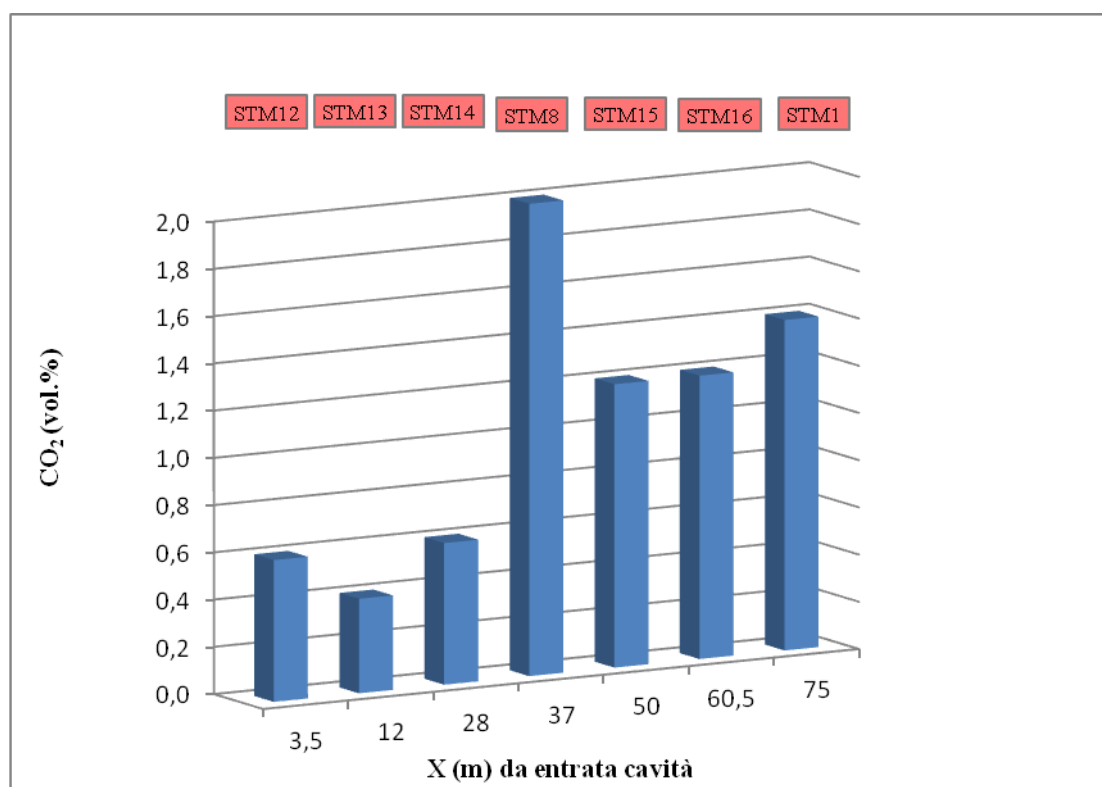


Figura 54: Andamento delle concentrazioni di CO_2 nel suolo, sulla direzione principale della cavità, in funzione della distanza dall'entrata della cavità.

Il rilievo della permeabilità intrinseca, effettuato negli stessi punti di misura di soil radon e CO_2 , ricade in classe di alta permeabilità ($k > 4,0\text{E}^{-12} \text{ m}^2$) per tutti i punti di misura. Non vi sono quindi casi di bassa permeabilità intrinseca tali da spiegare la variabilità notevole di ^{222}Rn e CO_2 nel suolo al di sopra dell'impronta principale della cavità e, trattandosi di una stessa litologia (suolo su substrato vulcanico del Tufo di

Villa Senni), questo conferma come la presenza di vie d'ingresso di aria atmosferica nella cavità possa provocare la diluizione delle concentrazioni dei gas del suolo in superficie nelle zone limitrofe a queste entrate. Settori ipogei distanti dalle vie d'ingresso di aria atmosferica, rappresentano viceversa zone d'accumulo di radon indoor, riscontrabili anche nel suolo sovrastante.

8.1.4 Relazione tra spessori della volta e concentrazioni di soil radon lungo l'asse principale della cavità sotterranea

Con l'aiuto del gruppo speleologico "Sotterranei di Roma" è stato effettuato un rilievo accurato della morfologia della cavità, in particolar modo per la determinazione degli spessori della volta. Le misure sono state effettuate per mezzo di una livella laser, come raffigurato in figura 55.



Figura 55: Utilizzo della livella laser all'interno della cavità.

Gli spessori della volta lungo il ramo principale della cavità (profilo AB in figura 56), sono stati messi in relazione con le concentrazioni di radon e thoron misurate nel suolo in superficie. In tabella 13 si riportano gli spessori della volta lungo la direzione principale, in corrispondenza dei punti di misura ubicati al disopra di essa.

Punto di misura	Spessore della volta (cm)	Altezza grotta (cm)	^{222}Rn (Bq/m^3)	^{220}Rn (Bq/m^3)
STM12	548,5	158,5	28190	195950
STM13	612	198,5	25200	178890
STM14	442,5	346	37800	183670
STM8	401	309	61200	156670
STM15	584	246,5	62800	181750
STM16	941	194	48150	165130
STM1	848,5	286,5	65350	251300

Tabella 13: Caratteristiche morfologiche della cavità, in corrispondenza dei punti di misura in superficie lungo l'asse principale.

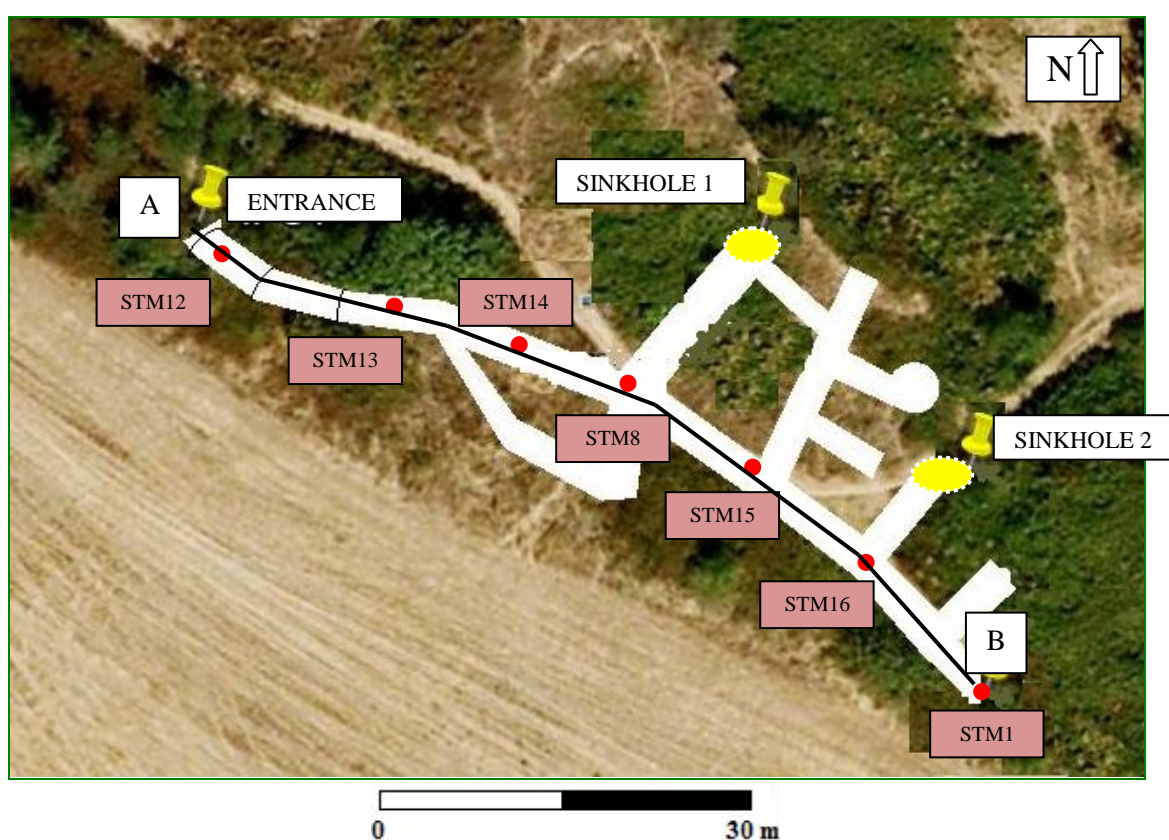


Figura 56: Profilo AB lungo il ramo principale, con relativi punti di monitoraggio del gas nel suolo in superficie.

Lo spessore della volta lungo il profilo AB va da un minimo di 4 m, misurato sul punto STM8, ad un massimo di 9,40 m corrispondente al punto STM16 in superficie (figura 57), mentre lo spessore medio lungo questo tratto è di 6,3 m.

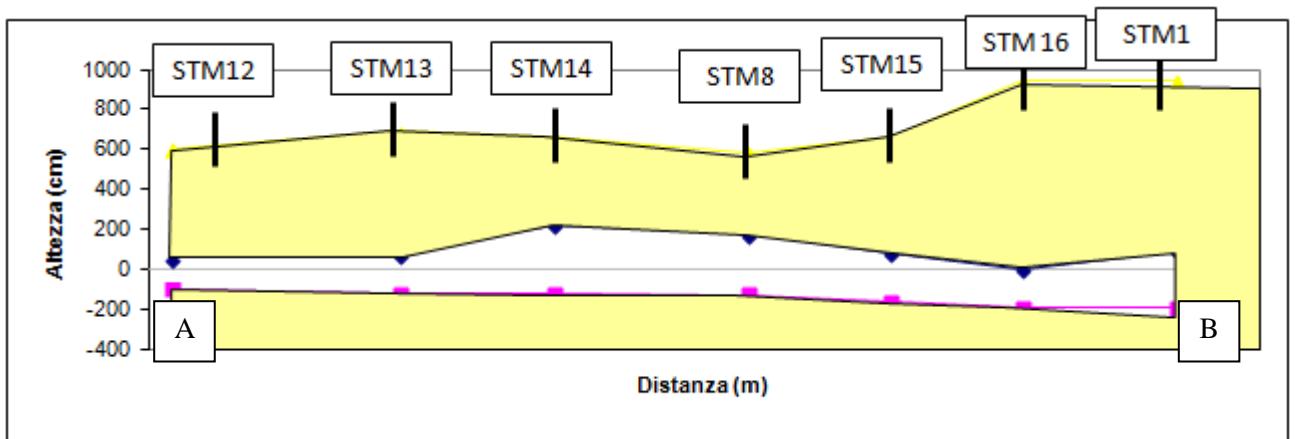


Figura 57: Sezione della cavità lungo il profilo AB. Sono indicati i punti di misura di soil radon in superficie.

All'interno le altezze della grotta sono comprese tra 1,58 e 3,46 m, con un'altezza media pari a 2,48 m.

Le concentrazioni di radon nel suolo in superficie non mostrano una buona correlazione con gli spessori della volta, come mostrato nel grafico in figura 58.

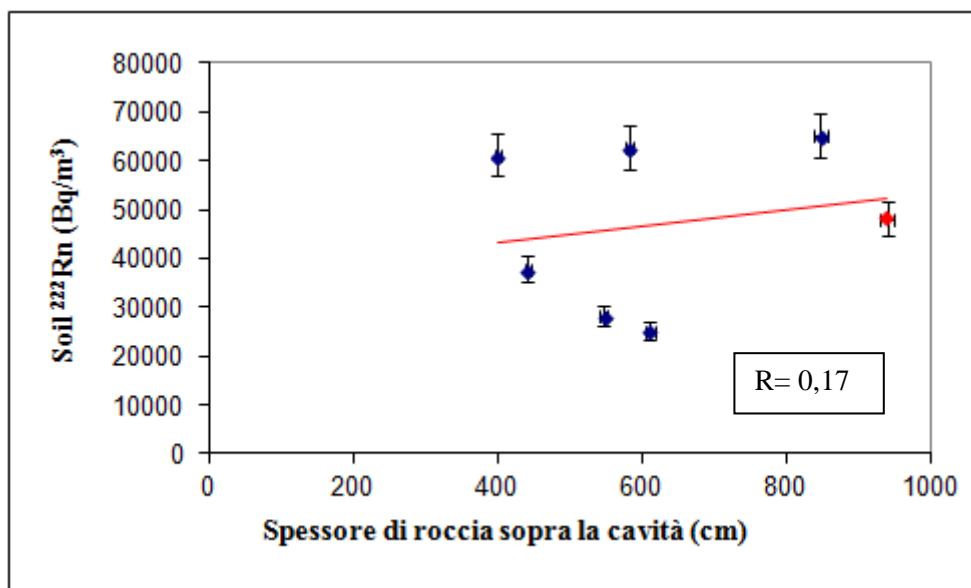


Figura 58: Relazione tra concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo e spessori della volta della cavità, lungo il profilo AB: in rosso si riporta il punto di misura STM16.

Nel grafico viene riportato il valore del coefficiente di correlazione di Bravais-Pearson (R), definito dalla covarianza (differenza tra la media dei prodotti e il prodotto delle medie) divisa per il prodotto degli scarti quadratici medi (deviazione standard) delle due variabili. Il coefficiente può assumere valori compresi tra -1 e 1 definendo l'entità della

correlazione (- 1 e 1 indicano una correlazione perfetta, lo 0 nessuna correlazione) e il tipo (valore negativi indicano una correlazione inversa, valori positivi una correlazione diretta delle due variabili). In rosso è stato riportato il punto di misura STM16 (dove lo spessore della volta è massimo, circa 9 m) che, come già spiegato nel sottoparagrafo 8.1.3, è situato in vicinanza del sinkhole 2 il quale rappresenta una via d'ingresso di aria atmosferica, provocando una diluizione della concentrazione di radon non solo all'interno della cavità, ma anche nel suolo nella parte sovrastante.

Si è pensato quindi di escludere dalla correlazione tra concentrazioni di radon nel suolo e spessore della cavità il punto in questione. Il grafico ottenuto (figura 59) mostra un piccolo miglioramento della correlazione delle due variabili, confermato anche da un aumento del coefficiente di Bravais-Pearson ($R= 0,20$).

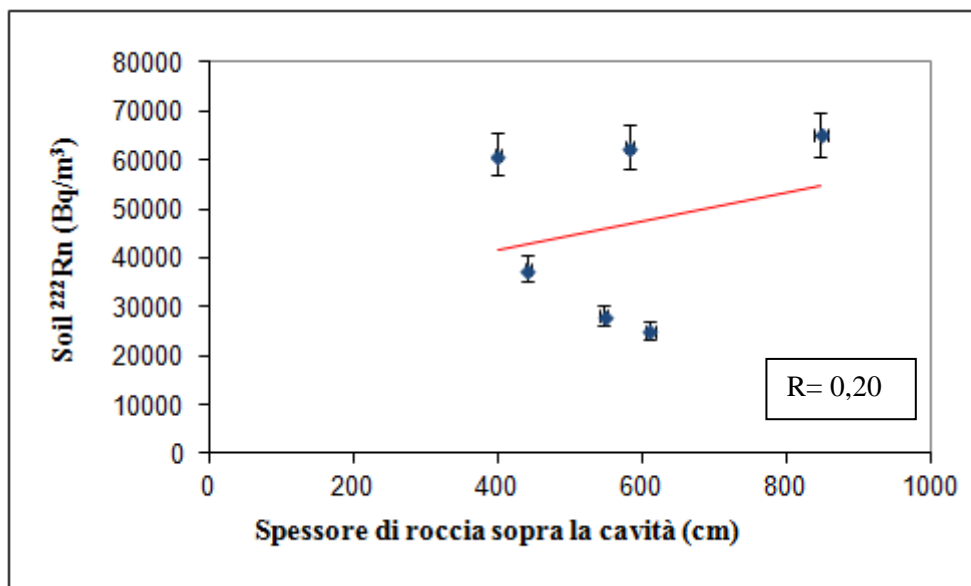


Figura 59: Relazione tra concentrazioni di ²²²Rn nel suolo e spessori della cavità, lungo il profilo AB, senza considerare il punto di misura STM16.

I valori di thoron nel suolo hanno una correlazione migliore con gli spessori della volta. Nel grafico in figura 60 si riportano i valori delle due variabili, considerando anche il punto di misura STM16 evidenziato in rosso.

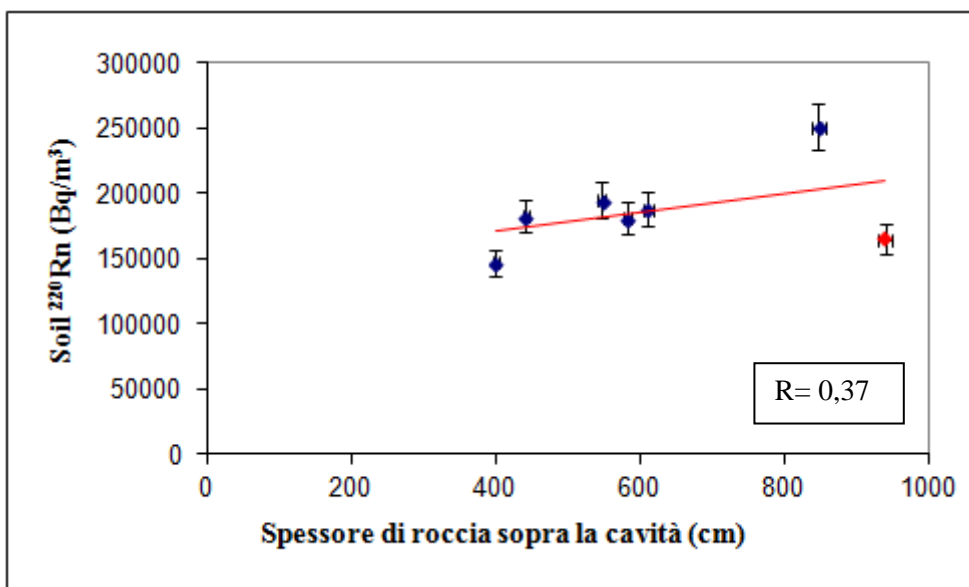


Figura 60: Relazione tra concentrazioni di ²²⁰Rn nel suolo e spessori della cavità, lungo il profilo AB: in rosso si riporta il punto di misura STM16.

In questo caso si ottiene un R= 0,37 indice di una correlazione diretta migliore rispetto ai casi descritti precedentemente.

Il valore di correlazione R tra thoron e spessori della roccia aumenta (da 0,37 a 0,77) anche in questo caso, non considerando il punto STM16, come mostrato nel grafico seguente (figura 61)

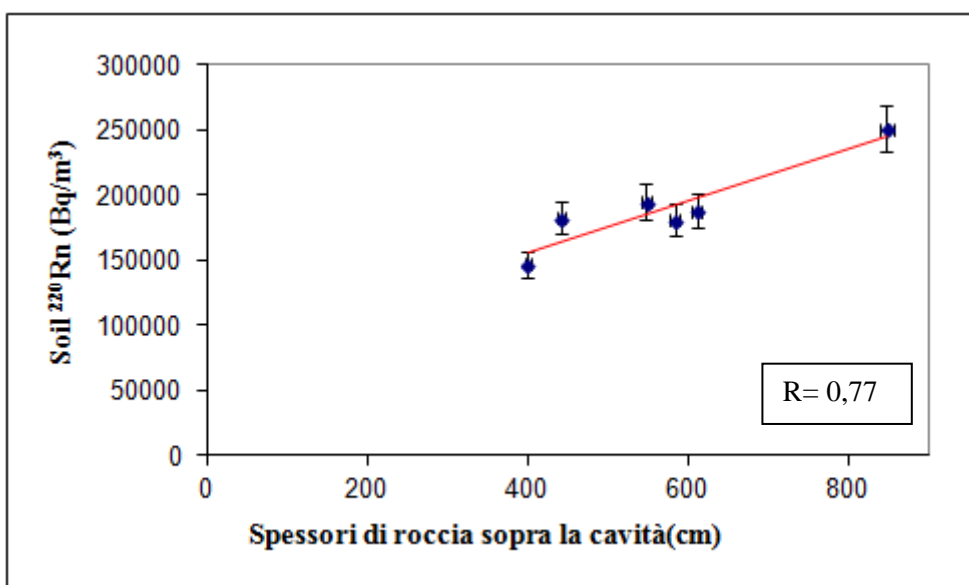


Figura 61: Relazione tra concentrazioni di ²²⁰Rn nel suolo e spessori della cavità, lungo il profilo AB, senza considerare il punto di misura STM16.

Da questi 4 casi risulta evidente l'ottima correlazione tra le concentrazioni di thoron nel suolo e gli spessori della cavità sotterranea, soprattutto nell'ultimo caso illustrato che non considera il punto di misura STM16 a causa della sua vicinanza con il secondo sinkhole dell'area, che potrebbe favorire l'ingresso di aria atmosferica con aumento dell'areazione del suolo nell'intorno e diminuzione delle concentrazioni del *soil gas*.

In riferimento ai valori di thoron nel suolo in punti dove non è presente la cavità, che presentano concentrazioni mediamente più elevate rispetto ai punti di misura su cavità, una possibile spiegazione potrebbe essere data dal fatto che al disopra della cavità il thoron può essere influenzato dalle basse concentrazioni di questo elemento che si registrano all'interno della cavità, diversamente da quello che accade al radon, come verrà spiegato nel paragrafo 8.4. Viste le considerazioni sopra elencate, si è provato a stabilire uno spessore massimo della volta oltre il quale le concentrazioni di thoron non risultano distinguibili con quelle dei punti di misura senza cavità sotterranea al di sotto. Prendendo il grafico in figura 61, abbiamo incrociato la retta di regressione ($R= 0,77$) con il valore medio della concentrazione di thoron nel suolo, ottenuto in punti senza cavità (figura 62).

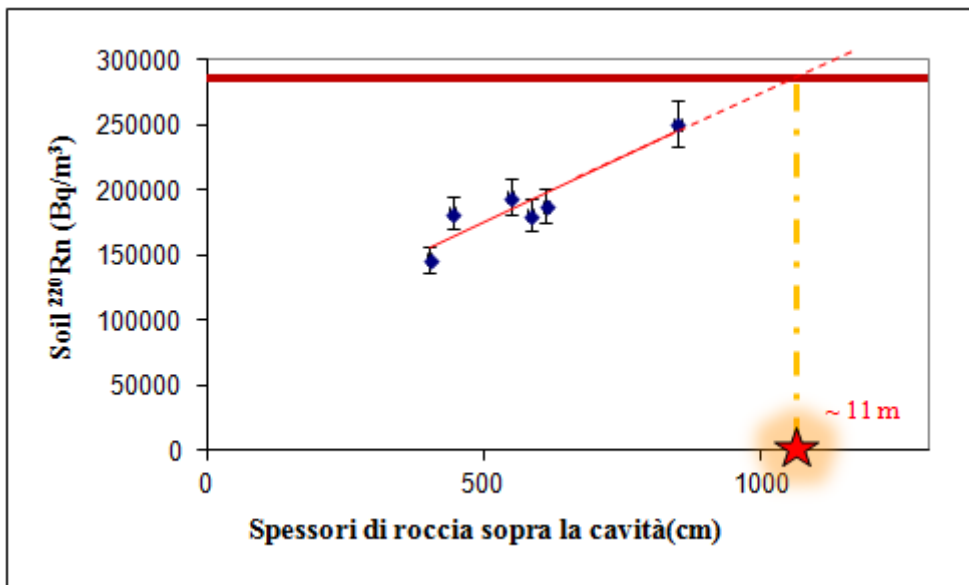


Figura 62: Determinazione del valore soglia dello spessore della volta per l'interpretazione del segnale delle concentrazioni di ²²⁰Rn. La linea rossa orizzontale rappresenta il valore di concentrazione media del ²²⁰Rn, nei punti senza cavità sotterranea.

L'incrocio di queste due rette (regressione-concentrazione media thoron in punti senza la cavità, 276 kBq/m³) determina uno spessore minimo della volta di circa 11 m. Quindi per questa tipologia di terreno (suolo sviluppato sul membro delle Pozzolanelle) con

valori elevati di permeabilità intrinseca, si ipotizza che solo se lo spessore della volta è inferiore a 11 m, si possono discriminare le concentrazioni di thoron nel suolo in punti di misura sulla cavità, dalle concentrazioni di thoron in punti distanti da essa.

8.2 Il sito di indagine della Valle della Caffarella, Roma

Nell'area di studio della Valle della Caffarella ormai da diversi anni vengono condotti monitoraggi di *soil radon* nel suolo dal nostro gruppo di studio. I lavori sono iniziati a partire dal 2008 per un precedente progetto di ricerca di dottorato (Castelluccio, 2010) e per lo sviluppo della tesi di laurea dello scrivente, incentrata sullo studio delle variazioni di concentrazioni di radon e thoron nel suolo in relazione al tipo di substrato geologico e alle condizioni meteo-climatiche. L'area indagata rappresenta un settore molto limitato della Valle della Caffarella, nelle vicinanze del Casale della Vaccareccia. Le concentrazioni di attività di ^{222}Rn e ^{220}Rn nel suolo sono state monitorate a 30 e 80 cm dal piano campagna, sul membro "Pozzolanelle" (VSN2) dell'unità eruttiva del Villa Senni. I punti di misura sono nominati RPS3 e C1 (figura 63), il primo corrisponde a un'asta cava inserita nel suolo, mentre C1 rappresenta un areale molto ristretto dove sono state monitorate concentrazioni a 30 e 80 cm dal piano campagna (C1_30; C1_80).

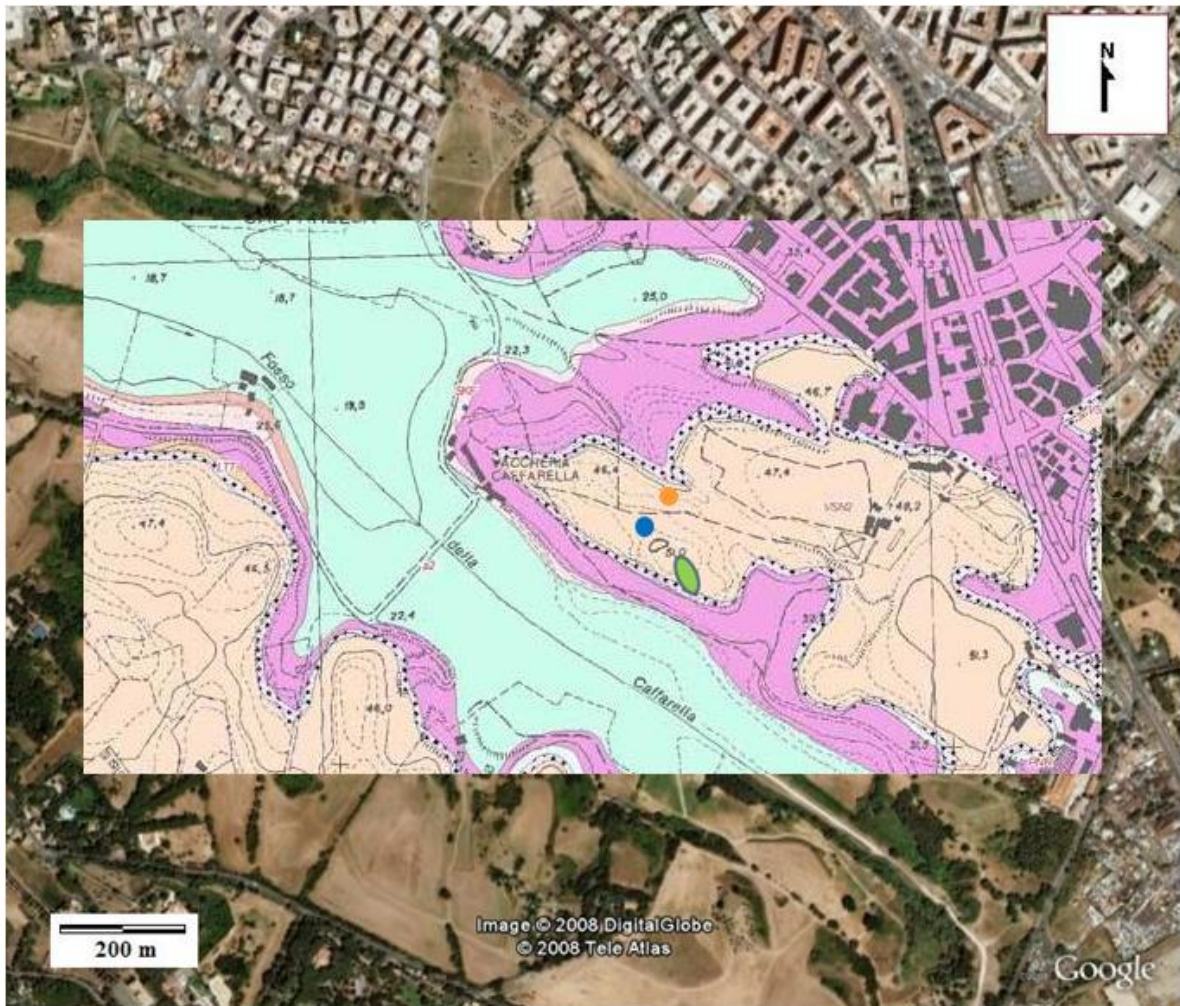


Figura 63: Stralcio della Carta Geologica del Comune di Roma (scala 1:10000) sovrapposta all'immagine satellitare della zona (tratta da Google Earth);
 ● punto di misura RPS3, ● zona di misura C1 ; ◌ zona di misure sopra l'impronta di una cavità sotterranea.

Nei pressi della stazione RPS3, sono stati monitorati la temperatura e il contenuto d'acqua nel suolo, rispettivamente a 30 e 80 cm di profondità, utilizzando appositi sensori. La temperatura viene rilevata tramite un termometro a resistenza, mentre per il contenuto d'acqua è stata utilizzata una sonda TDR, che misura la costante dielettrica del suolo, assumendo una correlazione tra costante dielettrica e contenuto d'acqua (*volumetric water content*, %). Il periodo di misura dei punti "fissi" va da gennaio 2011 a ottobre 2013, con cadenza mensile. Oltre alle concentrazioni di ^{222}Rn e ^{220}Rn sono state misurate le concentrazioni di CO_2 e la permeabilità intrinseca.

A partire da giugno 2012 sono stati monitorati anche dei punti di misura sopra la traccia di una cavità sotterranea, non molto distante dalla zona C1. La cavità in questione non è visitabile all'interno, essendo l'entrata chiusa per via di pericolo di crolli, tra l'altro

molto diffusi nell'area. Nei paragrafi successivi verranno presentati i dati ottenuti dai monitoraggi delle stazioni fisse e la possibile influenza della cavità sulle concentrazioni dei gas in superficie.

8.2.1 Risultati dei monitoraggi nelle stazioni fisse presenti nella Valle della Caffarella

Nel periodo compreso tra gennaio 2011 e ottobre 2013, sono state monitorate a cadenza mensile le concentrazioni di radon, thoron e anidride carbonica nel suolo nei tre punti di riferimento descritti nel paragrafo precedente. La posizione in dettaglio dei punti di misura è riportata in figura 64.



Figura 64: Ubicazione dei punti fissi di monitoraggio in Valle della Caffarella.

In realtà nella zona è presente “fisicamente” solo un’asta fissa inserita nel suolo a 80 cm di profondità, denominata RPS3. Nella zona C1 visibile nell’immagine in figura 64, si riporta la porzione di terreno dove le misure a 30 e 80 cm dal piano campagna (rispettivamente C1_30 e C1_80) sono state ripetute all’incirca nello stesso sito, ma verosimilmente distribuite in un areale di qualche metro. I valori delle concentrazioni di

radon, thoron, anidride carbonica e delle misure di permeabilità intrinseca, relative a tutto il periodo di monitoraggio, sono riportati nelle appendici B, C, e D rispettivamente per i punti RPS3, C1_80 e C1_30. Nelle tabelle 14 e 15 si riportano i valori mediati del *soil gas* a 80 cm dal p.c. e a 30 cm dal p.c..

Stazione Fissa	Soil ²²² Rn (Bq/m ³)		Soil ²²⁰ Rn (Bq/m ³)		Soil CO ₂ (vol.%)		²²² Rn/ ²²⁰ Rn A.M
	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	
RPS3	96270	41710	220000	46650	0,9	0,54	0,5
C1_80	101560	31650	553940	79740	1,7	0,90	0,2

Tabella 14: Medie aritmetiche delle concentrazioni di radon, thoron, anidride carbonica e rapporto radon/thoron nel suolo a 80 cm dal p.c., relative alle stazioni fisse RPS3 e C1_80 nel periodo gennaio 2011-settembre 2013.

Stazione Fissa	Soil ²²² Rn (Bq/m ³)		Soil ²²⁰ Rn (Bq/m ³)		Soil CO ₂ (vol.%)		²²² Rn/ ²²⁰ Rn A.M
	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	
C1_30	77580	37550	441720	73640	1,2	0,60	0,2

Tabella 15: Medie aritmetiche delle concentrazioni di radon, thoron e anidride carbonica nel suolo a 30 cm di profondità dal p.c., relative alla stazione fissa C1_30 nel periodo gennaio 2011-settembre 2013.

Le tabelle mostrano una situazione simile per il radon alla profondità di 80 cm nelle stazioni RPS3 e C1_80. Il discorso è molto differente per il thoron, il cui valore medio nella stazione RPS3 risulta essere circa il 40% rispetto a quello misurato in C1_80. Tralasciando per ora l'analisi del contenuto degli elementi precursori che sarà affrontata nel prossimo capitolo, ciò può dipendere da un fattore strettamente strumentale. Infatti la stazione RPS3 è rappresentata da una sonda con punta di diametro maggiore rispetto al resto dell'asta, come mostrato in figura 35 nel paragrafo 6.1. Come già detto, questa tipologia di aste, durante la misura, può richiamare aria atmosferica dall'intercapedine asta-suolo, causando una diluizione delle specie gassose, in particolar modo per il thoron.

Nella stazione di misura a 30 cm di profondità dal p.c., il valore medio di ²²²Rn è pari a 77,6 kBq/m³, pari all'80,5% del valore di ²²²Rn in RPS3 e al 76,4% del dato di C1_80. Da queste considerazioni risulta evidente come le concentrazioni di radon nel suolo a 30

cm, potrebbero risentire maggiormente dell'influenza dei parametri atmosferici e delle condizioni fisiche stagionali del suolo, rispetto a misure effettuate a profondità maggiori dal p.c. Per quanto concerne le misure di CO₂ nel suolo, in tutti e tre i punti di misura, non sono mai state trovate concentrazioni tali da far pensare ad una sua origine diversa da quella organica (attività batterica e respirazione delle piante), anche se questo andrebbe confermato con un'analisi isotopica. In generale i valori più elevati sono stati misurati nella zona C1, rispetto a RPS3.

Ciò è dovuto probabilmente a due fattori:

- 1) maggiore presenza di materia organica, rispetto alla zona della stazione RPS3;
- 2) influenza strumentale dell'asta fissa RPS3, munita di punta con diametro maggiore dell'asta, come precedentemente descritto, con possibilità di diluizione delle reali concentrazioni di CO₂.

8.2.2 Influenza delle precipitazioni sulle concentrazioni di soil radon

La presenza di acqua nel suolo comporta una diminuzione dell'energia di *recoil*, aumentando la probabilità per un atomo di radon di rimanere nel poro, a causa di un processo fisico già descritto nel paragrafo 3.2 e nel sottoparagrafo 3.2.3.

Le concentrazioni di radon nel suolo delle stazioni RPS3, C1_30 e C1_80, sono state correlate con le precipitazioni cumulate mensili per il periodo gennaio 2011-settembre 2013 (figura 65).

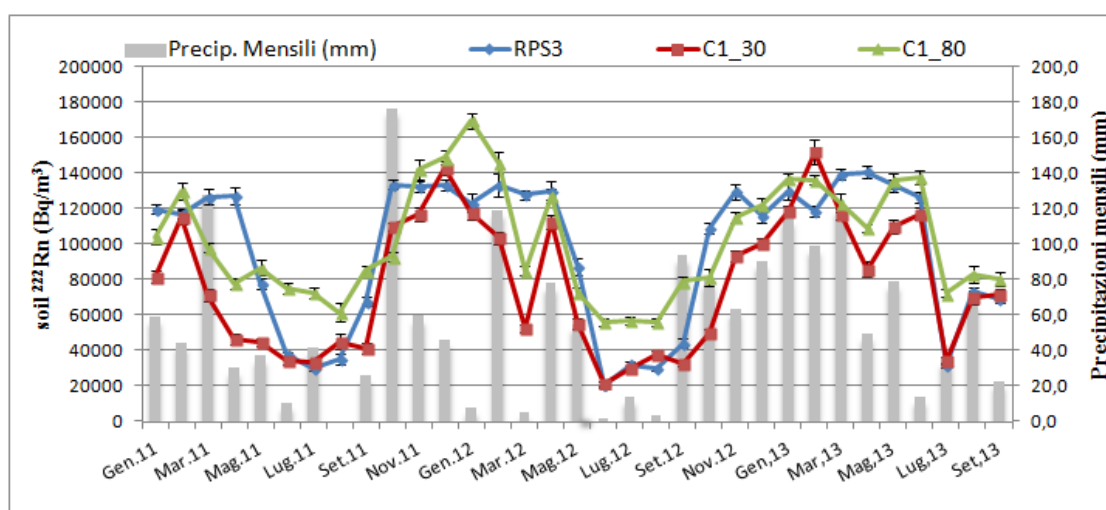


Figura 65: Variabilità stagionale del soil ²²²Rn in funzione delle precipitazioni mensili, nelle tre stazioni monitorate.

I dati pluviometrici si riferiscono ad una stazione meteorologica presente nella zona di Spinaceto (41° 48' 00'' N – 12° 24' 00'' E). Dal grafico in figura 65, possiamo notare come effettivamente ci sia una correlazione diretta tra le concentrazioni di ²²²Rn e la piovosità; i valori più elevati sono misurati nei mesi autunnali - invernali corrispondenti ai periodi più piovosi dell'anno.

Il coefficiente di Bravais-Pearson tra le due variabili, viene riportato in tabella 16, dove è stato inserito anche il test t di Student. Questo test ci permette di capire se la correlazione trovata possa essere statisticamente significativa o dovuta al caso (Young, 1993). Per lo svolgimento del test, si utilizza la seguente equazione:

$$t = R \sqrt{\frac{n - 2}{1 - R^2}} \quad (22)$$

dove:

R = coefficiente di correlazione di Bravais-Pearson;

n – 2 = (n) numero di coppie; (1 – R²) grado di libertà.

Il livello di significatività scelto è 0,01, questo significa che se il test viene superato (sono stati usati valori critici per un test bilaterale) la correlazione è statisticamente significativa, con un 1% di probabilità che sia dovuta al caso.

Stazione fissa	R	t di Student	Correlazione statistica significativa
RPS3	0,523	3,415	SI
C1_30	0,478	3,030	SI
C1_80	0,357	2,127	NO

Tabella 16: Correlazione della concentrazione di ²²²Rn nel suolo con i valori delle precipitazioni mensili.

La tabella mostra come correlazioni statisticamente significative (per un livello di significatività, α , scelto di 0,01) si registrano nelle stazioni RPS3 e C1_30. Le coppie di valori in C1_80 risultano essere significative per un α di 0,025, quindi con una probabilità di 2,5% che esse siano dovute al caso.

La variabilità stagionale delle concentrazioni di thoron è riportata nel grafico 66, sempre in funzione delle precipitazioni cumulate mensili.

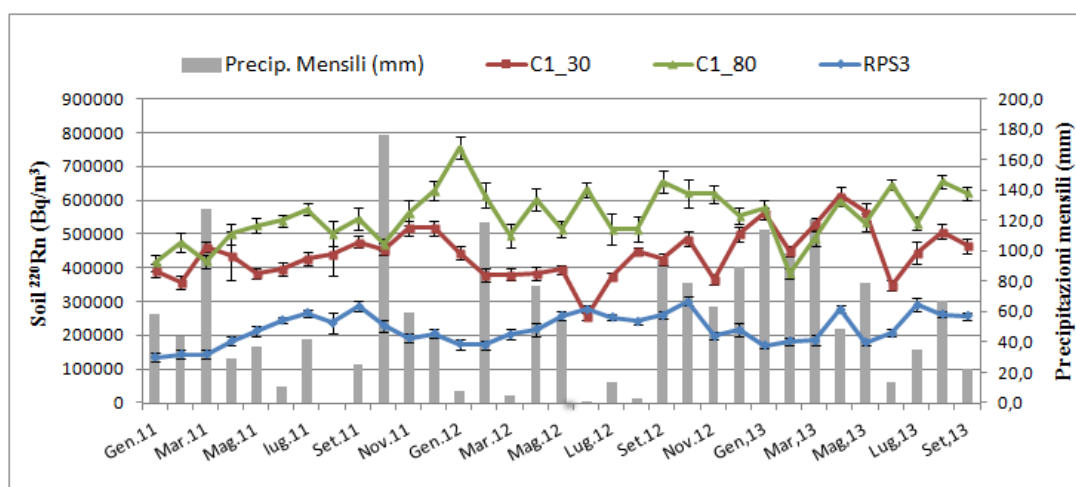


Figura 66: Variabilità stagionale del soil ^{220}Rn in funzione delle precipitazioni mensili, nelle tre stazioni monitorate.

Differentemente dall'andamento stagionale del radon, il thoron non ha una variabilità delle concentrazioni così netta, in funzione delle precipitazioni mensili.

Piuttosto nelle stazioni RPS3 e C1_80, i valori di thoron sembrerebbero aumentare nei periodi estivi. Bisogna considerare comunque la differenza fondamentale dei tempi di dimezzamento dei due isotopi (3,825 giorni per il ^{222}Rn e 54,5 secondi per il ^{220}Rn). Maggiori periodi di piovosità corrispondono ad un contenuto rilevante di acqua nel suolo. Tanto più elevato sarà il contenuto d'acqua nel suolo, tanto più basso sarà il valore della permeabilità del suolo al gas radon. Utilizzando una strumentazione di misura munita di pompa per aspirare aria dal suolo, nelle condizioni sopra descritte si verifica una riduzione della portata del flusso d'aria nel sistema, aumentando il tempo occorrente alla massa d'aria per essere trasportata all'interno dello strumento. Il tempo incide in modo significativo sul valore del ^{220}Rn e non su quello del ^{222}Rn , in funzione dei due diversi tempi di dimezzamento.

Nella tabella che segue si riassumono i parametri statistici per verificare la significatività (scegliendo sempre il livello di significatività, α , 0,01) della correlazione tra ^{220}Rn e precipitazioni mensili, per le tre stazioni fisse di monitoraggio.

Stazione fissa	R	t di Student	Correlazione statistica significativa
RPS3	-0,315	1,848	NO
C1_30	0,350	2,135	NO
C1_80	-0,239	1,370	NO

Tabella 17: Correlazione della concentrazione di ^{220}Rn nel suolo con i valori delle precipitazioni mensili.

I dati ottenuti mostrano come sia presente una correlazione inversa tra i due parametri, in RPS3 e C1_80, mentre le concentrazioni di thoron a 30 cm di profondità dal piano campagna (C1_30), hanno una correlazione diretta con le precipitazioni. In tutti i casi considerati, il test t di Student, per α di 0,01, non ha dato una correlazione statisticamente significativa.

8.2.3 *Influenza del contenuto d'acqua, della temperatura e della permeabilità intrinseca sulle concentrazioni di soil radon*

I dati del contenuto d'acqua e temperatura del suolo, sono stati monitorati grazie alle sonde, descritte brevemente nel paragrafo 8.2, presenti a circa 3 m dalla stazione fissa RPS3 alla profondità di 30 e 80 cm dal p.c.

Dai paragrafi precedenti si evince come la presenza di acqua nel suolo influenzi la mobilità del *soil radon* con un duplice meccanismo:

- 1) influenza diretta sul coefficiente d'emanazione;
- 2) influenza indiretta tramite la variabilità stagionale della permeabilità intrinseca.

Nella tabella 18 si riportano i valori statistici del contenuto d'acqua misurato dalle sonde (VWC_{30} e VWC_{80} espresso in %) presenti a diverse profondità nel suolo.

Profondità dal piano campagna (cm)	VWC % Min	VWC % Max	VWC % Medio	VWC % dev.st
VWC_{30} %	10,2	44,6	28,3	8,74
VWC_{80} %	8,2	21,7	13,9	4,48

Tabella 18: Dati statistici del contenuto d'acqua nel suolo a 30 cm (VWC_{30}) e a 80 cm (VWC_{80}) dal piano campagna.

I dati presenti in tabella mostrano come alla profondità di 30 cm, ci sia una variazione maggiore del contenuto d'acqua rispetto ai valori misurati a 80 cm. Le concentrazioni di ^{222}Rn e ^{220}Rn misurate nella stazione RPS3, che si trova a circa 3 m dalle sonde T-WVC, sono state correlate con i valori di T (°C) misurata a 80 cm e con il contenuto d'acqua a 30 e 80 cm. Nelle tabelle a seguire si riportano i risultati.

Stazione fissa RPS3	R	t di Student	Correlazione statistica significativa
VWC ₃₀ %	0,737	4,472	SI
VWC ₈₀ %	0,731	5,962	SI
T ₈₀ (°C)	-0,850	8,960	SI

Tabella 19: Correlazione della concentrazione di ^{222}Rn nel suolo con temperatura misurata a 80 cm e contenuto d'acqua a 30 e 80 cm di profondità.

Stazione fissa RPS3	R	t di Student	Correlazione statistica significativa
VWC ₃₀ %	-0,471	2,973	SI
VWC ₈₀ %	-0,502	3,232	SI
T ₈₀ (°C)	0,789	7,145	SI

Tabella 20: Correlazione della concentrazione di ^{220}Rn nel suolo con temperatura misurata a 80 cm e contenuto d'acqua a 30 e 80 cm di profondità.

Tutte le correlazioni risultano statisticamente significative (con un 1% di possibilità che siano dovute al caso). In particolare le concentrazioni di radon hanno una correlazione diretta sia con VWC₃₀, sia con VWC₈₀, mentre hanno una correlazione inversa con la temperatura del suolo a 80 cm. Questi dati sembrano confermare come la concentrazione di radon nel suolo sia influenzata dal contenuto d'acqua dipendente dalla piovosità.

Il thoron subisce l'influenza della temperatura e del contenuto d'acqua nel suolo in modo opposto rispetto al radon: correlazione inversa con VWC₃₀ e VWC₈₀ e diretta con la temperatura.

La permeabilità intrinseca è fortemente condizionata dalle condizioni fisiche del suolo, in particolare del contenuto d'acqua, come viene illustrato nel grafico presente in figura 67.

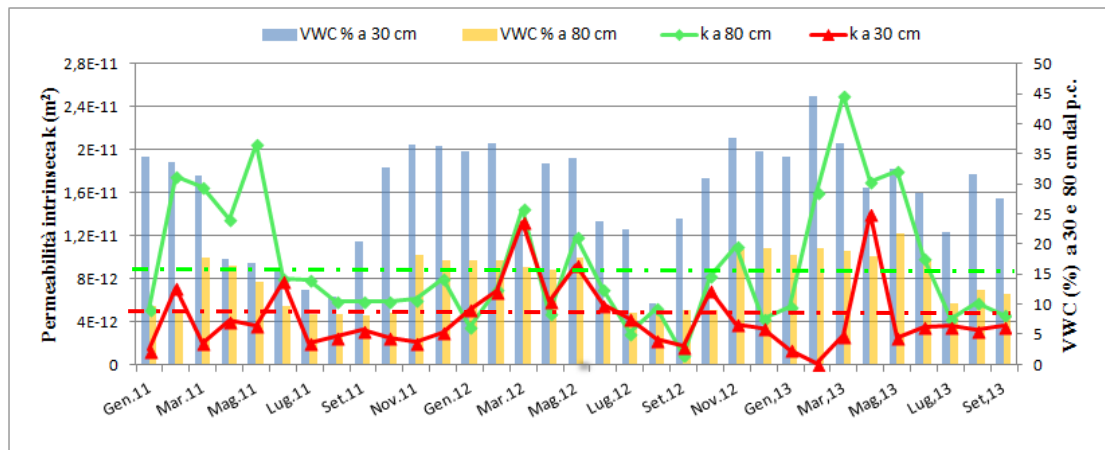


Figura 67: Andamento stagionale della permeabilità intrinseca misurata a 30 e 80 cm, in funzione del VWC_{30} e VWC_{80} . Le linee in tratteggio indicano il valore medio della permeabilità intrinseca a 30 cm (in rosso) e a 80 cm (in verde).

Risulta evidente come per i primi 30 cm k risenta in modo più netto del contenuto d'acqua, rispetto alla porzione di suolo più profonda. La permeabilità media a 30 cm è pari a $4,37E^{-12} \text{ m}^2$, mentre un valore più alto $9,35E^{-12} \text{ m}^2$ si riscontra a 80 cm. Entrambi i valori comunque ricadono nella classe di permeabilità alta, secondo la classificazione proposta da Neznal, (2005) con $k > 4,0E^{-12} \text{ m}^2$. Queste ulteriori considerazioni confermano che la mobilità del *soil radon* a 80 cm di profondità, per questa tipologia di suolo, è strettamente legata alle condizioni fisiche dello strato superficiale.

8.3 Variabilità del *soil radon* su un settore interessato dalla presenza di una cavità sotterranea

Nella zona investigata dalle misure di *soil gas* nelle stazioni fisse RPS3, C1_30 e C1_80, è presente una cavità sotterranea, dimostrata anche dal grande sprofondamento superficiale della volta nei pressi della zona C1 (figura 68).

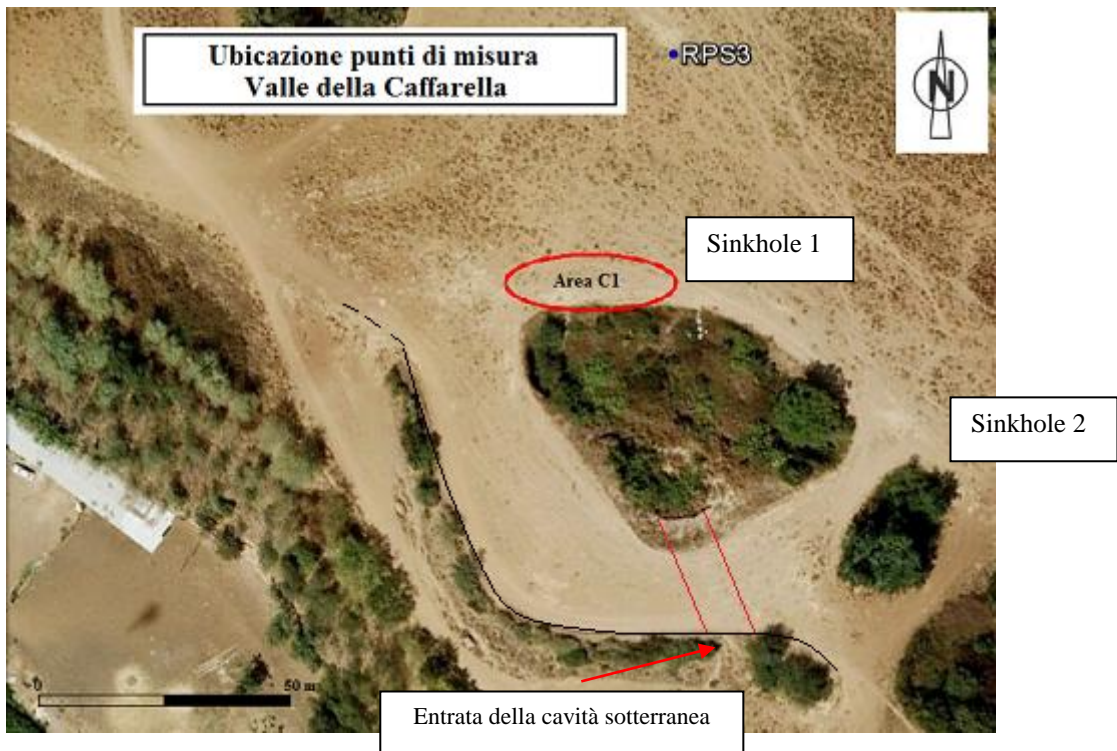


Figura 68: Area interessata dalla presenza di una cavità sotterranea. Sono stati riportati gli sprofondamenti presenti, l'entrata della cavità sotterranea (posta circa 5 m più in basso del piano campagna) e, tra le linee in rosso, la probabile direzione della cavità tra entrata e il sinkhole 1.

L'entrata della cavità è posta circa 5 m più in basso rispetto al pianoro interessato dagli sprofondamenti. Essa è protetta per mezzo di un cancello (figura 69), vista la pericolosità elevata da crollo per l'estrema instabilità della volta.



Figura 69: L'entrata della cavità protetta da un cancello.

La Valle della Caffarella è interessata da una moltitudine di cave (figura 70) comunemente scavate nell'unità della Pozzolane Rosse e nel Tufo Lionato, come nel caso della cava indagata nel sito di Tor Marancia.

Le cave sono concentrate in due grandi aree, poste rispettivamente sul lato sinistro e destro del fiume Almona (rivista Opera Ipogea n° 3, 1999).

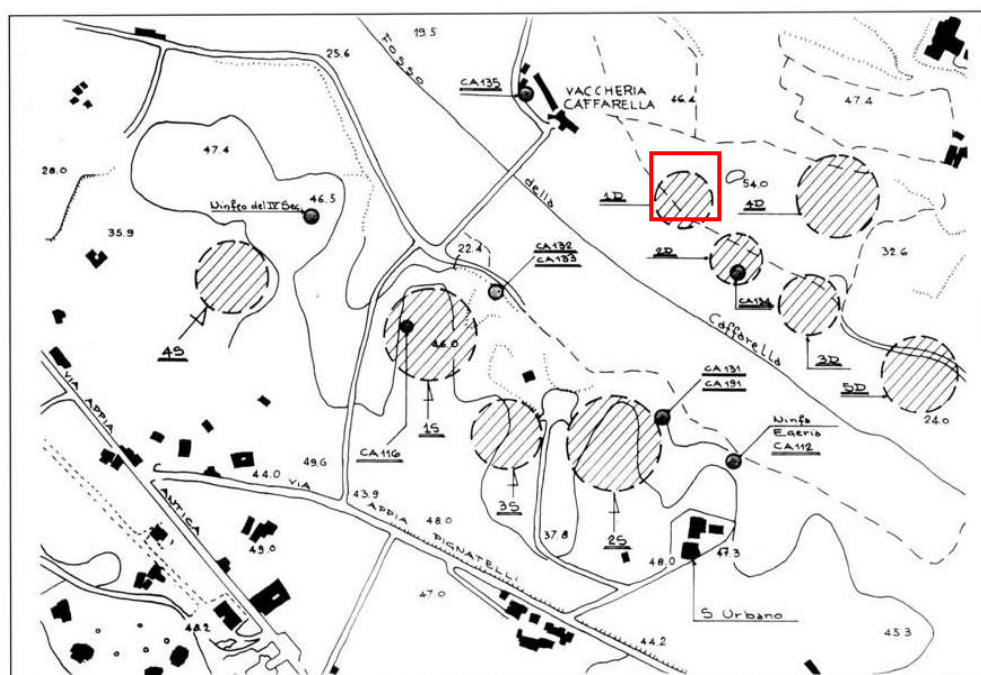


Figura 70: Ubicazione delle principali cave presenti nella zona della Valle della Caffarella. Nel riquadro in rosso viene riportata la zona interessata dalle nostre indagini (immagine tratta dalla rivista Opera Ipogea n° 3, 1999).

Le cave presenti nell'area sono in gran parte abbandonate, o riadattate nel tempo come fungaie. Le entrate delle cave in larga maggioranza sono protette da cancelli, in quanto la volta è estremamente instabile (sono numerosi gli sprofondamenti nella zona). Nel 1997 c'è stato un incidente mortale occorso a due persone che avevano trovato rifugio presso una delle strutture ipogee.

Per questo studio si è deciso di monitorare le concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn e CO_2 nel suolo, nella parte superficiale al di sopra della cavità. I punti di misura, sviluppati lungo due transetti, sono ubicati in figura 71.

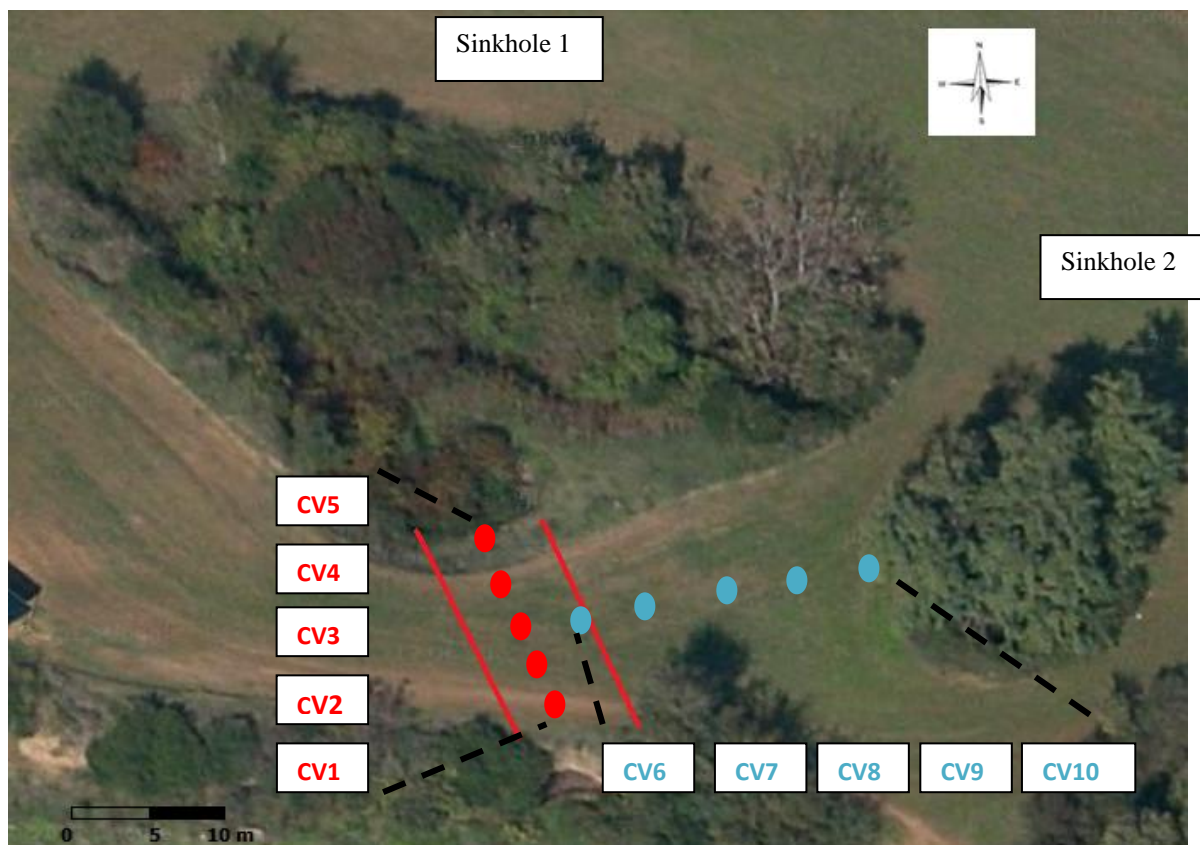


Figura 71: Ubicazione dei punti di misura del soil gas in presenza di cavità sotterranee. In rosso si riportano i punti lungo un transetto circa NNW-SSE corrispondente alla direzione ipotizzata della cavità, tra l'entrata e il sinkhole 1. In azzurro si rappresentano i punti del secondo transetto orientato W-E, dove non è possibile ipotizzare la presenza di strutture ipogee.

La direzione della cavità tra l'entrata e il sinkhole 1 (dove sono state eseguite le misure comprese tra CV1 e CV5) è stata ipotizzata, vista l'inaccessibilità al suo interno. Siamo abbastanza sicuri di questo andamento poiché dallo sprofondamento è visibile la parte rimanente della volta. Per le misure del secondo transetto W-E non è stato possibile rilevare o ipotizzare la presenza di cavità sotterranee. Solamente per il punto di misura CV6 (figura 71) siamo abbastanza certi della presenza di una cavità sotterranea.

I monitoraggi lungo i due transetti sono iniziati nel mese di giugno 2012 e ripetuti poi nei mesi di febbraio, aprile e luglio 2013. La tabella presente in allegato E, riporta i risultati delle indagini per i diversi periodi di misura, mentre i risultati ottenuti sono illustrati di seguito.

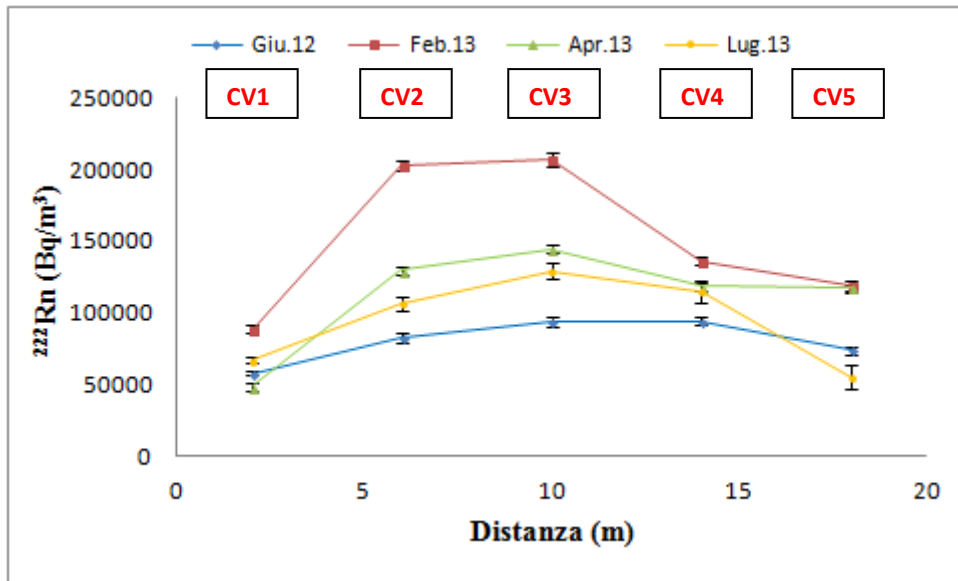


Figura 72: Andamento delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo lungo il transetto NNW-SSE sopra l'impronta della cavità sotterranea.

Le concentrazioni di radon misurate nei quattro periodi differenti, mostrano un andamento stagionale caratteristico, con i valori più alti misurati nel mese di febbraio 2013 e quelli più bassi relativi ai mesi di giugno e luglio 2013. Diverso è invece il discorso relativo alla variabilità delle concentrazioni lungo il transetto, in funzione della distanza del punto di misura dall'entrata e dal sinkhole 1. Infatti in tutti i periodi si registra una variabilità notevole del radon lungo il transetto. I punti di misura CV1 e CV5 sono in prossimità rispettivamente dell'entrata e del sinkhole 1. Come già descritto nel paragrafo relativo al sito di studio della cavità di Tor Marancia, vie d'ingresso di aria atmosferica nella cavità prossime a punti di misura effettuati in superficie, causano un'areazione della parte superficiale di suolo, con relativa diluizione delle concentrazioni di radon. I dati di radon relativi ai punti CV2 e CV3, situati nella parte centrale del transetto, danno una conferma di quanto sopra affermato. Infatti in questi le concentrazioni sembrano essere meno influenzate dalla presenza dell'entrata e del sinkhole 1. Nel punto di misura C4 le concentrazioni di radon risentono della presenza del sinkhole 1 in maniera meno netta rispetto al punto CV5 più vicino.

Per la variabilità delle concentrazioni di anidride carbonica lungo il transetto CV1-CV5, si può effettuare lo stesso ragionamento adottato per il radon.

Anche in questo caso infatti, le concentrazioni più basse si riscontrano nei punti CV1 e CV5 (figura 73).

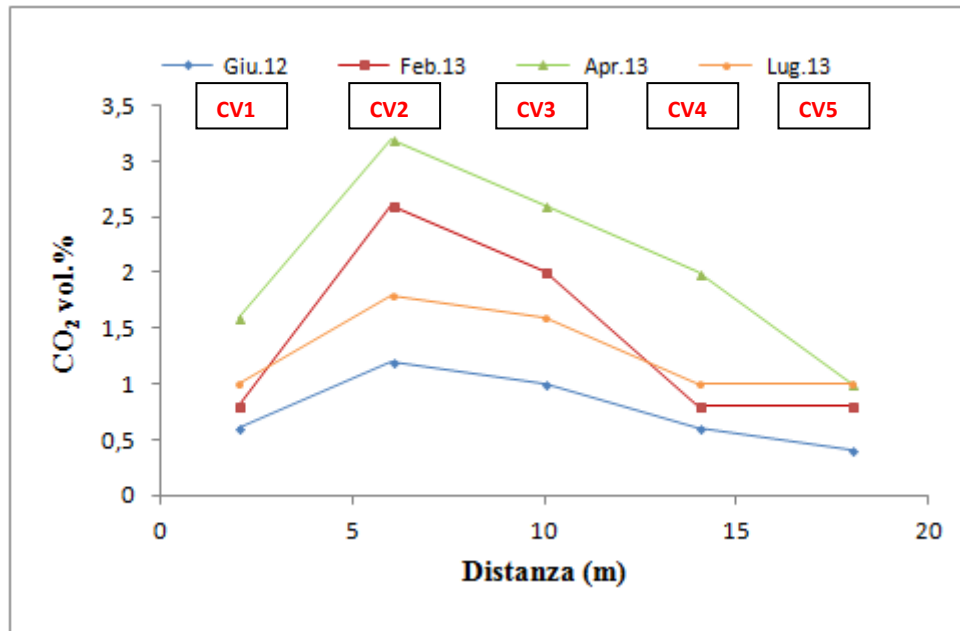


Figura 73: Andamento delle concentrazioni di CO₂ nel suolo lungo il transetto NNW-SSE lungo l'impronta della cavità sotterranea.

A differenza del radon però, i valori più elevati di anidride carbonica sono stati trovati nel mese di aprile 2013, quando è maggiore l'attività batterica nei suoli, anche se in alcuni punti (CV2) si registrano valori di CO₂ maggiori del 3 % in volume difficilmente riferibili ad un'origine organica. Sarebbe quindi utile un'analisi isotopica del gas per appurarne l'origine. Le concentrazioni di ²²⁰Rn mostrano un andamento simile al ²²²Rn, con una variabilità sicuramente meno netta, come mostrato dal grafico in figura 74. Da premettere che per tutti i punti di misura, sia nel transetto orientato NNW-SSE, sia per il secondo orientato E-W, i valori di permeabilità intrinseca misurata ricadono in classe alta ($k > 4,0E^{-12}$ m²).

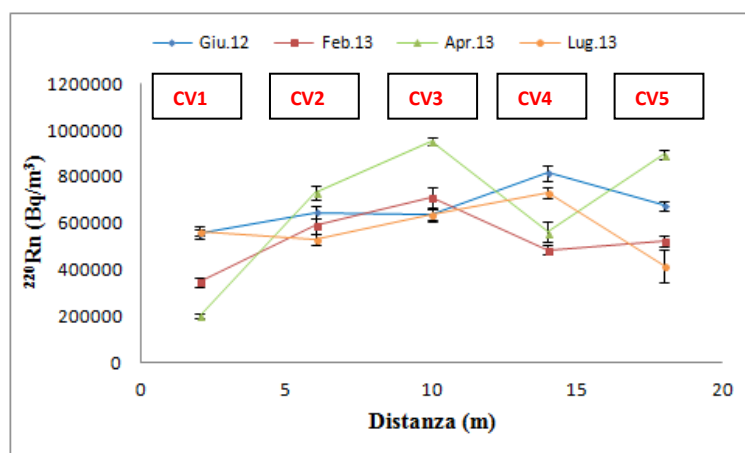


Figura 74: Variabilità delle concentrazioni di ²²⁰Rn nel suolo lungo il transetto NNW-SSE, nei diversi periodi di monitoraggio.

In questo caso i valori di thoron non si possono confrontare con gli spessori della volta, come effettuato nel caso studio di Tor Marancia, in quanto non è stato possibile entrare all'interno della cavità. Risulta evidente comunque come nel punto CV1 prossimo all'entrata della cavità e nel punto CV5, nei pressi del sinkhole 1, le medie delle concentrazioni di thoron sono più basse che negli altri punti di misura. Nella tabella a seguire si riportano tutte le medie delle misure delle diverse specie gassose, con relative deviazioni standard e rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, effettuate nei punti posti al di sopra della cavità.

Punto	^{222}Rn	dev.st	^{220}Rn	dev.st	CO₂	dev.st	
di	(Bq/m³)	^{222}Rn	(Bq/m³)	^{220}Rn	(vol%)	CO₂	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Misura	A.M.	(Bq/m³)	A.M.	(Bq/m³)	A.M.	(vol.%)	
CV1	65600	17080	418160	174480	1,0	0,432	0,18
CV2	130460	51970	624740	86480	2,2	0,879	0,21
CV3	143640	47270	734760	151000	1,8	0,673	0,22
CV4	115840	17300	648770	150930	1,1	0,622	0,19
CV5	91200	31850	628500	207900	0,8	0,283	0,15

Tabella 21: Valori mediati delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn e CO₂ e del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei diversi punti del transetto NNW-SSE, per i diversi mesi di monitoraggio.

I valori del rapporto isotopico tra radon e thoron, sembrano confermare come il tratto centrale del transetto (punti di misura CV2 e CV3) sia meno influenzato dalla presenza di aria atmosferica che diluisce le specie gassose nello strato superficiale della cavità.

I risultati ottenuti nelle misurazioni del secondo transetto, sono riportati in tabella 22.

Punto di misura	^{222}Rn (Bq/m ³) A.M.	dev.st ^{222}Rn (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³) A.M.	dev.st ^{220}Rn (Bq/m ³)	CO ₂ (vol%) A.M.	dev.st CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
CV6	134080	47380	644050	110440	1,7	0,661	0,22
CV7	86090	30060	541310	221560	1,8	0,998	0,18
CV8	146000	64640	691110	41160	1,9	0,823	0,21
CV9	112800	40270	582190	58750	1,5	0,526	0,20
CV10	88830	7500	580830	78850	1,7	0,341	0,15

Figura 22: Media delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn e CO₂ e del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei diversi punti del transetto W-E, misurati nei diversi mesi di monitoraggio.

Si ricorda che in questo caso non vi è in superficie alcuna traccia della presenza di cavità sotterranee, contrariamente al caso prima illustrato. Nei prossimi grafici si riportano le concentrazioni di radon, anidride carbonica e thoron relative al transetto orientato W-E, nei diversi periodi di monitoraggio.

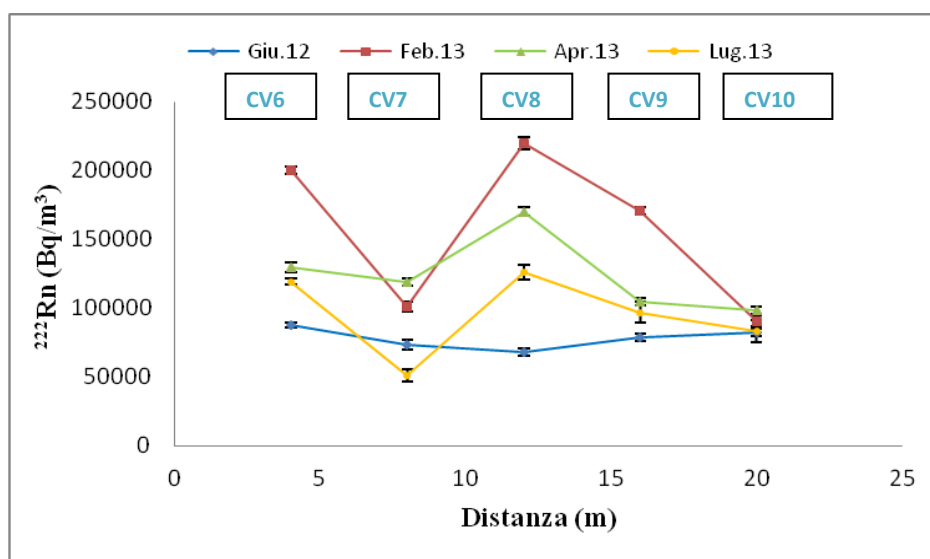


Figura 75: Grafico dell'andamento delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo lungo il transetto W-E.

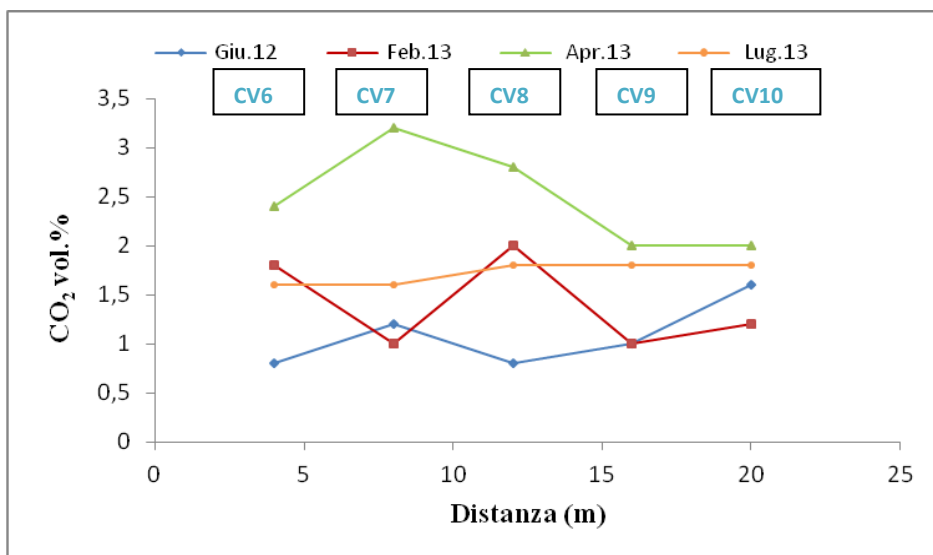


Figura 76: Grafico dell'andamento delle concentrazioni di CO₂ nel suolo lungo il transetto W-E.

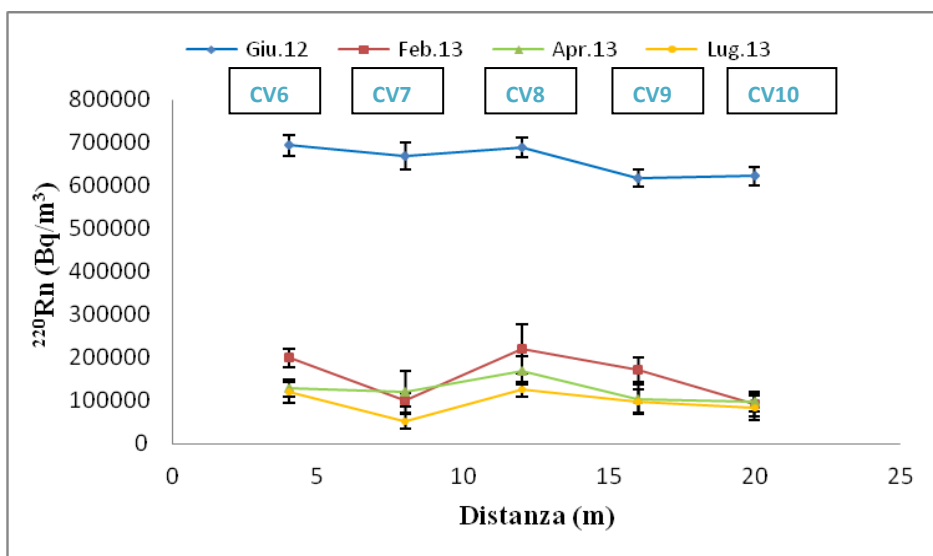


Figura 77: Variabilità delle concentrazioni di ²²⁰Rn nel suolo lungo il transetto W-E, nei diversi periodi di monitoraggio.

Tuttavia l'ubicazione dei punti di misura CV6 e CV10 lungo il transetto (vedi figura 71) è, rispettivamente, nei pressi della traccia ipotizzata della cavità per CV6 (distante 4 m da CV3) e in vicinanza con il secondo sinkhole presente nell'area per CV10, caratteristica simile al punto CV5 del primo transetto. Si è proceduto quindi al confrontare i dati mediati di CV6 e CV10 con quelli dei punti CV3 e CV5 (vedi tabella 23).

Punto di misura	soil ²²²Rn (Bq/m³) A.M.	soil ²²⁰Rn (Bq/m³) A.M.	CO₂ (vol.%) A.M.	²²²Rn/²²⁰Rn
CV3	143640	734760	1,8	0,22
CV6	134080	644050	1,7	0,22
CV5	91200	628500	0,8	0,15
CV10	88830	580830	1,7	0,15

Tabella 23: Confronto tra i dati medi dei punti CV 3 e CV5 del transetto NNW-SSE, con i dati medi dei punti CV6 e CV10 del transetto W-E.

Dal confronto si nota come per le coppie di punti CV3 - CV6 e CV5 - CV10, i valori del *soil gas* siano simili, a parte la concentrazione di CO₂ del punto CV5. Per i punti di misura limitrofi agli sprofondamenti (CV5 e CV10) i valori delle specie gassose misurate nel suolo, risentono di una maggiore diluizione ad opera di aria atmosferica, rispetto ai punti di misura situati distanti da queste vie d'ingresso dell'aria (CV3 e CV6).

In generale quindi sui punti di misura situati al disopra di cavità distanti ma dalle entrate o da sinkhole, le concentrazioni di radon risultano maggiori rispetto ai punti di misura dove non è presente alcuna cavità. L'aria arricchita in radon della grotta (come descritto nel caso di Tor Marancia) fluisce attraverso la volta verso la superficie, rappresentando quindi una "componente" complementare al gas radon presente nel suolo superficiale. Questo meccanismo viene suggerito anche dal rapporto isotopico ²²²Rn/²²⁰Rn delle misure effettuate su cavità, che è più elevato rispetto agli omologhi rapporti nei punti dove non risulta presente una cavità sottostante.

8.3.1 Confronto tra le stazioni di misura RPS3, CI_80 e CV3 situato al di sopra della cavità sotterranea

Nel periodo compreso tra giugno 2012 e settembre 2013, è stato monitorato con cadenza mensile il punto CV3, presente nella parte centrale del transetto sopra la cavità orientato circa NNW-SSE. La scelta è ricaduta su questo punto in quanto, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, le concentrazioni del *soil gas* sembrano non risentire di afflusso d'aria dall'entrata e dal sinkhole 1, come invece accade per gli altri punti del transetto.

L'intento è quello di verificare se l'aria indoor della cavità, arricchita in radon, può influenzare i valori del radon misurati nel suolo nella parte superficiale. I dati ottenuti sono stati confrontati con quelli delle stazioni RPS3 e C1_80 relativi allo stesso periodo (tabella 24).

Punto di misura	^{222}Rn (Bq/m ³) A.M.	dev.st ^{222}Rn (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³) A.M.	dev.st ^{220}Rn (Bq/m ³)	CO ₂ (vol%) A.M.	dev.st CO ₂ (vol%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ A.M.
CV3	133250	36930	587230	81990	1,9	1,07	0,2
RPS3	90030	45560	234960	43300	0,9	0,46	0,4
C1_80	98700	31270	571430	74440	1,7	0,97	0,2

Tabella 24: Confronto dei valori medi del soil gas misurato nei punti CV3, RPS3 e C1_80, nel periodo compreso tra giugno2012-settembre2013.

L'andamento stagionale delle concentrazioni di radon nelle due stazioni fisse e nel punto CV3, rapportate alle precipitazioni mensili, viene visualizzato nel grafico di figura 78.

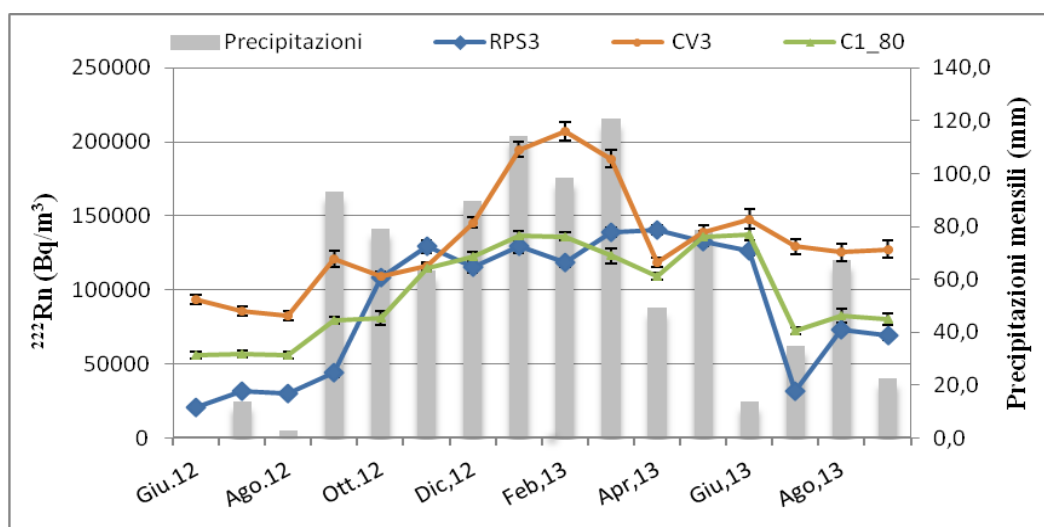


Figura 78: Andamento del ^{222}Rn nel suolo nei punti CV3, RPS3 e C1_80 e delle precipitazioni mensili nel periodo giugno2012-settembre2013

Si ricorda che la stazione fissa di misura RPS3 è rappresentata dal un'asta munita di punta con diametro maggiore del resto dell'asta, rispetto alle sonde utilizzate nei punti C1_80 e CV3. Questo probabilmente comporta una perdita di parte delle concentrazioni dei gas misurati, in particolar modo per il thoron. Il valore medio di thoron misurato in questo intervallo temporale, è circa il 40 % dei valori medi di thoron in C1_80 e CV3,

che sono simili. Significativo è il confronto dei dati di CV3 con quelli della stazione C1_80.

Dal grafico 78 possiamo notare come i valori di radon in CV3 presentino una variabilità meno accentuata rispetto a quella osservata in C1_80, soprattutto nei periodi estivi.

Dalle misure di radon indoor nella cava di Tor Marancia, abbiamo visto come le concentrazioni più alte si riscontrano nei periodi estivi con gradiente di temperatura tra interno ed esterno più alto, rispetto ad altri momenti stagionali.

Il ΔT genera dei flussi d'aria che si muovono dall'interno (ambiente più fresco in estate) verso l'esterno, impedendo l'ingresso di aria atmosferica che diluirebbe le concentrazioni indoor di radon. Il meccanismo sopra descritto potrebbe essere la spiegazione del perché la concentrazione di radon nel suolo in punti sopra cavità sotterranee poco profonde, sia maggiore specialmente nei periodi estivi, rispetto a punti senza cavità sotterranea, risentendo in maniera minore della variabilità stagionale.

Capitolo 9

Influenza della presenza di faglie con risalita di fluidi profondi sulle concentrazioni di radon e thoron nel suolo

9.1 Il sito di indagine delle Terme della Ficoncella, Civitavecchia (RM)

Il sito termale della Ficoncella è ubicato nella parte NE di Civitavecchia, in una zona collinare con altezze medie intorno i 200 m s.l.m. (figura 79).



Figura 79: Ubicazione delle Terme della Ficoncella (nel riquadro in rosso) rispetto all'abitato di Civitavecchia (RM) (immagine tratta da Google Earth).

Le acque termali presenti nella zona sono utilizzate sin da epoca romana; sono presenti infatti testimonianze storiche di vecchi centri termali, sia nell'area della Ficoncella sia nella zona poco distante dei Bagni di Traiano. In questi due siti si riscontra la presenza di depositi travertinosi, affioranti sulle serie marine neogeniche e quaternarie dell'area. Questi depositi sono la testimonianza della risalita di acque mineralizzate sature di bicarbonato di calcio lungo fratture bene definite. Le caratteristiche chimico-fisiche delle acque della Ficoncella, sono riportate nella tabella 25.

T	Portata	pH	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	Sr	CO ₂ libera
55	1	6,14	2730	628	91	39	6	634	1272	39	13	7,5	114

Tabella 25: Caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua termale della Ficoncella (Minissale,2004; Dall'Aglio et al., 1994). Temperatura espressa in °C, portata in l/sec ed elementi chimici in mg/kg, CO₂ libera espressa in mg/l.

L'acqua della Ficoncella può essere definita come solfato-calcica, ricca in gas.

Il lavoro effettuato nella zona è stato incentrato sul monitoraggio del soil gas in due stazioni fisse, TFF1 e TFF2 (intendendo come nel caso della Caffarella, delle aste fisse inserite nel suolo alla profondità di 80 cm) installate nella zona della risorgenza termale come riportato in figura 80.



Figura 80: Ubicazione delle stazioni fisse di monitoraggio TFF1 eTFF2, nei dintorni della sorgente termale, posizionata in una cavità del travertino a circa 4 m dal p.c.

Il monitoraggio è stato effettuato nel periodo compreso tra novembre 2012 e ottobre 2013, con cadenza mensile. Durante l'estate del 2011 è stato eseguito un monitoraggio delle concentrazioni di radon, thoron e anidride carbonica in un'areale limitrofo alla sorgente termale, dove si è riscontrata la presenza di pozzi profondi, realizzati per scopi

di esplorazione geotermica per conto dell'ENEL. Tra marzo e novembre 2012 sono state intensificate le misure nell'area delle due stazioni fisse, integrandole con i dati relativi alle misure realizzate nello stesso periodo stagionale del 2010 per un altro progetto di ricerca, allo scopo di avere informazioni più complete sulla concentrazione di radon nel suolo dell'area.

9.1.1 Risultati del monitoraggio nelle stazioni fisse TFF1 e TFF2

Il monitoraggio effettuato nelle due stazioni fisse TFF1 e TFF2, la cui ubicazione è mostrata in figura 80, è stato eseguito a partire da novembre 2010 fino a ottobre 2013. Le aste utilizzate sono le stesse impiegate nei punti fissi C1_80 e C1_30 nella Caffarella, munite di punta a perdere quindi senza lo spazio vuoto suolo-asta come nel caso della stazione RPS3.

Nella tabella 26 si riportano i valori mediati del *soil gas*, mentre nelle appendici F e G sono presentati i valori relativi a tutto il periodo di monitoraggio.

Stazione Fissa	Soil ^{222}Rn (Bq/m^3)		Soil ^{220}Rn (Bq/m^3)		Soil CO_2 (vol.%)		$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ A.M.
	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	
TFF1	128000	72580	93720	22180	1,6	0,67	1,5
TFF2	382270	187300	32280	5180	2,1	0,77	11,8

Tabella 26: Medie aritmetiche delle concentrazioni di radon, thoron, anidride carbonica e del rapporto radon/thoron nel suolo a 80 cm dal p.c., relative alle stazioni fisse TFF1-TFF2, periodo novembre 2010-settembre 2013.

La tabella mostra una situazione molto differente per i due punti di misura. In TFF2 la concentrazione media di radon è circa 3 volte il valore medio di radon in TFF1. Viceversa il thoron è 1/3 di quello misurato in TFF1. L'anidride carbonica invece è simile tra le due stazioni, con il valore medio più alto in TFF2. Questi dati testimoniano l'elevata differenza tra le due stazioni, distanti non più di 50 m l'una dall'altra, sintomo di un quadro complesso del movimento del gas nei travertini dell'area, i quali risultano essere molto fratturati e presentano una serie di vecchie trincee per la canalizzazione delle acque termali, sia superficiali che sepolte. Un'ulteriore conferma di questa differenza viene anche dal rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei due punti di misura. In

particolare in TFF2 il range misurato va da 2,6 a 21,1, mentre in TFF1 il rapporto è sempre più basso con un range di $0,4 \div 4,7$.

Nel grafico seguente si riporta l'andamento mensile delle concentrazioni di radon in TFF1 e TFF2, assieme ai dati pluviometrici cumulati mensili presi da una stazione meteorologica presente nel centro di Civitavecchia (coordinate geografiche: $42^{\circ} 03' 54''$ N; $11^{\circ} 48' 46''$ E).

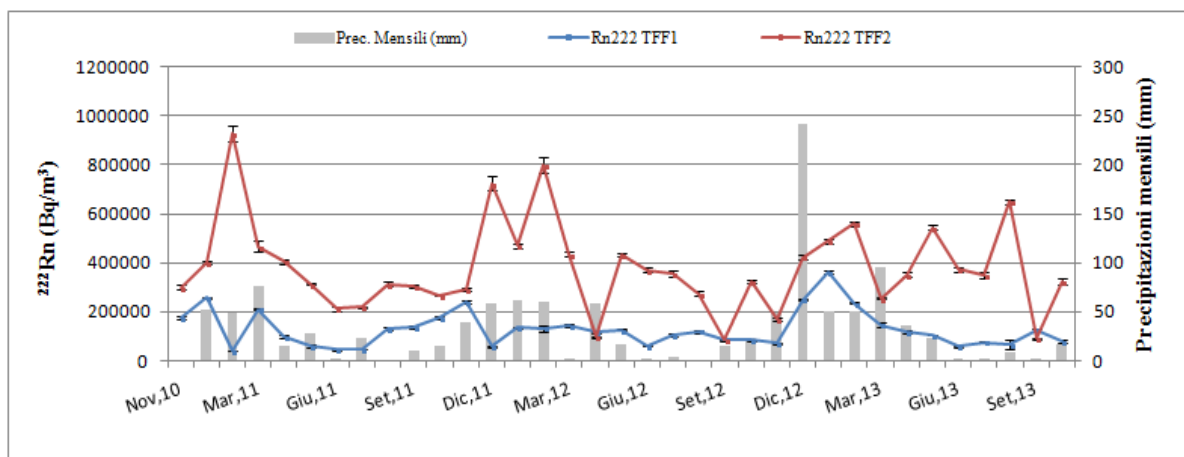


Figura 81: Andamento mensile delle concentrazioni di soil ^{222}Rn nelle stazioni TFF1 e TFF2, in funzione della piovosità dell'area.

L'andamento stagionale delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo sembra essere indipendente dalle precipitazioni mensili, contrariamente a quanto osservato per la Caffarella. Specialmente nella stazione TFF2 dove sono stati misurati valori di ^{222}Rn estremamente elevati (valore massimo di circa 1000 kBq/m^3 nel mese di febbraio 2011), anche in periodi estivi quando generalmente il contenuto d'acqua del suolo è minore rispetto ai periodi più piovosi dell'anno. L'aspetto sorprendente è che quando in TFF2 si misurano concentrazioni di radon notevoli, superiori o pari a circa 600 kBq/m^3 , nella stazione TFF1 si registrano invece i valori più bassi. In alcuni periodi dell'anno si verifica poi un meccanismo contrario rispetto a quanto sopra descritto, con i valori di ^{222}Rn maggiori o simili in TFF1 rispetto a TFF2.

Nella tabella 27 si riassumono i parametri statistici delle due stazioni utili per una verifica di correlazione tra precipitazioni mensili e concentrazioni di ^{222}Rn (livello di significatività scelto per il test t di Student, $\alpha, 0,01$).

Stazione fissa	R	t di Student	Correlazione statistica significativa
TFF1	1,113	1,113	SI
TFF2	0,450	2,850	NO

Tabella 27: Correlazione della concentrazione di ^{222}Rn nel suolo con i valori delle precipitazioni mensili, per le due stazioni TFF1 e TFF2.

Dai dati in tabella 27 risulta evidente come siamo in presenza di una correlazione diretta, statisticamente significativa, tra le concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo e precipitazioni mensili solo nel punto fisso di misura TFF1. In TFF2 non è evidente invece una correlazione statisticamente significativa per $\alpha = 0,01$. Il test invece risulta superato per $\alpha = 0,400$, quindi con un 40 % di probabilità che la correlazione tra le concentrazioni di radon e precipitazioni sia dovuta al caso.

La variabilità stagionale delle concentrazioni di radon tra le due stazioni, non sembrerebbe in relazione neanche con la permeabilità intrinseca, i cui valori sono riassunti in tabella 28. Da osservare tuttavia la più ampia variabilità della permeabilità intrinseca nella stazione TFF2 rispetto a TFF1.

Permeabilità intrinseca (k, m^2)	Min (m^2)	Max (m^2)	Medio (m^2)	dev.st (m^2)
TFF1	$2,3\text{E}^{-12}$	$2,9\text{E}^{-11}$	$1,1\text{E}^{-11}$	$7,2\text{E}^{-12}$
TFF2	$8,0\text{E}^{-12}$	$3,2\text{E}^{-11}$	$2,8\text{E}^{-11}$	$5,7\text{E}^{-11}$

Tabella 28: Permeabilità intrinseca misurata nelle stazioni TFF1 e TFF2.

In entrambe le stazioni il valore medio di k ricade nella classe di permeabilità elevata ($k > 4,0\text{E}^{-12} \text{ m}^2$), in TFF2 poi il valore medio è quasi 3 volte quello misurato in TFF1.

Dai dati mostrati (elevate concentrazioni di radon, permeabilità elevata, rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ sempre più alto rispetto a TFF1) possiamo ipotizzare come nella zona del punto TFF2 siamo in presenza di una via preferenziale di movimento del radon, probabilmente legata ad un sistema di fratturazione più intenso rispetto a quello della zona TFF1. In vicinanza dei punti TFF2 e TFF1 nel mese di novembre 2010 sono state effettuate misure di flusso di radon dal suolo. Anche in questo caso il valore più elevato è stato misurato in TFF2 ($189 \pm 35,2 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) rispetto al punto di misura TFF1 ($160 \pm 31,5 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). L'intorno della stazione TFF2 è stato investigato da misure del *soil gas* posizionate radialmente rispetto all'asta fissa e a distanze variabili da 1 a 3 m. In

particolare a 1 m sono state effettuate 4 misure, a 2 m 4 misure e a 3 m 3 misure. Nel dettaglio i risultati delle misure si riportano in tabella 29.

Distanza da TFF2	^{222}Rn (Bq/m³) A.M.	^{220}Rn (Bq/m³) A.M.	CO₂ (vol.%) A.M.	k (m²) A.M.
1 m (4 misure)	339000	28050	1,6	2,0E ⁻¹¹
2 m (4 misure)	217000	13680	1,1	1,9E ⁻¹¹
3 m (3 misure)	163000	21270	1,5	1,7E ⁻¹¹

Tabella 29: Risultati delle misure nell'intorno del punto TFF2.

I risultati delle indagini confermano la probabile presenza di un intenso sistema di fratturazione nell'area TFF2, responsabile del degassamento preferenziale in quest'area.

9.1.2 Influenza del vento sulle concentrazioni di radon nel suolo in TFF1 e TFF2

Per l'interpretazione della variabilità stagionale delle concentrazioni di radon nel suolo registrata nelle due stazioni, si è cercato di valutare se erano correlabili con l'intensità e la direzione del vento durante i giorni di misura. I parametri del vento sono stati presi dalla stessa stazione meteorologica presente nell'abitato di Civitavecchia, già utilizzata per i dati relativi alle precipitazioni mensili. Sono stati considerati in questo caso i valori medi dell'intensità e direzione del vento durante i giorni delle misure. In generale è stato possibile osservare che in presenza di vento con direzione predominante da N, si ha un aumento considerevole delle concentrazioni di radon in TFF2. Viceversa con un vento proveniente dal quadrante S, si ha un brusco calo dei valori di radon in TFF2, come possiamo osservare nel grafico in figura 82.

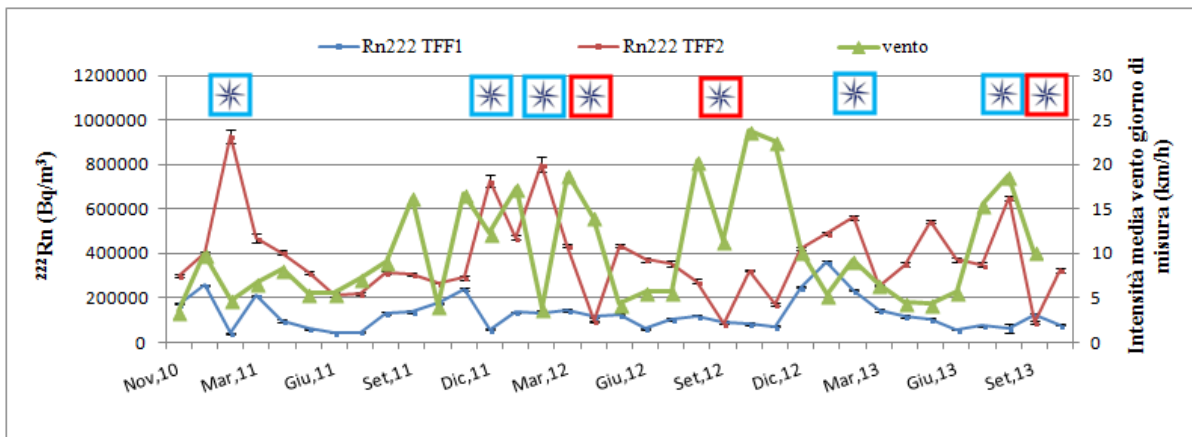


Figura 82: Concentrazioni di radon in TFF1 e TFF2 in relazione all'intensità e direzione del vento durante i giorni di misura: * Vento con direzione predominante N; * Vento con direzione predominante S.

I dati suggeriscono quindi che il vento proveniente dal quadrante N genera un gradiente di pressione all'interno del travertino fratturato e con presenza di trincee sotterranee, che favorisce una migrazione del gas nell'area della stazione di misura TFF2.

9.1.3 Misure nell'area limitrofa la zona termale della Ficoncella

Durante l'estate del 2011 nell'area limitrofa le terme della Ficoncella, è stata eseguita una campagna di misure del *soil gas*, con l'intento di ottenere maggiori informazioni sul degassamento nella zona. Nell'area investigata sono presenti dei pozzi di esplorazione geotermica realizzati per conto dell'ENEL. Il substrato dove sono state eseguite le misure, esclusi i punti TFF2 e TFF1 posizionati sul travertino, è di natura flyshoide. Dopo l'acquisizione dei dati in campagna, si è provveduto alla realizzazione di elaborati cartografici per avere un quadro completo sulla distribuzione spaziale delle variabili considerate e dei loro valori. Allo scopo è stato utilizzato, come per tutte le altre mappature effettuate in aree differenti, il programma informatico "Surfer 8". Prima dell'utilizzo di questo programma bisogna effettuare un'analisi esplorativa dei dati (EDA), come: calcolo del numero di campioni, range, media, mediana, varianza; questi calcoli servono per effettuare una corretta analisi grafica per la quale si utilizzano:

- scatterplots: per avere una visione spaziale del dato;
- verifica della distribuzione dei dati: si verifica la distribuzione *log-normale* del dato;
- istogrammi;
- distribuzioni cumulate.

L'algoritmo utilizzato per l'interpretazione spaziale tra i dati è il *kriging*, un metodo di regressione che permette di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio.

Questo è possibile dall'utilizzo del variogramma, che permette di descrivere la correlazione spaziale tra i dati, cioè la loro continuità o non continuità spaziale.

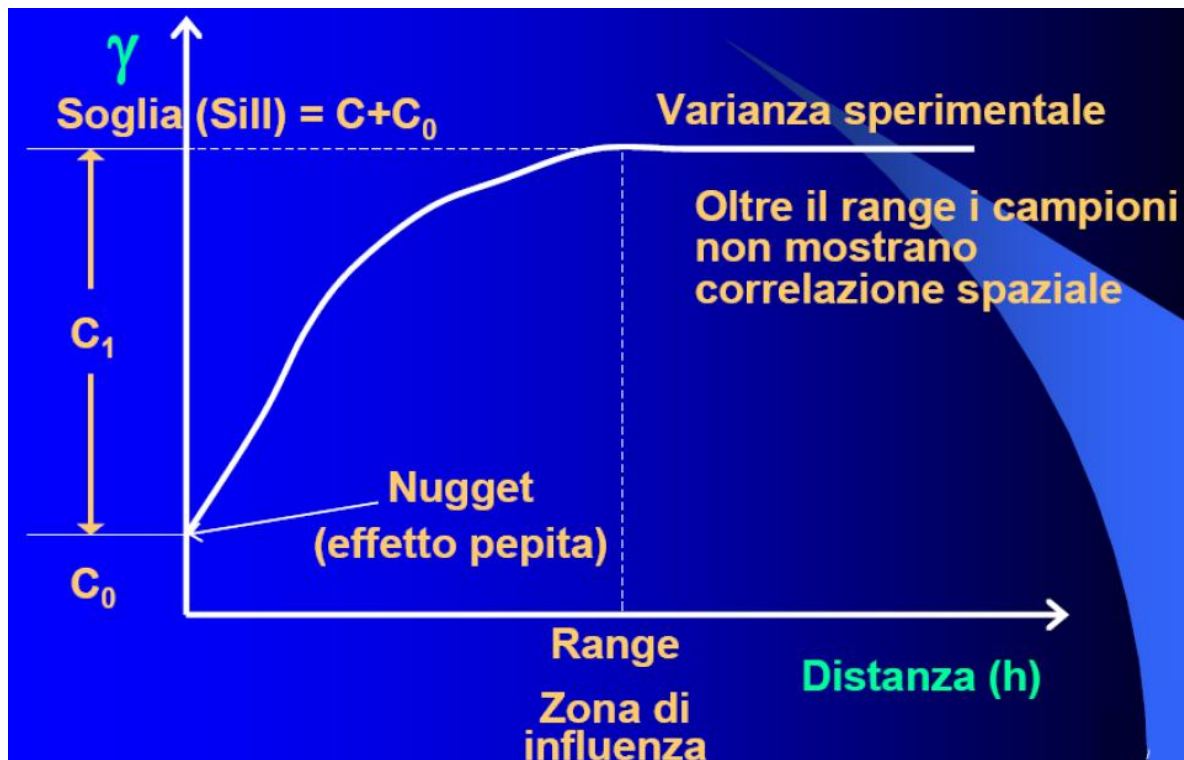


Figura 83: Esempio di un variogramma e sue proprietà (Ranaldi, 2008).

Affinché un variogramma sperimentale possa essere utilizzato per la stima di valori incogniti, è necessario trovare una funzione matematica (modello) che interpoli il comportamento spaziale dei dati sperimentali. I modelli utilizzati per la realizzazione di cartografie nel presente lavoro, sono: sferico, nugget, esponenziale e lineare. L'elaborato finale è una carta ad isolinee di uguale valore della variabile considerata che delimitano aree contraddistinte da diverse tonalità di colore.

Nell'area della Ficoncella sono stati effettuate 25 misure a 80 cm di profondità e sono state realizzate mappe delle concentrazioni di radon, del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e della permeabilità intrinseca. Per la concentrazione di CO_2 non è stato possibile realizzare una mappa, in quanto solo in 18 punti sui 25 totali è stata possibile la misura. Nella realizzazione delle mappe sono stati inclusi i punti di misura TFF1 e TFF2, per i quali sono stati considerati i valori medi dei mesi in cui è stato svolto tutto il lavoro, (maggio, giugno, luglio, agosto e settembre 2011). In tabella 30 si riportano i valori riassuntivi dei 25 punti di monitoraggio (i valori di anidride carbonica si riferiscono a 18 punti di misura su 25 totali dell'indagine).

Parametro	Min	Max	Medio	dev.st
^{222}Rn (Bq/m^3)	4090	263300	49990	33800
$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$	0,04	6,07	0,61	1,21
k (m^2)	$4,4\text{E}^{-14}$	$3,0\text{E}^{-11}$	$6,0\text{E}^{-12}$	$7,6\text{E}^{-12}$
CO_2 (vol.%)*	1	5,4	2,7	1,47

*Tabella 30: Valori di ^{222}Rn , $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, k e CO_2 misurati nell'indagine dell'estate del 2011. * I valori di CO_2 sono riferiti a 18 punti di misura.*

Gli elaborati grafici relativi alla concentrazioni di radon, ai rapporti radon/thoron e alla permeabilità intrinseca sono riportati rispettivamente nelle figure 84, 85 e 86.

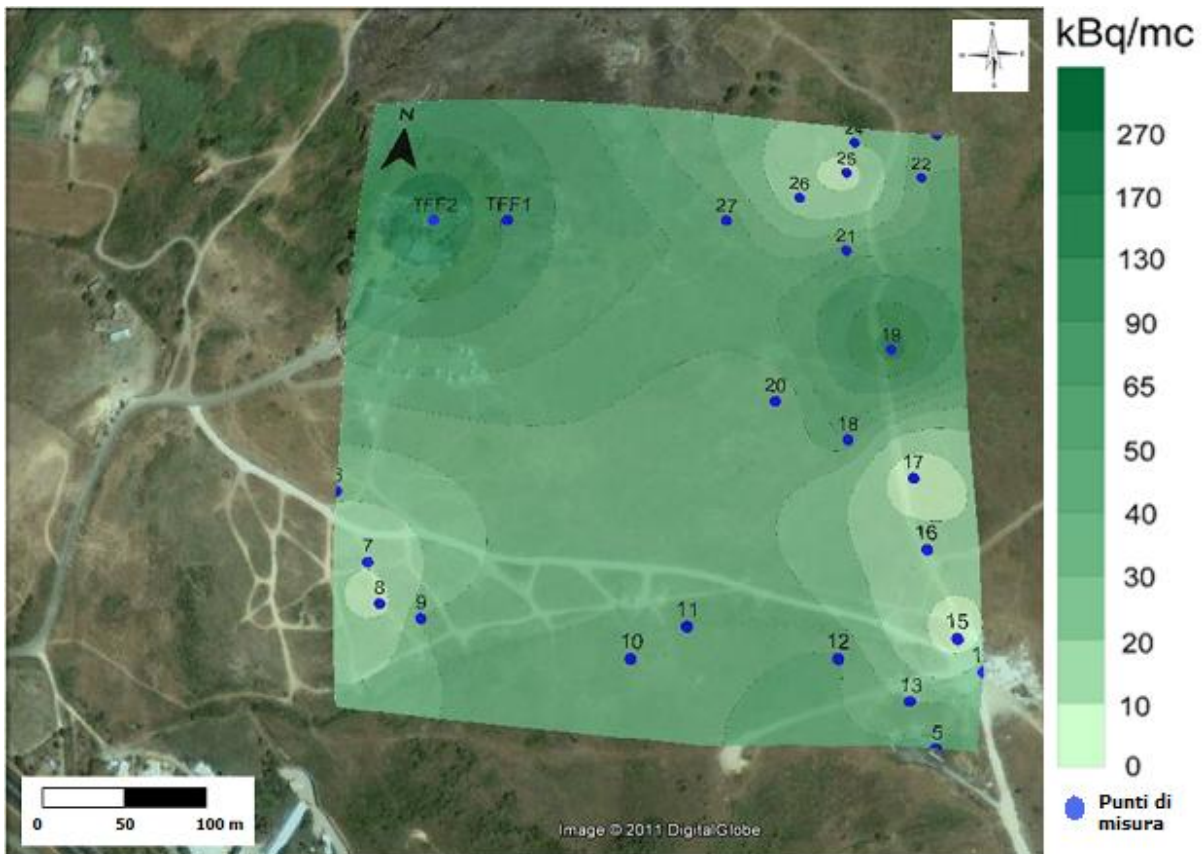


Figura 84: Concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo oggetto dello studio durante l'estate del 2011. (Immagine satellitare tratta da Google Earth).

E' comunque necessario premettere che la bassa densità dei punti di misura effettuati nell'area e la loro non omogenea distribuzione nello spazio, fanno sì che le mappe ottenute risultano non totalmente attendibili. Queste misure sono comunque utili per avere un'idea migliore sulle zone maggiormente interessate da anomalie di concentrazioni di radon nel suolo.

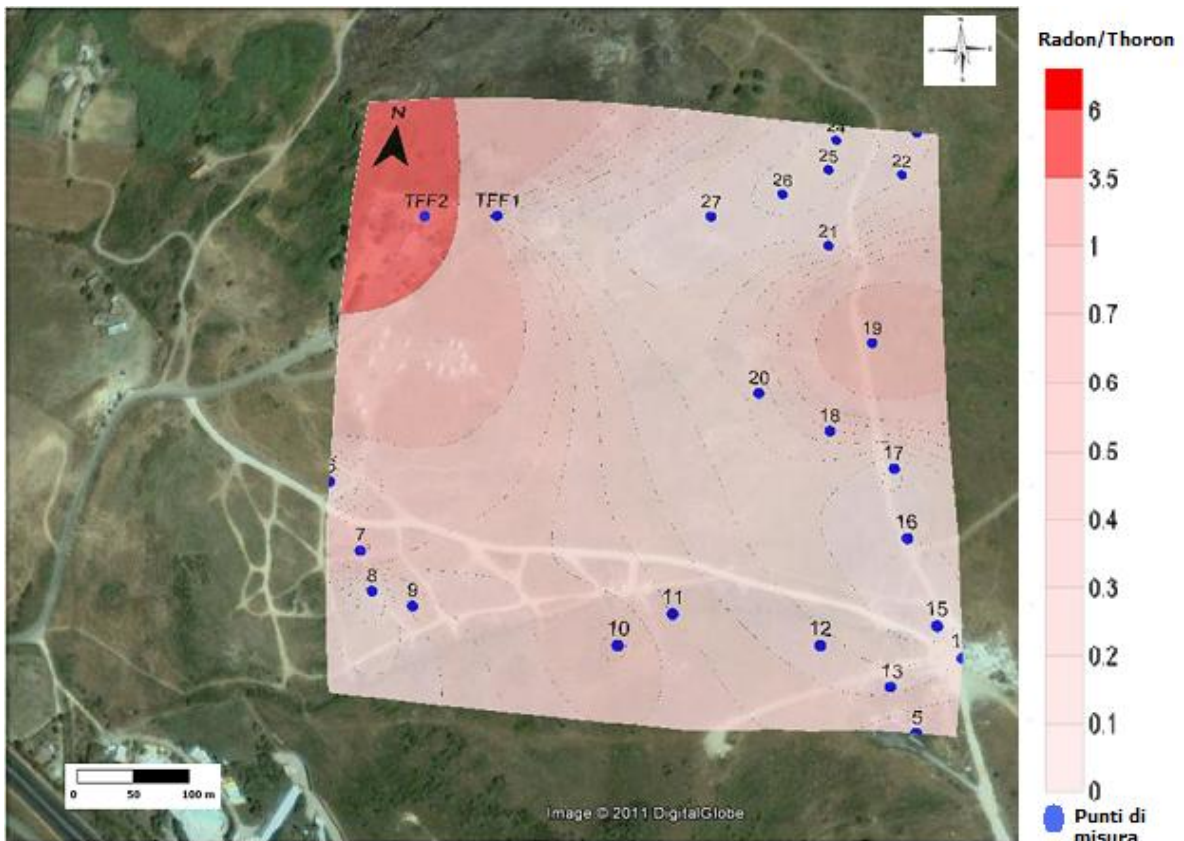


Figura 85: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti monitorati durante lo studio dell'estate 2011. (Immagine satellitare tratta da Google Earth).

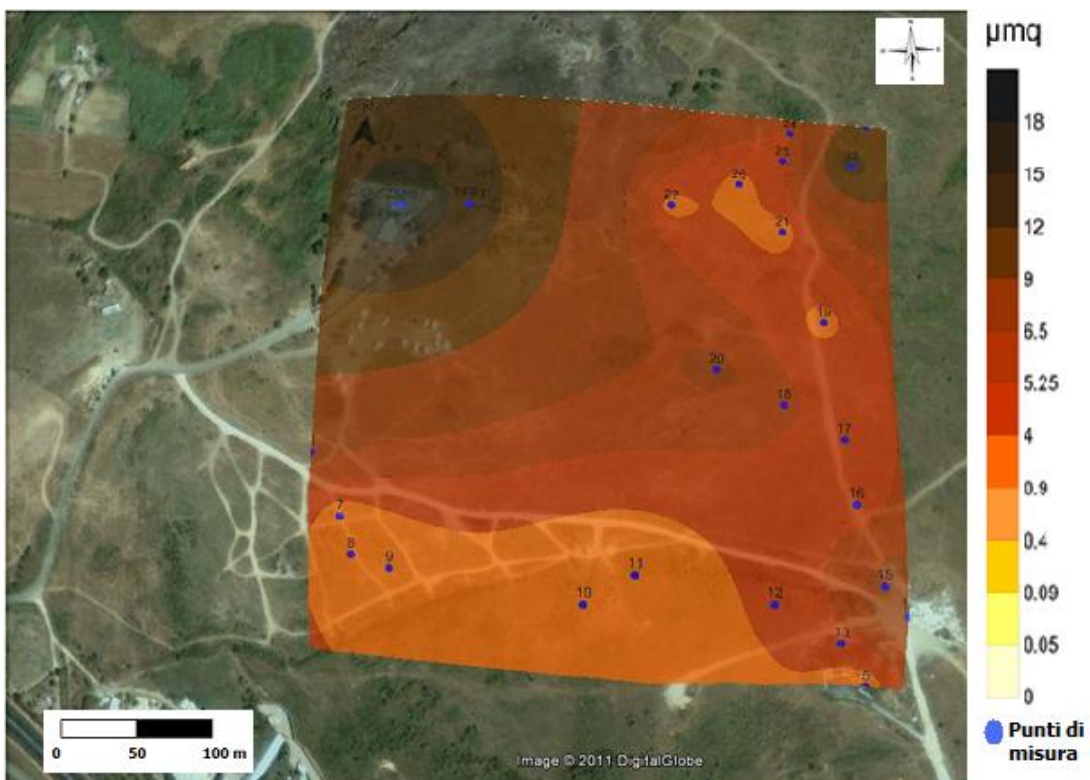


Figura 86: Valori della permeabilità intrinseca, espressa in μm^2 , nell'area indagata. (Immagine satellitare tratta da Google Earth).

Dalle mappe ottenute risultano evidenti le anomalie di radon nel suolo nelle stazioni fisse posizionate sul travertino in particolare TFF2, che presentano anche i valori più elevati del rapporto radon/thoron e della permeabilità intrinseca. Le concentrazioni più elevate di radon sembrano avere un allineamento preferenziale circa ovest-est nella parte nord dell'area indagata, dove si trovano anche i valori più alti di k misurati.

I valori più bassi di permeabilità intrinseca, sono stati misurati nella parte sud dell'area, dove è presente un reticolo di stradine sterrate. Molto probabilmente in loco sono presenti materiali di riporto di varia natura, compattati dall'azione di mezzi pesanti.

9.1.4 Mappatura della concentrazione di attività del ^{222}Rn nel suolo nella zona interessata dalla risorgenza termale

Nel periodo compreso tra marzo e novembre 2012 sono state eseguite alcune misure del radon a 80 cm nel suolo nell'area compresa tra le due stazioni fisse. Questi nuovi punti, integrati con altri punti di misura realizzati nel 2010 nel corso di un altro progetto di ricerca, sono stati utilizzati per la realizzazione di una mappatura della zona (24 punti di misura totali, i cui valori riassuntivi sono riportati in tabella 31), Per le stazioni di misura TFF1 e TFF2 è stato considerato il valore medio del radon misurato nel periodo marzo-novembre 2012.

Punti di misura	Min (Bq/m³)	Max (Bq/m³)	Medio(Bq/m³)	dev.st(Bq/m³)
24	14000	476000	136000	111170

Tabella 31 :Valori di ^{222}Rn nel suolo dell'indagine nella zona della sorgente termale.

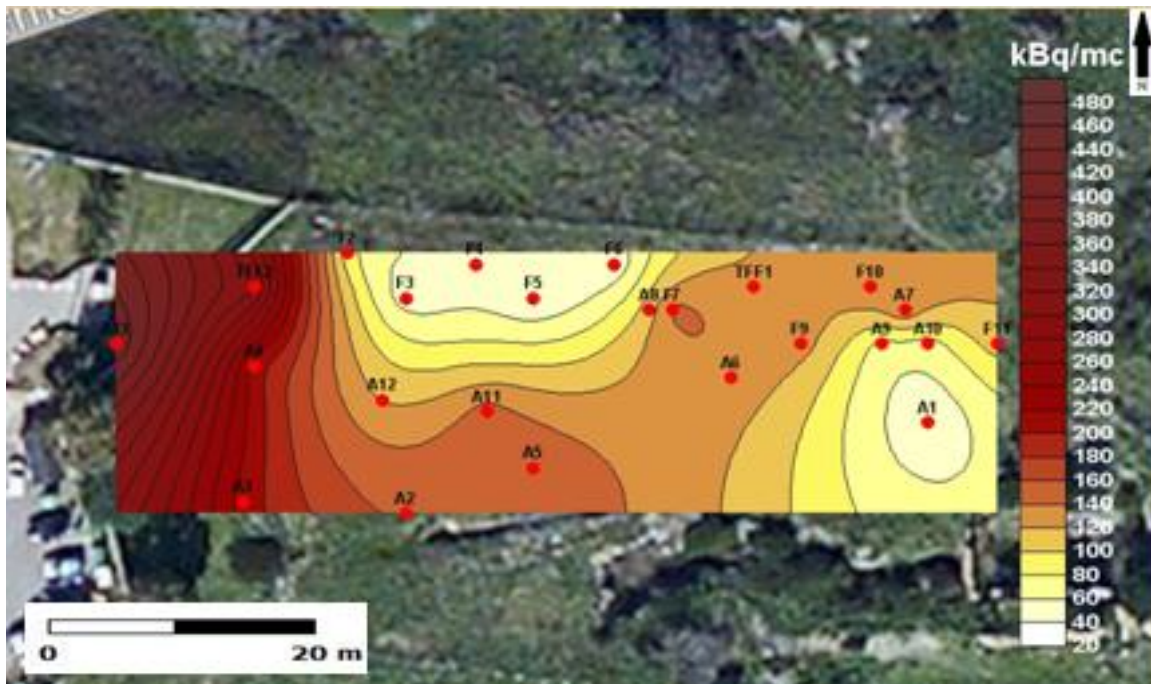


Figura 87: Mappa della concentrazione di ^{222}Rn nel suolo nell'area interessata dalla presenza delle due stazioni fisse di monitoraggio e dalla risorgenza termale.

Dalla mappa ottenuta (figura 87) risulta evidente come le maggiori concentrazioni di radon nel suolo sono ubicate nel settore ovest (zona della stazione fissa TFF2) con un valore medio di 310000 Bq/m^3 . Altrettanto evidente è un allineamento SW – NE di concentrazioni medio – alte di radon (valore medio pari a 147000 Bq/m^3). Si riconoscono poi 2 settori, uno centrale ed uno a SE dell'area, a concentrazioni medio – basse con valori medi rispettivamente pari a 34000 Bq/m^3 e 57000 Bq/m^3 .

Visti i dati registrati nelle due stazioni, e risultati delle misure infittite nell'intorno di TFF2, è possibile ipotizzare la presenza di una serie di fratture nella zona ovest dell'area, collegate ai cunicoli sotterranei scavati nel travertino. Il maggiore fattore di controllo della concentrazione del *soil radon* è rappresentato dall'intensità e soprattutto dalla direzione del vento che soffia durante l'esecuzione delle misure. In particolare un vento con direzione predominante da N genera una migrazione del radon verso TFF2 dalle zone limitrofe. Questo meccanismo genera una perdita del thoron visto il suo tempo breve di dimezzamento, come dimostrato dai valori elevati del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$.

9.1.5 Altre indagini effettuate nell'area della Ficoncella

Per completare lo studio delle emissioni gassose nell'area termale, sono state misurate le concentrazioni di radon, thoron, anidride carbonica e acido solfidrico all'interno della cavità dove si trova la sorgente termale, posta a circa 4 m dal piano campagna. Non è stato possibile scendere all'interno della cavità a causa delle elevate concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S misurate già all'ingresso della sorgente, che è protetto da una botola in una trincea scavata nel terreno (figura 88).



Figura 88: Ingresso della cavità dove è presente la sorgente, posizionata ad ulteriori 3 m di profondità.

Si è ovviato a questo problema grazie alla presenza di un piccolo foro sulla volta, dal quale si è calato un tubo in vinile della lunghezza di 4 m, direttamente al disopra della sorgente. Le misure sono state eseguite nel mese di ottobre 2012 e di novembre 2012. I valori sono riportati in tabella 33.

Data	²²²Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	H₂S (ppm)
29-ottobre 2012	880 ± 325	56 ± 36	68	200
06-novembre 2012	1260 ± 470	24 ± 13	68	130

Tabella 33: Concentrazioni in aria delle specie gassose misurate nella cavità della sorgente termale.

Come possiamo notare in tabella 33, i valori di ²²²Rn sono estremamente bassi se paragonati a quelli misurati nel suolo sovrastante. Il ²²⁰Rn risulta praticamente trascurabile. Gli alti valori delle concentrazioni di CO₂ e H₂S confermano che è molto pericoloso scendere nella cavità, dove la concentrazione di CO₂ è letale.

La bassa concentrazione di radon trovata può essere dovuta all'azione dell'acido solfidrico (molto aggressivo per i componenti elettrici) sul rilevatore di particelle α del radonometro, che può aver causato una notevole sottostima dei reali livelli di radon.

Il contenuto di ²²²Rn nelle acque termali della Ficoncella secondo un lavoro del 2010 (Petrullo, 2010) è pari a 2,49 ± 1,72 Bq/l, con pH e temperatura dell'acqua pari rispettivamente a 6,22 e 54,5 °C. Cinti et al. (2013) hanno misurato una concentrazione simile di ²²²Rn nella stessa acqua (2 Bq/l). Questi valori sono anche in accordo con la diminuzione della solubilità del ²²²Rn ad alte temperature dell'acqua, che viceversa favoriscono il degassamento.

9.1.6 Variabilità del soil radon lungo la faglia presente a nord dell'area termale della Ficoncella

Tra giugno e luglio 2013 sono state realizzate misure di gas nel suolo lungo dei profili trasversali alla faglia con direzione NW-SE riportata nella carta geologica dei Monti della Tolfa (Fazzini et al., 1972), a N del sito termale della Ficoncella. L'intento di queste misure è quello di verificare le concentrazioni di radon, thoron, anidride carbonica e il rapporto isotopico radon/thoron nel suolo, in zone interessate da sistemi di fratture le quali rappresentano vie preferenziali di degassamento. L'ubicazione dei profili si riporta in figura 89, dove è stata tracciata la localizzazione della faglia ed evidenziato anche il limite geologico tra il travertino della Ficoncella e il flysch tolfetano affiorante nell'area.

I profili sono stati coperti da 9 punti di misura ciascuno alla profondità di 80 cm dal piano campagna.

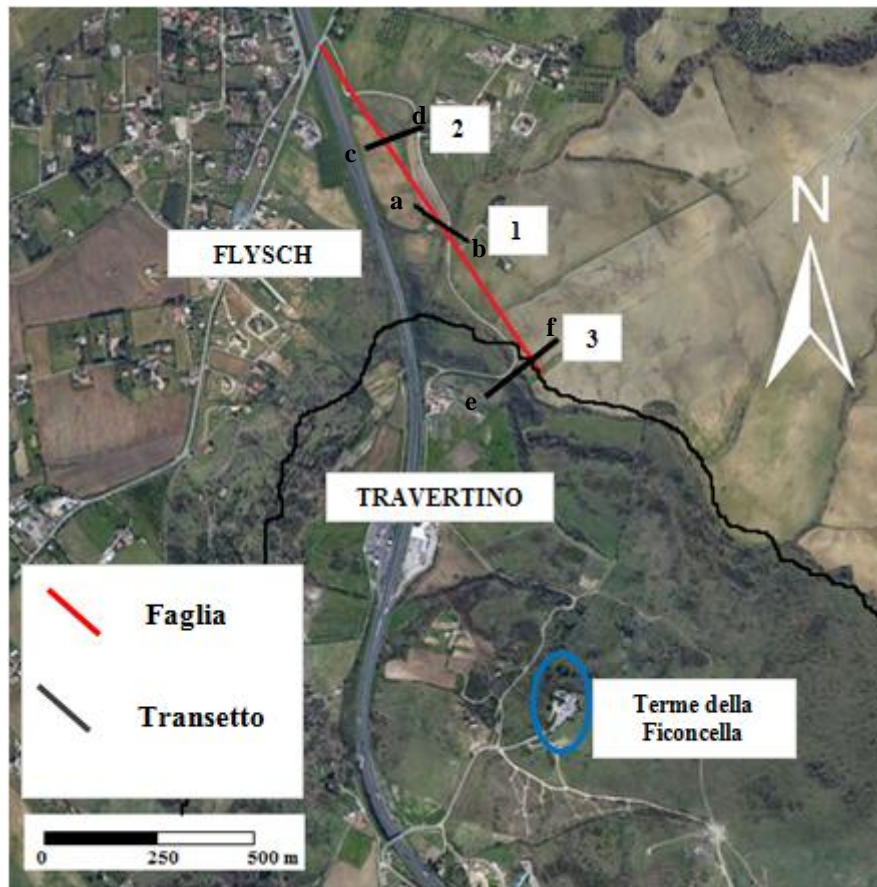


Figura 89: Immagine aerea dell'area a N delle Terme della Ficoncella interessata dalla presenza di una faglia indagata da misure di gas nel suolo lungo 3 profili: 1) a-b, 2) c-d, 3) e-f.

Nelle tabelle 34, 35 e 36 sono riportati i valori riassuntivi dei parametri misurati rispettivamente per i profili 1, 2 e 3, mentre in allegato H viene presentata la tabella con tutti i valori delle misure comprensive di coordinate metriche.

²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
24400	54370	39700	12450
CO₂ (vol%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)
Min	Max	Medio	Dev.st
3,4	10,0	6,0	2,03
²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
9800	45900	26780	13740

Tabella 34: Concentrazioni misurate lungo il profilo 1.

²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
7000	17600	10890	3280
CO₂ (vol%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)
Min	Max	Medio	Dev.st
1	3,4	2,0	0,90
²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
49770	83060	67050	12340

Tabella 35: Concentrazioni misurate lungo il profilo 2.

²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)	²²²Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
5700	26500	14750	6460
CO₂ (vol%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)
Min	Max	Medio	Dev.st
1,2	5,4	2,3	1,63
²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
28900	133400	67750	24900

Tabella 36: Concentrazioni misurate lungo il profilo 3.

Il flysch tolfetano mostra sicuramente un carattere differente rispetto ai travertini della Ficoncella in termini di permeabilità intrinseca; infatti dalle 27 misure è stata riscontrata una permeabilità intrinseca medio - alta, con 15 punti aventi alta permeabilità ($k > 4,0 \text{ E}^{-12} \text{ m}^2$); 10 punti con permeabilità media ($4,0 \text{ E}^{-12} \text{ m}^2 > K > 4,0 \text{ E}^{-13} \text{ m}^2$) e due punti con bassa permeabilità ($k < 4,0 \text{ E}^{-13} \text{ m}^2$).

Il profilo 1 (a-b) ha una lunghezza di 120 m con equidistanza tra le misure di 15 m. Per questioni logistiche non è stato possibile eseguirlo in direzione ortogonale rispetto alla traccia della faglia, per la presenza di zone recintate; di conseguenza anche i valori misurati possono risentire di questo aspetto geometrico. I risultati delle misure del profilo 1 sono visibili in figura 90, dove sono state riportate le concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 e i valori del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$.

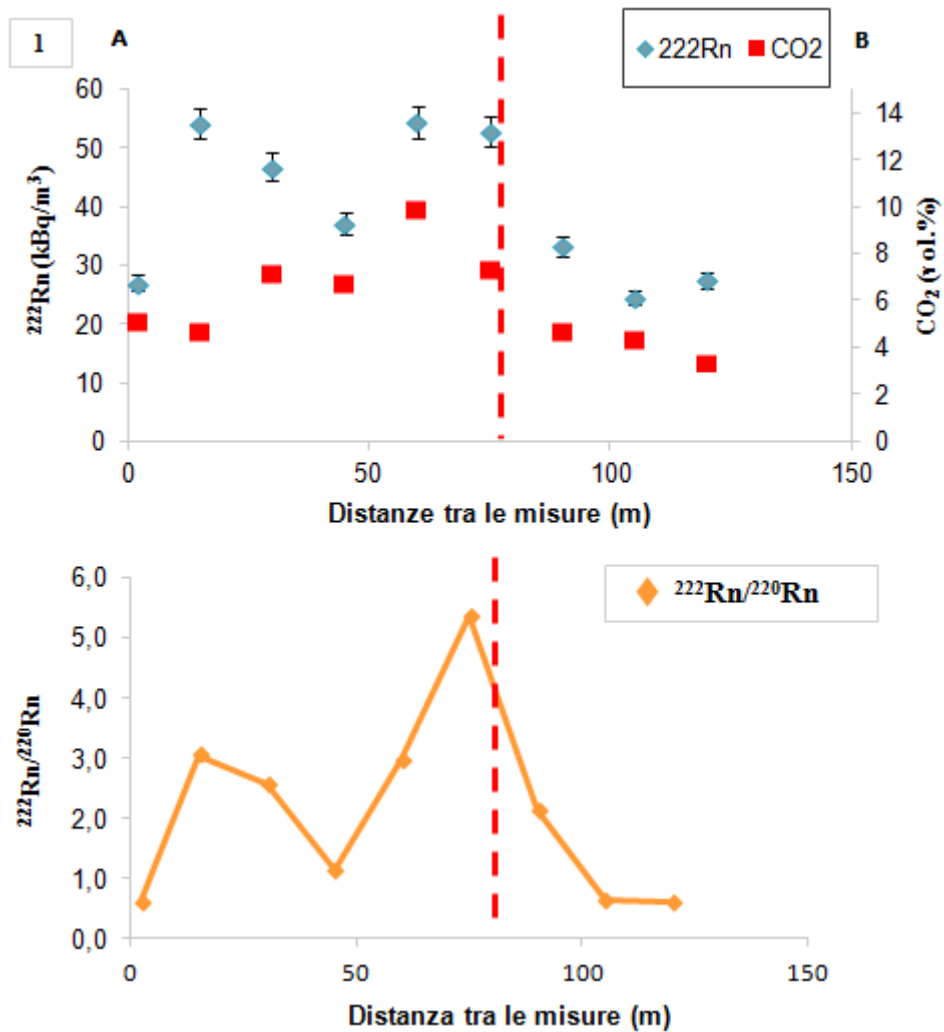


Figura 90: Concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 nel suolo e rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti di misura del profilo 1.

I risultati mostrano come in prossimità della faglia i valori di ^{222}Rn e CO_2 misurati sono più elevati, soprattutto nei punti ad ovest della faglia. Questo andamento forse è da attribuire al fatto che il profilo non è ortogonale al piano di faglia ma quasi parallelo ad essa nella sua parte NW (figura 89). Comunque è evidente la presenza di una zona più fratturata nei pressi della faglia, dove è più intenso il degassamento. Questo aspetto viene evidenziato in maniera ancora migliore dal rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ che in corrispondenza della faglia presenta il valore più alto, pari a 5,4. Come spiegato nei capitoli precedenti, questo rapporto a causa dei tempi di dimezzamento molto differenti tra radon e thoron, può darci indicazioni utili sulla sorgente del gas. Un valore elevato del rapporto in misure ravvicinate in una stessa litologia, a parità di contenuto di ^{226}Ra e ^{232}Th , è indice di un percorso più lungo del ^{222}Rn con conseguente perdita del ^{220}Rn che ha un tempo di dimezzamento di 54,5 secondi.

Il profilo 2 (c-d) ha equidistanza tra le misure di circa 18 m ed i risultati sono visibili nei grafici di figura 91.

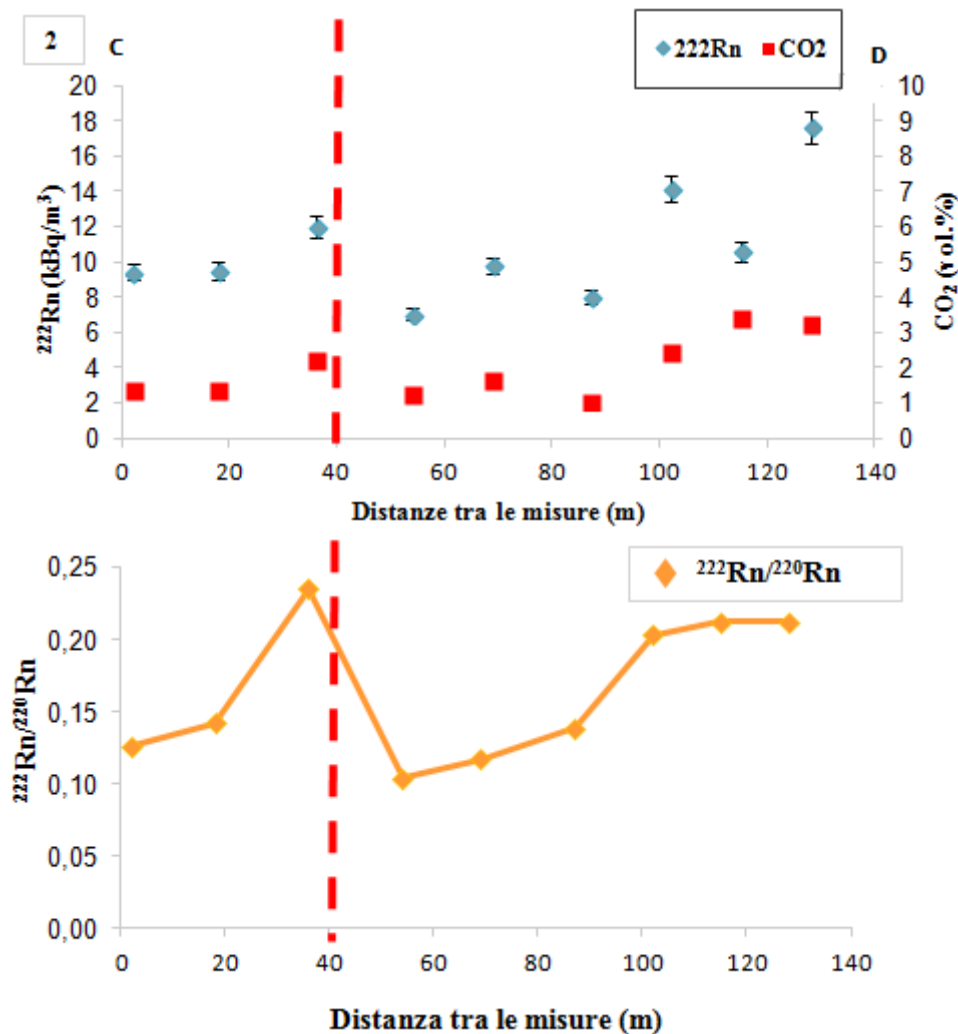


Figura 91: Concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 nel suolo e rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti di misura del profilo 2.

In questo caso le concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 aumentano leggermente avvicinandosi alla faglia se si considerano le misure eseguite a distanza inferiore ai 100 m, mentre i valori più alti sono stati trovati all'estremità NE del profilo. I valori sono comunque inferiori rispetto a quelli del profilo 1. E' interessante notare come, anche in questo caso, il valore più elevato del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ sia stato registrato in prossimità della faglia.

Il terzo profilo (e-f) eseguito nella parte sud della faglia indagata, ha una lunghezza di circa 160 m, con equidistanza tra le misure di 20 m. Nei grafici in figura 92 si riportano i risultati.

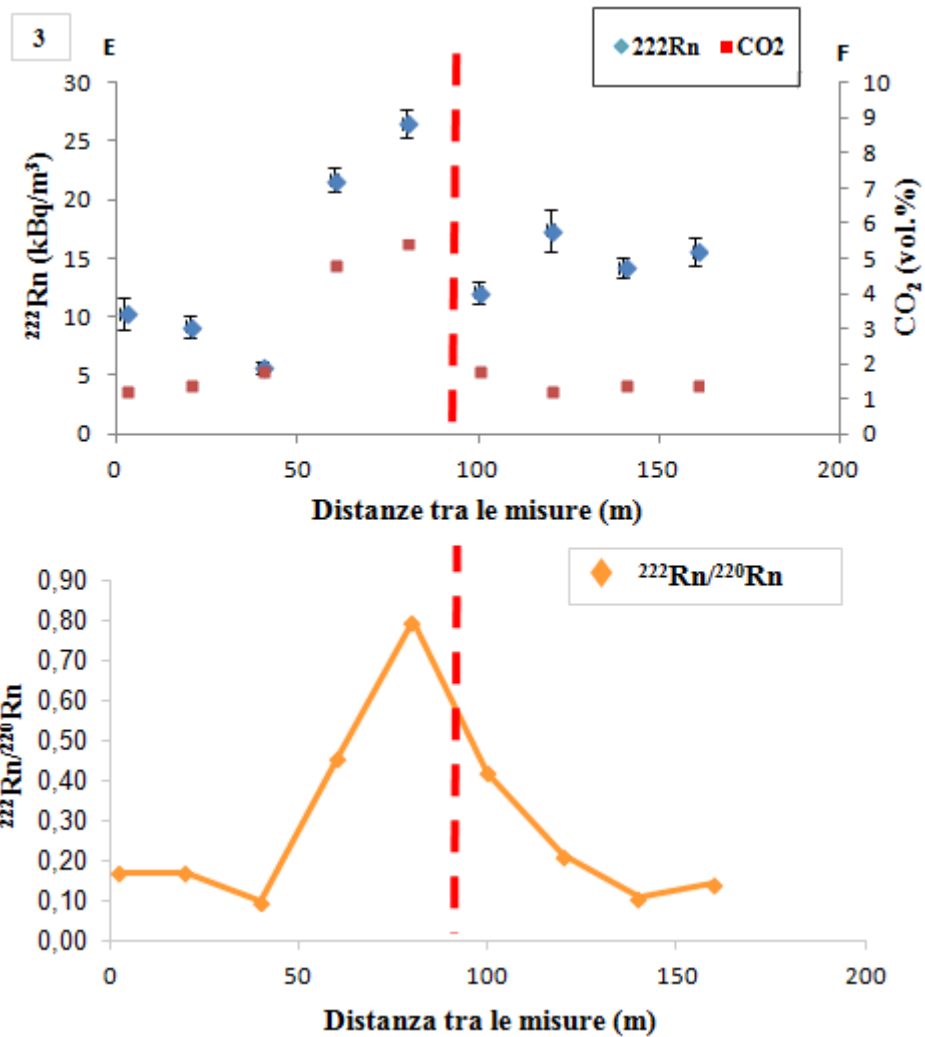


Figura 93: Concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 nel suolo e rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti di misura del profilo 3.

In questo profilo è evidente il caratteristico andamento a campana della concentrazione nel suolo delle specie gassose nei pressi di una faglia. Questo andamento è ben evidente anche per i valori dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$.

Questi tre profili, anche in presenza di un numero di misure ridotto, confermano la migrazione dei gas lungo vie preferenziali come faglie e fratture nel terreno, anche quando queste sono sepolte da coltri sedimentarie mediamente permeabili. La migrazione da zone più profonde, è evidenziata anche dai valori del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, che rappresenta un segnale più forte rispetto alle sole anomalie di ^{222}Rn .

9.2 Il sito di indagine di Vigna Fiorita, Ciampino (RM)

Il consorzio residenziale di Vigna Fiorita si trova nel Comune di Ciampino, a ridosso del settore nord occidentale dei Colli Albani. Alcune aree sui fianchi dell'edificio vulcanico sono note da tempo per il forte degassamento di CO₂, indicato anche dall'alto contenuto di bicarbonato disciolto nelle acque di falda (Chiodini e Frondini, 2001). Queste zone sono posizionate in corrispondenza di alti strutturali del basamento carbonatico profondo, che rappresenta il maggiore acquifero regionale e il serbatoio per i gas che risalgono da zone ancora più profonde. L'area studiata di Vigna Fiorita è situata appena ad E della frazione di Cava dei Selci del Comune di Marino, dove è presente l'area principale di degassamento permanente (principalmente CO₂ e H₂S), ubicata nella depressione di una vecchia cava, dove nel passato si sono verificati diversi incidenti mortali a persone e animali. La depressione stagionalmente ospita uno stagno dove sono osservabili tutta una serie di bolle nell'acqua dovute alla risalita del gas. Diversi anni di monitoraggio su dei punti fissi presenti nella depressione, indicano una forte variazione del flusso totale diffusivo di CO₂, da 25 a 3-4 tonn/giorno e da 84 a 36 kg/giorno per H₂S (Carapezza et al., 2012). Tuccimei e Soligo (2007) hanno misurato un flusso di radon nella cava pari a 1,7-23,4 Bq m⁻² min, mettendo anche in evidenza come alti valori del flusso di CO₂ dal suolo possono portare a una possibile sottostima dei flussi di radon.

Alcune misure di radon nel suolo effettuate dallo scrivente assieme ad un gruppo misto di ricerca Università Roma Tre - INGV Roma, nella zona di Cava dei Selci (Carapezza et al., 2012), mostrano concentrazioni di ²²²Rn all'interno della depressione, comprese tra 1,45 e 69,7 kBq/m³, con un valore medio per 11 misure pari a 32,9 kBq/m³. Molto probabilmente alcuni dei valori di ²²²Rn misurati sono influenzati dall'alta concentrazione di H₂S presente nel suolo che, come descritto nel sottoparagrafo 9.1.5, può generare fenomeni d'interferenza con il rilevatore del radonometro.

Per questo progetto di ricerca il lavoro è stato eseguito totalmente nella zona di Vigna Fiorita, poco distante dalla zona di Cava dei Selci e caratterizzata dalla presenza in affioramento dei depositi piroclastici dell'Unità di Villa Doria. Nel sito sono state installate due stazioni fisse di monitoraggio del soil radon, denominate VF1 e VF2 e la cui ubicazione è visibile in figura 94.

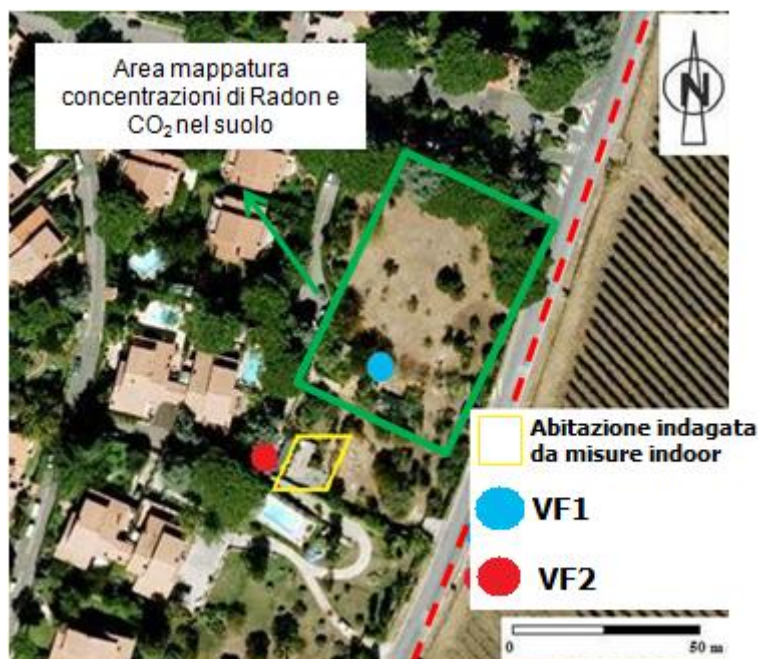


Figura 94: Ubicazione dei punti fissi VF1 e VF2 nel sito di Vigna Fiorita. Nell'immagine si riportano: l'abitazione indagata con misure indoor di ²²²Rn e CO₂, l'area interessata dalla mappatura di soil radon e CO₂ e con il tratteggio in rosso la faglia presunta o sepolta riportata nella carta geologica dell'area. (immagine satellitare tratta da Google Earth).

Il monitoraggio ha avuto una cadenza mensile; per VF1 il periodo monitorato va da febbraio 2011 a novembre 2013 mentre per VF2 il periodo considerato è aprile 2011-novembre 2013. Nell'estate del 2011 nell'abitazione presente nell'area è stata eseguita una misura indoor in continuo di radon e anidride carbonica. L'area del giardino, racchiusa dal rettangolo verde in figura 94, è stata indagata con una serie di misure nel suolo, al fine di ottenere degli elaborati cartografici delle concentrazioni del soil radon, della CO₂ e della permeabilità intrinseca. Nei pressi della stazione VF1 si trova un pozzo dalla profondità di circa 30 m, la cui acqua presenta delle bolle che indicano che al suo interno avviene una risalita di gas. Si è deciso quindi di monitorarlo attraverso misure della concentrazione di gas in aria al suo interno, a circa 3 m dal boccapozzo, accompagnate dalla determinazione del livello statico e, saltuariamente, da analisi chimico-fisiche dell'acqua comprensive di determinazione del radon disciolto. Nell'estate del 2012 sono state eseguite misure lungo profili ortogonali alla faglia presunta o sepolta, nella zona subito a N del consorzio di Vigna Fiorita. Nei paragrafi seguenti vengono illustrati i risultati ottenuti.

9.2.1 Risultati dei monitoraggi nelle stazioni fisse VF1 e VF2

Il monitoraggio nelle stazioni fisse è stato eseguito rispettivamente da febbraio 2011 a novembre 2013 in VF1 e da aprile 2011 a novembre 2013 in VF2. I valori riassuntivi delle specie indagate, sono riportati in tabella 37, mentre nelle appendici I e L sono presentati i valori relativi a tutto il periodo di monitoraggio.

Stazione Fissa	Soil ²²² Rn (Bq/m ³)		Soil ²²⁰ Rn (Bq/m ³)		Soil CO ₂ (vol.%)		²²² Rn/ ²²⁰ Rn A.M
	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	A.M.	dev.st	
VF1	72000	17860	195040	48100	4,7	1,39	0,4
VF2	169880	17490	95070	15570	70,1	5,10	1,8

Tabella 37: Medie aritmetiche delle concentrazioni di radon, thoron, anidride carbonica e rapporto radon/thoron nel suolo a 80 cm dal p.c., relative alle stazioni fisse VF1 e VF2.

Dai dati presenti in tabella si può osservare una differenza notevole tra le concentrazioni dei gas nel suolo, assimilabile a quella osservata tra i punti TFF1 e TFF2 nelle Terme della Ficoncella. In VF2 il valore medio di radon è più del doppio dell'omologo in VF1. Per il thoron il discorso si inverte con rapporto tra thoron medio in VF1 su thoron medio in VF2 pari a 2. Da questa prima analisi sulle concentrazioni di radon e thoron nei due punti, è evidente in VF2 un degassamento maggiore rispetto VF1, come confermato anche dai valori medi di anidride carbonica (70 vol % in VF2 rispetto al 4,7 vol.% in VF1).

Nel grafico della figura 95 sono riportati gli andamenti stagionali del soil radon e CO₂ nelle due stazioni, in relazione alle precipitazioni mensili dell'area, prese da una stazione meteorologica situata all'interno dell'abitato di Ciampino.

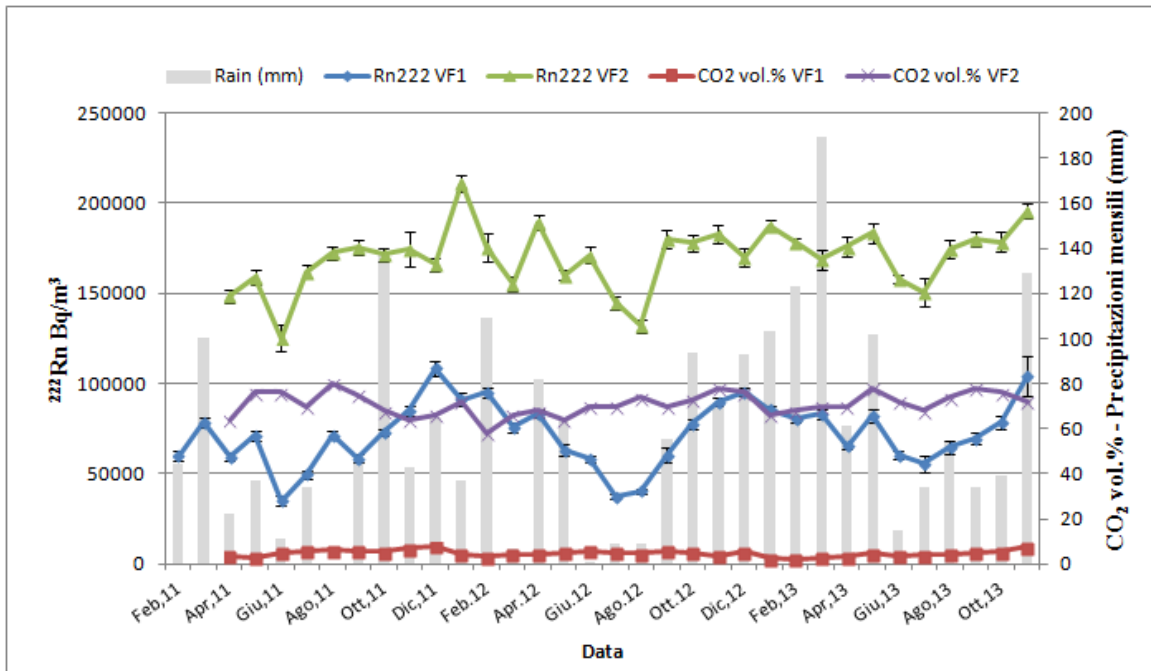


Figura 95: Andamento stagionale delle concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 nelle stazioni VF2 e VF1, in funzione delle precipitazioni mensili.

Gli andamenti mettono in luce la differenza notevole tra le due stazioni, dove in VF2 le concentrazioni di radon non sembrano influenzate dalle precipitazioni mensili e quindi dal contenuto d'acqua nel suolo. In VF2 si riscontra per il radon il solito andamento stagionale, con valori più elevati nei periodi di maggior piovosità. L'anidride carbonica mette in luce come il punto VF2 sia interessato da un forte degassamento profondo, con valori costantemente sopra il 58 vol.%, fino ad un massimo di 80 vol.%. In VF1 i valori di CO_2 sono molto più bassi, con un range che va da 2,2 vol.% fino ad un massimo di 7,8 vol.%.

Nella tabella 38 si riportano i parametri statistici per una verifica di correlazione tra concentrazioni di ^{222}Rn e precipitazioni mensili (livello di significatività scelto, α , 0,01).

Stazione fissa	R	t di Student	Correlazione statistica significativa
VF1	0,595	4,189	SI
VF2	0,452	2,74	NO

Tabella 38: Verifica della correlazione tra precipitazioni mensili e concentrazioni di ^{222}Rn nelle due stazioni fisse.

Risulta evidente una correlazione diretta in VF1, mentre in VF2 il test non viene superato per $\alpha = 0,01$; risulta però superato per un $\alpha = 0,025$ (probabilità del 2,55 % che la correlazione tra radon e precipitazioni sia dovuta al caso). La permeabilità intrinseca misurata nelle due stazioni fisse, mostra il seguente andamento stagionale.

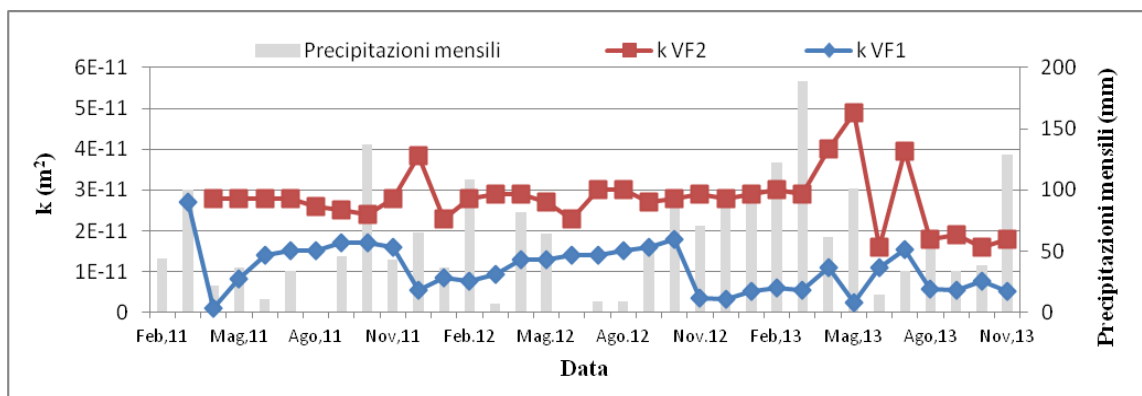


Figura 96: Andamento stagionale della permeabilità intrinseca nelle stazioni fisse VF1 e VF2, in funzione delle precipitazioni mensili.

In VF2 siamo in presenza di valori che ricadono nella classe di alta permeabilità intrinseca ($k > 4,0E^{-12} \text{ m}^2$), rispetto ai valori registrati in VF1 che risentono delle condizioni fisiche del suolo, come il contenuto d'acqua, con permeabilità variabile da medio-bassa ad elevata per lo più in periodi estivi. I dati descritti mostrano come in VF2 sia presente un forte degassamento profondo rispetto al punto VF1, evidenziato anche dal valore medio del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, pari a 1,8 in VF2 e 0,4 in VF1. Per completare le misure effettuate nei due punti fissi di monitoraggio, sono state eseguite misure di flusso superficiale di ^{222}Rn e CO_2 , all'interfaccia suolo atmosfera. Le misure di flusso di radon sono state eseguite con il sistema di misura descritto nel sottoparagrafo 6.2.1. Le misure di flusso di CO_2 , eseguite in collaborazione con il gruppo di lavoro del Prof. Franco Barberi, prevedono sempre l'utilizzo di una camera d'accumulo poggiate sulla superficie del suolo collegata però ad uno spettrometro ad infrarosso. Nella tabella a seguire si riportano i valori ottenuti dalle misure, effettuate nel mese di aprile 2011.

Stazione	Flusso di Radon (Bq m ⁻² giorno ⁻¹)	Flusso di CO ₂ (g m ⁻² giorno ⁻¹)
VF1	106 ± 21	26,6
VF2	124 ± 26	532

Tabella 39: Misure dei flussi di CO₂ e ²²²Rn dal suolo, nei pressi delle stazioni fisse VF1 e VF2.

I valori ottenuti dalle misure dei flussi sono una conferma ulteriore del degassamento maggiore presente in VF2, rispetto al punto VF1 nell'area di studio di Vigna Fiorita.

9.2.2 Misure di concentrazioni indoor di ²²²Rn, CO₂ e H₂S

Nel mese di luglio 2011, è stata realizzata una misura in continuo delle concentrazioni indoor di ²²²Rn e CO₂ nell'abitazione presente nell'area di studio (vedi figura 94 per l'ubicazione). La misura è stata effettuata in uno stanzino seminterrato, privo di pavimentazione, ad un'altezza dal piano di calpestio di circa 50 cm. La misura ha avuto una durata complessiva di 4 giorni, ed i valori delle specie monitorate sono stati registrati ogni 2 ore. Il risultato di questa indagine viene riportato nel grafico della figura 97.

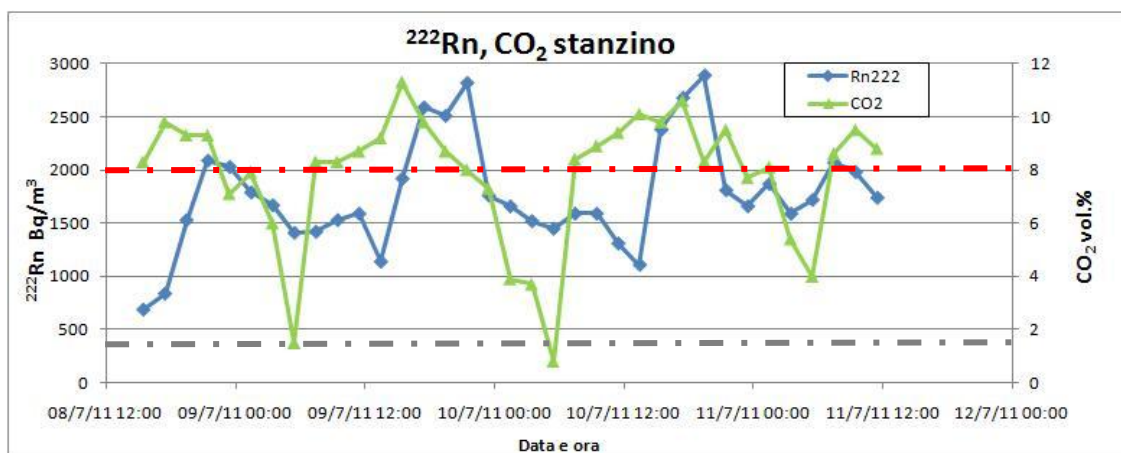


Figura 97: Andamento temporale delle concentrazioni indoor di ²²²Rn e CO₂, all'interno dello stanzino. La linea tratteggiata in rosso, indica il valore soglia potenzialmente letale di CO₂. Le linea tratteggiata in grigio indica il valore di riferimento della Raccomandazione Euratom 90/143 sulle concentrazioni indoor di ²²²Rn per edifici già esistenti.

Dal grafico risulta evidente l'alto rischio a cui sono sottoposte le persone che frequentano abitualmente lo stanzino. In particolare le concentrazioni di CO₂ superano molto spesso e per tempi prolungati (circa 14 ore) il valore soglia potenzialmente letale dell'8 vol%, rappresentato nel grafico dalla linea tratteggiata in rosso, arrivando ad un massimo di 11,3 vol%. Durante l'esecuzione delle misure non è stata rilevata la presenza di H₂S all'interno dello stanzino. Anche le concentrazioni di ²²²Rn sono estremamente elevate per un ambiente indoor, arrivando a toccare un valore massimo di circa 3000 Bq/m³. Tutti i valori di radon rilevati si mantengono ben al disopra del valore di 400 Bq/m³, indicato dalla raccomandazione Euratom 90/143 come livello di riferimento di concentrazione media annua di radon indoor, oltre il quale si raccomandano azioni di bonifica.

Viste le concentrazioni rilevate in questo ambiente, sono stati effettuati una serie di controlli dei valori di CO₂ nelle altre stanze a scopo precauzionale, che hanno dimostrato come l'elevato rischio per l'incolumità delle persone sia confinato in particolar modo allo stanzino. Considerando il quadro complessivo della pericolosità, agli abitanti, consapevoli già del problema da gas *indoor*, è stato consigliato di non entrare nello stanzino e di tenere il più possibile le finestre dell'abitazione aperte per un ricircolo continuo con l'aria atmosferica.

9.2.3 Il monitoraggio del pozzo presente nei pressi della stazione fissa VF1

A partire da novembre 2011 è iniziato il monitoraggio delle concentrazioni di radon e anidride carbonica in aria a 3 m di profondità dal p.c., all'interno del pozzo presente nelle vicinanze della stazione VF1 (figura 98). Assieme alle concentrazioni dei gas sono state misurate anche le variazioni nel tempo del livello statico, utilizzando un freatometro munito di sonda per il rilievo della temperatura dell'acqua che è risultata costantemente intorno ai 17,3 °C.

Le analisi chimico-fisiche su campioni d'acqua prelevati a fondo pozzo, effettuate nel mese di dicembre 2011, hanno dato un valore di pH pari a 5,69 e 1018 µS/cm di conducibilità elettrica. Queste analisi sono state ripetute nel mese di luglio 2013 ottenendo un valore del pH di 5,82 e conducibilità elettrica di 1637 µS/cm.

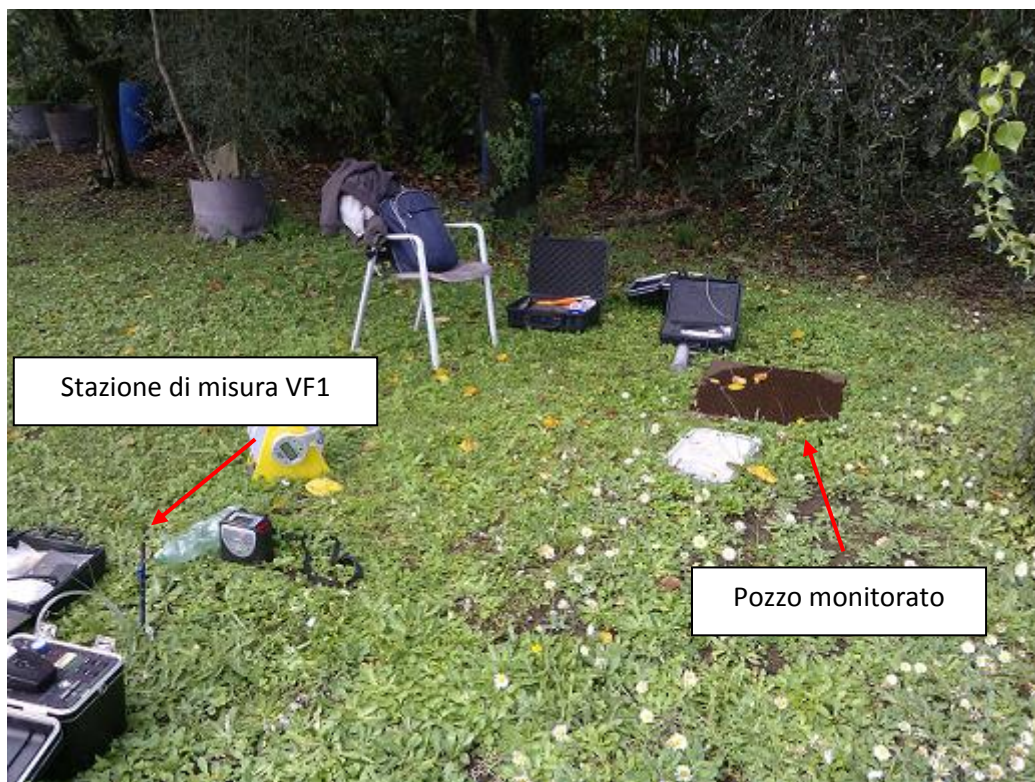


Figura 98: Ubicazione del pozzo monitorato nei pressi della stazione VF1.

La concentrazione di radon in acqua, misurata in tre momenti differenti, ha dato i valori visibili nella tabella 40.

Data	^{222}Rn (Bq/l)
Nov.11	$71,3 \pm 3,6$
Dic.11	$66,3 \pm 3,1$
Lug.13	$82,4 \pm 3,7$

Tabella 40: Misure di ^{222}Rn in acqua

Le concentrazioni del radon in acqua sono abbastanza elevate anche se al di sotto della soglia di riferimento secondo la Raccomandazione Euratom 928/2001, oltre il quale gli Stati membri devono stabilire se attuare possibili azioni correttive per la salvaguardia della popolazione. In allegato M si riportano tutti i valori di ^{222}Rn , CO_2 e livello statico relativi al periodo novembre2011 - luglio2013, che sono visibili nel grafico in figura 99.

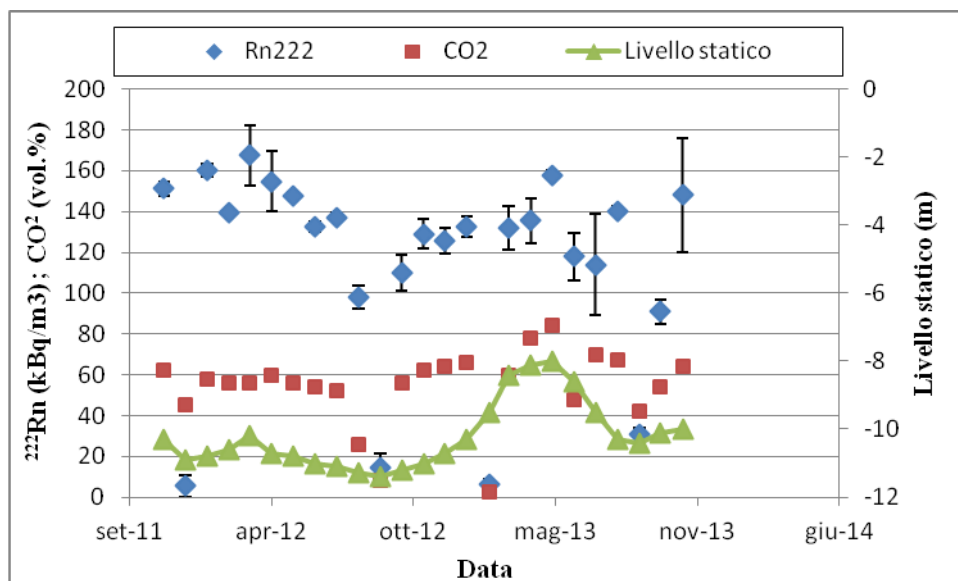


Figura 99 : Andamento delle concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 monitorate in aria nel pozzo, in relazione al livello statico.

Dal grafico risulta evidente l'influenza del livello statico del pozzo sulla variazione delle concentrazioni di radon e anidride carbonica. In particolare sembra esserci una correlazione diretta con le concentrazioni maggiori riscontrate con il livello dell'acqua più alto nel pozzo. E' verificata inoltre la funzione di *gas carrier* della CO_2 sul ^{222}Rn . In generale la presenza di pozzi in aree interessate dalla risalita di gas profondi, rappresentano vie preferenziali di risalita proprio come potrebbero essere i sistemi di faglie o le fratture nel terreno.

9.2.4 Mappature ottenute nella zona giardino dell'area di indagine

Nel mese di marzo 2012 nella zona del giardino dove sono presenti la stazione fissa VF1 ed il pozzo, sono state effettuate 30 misure del *soil radon*, CO_2 e permeabilità intrinseca, con equidistanza di 15 m, alla profondità di 80 cm dal piano campagna. Nell'appendice N sono riportate le coordinate metriche dei punti di misura della griglia e i valori delle specie monitorate, mentre nella tabella 41 si riportano i valori riassuntivi.

Parametro	Min	Max	Medio	dev.st
^{222}Rn (Bq/m ³)	46800	112000	80030	13850
$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$	0,13	0,97	0,40	0,19
k (m ²)	6,3E ⁻¹⁴	2,0E ⁻¹¹	5,88E ⁻¹²	5,8E ⁻¹²
CO ₂ (vol.%)	2,2	31	8,7	5,80

Tabella 41: Valori di ^{222}Rn , $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, k e CO₂ misurati nell'indagine di marzo 2012.

Per la realizzazione degli elaborati grafici è stato utilizzato il programma “Surfer8”, già descritto nel sottoparagrafo 9.1.3. Nelle figure a seguire si riportano le mappe delle concentrazioni di ^{222}Rn , CO₂, rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e dei valori della permeabilità intrinseca relative alla zona indagata.

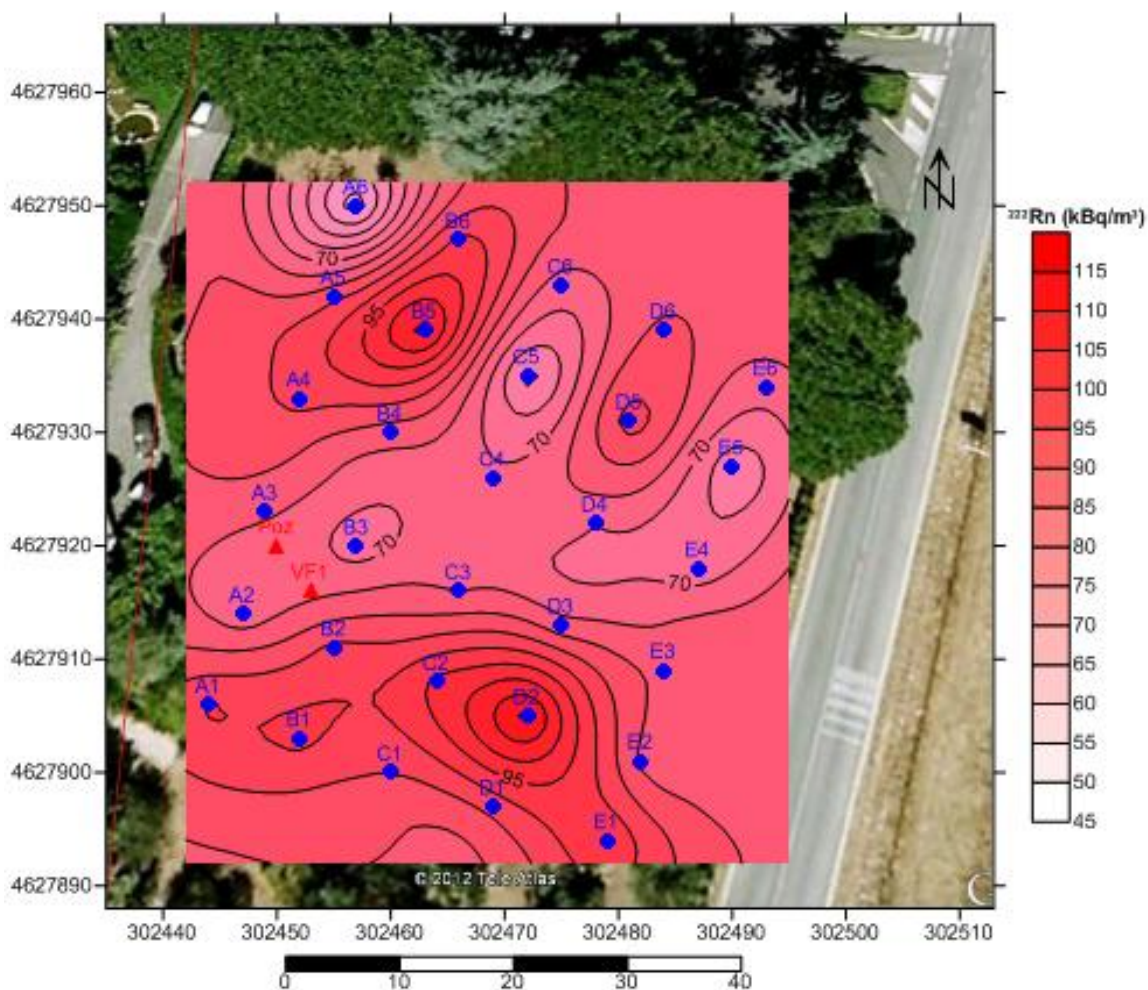


Figura 100: Mappa delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo nell'area di Vigna Fiorita.

Le concentrazioni maggiori di radon si trovano nelle parti SE e SW dell'area indagata, con valore medio per entrambe le zone pari a 93000 Bq/m^3 . E' interessante osservare come nella zona dove si trovano la stazione VF1 e il pozzo, si registri una concentrazione media di ^{222}Rn pari a 72000 Bq/m^3 , testimonianza di come le concentrazioni rilevanti misurate all'interno del pozzo, siano circoscritte nel pozzo stesso.

Come possiamo vedere dai valori di permeabilità intrinseca, presentato in figura 101, i 2 settori ad elevate concentrazioni di ^{222}Rn , corrispondono a permeabilità più elevate.

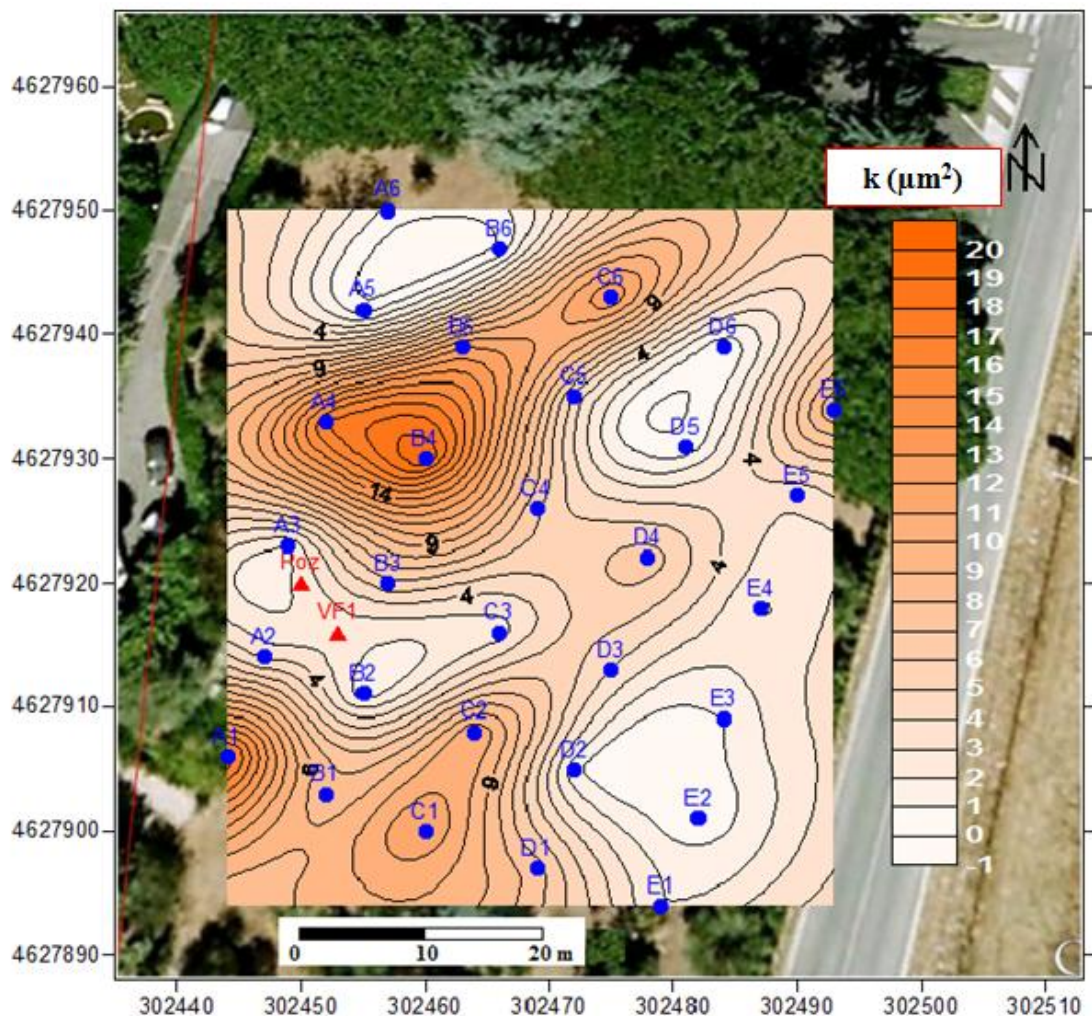


Figura 101: Mappa della permeabilità intrinseca dell'area di Vigna Fiorita.

In particolare il 50 % dei punti ricade in classe di elevata permeabilità ($k > 4,0 \text{ E}^{-12} \text{ m}^2$), il 33,3 % appartiene alla classe di permeabilità media ($4,0\text{E}^{-12} > k > 4,0\text{E}^{-13} \text{ m}^2$) e per il 16,7 % possiamo parlare di bassa permeabilità ($k < 4,0\text{E}^{-13} \text{ m}^2$).

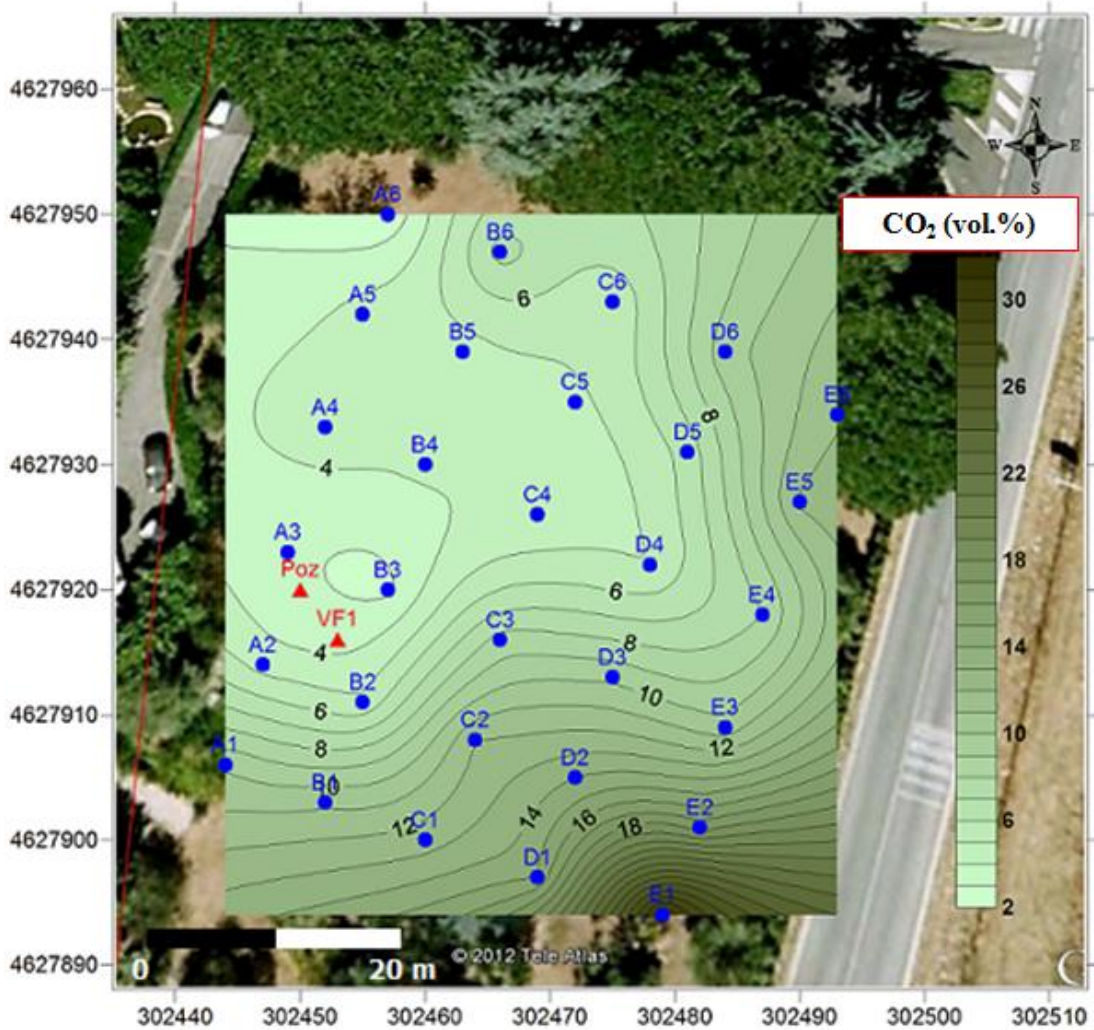


Figura 102: Mappa della concentrazione di CO₂ nel suolo dell'area di Vigna Fiorita.

La concentrazione della CO₂ nel suolo, visibile nella mappa in figura 102, ha un'elevata variabilità spaziale, passando da un minimo di 2,2 vol.% ad un massimo di 31 vol.% misurato nel punto B1 e sembrerebbe essere indipendente dalla permeabilità intrinseca. I valori più alti si trovano nella parte SE della mappa, dove lungo la via del Sassone, visibile nell'immagine satellitare, risulta ubicata la faglia sepolta riportata nella carta geologica dell'area. Anche in questa elaborazione è possibile osservare come nell'intorno del pozzo non si evidenziano anomalie elevate di CO₂ nel suolo rispetto ai valori importanti misurati al suo interno.

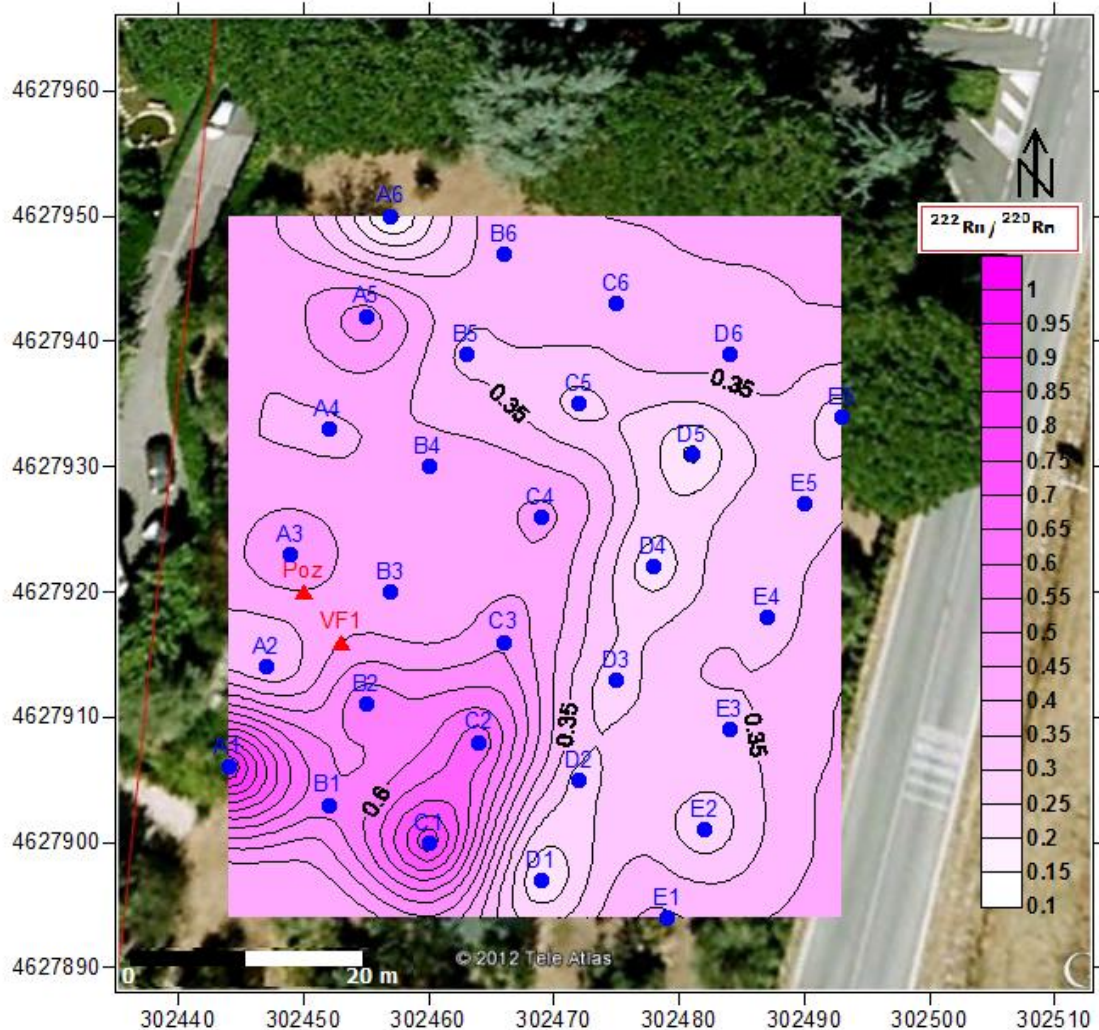


Figura 103: Mappa del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nel suolo dell'area di Vigna Fiorita.

Dall'elaborazione cartografica dei valori del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, risulta come la zona sud – ovest della mappa sia caratterizzata dai valori più elevati. In particolare nei punti A1, C1, C2 e B2 il rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ è maggiore di 0,5 che può essere considerato come un valore soglia dell'area, visto che negli altri 26 punti di misura si riscontrano valori inferiori. Quindi possiamo ipotizzare come in questo settore il ^{222}Rn abbia un contributo profondo più evidente rispetto a tutta l'area monitorata.

9.2.5 Variabilità del soil radon lungo la faglia presunta in corrispondenza della via del Sassone

Considerata la presenza della faglia sepolta o presunta riportata nella carta geologica dell'area, con direzione antiappenninica NE-SW, coincidente in gran parte con la via del

Sassone, si è pensato di indagare la sua influenza nel rilascio delle specie gassose monitorate. Le indagini sono state effettuate tramite l'esecuzione di misure lungo 2 profili ortogonali alla faglia, con direzione circa E-W, come rappresentato in figura 104.

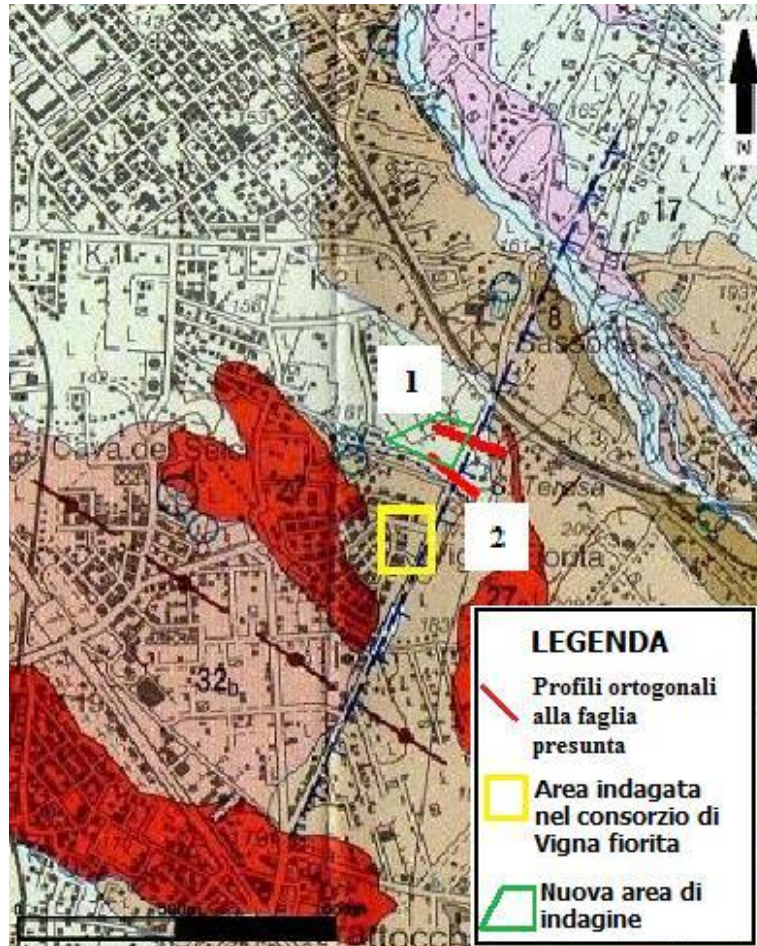


Figura 104: Stralcio della Carta Geologica foglio 387 Albano Laziale (scala 1:50000) dove sono riportati i profili 1 e 2, l'area del circolo sportivo degli Arcieri del Falco interessata da nuove indagini e l'area target nel Consorzio di Vigna Fiorita.

Oltre all'esecuzione dei 2 profili, il lavoro è proseguito tramite l'esecuzione di misure lungo alcuni transetti nel circolo sportivo degli Arcieri del Falco, solo nella parte ovest della faglia. La litologia in questo settore del territorio comunale di Ciampino, è rappresentata dalla Formazione del Tavolato, i cui depositi si possono relazionare alla rimobilizzazione di materiale vulcano clastico, con meccanismi di deposizione da *lahar*. Il profilo 1 è stato eseguito nel mese di settembre 2012, con 8 misure di *soil gas* distanziate di circa 20 m e lunghezza totale di 180 m. I valori riassuntivi delle misure sono riportati in tabella 42.

^{222}Rn (Bq/m ³) Min	^{222}Rn (Bq/m ³) Max	^{222}Rn (Bq/m ³) Medio	^{222}Rn (Bq/m ³) Dev.st
19970	74600	51960	21300
CO ₂ (vol.%) Min	CO ₂ (vol.%) Max	CO ₂ (vol.%) Medio	CO ₂ (vol.%) Dev.st
1,4	80	25,6	34,13
^{220}Rn (Bq/m ³) Min	^{220}Rn (Bq/m ³) Max	^{220}Rn (Bq/m ³) Medio	^{220}Rn (Bq/m ³) Dev.st
63900	181670	115770	44700

Tabella 42: Concentrazioni misurate lungo il profilo 1 ortogonale alla faglia di Vigna Fiorita.

I risultati ottenuti sono visibili nei grafici presenti in figura 105.

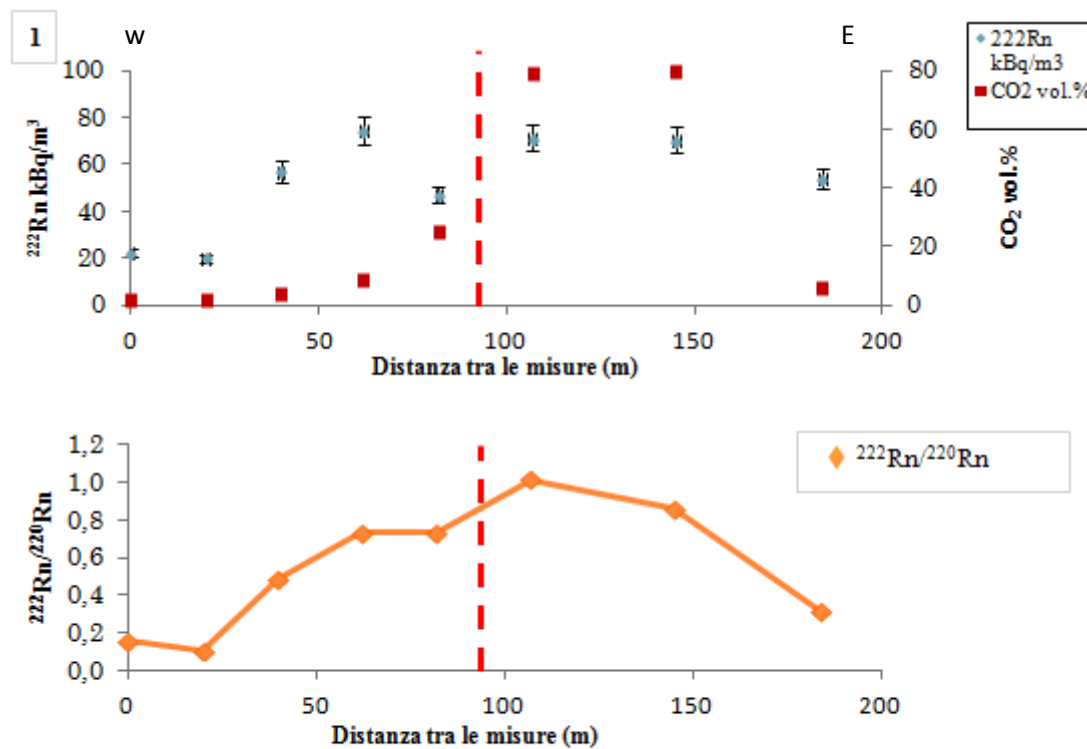


Figura 105: Andamento delle concentrazioni di ^{222}Rn , CO₂ e rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nel suolo lungo il profilo 1.

Le concentrazioni di ^{222}Rn e CO₂ aumentano nei pressi della faglia, in particolare nei 2 punti di misura subito ad E la CO₂ raggiunge valori intorno all' 80 vol.%. Queste misure sono state eseguite in prossimità di una stradina asfaltata laterale, dove è stata generata una via preferenziale di degassamento per la mancanza della copertura impermeabile. Il rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ lungo il profilo presenta un chiaro aumento nei pressi della faglia,

passando da un valore di circa 0,2 agli estremi del profilo, a valori compresi tra 0,8 e 1,0 per le misure prossime alla faglia.

Il profilo 2 è stato eseguito circa 100 m a sud del profilo 1, nel mese di aprile 2013. Ha una lunghezza di circa 100 m, con un'equidistanza media tra le 8 misure di circa 15 m. I risultati delle misure sono riportate in tabella 43.

^{222}Rn (Bq/m³)	^{222}Rn (Bq/m³)	^{222}Rn (Bq/m³)	^{222}Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
49700	117600	76630	22100
CO₂ (vol%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)	CO₂ (vol.%)
Min	Max	Medio	Dev.st
16	78	49,8	27,33
^{220}Rn (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)
Min	Max	Medio	Dev.st
50200	213200	100000	64300

Tabella 43: Concentrazioni misurate lungo il profilo 2 ortogonale la faglia di Vigna Fiorita.

I risultati ottenuti sono visibili nei grafici di figura 106.

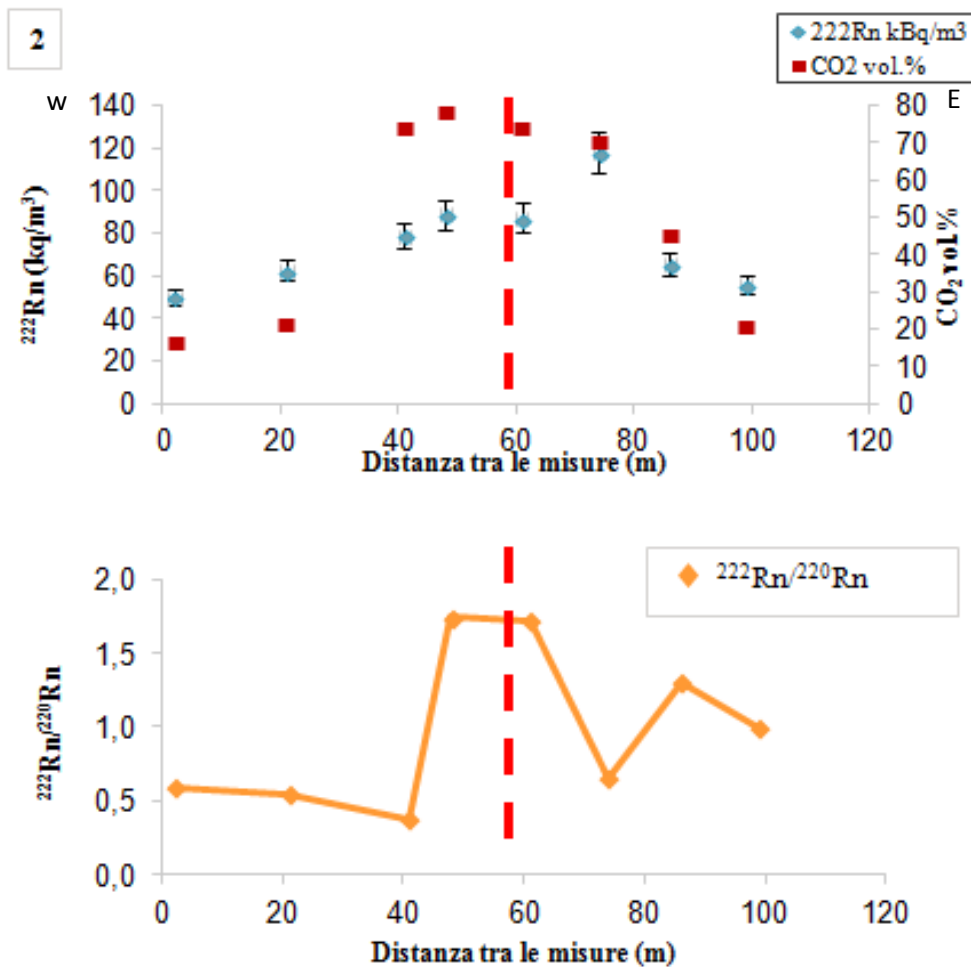


Figura 106: Andamento delle concentrazioni di ^{222}Rn , CO_2 e rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nel suolo lungo il profilo 2.

Anche per il secondo profilo le concentrazioni più elevate di ^{222}Rn e CO_2 si trovano in prossimità della faglia, con valori di CO_2 che si confermano molto alti; intorno all'80 vol.%. L'andamento del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ può essere suddiviso in 3 settori. Il primo riguarda le prime tre misure da W verso la faglia, con un valore medio basso pari a circa 0,5. Il secondo settore è rappresentato dai due punti di misura in prossimità della faglia e dai lati opposti di essa, dove è stato trovato lo stesso valore di 1,7. Il terzo settore corrispondente alle 3 misure più ad E rispetto alla faglia. Per questi punti il valore medio del rapporto è pari a 1,0. Da questi dati risulta evidente che la faglia agisce come via preferenziale di risalita per le specie gassose endogene. Il meccanismo sembrerebbe qui più evidente rispetto alla faglia presente nel sito della Ficoncella, vista la presenza nel suolo di grandi quantità di CO_2 che funge da trasportatore nei confronti del ^{222}Rn . Viene inoltre confermato che nei punti con concentrazione di CO_2 notevole, si trovano

bassi valori di ^{220}Rn , indice quindi di una sorgente profonda del radon (come della CO_2).

L'area in questione è stata ulteriormente investigata attraverso la realizzazione di misure nel suolo nella parte W rispetto alla faglia, come mostrato in figura 107.

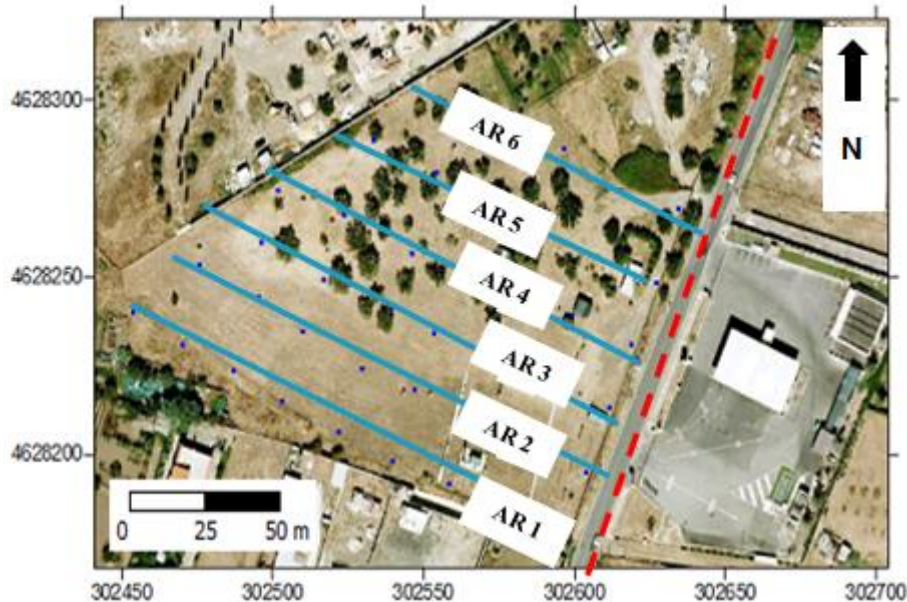


Figura 107: Ubicazione dei transetti di misura nell'area del circolo sportivo Arcieri del Falco.

I risultati sono riportati in figura 108, dove vengono mostrati per ogni transetto i valori del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ in funzione del contenuto di CO_2 . I 6 transetti sono denominati AR e in totale sono state eseguite 42 misure. Nella tabella 44 si riportano i valori riassuntivi, in allegato O è presente la tabella con tutti i valori registrati comprensivi di coordinate metriche.

Parametro	Min	Max	Medio	dev.st
^{222}Rn (Bq/m^3)	13700	159500	41660	27760
$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$	0,12	1,63	0,41	0,314
k (m^2)	$1,0\text{E}^{-13}$	$3,9\text{E}^{-11}$	$1,19\text{E}^{-11}$	$8,79\text{E}^{-12}$
CO_2 (vol.%)*	1,0	76,0	13,8	18,1

Tabella 44: Valori di ^{222}Rn , $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, k e CO_2 misurati nell'indagine di luglio 2013.

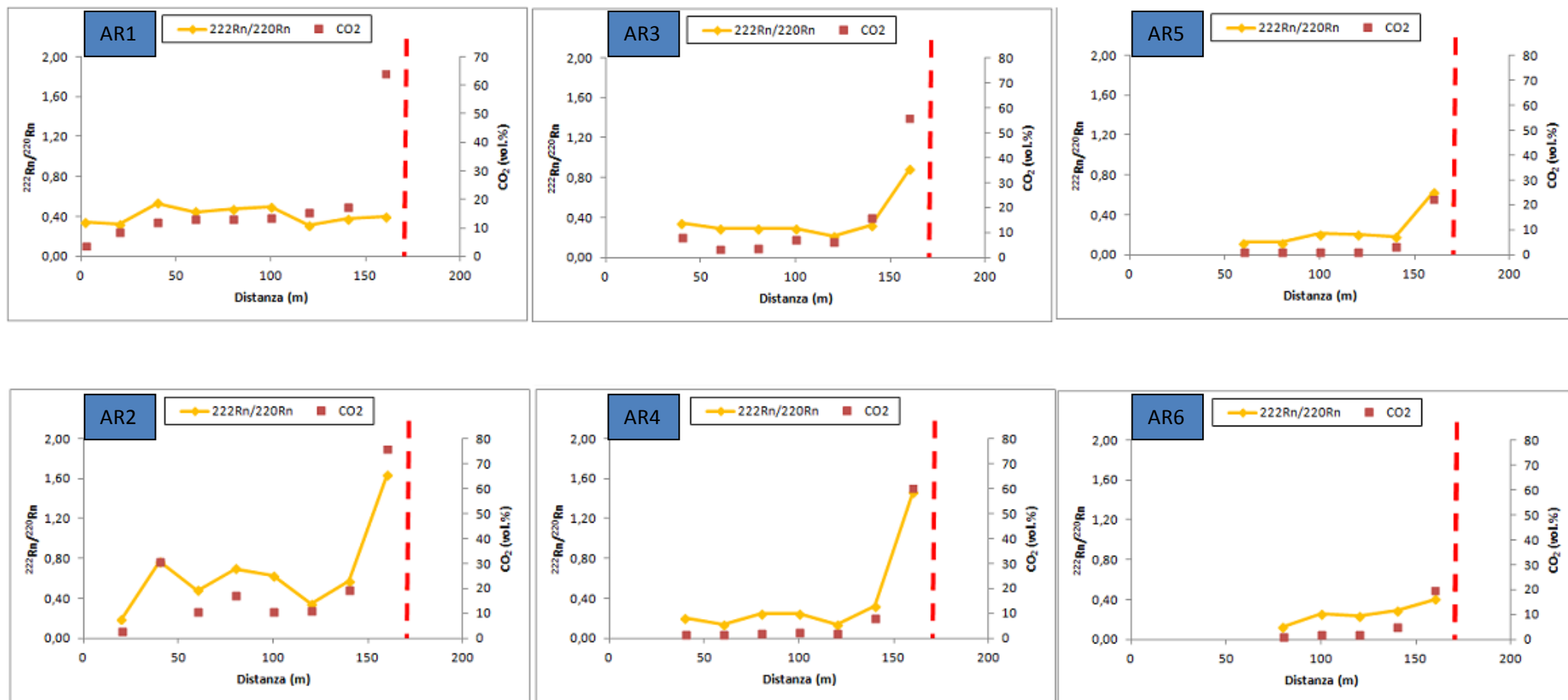


Figura 108: Andamento del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e concentrazioni di CO_2 nel suolo, lungo i transetti misurati nel circolo sportivo "Arcieri del Falco" (per l'ubicazione vedere figura 108).

Dai grafici di figura 108 risulta ben evidente che le massime concentrazioni di CO_2 nel suolo ed i valori più elevati del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, si trovano nei punti più vicini alla faglia. Questa faglia rappresenta una via di fuga di gas endogeni. Il rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ ha un peso molto rilevante sulle considerazioni sulle anomalie del *soil radon* in aree interessate da sistemi di faglie. Nei grafici della figura 109 si riportano a confronto le coppie di valori $^{222}\text{Rn} - \text{CO}_2$, $^{220}\text{Rn} - \text{CO}_2$ e $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn} - \text{CO}_2$ ottenuti nelle indagini nella zona degli Arcieri del Falco e nei 2 profili che attraversano ortogonalmente la faglia.

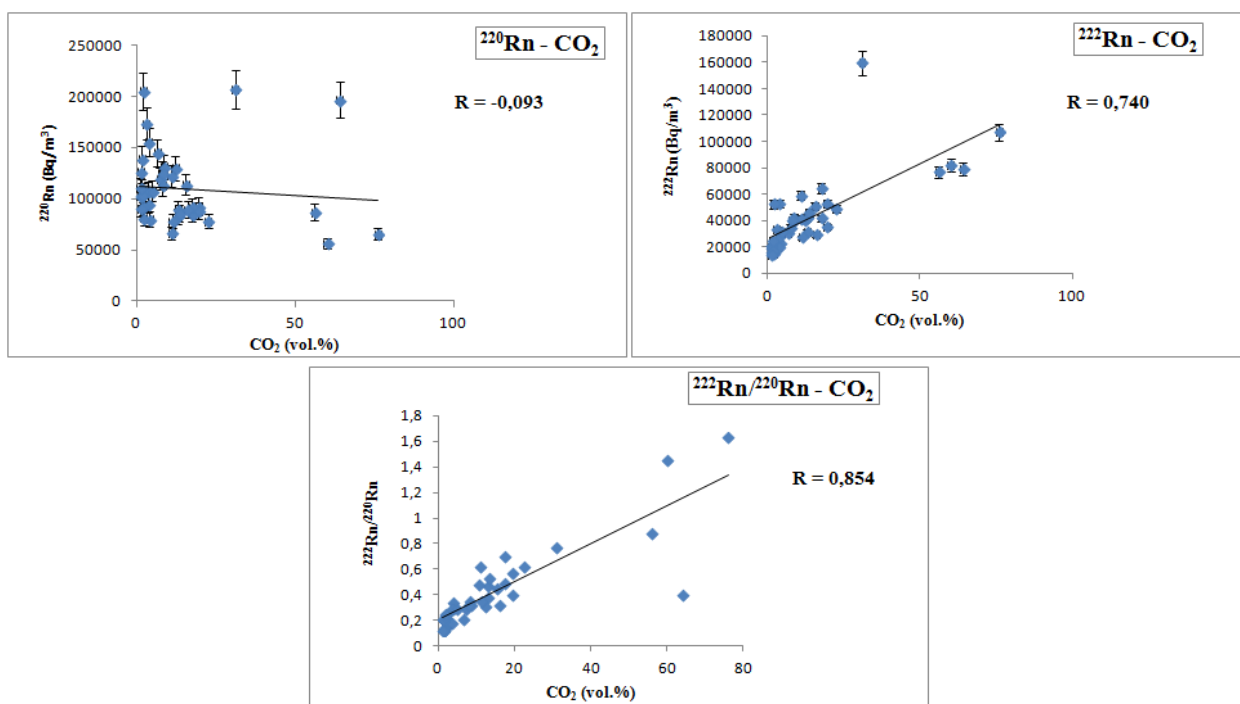


Figura 109: Correlazioni tra le specie indagate nell'area N del consorzio di Vigna Fiorita.

Dai grafici possiamo vedere come esiste una correlazione diretta tra le concentrazioni di ^{222}Rn e quelle di CO_2 nel suolo, con un coefficiente di Bravais – Pearson di 0,740. Tra i valori di ^{220}Rn e CO_2 la correlazione, molto bassa, è di tipo inverso, con $R = -0,093$. La migliore correlazione lineare diretta si ha tra i valori del rapporto isotopico $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e la concentrazione di CO_2 con $R = 0,854$. Questi dati danno ulteriore conferma che ad elevate concentrazioni di CO_2 nel suolo si ha una perdita sostanziale del segnale thoron, sintomo di un percorso maggiore del *soil gas* in considerazione del brevissimo tempo di dimezzamento del ^{220}Rn . Si ribadisce che l'analisi del contenuto di ^{220}Rn nei suoli è

essenziale nelle indagini geochimiche sulle emissioni gassose in presenza di faglie o comunque per indagare la risalita di fluidi endogeni profondi. Questo perché i valori dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, assieme al contenuto di ^{226}Ra e ^{232}Th in una data area, rappresentano un segnale più forte rispetto alla sola concentrazione di ^{222}Rn .

Durante l'esecuzione delle misure in alcune zone è stata riscontrata la presenza di H_2S nel suolo, con valori molto elevati compresi tra 220 – 560 ppm in particolar modo nella zona SE dell'area degli Arcieri del Falco. In questi casi per ovviare all'interferenza dell' H_2S con il radonometro, che, come descritto nel sottoparagrafo 9.1.5, può creare problemi di sottostima del ^{222}Rn , ci si è spostati di qualche metro in punti dove non è stata rilevata la presenza di H_2S , in modo da avere valori di concentrazione di ^{222}Rn nel suolo più vicini al reale.

9.3 Il sito di indagine di Fiumicino (RM)

Il giorno 24 agosto 2013, in una rotonda presente nella località “Coccia di Morto”, presso Fiumicino (a pochi metri di distanza dalla parte sud dell'aeroporto Leonardo da Vinci, figura 110) si è aperta nel terreno una piccola voragine, interessata dalla venuta a giorno di gas, acqua e fango con temperatura di circa 20 °C. A causare questa eruzione (da qui in poi sarà denominata polla), sono state alcune perforazioni effettuate qualche giorno prima, per il posizionamento di un cavo elettrico di messa a terra, alla profondità compresa tra i 35 e i 40 m dal piano campagna. Il gas emesso dalla polla era rappresentato soprattutto da anidride carbonica e in minor parte da metano. Il fatto che l'eruzione non si sia verificata già durante la perforazione per i lavori di messa a terra, testimonia come la copertura impermeabile che imprigionava i gas nel sottosuolo non sia stata perforata del tutto. La spinta dei gas profondi ha generato una via di fuga nella copertura già in gran parte attraversata, arrivando in superficie dopo alcuni giorni dalla fine dei lavori.



Figura 110: Ubicazione della polla, rappresentata dalla stella rossa, nella rotonda presente in località Coccia di Morto.

Con il passare del tempo il contributo di metano si è attenuato; probabilmente la sua presenza si deve ad una piccola sacca nel sottosuolo in un livello di sedimenti del delta del Tevere ricchi di materia organica. Il componente principale è rappresentato dalla CO_2 e tracce di H_2S . Precedenti lavori effettuati nella zona (Barberi et al., 2007) suggeriscono una composizione chimica dei gas simile a quelle di alcune emissioni dei Monti Sabatini, leggermente arricchite in metano. Il cratere della polla nell'arco di tempo ha subito varie trasformazioni morfologiche assumendo varie forme (circolare,

ellittico, forma ad 8 e di nuovo circolare), con bordo costituito dall'accumulo del materiale fangoso emesso (figura 111).



Figura 111: Forme del cratere della polla nel tempo (fotografie di G.Giordano).

Il giorno 9 settembre si è aperta una seconda polla a pochi m dalla prima, caratterizzata da dimensioni più piccole e dal fatto che nel tempo si è richiusa e riaperta più volte. Anche questa seconda polla si è formata in corrispondenza di un'altra perforazione di pari profondità.

Nell'area della rotonda sono state eseguite misure di *soil radon*, della concentrazione di anidride carbonica e della permeabilità intrinseca, in alcuni punti di monitoraggio utilizzati dal gruppo di ricerca misto Università degli Studi Roma Tre – INGV per effettuare misure di concentrazione nel suolo e del flusso dal suolo di anidride carbonica. Altra zona studiata è un terreno presente a NW della rotonda, denominato terreno circo. Le misure effettuate in queste aree sono state eseguite a 50 cm dal piano campagna per scopi precauzionali, in quanto nella rotonda risultano presenti una quantità rilevante di sottoservizi anche molto importanti, situati a profondità modeste

dal piano campagna. I risultati che verranno presentati nei prossimi paragrafi rappresentano solamente le fasi iniziali di uno studio tuttora in corso di svolgimento.

9.3.1 Mappature ottenute nella rotonda interessata dalla polla

Nella rotonda interessata dalla presenza delle 2 polle, sono state eseguite nel mese di settembre 2013 un totale di 35 misure del *soil radon* e delle concentrazioni di CO₂ nel suolo. I punti di misura formano una griglia con equidistanza di 5 m. Nella zona a ridosso delle polle non è stato possibile eseguire misure a causa della presenza di uno strato di alcuni cm di fango con conseguente saturazione dello strato superficiale di suolo, costituita da terreni incoerenti di riporto, per lo più sabbiosi. Nella tabella 45 si riportano i valori riassuntivi delle misure, l'allegato P contiene i valori di tutte le misure.

Parametro	Min	Max	Medio	dev.st
²²² Rn (Bq/m ³)	6180	29150	11760	4070
²²² Rn/ ²²⁰ Rn	0,05	1,04	0,27	0,24
CO ₂ (vol.%)*	1,6	88	25,9	25,65

Tabella 45: Valori di ²²²Rn, ²²²Rn/²²⁰Rn e CO₂ misurati nella campagna di settembre 2013.

La permeabilità intrinseca è stata misurata in 20 punti, ed in tutti i casi il valore rientra nella classe di alta permeabilità (> 4,0 E⁻¹² m²).

Per la realizzazione degli elaborati cartografici è stato utilizzato il programma GIS, le mappe ottenute sono riportate nelle figure 112 e 113, rispettivamente per le concentrazioni di radon e per i rapporti radon/thoron. Nelle elaborazioni, accanto ai punti di misura, viene riportato il valore della concentrazione di CO₂ corrispondente, con colori dal giallo per valori più bassi, al rosso per quelli più alti.

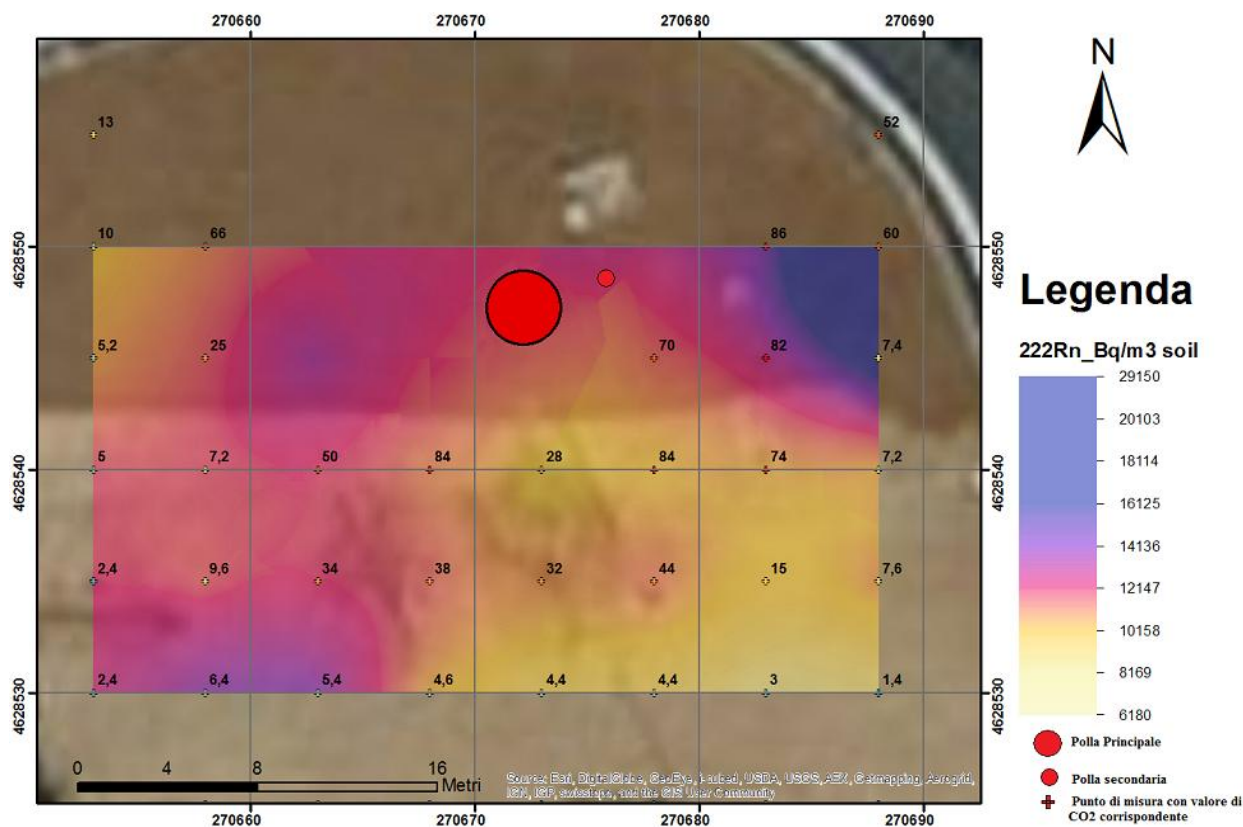


Figura 112: Mappa delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo nella rotonda, in funzione delle concentrazioni di CO_2 .

Le concentrazioni di ^{222}Rn più elevate si trovano nel settore NE della mappa in prossimità delle due polle, dove la concentrazione di CO_2 ha un valore medio pari a circa 60vol.%. Un'altro settore caratterizzato da valori medio - alti di ^{222}Rn è la parte occidentale dell'area, mentre le concentrazioni più basse sono state misurate nella parte SE.

Nella mappa del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ (figura 113) si evince una migliore correlazione diretta con le concentrazioni di CO_2 nel suolo, rispetto al ^{222}Rn .

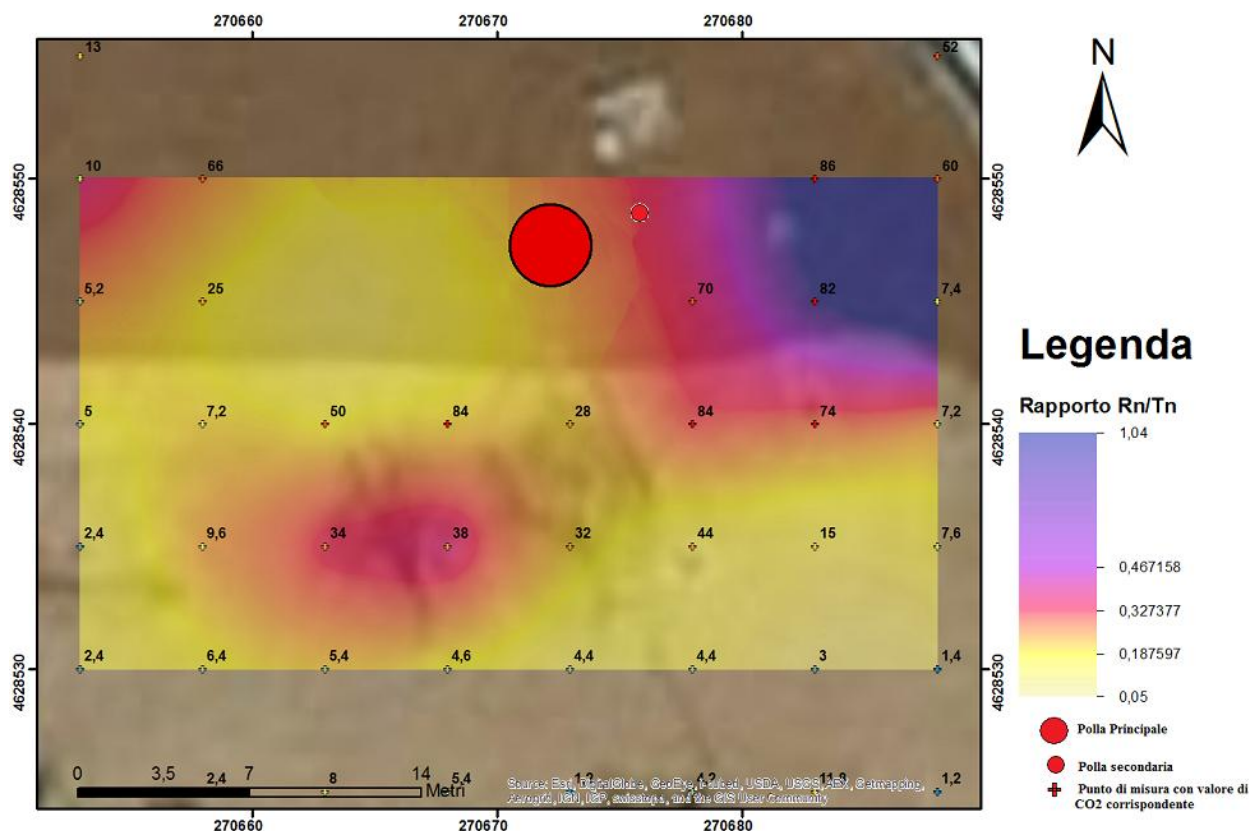


Figura 113: Mappa del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nel suolo nella rotonda e valore delle concentrazioni di CO_2 .

L'area caratterizzata dai valori più elevati del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ (valore medio 0,83) risulta essere anche in questo caso ad E delle due polle. E ipotizzabile quindi che vi sia in questa zona un contributo maggiore del degassamento profondo rispetto al resto dell'area monitorata.

Può essere interessante ripetere le misure negli stessi punti una volta che saranno state chiuse le due polle, probabilmente con iniezioni di cemento in profondità. In questo modo sarà possibile stabilire se i valori misurati nella zona NE sono dovuti a migrazione del gas dalle polle negli strati superficiali oppure riflettono un degassamento naturale dell'area.

9.3.2 Mappatura del gas nel suolo nel terreno a nord della rotonda (terreno circo)

Nel terreno a N della rotonda denominato “terreno circo”, nel mese di ottobre 2013 sono state eseguite 31 misure di radon, thoron, anidride carbonica e permeabilità intrinseca ad una profondità di 50 cm dal p.c.. Nella tabella 46 si riportano i valori riassuntivi delle misure (vedere allegato Q per la tabella completa dei valori).

Parametro	Min	Max	Medio	dev.st
^{222}Rn (Bq/m ³)	1200	5780	3690	1080
$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$	0,1	1,45	0,24	0,27
CO ₂ (vol.%)*	0,2	88	7,22	21,67

Tabella 46: Valori di ^{222}Rn , $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e CO₂ misurati nella campagna di lavoro di ottobre 2013 nel terreno circo.

Rispetto ai valori di radon misurati nella rotonda, in quest’area si registrano concentrazioni molto più basse. Lo stesso si può dire per la concentrazione nel suolo di CO₂, tranne che per due punti con valori di 88 vol.%. In questi due punti è stato trovato anche idrogeno solforato (H₂S) nell’ordine di pochi ppm (2 – 12 ppm). In uno dei 2 punti vi era una piccola cavità circolare nel suolo, dal diametro di circa 20 cm. Vista la presenza in questo campo di cassette porta carote abbandonate, si è pensato che anche questi 2 punti potessero coincidere con dei fori effettuati forse per indagini geotecniche e la cui esecuzione avrebbe favorito la risalita di gas profondi. L’ipotesi che nella zona siano state eseguite delle indagini geotecniche, è stata confermata da un’abitante. Nella figura 114 si riporta la mappa delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo, e sono indicati i valori di CO₂ misurati.

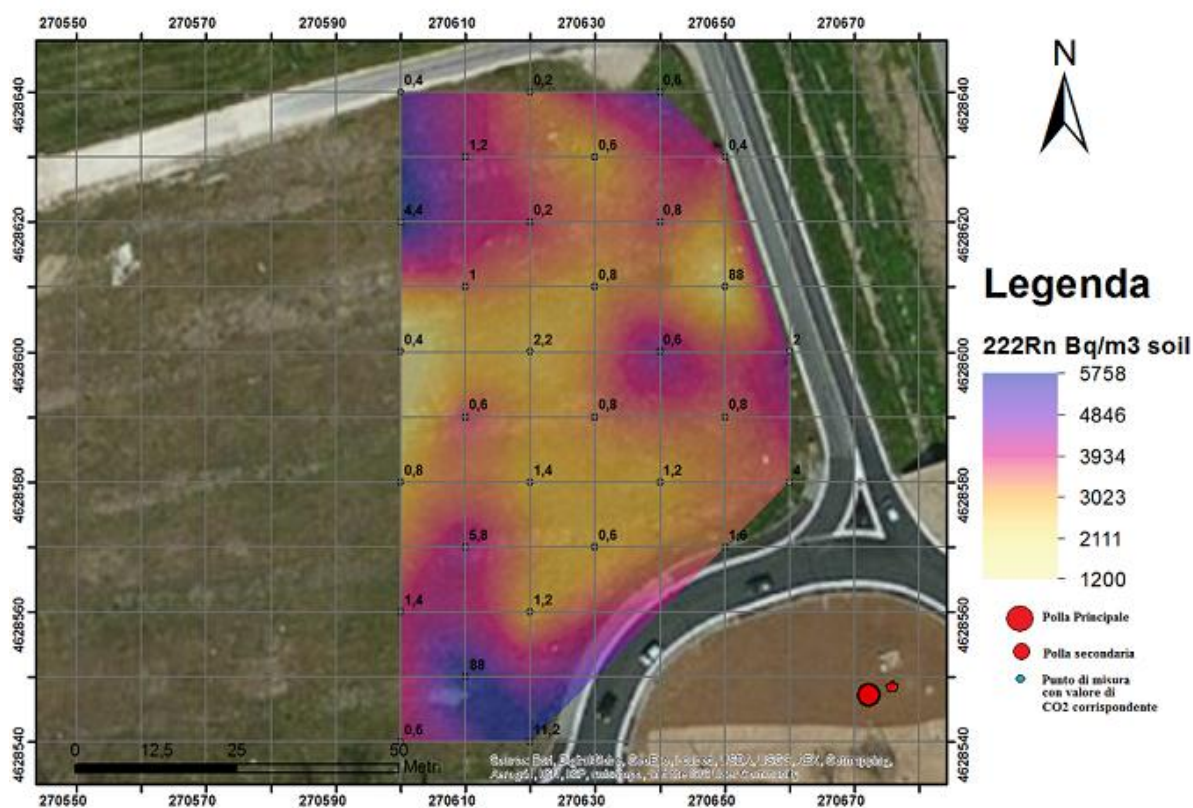


Figura 114: Mappa delle concentrazioni di ^{222}Rn nel suolo del terreno circo, e valori delle concentrazioni di CO₂.

Dalla mappa notiamo come uno dei valori più elevati di radon (5700 Bq/m³) è stato trovato in uno dei 2 punti prima descritti, con concentrazione di CO₂ di 88 vol.%. Il secondo punto con CO₂ pari a 88vol.%, situato nella zona NE dell'area, è invece interessato da un valore di radon molto basso, di 1910 Bq/m³. E' in questo punto che è stata osservata la presenza del foro circolare nel terreno. Anche se la misura del radon è stata effettuata a circa 1 m di distanza, probabilmente la presenza del foro e l'elevata permeabilità del sito (tutti i valori appartengono alla classe di alta permeabilità intrinseca) possono favorire l'ingresso nel suolo di aria atmosferica, creando così una diluizione importante per il radon. La bassa concentrazione di H₂S misurata in questo punto (12 ppm) probabilmente non è in grado di generare problemi di interferenza al radonometro con conseguente sottostima delle reali concentrazioni del radon.

In figura 115 si riporta la mappa dei valori del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, sempre con indicazione della concentrazione di CO₂.



Figura 116: Sistema di misura per la misura del flusso viscoso di CO₂ dalla polla, utilizzato anche per le misure di radon in aria.

Il tubo in vinile per l'estrazione della miscela di gas da inviare al rilevatore del radonometro è stato inserito nel tubo rosso presente nell'immagine sovrastante. In tabella 47 si riportano i risultati delle due misure.

Data	Radon (Bq/m³)	Thoron (Bq/m³)	²²²Rn/²²⁰Rn
05 settembre	4250 ± 280	1250 ± 190	3,42
24 settembre	4130 ± 340	910 ± 230	4,54

Tabella 47: Misure di radon nella miscela di gas emessa dalla polla con relativi rapporti ²²²Rn/²²⁰Rn.

In entrambe i casi i valori di CO₂ erano intorno al 98 vol.%, mentre il flusso viscoso è stato stimato in 18 tonn/giorno il 5 settembre e in 19 tonn/giorno il 24 settembre; quest'ultimo valore si riferisce alla somma dei flussi delle due polle (la seconda polla si è originata il 9 settembre). I valori di radon sono molto simili per le due misure, mentre il thoron subisce una diminuzione di circa il 27% nella seconda misura. Questa variazione potrebbe indicare una provenienza più profonda del gas, dopo l'apertura della seconda polla.

Capitolo 10

Determinazione del meccanismo di trasporto del radon nel suolo e coefficiente di arricchimento.

10.1 Valutazione del contenuto degli elementi precursori

Il contenuto degli elementi precursori è fondamentale per valutare la concentrazione di radon nel suolo e per differenziare il meccanismo del trasporto da diffusivo ad advettivo nelle zone studiate. I radionuclidi naturali possono avere origine cosmogenica, ovvero essere prodotti in continuazione a seguito dell'interazione tra raggi cosmici e nuclei stabili presenti in atmosfera, ed origine primordiale, ovvero corrispondere a radionuclidi presenti sin dalla formazione della Terra ed aventi vite medie sufficientemente lunghe da essere ancora presenti sul nostro pianeta. I principali isotopi radioattivi presenti nella crosta terrestre sono ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th : la loro abbondanza media è pari a 2,3 %, 2,7 ppm e 10,5 ppm rispettivamente. Nel nostro studio sono stati considerati l' ^{238}U , capostipite della famiglia di decadimento del ^{222}Rn ; il ^{226}Ra progenitore diretto del ^{222}Rn ; il ^{232}Th capostipite della famiglia di decadimento del ^{220}Rn . Viene considerato anche il ^{40}K , contenuto nel potassio naturale, che è di per sé capostipite ed il cui decadimento genera un singolo fotopicco di energia. I campioni di suolo sono stati prelevati ad una profondità media di circa 30 cm dal piano campagna; sono stati quindi essiccati e macinati al fine di ottenere una bassa granulometria omogenea e inseriti all'interno del beaker di Marinelli per almeno 20 giorni in modo da raggiungere uno stato di equilibrio (equilibrio secolare) con il ^{226}Ra , prima di essere posizionati e conteggiati nello spettrometro γ con rivelatore al germanio iperpuro (HPGe). Nel nostro caso è stato effettuato un conteggio di 4 ore. La risposta del conteggio è restituita dallo spettro di emissione γ , dove sono visibili i picchi energetici dei vari elementi, in un range compreso tra 50 e 3000 keV. Le concentrazioni di attività degli elementi di nostro interesse, sono determinate dai picchi dei seguenti elementi.

- ✓ per l' ^{238}U si è fatto riferimento al picco del nuclide ^{234}Th (63 keV);
- ✓ per il ^{232}Th si fa riferimento al picco del nuclide ^{220}Ac (riga a 911 keV);
- ✓ il ^{226}Ra è stato rilevato tramite il ^{214}Bi (611 keV);

✓ il ^{40}K è stato determinato dal suo unico picco a 1460 keV.

I risultati delle misure di spettrometria γ sono riportati in tabella 48.

Campione	Sito	^{238}U (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
TFF2	T. Ficoncella	41,1 ± 2,7	224,1 ± 1,6	21 ± 1,1	198,5 ± 7,1
TFF1	T. Ficoncella	46,45 ± 2,7	91,8 ± 1,6	20,8 ± 1,1	229 ± 7,1
C3	T. Ficoncella	11,5 ± 1,3	131 ± 2,2	26,3 ± 1,7	239,4 ± 9,3
C4	T. Ficoncella	10,3 ± 1,2	160,8 ± 2,4	27,4 ± 1,8	209,8 ± 8,7
C5	T. Ficoncella	10,2 ± 0,9	118,8 ± 1,8	19,8 ± 0,8	253,3 ± 9,1
C6 .	T. Ficoncella	8,3 ± 1	64,6 ± 1,4	18,2 0,8	163,3 ± 8,7
C7	T. Ficoncella	8,5 ± 1,4	189,1 ± 2,1	24,8 ± 1,8	210,1 ± 8,7
C8 .	T. Ficoncella	16,3 ± 1,6	209,9 ± 2,3	35,2 ± 1,9	269,4 ± 9,2
Travertino (roccia)	T. Ficoncella	3,9 ± 0,6	122,2 ± 1,8	1,6 ± 2,6	16,7 ± 3,1
RPS3	Caffarella	63,4 ± 2,7	89,9 ± 1,2	191,1 ± 2,7	231,1 ± 8,5
C1	Caffarella	49,4 ± 2,4	82,2 ± 1,1	196,8 ± 2,6	257,9 ± 8,2
STM8	Tor Marancia	63,1 ± 2	88,3 ± 1	178,6 ± 2,3	380,9 ± 9,1
STM1	Tor Marancia	71,3 ± 3,1	85,2 ± 1,3	186,3 ± 2,9	390,4 ± 11,7
STM21	Tor Marancia	115,5 ± 3,6	64,4 ± 1,2	190,6 ± 3,2	550,4 ± 14,9
STM25	Tor Marancia	79,4 ± 2,8	88 ± 1,4	202,4 ± 3,4	357,2 ± 12,9
Paleosuolo (roccia)	Tor Marancia	65,7 ± 2,5	50,3 ± 1,1	190 ± 3,4	577,5 ± 15,6
Pozz. Rosse(roccia)	Tor Marancia	131,5 ± 3,3	111,1 ± 1,5	212,8 ± 3,8	1484 ± 8
C. Giallo (roccia)	Tor Marancia	71,2 ± 3	66,6 ± 1,3	205,1 ± 3,5	916,3 ± 12,6
Villa Senni (roccia)	Tor Marancia	226,7 ± 3,7	65,5 ± 1,2	203,8 ± 3,5	599,8 ± 13,4
VF2	Vigna Fiorita	44,8 ± 2,8	43 ± 0,8	78,8 ± 1,6	470,8 ± 9,9
VF1	Vigna fiorita	55,2 ± 2,5	57,5 ± 0,9	108,1 ± 2	556,6 ± 11,7
Terreno circo	Fiumicino	14,2 ± 1,42	31,43 ± 0,6	2,69 ± 0,61	2,25 ± 0,06 *
Terreno rotonda	Fiumicino	15,6 ± 1,42	28,1 ± 0,6	26,2 ± 0,61	2,91 ± 0,05 *
Tavolato	Ciampino	48,4 ± 2,84	138,5 ± 0,9	101,3 ± 1,24	4,34 ± 0,06 *
Flysch	Civitavecchia	19,1 ± 1,42	26,1 ± 0,5	23,2 ± 0,65	3,17 ± 0,05 *

Tabella 48: Risultati delle misure di spettrometria γ in campioni di suoli e rocce, delle aree investigate. * Valori espressi in %.

I dati della tabella 48 mostrano come generalmente i suoli sono arricchiti in uranio e radio rispetto alle litologie che li hanno generati. In questo, giocano un ruolo fondamentale la capacità di adsorbimento dei radionuclidi sulla superficie dei diversi minerali e i meccanismi di accumulo di uranio da parte della materia organica (Lovley et al., 1991). I suoli della Ficoncella mostrano un forte disequilibrio tra uranio e radio, con valore medio degli 8 campioni analizzati pari rispettivamente a 19,08 Bq/kg per l'uranio e 148,76 Bq/kg per il radio e rapporto $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ di 7,8. A questo arricchimento di radio nel suolo, corrisponde viceversa un contenuto molto basso di ^{232}Th , il cui valore medio è 24,19 Bq/kg. Il travertino stesso affiorante nell'area mostra un forte disequilibrio tra uranio e radio con rapporto $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ di 31,3.

Le misure effettuate per i suoli delle Caffarella e di Tor Marancia, riferibili al membro delle Pozzolanelle dell'unità eruttiva del Villa Senni dei Colli Albani, hanno un contenuto medio di radio, come ci si aspettava, molto simile; 86,5 Bq/kg per il suolo della Caffarella e 81,5 Bq/kg nel suolo di Tor Marancia. Il ^{232}Th in questi suoli presenta concentrazioni di attività maggiori rispetto a ^{238}U e ^{226}Ra , con un valore medio di 194 Bq/kg alla Caffarella e 189,48 nell'area di Tor Marancia. Le rocce di origine vulcanica Pozzolane Rosse e Conglomerato Giallo campionate nell'area di Tor Marancia, mostrano rapporti di attività $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ vicini a 1, mettendo in evidenza per queste rocce una condizione di equilibrio radioattivo per i 2 isotopi, cosa non evidenziata dal tufo di Villa Senni con concentrazioni di ^{238}U di 226,7 Bq/kg e 65,5 Bq/kg per il ^{226}Ra . Probabilmente queste differenza può essere data dall'alterazione del campione ed in particolar modo dalla presenza di leucite analcimizzata. Il suolo dell'area di studio del consorzio di Vigna Fiorita, con roccia madre rappresentata dall'unità di Villa Doria, presenta valori molto simili di uranio e radio con rapporto $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ di 0,97. Inoltre il suolo risulta impoverito di torio se confrontato con i suoli della Caffarella e Tor Marancia. I suoli analizzati in spettrometria γ dell'area di Fiumicino, mostrano simili concentrazioni di uranio e radio, ma un'elevata differenza in torio; 2,69 Bq/kg per il terreno circo e 26,2 Bq/kg per il terreno di riporto della rotonda. Il rapporto radio/torio è pari rispettivamente a 11,68 per il terreno circo e 1,07 per il suolo della rotonda. La formazione del Tavolato presenta un forte disequilibrio tra uranio e radio con $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ di 0,35. Il flysch tolfetano presente a N dell'area termale della Ficoncella presso Civitavecchia, presenta concentrazioni di attività di ^{238}U , ^{226}Ra e ^{232}Th molto simili tra di loro, in particolare il rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ è pari a 1,13. Per discriminare il meccanismo di movimento del radon nelle aree di studio il nostro interesse ricade principalmente sul contenuto di ^{226}Ra e ^{232}Th da cui derivano rispettivamente il radon ed il thoron.

10.1.1 Valutazione dei tassi d'esorazione del radon e del thoron, in campioni di suolo

I valori delle misure dei tassi d'esorazione di radon e thoron, utilizzando il sistema di misura descritto nel sottoparagrafo 6.2.2, ha restituito risultati concordanti con i dati del contenuto degli elementi precursori, analizzati tramite spettrometria γ . I risultati delle misure dei tassi d'esorazione vengono riportati in tabella 49.

Campione	Sito	^{222}Rn (Bq/m ² *h)	^{220}Rn (Bq/m ² *h)	^{222}Rn (Bq/kg*h)	^{220}Rn (Bq/kg*h)
		<i>Surface exhalation rate</i>		<i>Mass exhalation rate</i>	
TFF2	T. Ficoncella	11,27 ± 0,34	1036 ± 82,8	0,75 ± 0,022	68,8 ± 5,5
TFF1	T. Ficoncella	3,86 ± 0,12	2112 ± 168,9	0,26 ± 0,008	139,6 ± 11,2
RPS3	Caffarella	2,77 ± 0,08	15264 ± 1220	0,18 ± 0,006	1014 ± 81,1
C1	Caffarella	3,25 ± 0,10	1041 ± 803,3	0,22 ± 0,006	667,1 ± 53,3
STM1	Tor Marancia	2,10 ± 0,06	11279 ± 902,3	0,14 ± 0,004	746,4 ± 59,7
VF2	Vigna Fiorita	2,04 ± 0,06	4569 ± 365	0,14 ± 0,004	308,3 ± 24,7
VF1	Vigna fiorita	3,73 ± 0,11	6313 ± 605	0,25 ± 0,007	419,4 ± 33,6
Terreno circo	Fiumicino	0,79 ± 0,02	1513 ± 121,1	0,05 ± 0,002	99,7 ± 8,0
Terreno rotonda	Fiumicino	1,15 ± 0,03	5644 ± 451,5	0,08 ± 0,002	374,8 ± 30,0
Tavolato	Ciampino	1,70 ± 0,05	4740 ± 373	0,11 ± 0,03	319,1 ± 26,5
Flysch	Civitavecchia	0,78 ± 0,02	1899 ± 154,3	0,05 ± 0,002	127,3 ± 10,6

Tabella 49: Risultati delle misure dei tassi d'esorazione in campioni di suolo delle aree investigate.

Anche in questo caso i suoli della Ficoncella mostrano i valori più elevati dei tassi d'esorazione del ^{222}Rn sia per unità di superficie (*surface exhalation rate*, Bq m⁻² h⁻¹) sia per unità di massa (*mas exhalation rate*, Bq kg⁻¹ h⁻¹), rispetto agli altri campioni di suolo analizzati. Viceversa questi stessi suoli hanno i valori più bassi dei tassi d'esorazione del thoron, rispecchiando quindi l'elevato contenuto di ^{226}Ra e l'impoverimento di ^{232}Th , come precedentemente illustrato nel paragrafo 10.1 sulla valutazione del contenuto degli elementi precursori nei suoli attraverso l'analisi di spettrometria γ .

Le misure effettuate sui suoli della Caffarella e di Tor Marancia, riferibili al membro delle Pozzolanelle dell'unità eruttiva del Villa Senni dei Colli Albani mostrano valori simili dei tassi d'esorazione di radon. Risulta interessante l'interpretazione dei tassi d'esorazione del thoron, dove i valori più elevati sono stati riscontrati nel campione di suolo prelevato nelle vicinanze della stazione fissa di monitoraggio dei gas RPS3. Proprio in questa stazione sono stati registrati i valori medi più bassi del radon ed in

particolare del thoron, presenti nel gas del suolo. Questa differenza è una buona spiegazione dell'influenza strumentale dell'asta RPS3 rispetto alle altre aste utilizzate negli altri punti di misura nelle Valle della Caffarella e nel sito di Tor Marancia. Infatti solo in RPS3 l'asta è munita di una punta con diametro maggiore rispetto al resto dell'asta che quindi, durante l'esecuzione delle misure del *soil radon*, genera un richiamo di aria atmosferica dall'intercapedine asta-suolo, causando una diluizione delle specie gassose in particolar modo per il thoron.

10.2 Considerazioni sulla mappatura di *soil radon* nell'area termale della Ficoncella, alla luce del contenuto di ^{226}Ra riscontrato in alcuni campioni di suolo dell'area

I valori elevati di ^{226}Ra riscontrati nei campioni di suolo dell'area interessata da misure del ^{222}Rn nel suolo per la realizzazione della mappatura descritta nel sottoparagrafo 9.1.5, suggeriscono alcune considerazioni. Nella tabella 50 sono riportati i valori riassuntivi del contenuto di radio presente negli 8 campioni analizzati.

Campioni di suolo analizzati	^{226}Ra Min (Bq/kg)	^{226}Ra Max (Bq/kg)	^{226}Ra Medio (Bq/kg)	^{226}Ra Dev.st. (Bq/kg)
8	64,6	224,1	148,7	56,98

Tabella 50: Valori riassuntivi del contenuto di ^{226}Ra nei campioni di suolo analizzati nell'area termale della Ficoncella.

Dai dati in tabella risulta evidente come il suolo presente nell'area termale della Ficoncella, risulti arricchito in ^{226}Ra e, come evidenziato nella tabella 48, impoverito in ^{232}Th (valore medio negli 8 campioni analizzati pari a 24,2 Bq/kg). Ricordiamo come la zona presenta elevate concentrazioni di radon fino ad un massimo di circa 1000 kBq/m³, in particolar modo nelle vicinanze della stazione fissa di misura TFF2, dove è stata riscontrata una permeabilità elevatissima e correlazione diretta tra l'intensità e direzione del vento e concentrazioni di radon. Si è pensato così di sovrapporre i punti dove sono stati prelevati i campioni del suolo per le analisi di spettrometria gamma, alla mappa delle concentrazioni di radon nel suolo. Questa sovrapposizione è visibile in figura 117.

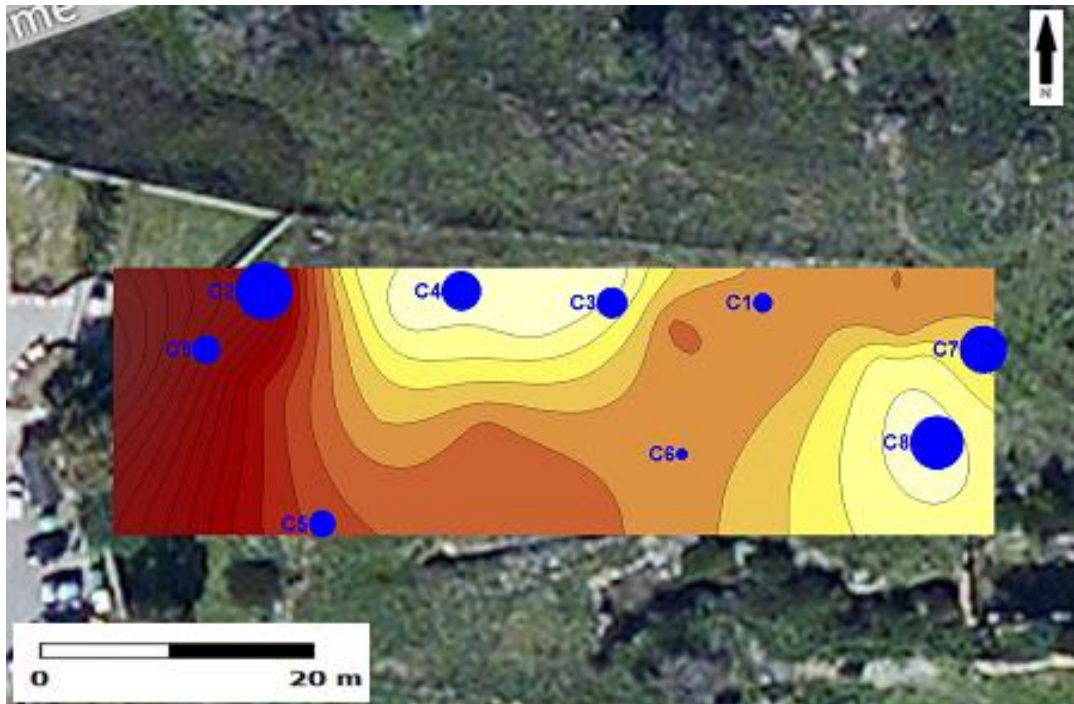


Figura 117: Sovrapposizione tra mappa delle concentrazioni di radon nel suolo, e i punti di campionamento del suolo per misure di spettrometria γ evidenziati dai cerchi azzurri. La grandezza del cerchio è direttamente proporzionale alla quantità di ^{226}Ra , riscontrata dall'analisi γ .

Dall'immagine risulta una discreta corrispondenza del *soil radon* con il contenuto di ^{226}Ra nel suolo. In particolare il valore più elevato di radio corrisponde proprio con il punto fisso di misura TFF2, dove nel tempo sono state registrate le più alte concentrazioni di radon rispetto alla stazione di misura TFF1. Grazie all'analisi del contenuto dell'elemento precursore di radon, siamo in grado di dire come in quest'area sia presente un meccanismo di trasporto misto di tipo diffusivo – advettivo del radon nel suolo. Diffusivo per l'elevata concentrazione di ^{226}Ra nei suoli, advettivo perché, come già verificato, è importante il controllo sulle concentrazioni di radon nel suolo ad opera dell'intensità e principalmente della direzione del vento, vista la presenza di travertini molto fratturati e interessati da cunicoli sotterranei.

10.3 Valutazione del meccanismo di movimento del ^{222}Rn nelle aree indagate

Grazie alla determinazione del contenuto degli elementi precursori del radon e del thoron nei suoli di tutte le aree di studio, siamo ora in grado di discriminare il meccanismo del movimento del radon nel suolo. Questo passo è possibile tramite la correlazione dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ del gas nei suoli con il rapporto dei contenuti di ^{226}Ra e ^{232}Th negli stessi. Per rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ maggiori del rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$, possiamo affermare che la sorgente del gas è più distante rispetto all'intorno del punto di misura, visto che si ha una perdita del ^{220}Rn dovuta al suo basso tempo di dimezzamento, con aumento del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$. Altri aspetti che possono aiutare a discriminare il meccanismo di trasporto sono: la presenza o meno di variabilità stagionale delle concentrazioni di radon, le concentrazioni di specie gassose che possono trasportare il radon da zone più profonde verso la superficie ed i valori della permeabilità intrinseca. In base a quanto descritto precedentemente, nei sottoparagrafi seguenti vengono analizzati i risultati ottenuti nelle aree studiate.

10.3.1 Valle della Caffarella – Tor Marancia

Le stazioni fisse RPS3 e C1_80 della Caffarella, descritte nel capitolo 8, presentano fluttuazioni stagionali delle concentrazioni di radon nel suolo molto marcate, mentre nel punto di misura CV3 situato sopra una cavità, la variabilità è meno evidente. Le concentrazioni di CO_2 risultano essere basse, con alcuni valori più elevati registrati in CV3. Nel grafico della figura 118 si riportano i rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ delle stazioni fisse, dei punti di misura di Tor Marancia al di sopra della cavità e dove non si registra la presenza della cavità.

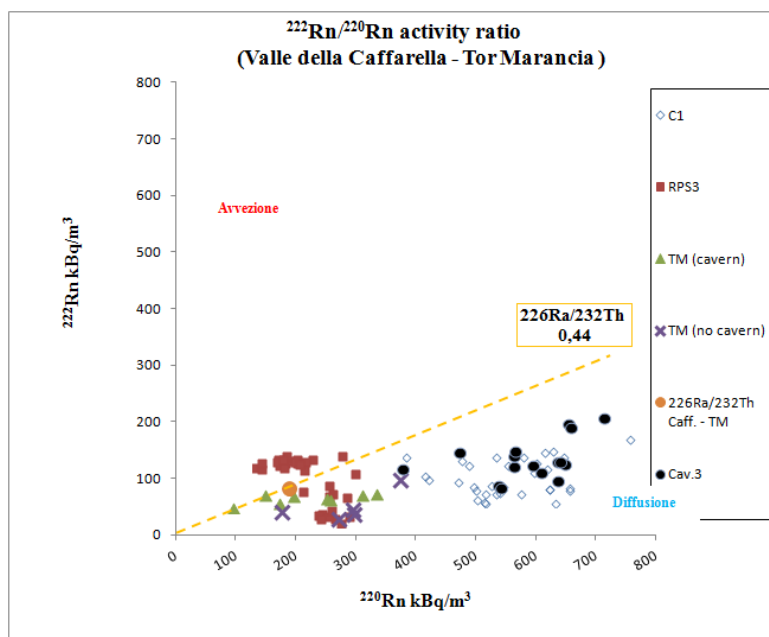


Figura 118: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ delle monitoraggi in Caffarella e Tor Marancia in funzione del rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ del suolo.

Nel grafico la linea tratteggiata arancione rappresenta il valore del rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ medio per le due aree, pari a circa 0,44. Il rapporto radon/thoron al di sotto di questo valore indica condizioni di movimento del radon prettamente diffusive, al disopra condizioni di tipo avettive. Nelle due aree quindi abbiamo un movimento del radon prettamente diffusivo . In alcuni punti presenti al disopra delle cavità sotterranee si osserva un contributo maggiore del radon, soprattutto in periodi estivi. La stazione di misura RPS3 presenta rapporti radon/thoron molto differenti da quelli della stazione C1_80. Questo potrebbe essere dovuto ad un fattore strumentale visto che l'asta RPS3 è munita di una punta di diametro maggiore del resto dell'asta, aspetto che favorisce una diluizione del *soil gas* con aria atmosferica.

10.3.2 Consorzio di Vigna Fiorita

In questo caso tra le due stazioni di misura VF1 e VF2 abbiamo registrato differenze notevoli delle concentrazioni di radon e anidride carbonica nell'arco del monitoraggio. La stazione di misura VF1 presenta una variabilità del radon marcata, con concentrazione media di anidride carbonica di 4,7 vol%. Nella stazione VF2 siamo in presenza di una variabilità stagionale nulla, con concentrazione media di anidride carbonica di 70,1 vol.%. I valori $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ delle due stazioni e dei punti di misura

nell'area del giardino, si riportano nel grafico in figura 119, in relazione ad un rapporto medio $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ nel suolo di 0,54.

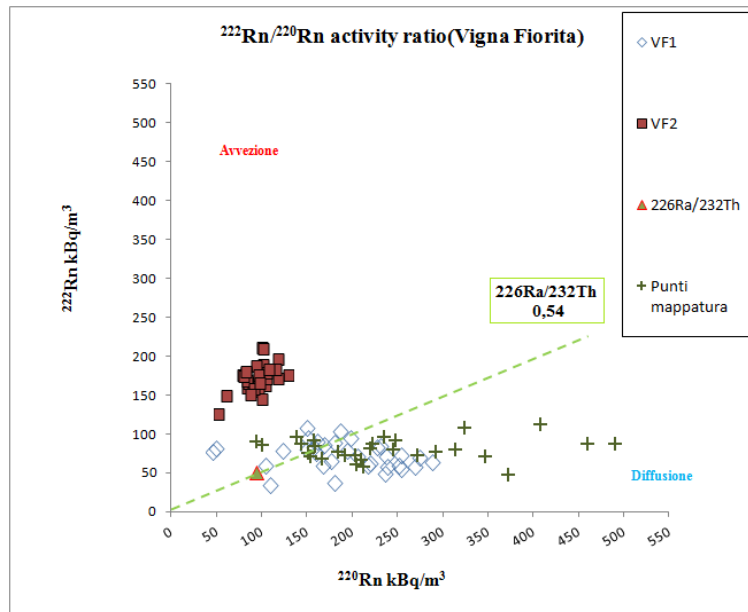


Figura 119: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ in VF1, VF2 e nelle misure effettuate nel giardino dell'area, in funzione del rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ del suolo.

E' palese in quest'area il meccanismo prettamente avvevivo del trasporto del radon in VF2. In VF1 siamo in presenza di un movimento misto diffusivo – avvevivo con prevalenza stagionale dell'uno o dell'altro. In alcuni punti della mappatura il movimento è ancora diffusivo – avvevivo, mentre in altri il radon ha un trasporto principalmente diffusivo.

10.3.3 Vigna Fiorita, Arcieri del Falco

I rapporti radon/thoron delle misure dei profili attraverso la faglia presente nell'area e quelli dei transetti effettuati nel circolo sportivo degli Arcieri del Falco, sono confrontati in Fig. 120 con il rapporto radio/torio relativo alla formazione del Tavolato, con valore di 1,4.

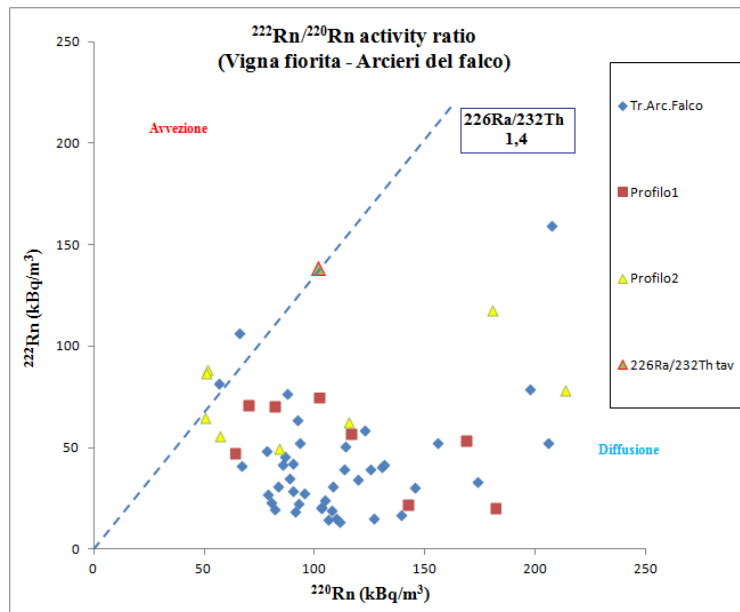


Figura 120: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ relativi ai profili e transetti, in relazione al rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$.

Dal grafico della figura 120 si individuano alcuni punti interessati da una componente avvetiva del radon. Questi punti di misura sono ubicati nei pressi della faglia indagata, come mostrato nei grafici della figura 121, dove la linea orizzontale tratteggiata identifica il rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ della formazione del Tavolato.

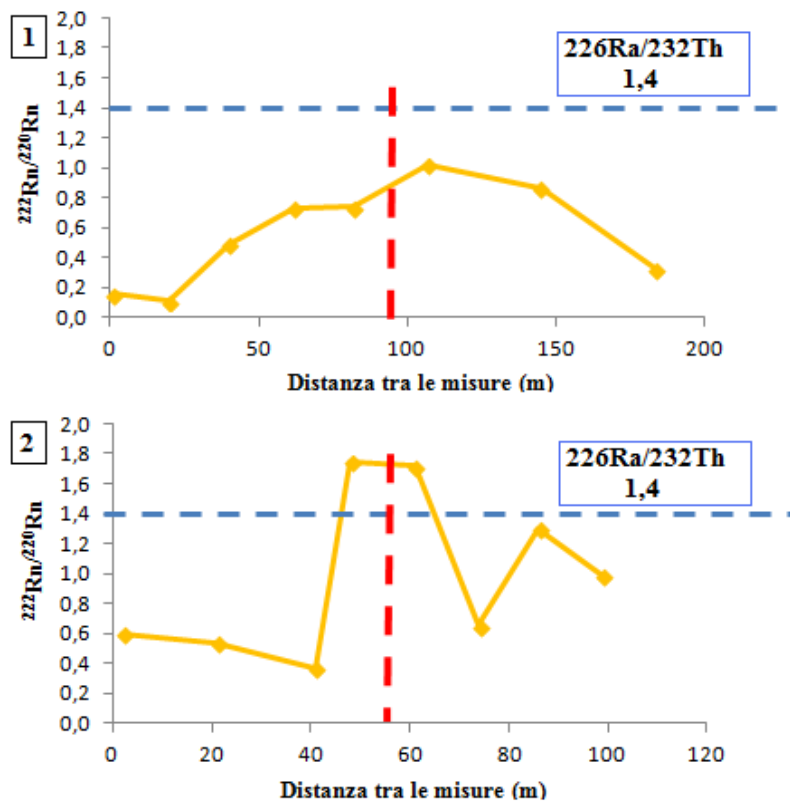


Figura 121: Andamento dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ dei profili 1 e 2 lungo la faglia, in funzione del rapporto radio/torio della formazione del Tavolato.

La componente avvertiva del radon risulta più evidente lungo i punti di misura più vicini alla faglia del profilo 2. In generale questi grafici possono fornirci un'idea di come, in vicinanza di una faglia, si possa osservare un aumento dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, indice di una provenienza più profonda del radon con meccanismi di trasporto di tipo avvertivo. Questi meccanismi sono legati alla presenza di elevate concentrazioni nel suolo di anidride carbonica, capace di trasportare il radon verso la superficie con conseguente perdita del thoron, per via del suo tempo breve di dimezzamento.

10.3.4 L'area termale della Ficoncella

In questa area sono state registrate le concentrazioni di radon più elevate, in particolare nella stazione di misura TFF2, dove è stata messa in evidenza anche la sua relazione con l'intensità e direzione del vento. Le misure di spettrometria γ hanno poi messo in evidenza come il suolo risulti particolarmente arricchito in ^{226}Ra piuttosto che in ^{232}Th , con un valore medio del rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ pari a 6,14.

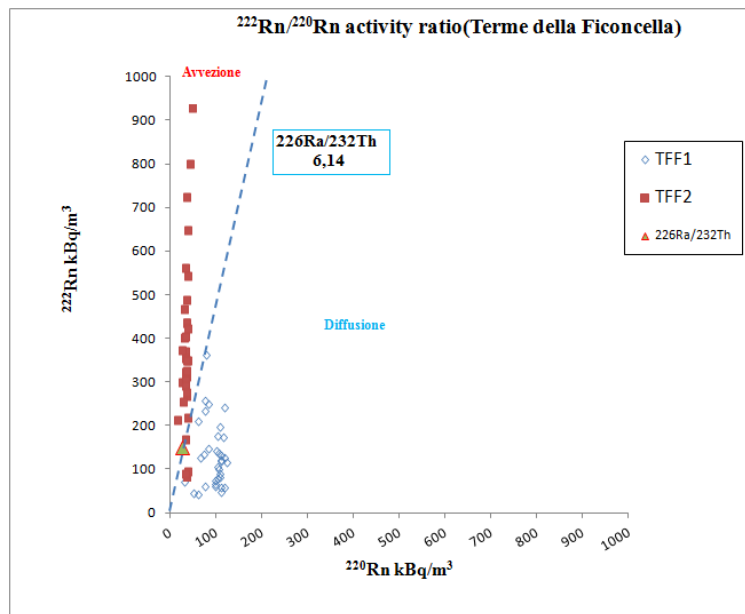


Figura 122: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ in TFF1 e TFF2 nell'area termale della Ficoncella. .

Dal grafico risulta come per la stazione di misura TFF2 il radon abbia un movimento diffusivo – avvevivo, anche se quest'ultimo è predominante. L'interazione del vento con direzione predominante N, contribuisce ad aumentare il contributo avvevivo sul movimento del radon.

10.3.5 Profili lungo la faglia a N dell'area termale della Ficoncella

Il suolo della zona a N delle terme della Ficoncella, controllato dalla presenza del flysch tolfetano, ha un rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ di 1,13 che testimonia un sostanziale equilibrio tra il Radio ed il Torio.

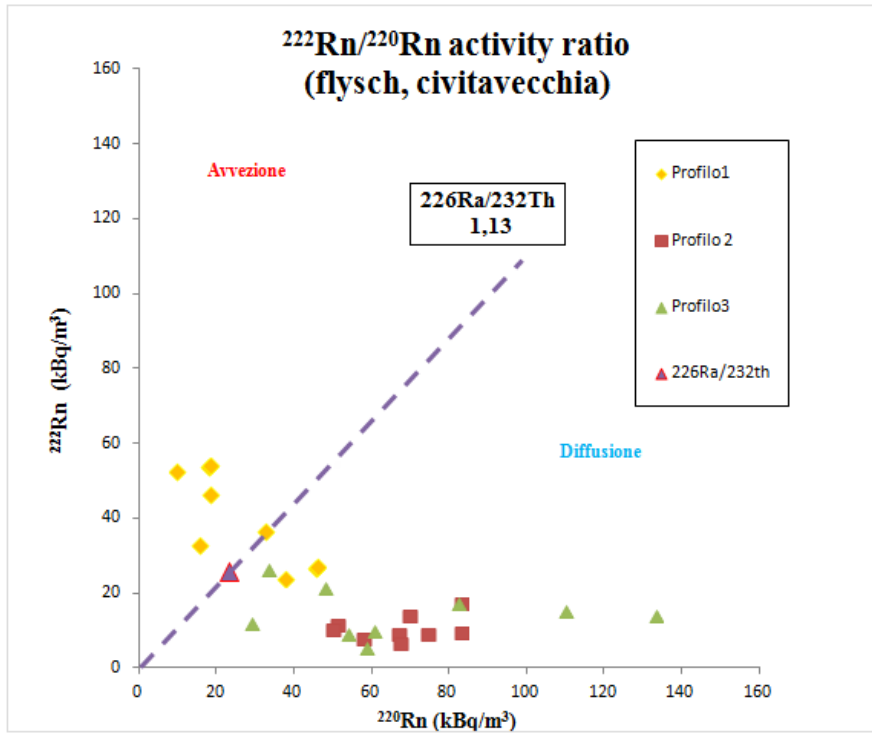


Figura 123: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ delle misure effettuate lungo la faglia e relativo rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ del suolo.

In questo caso la componente avvertiva risulta evidente in alcuni punti del profilo 1 lungo la faglia. Per gli altri profili possiamo parlare di un trasporto diffusivo del radon nel suolo, anche se alcuni punti di misura del profilo 3 mostrano un incremento della componente avvertiva, come è possibile notare dai grafici in figura 124.

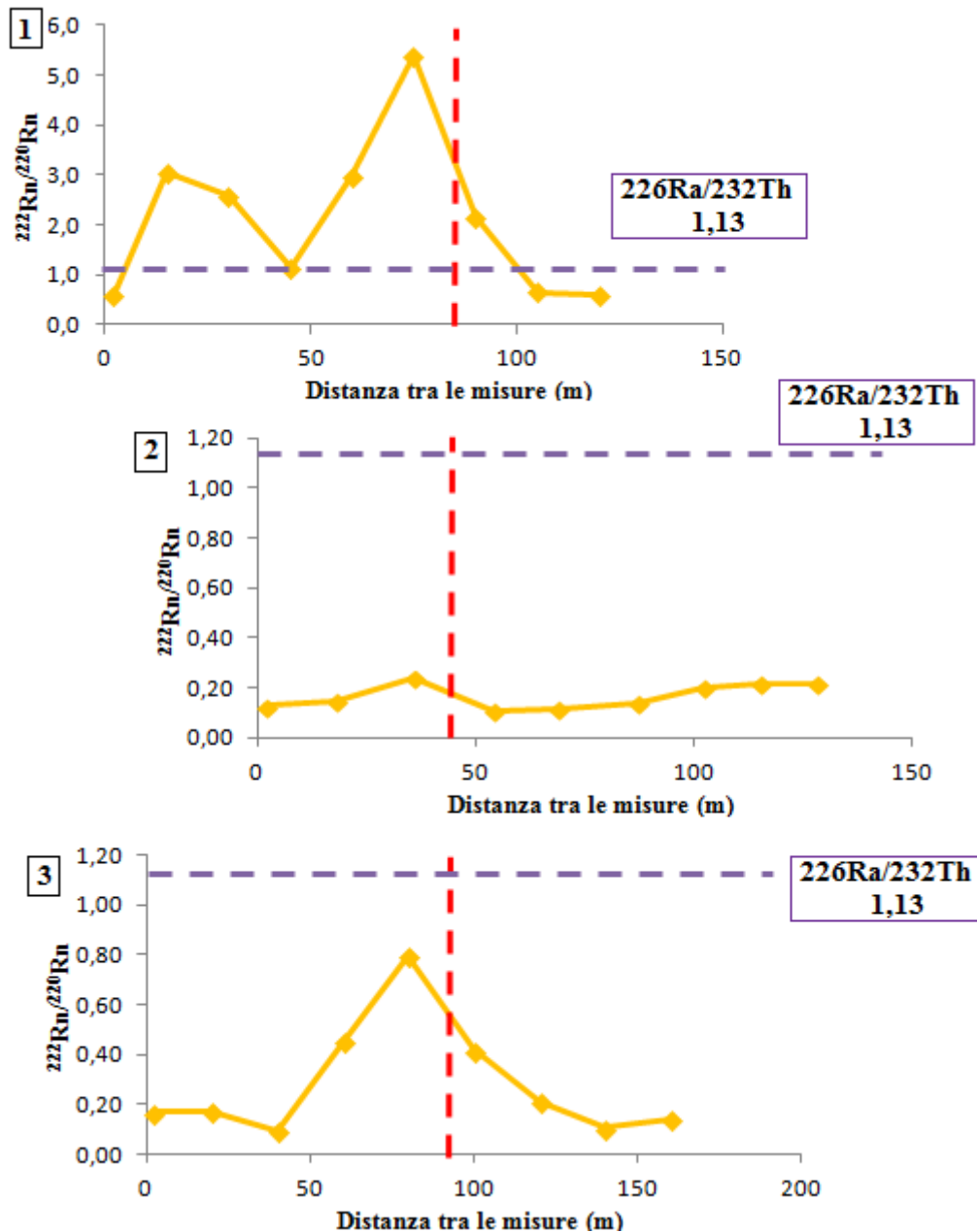


Figura 124: Andamento dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ dei profili 1,2 e 3 lungo la faglia, in funzione del rapporto radio/torio del flysch tolfetano.

Come già evidenziato nel sottoparagrafo 9.1.6 il profilo 1 non è perfettamente ortogonale rispetto alla faglia presente nell'area. Questo aspetto potrebbe incidere quindi sui valori misurati di radon e thoron e di conseguenza sui loro rapporti, che se confrontati con il valore del rapporto radio/torio, indicano una forte componente avvertiva lungo questo profilo rispetto agli altri due effettuati, dove specialmente le

misure del profilo 2 indicano un meccanismo di trasporto del radon di tipo prettamente diffuso.

10.3.6 L'area di Fiumicino interessata dalla presenza delle polle

Il suolo di riporto della rotonda presenta un rapporto $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ pari a 1,07.

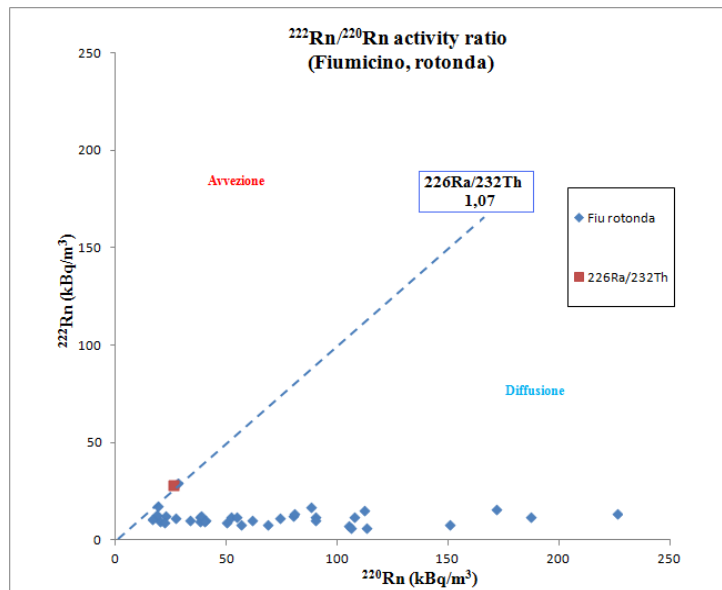


Figura 125: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ delle misure effettuate all'interno della rotonda interessata dalla presenza delle polle.

Dal grafico della figura 125 possiamo parlare di un movimento del radon principalmente di tipo diffusivo. Alcuni punti però si vengono a trovare in prossimità della linea che rappresenta il valore $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ del suolo, quindi per questi possiamo ipotizzare la presenza di un contributo profondo di ^{222}Rn , con meccanismo di movimento classificabile come diffusivo – avvertivo.

10.3.7 Terreno circo nell'area di Fiumicino

Nel terreno presente a N della rotonda il suolo ha un rapporto di attività tra radio e torio di 11,7 valore che indica un forte disequilibrio tra i due isotopi.

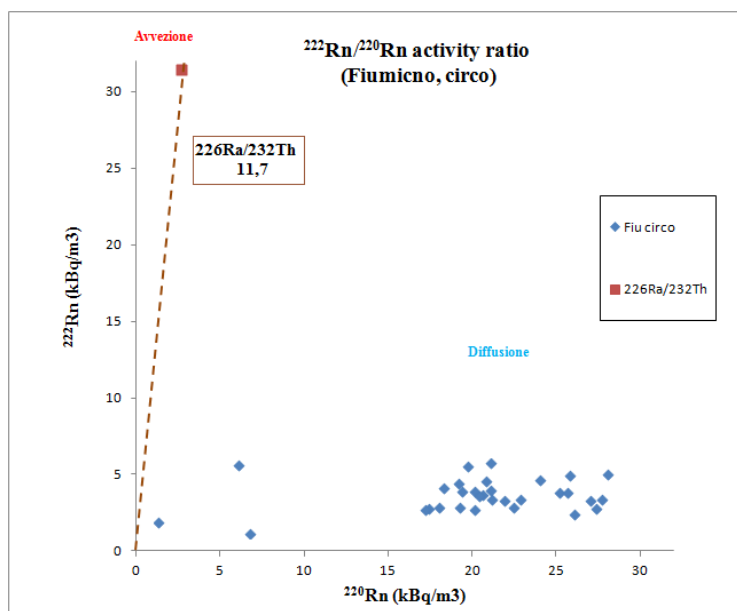


Figura 126: Rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ delle misure effettuate all'interno del terreno presente a N della rotonda interessata dalla presenza delle polle.

E' evidente in questa zona un meccanismo di movimento del radon nel suolo prettamente diffusivo. Inoltre è interessante notare come i tre punti che si avvicinano all'indicazione di componente avvettiva, sono relativi alle misure con le concentrazioni più elevate di CO_2 dell'area, tra cui i due punti con concentrazione pari a 88 vol%.

10.4 Il Coefficiente di Arricchimento del radon

L'emanazione è il processo per cui atomi di radon vengono rilasciati dai granuli minerali per decadimento del ^{226}Ra , contenuto entro i primi $0,02 \pm 0,07 \mu\text{m}$ dalla superficie del granulo (Sasaki et al., 2004). Il radon così formato può rimanere imprigionato in granuli minerali adiacenti o occupare il vuoto presente tra i granuli. Il coefficiente d'emanazione rappresenta quindi il rapporto fra il numero di atomi di radon che lasciano il materiale solido e la quantità generata dal campione. Abbiamo visto

come il coefficiente d'emanazione è influenzato dalla granulometria, porosità, contenuto d'acqua e temperatura.

Il radon così formato può muoversi nei pori tramite un meccanismo di tipo diffusivo, avvevivo o misto tramite interazione tra i due tipi. Nei grafici presentati nei paragrafi precedenti, è stato individuato il meccanismo di trasporto del radon nel suolo delle aree studiate, confrontando i rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ del gas con il rapporto degli elementi precursori $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ contenuti nei suoli. In condizioni di movimento del radon prettamente avvevivo, si ha un aumento del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, indice di una sorgente più profonda, che comporta un trasporto più lungo e concomitante decadimento del thoron, visto il suo basso tempo di dimezzamento. Abbondanti dati di letteratura (Schuman, 1993 e riferimenti ivi contenuti) scelgono come limite superiore del coefficiente d'emanazione il valore 0,7 in condizioni di equilibrio tra la concentrazione di attività del radon con il radio. Superato il valore 0,7 probabilmente si è in presenza di una ulteriore sorgente profonda del gas radon, con valore massimo assunto pari a 1.

In questo lavoro il coefficiente d'emanazione è stato sostituito dal *Coefficiente di Arricchimento (CdA)* del radon, poiché, come vedremo, in alcuni casi siamo in presenza di valori maggiori di 1, quindi con un contributo extra di radon rispetto al massimo valore che può essere generato dal decadimento del ^{226}Ra presente nei suoli delle aree studiate.

Per il calcolo del *CdA* è stata utilizzata la seguente equazione:

$$CdA = \frac{C_{^{222}\text{Rn}}}{C_{^{226}\text{Ra}} \cdot \rho} \quad (23)$$

dove:

$C_{^{222}\text{Rn}}$ = concentrazione di attività del ^{222}Rn nel suolo (Bq/m^3);

$C_{^{226}\text{Ra}}$ = contenuto del ^{226}Ra nel suolo (Bq/kg);

ρ = densità del terreno (kg/m^3).

Il calcolo del *CdA* è stato effettuato per i punti fissi di monitoraggio installati nelle aree oggetto dello studio, considerando il valore medio di concentrazione di radon nei periodi di misura ed il contenuto di ^{226}Ra nei campioni di suolo prelevati nei dintorni di questi punti fissi. Nel sito di Fiumicino, sono stati considerati i valori estremi di radon

misurati, in relazione al contenuto di ^{226}Ra presente nei suoli. Inoltre sono state considerate densità tipiche di terreni sabbiosi (1400 kg/m^3) e limoso argillosi (1200 kg/m^3) che corrispondono alla tipologia dei suoli presenti nelle varie aree della ricerca. In tabella 51 si riportano i valori del *CdA* ottenuti utilizzando l'equazione 23.

Punto di misura	soil ^{222}Rn (Bq/m³)	^{226}Ra (Bq/kg)	C.d.A. (ρ 1200 kg/m³)	C.d.A. (ρ 1200 kg/m³)
RPS3 Caffarella	96270	89,9	0,89	0,76
C1_80 Caffarella	101560	82,2	1,03	0,88
CV3 Caffarella	133250	86,0	1,29	1,11
STM1 Tor Marancia	53000	85,2	0,52	0,44
VF1 Vigna Fiorita	72000	57,5	1,04	0,89
VF2 Vigna Fiorita	169880	43	3,29	2,82
TFF1 T. Ficoncella	128000	91,8	1,18	1,00
TFF2 T. Ficoncella	382270	224,1	1,42	1,22
Rotonda MIN Fiu.	6180	28,1	0,18	0,15
Rotonda MAX Fiu.	29150	28,1	0,86	0,74
T.Circo MIN Fiu.	1200	31,4	0,03	0,03
T.Circo MAX Fiu.	5780	31,4	0,15	0,13

Tabella 51: Risultati del calcolo del Coefficiente d'Arricchimento nei punti di misura rappresentativi delle aree indagate.

Dai dati presenti in tabella 50 risulta come il maggior contributo profondo di radon sia evidente nel punto di misura VF2 ubicato nell'area di studio di Vigna Fiorita, dove sono state misurate costantemente elevate concentrazioni di CO_2 che agisce come *carrier gas* per il radon. Il secondo punto di misura che riceve un apporto di radon "extra" è la stazione fissa TFF2, presente nell'area termale della Ficoncella, dove in assoluto si registrano le più alte concentrazioni di radon. L'analisi del ^{226}Ra contenuto nel suolo ha poi evidenziato come già di per se la presenza di elevati valori di radon sia attribuibile alla concentrazione rilevante del suo diretto precursore. Per i punti di misura dei siti di Tor Marancia – Valle della Caffarella, non risulta evidente un contributo profondo del radon rispetto all'intorno del punto di misura, tranne che per il punto CV3. Si ricorda che questo è situato al di sopra della cavità della Valle della Caffarella, dove l'apporto

di radon è legato proprio alla presenza dell'ipogeo. In queste cavità scavate essenzialmente nell'unità ignimbratica delle Pozzolane Rosse, il radon tende ad accumularsi al loro interno e quindi a migrare attraverso la volta verso gli strati superficiali del suolo al disopra di essa. Questo meccanismo è regolato dal gradiente di temperatura tra interno ed esterno della cavità. Negli altri punti di misura sostanzialmente non si registra alcun arricchimento di radon rispetto al massimo che può essere generato dal contenuto di ^{226}Ra presente nel suolo. E' comunque visibile una differenza notevole del *CdA* nei punti di misura della rotonda di Fiumicino, relativi ai valori minimo e massimo di radon misurato durante l'indagine.

Conclusioni

Gli studi condotti durante tre anni di ricerca, hanno permesso di acquisire le conoscenze e i dati necessari per la comprensione del movimento del gas radon in aree con diverse caratteristiche geologico – strutturali. Parte fondamentale del lavoro è stato lo studio di quei fattori che determinano la variabilità spaziale e temporale delle concentrazioni di radon. Il monitoraggio di lunga durata in stazioni fisse installate nelle aree indagate, ha permesso di riconoscere aree dove le concentrazioni di *soil radon* ha una variazione stagionale, con valori massimi registrati nei periodi invernali in conseguenza della maggiore piovosità, ed aree dove questo andamento è meno evidente. Questa differenza già di per se può suggerire come il trasporto di radon nel suolo sia controllato da meccanismi differenti. La determinazione della concentrazione di CO₂ nel suolo è stata fondamentale per disporre di un quadro più completo utile per la discriminazione del tipo di movimento del radon da diffusivo ad avvertivo.

I risultati confermano come le faglie e i sistemi di frattura facilitano la risalita di fluidi profondi rappresentando le vie migliori per la migrazione del gas radon in forma strettamente avvertiva. Il trasporto avvertivo di radon da zone più profonde a zone più superficiali del sottosuolo si verifica grazie alla presenza di *carrier gas*, come in questo caso è certamente la CO₂ che è presente in alte concentrazioni in molte delle zone studiate. Per il riconoscimento di sorgenti profonde e di meccanismi di trasporto avvertivi è importante il segnale dato dal thoron, la cui concentrazione tende a diminuire notevolmente in presenza di sorgenti profonde. Risulta quindi importante misurare le concentrazioni di thoron nei suoli, cosa che viene invece trascurata in molti lavori geochimici. La conoscenza dei rapporti $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e del contenuto di ^{226}Ra e ^{232}Th , è fondamentale per identificare il movimento del gas radon nel suolo. Risultati interessanti sono stati ottenuti dalle misure effettuate nell'area termale della Ficoncella ed in particolare nella stazione TFF2, dove sono state registrate le più alte concentrazioni di radon di tutte le aree studiate assieme a valori elevati del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ e con scarsa variabilità stagionale del radon.. Se avessimo considerato solo questi aspetti, probabilmente avremmo ipotizzato la presenza di flussi prettamente avvertivi per il *soil radon*. L'analisi γ sui campioni di suolo dell'area ha messo in luce l'elevato contenuto in ^{226}Ra e l'impovertimento in ^{232}Th , che hanno permesso di identificare per quest'area un meccanismo di trasporto del radon misto diffusivo –

avvettivo. Risulta quindi evidente per studi di questo tipo la necessità di analizzare il contenuto degli elementi precursori. Una parte della tesi è stata dedicata alla valutazione dell'influenza di cavità sotterranee sulle concentrazioni superficiali di radon. E' stato dimostrato che queste cavità possono rappresentare zone di accumulo di radon, che tende poi a migrare in superficie attraverso la volta, con un movimento misto di tipo diffusivo – avvettivo. L'efficacia di questi fenomeni dipende da vari aspetti come la geometria della cavità e la sua profondità dal piano campagna, la presenza di sprofondamenti superficiali e di ingressi alla stessa cavità, che agiscono come vie preferenziali d'ingresso di aria atmosferica che causa una diluizione del radon all'interno della cavità e riduce di conseguenza la concentrazione di radon negli strati superficiali di suolo prossimi a queste vie d'ingresso.

I dati raccolti in questa ricerca possono risultare utili anche per la valutazione del rischio radon indoor per abitazioni che si trovano in prossimità di faglie, di zone di risalita di fluidi profondi e di cavità sotterranee. Infatti la frazione supplementare del radon, qui calcolata attraverso la valutazione del *Coefficiente di Arricchimento*, può accumularsi in ambienti confinati aumentando il rischio radon indoor per gli occupanti di tali ambienti.

Bibliografia

Ambronn R., (1921)

The Natural Radiation Environment University of Chicago Press
Chicago, IL.

Annunziatellis, A., Ciotoli, G., Lombardi, S., Nolasco, F., (2003)

Short- and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy)

J. Geoch. Expl. 77, 93–108.

ANPA (2000)

Il sistema informativo territoriale per la valutazione del potenziale radon dal suolo
Stato dell' Ambiente 9/2000.

Balletta A., Benedetti F., Frusteri L., (2011)

Le intossicazioni professionali mortali da Idrogeno Solforato (H₂S) in ambienti confinati

G. Ital. Med. Lav. Erg. suppl.,246-249.

Barberi F., Carapezza M. L., Ranaldi M., Tarchini L., (2007)

Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): induced hazard and evidence of deep CO₂ degassing on the Tyrrhenian margin of central Italy

Journal of Volcanology and Geothermal Reserch 165, 17-31.

Baxter P.J., (2000)

Gases

In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.C. Aw, A.Cockcroft and J.M.

Harrington eds., *Hunter's Diseases of Occupations*. Arnold, London, 123-178.

Beaubien, S.E., Ciotoli, G., Lombardi, S.,(2003)

Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (Central Italy)

J. Volcanol. Geotherm. Res. 123, 63–80.

Bellotti P., Tortora P., Valeri P., (1989)

Sedimentological and morphological features of the Tiber Delta

Suppl. to Sedimentology, 36 (5), Poster. England.

Bertini M., D'Amico C., Deriu M., Tagliavini S., Varnia L., (1971)

Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000

F. n° 143 Bracciano.

Bourdon B., Turner S., Henderson G.M., Lundstrom C.C. (2003)
Introduction to U-series geochemistry. In: *Uranium-series geochemistry*
Reviews in Mineralogy and Geochemistry, vol. 52 (1), pp. 1-21.

Bohicchio F., Campos-Venuti G., Piermattei S., Nuccetelli C., Risica S., Tommasino L., Torri G., Magnoni M., Agnesod G., Sgorbati G., Bonomi M., Minach L., Trotti F., Malisan M.R., Maggiolo S., Gaidolfi L., Giannardi C., Rongoni A., Lombardi M., Cherubini G., D'Ostilio S., Cristofaro C., Pugliese M., Martucci V., Crispino A., Cuzzocrea P., Sansone Santamaria A., Cappai M. (2005)
Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions
Radiation Measurements, vol. 40, pp. 686-694.

Barnet I., Pacherová P., Neznal M., Neznal M., (2008)
Radon in geological environment – Czech experience
Czech Geological Survey Special Papers, No. 19, Prague, 2008, pp. 19-25.

Bertrami R., Buonasorte G., Ceccarelli A., Lombardi S., Pieri S., Scandiffio G. (1990)
Soil gases in geothermal prospecting: two case histories (Sabatini Volcanoes and Alban Hills, Latium, Central Italy)
J. Geophys. Res. 21475-21481.

Capelli G., Mazza R. (2005)
Carta idrogeologica – Uso compatibile della risorsa idrica degli acquiferi vulcanici del Lazio In: *Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio – Gli acquiferi vulcanici* (a cura di Capelli G., Mazza R., Gazzetti C.)
Pitagora Editrice Bologna, 2005.

Capelli G., Mazza R., Papiccio C. (2007)
Intrusione salina nel delta del Tevere. Geologia, idrologia e idrogeologia del settore romano della piana costiera.
Giornale di Geologia Applicata 5 (2007) 13 -28.

Carapezza, M. L., Badalamenti B, Cavarra L., Scalzo A., (2003)
Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani volcano (Cava dei Selci, Roma).
J. Volcanol. Geotherm. Res., 123: 81-94.

Carapezza, M.L., Barberi, F., Tarchini, L., Cavarra, L., Granieri, D., (2005.)
Le emissioni gassose dell'area vulcanica dei Colli Albani. In: *Carapezza, M.L., et al. (Ed.), Nuovi dati sull'attività recente del cratere del Lago Albano e sul degassamento dei Colli Albani*.
Atti Acc. Naz. Lincei, 218, pp. 229–242.

- Carapezza, M.L., Tarchini, L., (2007)
Magmatic degassing of the Alban Hills volcano (Rome, Italy): geochemical evidence from accidental gas emission from shallow pressurized aquifers
 J. Volcanol. Geotherm. Res 165, 5–16.
- Carapezza, M.L., Tarchini, L., (2007)
 Accidental gas emission from shallow pressurized aquifers at Alban Hills volcano (Rome, Italy): geochemical evidence of magmatic degassing?
 J. Volcanol. Geotherm. Res. 165, 5–16
- Carapezza M. L., Granieri D., (2004)
CO2 soil flux at Vulcano (Italy): comparison between active and passive methods
 Appl. Geochem., 19: 73-88.
- Carapezza M.L., Barberi F., Ranaldi M., Ricci T., Tarchini L., Barrancos J., Fischer C., Granieri D., Lucchetti C., Melian G., Perez N., Tuccimei P., Vogel A., Weber K.,(2012)
Hazardous gas emission from the flanks of the quiescent Colli Albano volcano (Rome, Italy)
 Applied Geochemistry 9/27.
- Carapezza, M.L., Barberi, F., Tarchini, L., Ranaldi, M., Ricci, T., (2010)
Volcanic hazard of the Colli Albani
 In: Funicello, R., Giordano, G. (Eds.), *The Colli Albani Volcano*.
 IAVCEI Spec. Publ. 3, Geological Society, London, pp. 279–297.
- Carrera, G., Garavaglia, M., Magnoni, S., Valli, G. and Vecchi, R., (1997)
Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Stony Materials
 Journal of Environmental Radioactivity 34, 149-159.
- Castelluccio M., Giannella G., Lucchetti C., Moroni M., Tuccimei P. (2012)
La classificazione della pericolosità da radon nella pianificazione territoriale finalizzata alla gestione del rischio
 Italian Journal of Engineering Geology and Environmental.
- Castelluccio M. (2010)
Studio del soil radon nel test-site della Valle della Caffarella (Roma)
 Tesi di dottorato.
- Chiodini, G., Frondini, F., (2001)
Carbon dioxide degassing from the Alban Hillsvolcanic region, Central Italy.
 Chem. Geol. 177, 67–83.

Ciotoli G., Etiopo G., Lombardi S., Naso G., Tallini M., (1993)
Geological and soil-gas investigation for tectonic prospecting: preliminary results over the Val Roveto Fault (central Italy) *Geologia Romana*, 29, 483-493.

Ciotoli G., Etiopo G., Gambino P., Lombardi S., (1994)
Elio e radon nei gas del suolo quali traccianti di discontinuità tettoniche: confronto con l'analisi del campo di fratturazione nella Valle dell'Ofanto (Appennino Meridionale)
Geologica Romana, 761-768.

Ciotoli, G.; Guerra, M.; Lombardi, S. & Vittori, E., (1998).
Soil gas survey for tracing seismogenic faults: a case-study the Fucino basin (central Italy).
J. Geophys. Res., 103B, 23781- 23794.

Cinti D., Poncia P.P., Procesi M., Galli G., Quattrocchi F., (2013)
Geostatistical techniques application to dissolved radon hazard mapping: An example from the western sector of the Sabatini Volcanic District and the Tolfa Mountains (central Italy)
Appl. Geochem., <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.05.005>.

Civita M. (2005)
Idrogeologia applicata e ambientale
Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2005, pp. 27-38.

Cox M.E., (1980)
Ground radon survey of a geothermal area in Hawaii
Geophys. Res. Lett., 7, 283-286.

Dall'Aglio, M., Duchi, V., Minissale, A., Guerrini, A., Tremori, M., (1994)
Hydrogeochemistry of the volcanic district in the Tolfa and Sabatini Mts in central Italy
J. Hydrol. 154, 195–217.

Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomá ek L., Whitley E., Wichmann H.E., Doll R. (2005)
Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies
British Medical Journal, vol. 330, pp. 223-227.

Decreto Legislativo n. 230 del 17 marzo 1995
Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti
Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 136 del 13 giugno 1995 – Serie generale.

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
Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 203 del 31 agosto 2000 – Serie generale, pp. 1-235.

Decreto Legislativo n. 257 del 9 maggio 2001
Disposizioni integrative e correttive del Decreto Legislativo n. 241 del 26 maggio 2000
Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 153 del 4 luglio 2001 – Serie generale, pp. 9-25.

De Rita D., Funicello R., Rosa C. (1988)
Caratteristiche deposizionali della II c.p. del Tuscolano-Artemisio (complesso vulcanico dei Colli Albani)
Bollettino del Gruppo Nazionale per la Vulcanologia, pp. 278-298.

De rita D., Bertagnini A., Faccenna C., Landi P., Di Filippo M., Carboni M.G., (1997)
Evoluzione geopetrografica – strutturale dell'area Tolfa-Tuscolano
Boll. Soc. Geol. It., 116, 143 – 175.

Determinazione n 920 del gennaio 2012 della Regione Lazio
Aree indiziate di emissione pericolosa di anidride carbonica nei territori dei Comuni di Castel Gandolfo, Ciampino, Marino e Roma (Municipi X, XI, XII). Nuove direttive agli uffici regionali competenti ai fini del rilascio dei pareri ai sensi dell'art. 89 del D.P.R. 380/01.

De Martino S., Sabbarese C., Monetti G. (1998)
Radon Emanation and Exhalation Rates from Soils Measured with an Electrostatic Collector
Applied Radiation and Isotopes Vol. 49, pp 407 – 413.

Di Filippo M., Toro B., (1980).
Analisi gravimetrica delle strutture del Lazio meridionale.
Geol. Rom., 19: 285-294.

Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996
Protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti
Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea L 159 del 26 giugno 1996.

Dragonte F., Maino A., Malatesta A., Segre A.G., (1967)
Carta geologica foglio 149 Cerveteri, scala 1:100000
Note illustrative della carta geologica d'Italia. Servizio Geologico d'Italia.

Dubois G. (2005)
An overview of radon surveys in Europe
Radioactivity Environmental Monitoring - Emissions and Health Unit - Institute for Environment and Sustainability – Joint Research Center - European Commission - EUR 21892 EN.

Dyck W. (1974)
Gases and their relevance to mineral exploration
Geol. Survey Can., Paper 74-1A, 61; Paper 74-1B, 57-59.

Etioppe G., (1995)
Migrazione e comportamento del "geogas" in bacini argillosi.
Tesi di dottorato.

Faccenna C., Funicello R., Marra F., (1995)
Inquadramento geologico-strutturale dell'area romana.
In: "La geologia di Roma. Il centro Storico". Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, 50, 31-47.

Faive-Pierret, R., Le Guern, F., (1983)
Health risks linked with inhalation of volcanic gases and aerosols
In: H. Tazieff and J.C. Sabroux (Editors), *Forecasting Volcanic Events*
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 69-81.

Fazzini P., Gelmini R., Mantovani M.P., Pellegrini M., (1972)
Geologia dei Monti della Tolfa (Lazio settentrionale; Prov. Di Roma e viterbo)
Mem. Soc. Geol. It., 11, 65 – 144.

Fleischer R.L., Mogro-Campero A., (1978)
Mapping of integrated radon emanation for detectig of long-distance migration of gases within the earth: techniques and principles
J. Geophys. Res., 83/B7, 3539-3459
Fleischer R.L., Hart H.R., Mogro-campero A., (1979)
Radon enhancement in the earth: evidence for intermittent upflows?
Geophys. Res. Lett., 361-364.

Fornaseri, M., Scherillo, A., Ventriglia, U., (1963)
La regione vulcanica dei Colli Albani (Vulcano Laziale)
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma. 550 pp.

Funiciello, R., Giordano, G., De Rita, D., Carapezza, M.L., Barberi, F., (2002)
L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo. Rend. Acc. Lincei 9-13, 113–143.

Funiciello R., Parotto M. (1978)
Il substrato sedimentario nell'area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale
Geologica Romana, vol. 17, pp. 233-287.

Funiciello R., Giordano G. (2005)
Carta geologica del Comune di Roma – Volume 1 – scala 1:10.000
Comune di Roma – Ufficio di Protezione Civile
Università degli Studi Roma Tre – Dipartimento di Scienze Geologiche
APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici).

Gascoyne M. (1992)
Geochemistry of the actinides and their daughters
In: *Uranium-series disequilibrium: application to earth, marine and environmental sciences* -Ivanovich M., Harmon R. S.
Oxford Sciences Publication, Oxford, 1992 - pp. 34-61.

Gerlach T.M.J., Graeber E.J., (1985)
Volatile budget of Kilauea volcano
Nature, 313, 273-277.

Giggenbach W.F., Minissale A.A., Scandiffio G., (1988)
Isotopic and chemical assessment of geothermal potential of the Colli Albani area, Latium region, Italy
Appl. Geochem., 3: 475-486.

Giordano G., the CARG team (2010)
Stratigraphy, volcano tectonics and evolution of the Colli Albani volcanic field. In: The Colli Albano volcano (Funiciello R., Giordano G.)
Special publication of the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, No. 3 - Geological Society, London, 2010, pp. 43-97.

Giraudi C., Tata C., Paroli L., (2007)
Carotaggi e studi geologici a Portus: il delta del Tevere dai tempi di Ostia Teberina alla costruzione dei porti di Claudio e Traiano
Journal of Fast on Line – Fasti on Line Documents e Research – 80.

Grenthe I., Fuger J., Konings R.J.M., Lemire R.J., Muller A.B., Nguyen-Trung C., Wanner H. (1992)
Chemical thermodynamicism of uranium
Nuclear, North-Holland; 1992.

Gold T., Soter S., (1980)
The deep earth-gas hypothesis
Scient. Am., 130-138.

Hakl J., Csige I, Hunyadi I., (1996)
Radon transport in fractured porous media – experimental study in caves
Environmental International vol. 22, suppl. 1, s433-s437.

Harley J.H. (1975)
“*Environmental radon*” in “*The noble gases*”
Moghissi A.A. and Stanley R.E. Eds.
U. S. Government Printing Office Washington, D. C.

Illing V. C., (1933)
Migration of oil and natural gas
Inst. Petroleum Technology Jour., 229-274.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) Publication 60 (1990)
Recommendations of the International Commission on Radiological Protection - Users' edition
Pergamon Press, Oxford, 1990.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) Publication 65 (1994)
Protection against radon-222 at home and at work
Pergamon Press, Oxford, 1994.

Iskandar D., Yamazawa H., Iida T. (2004)
Quantification of the dependency of radon emanation power on soil temperature
Applied Radiation and Isotopes, vol. 60, pp. 971–973.

Johner H.U., Surbeck H. (2001)
Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction
The Science of the Total Environment, vol. 272, pp. 337-341.

Jones V.T., Drozd R.J., (1983)
Prediction of oil or gas potential by near-surface geochemistry
AAPG Bull 67.

- Jostes R.F. (1996)
Genetic, cytogenetic, and carcinogenic effects of radon: a review
Mutation Research, vol. 340, pp. 125-139.
- Keller, G., Hoffmann, B. and Feigenspan, T., (2001).
Radon permeability and radon exhalation of building materials
Science of the Total Environment 272, 85-89.
- Kouznetsov O., Sidorov V., Katz S., Chilingarian G., (1994)
Interrelationships among seismic and short-term tectonic activity, oil gas production, and gas migration to the surface
Journal Petrol. Sci and Engineering, 13, 57-63.
- Laubmeyer G., (1933)
A new geophysical prospecting method, especially for deposit of hydrocarbons
Petroleum, 29, 1-4.
- Langmuir D., Herman J.S. (1980)
The mobility of thorium in natural water at low temperature
Geochemical et Cosmochimical Acta, vol. 44, pp. 1753-1766.
- Legge Regionale del Lazio n. 14 del 31 marzo 2005
Prevenzione e salvaguardia dal rischio gas radon
Bollettino Ufficiale della Regione Lazio n. 10 del 9 aprile 2005.
- Leythaeuser D., Schaefer R.G., Yüklér A.,
Role of diffusion in primary migration of hydrocarbon
AAPG Bull, 408-429.
- Lovley D., Phillips E.J.P., Gorby Y.A., Landa E.R. (1991)
Microbial reduction of uranium
Nature, vol. 350, pp. 413-416.
- Menetrez M.Y., Mosley R.B. (1996)
Evaluation of radon emanation from soil with varying moisture content in a soil chamber
Environment International, vol. 22 (1), pp. 447-453.
- Minissale A., (2004)
Origin, transport and discharge of CO₂ in Central Italy
Earth Reviews 66, 89-141.

Morawska L., Philips C. R., (1993)
Dependence of the Radon Emanation Coefficient on Radium Distribution and Internal Structure of the Material
Geochimica et Cosmochimica Acta Vol. 57, pp. 1783.

Minkin L., Shapovalov A.S., (2008)
Indoor radon entry: 30 years later
Iranian Journal of Radiation Research, vol. 6 (1), pp. 1-6.

Muskat M., (1946)
The flow of homogeneous fluids through porous media
J.W. Edwards Inc. – Ann Arbor. Michigan.

Nazaroff W.W., Nero A.V., (1988)
Radon and its decay products in indoor air
Wiley Interscience Publications, New York, 1988.

Nero A.V., (1989)
Earth, air, radon and home
Physics Today, vol. 42, pp.32-39.

Neznal M., Neznal M., Matolín M., Barnet I., Miksova J. (2004)
The new method for assessing the radon risk of building sites
Czech Geological Survey Special Papers, CGS Prague.

Neznal M., Neznal M., Šmarda J. (1996)
Assessment of radon potential of soils – A five-year experience
Environment International, vol. 22 (1), pp. 819-828.

Neznal M., Neznal M. (2005)
Permeability as an important parameter for radon risk classification of foundation soils
Annals of Geophysics, vol.48, pp. 175-180.

Oliver M.A., Badr I. (1995)
Determining the spatial scale of variation in soil radon concentration
Mathematical Geology, vol. 27(8), pp. 893-922.

Pan, V., Holloway, J.R., Hervig, R.L., (1991)
The pressure and temperature dependence of carbon dioxide solubility in tholeiitic basalt melts.
Geochim. Cosmochim. Acta 55, 1587–1595.

- Papale, P., Moretti, R., Barbato, D., (2006)
The compositional dependence of the multicomponent volatile saturation surface in silicate melts
Chem. Geol., 229: 78-95.
- Parotto M. (1995)
La storia geologica della Caffarella
Convegno “Il Parco della Caffarella: dalla ricerca alla gestione” – Comitato per il Parco della Caffarella ed Assessorato alle Politiche Ambientali del Comune di Roma.
- Petropoulos, M.P., Anagnostakis, M.J. and Simopolous, S.E., (1999)
Building materials radon exhalation rates: ERRICA intercomparison exercise results
Science of the Total Environment 272, 109-118.
- Petrullo A.V., (2010)
Studio della presenza di gas radon nel territorio Comunale di Civitavecchia
Tesi di laurea.
- Pisent G.(1986)
Nucleo e Radioattività, gli studi sull'età della Terra e dell'Universo
Editori Riuniti, pp.41 – 46.
- Quattrocchi, F., Calcara, M., (1998)
Test-sites for earthquake prediction experiments within the Colli Albani region.
Phys. Chem. Earth 23, 915–920.
- Raccomandazione 90/143/Euratom della Commissione del 21 febbraio 1990
Tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti indoor
Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea L 80 del 27 marzo 1990.
- Ranaldi M., (2008)
Studio delle emissioni di gas in aree vulcaniche e geotermiche: implicazioni strutturali, geotermiche e di pericolosità
Tesi di dottorato.
- Richon P., Perrier F., Koirala B.P., Girault F., Bhattarai M., Sapkota S.N. (2011)
Temporal signatures of advective versus diffusive radon transport at a geothermal zone in Central Nepal
Journal of Environmental Radioactivity, vol. 102, pp. 88-102.

Risorse RpR spa (2007)
Corridoio della Mobilità C5 – Fiumicino – Fiumicino Porto - Ostia
Relazione Geologica.

Rivista Opera Ipogea n° 3 (1999)
Gli ipogei minori della Caffarella (Roma)
Società Speleologica Italiana

Sasaki T., Gunji Y., Okuda T. (2004)
Mathematical modeling of radon emanation
Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 41(2), pp. 142-151.

Schubert M., Schulz H. (2002)
Diurnal radon variations in the upper soil layers and at the soil-air interface related to meteorological parameters
Health Physics, vol. 83 (1), pp. 91-96.

Schumann R.R., (1993).
The radon emanation coefficient: an important tool for geologic radon potential estimations
The 1993 International Radon Conference Proceedings. Volume IV, 40-47.

Soligo M., Tuccimei P. (2010)
Geochronology of Colli Albano volcano. In: *The Colli Albano volcano* (Funicciello R., Giordano G.)
Special publication of the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, No. 3 - Geological Society, London, 2010, pp. 99-106.

Stranden E., Kolstad A.K., Lind B. (1984)
The influence of moisture and temperature on radon exhalation
Radiation Protection Dosimetry, vol. 7, pp. 55-58.

Sundal A.V., Henriksen H., Soldal O., Strand T. (2004)
The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway
Science of the Total Environment, vol. 328, pp. 41-53.

Tanner A. B., (1959)
Meteorological influence of radon in drill holes
Mining Engineering, 706-70.

Tommasino L. (1998)
Radon
Encyclopedia of Analytical Science, pp.4359-4368, Academic Press Limited.

Tuccimei P., Castelluccio M., Soligo M., Moroni M. (2009)
Radon exhalation rates of building materials: experimental, analytical protocol and classification criteria
In: *Building materials: properties, performance and applications* - Autori vari
Nova Science Publishers - Hauppauge, NY, 2009 - cap. 7.

Tuccimei P., Moroni M., Norcia D. (2006)
Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: influence of particle size, humidity and precursors concentration
Applied Radiation and Isotopes, vol. 64, pp. 254-263.

Tuccimei, P., Soligo, M., (2007)
Correcting for CO₂ interference in soil radon flux measurements
Radiat. Measure. 43, 102–105.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
(2000)
Sources and effects of ionizing radiation – Report 2000
Journal of Radiological Protection, vol. 21 (1), pp. 83-85.

Vanga G., (2009)
Studio e caratterizzazione di elementi chimici di interesse radioprotezionistico in matrice di natura biologica e ambientale
Tesi di dottorato.

Ventriglia U. (1990)
Idrogeologia della Provincia di Roma – Regione vulcanica dei Colli Albani
A cura dell'Amministrazione Provinciale di Roma - Assessorato LL.PP. Viabilità e Trasporti. Abete Grafica, Roma, 1990.

Ventriglia U. (1990)
Idrogeologia della Provincia di Roma – Regione vulcanica dei Colli Albani
A cura dell'Amministrazione Provinciale di Roma - Assessorato LL.PP. Viabilità e Trasporti. Abete Grafica, Roma, 1990.

Ventriglia U., (2002)
Geologia del territorio del Comune di Roma
Provincia di Roma – Servizio Geologico, Difesa del Suolo
Università degli Studi Roma Tre – Dipartimento di Scienze Geologiche.

Voltaggio M., Masi U., Spadoni M., Zampetti G. (2006)
A methodology for assessing the maximum expected radon flux from soils in northern Latium (central Italy)
Environmental Geochemistry and Health, vol. 28 (6), pp. 541-551.

Voltattorni N., Sciarra A., Quattrocchi F., (2003)
The application of soil gas technique to geothermal exploration: study of "hidden" potenzial geothermal system
ING, final report.

Wiegand J. (2001)
A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters
Environmental Geology, vol. 40, pp. 949-963.

Winkler R., Ruckerbauer F., Bunzl K. (2001)
Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations
The Science of the Total Environment, vol. 272 (1-3), pp. 273-282.

Young D. H., (1993)
Elaborazione statistica dei dati sperimentali
Veschi Editore Roma 1993.

Zuppi, G.M., Fontes, J.C., Letolle, R., (1974)
Isotopes du milieu et circulation d'eaux sulfurees dans le Latium *Isotope Techniques*
in Groundwater Hydrology, vol. 1. IAEA Editor, Vienna, pp. 341– 361.

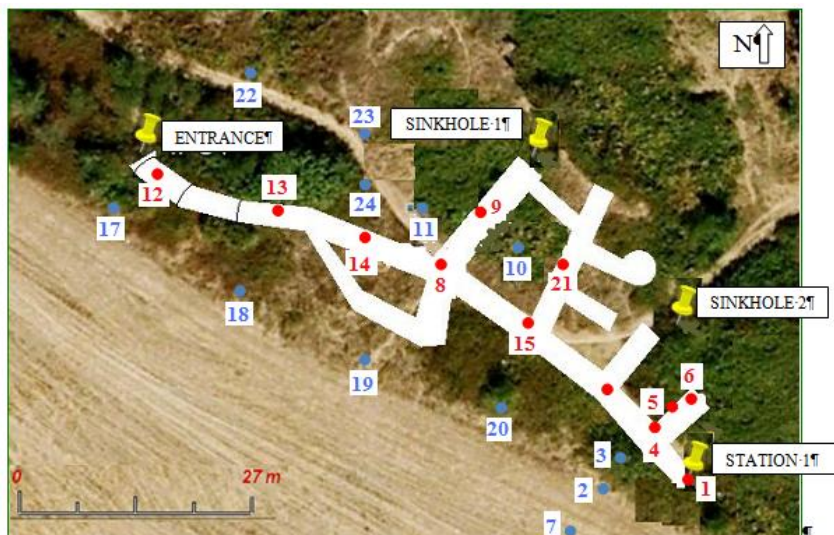
Sitografia

- [1] <http://www.fis.unical.it/~ferdos/utility/radonambientale.doc>
- [2] <http://www.iapht.unito.it>
- [3] <http://www.apat.cov.it>
- [4] <http://www.ispesl.it/osservatorio/pdf/radon.pdf>
- [5] <http://www.wise-uranium.org/rdcumh.html>
- [6] <http://www.edilitaly.com/radon/risanamento.php3>
- [7] http://www.iss.it/binary/tesa/cont/PNR_Raccomandazione.pdf
- [8] <http://www.ispesl.it/campagnaAbruzzo/documenti/2010DispensaRinaldini.pdf>
- [9] <http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon/3.html>
- [10] <http://www.parcoappiaantica.it/it/pdf/PATRIMONIOIDRO.pdf>
- [11] <http://www.durridge.com/documentation/R7MANV7.pdf>
- [12] <http://www.draeger.com>
- [13] <http://www.parcoappiaantica.it>

ALLEGATI

Allegato A

Ubicazione dei punti di misura al di sopra della cavità sotterranea e dove essa non risulta presente nel sito d'indagine di Tor Marancia (1 di 3).



Risultati delle misure nel suolo effettuate a 80 cm dal piano campagna al di sopra della cavità sotterranea (2 di 3).

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Punti di misura sopra la cavità sotterranea								
1	293197	4636265	65350	2070	251300	11850	1,4	1,7E ⁻¹¹
4	293191	4636270	70500	2680	147840	12350	1,2	7,3E ⁻¹²
5	293193	4636274	55900	1920	161700	14500	1,0	3,8E ⁻¹¹
6	293194	4636275	71200	2220	309360	17990	1,2	3,0E ⁻¹¹
8	293164	4636284	61200	3100	156670	10500	2,0	3,0E ⁻¹¹
9	293168	4636292	52470	2430	75980	8560	1,6	3,8E ⁻¹¹
12	293128	4636290	28190	3600	195950	7460	0,6	2,0E ⁻¹¹
13	293144	4636287	25200	1800	178890	7900	0,4	1,8E ⁻¹¹
14	293154	4636286	37800	2340	183670	7650	0,6	1,1E ⁻¹¹
15	293175	3636280	62800	3870	181750	7600	1,2	2,5E ⁻¹¹
16	293185	4636274	49150	4200	165130	11150	1,4	2,2E ⁻¹¹
21	293178	4636287	55360	2690	206000	17100	0,8	7,3E ⁻¹²

Risultati delle misure nel suolo effettuate a 80 cm dal piano campagna, dove non risulta presente la cavità sotterranea (3 di 3).

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Punti di misura dove non è presente la cavità sotterranea								
2	293188	4636262	42450	1940	375270	21800	1,8	1,5E ⁻¹¹
3	293189	4636266	45100	2580	293810	16640	1,0	3,2E ⁻¹²
7	293185	4636254	28150	1370	271140	13800	1,8	4,3E ⁻¹²
10	293173	4636287	43200	2090	297600	13160	1,0	1,8E ⁻¹¹
11	293160	4636290	46760	2120	299500	13170	0,6	1,7E ⁻¹¹
17	293123	4636283	36230	1980	290290	12870	1,2	1,1E ⁻¹¹
18	293141	4636277	43240	2130	153230	8800	0,8	2,6E ⁻¹¹
19	293157	4636272	36100	1950	179770	9800	1,0	3,2E ⁻¹¹
20	293175	4636266	34580	1930	277340	13700	0,6	9,2E ⁻¹²
22	293136	3636303	43400	2190	290400	15700	0,8	1,8E ⁻¹¹
23	293154	4636296	45600	2220	295600	12860	1,1	3,3E ⁻¹¹
24	293151	4636291	50100	2340	290300	15600	1,4	3,6E ⁻¹²

Allegato B

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn e CO₂ a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa RPS3 presente all'interno della Valle della Caffarella.

(coordinate WGS84: 294454 – 4637618).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)
Gen.11	119500	2820	135100	13020	
Feb.11	117000	2800	143180	12590	
Mar.11	126500	4540	144190	12200	
Apr.11	127000	5130	183800	11500	1,2
Mag.11	77650	3380	213590	15300	
Giu.11	37500	2800	244050	9720	
Lug.11	29650	1240	265920	10100	
Ago.11	35150	2550	238070	30750	
Set.11	67250	2550	286450	14960	

Periodo di misura	²²²Rn (Bq/m³)	Errore ²²²Rn ± (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	Errore ²²⁰Rn ± (Bq/m³)	CO₂ (vol. %)
Ott.11	133500	2970	227890	16580	0,8
Nov.11	132000	3310	192140	14240	0,8
Dic.11	133000	5090	204160	12790	0,6
Gen.12	123000	6380	173530	14800	0,2
Feb.12	133000	2950	171260	12200	0,2
Mar.12	127500	5190	203817	14690	0,8
Apr.12	130000	4380	217630	19040	0,6
Mag.12	87100	1630	257360	12470	2,0
Giu.12	20500	1400	277000	10140	1,6
Lu.12	32000	1300	253750	7290	0,8
Ago.12	29700	2700	242000	8690	0,8
Set.12	44000	2950	259500	12050	0,8
Ott.12	108670	4300	300340	13290	1,0
Nov.12	129500	3800	199470	10170	1,2
Dic.12	115400	4250	216330	19600	0,6
Gen.13	129500	2800	170000	7200	0,6
Feb.13	118500	3070	182400	9970	0,4
Mar.13	139000	3250	184460	15690	0,2
Apr.13	140500	3450	277500	9300	0,6
Mag.13	133000	3200	179280	8890	0,8
Giu.13	126400	1300	207650	9970	1,3
Lug.13	31600	2470	290700	18690	2,0
Ago.13	73200	2640	262120	8100	1,2
Set.13	69000	2350	256880	11990	1,4

Allegato C

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO_2 e della permeabilità intrinseca a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa C1_80 presente all'interno della Valle della Caffarella.

(coordinate WGS84: 294433 - 4637584).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO_2 (vol.%)	k (m ²)
Gen.11	104000	4100	415080	24130		5,1E ⁻¹²
Feb.11	129750	4440	475200	26720		1,7E ⁻¹¹
Mar.11	97850	2850	419540	19990		1,7E ⁻¹¹
Apr.11	77700	2750	499260	31390	1,7	1,4E ⁻¹¹
Mag.11	86600	4250	525090	20400		2,1E ⁻¹¹
Giu.11	74950	2770	539340	18830		8,1E ⁻¹²
Lug.11	72350	3240	573630	19600		7,9E ⁻¹²
Ago.11	61425	5300	501930	38340		5,8E ⁻¹²
Set.11	85250	2320	544690	32850		5,9E ⁻¹²
Ott.11	92830	2830	469860	17840	0,9	5,9E ⁻¹²
Nov.11	141750	5630	562500	37270	1,4	6,8E ⁻¹²
Dic.11	148500	4000	628320	30500	1,3	8,1E ⁻¹²
Gen.12	169500	4350	756760	32590	1,0	3,6E ⁻¹²
Feb.12	145500	6240	614950	35880	1,1	7,1E ⁻¹²
Mar.12	84930	2920	497790	34150	1,2	1,5E ⁻¹¹
Apr.12	127000	3360	600800	32230	3,2	4,8E ⁻¹²
Mag.12	72500	2780	514420	23580	2,3	1,2E ⁻¹¹
Giu.12	55950	2270	631430	22080	0,8	7,0E ⁻¹²
Lu.12	56700	2100	513500	45650	0,8	2,9E ⁻¹²
Ago.12	55800	2220	515590	36140	0,6	5,3E ⁻¹²
Set.12	79200	2500	654900	31700	0,8	9,2E ⁻¹³
Ott.12	81000	4840	621090	41650	1,0	8,3E ⁻¹²
Nov.12	115000	2700	618200	25180	1,2	1,1E ⁻¹¹
Dic.12	122000	3280	553290	23880	1,4	4,3E ⁻¹²
Gen.13	137000	2900	577600	21880	1,6	5,4E ⁻¹²
Feb.13	136000	2830	383600	14290	1,4	1,6E ⁻¹¹
Mar.13	123000	5290	487360	24120	2,4	2,5E ⁻¹¹
Apr.13	109000	2240	596220	14260	2,4	1,7E ⁻¹¹
Mag.13	135700	4300	533530	24880	3,3	1,8E ⁻¹¹

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	k (m²)
Giu.13	137500	4200	654860	15120	3,4	9,9E ⁻¹²
Lug.13	72200	2280	533260	19790	1,2	4,3E ⁻¹²
Ago.13	82700	4920	656240	18830	2,8	5,8E ⁻¹²
Set.13	80300	3850	621180	19750	2,8	4,6E ⁻¹²

Allegato D

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e della permeabilità intrinseca a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa C1_30 presente all'interno della Valle della Caffarella.

(coordinate WGS84: 294428 - 4637583).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	k (m²)
Gen.11	81130	3440	391480	18190		1,3E ⁻¹²
Feb.11	114750	4160	357540	20110		7,2E ⁻¹²
Mar.11	71050	3850	462290	15930		2,0E ⁻¹²
Apr.11	46150	2920	436610	72890	1,5	4,1E ⁻¹²
Mag.11	44550	2070	382570	15740		3,7E ⁻¹²
Giu.11	34330	1980	396370	21400		7,8E ⁻¹²
Lug.11	33030	1520	427110	17850		2,0E ⁻¹²
Ago.11	44980	4050	439580	62200		2,6E ⁻¹²
Set.11	41100	2700	476540	18890		3,2E ⁻¹²
Ott.11	109650	2490	455170	17710	1,2	2,5E ⁻¹²
Nov.11	116750	4030	517520	21020	0,8	2,1E ⁻¹²
Dic.11	143000	3930	517190	23310	1,2	3,0E ⁻¹²
Gen.12	117250	3630	444150	19600	0,8	5,2E ⁻¹²
Feb.12	103280	3520	377890	20530	1,1	6,9E ⁻¹²
Mar.12	52700	2190	379750	17240	0,6	1,3E ⁻¹²
Apr.12	112050	3940	382410	20200	2,8	5,9E ⁻¹²
Mag.12	54900	3000	394570	14350	2,0	9,3E ⁻¹²
Giu.12	21200	1170	254500	10420	0,2	5,6E ⁻¹²
Lu.12	29850	1680	375360	10110	0,4	4,3E ⁻¹²
Ago.12	37600	1870	450240	10730	0,5	2,4E ⁻¹²
Set.12	32650	1400	424900	19410	0,6	1,7E ⁻¹²

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Ott.12	49850	2170	486190	21480	0,8	6,9E ⁻¹²
Nov.12	93350	2900	365800	14820	1,2	3,8E ⁻¹²
Dic.12	100200	2560	500410	21410	1,2	3,4E ⁻¹²
Gen.13	118500	3000	561770	18290	1,0	1,4E ⁻¹²
Feb.13	151750	6750	448500	15450	1,4	9,7E ⁻¹⁴
Mar.13	116500	3100	528000	20000	1,8	2,7E ⁻¹²
Apr.13	85500	4400	613530	27020	1,8	1,4E ⁻¹²
Mag.13	110000	3800	565120	25630	1,5	2,5E ⁻¹²
Giu.13	117000	3760	347470	15560	1,6	3,5E ⁻¹²
Lug.13	34000	2000	445230	33250	0,8	3,6E ⁻¹²
Ago.13	70000	3900	506120	22000	1,4	3,2E ⁻¹²
Set.13	71500	3120	464780	21710	1,6	3,6E ⁻¹²

Allegato E

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti di misura, a 80 cm dal p.c., del transetto di direzione NNW-SSE al di sopra della cavità sotterranea presente nella Valle della Caffarella (1 di 2).

Punto di misura	UTM WGS84 X (m)	UTM WGS84 Y (m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Periodo di misura: giugno 2012								
CV1	294457	4637523	58200	2000	554530	18000	0,6	0,10
CV2	294456	4637526	82850	3400	647670	24000	1,2	0,13
CV3	294454	4637530	93850	3000	636280	23500	1,0	0,15
CV4	294453	4637535	93850	2800	815600	35500	0,6	0,12
CV5	294453	4637542	73700	2700	675770	20900	0,4	0,11
Periodo di misura: febbraio 2013								
CV1	294457	4637523	88600	2700	348940	19800	0,8	0,25
CV2	294456	4637526	203000	3250	588700	32200	2,6	0,34
CV3	294454	4637530	207000	4700	712400	43700	2,0	0,29
CV4	294453	4637535	136000	2600	487000	18600	0,8	0,28
CV5	294453	4637542	118500	4200	522800	23500	0,8	0,23

Punto di misura	UTM WGS84 X (m)	UTM WGS84 Y (m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Periodo di misura: aprile 2013								
CV1	294457	4637523	48600	3300	203350	11800	1,6	0,24
CV2	294456	4637526	129500	2600	732600	27800	3,2	0,18
CV3	294454	4637530	144500	3200	954750	18200	2,6	0,15
CV4	294453	4637535	118500	2900	561600	44200	2,0	0,21
CV5	294453	4637542	117500	2600	897000	20900	1,0	0,13
Periodo di misura: luglio 2013								
CV1	294457	4637523	67000	2200	565800	18750	1,0	0,12
CV2	294456	4637526	106500	4600	530000	21450	1,8	0,20
CV3	294454	4637530	129200	5300	635600	25900	1,6	0,20
CV4	294453	4637535	115000	7760	730850	23760	1,0	0,16
CV5	294453	4637542	55150	7950	418350	70230	1,0	0,13

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti di misura, a 80 cm dal p.c., del transetto di direzione W-E nella Valle della Caffarella (2 di 2).

Punto di misura	UTM WGS84 X (m)	UTM WGS84 Y (m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Periodo di misura: giugno 2012								
CV6	294458	4637531	87800	6400	693700	24000	0,8	0,13
CV7	294463	4637532	73600	2500	668500	31800	1,2	0,11
CV8	294469	4637532	68000	2400	688400	22600	0,8	0,10
CV9	294473	4637532	78800	2600	617800	20800	1,0	0,13
CV10	294479	4637534	82700	2900	623400	21300	1,6	0,13
Periodo di misura: febbraio 2013								
CV6	294458	4637531	2000000	5600	509800	21500	1,8	0,39
CV7	294463	4637532	101000	4500	312000	16000	1,0	0,32
CV8	294469	4637532	220000	6700	647000	56800	2,0	0,34
CV9	294473	4637532	171000	7100	567700	29200	1,0	0,30
CV10	294479	4637534	90600	5800	530400	28200	1,2	0,17

Punto di misura	UTM WGS84 X (m)	UTM WGS84 Y (m)	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Periodo di misura: aprile 2013								
CV6	294458	4637531	129500	2500	607200	20600	2,4	0,21
CV7	294463	4637532	119000	6400	938800	48600	3,2	0,12
CV8	294469	4637532	170000	5200	746400	33600	2,8	0,23
CV9	294473	4637532	104500	5500	637500	33600	2,0	0,16
CV10	294479	4637534	98700	5200	669200	23000	2,0	0,15
Periodo di misura: luglio 2013								
CV6	294458	4637531	119000	2740	765470	24000	1,6	0,16
CV7	294463	4637532	50750	2300	400950	17400	1,6	0,13
CV8	294469	4637532	126000	2640	682640	16750	1,8	0,18
CV9	294473	4637532	96900	2260	505950	28300	1,8	0,19
CV10	294479	4637534	83300	2400	500300	29200	1,8	0,17

Allegato F

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e della permeabilità intrinseca, a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa TFF1 presente all'interno delle Terme della Ficoncella. (coordinate WGS84: 733917 - 4666906).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	k (m²)
Nov.10	174500	5773	114014	8752		
Gen.11	256500	3801	74465	7125		4,2E ⁻¹²
Feb.11	41500	1814	60499	8217		3,9E ⁻¹²
Mar.11	210500	5170	59679	9688		4,1E ⁻¹²
Apr.11	99600	5615	103860	11571		4,5E ⁻¹²
Mag.11	60950	4035	75802	8235		1,5E ⁻¹¹
Giu.11	45300	3287	50238	8358	2,0	1,7E ⁻¹¹
Lug.11	46550	1527	110451	13390		1,6E ⁻¹¹
Ago.11	131000	3632	109382	11589	2,6	2,9E ⁻¹¹
Set.11	136500	5774	105196	7649	0,6	1,4E ⁻¹¹
Ott.11	176000	4582	103147	9417	0,6	1,5E ⁻¹¹
Nov.11	240500	4988	116404	10488	1,2	1,5E ⁻¹¹
Dic.11	58400	2760	117440	11213	0,6	1,5E ⁻¹¹
Gen.12	135400	2800	107880	10524	0,8	1,5E ⁻¹¹

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	k (m²)
Feb.12	133000	11993	72822	17041	1,8	4,8E ⁻¹²
Mar.12	142500	6156	98986	16603	1,8	4,7E ⁻¹²
Apr.12	116000	3037	122980	12161	2,2	5,3E ⁻¹²
Mag.12	126000	3152	118596	9838	1,6	1,4E ⁻¹¹
Giu.12	61550	2041	97413	7539	1,0	1,7E ⁻¹¹
Lug.12	105000	4944	101518	8051	1,2	1,8E ⁻¹¹
Ago.12	120000	5230	109706	8171	2,3	1,7E ⁻¹¹
Set.12	89100	4900	107700	8471	0,8	1,9E ⁻¹¹
Ott.12	83250	5400	108300	12824	1,0	1,9E ⁻¹¹
Nov.12	72400	3200	29500	3706	1,6	2,3E ⁻¹²
Dic.12	249000	4660	81500	6824	1,2	3,1E ⁻¹²
Gen.13	361000	7550	76500	16706	1,8	2,8E ⁻¹²
Feb.13	235000	3600	73540	6647	2,2	2,4E ⁻¹²
Mar.13	147000	7700	83000	7235	2,4	2,8E ⁻¹²
Apr.13	118000	5200	108647	5529	2,1	3,2E ⁻¹²
Mag.13	105500	2600	107800	11765	3,0	3,9E ⁻¹²
Giu.13	57350	1800	111000	12059	1,4	3,4E ⁻¹²
Lug.13	75250	3680	96670	12000	1,2	2,9E ⁻¹²
Ago.13	65700	20300	97471	7482	1,0	3,0E ⁻¹²
Set.13	126700	6800	66059	6788	2,4	3,2E ⁻¹²
Ott.13	78800	4800	102176	11824	1,4	3,7E ⁻¹²

Allegato G

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO_2 e della permeabilità intrinseca, a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa TFF2 presente all'interno delle Terme della Ficoncella.

(coordinate WGS84: 733868 - 4666903).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO_2 (vol.%)	k (m ²)
Nov.10	300500	7523	24584	9774		
Gen.11	402000	6700	28994	6925		2,9E ⁻¹¹
Feb.11	928000	30323	45338	11089		2,8E ⁻¹¹
Mar.11	467500	20567	28495	7391		2,9E ⁻¹¹
Apr.11	404500	12572	31416	7775		3,0E ⁻¹¹
Mag.11	314000	6140	31853	6686		3,0E ⁻¹¹
Giu.11	213000	10428	13495	4598	3,6	3,1E ⁻¹¹
Lug.11	218500	4638	36045	7492		3,0E ⁻¹¹
Ago.11	314000	8974	32423	7187	4,2	1,4E ⁻¹¹
Set.11	305000	6848	31202	8812	1,8	2,9E ⁻¹¹
Ott.11	267500	4202	34445	4901	1,4	2,9E ⁻¹¹
Nov.11	291000	8763	31389	6248	1,2	3,2E ⁻¹¹
Dic.11	725500	27164	34400	10384	2,2	3,2E ⁻¹¹
Gen.12	470800	10240	30676	9000	1,2	3,2E ⁻¹¹
Feb.12	800000	33427	40473	9286	1,8	2,6E ⁻¹¹
Mar.12	436000	7759	33657	6299	2,0	2,9E ⁻¹¹
Apr.12	96350	3981	36706	4913	2,0	3,1E ⁻¹¹
Mag.12	436000	6535	34734	5601	2,4	2,8E ⁻¹¹
Giu.12	371500	9043	31200	8196	1,8	8,0E ⁻¹²
Lug.12	354500	12772	31645	4738	1,6	2,8E ⁻¹¹
Ago.12	275000	9450	32618	5412	3,3	2,6E ⁻¹¹
Set.12	83000	2500	33900	5941	1,4	3,2E ⁻¹¹
Ott.12	323500	5700	31800	8941	1,8	3,0E ⁻¹¹
Nov.12	170000	6300	29700	4471	1,2	2,5E ⁻¹¹
Dic.12	423500	8000	37000	4824	1,6	3,0E ⁻¹¹
Gen.13	489000	8500	34170	6588	1,6	3,0E ⁻¹¹
Feb.13	561000	9100	32330	7412	2,0	3,6E ⁻¹¹
Mar.13	255000	4680	27300	6294	2,6	2,5E ⁻¹¹

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Apr.13	350400	9700	36706	5941	3,0	2,8E ⁻¹¹
Mag.13	543750	9270	34900	6294	3,2	2,5E ⁻¹¹
Giu.13	373500	11200	23200	6294	2,4	2,0E ⁻¹¹
Lug.13	349500	10980	32700	6747	2,0	3,1E ⁻¹¹
Ago.13	650400	10200	34647	6406	2,8	2,9E ⁻¹¹
Set.13	90300	4200	31294	6029	1,4	3,3E ⁻¹¹
Ott.13	325400	11300	34471	6647	2,2	3,4E ⁻¹¹

Allegato H

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e del rapporto $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ nei punti di misura, a 80 cm dal p.c., lungo i profili ortogonali alla faglia presente a N del sito termale della Ficoncella

Punto di misura	UTM WGS84 X (m)	UTM WGS84 Y (m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Profilo 1 (a - b)								
1	733406	4667979	27000	3600	45600	9980	5,2	0,6
2	733420	4667972	54150	2400	17750	3560	4,8	3,1
3	733433	4667964	46800	1780	18170	2960	7,2	2,6
4	733446	4667955	37000	1400	32460	3370	6,8	1,1
5	733460	4667946	54370	1750	18300	3400	10,0	3,0
6	733472	4667933	52850	1700	9820	2000	7,4	5,4
7	733485	4667923	33300	1100	15500	1700	4,8	2,1
8	733498	4667913	24400	2000	37500	5500	4,4	0,7
9	733512	4667904	27500	1240	45900	4300	3,4	0,6
Profilo 2 (c - d)								
1	733270	4668151	9400	730	74600	4380	1,3	0,13
2	733287	4668156	9500	680	66920	5060	1,3	0,14
3	733305	4668162	12000	1850	51000	5780	2,2	0,24
4	733323	4668163	7000	950	67460	4700	1,2	0,10
5	733338	4668166	9760	680	83060	4830	1,6	0,12
6	733355	4668167	8000	850	57800	5100	1,0	0,14
7	733369	4668170	14150	870	69800	23000	2,4	0,20
8	733382	4668176	10560	1750	49770	4400	3,4	0,21
9	733394	4668180	17600	1130	83000	7760	3,2	0,21

Punto di misura	UTM WGS84 X (m)	UTM WGS84 Y (m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Profilo 3 (e - f)								
1	733567	4667575	10300	1300	60700	6200	1,2	0,17
2	733589	4667589	9200	900	54000	5900	1,4	0,17
3	733612	4667601	5700	570	58800	4000	1,8	0,10
4	733633	4667613	21700	1000	47900	4900	4,8	0,45
5	733654	4667624	26500	1200	33250	4300	5,4	0,80
6	733673	4667638	12100	960	28900	3600	1,8	0,42
7	733692	4667650	17400	1800	82500	11200	1,2	0,21
8	733712	4667664	14250	850	133400	6700	1,4	0,11
9	733740	4667677	15600	1200	110300	4700	1,4	0,14

Allegato I

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e della permeabilità intrinseca a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa VF1 presente all'interno nell'area di studio di Vigna Fiorita. (coordinate WGS84: 302443 - 4627922).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Feb.11	59750	2810	103504	10702		
Mar.11	78500	3074	122031	9500		2,7E ⁻¹¹
Apr.11	59550	1886	167191	8068	3,6	9,8E ⁻¹³
Mag.11	71100	2779	205225	11661	3	8,2E ⁻¹²
Giu.11	35000	2870	108028	12318	5	1,4E ⁻¹¹
Lug.11	49800	2263	235421	13397	6,0	1,5E ⁻¹¹
Ago.11	71650	2592	236223	10405	6,2	1,5E ⁻¹¹
Set.11	58450	2098	268824	13652	6,0	1,7E ⁻¹¹
Ott.11	72950	2085	253058	13177	5,4	1,7E ⁻¹¹
Nov.11	84850	2894	230789	14895	7,0	1,6E ⁻¹¹
Dic.11	108500	4377	148722	10253	7,8	5,5E ⁻¹²
Gen.12	91250	3534	160086	11400	4,2	8,6E ⁻¹²
Feb.12	95050	2765	149756	11194	3,2	7,6E ⁻¹²
Mar.12	75850	2972	159070	13685	4,4	9,2E ⁻¹²
Apr.12	83450	2209	226512	10989	4,4	1,3E ⁻¹¹
Mag.12	63150	3569	218557	9694	5,0	1,3E ⁻¹¹

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Giu.12	58250	1897	238816	13816	5,6	1,4E ⁻¹¹
Lug.12	37400	1365	179884	12394	5,2	1,4E ⁻¹¹
Ago.12	40500	1400	197471	12941	4,7	1,5E ⁻¹¹
Set.12	60500	3780	250900	19500	5,6	1,6E ⁻¹¹
Ott.12	77500	2900	196941	17765	5,1	1,8E ⁻¹¹
Nov.12	90000	2200	180100	10059	3,6	3,5E ⁻¹²
Dic.12	95600	2300	197400	10588	5,4	3,3E ⁻¹²
Gen.13	85700	2190	168700	9000	2,4	5,2E ⁻¹²
Feb.13	80500	1900	149600	10353	2,2	5,9E ⁻¹²
Mar.13	83100	3000	157000	9218	2,8	5,4E ⁻¹²
Apr.13	65400	2130	176000	10294	3,2	1,1E ⁻¹¹
Mag.13	82300	3500	134471	8941	4,8	2,5E ⁻¹²
Giu.13	60400	2650	215800	11294	3,6	1,1E ⁻¹¹
Lug.13	55400	4400	253550	16353	4,0	1,5E ⁻¹¹
Ago.13	64700	3540	288000	15176	4,4	5,6E ⁻¹²
Set.13	69700	3600	273941	14294	4,9	5,4E ⁻¹²
Ott.13	78600	3600	194118	14294	5,4	7,6E ⁻¹²
Nov.13	104350	11100	185640	16053	7,6	5,3E ⁻¹²

Allegato L

Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn , ^{220}Rn , CO₂ e della permeabilità intrinseca a 80 cm dal p.c., nella stazione fissa VF2 presente all'interno nell'area di studio di Vigna Fiorita. (Coordinate WGS84: 302419 - 4627880).

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
Apr,11	148500	3873	61105	7655	64	2,8E ⁻¹¹
Mag,11	159000	4526	83551	9692	76	2,8E ⁻¹¹
Giu,11	125000	7350	52554	4247	76	2,8E ⁻¹¹
Lug,11	162000	3448	104216	8528	70	2,8E ⁻¹¹
Ago,11	172500	3664	97446	9839	80	2,6E ⁻¹¹
Set,11	175500	4248	129246	9135	75	2,5E ⁻¹¹
Ott,11	171500	3708	117310	11565	68	2,4E ⁻¹¹

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	k (m²)
Nov.11	174500	10001	102388	8626	64	2,8E ⁻¹¹
Dic.11	166000	3840	85125	9445	66	3,8E ⁻¹¹
Gen.12	211000	4219	100206	7142	72	2,3E ⁻¹¹
Feb.12	175667	8112	78140	8145	58	2,8E ⁻¹¹
Mar.12	155500	4136	90081	13238	66	2,9E ⁻¹¹
Apr.12	189500	3924	101278	11389	68	2,9E ⁻¹¹
Mag.12	160000	2768	96961	6502	64	2,7E ⁻¹¹
Giu.12	171000	4559	104936	9826	70	2,3E ⁻¹¹
Lug.12	145000	3787	100199	10533	70	3,0E ⁻¹¹
Ago.12	132000	3600	102353	9706	74	3,0E ⁻¹¹
Set.12	180140	4900	117400	9706	70	2,7E ⁻¹¹
Ott.12	178000	4500	109235	10000	73	2,8E ⁻¹¹
Nov.12	182500	5100	115600	13224	78	2,9E ⁻¹¹
Dic.12	170000	4900	96800	9529	76	2,8E ⁻¹¹
Gen.13	187500	3030	93700	5874	66	2,9E ⁻¹¹
Feb.13	178000	2890	81800	7471	68	3,0E ⁻¹¹
Mar.13	168670	5450	83690	7341	70	2,9E ⁻¹¹
Apr.13	176000	5200	96380	20000	70	4,0E ⁻¹¹
Mag.13	183400	5500	100353	9647	78	4,9E ⁻¹¹
Giu.13	158000	2700	91900	8565	72	1,6E ⁻¹¹
Lug.13	151000	7730	86880	9647	68	3,9E ⁻¹¹
Ago.13	174500	5300	80118	7118	74	1,8E ⁻¹¹
Set.13	180300	4370	82529	7588	78	1,9E ⁻¹¹
Ott.13	178600	5200	97294	9647	76	1,6E ⁻¹¹
Nov.13	195500	4070	101340	11400	72	1,8E ⁻¹¹

Allegato M

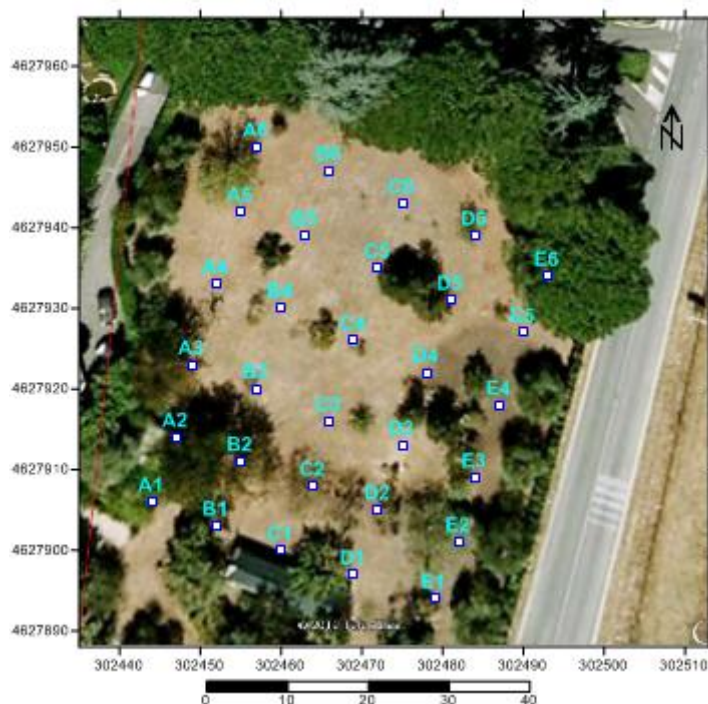
Misure delle concentrazioni di ^{222}Rn e CO_2 all'interno del pozzo presente nell'area di studio di Vigna Fiorita. Nella tabella sono riportate le variazioni nel tempo del livello statico.

(Coordinate WGS84: 302450 – 4627920)

Periodo di misura	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	Livello statico (m)
Nov.11	151330	3400	62	-10,3
Dic.11	5490	5140	45	-10,9
Gen.12	160000	3030	58	-10,8
Feb.12	139670	1180	56	-10,6
Mar.12	167500	14670	56	-10,2
Apr.12	154670	14640	60	-10,7
Mag.12	147750	1694	56	-10,8
Giu.12	132333	2437	54	-11
Lug.12	137000	2173	52	-11,1
Ago.12	98000	5400	26	-11,3
Set.12	14400	6700	8	-11,4
Ott.12	110000	8700	56	-11,2
Nov.12	129000	7200	62	-11
Dic.12	125700	6400	64	-10,7
Gen.13	132500	4960	66	-10,3
Feb.13	6270	2572	2,4	-9,5
Mar.13	132000	10500	60	-8,4
Apr.13	135400	11100	78	-8,1
Mag.13	157800	2280	84	-8,0
Giu.13	118000	11600	48	-8,6
Lug.13	113880	24780	70	-9,5
Ago.13	140300	2360	67	-10,3
Set.13	30600	3500	42	-10,4
Ott.13	90800	6000	54	-10,1
Nov.13	148000	27900	64	-10

Allegato N

Ubicazione dei punti di misura effettuati nel giardino presente nell'area di studio di Vigna Fiorita (1 di 2).



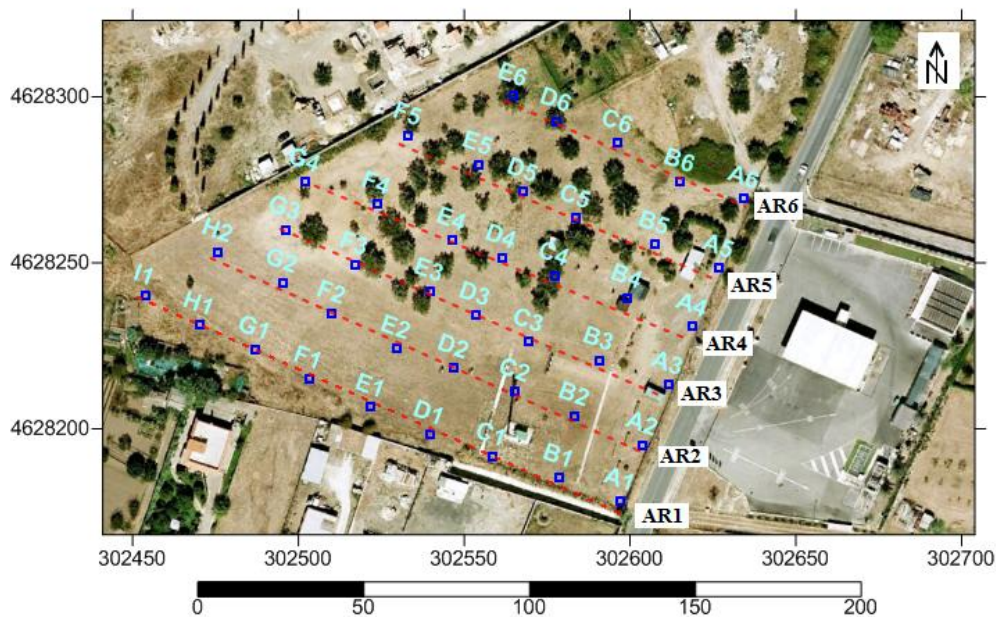
Risultati delle misure nel suolo effettuate a 80 cm dal piano campagna nel giardino dell'area di studio di Vigna Fiorita (periodo: marzo 2012) (2 di 2).

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
A1	302444	4627906	90550	2720	93050	6510	9,8	1,8E ⁻¹¹
A2	302447	4627914	71600	2150	202070	14150	4,6	3,7E ⁻¹²
A3	302449	4627923	75850	2280	150745	10550	3,2	2,0E ⁻¹²
A4	302452	4627933	86800	2600	221260	15490	4,6	1,7E ⁻¹¹
A5	302455	4627942	83850	2520	157670	11040	4,4	2,5E ⁻¹³
A6	302457	4627950	46800	1400	370725	25950	2,2	6,7E ⁻¹³
B1	302452	4627903	91350	2740	157000	10990	10,8	8,2E ⁻¹²
B2	302455	4627911	86400	2590	142450	9970	5,2	1,5E ⁻¹²
B3	302457	4627920	67400	2020	165915	11610	2,8	5,7E ⁻¹²
B4	302460	4627930	77150	2320	183627	12850	4,2	2,0E ⁻¹¹
B5	302463	4627939	107000	3210	322590	22580	4,6	1,2E ⁻¹¹
B6	302466	4627947	91400	2740	247000	17290	7,4	6,3E ⁻¹⁴
C1	302460	4627900	85250	2560	99575	6970	12,5	1,2E ⁻¹¹
C2	302464	4627908	96350	2891	137400	9618	12	1,1E ⁻¹¹
C3	302466	4627916	74850	2246	150800	10556	8,4	2,5E ⁻¹²

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	k (m ²)
C4	302469	4627926	71200	2136	152570	10680	4,2	6,2E ⁻¹²
C5	302472	4627935	58000	1740	211575	14810	4,8	4,7E ⁻¹²
C6	302475	4627943	72700	2181	191145	13380	5,2	1,3E ⁻¹¹
D1	302469	4627897	86800	2604	458225	32076	15	7,4E ⁻¹²
D2	302472	4627905	112000	3360	406745	28472	14	1,2E ⁻¹²
D3	302475	4627913	76700	2301	291380	20397	9,8	4,0E ⁻¹²
D4	302478	4627922	70100	2103	346110	24228	5,0	6,6E ⁻¹²
D5	302481	4627931	87250	2618	488840	34219	6,4	2,2E ⁻¹³
D6	302484	4627939	80650	2420	218490	15294	9,6	1,4E ⁻¹³
E1	302479	4627894	95200	2856	233825	16368	31	2,1E ⁻¹²
E2	302482	4627901	78900	2367	313160	21921	17,5	1,3E ⁻¹³
E3	302484	4627909	79250	2378	243620	17053	10,4	9,9E ⁻¹³
E4	302487	4627918	66700	2001	208970	14628	8,0	1,9E ⁻¹²
E5	302490	4627927	60950	1829	203965	14278	12,2	3,2E ⁻¹²
E6	302493	4627934	71850	2156	270630	18944	11,8	1,0E ⁻¹¹

Allegato O

Ubicazione dei punti di misura lungo i transetti effettuati nell'area del circolo sportivo degli Arcieri del Falco (1 di 2).



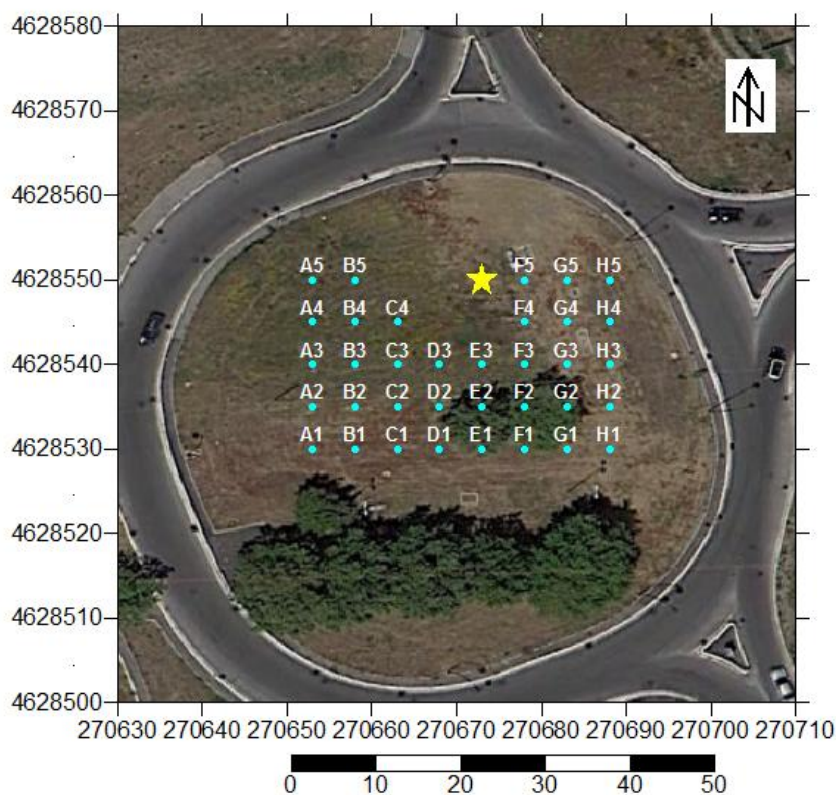
Risultati delle misure nel suolo effettuate a 80 cm dal piano campagna nell'area degli Arcieri del Falco (periodo: luglio 2013) (2 di 2).

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	²²²Rn (Bq/m³)	Errore ²²²Rn ± (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	Errore ²²⁰Rn ± (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	²²²Rn/²²⁰Rn
Transetto AR1								
A1	302597	4628178	79250	2380	196760	13770	64,0	0,40
B1	302579	4628185	31550	950	83000	5810	13,0	0,38
C1	302558	4628192	40670	1220	129780	9080	12,2	0,31
D1	302540	4628198	42000	1260	85000	5950	17,5	0,49
E1	302522	4628206	42350	1270	89600	6270	13,0	0,47
F1	302503	4628215	51000	1530	113600	7950	15,5	0,45
G1	302487	4628224	46000	1380	85900	6010	13,5	0,54
H1	302470	4628231	42100	1260	131000	9170	8,6	0,32
I1	302454	4628240	53000	1590	155000	10850	3,8	0,34
Transetto AR2								
A2	302604	4628195	107000	3210	65560	4590	76,0	1,63
B2	302583	4628204	52700	1580	92650	6490	19,5	0,57
C2	302565	4628211	27200	820	78150	5570	11,2	0,35
D2	302547	4628218	41650	1250	66660	4670	11,0	0,62
E2	302530	4628224	64250	1930	91900	6430	17,5	0,70
F2	302510	4628235	58800	1760	122300	8560	10,8	0,48
G2	302495	4628244	159500	4790	206800	14470	31,0	0,77
H2	302476	4628253	33500	1010	173100	12120	3,0	0,19
Transetto AR3								
A3	302612	4628213	76800	2300	86850	6080	56,0	0,88
B3	302591	4628221	29300	880	89500	6270	16,0	0,33
C3	302570	4628226	30850	930	144780	10130	6,6	0,21
D3	302553	4628234	34700	1040	119200	8340	7,4	0,29
E3	302540	4628241	23200	700	80000	5600	4,0	0,29
F3	302517	4628249	27800	830	94600	6620	3,6	0,29
G3	302496	4628260	39600	1190	113100	7920	8,2	0,35

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
Transetto AR4								
A4	302619	4628231	82300	2470	56360	3950	60,0	1,46
B4	302599	4628239	39800	1190	124700	8730	8,0	0,32
C4	302577	4628246	15150	460	105840	7410	2,0	0,14
D4	302561	4628251	20100	600	81200	5680	2,2	0,25
E4	302546	4628257	22600	680	92200	6450	2,0	0,25
F4	302524	4628268	15700	470	109400	7660	1,6	0,14
G4	302502	4628274	20400	610	102300	7160	1,4	0,20
Transetto AR5								
A5	302627	4628248	48800	1460	77900	5450	22,5	0,63
B5	302607	4628255	19400	580	106960	7490	3,6	0,18
C5	302584	4628263	21250	640	102720	7190	1,4	0,21
D5	302568	4628271	19100	570	90450	6330	1,2	0,21
E5	302554	4628280	15550	470	126380	8850	1,4	0,12
F5	302533	4628288	17350	520	138500	9700	1,6	0,13
Transetto AR6								
A6	302635	4628269	35450	1060	88120	6170	19,5	0,40
B6	302615	4628274	31550	950	107570	7530	4,8	0,29
C6	302596	4628286	24350	730	103850	7270	1,8	0,23
D6	302578	4628293	52500	1580	205160	14360	2,0	0,26
E6	302565	4628300	13700	410	110600	7740	1,0	0,12

Allegato P

Ubicazione dei punti di misura nella rotatoria stradale, interessata dalla presenza delle polle gorgoglianti, presso Fiumicino (1 di 2).



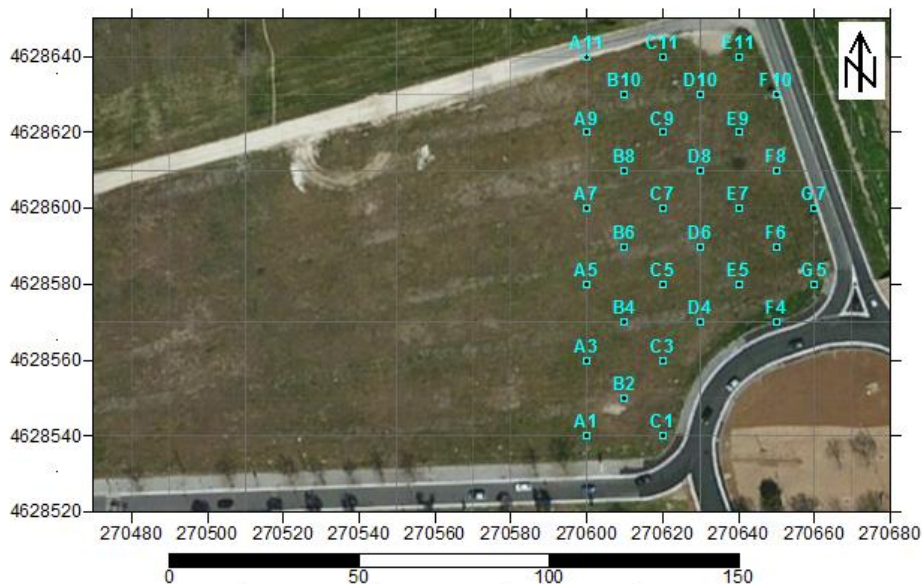
Risultati delle misure nel suolo effettuate a 50 cm dal piano campagna nell'area della rotatoria stradale, in presenza delle polle gorgoglianti (periodo: settembre 2013) (2 di 2).

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m^3)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m^3)	^{220}Rn (Bq/m^3)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m^3)	CO_2 (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
A1	270653	4628530	12160	370	90060	6300	2,2	0,14
A2	270653	4628535	12150	360	187300	13110	3,6	0,06
A3	270653	4628540	12700	380	79870	5590	4,6	0,16
A4	270653	4628545	9870	300	38100	2670	1,6	0,26
A5	270653	4628550	9550	290	19700	1380	13,0	0,48
B1	270658	4628530	15350	460	112200	7850	6,2	0,14
B2	270658	4628535	10000	300	33490	2340	9,6	0,3
B3	270658	4628540	11900	360	52000	3640	20,5	0,23
B4	270658	4628545	11500	350	74100	5190	30,0	0,16
B5	270658	4628550	10500	320	40550	2840	66,0	0,26
C1	270663	4628530	17230	520	87960	6160	5,4	0,2
C2	270663	4628535	11500	350	26980	1890	34,0	0,43
C3	270663	4628540	11850	360	107300	7510	10,4	0,11

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	²²²Rn (Bq/m³)	Errore ²²²Rn ± (Bq/m³)	²²⁰Rn (Bq/m³)	Errore ²²⁰Rn ± (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	²²²Rn/²²⁰Rn
C4	270663	4628545	16100	480	171645	12020	76,0	0,08
D1	270668	4628530	8080	240	68560	4800	4,6	0,12
D2	270668	4628535	12600	380	22200	1550	38,0	0,57
D3	270668	4628540	10350	310	61400	4300	26,0	0,17
E1	270673	4628530	8000	240	150800	10550	4,4	0,05
E2	270673	4628535	11870	360	54500	3820	32,0	0,22
E3	270673	4628540	8200	250	56400	3950	28,0	0,15
F1	270678	4628530	9400	280	50000	3500	4,4	0,19
F2	270678	4628535	13550	410	226100	15830	30,0	0,06
F3	270678	4628540	9070	270	21900	1530	18,5	0,41
F4	270678	4628545	12100	360	37800	2640	88,0	0,32
F5	270678	4628550	12750	390	38190	2670	58,0	0,33
G1	270683	4628530	6180	190	112970	7900	3,0	0,05
G2	270683	4628535	10000	300	90000	6300	15,0	0,11
G3	270683	4628540	9700	290	40000	2800	52,0	0,24
G4	270683	4628545	12950	390	18430	1290	48,0	0,7
G5	270683	4628550	10750	320	16580	1160	86,0	0,65
H1	270688	4628530	7500	230	105000	7350	3,8	0,07
H2	270688	4628535	13400	400	80200	5610	12,0	0,17
H3	270688	4628540	6300	190	106000	7420	4,0	0,06
H4	270688	4628545	17500	530	18750	1310	9,0	0,93
H5	270688	4628550	29150	880	28000	1960	60,0	1,04

Allegato Q

Ubicazione dei punti di misura nel terreno a N della rotonda stradale nell'area di studio di Fiumicino (1 di 2).



Risultati delle misure nel suolo effettuate a 50 cm dal piano campagna nel terreno a N della rotonda stradale (periodo: ottobre 2013) (2 di 2).

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	^{220}Rn (Bq/m ³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m ³)	CO ₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
A1	270600	4628540	4000	120	21070	1470	0,6	0,19
A3	270600	4628560	3950	120	20130	1400	1,4	0,2
A5	270600	4628580	2730	130	20160	1410	0,8	0,14
A7	270600	4628600	1200	110	6780	480	0,4	0,18
A9	270600	4628620	5570	170	19740	1380	4,4	0,28
A11	270600	4628640	5030	150	25760	1800	0,4	0,2
B2	270610	4628550	5700	170	6050	420	88,0	0,94
B4	270610	4628570	4440	130	19200	1340	5,8	0,23
B6	270610	4628590	3840	120	25190	1760	0,6	0,15
B8	270610	4628610	3460	100	21180	1480	1,0	0,16
B10	270610	4628630	4210	130	18280	1280	1,2	0,23
C1	270620	4628540	5780	170	21080	1480	11,2	0,27
C3	270620	4628560	2850	140	17400	1220	1,2	0,16
C5	270620	4628580	2740	110	17200	1200	1,4	0,16
C7	270620	4628600	2490	110	26070	1830	2,2	0,1
C9	270620	4628620	3920	120	19370	1360	0,2	0,2
C11	270620	4628640	3360	100	21920	1530	0,2	0,15

Punto di misura	UTM WGS84 X(m)	UTM WGS84 Y(m)	^{222}Rn (Bq/m³)	Errore $^{222}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	^{220}Rn (Bq/m³)	Errore $^{220}\text{Rn} \pm$ (Bq/m³)	CO₂ (vol.%)	$^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$
D4	270630	4628570	2900	90	19270	1350	0,6	0,15
D6	270630	4628590	3320	100	27000	1890	0,8	0,12
D8	270630	4628610	2870	90	18000	1260	0,8	0,16
D10	270630	4628630	2800	80	27380	1920	0,6	0,1
E5	270640	4628580	2920	110	22440	1570	1,2	0,13
E7	270640	4628600	4700	140	24000	1680	0,6	0,19
E9	270640	4628620	3760	110	20620	1440	0,8	0,18
E11	270640	4628640	5070	150	28050	1960	0,6	0,18
F4	270650	4628570	3430	100	27730	1940	1,6	0,12
F6	270650	4628590	3440	100	22870	1600	0,8	0,15
F8	270650	4628610	1910	90	1320	90	88,0	1,45
F10	270650	4628630	3870	110	25680	1800	0,4	0,15
G5	270660	4628580	3620	100	20420	1430	4,0	0,18
G7	270660	4628600	4590	140	20840	1460	2,0	0,22