



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

CICLO XXI

COORDINATORE Prof. Luigi Beccaluva

Rilascio di radon: problematiche di rilevamento e valutazione dei fattori di rischio

Settore Scientifico Disciplinare 04/GEO07

Dottorando

Dott.ssa Rossetti Marta

Tutore

Prof.ssa Vaccaro Carmela

Co-tutore

Dott. Bartolomei Paolo

Anni 2006/2008

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1:	
IL PROBLEMA RADON	
1.1 Il radioisotopo Radon	5
1.2 Proprietà chimico – fisiche del radon	6
1.3 Produzione e trasporto del radon	8
1.4 Il radon negli ambienti indoor	11
1.5 Effetti del radon sulla salute	12
CAPITOLO 2:	
METODI DI MISURA DEL RADON	
2.1 Tecniche di misura del radon in diverse matrici ambientali	15
2.1.1 Metodi di misura del radon in aria	17
2.2 Metodo di misura passivo del radon in aria	19
2.2.1 Caratteristiche del sistema di misura sviluppato	19
2.2.2 Confronto con laboratori europei per la validazione della metodologia adottata	22
2.3 Metodo di misura di radon in aria in continuo	24
CAPITOLO 3:	
MATERIALI E METODI: DISTRIBUZIONE DEL RADON IN EUROPA E IN ITALIA	
3.1 Stato di avanzamento delle conoscenze sull'esposizione al radon in Europa	26
3.2 Stato di avanzamento delle conoscenze sull'esposizione al radon in Italia e adempimenti delle singole regioni	27
3.2.1 La Legislazione italiana	28
3.2.2 Valutazione del rischio radon eseguita dall'Indagine Nazionale radon	29

3.2.3 Stato di avanzamento della valutazione del rischio radon delle regioni italiane	32
--	-----------

CAPITOLO 4:

RISULTATI: CAMPAGNA DI MISURE SVILUPPATA NELL'AMBITO DELLA TESI

4.1 Il protocollo di indagine adottato	34
4.2 Risultati delle misure eseguite in ambito nazionale	35
4.3 Confronto della campagna eseguita nell'ambito di tesi con i dati di letteratura	37
4.4 Stagionalità	40

CAPITOLO 5:

DISCUSSIONE DEI RISULTATI: RESTITUZIONE DEI DATI MEDIANTE GEOREFERENZIAZIONE

5.1 Metodologia adottata	43
5.2 Cartografia tematica e considerazioni geologiche	44
5.2.1 Regione Lombardia	44
5.2.1.1 Provincia di Milano	53
5.2.1.1.1 Origine delle elevate concentrazioni di uranio in alcuni livelli sedimentari della pianura lombarda	56
5.2.1.1.2 Mobilità e trasporto dell'uranio	58
5.2.1.2 Milano città	73
5.2.2 Regione Emilia Romagna	78
5.2.3 Regione Toscana	83
5.2.4 Regione Puglia	90
5.3 Confronto con i risultati delle campagne eseguite nella tesi con i dati regionali ARPA	96
5.4 Valutazione del comportamento radon in siti ad elevata concentrazione mediante campagne in continuo	100

CAPITOLO 6:	
IMPORTANZA DELLE MISURE IN UN LABOATORIO CON CAMERA RADON	
6.1 Matrici caratteristiche di una camera radon	104
6.2 Progetto realizzato	106
6.3 Fase di realizzazione	108
CAPITOLO 7:	
DISCUSSIONE DEI DATI E CONCLUSIONI	111
BIBLIOGRAFIA	117

INTRODUZIONE

Il radon è un gas nobile radioattivo naturale discendente dal decadimento dell'uranio, elemento radioattivo primordiale presente in concentrazioni variabili in tutta la crosta terrestre. La sua concentrazione in atmosfera è molto bassa essendone rapidamente diluito, tuttavia in alcuni ambienti chiusi può accumularsi costituendo così un elevato rischio per la salute. Il radon insieme ai suoi prodotti di decadimento è stato classificato dalla Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) come agente cancerogeno di gruppo 1 ed è considerato la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo di sigaretta.

A livello europeo il problema è stato inserito nel contesto legislativo con le normative emanate dalla Commissione Europea (Raccomandazione 90/143/Euratom e Direttiva 96/29/Euratom in materia di radon relativamente agli ambienti residenziali e di lavoro). A differenza di molti paesi europei in Italia manca una normativa che stabilisca i limiti di concentrazione nelle abitazioni, mentre per quanto riguarda gli ambienti di lavoro la normativa di riferimento è il Decreto Legislativo n. 241 del 26/05/2000 che fissa il livello d'azione in termini di concentrazione media annuale in 500 Bq/m^3 . Nel decreto è contenuta anche una disposizione che prevedeva entro 5 anni dalla data di entrata in vigore (1 gennaio 2001) l'individuazione da parte delle Regioni delle aree geografiche a rischio radon secondo le disposizioni di un'apposita commissione che ad oggi non è ancora stata insediata.

A livello nazionale l'unica campagna condotta risale al periodo 1989 – 1998 realizzata dall'APAT (ora ISPRA), dall'Istituto Superiore di Sanità e dalle ARPA regionali e ha fornito una valutazione dell'esposizione al radon per la popolazione italiana a grande scala; la concentrazione media annuale nazionale di radon è risultata pari a 70 Bq/m^3 . Il rischio legato all'esposizione al radon è noto in letteratura e numerosi studi sono stati condotti per l'individuazione delle aree a maggior rischio (radon prone areas), ma le metodologie e gli approcci utilizzati per l'identificazione dei fenomeni naturali e antropici che ne regolano la concentrazione e la diffusione indoor hanno spesso mostrato lacune. A livello nazionale ed internazionale sono state avviate numerose indagini utilizzando diversi approcci che spesso non hanno tenuto in considerazione i numerosi fattori che influenzano le concentrazioni di radon arrivando a conclusioni basate solo su campagne di misurazione indoor e senza tenere in considerazione gli aspetti geologici come la litologia, la sismica, la permeabilità e la struttura del sottosuolo che costituiscono la maggior causa di ingresso del radon negli edifici. Altre indagini che hanno prodotto carte basate soltanto sulle caratteristiche dei suoli con la suddivisione in classi litologiche sono risultate però scarsamente predittive dei livelli attesi in ambienti indoor. In Italia alcune regioni hanno autonomamente avviato delle campagne per l'identificazione delle radon prone areas ma con criteri ed approcci differenti che

consentono solo confronti parziali e soprattutto non consentono una classificazione uniforme del territorio italiano.

Scopo della tesi:

Questo lavoro di tesi affronta due problematiche la prima metodologica, la seconda relativa alla definizione del rischio radon attraverso misure eseguite in base alla metodologia sviluppata.

I problemi metodologici sono stati sviluppati secondo le seguenti azioni:

- 1) **Mettere a punto una metodologia standardizzata per le misure passive di radon:**
attualmente in Italia vengono adottati diversi metodi di indagine che non consentono il confronto fra i diversi laboratori per cui nell'ambito della tesi sono state affrontate le seguenti problematiche: a) messa a punto di un dispositivo passivo per il monitoraggio ambientale del radon indoor; b) definizione di protocolli operativi per il monitoraggio degli ambienti oggetto di misura; c) verifica delle problematiche di campionamento e misura attraverso una campagna di monitoraggio del radon indoor secondo i criteri stabiliti.
- 2) **Validazione della tecnica di misura attraverso l'adesione a un progetto di interconfronto fra laboratori internazionale:**
a differenza di altri metodi analitici la breve vita del radon non consente l'utilizzo di standard internazionali e per ovviare a questo problema si è creata una rete di laboratori che partecipano ad interconfronti che prevedono l'esposizione dei dispositivi a valori incogniti e permettono di realizzare un confronto dei risultati ottenuti.
- 3) **Progettazione scientifica di una camera radon per le misure del rilascio di materiali geologici.**
- 4) **Valutazione del comportamento del radon nelle aree ad elevato rischio attraverso l'accoppiamento di misure in continuo.**

La valutazione del rischio radon in base all'esecuzione di misure indoor è stata sviluppata attraverso le seguenti azioni:

- 1) **Analisi dello stato di avanzamento delle conoscenze del rischio radon in Italia e confronto con altri contesti europei:**
sono state analizzate le lacune normative ed è stato proposto un protocollo di analisi al fine di una migliore fruizione delle informazioni sul rischio radon, fornendo soluzioni per ovviare alle difficoltà riscontrate.

2) Campagna di monitoraggio annuale del radon indoor:

parte dei campionamenti sono stati eseguiti nel medesimo punto di misura, esponendo un primo rivelatore nel trimestre invernale e uno nei mesi successivi per ottenere un intero ciclo stagionale (annuale) e valutare l'eventuale stagionalità dei fenomeni

3) Elaborazione con tecniche geostatistiche:

i dati ottenuti nelle regioni con maggior densità di informazioni sono stati georeferenziati ed elaborati con tecniche geostatistiche per produrre carte di distribuzione della concentrazione di radon indoor

4) Integrazione delle carte di distribuzione con considerazioni geologiche:

utilizzando l'approccio recentemente utilizzato a livello internazionale, le carte elaborate sono state integrate con le conoscenze geologiche in particolare delle aree risultate a maggior rischio di rilascio di radon; questi dati integrati potranno essere elementi indispensabili per la comprensione dei fenomeni che comportano la formazione e l'emanazione del gas radon.

L'applicazione della metodologia sviluppata potrà essere utilizzata per l'adozione di azioni di rimedio mirate e per fornire suggerimenti utili a colmare le lacune della normativa nazionale.

5) Confronto fra le restituzioni cartografiche prodotte in questo lavoro e le informazioni di letteratura.

Nel primo capitolo sono esaminate le caratteristiche fisico-chimiche e le relazioni tra radon e geologia del radon ovvero i fenomeni che ne regolano e governano la produzione, l'emanazione e la diffusione in ambienti indoor, per avere così la conoscenze di base per affrontare il complesso sistema della formazione e del trasporto del radon. Verrà anche fatto un breve accenno sugli effetti del radon sulla salute.

Il secondo capitolo illustra i metodi utilizzati per la misura del radon in diverse matrici ambientali, ponendo particolare attenzione al metodo di misura del radon indoor con rivelatori passivi a tracce sviluppato per la campagna di misure svolta in ambito di tesi. Sono inoltre presentati i risultati ottenuti attraverso un interconfronto internazionale per la validazione del metodo sviluppato.

Nel terzo capitolo è illustrato lo stato dell'arte delle conoscenze per l'individuazione delle aree a rischio radon, riassumendo le tecniche di mappatura utilizzate a livello europeo ed italiano. In tale capitolo viene inoltre inquadrata la situazione odierna italiana in ambito legislativo, mettendo in evidenza l'inadeguatezza della legislatura e delle attività intraprese fino a questo momento sul territorio nazionale.

Nel capitolo quattro è descritto nel dettaglio il protocollo di indagine definito nell'ambito di tesi e proposto come metodologia idonea per lo studio delle aree a rischio di rilascio radon, inoltre sono presentati i circa 2700 dati raccolti dalla campagna di misure, elaborati con i dati pregressi messi a disposizione dalla società U-Series Srl, per un totale di circa 5400 campionamenti; i dati ottenuti su tutto il territorio nazionale sono poi confrontati con i risultati ottenuti dall'Indagine Nazionale 1989 – 1998 (APAT, ISS, ARPA).

Nel capitolo cinque sono presentate le carte di distribuzione della concentrazione di radon ottenute dai dati georeferenziati ed elaborati con tecniche geostatistiche per le regioni a maggior densità di informazioni – Emilia Romagna, Toscana, Puglia e Lombardia e i casi studio della Provincia di Milano e Milano città. Per le aree in cui si sono riscontrate criticità lo studio è stato integrato con considerazioni geologiche per la valutazione del rischio potenziale. Sono infine presentati i risultati ottenuti con misurazioni di radon in continuo in due casi studio.

Nel capitolo sei è brevemente illustrata la fase di progettazione scientifica di una camera radon ai fini del confronto del rilascio radon delle varie matrici geologiche in ambiente controllato.

CAPITOLO 1 IL PROBLEMA RADON

Nel primo capitolo vengono introdotti i concetti necessari alla comprensione del rischio legato all'esposizione al gas radon; verrà posta particolare attenzione alle sue caratteristiche fisico – chimiche, ai fenomeni che ne regolano la produzione e trasporto in relazione agli aspetti geologici e agli effetti sulla salute.

1.1 Il radioisotopo Radon

Il radon è un gas nobile radioattivo presente in natura sotto forma di tre isotopi: ^{222}Rn , ^{220}Rn (Thoron) e ^{219}Rn , prodotti rispettivamente nella catena di decadimento dell' ^{238}U (Fig. 1.1), del ^{232}Th e dell' ^{235}U . Con il termine radon s'intende normalmente il ^{222}Rn , poiché è più longevo del ^{220}Rn (^{222}Rn tempo di dimezzamento pari a 3.82 giorni, rispetto ai 55.6 secondi del ^{220}Rn) e per la scarsa abbondanza isotopica del progenitore del ^{219}Rn .

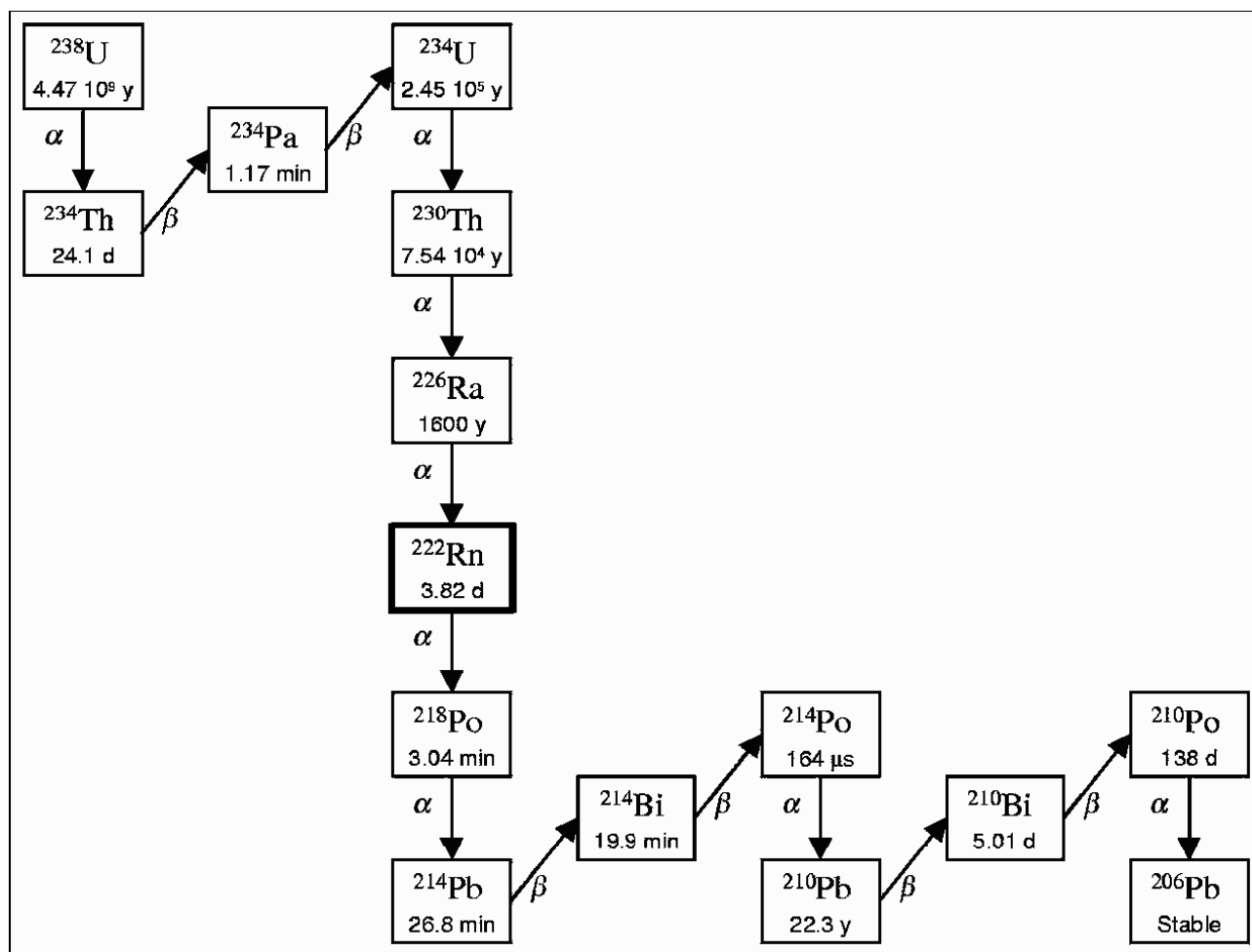


Figura 1.1: Schema di decadimento dell' ^{238}U .

La concentrazione del radon nell'ambiente é l'attività del radioisotopo in questione nell'unità di volume (Bq/m^3); successivamente con il termine concentrazione, senza ulteriori specificazioni, si intenderà la concentrazione di attività. L'esposizione al radon è invece l'integrale nel periodo di tempo considerato della concentrazione di radon: $\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$.

1.2 Proprietà chimico – fisiche del radon

Il radon è un gas nobile, incolore, inodore, pesante (con una densità pari a 0.75 volte quella dell'aria) e moderatamente solubile in acqua, che può quindi rappresentare un veicolo importante per il trasporto del radon anche a grandi distanze dal luogo di formazione (Tab 1.1).

Proprietà	Valore
Numero atomico Z	86
Punto di ebollizione a temperatura e pressione normali	- 61,8 °C
Densità a temperatura e pressione normali	9,96 Kg/m^3
Coefficiente di solubilità in acqua alla temperatura di:	
0 °C	0,57
20 °C	0,250
37 °C	0,167
100°C	0,106
Coefficiente di solubilità a pressione atmosferica e 18 °C in:	
Esano	16,56
Olio di oliva	29,00
Petrolio (paraffina liquida)	9,20
Toluene	13,24

Tabella 1.1: Proprietà chimico - fisiche del radon (Tommasino, 1998).

La quantità di radon esalata dalle rocce dipende essenzialmente da due fattori: il loro contenuto di uranio e la permeabilità. L'uranio si trova in tutte le rocce e suoli in concentrazioni variabili in dipendenza della composizione chimica e del processo di genesi e formazione; è presente soprattutto nelle rocce magmatiche, in particolare in quelle intrusive acide come i graniti. Durante la cristallizzazione magmatica come ione $4+$ l'uranio tende a concentrarsi nel fuso residuale ed è quindi più abbondante nelle rocce acide, ovvero più ricche di silice, ad esempio graniti e rioliti (Tab. 1.2).

Roccia	²³⁸U (ppm)
Ultrafemiche	0.03
Rocce basiche	2.00
Gabbri	0.94 – 0.46
Rocce intermedie	1.4 – 3.0
Graniti	2.8 – 4.0
Graniti alcalini	10.0 – 100
Crosta terrestre	0.2

Tabella 1.2: Concentrazione media di ²³⁸U nelle rocce più comuni (Khan et al.)

A causa dell'affinità chimica tra fosfati ed uranio, le rocce fosfatiche tendono ad avere livelli elevati di questo elemento.

Nelle rocce metamorfiche la quantità di uranio è prevalentemente legata al tipo di roccia dalla quale ha avuto origine. Il fissaggio nelle rocce sedimentarie è invece di difficile classificazione, ad esempio l'arenaria non ne contiene grandi quantità tranne nel caso in cui vi siano miscelati scisti di materiale carbonioso, che favoriscono il fissaggio dell'uranio. Un esempio di arenaria ricca di uranio è la grovacca essendo ricca di argilla, come anche la bentonite formate per alterazione degli agenti atmosferici sulle rocce vulcaniche.

La quantità di radon non è però sempre direttamente legata alla quantità di uranio, in quanto il radio da cui discende direttamente ha un diverso comportamento geochimico, in particolare appartenendo al gruppo degli elementi alcalino-terrosi si concentra nei solfati (soprattutto nella barite) e nelle rocce sedimentarie come le argille.

I diversi processi di formazione del suolo, che non è altro che il prodotto del disfacimento del bedrock sottostante, comportano concentrazioni di uranio nel suolo generalmente diverse da quelle della crosta terrestre. In particolare per processi di "chemical weathering", l'uranio può essere rilasciato o rimosso per percolamento o per un flusso d'acqua, per poi eventualmente riprecipitare in ambiente riducente, ad esempio nei suoli con orizzonti moderatamente ricchi in calcio.

L'uranio nel bedrock si trova spesso sotto forma di piccoli grani di minerale uranifero, ad esempio coffenite $[U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$ e uraninite (U_3O_8), oppure assorbito nei grani stessi o racchiuso in minerali quali zirconi ($ZrSiO_4$), apatite ($Ca_5(F,Cl)(PO_4)_3$), titanite ($CaTiSiO_5$) e altri minerali accessori. I grani di minerali uraniferi sono rilasciati durante l'erosione ed il trasporto; i minerali leggeri vengono convertiti in particelle argillose e accompagnano l'acqua che scorre, mentre i grani più duri e pesanti, come zircone, monazite e titanite sedimentano con la frazione sabbiosa.

In Tabella 1.3 sono riportate le concentrazioni tipiche di ²²⁶Ra e ²²²Rn nei suoli alla profondità di un metro, tenendo presente che 12,3 Bq/Kg di ²²⁶Ra sono equivalenti a 1 ppm di uranio.

Tipo di suolo	²²⁶ Ra (Bq/Kg)	²²² Rn (Bq/m ³)
Suoli con contenuto normale di radio	15 - 65	5000 - 30000
Suoli con frammenti di granito	130 - 125	10000 - 60000
Suoli con frammenti di granito ricco in uranio	125 - 360	10000 - 200000
Ghiaia	30 - 75	10000 - 150000
Sabbia	5 - 35	2000 - 20000
Limo	10 - 50	5000 - 60000
Argilla	10 - 100	10000 - 100000
Suolo contenente frammenti di alum shale	175 - 2500	50000 - >10 ⁶

Tabella 1.3: Concentrazioni medie di ²²⁶Ra e ²²²Rn nei suoli a un metro di profondità.

1.3 Produzione e trasporto del radon

L'efficacia del radio nel fornire radon ai pori del suolo per il trasporto in atmosfera non dipende solo dalla concentrazione totale degli atomi di radio ma anche dalla frazione di questi che si localizzano sulla superficie dei granuli in modo che il radon formatosi dal decadimento del radio nel reticolo cristallino di un minerale possa fuoriuscire dai granuli (Tab. 1.4) per effetto del rinculo (0,02 - 0,07 μm). L'atomo di radon può quindi essere assorbito dal grano stesso o da uno adiacente oppure può essere emesso nei pori interstiziali (saturi o meno).

Tipo di suolo	Dimensione del grano
Argilla fine	< 0,6 μm (spesso < 0,06 μm)
Argilla	0,6 - 2 μm
Limo	2 - 60 μm
Sabbia	60 - 2000 μm
Ghiaia	2000 - 60,000 μm

Tabella 1.4: Dimensioni medie dei grani del suolo.

Con il termine *emanazione* del radon si intendono proprio i vari processi attraverso i quali gli atomi di radon riescono a sfuggire dai grani di un dato materiale (Fig.1.2); inoltre si definisce coefficiente di emanazione il rapporto tra il numero di atomi di radon che fuoriescono da un solido ed il numero di atomi di radon formati nel solido stesso. I valori tipici di questo coefficiente sono compresi tra circa 0.02 e 0.7, secondo la struttura del materiale e il contenuto d'acqua (Tab. 1.5).

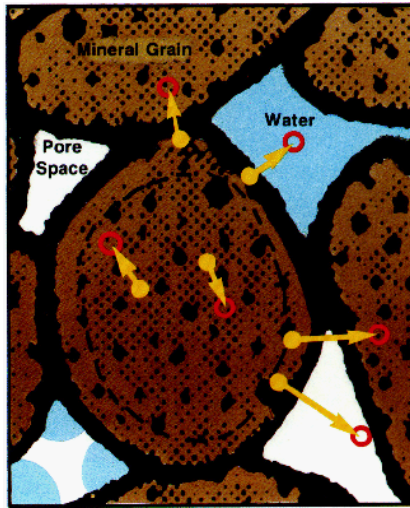


Figura 1.2: Formazione del radon nei pori interstiziali.

Tipo di suolo	Emanazione (%)
Ghiaia	15 – 40
Sabbia	15 – 30
Argilla	30 – 70
Crushed rock (1 – 8 mm)	5 – 15
Crushed granite ricco in Uranio (1 – 8 mm)	15 - 30

Tabella 1.5: Emanazione degli atomi di radon nei suoli espressa in percentuale.

Una correlazione tra la quantità di ^{222}Rn e quelle di ^{238}U e ^{226}Ra ha validità certa solo per livelli di concentrazione estremi di questi ultimi, cioè molto alta o molto bassa. Per valori intermedi la concentrazione di radon è dominata da altri fattori responsabili dei processi di *trasporto*; in particolare il radon arriva più o meno facilmente in superficie, secondo:

- la porosità,
- la permeabilità,
- il grado di fratturazione del terreno (Fig. 1.3)

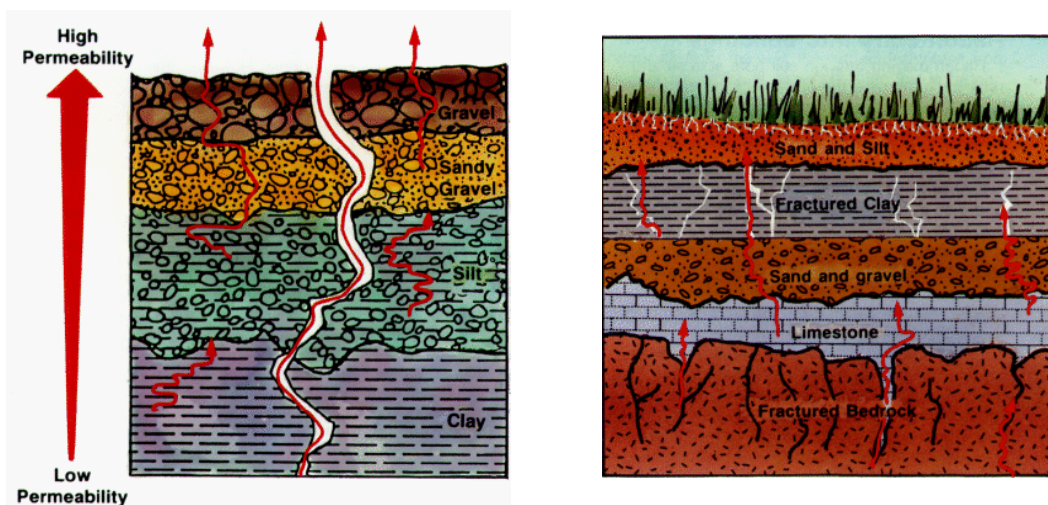


Figura 1.3: Trasporto del radon in superficie.

Le formazioni del substrato roccioso inoltre possono rallentare o impedire la risalita del gas radon (confinamento litostatico).

Il trasporto di radon nel suolo avviene principalmente per diffusione (Legge di Fick), legata alla permeabilità che dipende dalla distribuzione delle dimensioni dei grani, dal grado di compattamento e dal contenuto d'acqua (Rodgers and Nielson, 1991); in tabella 1.6 sono riportati i coefficienti di diffusione del radon in diversi tipi di suolo.

Mezzo	Coefficiente di diffusione D (m ² /s)
Aria	10 ⁻⁵
Ciottoli – ghiaia grossolana	10 ⁻⁵ – 5 10 ⁻⁶
Sabbia asciutta	10 ⁻⁵
Sabbia umida	2,5 10 ⁻⁶
Detrito	5 10 ⁻⁷ – 2,5 10 ⁻⁷
Detrito argilloso	8 10 ⁻⁸
Acqua	10 ⁻⁹

Tabella 1.6: Coefficienti di diffusione, D, del radon (UNSCEAR, 1982, ecc.)

La tabella mostra che il radon diffonde molto bene attraverso terreni composti da ghiaia grossolana, come in aria, mentre la diffusione è molto bassa attraverso argilla satura d'acqua; inoltre se i pori sono completamente saturi d'acqua, il suolo ha lo stesso coefficiente di diffusione dell'acqua.

Il rilascio in atmosfera dipende da vari fattori tra cui l'umidità del terreno e le condizioni meteorologiche (temperatura, pressione, presenza di vento); in particolare differenze di pressione dovute a cause meteorologiche possono creare risalita di radon per convezione (Legge di Darcy).

Principalmente il radon entra in atmosfera attraversando l'interfaccia suolo-aria con una certa velocità, detta velocità di esalazione (Bqm⁻²s⁻¹). Il coefficiente di diffusione D in aria è pari a 0.1 cm²·s⁻¹ (10000 volte più grande rispetto a quello in acqua); di conseguenza la distanza di diffusione $\sqrt{D\tau}$ (dove τ è la vita media del radon) è 2.2 m (Tab. 1.7).

Mezzo	Distanza diffusione media ²²² Rn (cm)	Costante di diffusione ²²² Rn (cm ² s ⁻¹)
Aria	220	10 ⁻¹
Suolo poroso	155	5 10 ⁻²
Acqua	2,2	10 ⁻⁵
Suolo poroso saturo	1,55	5 10 ⁻⁶

Tabella 1.7: Distanza di diffusione del ²²²Rn in diversi mezzi (Tanner, 1964).

Il radon atmosferico presenta un profilo verticale di concentrazione che varia da un massimo in corrispondenza del livello suolo-aria a un valore minimo nella troposfera. Tale diminuzione di concentrazione è dovuta all'azione di rimescolamento dell'aria e al relativamente breve tempo di dimezzamento del radon.

Sorgenti minori di radon atmosferico sono: acque sotterranee, gas naturali, carboni e gli oceani (Tab.1.8); in particolare è stato dimostrato come la CO₂ sia un carrier nel trasporto da zone di frattura alla superficie (Hunyadi et al., 1995).

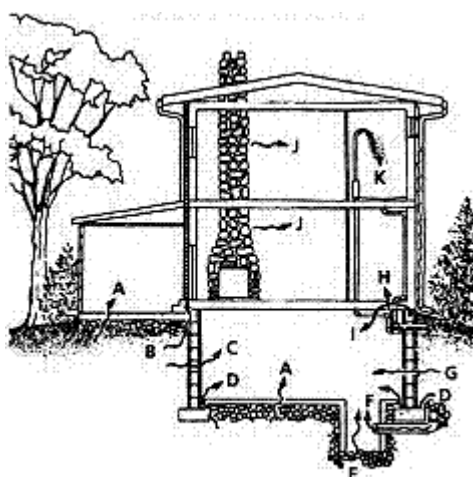
Sorgente	Concentrazione (atomi/cm ³)
Aria sopra gli oceani	0,04
Aria prossima alla superficie della terra	4
Aria del sottosuolo	20000
Interno di un minerale (valore medio)	500000

Tabella 1.8: Concentrazioni tipiche di radon per diverse sorgenti.

Come visto sopra se i pori sono saturi, il coefficiente di diffusione del gas è basso, perciò solo se ci sono veloci spostamenti dell'acqua di falda si ha un significativo aumento del radon liberato. E' possibile però misurare alte concentrazioni di radon nell'acqua presente nelle cavità e nelle fessure della roccia. La motivazione è data dalla solubilità dell'uranio esavalente che viene lisciviato dalle rocce e ne arricchisce le acque di falda, poi per reazioni chimiche e per l'insolubilità, l'uranio e i suoi figli possono precipitare e depositarsi sulla superficie di fratture e fessure; l'acqua in contatto con queste zone si arricchisce così in radon che viene direttamente emanato nella matrice acquosa. La concentrazione media del radon nelle acque di falda normalmente varia tra 10 e 200 Bq/l; alte concentrazioni di radon superiori ai 1000 Bq/l sono state trovate in acque sotterranee a diretto contatto con rocce del substrato costituite ad esempio da graniti ricchi in uranio (Akerblom et al., 1997).

1.4 Il radon negli ambienti indoor

In conseguenza della minor quantità d'aria disponibile per la diluizione in un ambiente confinato, la concentrazione di radon all'interno degli edifici ("indoor") può aumentare significativamente rispetto ai normalmente bassi valori che si riscontrano all'esterno ("outdoor").



- A: crepe nella soletta di cemento;
- C: fratture o crepe tra blocchi di cemento o mattoni nelle pareti;
- B, D: giunzioni pavimento – parete;
- E: terreno scoperto, come ad esempio in pozzetti;
- F: aperture intenzionali di drenaggio;
- G: lungo i giunti di malta;
- H: aperture attorno a penetrazioni di forniture (tubazioni acqua, fognature, ecc.);
- I: cavità non sigillate sulla sommità del corso dei blocchi;
- J: materiali da costruzione, come alcuni tipi di rocce;
- K: acqua.

Figura 1.4: Vie di ingresso del radon all'interno di un edificio (EPA).

La causa principale dell'ingresso del radon negli edifici è la depressione che si viene a creare tra i vari locali e il suolo; depressione indotta in primo luogo dalla differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno (Nazaroff e Nero, 1988). La differenza di pressione determina un flusso di risalita di aria dal suolo e con essa del radon contenuto (movimento da un'area di alta ad una di bassa pressione), provocando *l'effetto camino*. Questo fenomeno risulta particolarmente accentuato nel periodo invernale a causa del riscaldamento dei locali, con il conseguente aumento della differenza di temperatura tra l'edificio e il suolo. La concentrazione di radon può quindi subire sensibili variazioni giornaliere e stagionali; in particolare si riscontrano valori più elevati nelle ore notturne, oltre che nel periodo invernale.

La differenza di pressione è influenzata, oltre che dalla temperatura, anche dal vento, da aperture come camini, finestre, lucernari e da impianti di aspirazione di cucine, bagni, ecc.

Fattore secondario d'ingresso del radon negli edifici è l'infiltrazione, che può verificarsi in corrispondenza di crepe in pavimenti e pareti, di tubazioni, pozzetti ed aperture di controllo, di componenti costruttivi permeabili, come solai in legno o laterizi forati, di pavimenti naturali in terra battuta, ecc., oltre ai materiali da costruzione utilizzati che possono contribuire tra il 15 e il 20% (UNSCEAR 2000).

1.5 Effetti del radon sulla salute

Il radon ha un tempo di dimezzamento di 3.82 giorni, mentre i suoi prodotti di decadimento (Tab. 1.9), fino al ^{210}Pb escluso, hanno un tempo di dimezzamento non superiore a qualche decina di minuti e per tale ragione sono detti *figli a vita breve del radon*; essi sono atomi e ioni metallici (Pb,

Bi e Po) che possono essere rimossi condensando su qualsiasi superficie liquida o solida con cui entrano a contatto. Tipicamente in aria si attaccano alle piccole particelle che sono normalmente presenti (aerosol ambientale); l'abbondanza di queste particelle è di circa 10^{-3} cm^{-3} in aria "pulita" e cresce fino a circa 10^5 nelle aree urbane (Junge, 1963). In particolare il ^{218}Po si forma nello stato di ione positivo e una frazione permane in tale stato nel tempo presentando, così, una spiccata tendenza a legarsi con le polveri e gli aerosol atmosferici.

Isotopo	Radiazione	Tempo di dimezzamento
Radon 222	Alfa	3.82 giorni
Polonio 218	Alfa	3 minuti
Piombo 214	Beta	27 minuti
Bismuto 214	Alfa e beta	20 minuti
Polonio 214	Alfa	1.5×10^{-4} secondi
Piombo 210	Beta	25 anni
Bismuto 210	Beta	5 giorni
Polonio 210	Alfa	136 giorni
Piombo 206		Stabile

Tabella 1.9: Caratteristiche del decadimento dei figli a vita breve del radon.

Gli effetti sulla salute non sono principalmente conseguenza diretta dell'esposizione al radon, ma piuttosto dei figli a vita breve che possono essere inalati. Poiché il radon è un gas nobile con un'emivita relativamente lunga rispetto ai tempi legati ai meccanismi di respirazione, la maggior parte del radon inalato è esalato, prima che possa decadere o depositarsi nei polmoni.

Al contrario, i figli del radon possono essere inalati con gli aerosol ambientali e poi depositarsi sulle superfici epiteliali nei polmoni. Dal momento che i quattro discendenti a vita breve del radon hanno un tempo di dimezzamento inferiore ai 27 minuti, l'intera sequenza del decadimento può essere completata prima che possano essere rimossi con i normali processi di eliminazione da parte dei polmoni. Le più dannose da un punto di vista radiobiologico sono le particelle alfa emesse dagli isotopi del polonio, ^{214}Po e ^{218}Po che a causa del loro breve percorso nel tessuto (40-70 μm) irradiano le cellule epiteliali, in particolare nella regione bronchiale, aumentando così il rischio di cancro polmonare.

L'Organizzazione mondiale della sanità (Oms), attraverso l'International Agency for Research on Cancer (Iarc), ha classificato il radon appartenente al gruppo 1 delle sostanze cancerogene per l'essere umano.

Diversi studi hanno inoltre dimostrato effetti sinergici tra il radon e il fumo di sigaretta; in particolare l'effetto concomitante dei due fattori aumenta il rischio di sviluppare un tumore polmonare di circa 15 volte (BEIR VI).

CAPITOLO 2 METODI DI MISURA DEL RADON

La misura del radon presente nelle diverse matrici ambientali (aria, acqua e suolo) si basa essenzialmente sulla rivelazione delle particelle alfa emesse dal suo decadimento o dal decadimento dei suoi figli.

I metodi di misura del radon possono essere così classificati in base alla tipologia di monitoraggio:

- *Istantanei*: il valore della concentrazione di radon è fornito nell'istante di riempimento del volume sensibile dello strumento
- *Continui*: forniscono in tempo reale l'andamento della concentrazione ambientale del radon mediante una serie di prelievi contigui nel tempo
- *Integrati*: permettono di ottenere il valore medio della concentrazione di radon su un determinato periodo di tempo mediante campionamento senza soluzione di continuità temporale per periodi compresi, generalmente, tra qualche giorno e diversi mesi, fino ad un anno.

Tali campionatori si possono inoltre distinguere in base alla tipologia di campionamento in *attivi* o *passivi* se il gas radon entra nel volume sensibile rispettivamente mediante aspirazione forzata o per diffusione passiva.

2.1 Tecniche di misura del radon in diverse matrici ambientali

Nel campo degli studi geofisici, geochimici e idrogeologici i principali strumenti e tecniche utilizzati per la misura della concentrazione di radon in aria in diverse matrici ambientali sono i seguenti (Papastefanou, 2002):

- Celle a scintillazione,
- Rivelatori di tracce nucleari a stato solido (SSNTD),
- Rivelatori a semiconduttore.

L'utilizzo di *celle a scintillazione* è uno dei metodi istantanei (grab-sample) più usati. Il monitore è costituito da una cella a scintillazione (ad esempio cella di Lucas) rivestita con uno scintillatore inorganico, tipicamente ZnS(Ag), accoppiata ad un fotomoltiplicatore. Le celle a scintillazione possono essere riempite attraverso una membrana permeabile (campionamento istantaneo) o tramite flusso continuo di aria nella cella stessa a condizioni ambiente per 1-5 minuti. Il principio di rivelazione si basa sul conteggio degli impulsi luminosi prodotti dall'interazione delle particelle alfa prodotte dal decadimento del radon o dei suoi figli con i fosfori ZnS(Ag); il segnale viene poi

amplificato tramite il fotomoltiplicatore accoppiato. Il vantaggio nell'uso della cella a scintillazione consiste nell'eliminare la necessità del trasferimento del campione prima del conteggio; errori di misura possono però derivare da una non corretta calibrazione del sistema. La sensibilità delle celle a scintillazione varia tra 0.8 e 16 cph/Bqm⁻³.

I metodi più efficaci per misurare il radon nel suolo e nell'acqua sono basati sulla misurazione del gas radon dopo che esso è stato separato dal campione ambientale mediante processi di estrazione e/o diffusione. Nel caso di misure nel suolo per valutare l'emanazione dai terreni, il gas viene aspirato dal terreno attraverso una sonda infissa a profondità di 70-100 cm e una pompa ispiratrice per trasportarlo alla camera di misura. Per la misura del radon in acque del sottosuolo viene utilizzato un kit per degasaggio, ovvero l'estrazione avviene tramite gorgogliamento (bubbling) nell'acqua e il gas così estratto viene collezionato nella cella a scintillazione per il conteggio.

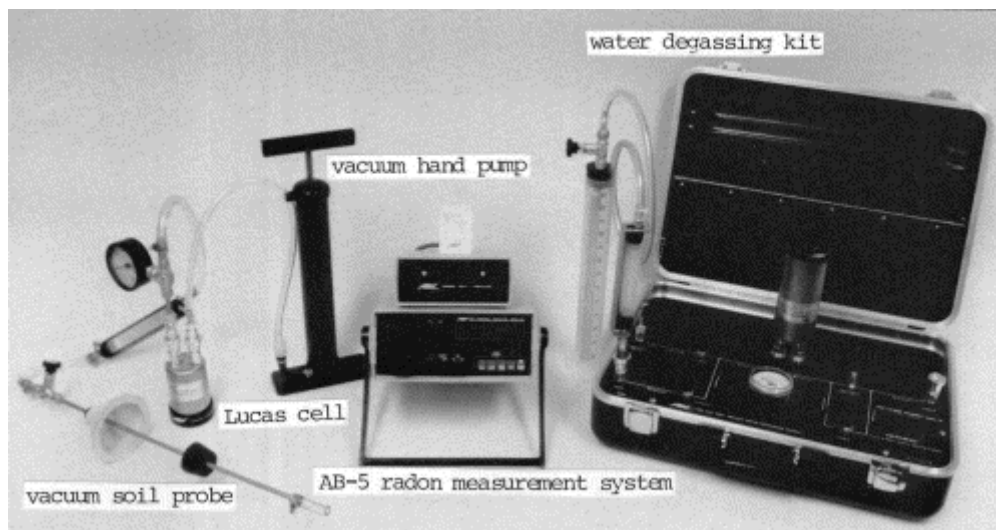


Figura 2.1: Strumentazione per la misura del radon nei gas del suolo e nell'acqua del sottosuolo con cella a scintillazione (PYLON, model AB-5, radon measurement system).

La figura 2.1 mostra un sistema completo (PYLON Electronics Inc) per misure di radon nel suolo e nelle acque del sottosuolo con la strumentazione con la quale un campione può essere trasferito nella cella per il conteggio; la cella viene poi collegata a un monitore radon portatile con unità acquisizione dati.

I rivelatori di tracce nucleari a stato solido (SSNTD) si basano sulla registrazione delle particelle alfa su particolari materiali quali LR-115 e CR39; nel paragrafo 2.1.1 verrà descritta in dettaglio questa tipologia di strumenti che è la più utilizzata per la misura della concentrazione di radon in aria negli ambienti indoor.

I rivelatori a semiconduttore sono monitori in continuo e permettono quindi il monitoraggio del radon in tempo reale e sono molto utili in casi in cui si verificano rapidi e significativi cambiamenti

delle concentrazioni di radon, ad esempio per misure nel suolo lungo zone di faglia attive. Un esempio di monitor basato su questa tecnica è il monitor RTM2100 (SARAD GmbH, Wiesbadener Str. 20, D-01159 Dresden, Germany) che viene utilizzato con una strumentazione accessoria, analoga a quella descritta precedentemente, per le misure di radon nell'aria e nelle acque del sottosuolo. Il monitor consiste in una camera di misura nella quale i prodotti di decadimento del radon ionizzati vengono raccolti su un rivelatore al silicio; i valori di concentrazione del radon vengono quindi calcolati mediante spettrometria alfa. Il volume sensibile è 0,27 litri e la sensibilità del rivelatore è 0,01 cpm/Bqm³. Tale strumento lavora in continuo con vari range di risoluzione temporale da un minuto fino a 24 ore. Il monitor può anche essere integrato con sensori per la misura di parametri fisici quali pressione atmosferica, temperatura, umidità e concentrazione di CO₂.

2.1.1 Metodi di misura del radon in aria

La maggior parte delle misure che vengono eseguite in aria riguarda la valutazione del radon, piuttosto che della sua progenie, in quanto tale misura è semplice ed economica e poiché i fattori di equilibrio sono relativamente costanti.

Nell'utilizzo di sistemi continui il vantaggio consiste nel poter registrare, contemporaneamente alla concentrazione di radon, altri parametri importanti come la temperatura, la pressione atmosferica, l'umidità relativa, ecc.; inoltre tali sistemi permettono di analizzare l'andamento temporale dei parametri registrati e di correlarli tra loro per trarre informazioni sui meccanismi di ingresso del radon o anche per riconoscere eventuali fattori casuali. Esempi di monitori istantanei e/o continui sono le camere a ionizzazione (Fig. 2.2), le celle a scintillazione o i sistemi di misurazione che si basano sul metodo dei due filtri.

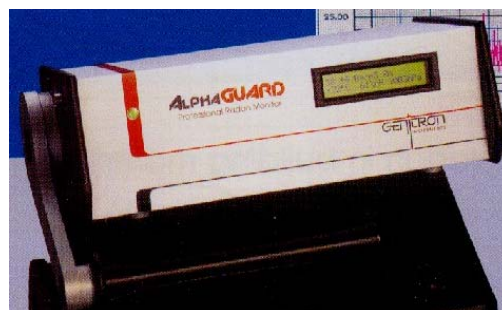


Figura 2.2: Monitore per la misura di radon in continuo con camera a ionizzazione (modello Alphaguard).

La misura integrata è invece particolarmente indicata per determinare la concentrazione di radon indoor, in quanto media i fattori di variabilità (tipiche fluttuazioni giornaliere e stagionali) del radon

in ambiente confinato; inoltre i campionatori passivi sono particolarmente maneggevoli, poco costosi e non necessitano di alimentazione elettrica.

I monitori ad integrazione più diffusi sono i canestri a carbone attivo, i monitori a termoluminescenza (TLD), le camere a ionizzazione ad elettret e i monitori a tracce nucleari (SSNTD) (Fig. 2.3).

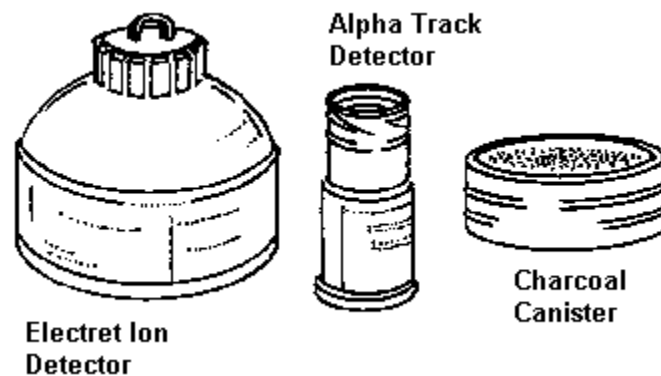


Figura 2.3: Esempi di monitori passivi per la misura di radon in aria (EPA)

Al momento il metodo di misura della concentrazione di radon più utilizzato si basa sui rivelatori a tracce nucleari (Durrani e Ilic, 1997) che sono costituiti da lastre di film o polimeri sensibili alle radiazioni alfa, ma insensibili ad altri tipi di radiazione (in particolare beta e gamma). I più utilizzati sono il nitrato di cellulosa LR-115 (Kodak Co.), il policarbonato Makrofol e l'allile diglicole-carbonato (noto come CR-39, acronimo di Columbia Resin 1939). Le particelle alfa che penetrano nel materiale sensibile producono una rottura permanente dei legami molecolari, detta "traccia latente". A seguito di un particolare attacco chimico, le tracce vengono allargate fino ad essere visibili al microscopio ottico; la densità delle tracce prodotte dalle particelle alfa (emesse dal radon e dai suoi figli ^{218}Po e ^{214}Po) sulla superficie dei rivelatori è proporzionale alla concentrazione di radon. Nei campionatori di tipo chiuso i rivelatori sono inseriti in opportuni dispositivi di campionamento, nei quali il radon entra per diffusione o per permeazione; in questi anni sono stati realizzati campionatori di diverse forme e dimensioni, ma in generale con un volume piuttosto contenuto (ordine di pochi centimetri cubi) e tali da impedire l'ingresso dei prodotti di decadimento del radon.

Questo sistema è indicato per tempi di esposizione superiori a un mese, fino ad un massimo, indicativamente, di un anno. Per indagini su larga scala di misure integrate a lungo termine, i rivelatori a traccia hanno le caratteristiche più favorevoli: semplicità d'uso, robustezza, basso costo e sensibilità in genere elevata (indicati per misurare anche concentrazioni di poche decine di Bq/m^3).

Ai fini di questo lavoro di tesi sono stati adottati metodi passivi anche se in alcuni contesti ad elevato rilascio di radon si è proceduto al confronto con metodi in continuo.

2.2 Metodo di misura passivo del radon in aria

Per la campagna di misurazioni condotta nell'ambito del lavoro di tesi sono stati utilizzati rivelatori passivi a tracce i cui processi di sviluppo e analisi sono stati elaborati in collaborazione con la società U-Series Srl che ha messo a disposizione la propria strumentazione.

2.2.1 Caratteristiche del sistema di misura sviluppato

Il dispositivo passivo a tracce è costituito da una piccola lastra di materiale plastico denominato CR39 alloggiato in un contenitore in polipropilene senza filtri di tipo "chiuso" modello RADOSURE detto "camera di diffusione" (Fig. 2.4). La camera sfrutta la diffusione naturale del Radon nelle piccole intercapedini presenti tra il coperchio e il fondo ed è inoltre progettata al fine di impedire il passaggio verso l'interno dei figli del radon e del thoron.

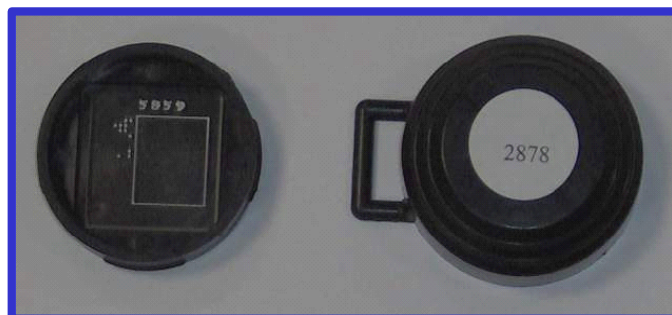


Figura 2.4: Elemento sensibile in CR39 con camera di diffusione modello RADOSURE utilizzati nel lavoro di tesi.

Il rivelatore è costituito da una lastrina in CR-39 (69,86% di monomero Poly-Allyl Diglycol Carbonate, PADC) tipo TASTRAK (Track Analysis Systems Ltd, H H Wills Physics Laboratori, Bristol UK) di dimensioni 25 x 25 mm², densità 1,30 gr/cm³ e spessore di 1 mm, sulla cui superficie è inciso un codice numerico di identificazione.

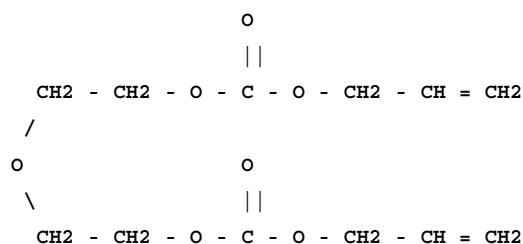


Figura 2.5: Monomero Allil Diglicol Carbonato (ADC) che compone il 69.86% del CR-39.

Il principio di funzionamento del rivelatore a tracce si basa sui processi di ionizzazione che avvengono nel materiale plastico lungo il percorso delle particelle alfa emesse dal decadimento del radon; tali ionizzazioni innescano dei processi chimici il cui risultato è un danneggiamento chiamato “traccia latente”.

Se il rivelatore viene sottoposto ad attacco chimico da parte di una base forte (ad esempio NaOH o KOH), la traccia latente incrementerà le sue dimensioni (fino a qualche decina di micrometri) e risulterà visibile otticamente (Fig. 2.6), assumendo una tipica forma conica (Nikezic et al, 2004).

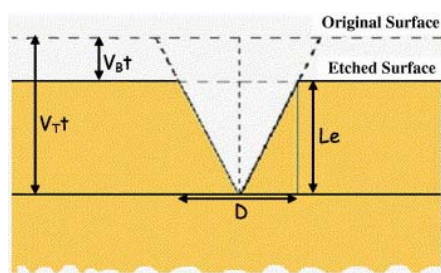


Figura 2.6: Velocità di attacco in un rivelatore a tracce.

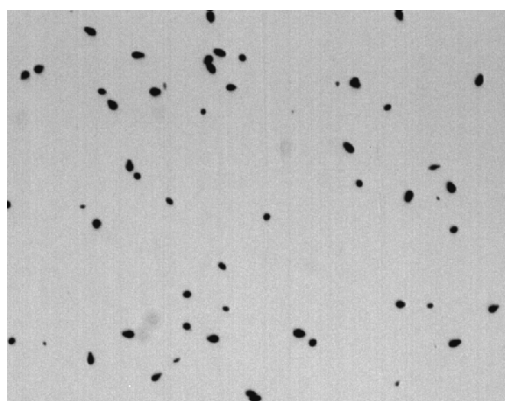


Figura 2.7: Aspetto delle tracce al microscopio ottico dopo l'attacco chimico.

Al termine del periodo di esposizione i rivelatori sono stati quindi attaccati chimicamente in una soluzione acquosa 6,25 M (25% peso/volume) di NaOH alla temperatura di 98 °C per un periodo di 1 ora come indicato dal produttore (sistema TASL). Al termine dell'attacco chimico i rivelatori sono stati sottoposti al seguente ciclo: 1) lavaggio per qualche minuto in acqua distillata per rimuovere i residui di NaOH; 2) lavaggio in soluzione di acido acetico al 2% per 30 minuti per il fissaggio; 3) lavaggio finale in acqua distillata per 30 minuti.

Per la lettura dei rivelatori è stato appositamente sviluppato un sistema semi-automatico per l'acquisizione e l'analisi delle immagini; tale sistema è costituito principalmente da un microscopio

ottico (macroscopio apocromatico Leica Z16 APOA, ingrandimento totale pari a 481x e illuminazione a luce trasmessa con condensatore), con telecamera Leica DFC 280 interfacciata ad una scheda di acquisizione di immagini, oltre a un tavolo meccanizzato per la scansione dei medesimi (Fig. 2.8) e a una scheda hardware d'interfaccia tra il microscopio ottico e un personal computer.



Figura 2.8: Microscopio ottico per la lettura dei rivelatori (U-Series Srl).

Per l'elaborazione delle immagini, la movimentazione automatica degli assi x-y e della messa a fuoco è stato sviluppato un programma tramite il software Leica Qwin. Il programma permette di registrare automaticamente le immagini di ciascuno dei campi di visione (FOV) in cui viene suddiviso il rivelatore tramite il movimento del piano motorizzato (64 campi di circa 1 mm^2) e tutte le caratteristiche morfometriche delle tracce (lunghezza, area e rotondità), in modo da non considerare macchie o imperfezioni del rivelatore stesso che in genere sono di forme e dimensioni molto diverse da quelle delle tracce latenti (Fig. 2.9); al termine dell'esecuzione della routine viene prodotto un file Excel in cui sono forniti i conteggi totali di tracce per fov, dai quali si ricava la densità superficiale di tracce di ciascuno dei rivelatori presenti sulla griglia del tavolo motorizzato (fino a 24 rivelatori).

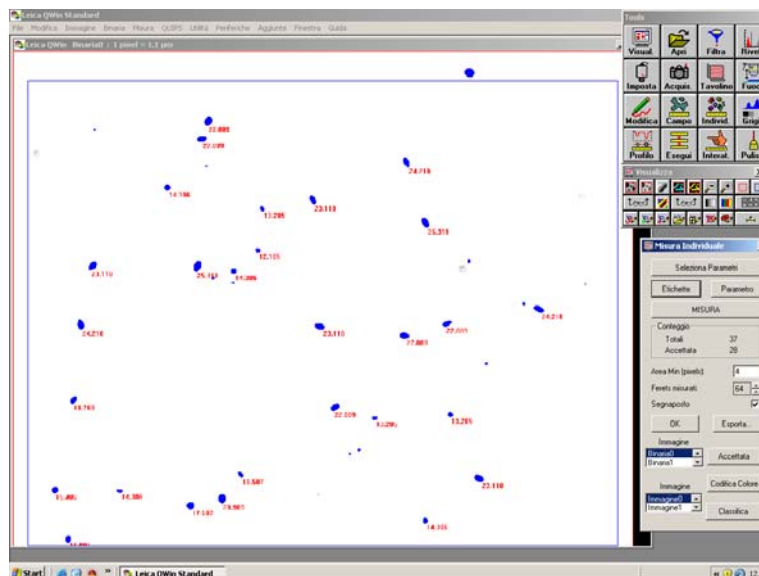


Figura 2.9: Analisi morfometrica delle tracce tramite Software Leica QWin.

La concentrazione (Bq/m^3) si ottiene dividendo per le ore di campionamento il valore dell'esposizione ($\text{kBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$), valore dato dal rapporto tra la densità delle tracce efficaci ($\text{Tracce}/\text{cm}^2$) e la sensibilità del sistema ($2,69 \text{ Tracce}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{kBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$), che viene determinata mediante le operazioni di calibrazione. Per la retta di calibrazione del sistema sono state condotte diverse esposizioni in camera radon a concentrazione nota presso il Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Centro studi Enrico Fermi (CESNEF).

Il limite connesso all'impiego di questa tecnica è relativo alla variabilità del numero di tracce di fondo del materiale CR39, dovute a imperfezioni del processo di lavorazione, che crea disomogeneità nella lastra; questo problema è stato risolto testando le lastre di materiale utilizzato e sottraendo il numero di tracce di fondo (circa $16 \text{ tracce}/\text{cm}^2$) alla densità di tracce misurato.

2.2.2 Confronto con laboratori europei per la validazione della metodologia adottata

Al fine di validare il sistema e le procedure di analisi messe a punto è stato condotto nel 2008 un interconfronto presso il BfS (German Federal Office for Radiation Protection) accreditato come German Calibration Service (DKD) per la misurazione della concentrazione di radon in aria.

All'interconfronto hanno partecipato 19 laboratori europei (Interlaboratory Intercomparison 2008 Report) che utilizzano dispositivi di misura del radon in aria di tipo passivo (rivelatori a tracce nucleari, eletteti, canestri a carbone attivo).

Trentacinque rivelatori, della tipologia descritta nel paragrafo 2.2.1 e utilizzata per la campagna di misura, sono stati inviati presso il laboratorio del BfS per essere esposti nella camera radon dell'istituto a 4 diverse concentrazioni di radon ($210, 284, 964$ e $3035 \text{ kBq}/\text{m}^3$) inizialmente non

note ai laboratori partecipanti. I rivelatori sono tornati poi in laboratorio per essere analizzati; i risultato sono riportati in Figura 2.10 e Tabella 2.1.

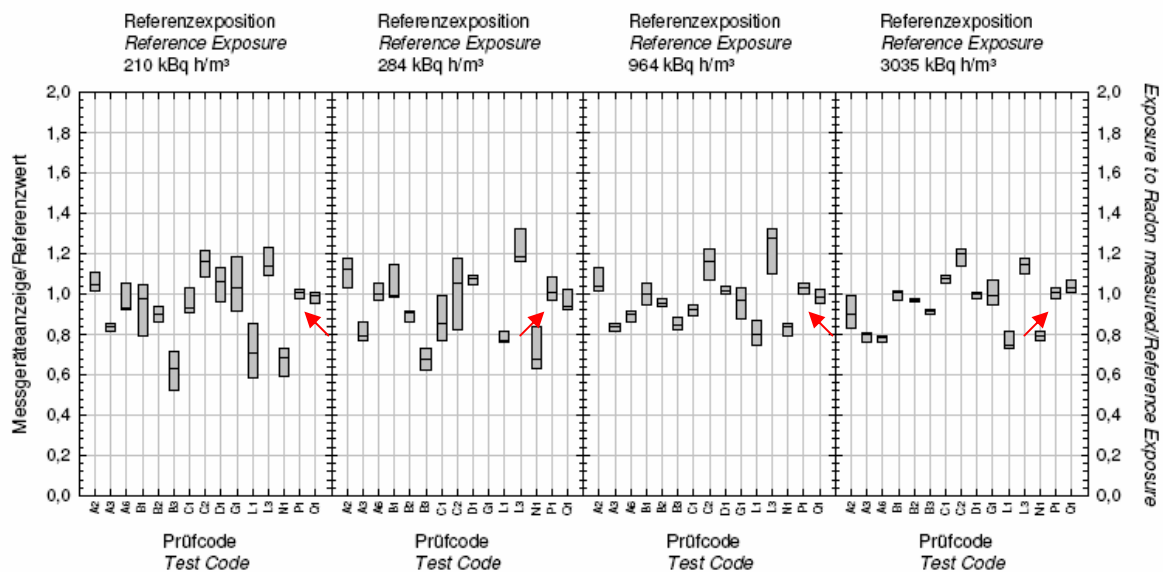


Figura 2.10: Risultati interconfronto BfS – codice laboratorio P1: deviazione dal valore vero per i quattro punti di esposizione.

Esposizione netta (kBq h m ⁻³)	Valore di riferimento (kBq h m ⁻³)	Errore relativo (%)
208,4	210	-0,7
292,7	284	3,1
996,6	964	3,4
3053,1	3035	0,6

Tabella 2.1: Errore relativo % per i quattro punti di esposizione – Interconfronto Bfs.

Dai risultati si evince che per tutti i quattro punti di misura la deviazione rispetto al valore vero è risultata inferiore al 5%; l'interconfronto ci ha permesso quindi di dimostrare la validità del sistema di analisi adottato e dei risultati ottenuti dalla campagna indoor condotta nell'ambito del lavoro di tesi

2.3 Metodo di misura di radon in aria in continuo

Nel caso di situazioni con concentrazioni di radon particolarmente elevate sono state condotte anche campagne con monitori in continuo per valutare le variazioni temporali delle concentrazioni di radon nei siti di interesse.

A questo scopo è stato utilizzato un monitor per la misura del radon in aria in continuo, ovvero in grado di fornire l'andamento della concentrazione ambientale del radon mediante una serie di prelievi contigui nel tempo. Il modello di monitor utilizzato è il Radon Scout della Sarad (Fig 2.11), messo a disposizione della U-Series Srl. Il monitor di tipo a semiconduttore è costituito da una camera all'interno della quale il radon entra per diffusione e da un rivelatore a semiconduttore a cui viene applicata un'alta tensione HV al fine di generare un campo elettrostatico per la ionizzazione e la focalizzazione sulla superficie del rivelatore dei figli Po-218 e Po-214 prodotti dal decadimento del radon (misura indiretta). Il calcolo della concentrazione di radon avviene attraverso il conteggio dei decadimenti dei figli raccolti utilizzando la spettrometria alfa in diverse finestre energetiche di misura (ROI), secondo la formula:

$C_{Rn222} = N/(E*t)$, dove t è il tempo di misura, N sono i conteggi di Po-218 e Po-214 registrati in t ed E è l'efficienza dello strumento.



Figura 2.11: Monitor a semiconduttore “Radon Scout” Sarad.

La sensibilità dello strumento è pari a 1,8 cpm per 1 kBq/m³; l'efficienza del rivelatore è quindi ordini di grandezza superiore ai rivelatori passivi a tracce ed è in grado di rilevare 100 Bq/m³ nell'arco di tre ore di campionamento.

Il range di misura è compreso tra 0 e 10 MBq/m³. L'intervallo di campionamento può essere regolato a 1 ora od ogni 3 ore. Il monitor è inoltre equipaggiato con sensori per la misura della temperatura (°C) e dell'umidità relativa (%).

Il microprocessore interno permette di immagazzinare una grande quantità di dati scaricabili successivamente attraverso l'apposito software (Fig. 2.12) che permette poi di esportare i dati acquisiti in Excel per l'elaborazione dei dati.

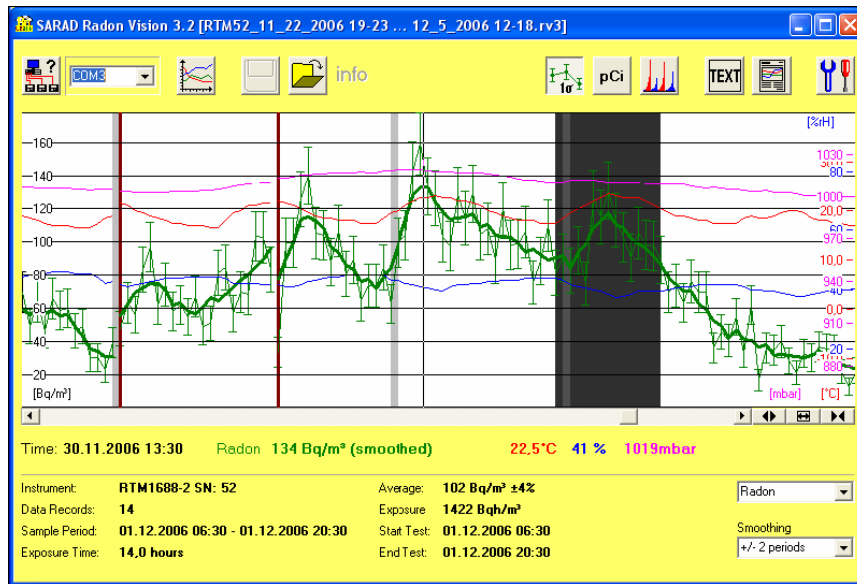


Figura 2.12: Software per l'esportazione dei dati acquisiti del monitor "Radon Scout" Sarad.

CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI: DISTRIBUZIONE DEL RADON IN EUROPA E IN ITALIA

Nel capitolo verrà esaminato lo stato di avanzamento delle metodologie per la valutazione dell'esposizione al radon in Europa e in Italia alla luce di quanto previsto dalla legislazione italiana.

3.1 Stato di avanzamento delle conoscenze sull'esposizione al radon in Europa

Per l'identificazione delle zone a rischio radon sono state utilizzate diverse metodologie: utilizzo delle sole caratteristiche dei suoli, indagini campionarie su basi di tipo amministrativo, a maglie, ecc. e campagne di misura indoor unitamente all'uso di dati di tipo geologico (Miles and Appleton 2005). La prima metodologia si fonda sulla suddivisione del territorio in unità geologiche sulla base di misure di radon nel suolo che hanno dato però risultati contrastanti, anche in conseguenza a problematiche specifiche legate alle tecniche di misura del radon nel suolo (Iakovleva et al., 2003); mentre la seconda non garantisce che tutte le aree a rischio vengano identificate ed è soprattutto inefficiente se le aree identificate sono poche e poco popolate.

A livello internazionale le metodologie maggiormente adottate (Tab. 3.1 – Progetto ERRICCA2), unitamente all'utilizzo di dati geologici, sono state quelle basate su campagne di misura indoor; ma i risultati delle misure indoor sono fortemente dipendenti da diversi fattori come la durata delle misure, il numero di misure condotte in un edificio, il piano dell'edificio in cui viene condotta la misura, ecc.. Per questo motivo è di grande importanza definire chiaramente le tecniche di misura e i protocolli da utilizzare.

Organizzazioni che hanno condotto i programmi nazionali di mappatura radon e le metodologie utilizzate.					
Paese	Organizzazione	Indoor Rn	Rn nel suolo	Mappatura geologica	Altri metodi
Austria	University of Vienna ¹	x			
Belgium	FANC ² (Federal Agency for Nuclear Control)	x			
Czech Republic	Various academic institutes/universities ¹ , Czech Geological Survey ² and private consultants ³ with experience in geological techniques	x	x	x	x
Denmark	National Institute of Radiation Hygiene ² , Geological Survey of Denmark and Greenland ² , Risoe National Laboratory ²	x			
Finland	STUK ² (Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland) with the cooperation of municipal authorities ²	x		x	x
France	IRSN ² (Institute de Radioprotection et de Sureté Nucléaire) and BRGM ¹ (Bureau des Ressources Géologique et Mineures)	x	x	x	

Paese	Organizzazione	Indoor Rn	Rn nel suolo	Mappatura geologica	Altri metodi
Germany	BFS ² (Federal Office for Radiation Protection), Kemski and Partner Geologists ³	x	x	x	
Greece	Various University Laboratories ¹ with no centre of coordination ²	x	x		x
Hungary	National Research Institute for Radiobiology and Radiohygiene ²	x			
Ireland	RPII ² (Radiological Protection Institute of Ireland)	x			
Italy	Italian National Institute of Health, Agency for Environmental Protection ² and Technical Services ² , public organisations in various regions ² with no centre of coordination	x		x	
Netherlands	RIVM ¹ (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), KVI ² (Kernfysisch Versneller Instituut)	x			
Poland	Polish Geological Institute ²		x	x	
Portugal	ITN ² (Instituto Tecnologica e Nuclear)	x			
Romania	Various Institutes ^{1,3} with no centre of coordination	x	x		
Slovenia	Institute Josef Stefan ²	x			
Spain	Universities of Cantabria ¹ , Catulana ¹ , Canarias-Ciemat ¹ , CSN ² (Nuclear Safety Council), ENUSA ³ Industrias Avanzadas	x		x	x
Sweden	Private consultants on behalf of various municipalities ³ with no centre of coordination		x		x
Switzerland	SFOPH ² (Swiss Federal Office of Public Health)	x			
United Kingdom	NRPB ² (National Radiological Protection Board)	x			
¹ Università o istituto accademico ² Organizzazione governativa ³ Altri laboratori privati, etc.					

Tabella 3.1: Programmi di mappatura del rischio radon nei diversi paesi europei e metodologie utilizzate.

In Italia, a differenza della maggior parte degli altri paesi europei, il programma di mappatura e in particolare i protocolli da seguire non sono stati coordinati a livello nazionale ma rimandati alle singole Regioni.

3.2 Stato di avanzamento delle conoscenze sull'esposizione al radon in Italia e adempimenti delle singole regioni.

In Italia la legislazione per quanto riguarda il rischio radon è limitata al D.Lgs 241 del 2000 per gli ambienti di lavoro, mentre la mappatura delle aree a rischio radon (radon prone areas) a livello nazionale è sostanzialmente ferma. Alla luce di questa situazione alcune singole regioni tramite le agenzie ARPA hanno avviato delle indagini per produrre mappe di rischio.

3.2.1 La Legislazione italiana

La normativa in materia di radon distingue gli ambienti di lavoro dagli ambienti domestici.

In Italia per quanto riguarda gli ambienti di lavoro, il 01/01/2001 è entrato in vigore il Decreto Legislativo 26.05.2000 n.241, che modifica e integra il precedente D. Lgs. 17.03.1995 n. 230 (in materia di radiazioni ionizzanti); in particolare va sottolineata l'introduzione del capo III bis, per disciplinare l'esposizione occupazionale alla radioattività naturale. E' stata così recepita la direttiva 96/29/Euratom del 13.05.96 riguardante la protezione sanitaria dai rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti per la popolazione e per i lavoratori; tale direttiva, riguardo alle sorgenti naturali di radiazioni, chiede di individuare le attività lavorative a rischio, di eseguire opportuni controlli e di imporre dei limiti per gli ambienti di lavoro.

Il D. Lgs. 241/00 va in particolare applicato alle attività lavorative in tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, a tutti i luoghi lavorativi sotterranei o interrati (capo III-bis, Art.10 bis, comma 1, lettera a) e in luoghi di lavoro in superficie in zone ben individuate ("radon prone areas").

Per i luoghi di lavoro, la concentrazione di radon, misurata come media annuale, non deve superare il livello d'azione definito nell'allegato I-bis: **500 Bq/m³**.

Nel caso in cui le grandezze non superino il livello d'azione, ma siano superiori all'80% del livello stesso (400 Bq/m³), l'esercente deve assicurare nuove misurazioni nel corso dell'anno successivo.

Nel caso di superamento dei livelli d'azione, avvalendosi di un esperto qualificato, il datore di lavoro deve valutare la dose ai lavoratori e, nel caso in cui vengano superati i 3 mSv/anno, deve adottare le necessarie azioni di rimedio, tenendo conto del principio di ottimizzazione; tali azioni devono essere completate entro 3 anni dal rilascio della relazione tecnica. Se, nonostante le azioni di rimedio, non si è riusciti a rientrare nei limiti previsti, verrà messa in atto la sorveglianza fisica di radioprotezione, come da Capo VIII del D. Lgs. 241/00.

Per quanto riguarda le metodologie da adottare per le misure di radon, la normativa prevedeva l'istituzione di una Commissione Ministeriale (D. Lgs. 230/95 Art. 9) che avrebbe dovuto definirle; ad oggi la commissione non è stata ancora insediata.

Per far fronte a tale inadempienza il Coordinamento delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano ha ritenuto opportuna l'elaborazione di linee guida ("Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei"), "che, in attesa di quelle emanate secondo le procedure previste dalla normativa, possano costituire un valido riferimento per gli esercenti, gli organismi di misura e gli organi di vigilanza".

Le linee guida, elaborate da un gruppo di lavoro tecnico composto dalle Regioni Emilia-Romagna, Lombardia, Toscana, Umbria e Veneto, comprendono:

- La definizione di luogo di lavoro sotterraneo ed i criteri generali per l'impostazione delle misure di radon: "locale o ambiente con almeno tre pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente dal fatto che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno".
- I metodi di misura delle concentrazioni di radon: rivelatori a tracce nucleari e rivelatori ad elettretre, ovvero sistemi passivi che consentono di coprire l'intero anno solare come richiesto dalla normativa.
- I requisiti minimi degli organismi che effettuano le misure.

L'individuazione delle aree di lavoro in superficie in zone considerate a rischio di elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon, è stata assegnata dal Decreto alle Regioni ed alle Province Autonome, con un tempo di realizzazione di 5 anni dalla data di pubblicazione del Decreto (Art. 37 comma 5) ovvero entro il 31.08.2005 e sulla base di linee guida emanate dalla Commissione Ministeriale non ancora insediatasi.

Per quanto riguarda gli ambienti domestici in Italia non esiste una legislazione specifica, mentre la Comunità Europea ha fissato dei livelli di riferimento di 400 Bq/m³ per le abitazioni esistenti e di 200 Bq/m³ per le abitazioni da costruire come parametro di progetto, superati i quali si raccomanda di intraprendere azioni di rimedio atte a ridurre la concentrazione al di sotto dei valori indicati (Raccomandazione CE 90/143/Euratom).

3.2.2 Valutazione del rischio radon eseguita dall'Indagine Nazionale radon

L'unica stima di distribuzione della concentrazione di radon sull'intero territorio nazionale (Fig. 3.1) si basa sull'indagine nazionale condotta tra il 1989 e il 1998 dall'APAT, dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e dalle Agenzie per la protezione dell'ambiente regionali (ARPA), che in seguito identificheremo come Indagine Nazionale. Le misurazioni sono state condotte su un campione di 5631 abitazioni di 232 città distribuite su tutte le 21 regioni italiane per due periodi successivi di 6 mesi ciascuno in una stanza di ciascuna abitazione, generalmente la camera da letto. La concentrazione media annuale nazionale di radon è risultata pari a 70 Bq/m³, la media geometrica 52 Bq/m³ e la deviazione standard geometrica 2.1. L'Indagine Nazionale ha fornito una valutazione rappresentativa della distribuzione dell'esposizione al radon per la popolazione italiana, ma ha fornito necessariamente informazioni di minor precisione sulla distribuzione su piccola scala (Bochicchio et al., 2005).

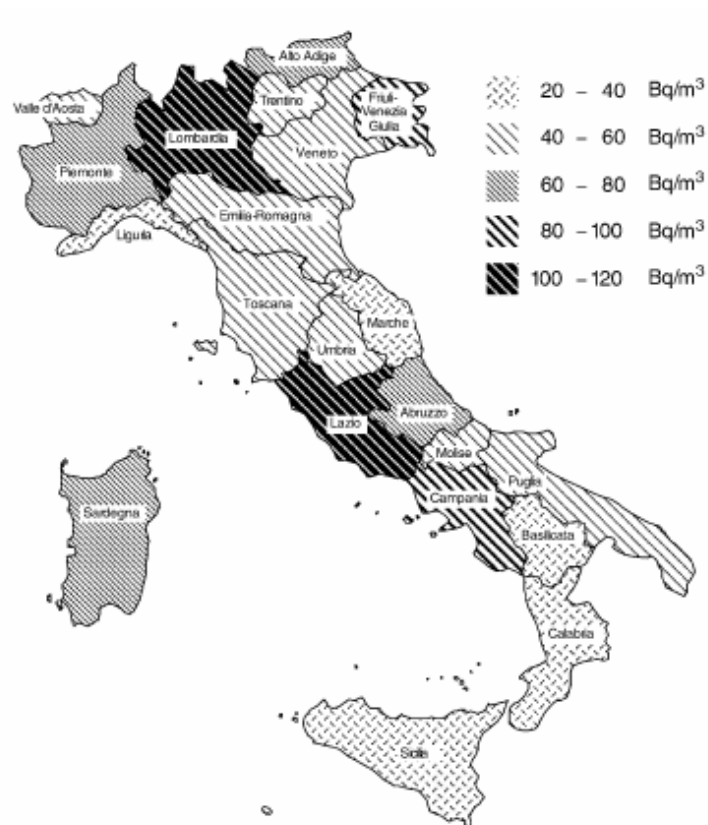


Figura 3.1: Mappa dei livelli di concentrazione media annua stimati dall'Indagine Nazionale APAT nelle 21 regioni italiane

In tabella 3.2 sono riportati il numero di campionamenti per ciascuna regione, mentre in tabella 3.3 è riportata una sintesi dei risultati ottenuti dall'indagine in termini di concentrazione media annuale e con la percentuale di superamenti rispetto ai limiti consigliati dalla Commissione Europea.

Region	Large town stratum ^a		Small town stratum ^a		All towns	
	No. of dwell.	No. of towns	No. of dwell.	No. of towns	No. of dwell.	No. of towns
Piemonte	110	2	311	23	421	25
Valle d'Aosta	—	—	24	3	24	3
Lombardia	198	4	622	30	820	34
Alto Adige	10	1	25	2	35	3
Trentino	17	1	62	10	79	11
Veneto	90	4	274	11	364	15
Friuli-Venezia Giulia	78	2	151	8	229	10
Liguria	88	2	98	4	186	6
Emilia-Romagna	153	9	216	6	369	15
Toscana	74	4	241	5	315	9
Umbria	24	2	49	2	73	4
Marche	19	1	220	11	239	12
Lazio	175	1	129	6	304	7
Abruzzo	11	1	92	6	103	7
Molise	—	—	28	3	28	3
Campania	81	3	705	25	786	28
Puglia	65	4	243	5	308	9
Basilicata	—	—	50	2	50	2
Calabria	31	3	136	8	167	11
Sicilia	109	4	228	5	337	9
Sardegna	25	2	99	7	124	9
All 21 Regions	1358	50	4003	182	5361	232

Tabella 3.2: Numero di abitazioni nelle quali sono stati condotti i campionamenti dell'Indagine Nazionale rispettivamente nelle grandi, nelle piccole e in tutte le città scelte sul territorio nazionale (Bochicchio et al., 2005).

Region	Rn concentration (Bq m^{-3})	Dwellings $> 200 \text{ Bq m}^{-3}$		Dwellings $> 400 \text{ Bq m}^{-3}$	
	AM \pm SE	N	%	N	%
Piemonte	69 \pm 3	9	2.1	3	0.7
Valle d'Aosta	44 \pm 4	0	0.0	0	0.0
Lombardia	111 \pm 3	70	8.4	18	2.2
Alto Adige	70 \pm 8	2	5.7	0	0.0
Trentino	49 \pm 4	1	1.3	0	0.0
Veneto	58 \pm 2	7	1.9	1	0.3
Friuli-Venezia Giulia	99 \pm 8	22	9.6	11	4.8
Liguria	38 \pm 2	1	0.5	0	0.0
Emilia-Romagna	44 \pm 1	3	0.8	0	0.0
Toscana	48 \pm 2	4	1.2	0	0.0
Umbria	58 \pm 5	1	1.4	0	0.0
Marche	29 \pm 2	1	0.4	0	0.0
Lazio	119 \pm 6	37	12.2	10	3.4
Abruzzo	60 \pm 6	5	4.9	0	0.0
Molise	43 \pm 6	0	0.0	0	0.0
Campania	95 \pm 3	42	6.2	3	0.3
Puglia	52 \pm 2	5	1.6	0	0.0
Basilicata	30 \pm 2	0	0.0	0	0.0
Calabria	25 \pm 2	1	0.6	0	0.0
Sicilia	35 \pm 1	0	0.0	0	0.0
Sardegna	64 \pm 4	3	2.4	0	0.0

Tabella 3.3: Concentrazioni medie annuali di radon indoor (Bq m^{-3}) nelle 21 regioni italiane ottenute dall'Indagine Nazionale (Bochicchio et al., 2005); AM media aritmetica, SE errore standard.

Si evidenzia quindi una notevole differenza tra i risultati ottenuti nelle diverse regioni, con valori più elevati in Lazio (119 Bq/m³), Lombardia (111 Bq/m³), Friuli Venezia Giulia (99 Bq/m³) e Campania (95 Bq/m³), rispetto alla media nazionale di 70 Bq/m³. In Sardegna e Trentino Alto Adige altre indagini hanno però rilevato valori maggiori per cui anche queste dovrebbero essere considerate tra le regioni ad alto rischio (Bocchicchio et al., 2005).

Inoltre è risultato che la variazioni stagionali non sono trascurabili e, almeno in situazioni di incertezza, queste vanno tenute in considerazione in caso di misurazioni inferiori ad un anno.

Nei primi anni 90 è stata inoltre effettuata un'indagine in scuole materne ed elementari di 6 regioni italiane (Gaidolfi et al., 1991); anche questi campionamenti sono stati utilizzati in seguito per le valutazioni di rischio radon in quanto dall'indagine è risultato che in queste tipologie di edifici i livelli di radon riscontrati si possono considerare equivalenti a quelli nelle abitazioni ed hanno in generale confermato i risultati ottenuti dall'Indagine Nazionale.

Alla fine del 2005 è stato avviato il “Piano Nazionale Radon (PNR) per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia” che rappresenta il primo stadio di realizzazione del PNR elaborato nel 2002 dal Ministero della Salute con la partecipazione di esperti di diversi enti regionali, Regioni e Province Autonome; in particolare, il progetto PNR-CCM prevede la valutazione dei rischi associati all'esposizione al radon, l'istituzione dell'Archivio Nazionale Radon presso l'ISS, lo sviluppo delle indagini sulla distribuzione territoriale delle concentrazioni di radon negli edifici, la messa a punto e l'avvio di un piano di informazione della popolazione e di gruppi specifici, la produzione di linee guida e la predisposizione di adeguamenti normativi. Le attività di monitoraggio saranno comunque affidate alle singole Regioni e Province Autonome.

3.2.3 Stato di avanzamento della valutazione del rischio radon delle regioni italiane

Il D.Lgs. 241/2000 prevedeva che le regioni, entro 5 anni dalla data di pubblicazione, quindi entro il 31 agosto 2005 (art. 10-sexies e art.37, comma 5), definissero le aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon (*radon prone areas*) all'interno del proprio territorio e con le modalità definite da un'apposita Commissione Ministeriale non ancora insediata.

Alcune regioni e province autonome hanno comunque avviato il lavoro di indagine per la definizione delle radon prone areas facendo riferimento alle soluzioni adottate in altri paesi europei e alle indicazioni contenute nel PNR, ma comunque in modo non coordinato.

In particolare le regioni che, tramite le ARPA, hanno già avviato e divulgato i risultati parziali delle proprie indagini indoor sono: *Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Veneto, Trentino Alto Adige, Friuli Venezia Giulia, Emilia Romagna, Toscana e Abruzzo*. Le singole indagini differiscono per la strategia e la metodologia di campionamento e per il periodo di esposizione dei rivelatori; in alcuni casi insieme a misure annuali sono state effettuate misurazioni anche nel solo periodo invernale (in particolare nelle scuole al fine ricercare i valori più elevati) oppure le misure sono state condotte su diversi piani, ricorrendo poi a delle normalizzazioni, e comunque in prevalenza al piano terreno rispetto ai piani sotterranei (Giannardi et al., 2001). Per i siti di campionamento alcune regioni hanno suddiviso il territorio in maglie più o meno regolari in base alla distribuzione della popolazione sul territorio o delle caratteristiche morfologiche del suolo (De Bartolo et al., 2005), in altri casi invece sono stati preliminarmente utilizzati i dati pregressi derivanti dall'Indagine Nazionale basatasi su un campionamento casuale (Gaidolfi et al.). Altre regioni hanno in programma la realizzazione delle mappe (ad esempio Province di Roma e Viterbo) oppure hanno condotto delle indagini senza realizzare una vera e propria mappatura (ad esempio regione Puglia).

Regione	Criterio per la mappatura
Valle d'Aosta	Griglie a maglie fisse e normalizzazione al primo piano. Valutazione geologica.
Piemonte	Utilizzo dati di campagne pregresse e Indagine Nazionale, normalizzazione al piano terra. Sovrapposizione dati alla base geologica per correlazione con classi litologiche.
Lombardia	Griglie a maglie semifisse in base alla morfologia del territorio. Elaborazione geostatistica dei dati.
Veneto	Griglia a maglie fisse e normalizzazione al piano terra. Elaborazione geostatistica area del triveneto.
Alto Adige	Campagna indoor nel periodo invernale e elaborazione geostatistica dei dati. Prevista caratterizzazione geologia.
Friuli Venezia Giulia	Campagna indoor, mappa di distribuzione e correlazione con parametri geologici.
Emilia Romagna	Utilizzo dati dell'Indagine Nazionale e campagna regionale scuole. Elaborazione geostatistica. Correlazione con le caratteristiche geologiche.
Toscana	Avvio di una nuova campagna indoor sulla base delle conoscenze geologiche e delle campagne precedenti.
Abruzzo	Griglia maglie regolari e normalizzazione al primo piano e stagionale; campagna in completamento. Elaborazione geostatistica dei dati. Considerazioni geologiche.

Tabella 3.4: Criteri per la definizione delle aree a rischio radon nelle regioni italiane.

La mancanza di un protocollo comune ha comportato da parte delle diverse Regioni la definizione di criteri ed approcci autonomi che spesso sono risultati non confrontabili fra loro, rendendo complesso il confronto dei dati e la definizione di una carta nazionale di rischio.

CAPITOLO 4 - RISULTATI: CAMPAGNA DI MISURE SVILUPPATA NELL'AMBITO DELLA TESI

Nel presente lavoro di tesi, per le motivazioni descritte nel paragrafo 3.1, è stata condotta una campagna di misurazioni delle concentrazioni di radon indoor, definendo però una procedura generale e condivisibile per rendere omogenei e confrontabili i risultati ottenuti.

4.1 Il protocollo di indagine adottato

Per i campionamenti sono stati utilizzati rivelatori passivi a tracce (paragrafo 2.2.1) che misurano la concentrazione media di radon lungo il periodo di esposizione; questo tipo di strumentazione risulta la più affidabile per i campionamenti di lungo periodo ed è inoltre di semplice utilizzo, insensibile alle radiazioni gamma e all'umidità, poco costosa e non richiede alimentazione.

Scelta la metodologia di misura più adatta è stato definito il tempo di esposizione dei rilevatori in ciascun punto di misura; si è ritenuto più opportuno procedere a campionamenti annuali in modo da ottenere un valore di concentrazione medio non influenzato dalle variazioni giornaliere e stagionali del radon. Parte dei campionamenti sono stati eseguiti, esponendo un primo rivelatore nel trimestrale invernale e uno nei mesi successivi per ottenere un intero ciclo annuale nel medesimo punto di misura; in tal modo è stato possibile calcolare la media annuale ed avere anche una stima dell'eventuale maggior rischio di esposizione durante il periodo invernale. Parte del campionamento è stato condotto con misurazioni solo di tipo annuale sia per limitare il rischio di perdita di punti di campionamento data la facile rimovibilità dello strumento, che ne costituisce il limite nell'utilizzo, sia per il rischio di non poter sostituire il rivelatore entro il termine del periodo invernale. A differenza di altri lavori si è deciso di non eseguire campionamenti di sei mesi più sei mesi in quanto nel considerare come unico periodo invernale sei mesi dell'anno la concentrazione di radon potrebbe essere troppo influenzata da condizioni climatiche anomale nell'anno di campionamento e non permetterebbe di apprezzare una differenza significativa. Inoltre l'allegato 1-bis D.Lgs. 230/95 e s.m.i. fissa il livello d'azione in termini di concentrazione di attività media annua al fine di ottenere una ragionevole stima della concentrazione nel punto di misura.

Un aspetto importante nel definire il protocollo è stata la scelta dei punti di campionamento; nel presente lavoro tutti i punti dove sono stati eseguiti i rilievi sono stati scelti in ambienti lavorativi situati in piani interrati in conformità a quanto richiesto dal D.Lgs 230/95 e s.m.i..

La scelta di campionamento in locali interrati e quindi a più diretto contatto con il terreno ha permesso di rilevare condizioni di maggior accumulo del radon, a differenza di altri lavori come ad esempio l'Indagine Nazionale (Bochicchio et al., 2005) che hanno considerato per definire aree a rischio campionamenti eseguiti su diversi piani, anche superiori al primo, ricorrendo eventualmente a delle normalizzazioni che non sempre riproducono la complessità dei singoli edifici.

In particolare i campionamenti sono stati condotti in edifici ad uso lavorativo con caratteristiche costruttive analoghe ad edifici abitativi, sono stati quindi esclusi tunnel, grotte, capannoni industriali, ecc. e inoltre durante tutto il periodo di misura nei locali sono state mantenute le "normali" condizioni di uso (inclusa la ventilazione).

All'interno di ciascun edificio dove presenti più locali i campionamenti sono stati condotti in ciascuno di essi in modo da evitare sovrastime dovute ad anomalie di singoli locali. All'interno di ciascun locale il posizionamento del rilevatore è stato scelto nel punto più opportuno, seguendo i criteri delineati nelle Linee guida delle Regioni e Province autonome, ovvero ad un'altezza compresa fra circa 1 e 3 metri, in un'area lontana da fonti di calore e/o di ricambio d'aria ed in base all'ampiezza del locale secondo la tabella 4.1.

Categoria	Numero di misure raccomandato
A: Locali separati di piccole dimensioni	Una misura in ciascun locale
B: Ambienti di medie e grandi dimensioni	Una misura ogni 100 m ² di superficie

Tabella 4.1: Numerosità delle misure in funzione dell'ampiezza del locale.

La strategia di campionamento si è basata in primo luogo sulla necessità di delineare l'esposizione radon sull'intero territorio italiano, utilizzando un numero di punti di misura adeguato in base anche a precedenti esperienze, ovvero eseguendo un numero di misure statisticamente equivalente a quello dell'Indagine Nazionale. In conseguenza della tipologia edificativa scelta i punti di campionamento sono risultati concentrati nei centri abitati e quindi distribuiti in modo non omogeneo su tutto il territorio, ma essi forniscono comunque elementi per considerazioni più generali e possibili correlazioni con fattori geologici.

4.2 Risultati delle misure eseguite in ambito nazionale

Nella campagna di misure sono stati condotti 2715 campionamenti della durata di un anno distribuiti su tutto il territorio nazionale nel periodo settembre 2005 - ottobre 2008, seguendo il protocollo descritto nel paragrafo 4.1 e utilizzando il metodo di misura sviluppato (paragrafo 2.2.1). Sono stati inoltre utilizzate 2710 misure pregresse messe a disposizione dalla U-Series Srl condotte nel periodo giugno 2003 – ottobre 2006 con criteri analoghi alla campagna oggetto di tesi, per un

totale di 5425 campionamenti. I risultati sono riportati in sintesi nella tabella 4.2 dove per ogni regione è indicato il numero di campionamenti, la media annuale di concentrazione di radon calcolata e la percentuale di risultati non inclusi nella media in quanto inferiori alla minima concentrazione di attività rivelabile dagli strumenti (MAR). Sono inoltre riportati per ciascuna regione i valori massimi e minimi registrati e quindi il range dei valori di concentrazione riscontrati sul territorio regionale. L'incertezza della misura del valore medio è espressa come errore standard SE (Bochicchio et al., 2005).

REGIONE	NUMERO PUNTI CAMPIONAMENTO	MAR (Bq/m ³)	% < MAR	MEDIA±SE (Bq/m ³)	MIN (Bq/m ³)	MAX (Bq/m ³)	RANGE
ABRUZZO	60	-	-	225 ± 38	22	1607	1585
BASILICATA	19	-	-	70 ± 38	4	156	152
CALABRIA	39	9÷13	13%	137 ± 42	11	1200	1189
CAMPANIA	132	6÷13	6%	210 ± 29	8	2200	2192
EMILIA ROMAGNA	474	5÷14	15%	57 ± 7	4	2500	2496
FRIULI-VENEZIA GIULIA	41	6	15%	85 ± 20	7	513	506
LAZIO	602	-	-	199 ± 29	7	10087	10080
LIGURIA	150	6	12%	30 ± 5	5	686	681
LOMBARDIA	1741	5÷12	6%	89 ± 5	5	4400	4395
MARCHE	104	-	-	70 ± 8	8	548	540
MOLISE	14	-	-	40 ± 7	20	100	80
PIEMONTE	282	6÷12	4%	118 ± 20	8	2400	2392
PUGLIA	279	6÷12	4%	189 ± 18	7	2587	2580
SARDEGNA	72	-	-	35 ± 4	8	232	224
SICILIA	232	6÷14	14%	93 ± 8	5	900	895
TOSCANA	707	5÷10	7%	62 ± 5	4	1953	1949
TRENTINO-ALTO ADIGE	65	-	-	179 ± 33	15	1531	1516
UMBRIA	86	6	6%	99 ± 25	5	1600	1595
VALLE D'AOSTA	17	-	-	115 ± 24	26	406	379
VENETO	309	6÷10	2%	89 ± 9	8	1800	1792

Tabella 4.2: Riassunto dei risultati ottenuti suddivisi per regione.

Essendo la distribuzione dei punti di misura non omogenea sul territorio, i risultati così raggruppati per regione danno solamente un dato mediato che però è utile per avere un primo quadro complessivo della situazione sul territorio nazionale.

I livelli di concentrazione di attività radon misurati sono risultati complessivamente molto variabili anche all'interno di una stessa regione, fino ad un valore massimo di 10087 Bq/m³ in Lazio. La

media complessiva su tutto il territorio nazionale risulta essere di 110 Bq/m^3 , molto superiore alla media di 70 Bq/m^3 derivata dall'Indagine Nazionale. Valori medi di concentrazione di radon regionali superiori ai 150 Bq/m^3 (livello d'azione fissato dall'Environmental Protection Agency) sono stati riscontrati in Abruzzo, Campania, Lazio, Puglia e Trentino Alto Adige. In generale, tranne in Molise e Basilicata dove però il numero di campionamenti è inferiore a 20, in tutte le regioni sono stati indagati punti dove le concentrazioni annuali sono risultate superiori ai 200 Bq/m^3 , livello di riferimento raccomandato dalla Commissione Europea (Euratom 143/90) per le abitazioni e in 16 regioni punti dove le concentrazioni sono risultate superiori al livello d'azione fissato nel D. Lgs. 241/00 in 500 Bq/m^3 . Una prima esamina dei dati raccolti ha dato quindi indicazione dell'effettiva esistenza del pericolo radon nel territorio nazionale.

4.3 Confronto della campagna eseguita nell'ambito di tesi con i dati di letteratura

Al fine di meglio comprendere i risultati ottenuti, è stata elaborata una carta tematica di concentrazione media annua di radon nelle diverse regioni (Fig. 4.1) ed è stata messa a confronto con quella ottenuta dall'Indagine Nazionale APAT (Paragrafo 3.2.2), utilizzando i medesimi intervalli di concentrazione media annuale di radon, la stessa colorazione e introducendo un ulteriore intervallo per concentrazioni medie superiori a 120 Bq/m^3 .

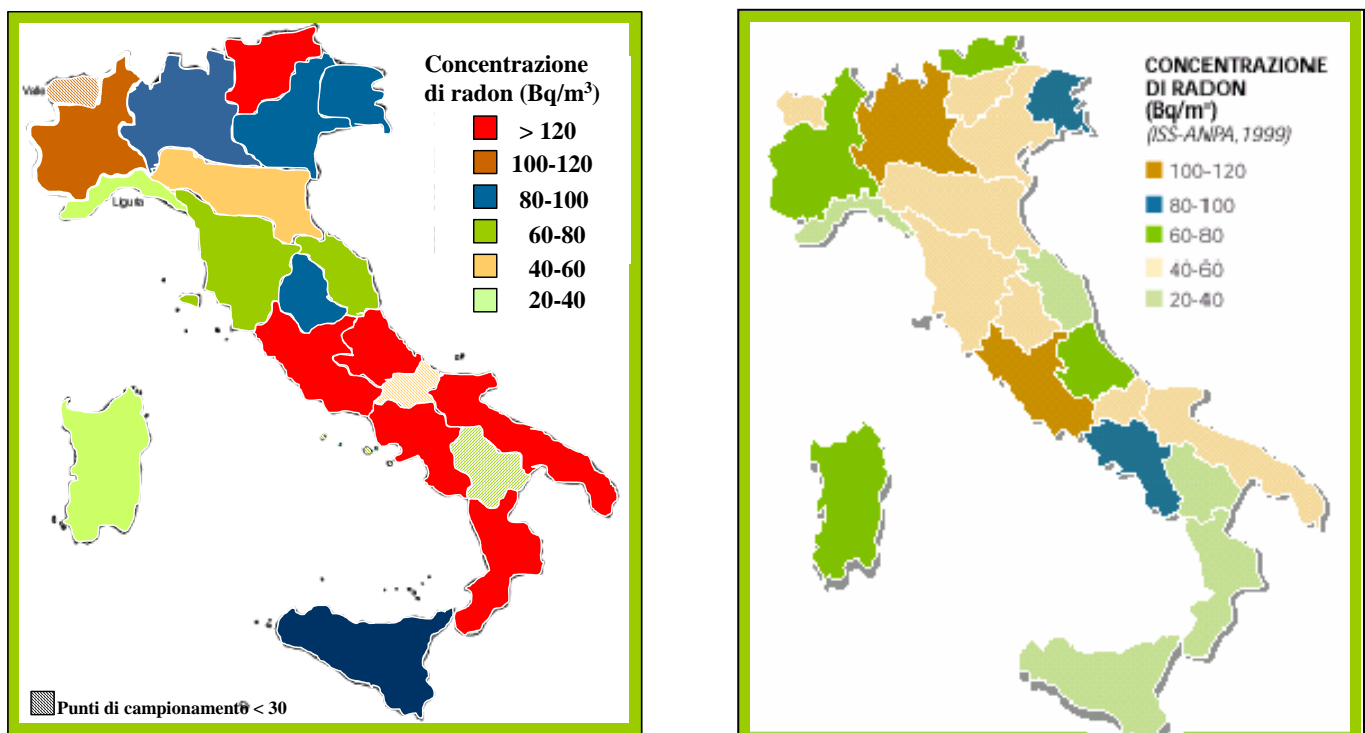


Figura 4.1: Confronto tra la concentrazione media annuale di radon nelle regioni italiane: a sinistra la carta ottenuta nell'ambito della tesi (5425 campionamenti) e a destra quella elaborata dall'Indagine Nazionale (5228 campionamenti).

Dal confronto risulta evidente che la campagna condotta in ambito di tesi ha messo in luce concentrazioni medie più elevate rispetto a quelle ottenute dall'Indagine Nazionale nella maggior parte delle regioni italiane. Questo risultato deriva innanzitutto dalla metodologia utilizzata nella campagna condotta in cui le misurazioni sono state effettuate in condizioni di rischio maggiore, ovvero in locali interrati. Per meglio comprendere le differenze fra il rilascio di radon definito dai dati di letteratura e quelli da noi riscontrati, i dati dell'Indagine Nazionale sono stati rielaborati in base alle caratteristiche degli ambienti monitorati; analizzando i dati è emerso che solo l'1% dei campionamenti sono stati condotti in ambienti sotterranei, il 20% in locali al piano terreno, il 39% al primo piano e ben il 40% in locali superiori al primo (Fig.4.2).

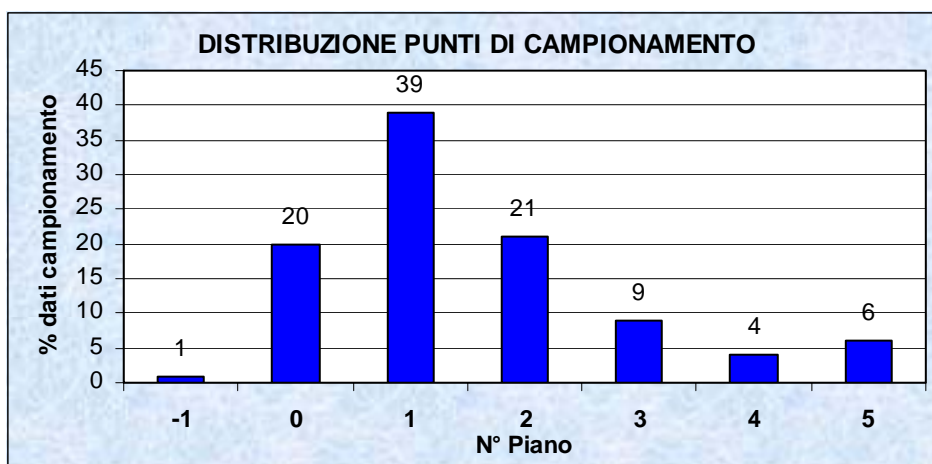
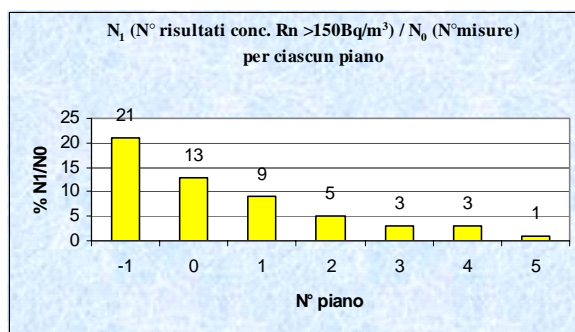


Figura 4.2: Percentuale di campionamenti eseguiti a diversi livelli in 5228 edifici nell'ambito dell'Indagine Nazionale (Bocchicchio et al., 2005)

L'utilizzo di questi campionamenti ha comportato una sottostima del rischio, infatti analizzando in dettaglio i risultati ottenuti nell'Indagine Nazionale si ha che la maggior parte dei superamenti del limite dei 200 Bq/m³ raccomandato dalla Commissione Europea (EC,1990) per le abitazioni sono stati ottenuti nei locali interrati e via via in misura minore nei locali dei piani più alti (Fig. 4.3).



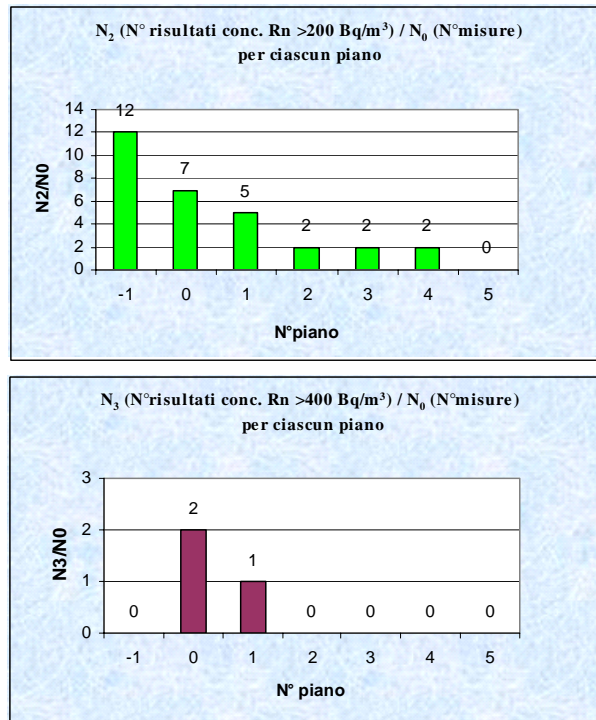


Figura 4.3: Percentuale delle concentrazioni annuali di radon superiori a rispettivamente 150 Bq/m³, 200 Bq/m³ e 400 Bq/m³ nei diversi piani dei 5228 edifici dove sono stati eseguiti i campionamenti nell'ambito delle Campagna Nazionale (Bocchicchio et al., 2005).

In entrambi gli studi per 5 regioni il peso statistico delle misure è più significativo mentre per le altre il numero di misure è relativamente basso con 2 regioni in cui i dati sono inferiori a 30 nell'Indagine Nazionale e 3 nel rilevamento di questo studio. Confrontando i risultati ottenuti con un numero di campionamento pari o superiori a quelli dell'indagine Nazionale (Tab. 4.3), si evidenzia che le regioni Lombardia e Lazio in particolare si confermano regioni particolarmente a rischio con concentrazioni medie annuali rispettivamente di 89 e 199 Bq/m³. La regione Emilia Romagna si conferma una regione a basso rischio, anche se analizzando i valori massimi non sono da escludersi situazioni a rischio che verranno poi meglio analizzate. Particolarmente interessante è il caso dei risultati dei campionamenti della regione Puglia, regione tradizionalmente considerata a basso rischio, dove la media è risultata pari a 189 Bq/m³ e quindi molto superiore rispetto ai 52 Bq/m³ ottenuti nell' Indagine Nazionale.

Regione	Numero campionamenti in ambito di tesi	Concentrazione media annuale di radon ottenuta	Numero campionamenti Indagine Nazionale	Concentrazione media annuale di radon Indagine Naz.
Emilia Romagna	474	57	369	44
Lazio	602	199	304	119
Lombardia	1741	89	820	111
Puglia	279	189	308	52
Toscana	707	62	315	48

Tabella 4.3: Risultati ottenuti nell'ambito di tesi a confronto con l'Indagine Nazionale per le regioni con un uguale o superiore numero di campionamenti.

4.4 Stagionalità

Per un totale di 2085 punti di campionamento, le misure sono state condotte posizionando uno strumento passivo per tre mesi durante la stagione invernale (2005-2006, 2006-2007, 2007-2008) sostituito poi da uno nuovo nel medesimo punto per altri 9 mesi, ottenendo così la media di concentrazione di radon invernale e quella annuale per ciascun punto di misura. A queste sono state aggiunte per l'elaborazione un centinaio di misure pregresse messe a disposizione dalla U-Series Srl, per un totale di 2205 punti di campionamento.

Con i dati ottenuti è stata elaborata una carta tematica della concentrazione di radon media stagionale per ciascuna regione, utilizzando intervalli di concentrazioni analoghi a quelli utilizzati nell'Indagine Nazionale APAT; le carte tematiche così prodotte permettono di rendere più immediato il confronto fra le concentrazioni medie di radon annuali e invernali ottenute dalla campagna (Fig. 4.4).

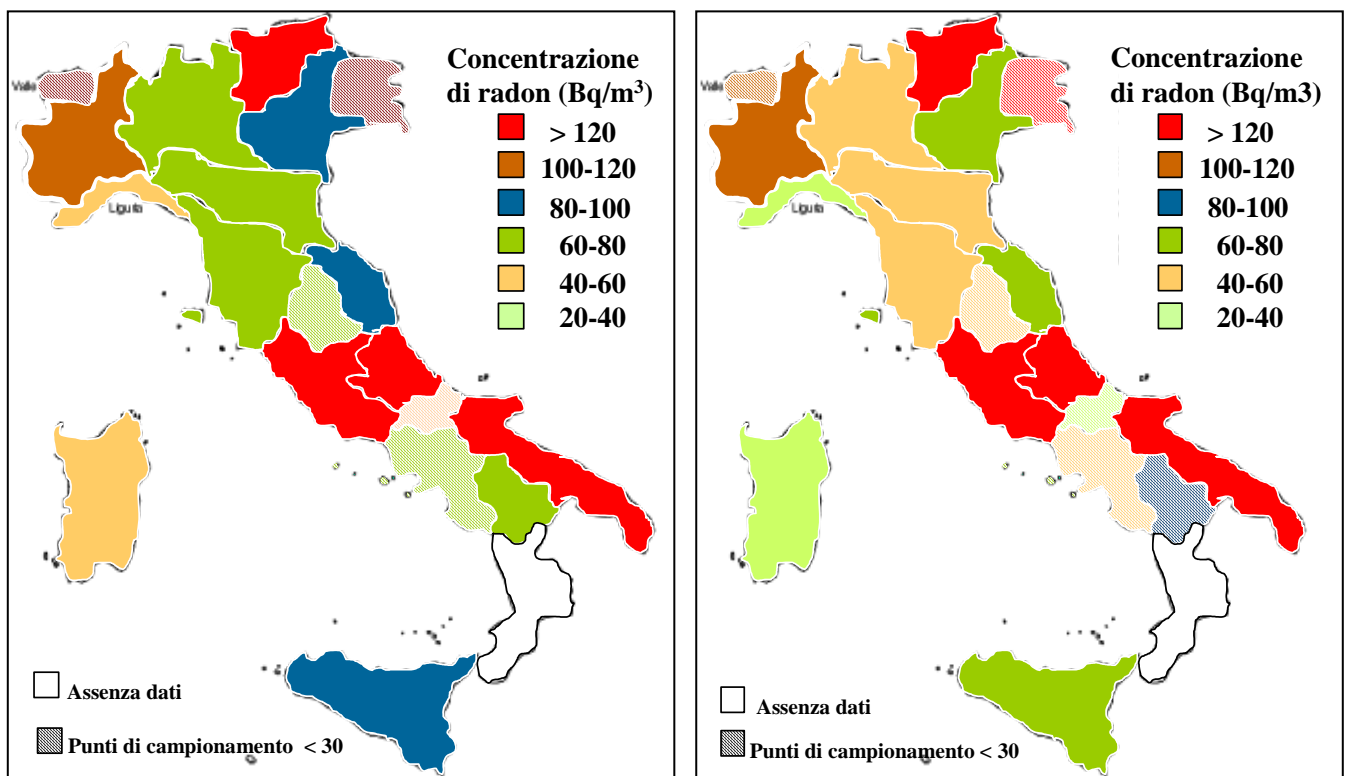


Figura 4.4: Mappe della concentrazione media di radon per regione durante il periodo invernale (a sinistra) e annuale (a destra) a confronto (2205 punti di campionamento).

Le carte tematiche evidenziano un' esposizione al radon maggiore o almeno uguale durante il trimestre invernale, evento noto e legato al verificarsi delle condizioni peggiori fra le varie componenti (Tab.4.4) che influenzano le variazioni di radon indoor, quali la diminuzione di areazione dei locali, l' "effetto camino", le oscillazioni dell'acquifero, ecc..

Tempo	Causa fisica
Minuti - ore	Fattori correlati all'attività degli abitanti (apertura di finestre, porte, ecc.)
< minuti	Brevi fluttuazioni delle differenze di temperatura dovute alle fluttuazioni dei venti
Ore	Fluttuazioni nelle proprietà di trasporto nel suolo indotti da fattori meteorologici
Ore, giorni, settimane	Episodi climatici short-term
Giornaliero	Ritmi giornalieri della temperatura e della pressione
Annuale	Variazioni meteorologiche stagionali, legate alle attività degli abitanti (probabilità apertura finestre)

Tabella 4.4: Componenti che influenzano la variabilità del radon in ambienti indoor (Bossew et Lettner, 2007)

I risultati ottenuti sono in accordo con i dati della letteratura, in particolare con il lavoro di Sesana et al., 2003, che grazie al monitoraggio eseguito in esterno nella città di Milano dal 1997 al 2000 ha potuto evidenziare la maggiore concentrazione di radon nei periodi invernali (novembre, dicembre, gennaio), da imputare anche alle condizioni meteorologiche del periodo invernale.

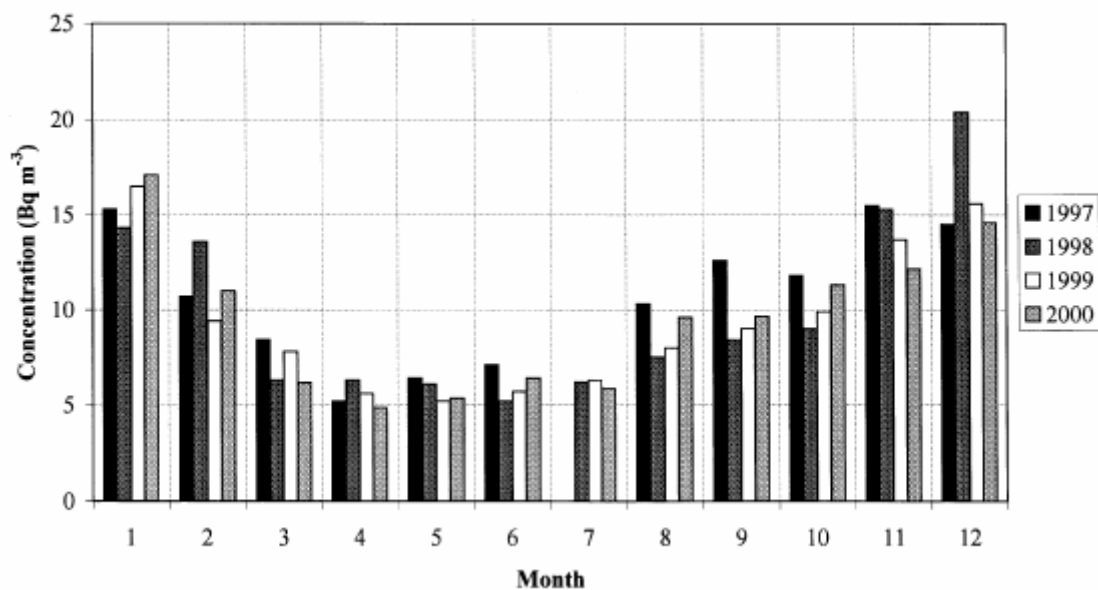


Figura 4.5: Concentrazioni medie mensili (Bq/m^3) di radon nei 12 mesi dell'anno per il periodo 1997 – 2000 (Sesana et al., 2003).

Al fine di valutare il rischio radon indoor non è possibile quindi trascurarne le variazioni stagionali e inoltre i risultati ottenuti confermano la necessità di effettuare in ambienti indoor misurazioni di durata annuale.

Dai risultati ottenuti non sembra però possibile ricavare fattori di correzione stagionali per tenere conto di tali variazioni nel caso di misurazioni brevi, come quelli adottati da alcuni paesi secondo il modello di Pinel, come Francia (Baysson et al., 2003) e Regno Unito (Pinel et al., 1995).

CAPITOLO 5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI: RESTITUZIONE DEI DATI MEDIANTE GEOREFERENZIAZIONE

I risultati ottenuti dalla campagna di misure delle concentrazioni di radon indoor e presentati nel Capitolo 4 come medie regionali non permettono correlazioni con la geologia locale e non permettono di apprezzare eventuali anomalie locali che possono presentarsi anche in regioni a basso rischio come l'Emilia Romagna. Per rappresentare la correlazione spaziale dei dati si è quindi proceduto ad un'elaborazione geostatistica; sono state poi realizzate delle carte di distribuzione del radon di alcune regioni corredate da opportune considerazioni geologiche.

5.1 Metodologia adottata

Il metodo utilizzato per produrre carte di distribuzione di radon si basa sull'utilizzo di tecniche geostatistiche che permettono di ottenere informazioni sulla variabilità spaziale di un dato fenomeno a partire da informazioni ottenute da misurazioni in campo, al fine di stimare tali fenomeni (Raspa, 1995). In particolare la tecnica basata sul kriging è un potente strumento per la mappatura delle concentrazioni di radon che seguono, in generale, una distribuzione log-normale (Zhu et al., 1996). Le mappe prodotte permettono inoltre di correlare i valori di concentrazione di radon agli ambienti geologici (Zhu et al., 2001).

Poiché il rischio radon non è legato semplicemente alla litologia locale, ma anche ad altri fattori quali la struttura geologica, la composizione del suolo, la porosità e la presenza di faglie e fratturazioni, una semplice stima in base alla classificazione litologica porterebbe a una perdita di informazioni; perciò diversi paesi europei ed extraeuropei recentemente hanno cominciato ad utilizzare metodologie geostatistiche per predirne la distribuzione spaziale e individuare così le aree a rischio radon non basandosi solo sulle misure nel suolo (Oliver et al., 2001) ma attraverso l'utilizzo di campagne di misura indoor. In particolare Austria (Dubois et al., 2007) e Belgio (Zhu et al., 2001) hanno applicato tecniche geostatistiche per l'individuazione di aree a rischio e hanno poi provato la correlazione tra le concentrazioni di radon indoor e le caratteristiche geologiche delle zone monitorate (Bossey et al., 2008); analogamente stanno procedendo in questa direzione altri paesi quali Spagna (Quindos Porcela et al., 2004) e Repubblica Ceca (Carnet et al., 2008).

Per ciascuna delle regioni prese in esame si è proceduto alla georeferenziazione dei dati raccolti ovvero all'associazione di una coppia di coordinate geografiche agli indirizzi degli edifici nei quali sono stati condotti i campionamenti; a questo scopo è stato utilizzato il software Google Earth; tutte

le coordinate geografiche sono state convertite nelle coordinate standard UTM (Quindos Porcela et al., 2004). Al singolo sito di misura è stato quindi messa in relazione la media delle concentrazioni di radon nei diversi locali.

L'elaborazione delle carte tematiche si è basata sul programma Surfer 8.0 della Golden Software che necessita di dati sotto forma di matrice a tre colonne in cui ogni singolo edificio campionato è associato alle due coordinate di posizionamento sulla mappa, mentre alla terza colonna è associato il valore medio di concentrazione di radon annuale misurato nell'edificio stesso. Il software è in grado di interpolare i singoli dati mediante kriging ordinario; dalla griglia di dati ottenuta vengono costruite le linee di isodensità.

Al fine di migliorarne la visualizzazione per tutte le diverse carte è stato utilizzato un medesimo codice di colori, ovvero ad ogni intervallo di concentrazioni è stato assegnato un colore caratteristico.

5.2 Cartografia tematica e considerazioni geologiche

Basandoci sui dati forniti dalla campagna condotta nel lavoro di tesi e sulle carte tematiche già esistenti sono state selezionate alcune regioni rappresentative delle problematiche che interessano il territorio nazionale. Fra le zone già studiate in passato sono state maggiormente indagate le aree con estesi affioramenti vulcanici dell'Italia centrale (Beaubien et al., 2003) e le aree presso il versante sud-est del vulcano Etna (Brognna et al., 2007); sono state quindi scelte regioni di studio dove le problematiche non sono state ancora approfondite o dove il problema è noto, ma forse sottovalutato. Al fine di valutare il rischio radon le carte ottenute sono state integrate con considerazioni di tipo geologico.

5.2.1 Regione Lombardia

Per la realizzazione, tramite la procedura descritta nel paragrafo 5.1, della carta di distribuzione della concentrazione di radon della regione Lombardia sono stati utilizzati i risultati dei 1741 campionamenti condotti nella campagna indoor e distribuiti in ambienti urbani.

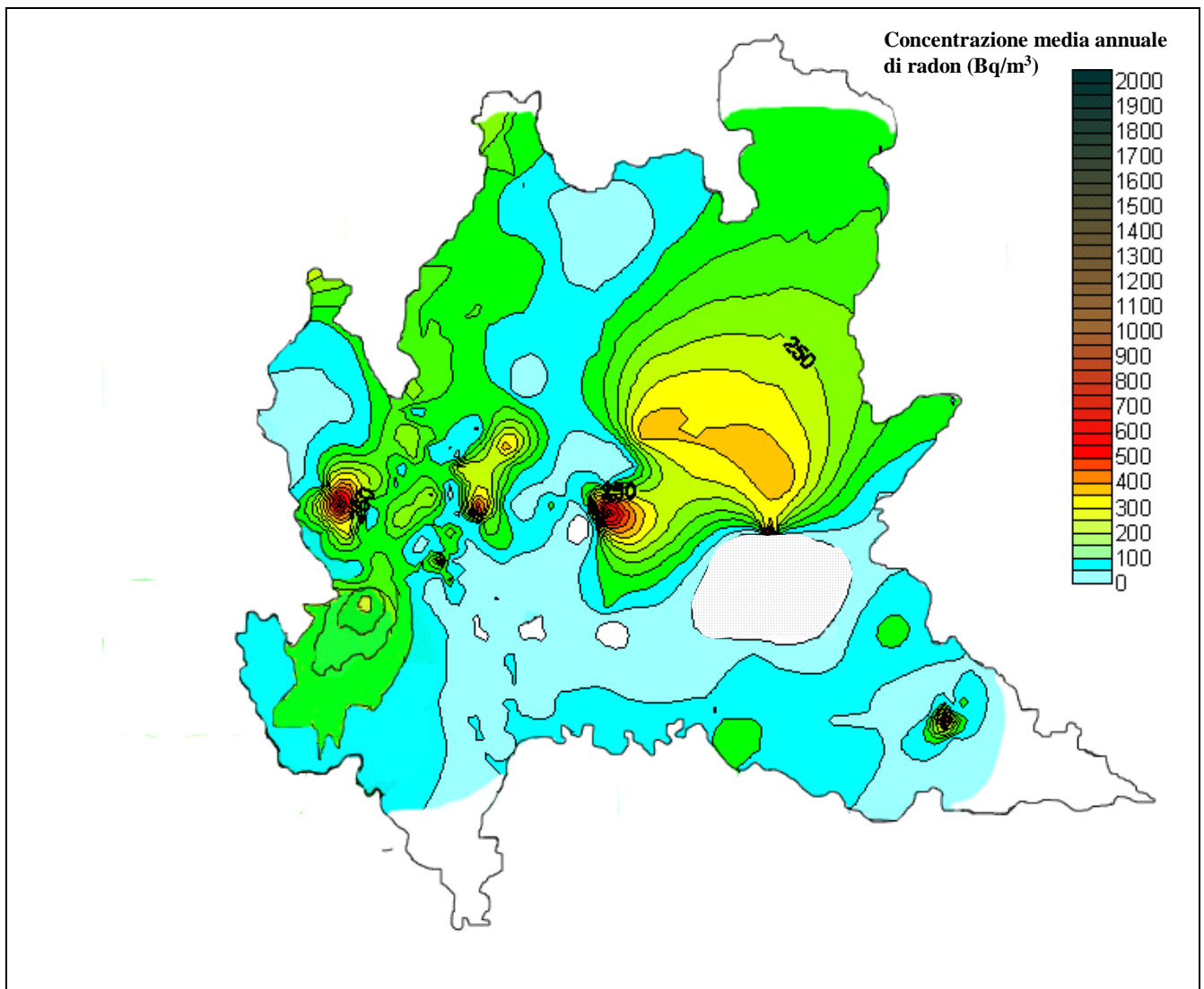


Figura 5.1: Carta di distribuzione delle concentrazioni medie di radon annuali (Bq/m³) nella regione Lombardia con relativa scala; le zone in bianco sono da considerarsi in prevalenza rurali e/o a bassa densità abitativa.

La zona indicata nella carta con punti su sfondo bianco indica una zona al di sotto della città di Brescia molto complessa dal punto di vista tettonico, ma nella quale i dati disponibili non erano sufficienti per descriverla e anzi avrebbero potuto essere fuorvianti.

La distribuzione della concentrazione media annuale di radon ha messo in evidenza la presenza di diverse zone dove è probabile il superamento dei 200 Bq/m³ indicati dalla Commissione Europea, ma anche zone suscettibili al superamento del livello d'azione di 500 Bq/m³, anche in centri densamente abitati come la città di Brescia con una media di 550 Bq/m³.

Considerazioni geologiche:

Come primo punto su cui basare le nostre ipotesi si è partiti dall'inquadramento geologico della regione in oggetto, per poi passare a studi di dettaglio delle aree che hanno presentato un potenziale rischio radon. La regione Lombardia dal punto di vista geologico si presenta particolarmente eterogenea, confermando la non rappresentabilità della regione con un unico valor medio di radon.

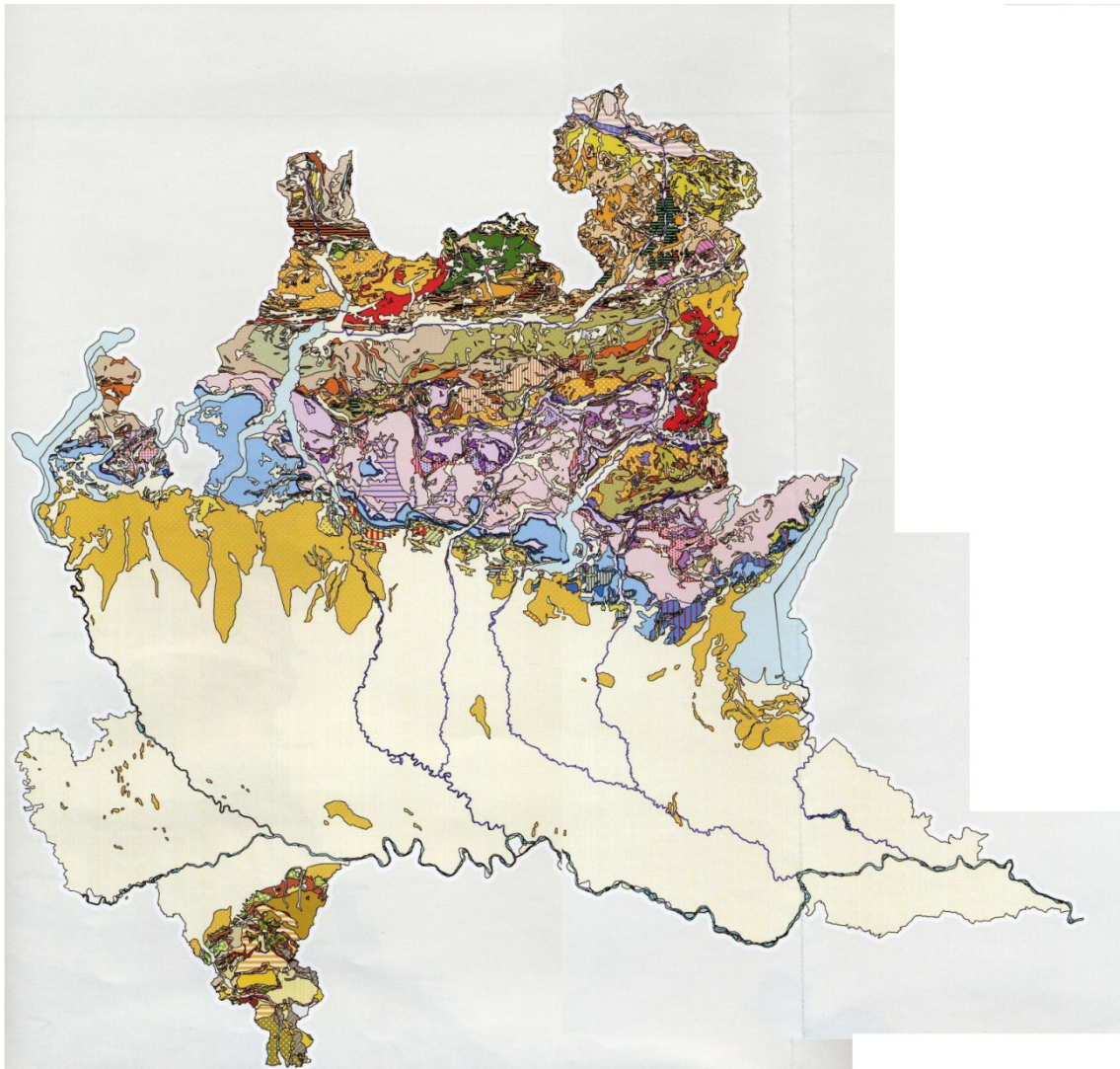


Figura 5.2: Sintesi e rielaborazione della “Carta Geologica della Regione Lombardia” alla scala 1:250000 (Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 1990).

CARTA GEOLOGICA

QUATERNARIO CONTINENTALE - "VILLAGRANCHIANO"

- Depositi fluviali, fluvio-glaciali e lacustri (Pleistocene-Olocene)
- Depositi fluviali, fluvio-glaciali e lacustri (Pleistocene medio-inf.)
- "Ceppo" (Pleist. inf.-Plioc. sup.) e formaz. simili, facies "Villagranchiane"

ALPI

ROCCE MAGMATICHE s.s. E ROCCE MAGMATICHE CON LEGGERA IMPRONTA METAMORFICA ALPINA

A) ROCCE PLUTONICHE TERZIARIE

- Graniti e granodioriti, pegmatiti e apliti
- Quarzodioriti e tonaliti
- Dioriti e gabbri

B) ROCCE FILONIANE DA TRIASSICHE A TERZIARIE TALORA CON METAMORFISMO ALPINO

- Andesiti, dactili, basalti e rioliti ("Porfiriti" Auct.)

C) ROCCE VULCANICHE PERMIANE GENERALMENTE CON METAMORFISMO ALPINO

- Rioliti più o meno alcaline ("Porfidi quarziferi" Auct.)
- Andesiti ("Porfiriti" Auct.)
- "Granofiri" Auct.

D) ROCCE PLUTONICHE PERMO-CARBONIFERE CON METAMORFISMO ALPINO

- Graniti e granodioriti
- Dioriti e gabbri

ALPI MERIDIONALI o SUDALPINO

A) COPERTURA SEDIMENTARIA

- "Gonfolite" (Burdigaliano-Oligocene sup.)
- F. di M. Orfano (Miocene medio-inf.)
- "Scaglia Lombarda" (Eocene medio-Barremiano sup.)
- Flysch di Bergamo (Campaniano-Santoniano)
- Arenaria di Sarnico (Coniaco)
- F. di Pontida (Turoniano)
- "Sass de la luna" (Turoniano inf.-Albiano) e Marna di Bruntino (Aptiano-Albiano)
- "Maioica" (Barremiano-Titoniano)
- "Seicifero lombardo" (Titoniano-Bajociano)
- Gruppo del Medolo (Sinemuriano-Domeriano)
- "Dolomia a Conchodon" (Lias inf.)
- "Coma" (Lias medio-Retico sup.)
- Calcarea di Zu (Retico)
- Argillite di Riva di Solto (Retico)
- Calcarea di Zorzino (Norico)
- "Dolomia Principale" (Norico)
- Dolomia di Campo dei Fiori (Retico medio-inf.)
- Formazione di S. Giovanni Bianco (Carnico sup.)
- Formazione di Gorno (Carnico medio-inf.)
- Arenaria di Val Sabbia (Carnico medio-inf.)
- Formazione di Breno (Carnico medio-inf.)
- "Calcarea metallifero bergamasco" (Carnico inf.)
- Calcarea di Esino (Carnico inf.-Anisico sup.)
- Dolomia di S. Salvatore (Carnico inf.-Anisico sup.)

- F. di Buchenstein e F. di Wengen (Ladinico)

- Calcarea di Prezzo e Calcarea di Angolo (Anisico)

- Carniola di Bovegno (Anisico inf.-Scitico sup.)

- "Servino" (Scitico)

- "Verrucano Lombardo" (Permiano sup.)

- F. di Collio (Permiano inf.)

- Conglomerati di Ponteranica e Dosso dei Galli (Permiano inf.)

- "Conglomerato Basale" (Permiano inf.-Carbonifero sup.?)

B) BASAMENTO CRISTALLINO PRE-PERMIANO

- Ortogneiss, talora occhiadini ("ortogneiss e Gneiss Chiari Auct.")

- Scisti di Edolo, Filladi di Ambria e Micascisti del Maniva

- Quarziti in masse

- Micascisti prevalenti ("Scisti dei Laghi" Auct.)

- Paragneiss ("Gneiss di Morbegno" e simili)

AUSTRIDI o AUSTRALPINO

A) COPERTURE SEDIMENTARIE PERMO-MESOZOICHE (Austridi medio-superiori)

- F. di M. Motto, Calcarea di Valle del Monte e "Broccatello" (Lias?)

- F. di Fraele (Retico)

- Calcarea di Quattervals (Norico)

- Dolomia di Umbrail, di Pra' Grata, dello Stelvio e del Cristallo (Norico)

- F. della Val Forcola, Carniola del M. Garone (Carnico)

- Dolomia di Wetterstein, F. di Val Pila (Anisico-Ladinico)

- "Verrucano Alpino", Arenarie variegata (Permo-Trias)

- (Austridi inferiori, in facies metamorfica)

- Calcescisti non oliolitiferi e quarzoscisti manganiferi

- Dolomie e calcari cristallini, carnioli e quarziti

B) BASAMENTI CRISTALLINI PALEOZOICI

- Gneiss granitici e granodioritici ("ortogneiss" Auct.) e migmatiti

- Filladi e micascisti filladici

- Micascisti argentei ("Micascisti della Cima Roavaia")

- Paragneiss a due miche e sillimanite

PENNIDI o PENNIDICO

A) COPERTURE PERMO-MESOZOICHE METAMORFICHE

- Metafoliti: calcescisti, quarzoscisti, prasiniti, anfiboliti

- Marmi dolomitici e calcarei, carnioli

B) BASAMENTI CRISTALLINI PRE-TRIASSICI

- Serpentiniti e oficarbonati

- Gneiss granitici e granodioritici e Migmatiti

- Paragneiss a due miche

INTERCALAZIONI NEI BASAMENTI CRISTALLINI (Sudalpino, Australpino, Pennidico)

- Anfiboliti

- Marmi

APPENNINO

A) DEPOSITI CONTINENTALI E MARINI DA TARDO A POST-OROGENICI

- Argille di Lugagnano (Pliocene inf.)

- Conglomerati di Cassano Spinola (Pliocene inf.-Messiniano)

B) SUCCESSIONI OLIGO-MIOCENICHE NEOAUTOCTONE (BTP) E SEMIALLOCTONE (COMPL. RANZANO-BISMANTOVA)

- "Formazione Gessoso-solfifera" (Messiniano)

- Marne di S. Agata Fossili (Messiniano?-Tortoniano)

- Arenarie di Monte Vallassa (Tortoniano-Serravalliano)

- Marne di Monte Lumello (Langhiano-Miocene pre-Langhiano)

- Marne di Antognola (Miocene pre-Langhiano-Eocene sup.)

- Arenarie di Ranzano (Oligocene sup.-Eocene sup.)

C) UNITA' LIGURI

- Arenarie di Scabiazza (Turoniano-Cenomaniano)

- Complesso indifferenziato

- Marne di Monte Piano (Eocene sup.-Eocene inf.)

- Formazione di Val Luretta (Eocene medio-Paleocene)

- Calcarea di Antola (Paleocene-Turoniano)

- Calcarea di Cassio (Paleocene-Turoniano)

- "Argille a Palombini di Barberino" (Albiano-Aptiano)

- "Complesso Caotico"

D) UNITA' SUB-LIGURI

- Formazione di Monte Perice (Eocene medio-Paleocene)

Figura 5.3: Legenda della "Carta Geologica della Regione Lombardia" alla scala 1:250000.

La regione si distingue in quattro domini strutturali, ciascuno contraddistinto da una particolare costituzione fisica ed evoluzione geologica. Per quanto riguarda la fascia di Pianura Padana, essa riceve sedimenti terrigeni dalle Alpi e dall'Appennino che ricoprono le litologie del sottosuolo, ed in particolare i fronti sepolti delle Prealpi e degli Appennini. La pianura padana lombarda è stata alimentata dai sedimenti fluviali convogliati in essa dai corsi d'acqua, che si sovrappongono ai sedimenti glaciali del fronte prealpino a loro volta depositi su sequenze sedimentarie che in base alla paleomorfologia erano di ambiente continentale, di transizione o marino. “Nei depositi prevalgono movimenti verticali, legati alla subsidenza da carico localmente in parte compensata dal sollevamento isostatico dei fronti sepolti delle due catene; tuttavia sono ancora attivi anche i fenomeni convergenti, che determinano un'attività sismica modesta ma non trascurabile. Il fronte Subalpino è costituito da rocce per lo più sedimentarie, tranne lungo il crinale Orobico e nel Massiccio delle Tre Valli Bresciane dove diventano importanti le rocce metamorfiche. La successione sedimentaria subalpina registra dal collasso estensionale di una catena montuosa paleozoica (Orogene Ercinico), attraverso l'apertura di un piccolo oceano (Tetide Alpina) sino al sollevamento delle Alpi. A quest'ultima fase è da collegare l'intrusione di grandi plutoni granitoidi, sia nelle Prealpi (Adamello), sia nelle Alpi (Masino-Bregaglia), e l'intensa deformazione delle rocce ad opera di pieghe, faglie e sovrascorrimenti. Nelle Alpi, che si collocano a ridosso di un margine convergente di placche litosferiche, la maggiore entità dei processi deformativi e metamorfici ha trasformato la successione permo-mesozoica in un complesso sistema di falde, che spesso presentano uno zoccolo cristallino con coperture sedimentarie deformate e metamorfosate a vario grado. In Appennino pavese una successione di sedimenti marini è stata bruscamente sollevata fino all'emersione (fine Miocene) da cui l'origine di un “complesso caotico”, ad abbondante frazione argillosa, che ancora comporta una franosità diffusa e locali morfologie calanchive” (“Geografia e numeri della regione Lombardia” Regione Lombardia – Territorio e urbanistica).

Per definire in modo più preciso le aree che debbono essere considerate a rischio, la carta di distribuzione delle concentrazioni di radon realizzata è stata confrontata con le carte litologiche e geomorfologiche e per le aree in cui sono stati riscontrati valori più elevati di radon sono state prese in esame le stratigrafie al fine di comprendere se possibile gli eventuali fenomeni che possono favorire la formazione e l'emanazione del gas.

Per quanto riguarda l'ampia zona a Nord-Ovest della regione, caratterizzata da estese aree con valori intorno ai 100-200 Bq/m³, essa è identificabile con la zona denominata “Serie dei Laghi” (Boriani et al., 1990). La Serie dei Laghi è costituita dalla corpi plutonici granitici intrusi nel

basamento cristallino sudalpino caratterizzato da rocce metamorfiche prealpine; in particolare consiste in un'unità meta-arenitica (Strona Ceneri Zone, SCZ) che include meta – areniti a grana grossa (Cenerigneiss) e a grana fine (Gneiss Minuti) e una formazione metapelitica (Scisti dei Laghi) che affiora dal Lago d'Orta al Lago Maggiore presso Verbania (Pinarelli et al., 2008).

La serie intrusiva è costituita dai graniti Permiani, detti Graniti dei Laghi, piccolo batolite allungato in direzione NE-SW composto di età permiana che intrude sia gli scisti dei laghi sia la zona Strona-Ceneri. Fanno parte dei Graniti dei Laghi 5 plutoni di: Baveno-Mottarone, Montorfano, Alzo, Roccapietra e Quarna.

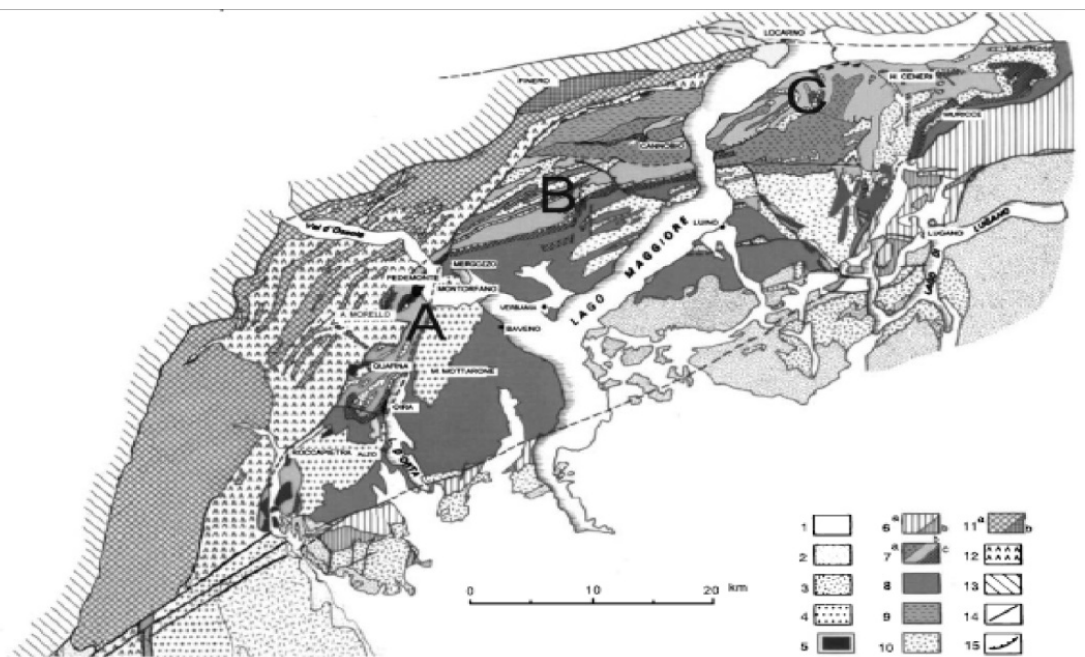


Figura 5.4: Carta Geologica del Massiccio dei Laghi (da Boriani et al., 1990, modificata) – 1) Copertura quaternaria; 2) Copertura sedimentaria mesozoica-cenozoica; 3) Vulcaniti permiane; 4) Graniti permiani (“Graniti dei laghi”); 5) Dicchi e stock a composizione basica ed intermedia (“Appinniti”); 6) Zona Val Colla: a) Scisti, filloniti, anfiboliti ed epidoto; b) “Gneiss Chiari”. SERIE DEI LAGHI: 7a) Zona Strona-Ceneri (paragneiss, comprendenti Cenerigneiss e Gneiss minuti); 7b) Zona Strona-Ceneri Marginale; 8) Scisti dei Laghi (micacisti, paragneiss); 9) rocce della Serie dei Laghi con impronta metamorfica permiana di alta temperatura e bassa pressione, localizzate lungo la Linea Cossato-Mergozzo-Brissago; 10) metagranitoidi ordoviciani. ZONA IVREA-VERBANO: 11a) Rocce basiche, in facies granulitica ed anfibolitica; 11b) Ultramafiti; 12) Kinzigiti e strolaliti. 13) DOMINIO ALPINO. 14) LINEE TETTONICHE: CN = Canavese; TC = Tonale-Centovalli; CMB = Cossato-Mergozzo-Brissago; GR = Grottaccio; PO = Pogallo-Lago d’Orta; LGQ = Val Lessa-Germagno-Quarna; CR = Cremosina; D = Val Dumantina; VC = Val Colla; IT = sovrascorrimento Indemini-Monte Tamaro. 15) SOVRASCORRIMENTI (Pinarelli et al., 2008).

Nella Figura 5.4 si può notare lungo l'ampia fascia che si estende nella regione dei laghi (Lago Como, Lago Maggiore, Lago d'Orta) l'affioramento di grandi masse di rocce ignee intrusive di età carbonifera, prevalentemente acide, legate all'orogenesi ercinica (paleozoico) facenti parte della Serie dei Laghi; queste rocce differenziate acide sono arricchite in elementi incompatibili che tendono a concentrarsi nel fuso (Na, K, Rb, B, U, Th, ecc.). L'elevata concentrazione di K, Th, Rb ed U, che caratterizza alcuni di questi fusi fortemente differenziati, possono rendere queste rocce radioattive oltre a essere dei buoni emettitori di radon. Le concentrazioni di Radio-226, progenitore del radon, che caratterizzano questi affioramenti si possono desumere da misure condotte sui graniti provenienti dalla Serie dei Laghi "Bianco Montorfano" e "Rosa Baveno", che presentano valori di Radio-226 intorno ai 50 Bq/Kg (Tabella 5.2) e quindi leggermente superiori alla media mondiale di 40 Bq/Kg.

Pietra Ornamentale	Tipo	Prov	Ra-226 Bq/Kg	Th-232 Bq/Kg	K-40 Bq/Kg
MONTE BIANCO	Gneiss	AO	166	86	832
PIETRA DI LUSERNA	Gneiss	CN	125	114	1276
BEOLA GHIANDONATA	Beola	NO	68	66	1208
BEOLA VERDE	Beola	NO	34	79	1891
BEOLA GRIGIA	Beola	NO	101	28	1431
BEOLA BIANCA	Beola	NO	48	14	1199
ROSA BAVENO	Granito	NO	SO	68	1225
SERIZZO FORMAZZA	serizzo	NO	35	33	912
SERIZZO ANTIGORIO	serizzo	NO	24	42	738
BIANCO MONTORFANO	Granito	NO	72	73	1258
SERIZZO SEMPIONE	Serizzo	NO	29	40	763
ROSA BAVENO	Granito	NO	65	63	1100
SIENITE DELLA BALMA	Sienite	VC	375	339	1390
SIENITE GRIGIA A GRANA FINE	Sienite	VC	364	256	1264
GRANITO ROSATO S. PAOLO CERVO	sienite	VC	239	189	1206
GRANITO BIANCO DI CAMPIGLIO	sienite	VC	269	173	1181
ROSA CERVO	Granito	VC	348	197	1210
ARDESIA	Ardesia	GE	46	47	924
PORTORO	Marmo	SP	4.2	<0.3	4.5
SERIZZO VALMASINO	Serizzo	SO	42	51	626
SERIZZO GHIANDONE	Serizzo	SO	31	52	1014
TONALITE	Gneiss	SO	30	26	498
PORFIDO DI ALBIANO	Porfido	TN	51	71	1476
CEPPO DI POLTRAGNO	Ceppo	BG	63	0.7	<3
GRANODIORITE	Gneiss	BS	30	86	1285
MULTICOLOR	Granito	BS	29	85	1170
PORFIDO	Porfido	BS	39	54	1164
NUVOLERA	Marmo	BS	2	<0.3	< 3
BOTTICINO	Marmo	BS	13	<0.3	< 2
ROSSO VERONA	Marmo	VE	1.4	2.7	14
GIALLO DORATO	Calcare	VI	12	0.6	5.3
PIETRA DI VICENZA S.GOTTARDO	Calcare	VI	12	0.7	4.6
TRACHITE GIALLO VENATA	Trachite	PD	36	51	1154

Pietra Ornamentale	Tipo	Prov	Ra-226 Bq/Kg	Th-232 Bq/Kg	K-40 Bq/Kg
MONTEMERANO	Travertino	GR	0.3	<0.2	<2.4
TRAVERTINO	Travertino	GR	<0.2	<0.2	<2.4
BIANCO GIOIA	Marmo	MS	1.2	<0.2	5
STATUARIO	Marmo	MS	1.1	<0.2	5
BIANCO SCINTILLANTE	Marmo	MS	3.6	<0.2	<2
BIANCO CARRARA	Marmo	MS	3.9	<0.3	4.2
MARMO	Marmo	MS	1.5	<0.2	<2
TOSCANO CHIARO CLASSICO	Travertino	SI	0.6	0.2	<2
TOSCANO NOCCIOLA	Travertino	SI	1.6	0.7	9
ASCOLANO CHIARO VENATO	Travertino	AP	0.5	<0.2	<2
PEPERINO ROSATO	Peperino	VT	124	162	1351
PEPERINO GRIGIO	Peperino	VT	121	160	1340
BASALTINA	Basalto	VT	498	712	2354
TRAVERTINO	Travertino	RM	0.5	<0.2	<2

Tabella 5.1: Concentrazione di radionuclidi (Ra-226, Th-232 e K-40) nelle Pietre Ornamentali, tratto da “Il Radon nella Casa - di U. Facchini, Gianluigi Valli, R. Vecchi - Ist. di Fisica Gen. Applicata - Universita' di Milano - Maggio 1999”.

La carta di distribuzione del Radon elaborata presenta un'ampia area con concentrazioni medie superiori ai 200 Bq/m³ nella zona Nord-Est della regione Lombardia, ovvero a Nord delle province di Bergamo e Brescia, che sono riconosciute aree a potenziale rischio radon.

In particolare nella zona dell'Alta Val Seriana collocata nelle Alpi Orobie sono conosciute diverse mineralizzazioni ad uranio contenute nei tufi della serie di Collio (Permo-Carbonifero). La mineralizzazione uranifera di Novazza (Paragrafo 5.2.1.1.1) è impostata nelle vulcaniti acide del tardo Paleozoico, che ha una ampia estensione in tutto l'arco alpino meridionale ed è caratterizzato da prodotti vulcanoclastici, tufi conglomeratici e porfiriti (figura 5.5), eventi legati alle fasi post-orogeneche erciniche. Le tufiti uranifere sono legate a eventi magmatici di ambiente continentali i cui proietti sono stati rielaborati in bacini lacustro-lagunari. Le tufiti della Val Trompia sono corpi facilmente erodibili e vengono facilmente degradati dagli agenti meteorici, per cui i corsi d'acqua trasportano a valle sedimenti che spesso hanno concentrazioni di uranio superiori alla norma.

Per quanto riguarda le alte concentrazioni riscontrate nelle zone di pianura in cui la sorgente di radon non è così chiaramente identificabile e correlabile con le litologie sepolte, si è deciso di studiare in modo dettagliato la provincia di Milano e in particolare Milano città attraverso l'analisi delle stratigrafie rese disponibili dalla Provincia di Milano – Assessorato all'Ambiente.

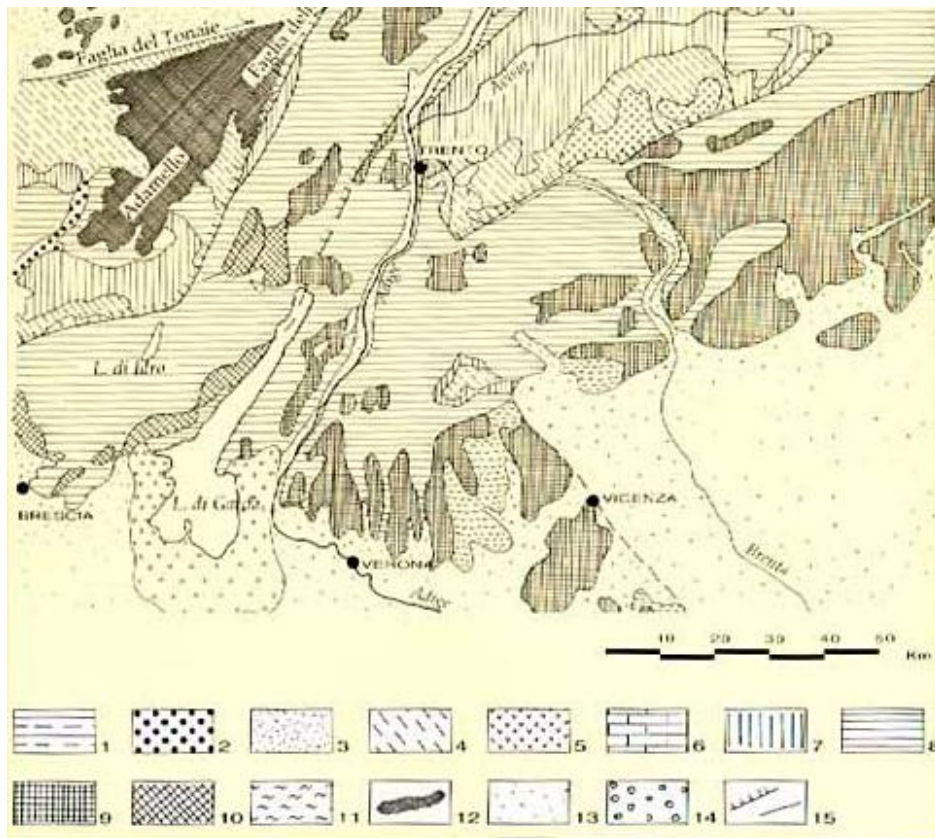


Figura 5.5: 1 Crosta paleoeuropea (Elvetidi): serie delle coperture antiche (dal Precambriano al Paleozoico antico), graniti e gneiss delle alpi centrali (Carbonifero Superiore) compreso il contorno metamorfico ed i sedimenti di piattaforma paleoeuropei (dal Permiano al Cretaceo);
 2 Crosta dell'Oceano Penninico: calcescisti micacei, filiti nere e rocce verdi (serpentiniti, anfiboliti, prasiniti, dal Giurassico al Cretaceo) con lenti di marmi dolomitici e calcarei (Trias);
 3 Cristallino antico dalla copertura delle Alpi orientali (Australpino) a nord della Linea Tonale - Giudicarie - Pusteria: Gneiss, micascisti, granito, anfiboliti, eclogiti e filiti (Precambriano), già interessati da metamorfismo prealpino;
 4 Complesso dello Schneeberg: marmi, quarziti, anfiboliti, paragneiss, grigio, micascisti e granati di collocazione incerta (Precambriano, Paleozoico o eventualmente, in parte, Trias). Quarzofiliti e paragneiss, talora anche ortogneiss, a nord della finestra dei Tauri (quarzofilite di Innsbruck) ad ovest del Brennero (copertura di Steinacher), presso Bressanone (quarzofilite di Bressanone) e ad est di Trento;
 5 Granito delle catene varisiche (Carbonifero superiore): Marteller, Ifinger, Monte Croce, Cima d'Asta e granito, granodiorite e tonalite di Bressanone;
 6 Copertura sedimentaria delle Alpi orientali (Trias-Giurassico) ad ovest e a sud del Brennero, dell'Ortles e delle Dolomiti engadinesi;
 7 Porfiriti quarzifere ed altre rocce vulcaniche (Permiano inferiore) e sovrastanti sedimenti clastici e di laguna (Arenarie di Val Gardena, Scisti di Werfen ecc., Permiano superiore-Trias inferiore);
 8 Complesso sudalpino costituito in prevalenza da calcari e dolomie (dal Trias medio a Lias);
 9 Rocce di mare aperto della piattaforma di Trento (Giurassico medio, Cretaceo e Paleogene);
 10 Sedimenti di mare profondo del bacino lombardo (Giurassico medio, Cretaceo e Paleogene);
 11 Rocce intrusive terziarie (basalti, andesiti e rioliti);
 12 Rocce intrusive terziarie (granito, tonalite);
 13 Sedimenti incoerenti del Terziario e Quaternario (sabbie, argille, ciottoli);
 14 Morene pleistoceniche;
 15 Faglie e sovrascorrimenti principali.

5.2.1.1 Provincia di Milano

Con i risultati ottenuti dalla campagna di misure indoor è stata elaborata una carta di distribuzione della concentrazione di radon nella provincia di Milano, in modo da meglio evidenziare le zone con elevate concentrazioni.

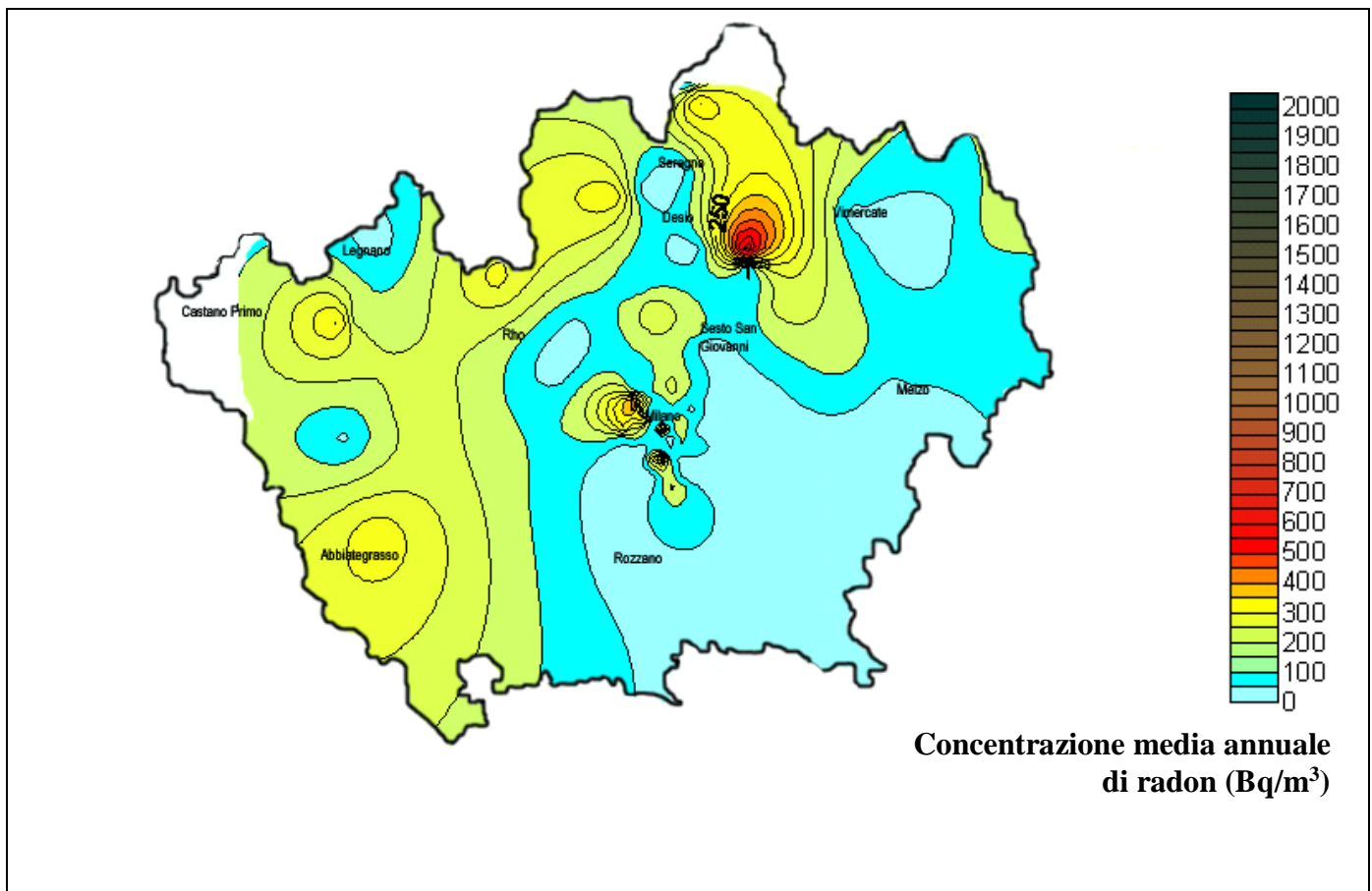


Figura 5.6: Carta delle concentrazioni medie annuali di radon indoor (Bq/m³) nella provincia di Milano con relativa scala.

L'area Nord e Nord-Ovest della provincia è caratterizzata da concentrazioni di radon mediamente superiori al resto della provincia; in particolare si è rilevato un picco di concentrazione superiore ai 500 Bq/m³ nella zona di Monza.

Dall'inquadramento geologico del territorio di Milano si evidenzia l'esclusiva presenza di litologie sedimentarie terrigene, appartenenti alla serie deposizionale regressiva Plio-Pleistocenica. Al passaggio fra il pliocene ed il pleistocene si aveva un paleoambiente di transizione nel quale durante le fasi di ritiro del mare si realizzava la sedimentazione di depositi continentali fluvio-lacustri, deltizi e di piana costiera in prevalenza con granulometrie non grossolane sabbie fini, limi di ambiente costiero con intercalazioni di depositi argillosi per il predominare delle condizioni di acque tranquille delle aree lagunari. I sedimenti argillosi di ambiente lagunare sono frequentemente caratterizzati da condizioni riducenti che favoriscono la riduzione dell'Uranio (elemento presente in elevate concentrazioni delle rocce vulcanoclastiche che affiorano nelle aree montane dei bacini idrografici sud alpini) da esavalente a tetraivalente e quindi la sua precipitazione. Tali rocce sedimentarie sono unità attribuite al Villafranchiano. Le paleosuperfici riferite a questi depositi presentano geometrie articolate in quanto l'area è stata sottoposta dopo la sua deposizione ad un sollevamento differenziale e quindi la sua parte superiore in alcuni settori risulta profondamente incisa ed erosa. Durante il Pleistocene la generale fase di sollevamento è avvenuta con alternanze di fasi trasgressive cicliche, i cui depositi marini e continentali hanno riempito tali incisioni e sono stati a loro volta erosi più o meno parzialmente. Nel sottosuolo della provincia di Milano si osservano infatti potenti sequenze sedimentarie caratterizzate da forti variazioni laterali degli spessori, in quanto in corrispondenza dei paleo-solchi vallivi creatisi si deposero ghiaie e sabbie anche con grandi spessori, che hanno poi subito processi di cementazione. Attualmente questi depositi affiorano o si rinvengono nel sottosuolo in modo discontinuo (fascia prealpina e alta pianura). Nel Pleistocene l'area viene interessata dalla deposizione di una vasta coltre di sedimenti glaciali nelle aree pedemontane e alluvionali ("fluvioglaciali") nella media e bassa pianura e dal Pleistocene superiore all'Olocene da un lento innalzamento dell'alta pianura. In particolare è stato più consistente nel settore nord-orientale della Provincia con la formazione di "dorsali"; i settori compresi fra queste sopraelevazioni furono interessati da una rilevante deposizione di alluvioni. Nel settore occidentale si è avuto quindi un maggiore accumulo di depositi recenti. L'articolata geometria dei depositi sedimentari e le forti variazioni delle granulometrie influiscono sul rilascio di radon dal sottosuolo. Notevole importanza sulla diffusione di radon dal sottosuolo è rivestita dai depositi più recenti costituiti dagli imponenti archi morenici su cui si sono sovrapposti i bacini lacustri post-glaciali e i successivi terrazzi fluviali; in particolare nelle aree collinari dominano le propaggini degli anfiteatri morenici dell'Adda e del Ticino nella zona settentrionale. La morfologia è quella tipica delle morene frontali mendeliane caratterizzata da lievi ondulazioni che si intervallano ad ampie spianate e questi ripiani rappresentano le zone in cui si avevano ristagni d'acqua di fusione dei ghiacciai o di piccoli laghi intramorenici, colmati da sedimenti limoso

argillosi spesso di ambiente riducente. Le aree elevate sono formate da piccole colline di materiali morenici caotici inglobanti talora erratici di notevoli dimensioni.

L'alta pianura terrazzata rappresenta una zona estesa dagli archi morenici fino al limite meridionale.

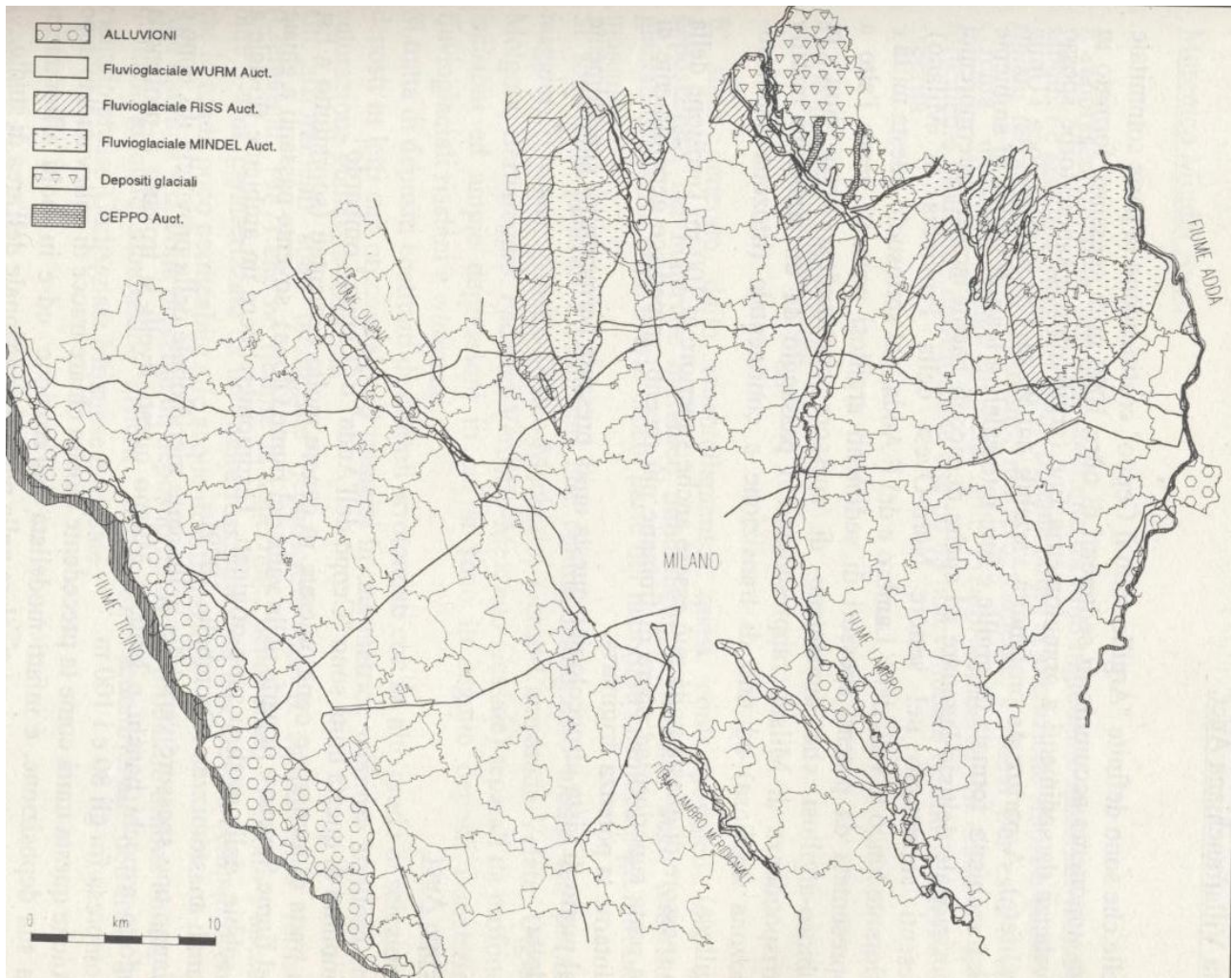


Figura 5.7: Carta geologica semplificata della Provincia di Milano (da “Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano”, Provincia di Milano – Assessorato all’Ambiente).

5.2.1.1.1 Origine delle elevate concentrazioni di uranio in alcuni livelli sedimentari della pianura lombarda:

L'area montana è caratterizzata come abbiamo visto da giacimenti uraniferi potenziali; in particolare i giacimenti di Novazza (Val Seriana) e Valvedello (Valtellina) sono due giacimenti uraniferi legati al Permico. Attualmente il più importante giacimento in Italia è quello di Novazza, il cui cubaggio ammonta a 2500 ton di U_3O_8 (fra accertato e probabile) allo 0,08% in U.

“Il quadro geologico di Novazza è il seguente: su un basamento cristallino pre-carbonifero, giace – in discordanza – una serie permo-carbonifera, costituita, dal basso verso l'alto, dai seguenti terreni:

- a) Un conglomerato basale carbonifero discontinuo (spessore da 0 a 2 m) costituito da elementi spigolosi e non classati provenienti dal basamento;
- b) Una potente serie vulcanico – sedimentare (formazione di Collio) con potenza di 600 m, di età permiana inferiore. Essa è composta da ignimbriti riolitiche e sedimenti elastici costituiti, a loro volta, da ciottoli delle stesse ignimbriti e del basamento;
- c) Una costante serie sedimentare rossastra a siltiti e conglomerati derivate dall'erosione della serie vulcano-sedimentare; è il “Verrucano lombardo” di età permiana superiore, con potenza di 500 m.

Tutto questo complesso immerge a SSO di 35° ed è interessato da una serie di faglie, in parte viventi durante la sedimentazione della serie vulcano – sedimentare, che si presenta quindi con mega-strutture complesse (paleo-scarpate, canali di erosione), e rapide variazioni di spessore dei singoli strati e frequenti strutture da slumping.

La mineralizzazione uranifera ricorre in concentrazioni lenticolari o in vene o in reticolati di vene entro uno dei banchi ignimbritici (il cosiddetto “Banco di Novazza” situato circa a metà del Collio), mentre gli altri banchi ignimbritici sono praticamente sterili. Lo spessore di ciascuna lente è di qualche metro (fino ad un massimo di 15-20 metri) e l'estensione in pianta di qualche decina, fino a un centinaio, di metri. Si ritiene che la pechblenda che costituisce il minerale uranifero principale di Novazza, sia stata apportata nel bacino sedimentare permico, dal vulcanismo coevo e che la circolazione di acque superficiali e di falda, abbia avuto un ruolo importante nella sua riconcentrazione e ridistribuzione”.

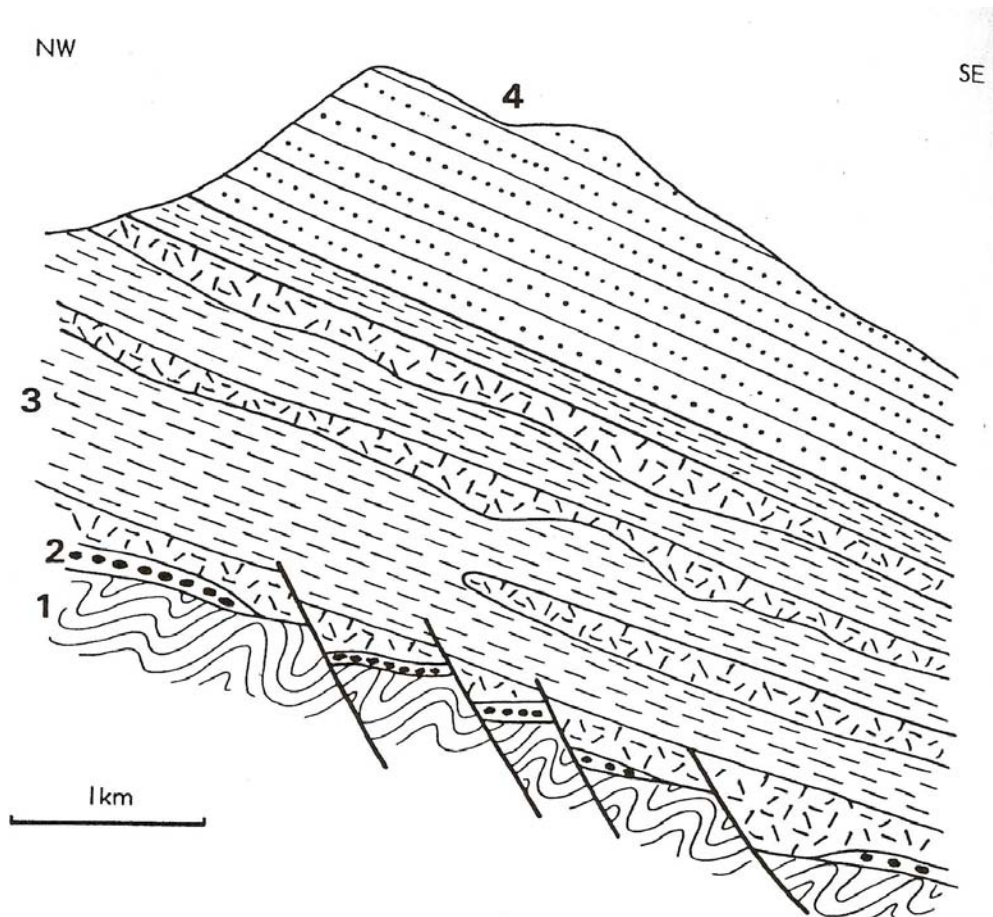


Figura 5.8: Il giacimento uranifero di Novazza (BG): 1 = Basamento scistoso-cristallino; 2 = Conglomerato carbonifero; 3 = Formazione di Collio (Permico inf.): alternanze di sedimenti clastici e di ignimbriti più o meno tufacee; 4 = Verrucano Lombardo (Permico sup.): conglomerati, arenarie, argilliti di color rossastro. L'uranio ricorre a concentrazioni lenticolari entro uno dei banchi ignimbricitici, circa a metà del Collio.

Un quadro geologico simile, ma assai più complesso, si presenta a Valvedello. “Gli effetti dell’orogenesi ercinica e alpina e degli assestamenti tardo-alpini, sono stati assai più intensi, producendo – nel complesso permiano – ripiegamenti, sovrascorrimenti, faglie compressive e distensive. Le mineralizzazioni ricorrono in varie sedi: nei conglomerati poligenici soprastanti al basamento pre-carbonifero, particolarmente lungo i contatti tettonici fra questi e il Collio vulcano-sedimentare; lungo faglie, specie se interessano tali contatti. Notevole il ruolo giocato dalla rimobilizzazione e riconcentrazione dell’uranio”.

5.2.1.1.2 Mobilità e trasporto dell'uranio:

L'uranio presente nelle rocce vulcanoclastiche può essere mobilizzato per i processi erosivi e di weathering, infatti come noto in letteratura l'uranio si ossida e in forma esavalente diventa solubile; al fine di una migliore comprensione riportiamo quindi anche lo schema che descrive la mobilità degli elementi chimici in funzione della carica e del raggio ionico.

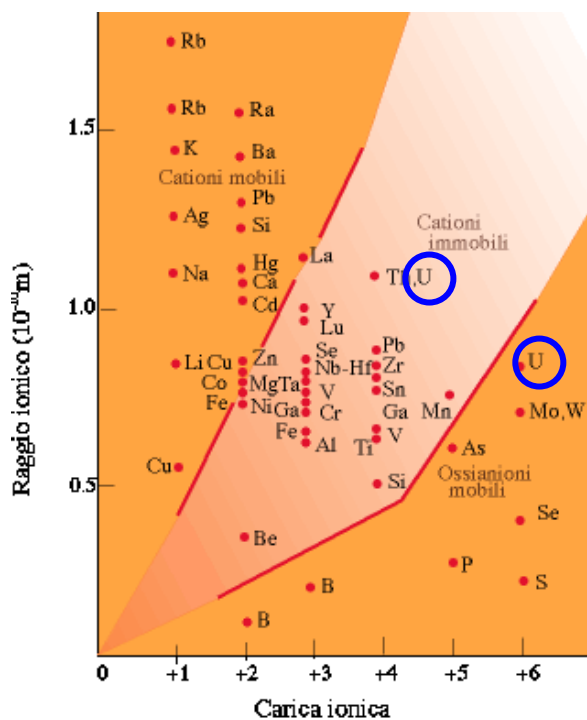


Figura 5.9: Mobilità degli elementi chimici negli ambienti superficiali in funzione della carica e del raggio ionico (www.igg.cnr.it).

L'uranio è presente nelle rocce e nei minerali come ione con carica tetravalente (4+), tuttavia se entra in contatto con un ambiente ossidante (come acqua contenente ossigeno sciolto) si ossida in un ione uranio esavalente (6+). Lo ione tetravalente (4+) è fortemente insolubile e può combinarsi con l'acqua come idrossido di uranio, $U(OH)_4$, che si fissa immediatamente nei minerali; pertanto anche la fonte di radon è localizzata nello stesso punto. Lo ione esavalente (6+) invece è estremamente solubile e forma molti ioni complessi (ad esempio $UO_2(HPO_4)_2^{2-}$, UO_2^{2+} , $UO_2(CO)_3$, $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ o $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ altamente stabili) con l'ossigeno O^{2-} e il carbonato $CaCO_3$ CO^{2+} ; lo ione uranile (UO_2^{2+}) e i suoi complessi hanno un'alta solubilità e sotto certe condizioni ambientali possono essere trasportati a lunga distanza nell'acqua del sottosuolo. Oppure il carbonato presente nelle acque superficiali trasporta l'uranio e lo fissa nell'acqua e nel suolo lontano dal luogo di formazione. Il diverso comportamento degli ioni di uranio è quindi molto importante ai fini della distribuzione del radon. Se l'Uranio si fissa nei minerali nella forma insolubile tetravalente (4+), la

fonte di radon viene a fissarsi, per necessità, nello stesso punto. Diversamente, se l'uranio è nella forma esavalente (6+), esso viene prelevato dalle rocce d'origine e si accumula nell'acqua o si fissa nel suolo lontano dalla sua fonte. L'uranio solubile viene trasportato dalle falde acquifere e, qualora dovesse incontrare condizioni di pH riducente, lascerebbe precipitare l'uranio in punti anche molto distanti da quello di ossidazione; le rocce formatesi saranno quindi arricchite in uranio.

Tornando all'analisi del sito oggetto di studio, se si considerano le zone di origine dell'uranio precedentemente descritte, la natura vulcanoclastica dei depositi, poco coerenti, rende più facile sia i processi erosivi sia quelli di trasporto.

I detriti e soprattutto gli elementi che viaggiano in soluzione tendono a riprecipitare nelle zone lacustri a valle dell'area mineraria, negli ambienti caratterizzati da ristagni d'acqua e quindi in cui si realizzano i processi di riduzione responsabili della brusca diminuzione della solubilità dell'uranio. Questi ambienti sono in genere i piccoli laghi intramorenici a dominante deposizione di argille torbose. Le intercalazioni argillose possono risultare quindi arricchite in uranio e possono costituire un'importante sorgente di gas radon.

Per valutare il contributo al rischio di esposizione radon nella provincia di Milano si è quindi proceduto all'analisi delle 27 stratigrafie disponibili dalla letteratura ("Risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano", Provincia di Milano – Assessorato all'Ambiente), dalle quali si evince l'elevata variazione laterale degli spessori e della distribuzione dei sedimenti argillosi riducenti a elevato rischio potenziale di radon. In dettaglio lungo le valli del fiume Lambro e del fiume Adda, nel sottosuolo dell'unità Villafranchiana potenti spessori di sedimenti argillosi passano verso l'alto a sabbioso-argillosi; questi sedimenti a elevato rischio potenziale di radon aumentano di spessore spostandosi verso Sud. In corrispondenza di Milano è presente un paleogradino morfologico derivato dal passaggio da un ambiente marino (litozona argillosa) ad uno di transizione e continentale (litozona sabbioso-argillosa).

Esiste una buona correlazione fra la presenza di importanti livelli di argille di ambiente riducente e le zone ad elevata concentrazione di radon elaborata nel presente lavoro; ciò supporta l'ipotesi che proprio questi terreni possano essere la sorgente delle alte concentrazioni rilevate anche nella fascia di pianura alluvionale. Naturalmente sarebbe ottimale poter disporre di campioni per misure dirette. Un ulteriore elemento a supporto dell'ipotesi precedentemente esposta è la diminuzione delle concentrazioni di radon rilevato nei settori Sud della provincia; questo potrebbe essere dovuto

infatti alla precoce sottrazione di uranio nei primi bacini riducenti che i corsi d'acqua incontrano durante il loro percorso e quindi dalla bassa concentrazione di uranio in soluzione dei fiumi effluenti dai paleo-laghi glaciali.

Nelle Figure 5.10, 5.11 e 5.12 è riportata la sezione Est- Ovest che attraversa la parte settentrionale della provincia, in particolare i comuni di Lonate Pozzolo, Busto Arsizio, Legnano e Monza. Una brusca variazione si registra proprio in prossimità della dorsale di Muggiò – Monza dove il substrato villafranchiano si rinviene a profondità relativamente modesta (probabile sollevamento post-villafranchiano che ha interessato questo settore).

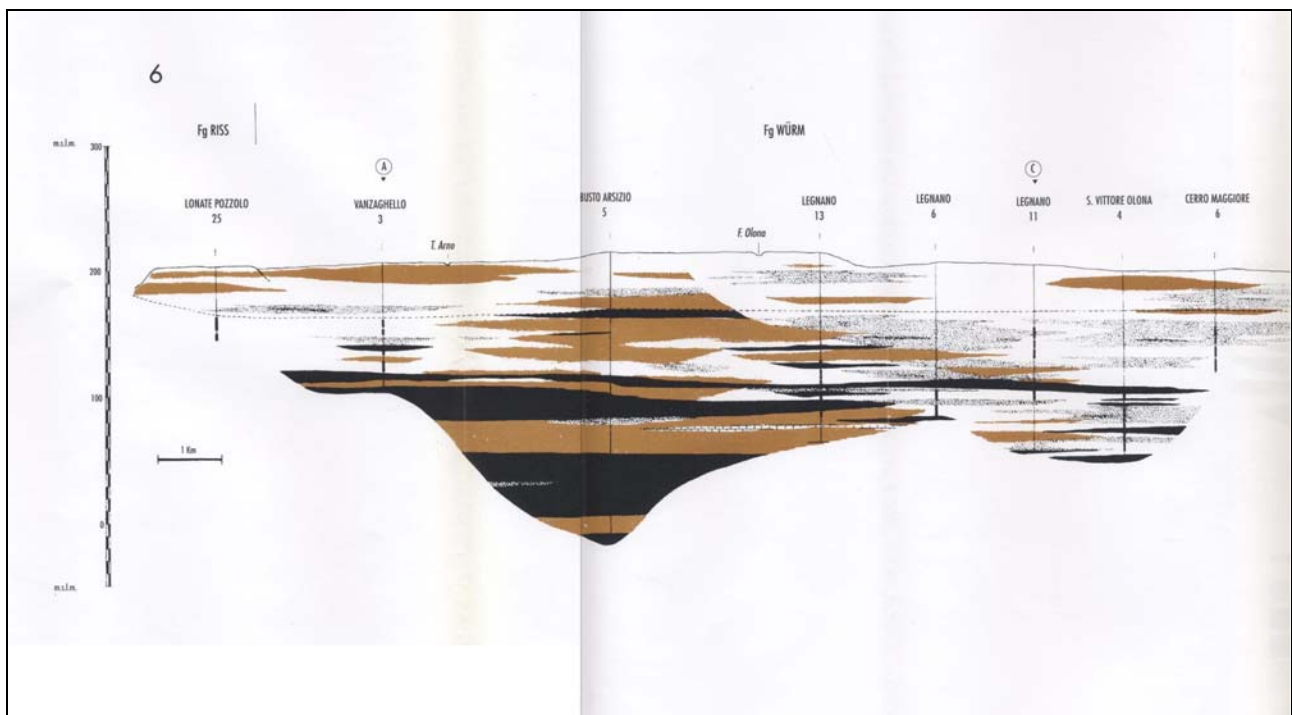


Figura 5.10: Sezione geologica (numero 6) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente – Parte I.

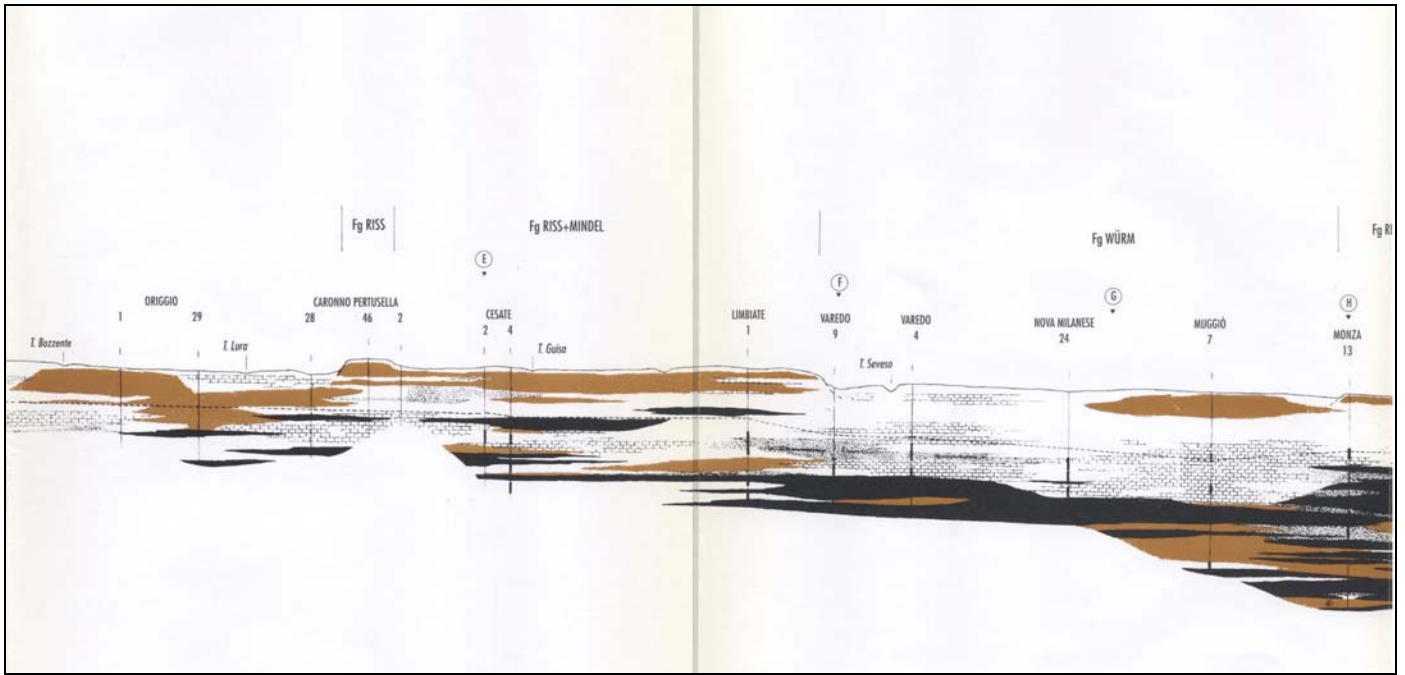


Figura 5.11: Sezione geologica (numero 6) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente Parte II.

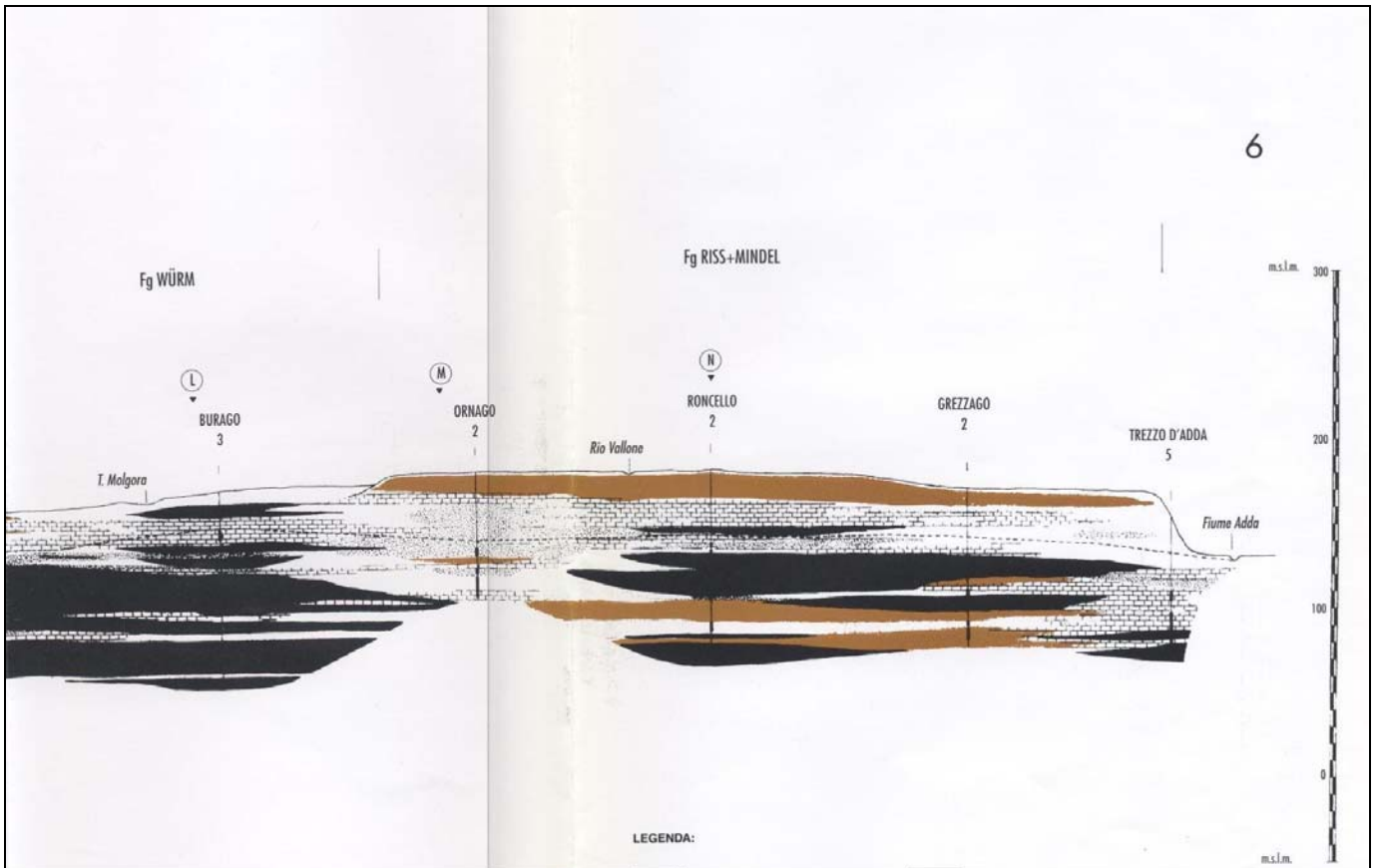


Figura 5.12: Sezione geologica (numero 6) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente Parte III.

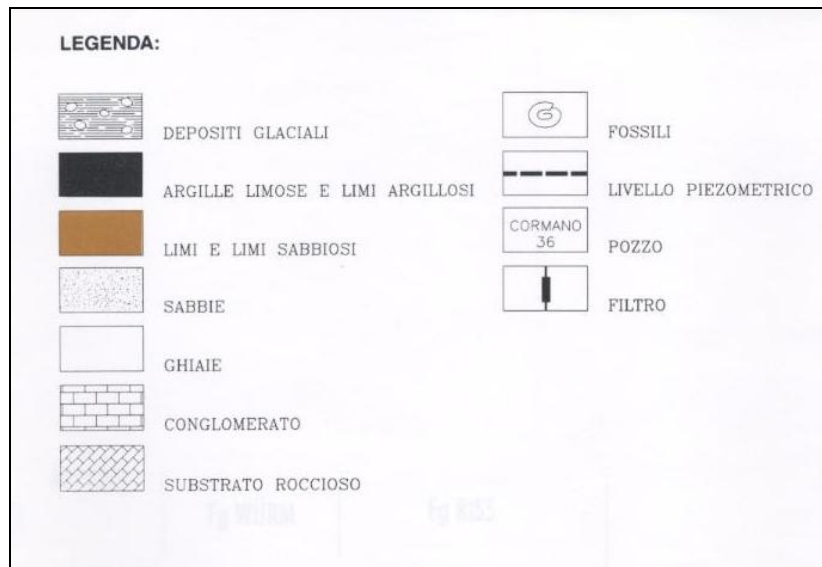


Figura 5.12b: Legenda delle sezioni geologiche fornite dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente, nell'ambito dello studio "Risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano".

Nelle Figure 5.13 e 5.14 è riportata la sezione Nord - Sud a est della provincia e che attraversa in particolare i comuni di Briosco, Albiate, Lissone, Monza, Milano e San Donato Milanese.

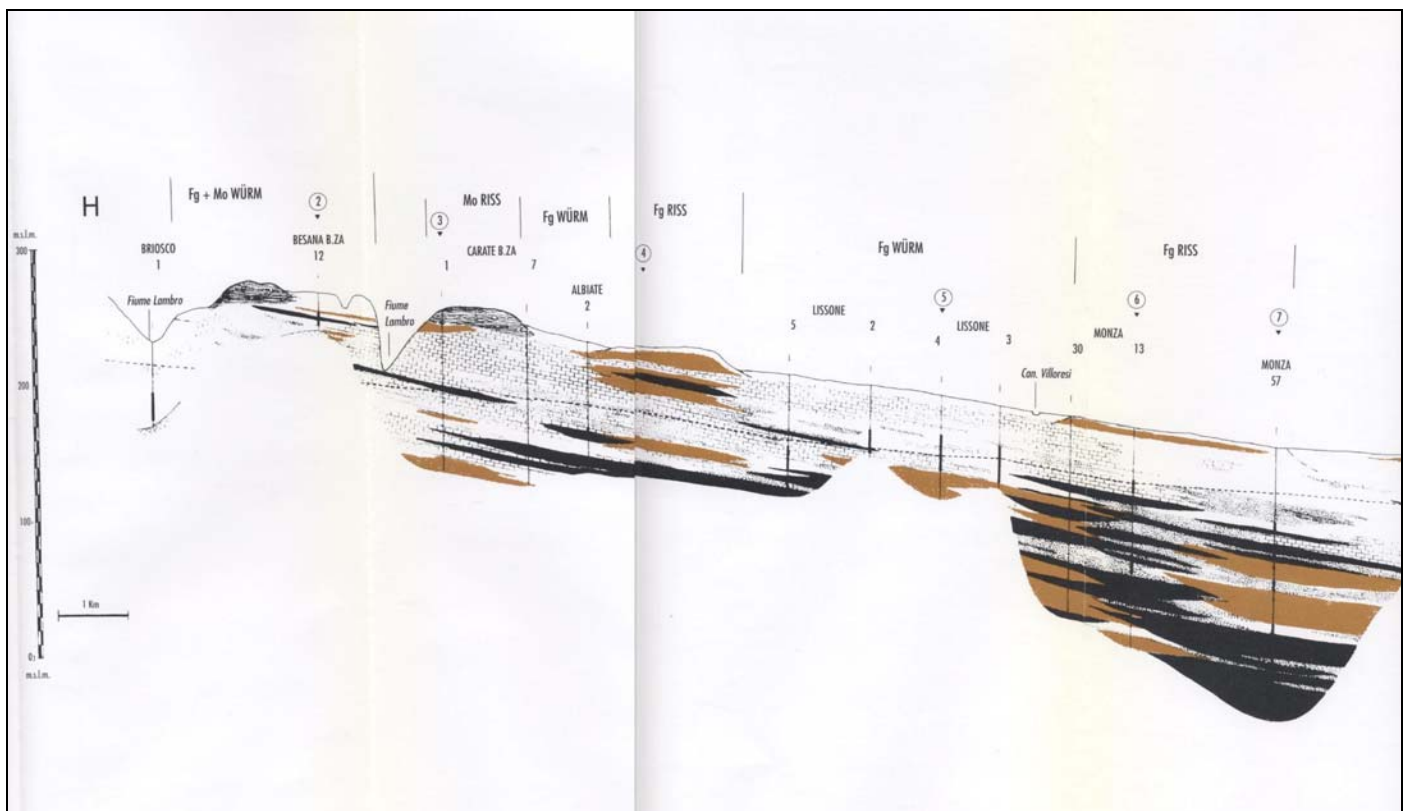


Figura 5.13: Sezione geologica Nord-Sud (lettera H) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente

Parte I.

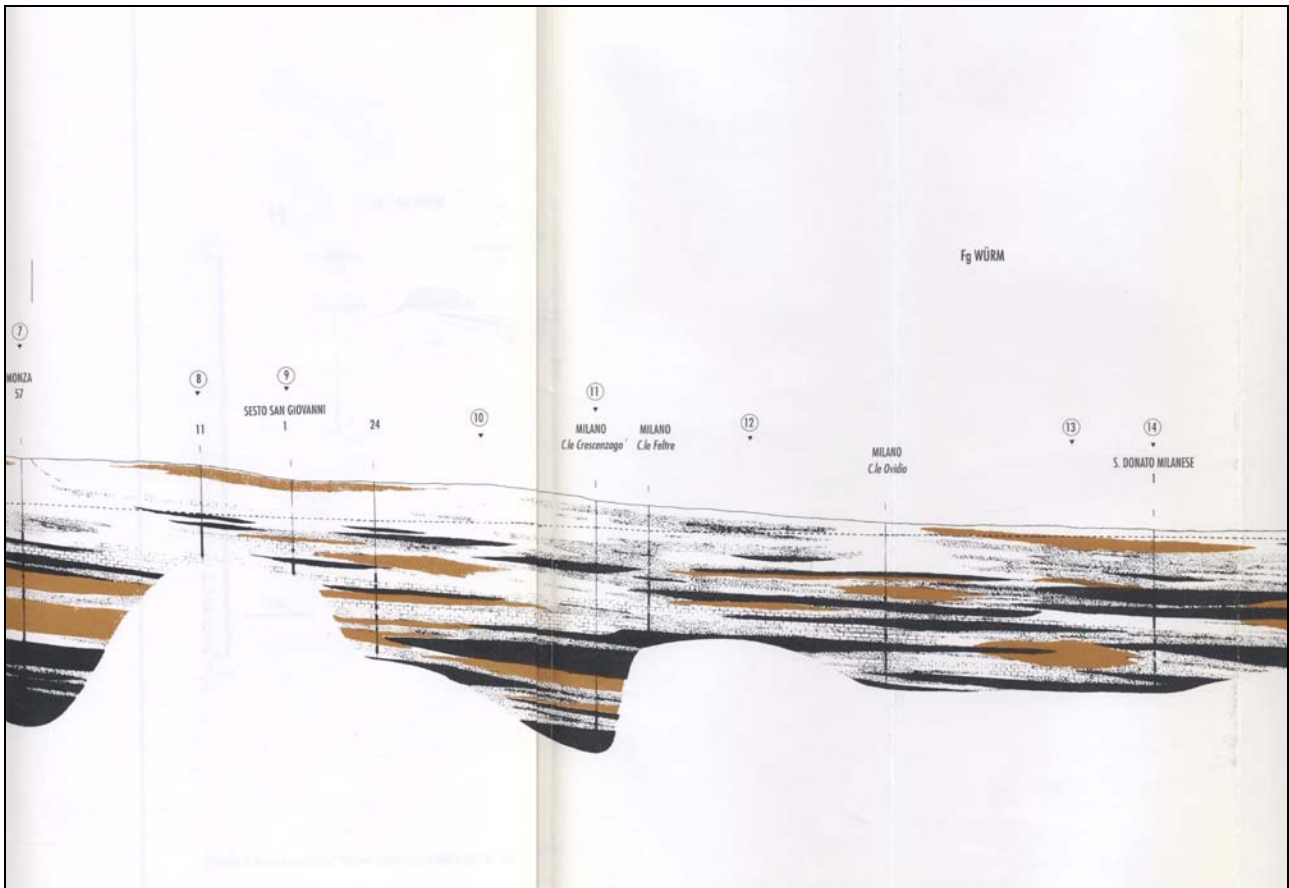


Figura 5.14: Sezione geologica Nord-Sud (lettera H) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente Parte II.

Come si può notare dalle sezioni gli strati di argille limose possono essere conglomerati a strati di limi e limi sabbiosi che limiterebbero il possibile passaggio di gas radon; laddove gli strati d'argilla sono sottostanti a livelli limosi si ipotizza quindi una minor veicolazione del radon, mentre nelle zone dove le argille si trovano all'interno di deposizioni di ghiaie permeabili o conglomerati la maggior porosità e fratturazione di questi ne favorirebbe la fuoriuscita. Tale ipotesi confermerebbe il maggior rischio rilevato durante la campagna di tesi nella zona di Monza dove lo strato di argilla sollevato rispetto alle altre zone della provincia è ricoperto da uno strato di conglomerati.

Il maggior rischio sarebbe favorito quindi anche dalla minor profondità in cui si trova lo strato di argilla ovvero per la presenza di un alto strutturale che è stato bene evidenziato dagli studi condotti dalla Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica nell'ambito dello studio “Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia” e che qui sintetizziamo per quanto riguarda l'analisi dell'evoluzione del bacino Padano.

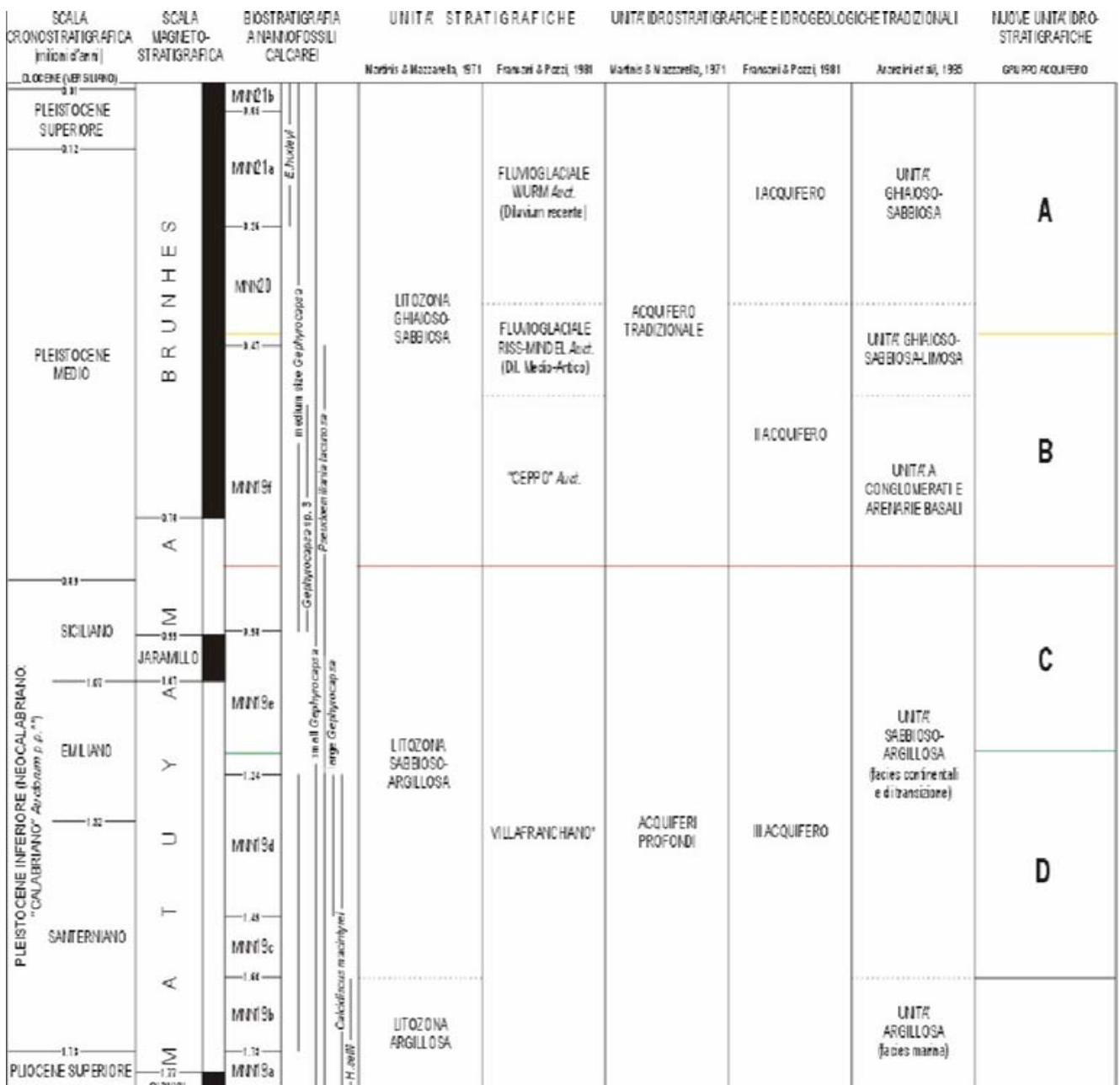


Figura 5.15: Schema dei rapporti stratigrafici del bacino padano (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

“L’evoluzione del bacino Padano, dal Pliocene superiore all’attuale, può essere sintetizzata in sette fasi principali: 1) da ~3.9 a ~3.6 – 3.3 Ma - evento tettonico di sollevamento regionale che provoca un’importantissima regressione forzata nell’area piemontese Sud-orientale; 2) da ~3.6 – 3.3 a ~2.4 Ma - subsidenza bacinale e quiescenza tettonica relativa che inducono una rapida aggradazione ed un ampliamento delle aree deposizionali; 3) Da ~2.4 a 1.6 Ma evento tettonico di sollevamento regionale del settore meridionale del bacino Padano che provoca un’importante regressione forzata. La situazione a 1.6 Ma vede la TSB localizzata lungo il margine sud-alpino, a partire dal lago Maggiore fino al lago di Garda (Fig. 5.16 e 5.17).

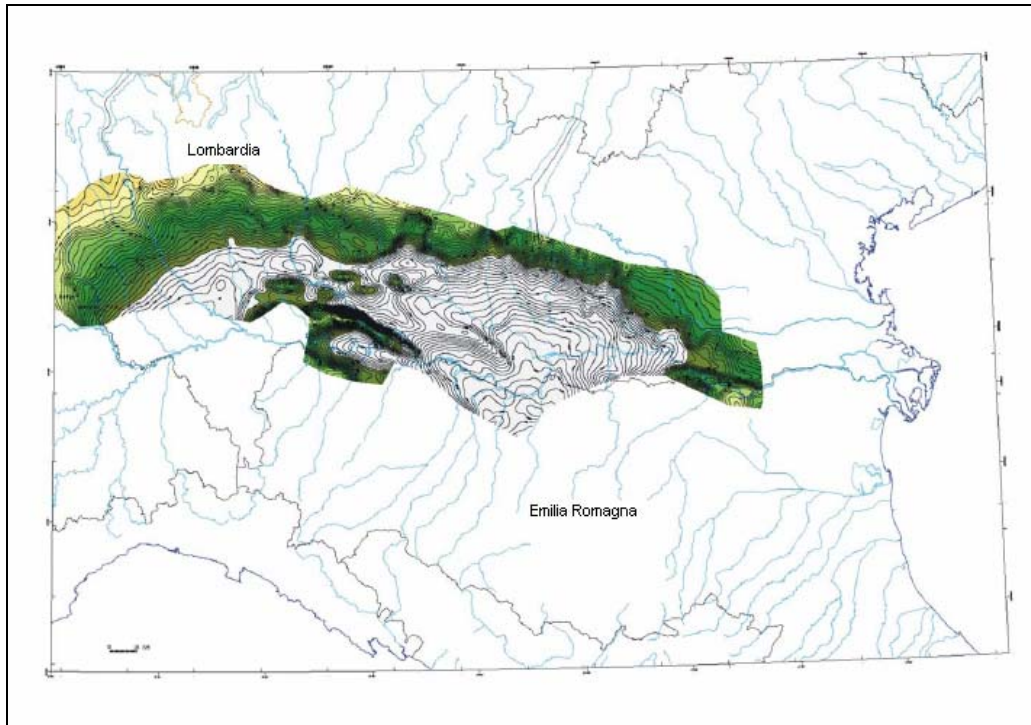


Figura 5.16: Superficie stratigrafica 1.6 Ma (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

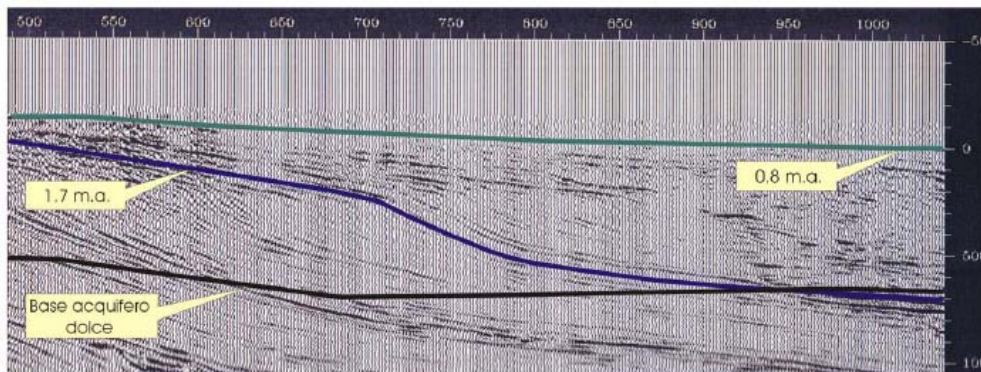


Figura 5.17: Transizione Scarpata sottomarina – piana bacinale (TSB) (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

Sul lato meridionale del bacino prograda rapidamente fin sul fronte dell'allineamento strutturale S.Colombano al Lambro - Pieghe Emiliane. Alle spalle della TSB si osserva un prisma sedimentario fluvio-deltizio, progradante, sormontato sul Margine da un'estesa superficie subaerea d'erosione e/o non deposizione. 4) da 1.6 a ~0.8 Ma - la coalescenza dei delta-conoidi dei paleo fiumi alpini (Ticino e Adda) e del sistema deltizio centro padano ha colmato la parte meno subsidente del bacino marino profondo spostando la TSB più ad Est, nella zona di Cremona. La situazione cartografata a 0.8 Ma vede il settore colmato in condizione di piattaforma. La TSB si estende verso Sud con andamento NNE – SSO, da Sud di Brescia fino all'alto di Cortemaggiore (PC) e verso Est si spinge lungo il margine Sudalpino verso l'alto corso del Mincio e quindi nella pianura veneta (Fig. 5.18 a 5.19);

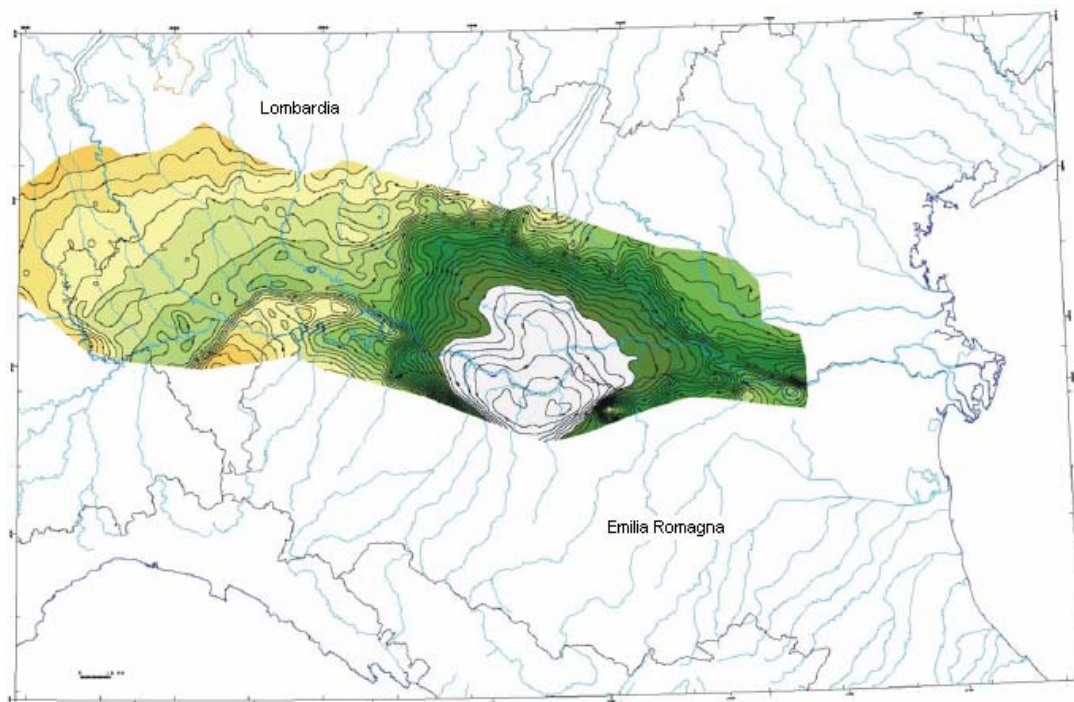


Figura 5.18: Superficie stratigrafica 0.8 Ma (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

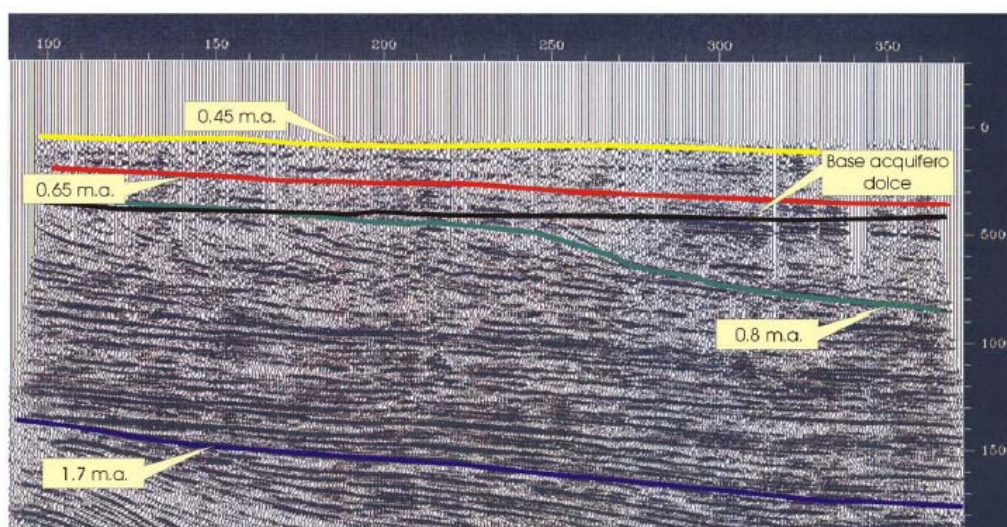


Figura 5.19: Transizione Scarpatà sottomarina – piana bacinale (TSB) (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

5) da 0.8 a ~0.65 Ma - a circa 800.000 anni inizia l'ultima importante fase di traslazione verso Nord delle falde appenniniche. Si realizza un sollevamento dell'intera “Dorsale Ferrarese”, con conseguente riduzione della subsidenza nel retrostante bacino di Bologna-Ravenna, erosione sui margini del bacino Padano e sui culmini strutturali. I delta-conoidi alpini a Nord e quelli appenninici a Sud, diminuendo lo spazio disponibile per la sedimentazione, coalescono con il sistema fluvio deltizio centro padano, portando al riempimento definitivo del bacino marino profondo. In questo momento si realizza la concomitanza tra un incremento repentino e generalizzato a tutto il bacino Padano della subsidenza tettonica e le fluttuazioni del livello eustatico, legate a variazioni climatiche globali. La TSB prograda rapidamente fin sul fronte dell'allineamento strutturale di Ferrara – Ravenna, lasciandosi alle spalle un prisma sedimentario fluvio-deltizio, progradante, sormontato sul Margine da un'estesa superficie subaerea d'erosione e/o non deposizione. La base di questi depositi è una superficie di discontinuità regionale, evidente sul

marginale appenninico e sulle linee sismiche. Potrebbe essere dovuta a un'oscillazione eustatica innescata da fattori climatici, sovrapposta al sollevamento tettonico regionale. Le aree che erano già in condizione emersa sono di nuovo invase dalla trasgressione marina. Se al rapido innalzamento relativo del livello del mare si unisce la riduzione di apporto di materiale grossolano (ghiaia e sabbia) da parte dei fiumi, si ha come risultato la deposizione di sedimenti fini (argilla) su gran parte del bacino. La riduzione di apporto di materiale grossolano da parte dei fiumi è legata al fattore climatico: precipitazioni ridotte, tipiche di un interglaciale, cui si somma un aumento della vegetazione che riduce l'erosione dei versanti, determinano una ridotta energia da parte dei fiumi e un ridotto apporto di materiale grossolano in bacino. A questa serie di fattori occorre aggiungere anche l'arretramento dei punti di sbocco dei sistemi fluviodeltizi causato dalla trasgressione (Fig. 5.20);

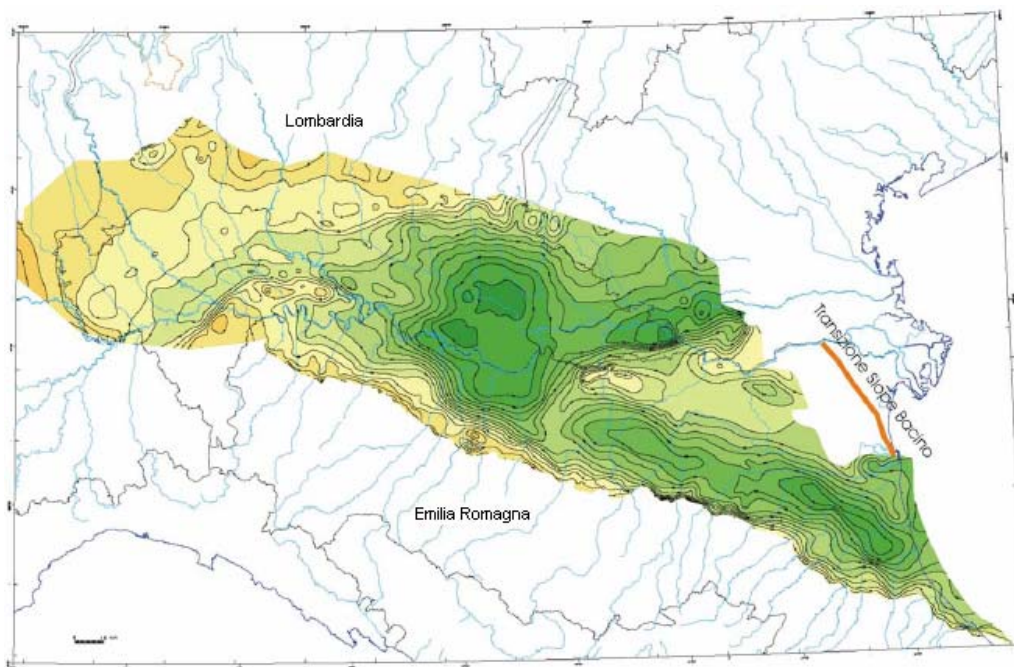


Figura 5.20: Superficie stratigrafica 0.65 Ma (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

6) da ~0.65 a ~0.45 – 0.35 Ma - forte subsidenza bacinale e quiescenza tettonica relativa inducono una rapida aggradazione sedimentaria nell'area di pianura attuale, e la contemporanea trasgressione della superficie di erosione formatasi in precedenza sul Margine Sudalpino e Appenninico Padano. Alternanze cicliche di facies fini e grossolane, alluvionali e deltizie, probabilmente originate da oscillazioni climatico - eustatiche ad alta frequenza (Sequenze Deposizionali Elementari). Verso la fine di questo periodo si verifica un evento minore di sollevamento delle strutture compressive appenniniche; esso è registrato in affioramento da una superficie di discontinuità erosiva che, solitamente, separa i depositi di piana alluvionale e conoide distale, citati in precedenza, dai depositi di conoide prossimale sovrastanti. Tale superficie, tracciata in sismica, risulta particolarmente evidente in corrispondenza dei principali fronti strutturali sepolti. Fig. 5.21

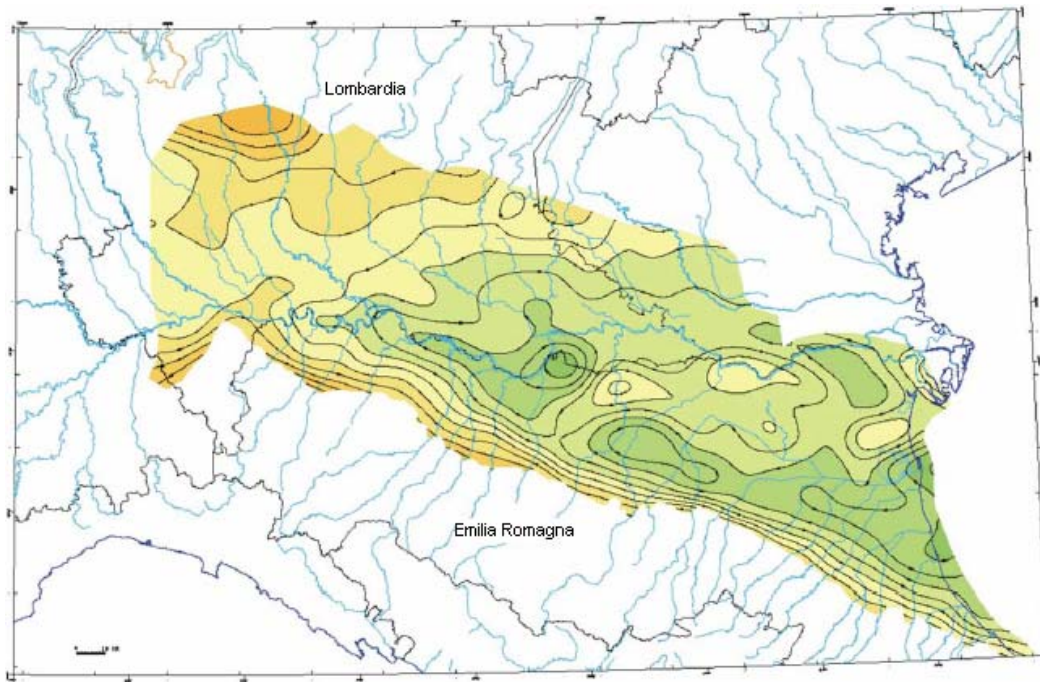


Figura 5.21: Superficie stratigrafica 0.45 Ma (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

7) da ~0.45 – 0.35 Ma all'Attuale - prosegue la forte subsidenza bacinale e la quiescenza tettonica relativa dello stadio evolutivo precedente. Nell'intervallo tra circa 200.000 e circa 100.000 anni B.P., l'ampliamento delle aree deposizionali raggiunge la massima espansione sulle superfici di erosione del Margine. Il Margine Sudalpino del bacino è caratterizzato dalla presenza di depositi fluviali grossolani con intercalati paleosuoli con differenti tipi di alterazione. La sedimentazione nettamente continentale è influenzata da frequenti variazioni climatiche che portano poderosi apparati glaciali fino ad affacciarsi in pianura. La redistribuzione dei depositi glaciali nelle valli fluviali porta all'accumulo di livelli fino a decametrici di ghiaie. L'alternanza con climi più miti è registrata dalla frequente presenza di paleosuoli intercalati. Depositi di conoide alluvionale, appartenenti a questa fase, affiorano in modo continuo lungo tutto il Margine Appenninico e Sudalpino. Depositi di piana alluvionale, deltizi e costieri, coevi dei precedenti, aggradano nelle aree di pianura attuali del bacino Padano”.

In Figura 5.21b è riportata la legenda relativa alle superfici stratigrafiche nel lavoro di letteratura citato e presentate al fine di evidenziare l'andamento del sottosuolo e in particolare la tendenza ad emergere della scarpata sottomarina; tali mappe erano state create integrando 30000 Km di linee sismiche interpretate e dei dati di pozzo e l'operazione di taratura stratigrafica aveva permesso di validare le fasi temporali dell'evoluzione del bacino.

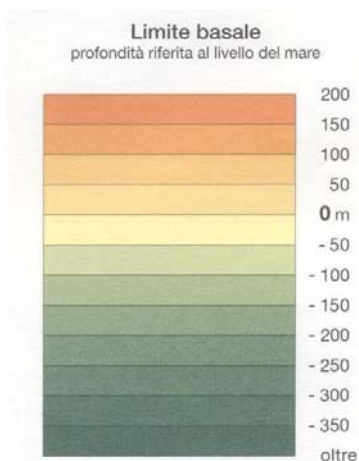


Figura 5.21b: Legenda della superficie stratigrafica 0.45 Ma (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

In Figura 5.22 (sezione 4) e 5.23 (sezione 2) sono riportate le sezioni idrostratigrafiche elaborate sempre in ambito dello studio sopra citato; tali stratigrafie orientate all’incirca N-S rappresentano le geometrie dei corpi sedimentari trasversali all’asse del bacino.

Nelle sezioni è evidente una grande differenza nella geometria dei corpi sedimentari tra la parte superiore e quella inferiore delle sezioni stesse. Tale differenza si può ricondurre, in generale, alla tendenza regressiva che porta, nel corso del Pleistocene, al progressivo ritiro del mare dall’attuale Pianura Padana. La sezione in figura 5.22 presenta importanti deformazioni nella zona del pozzo Castanedolo 1, dove risultano deformate praticamente tutte le unità, evidenziando la continua attività di questa struttura subalpina. Queste strutture tettoniche presenti nella zona a sud di Brescia (area indicata a punti nella carta di distribuzione del radon elaborata) potrebbero rappresentare una fonte di rischio per la possibile risalita di radon in corrispondenza delle strutture stesse.



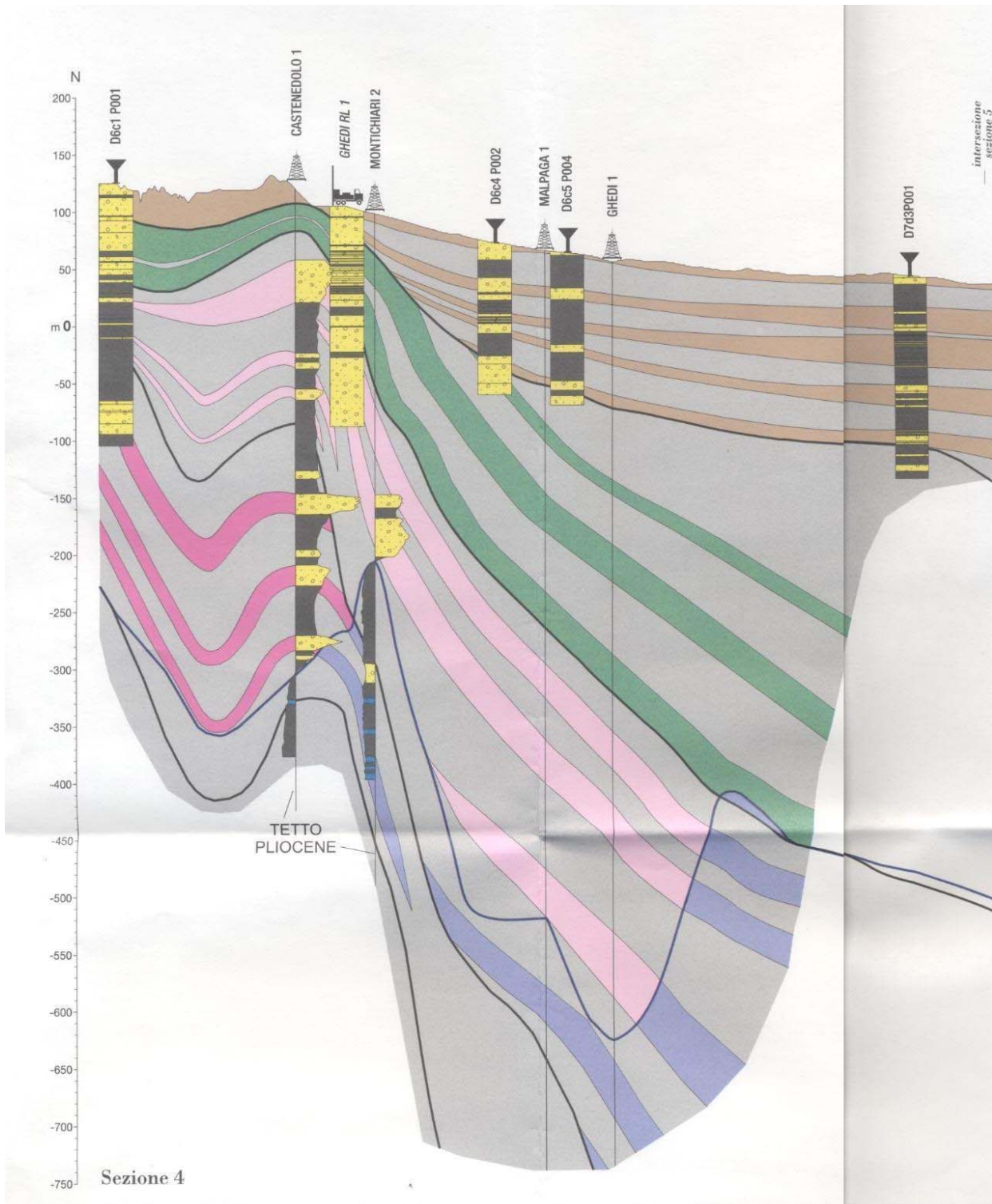


Figura 5.22: Sezione idrostratigrafica (sezione 4) all'altezza di Ghedi (BS) (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

La figura 5.23 sono evidenti le sequenze profonde legate al vecchio bacino glaciale; la zona superiore della sezione corrispondente alla zona Nord della provincia di Milano presenta localmente livelli a litologia permeabile che possono favorire la risalita del radon dalle argille formatesi in ambienti più o meno riducenti.

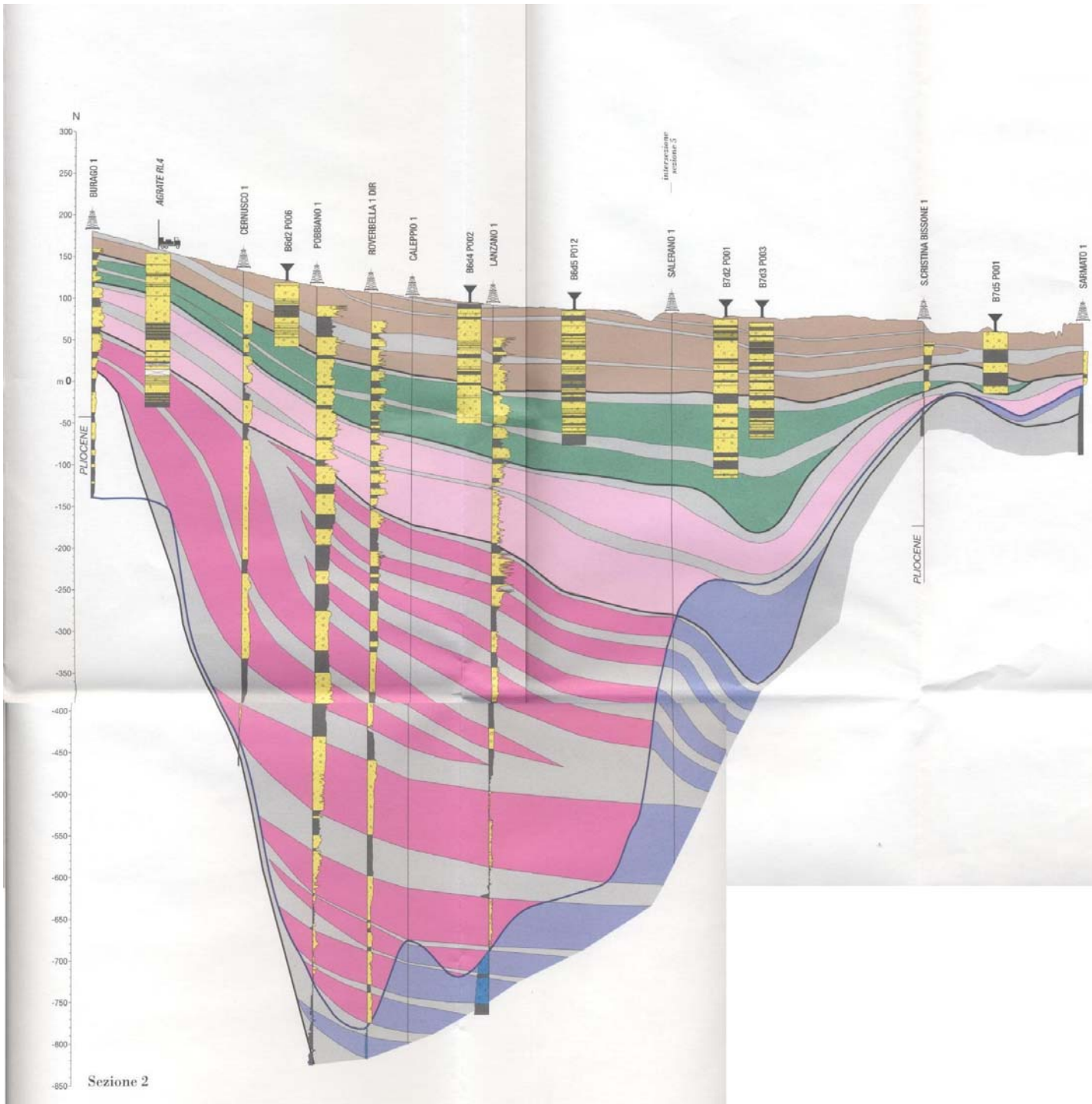


Figura 5.23: Sezione idrostratigrafica (sezione 2), “Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica.



Figura 5.23b: Legenda delle sezioni idrostratigrafiche, “Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica.

5.2.1.2 Milano Città

Con i dati a disposizione si è deciso di studiare più dettagliatamente la situazione della città di Milano, elaborando una carta di distribuzione della concentrazione media annuale di radon analoga alle precedenti ma che permettesse di evidenziare le diverse aree all'interno della città.

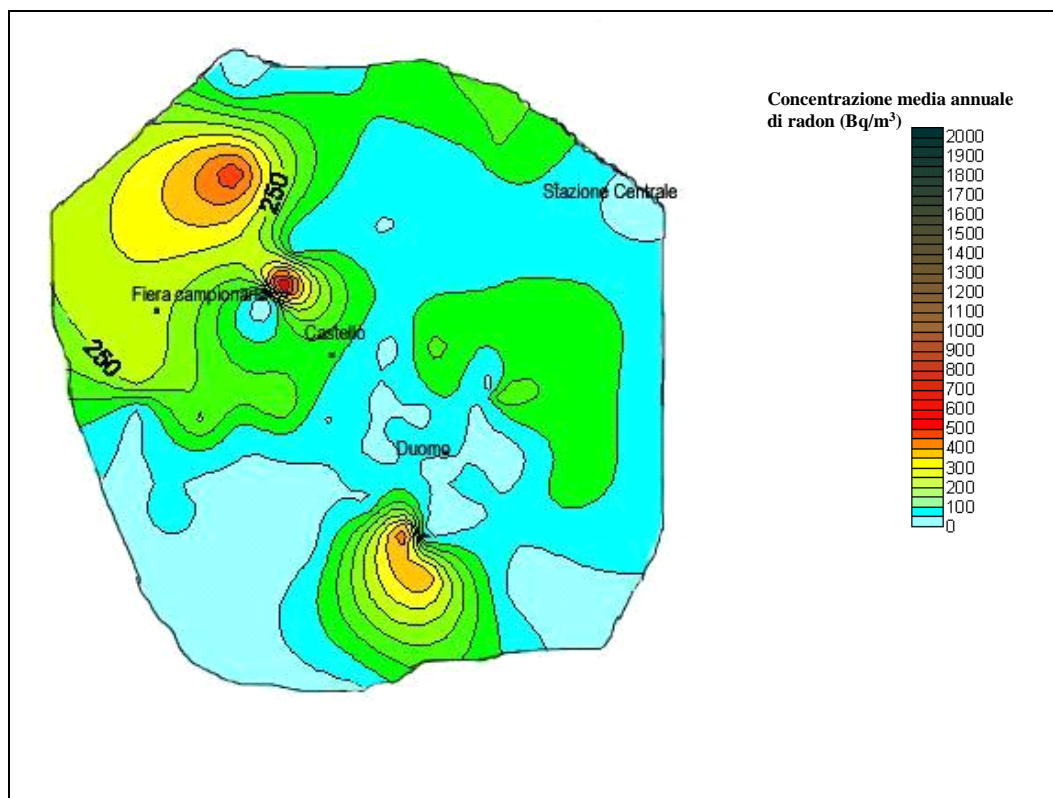


Figura 5.24: Carta di distribuzione delle concentrazioni medie annuali di radon (Bq/m³) nella città di Milano con relativa scala.

Da una prima analisi delle concentrazioni misurate in diversi punti della città si sono rilevati valori superiori ai livelli raccomandati; in particolare il fenomeno sembra più evidente nella zona Nord-Ovest della città.

Per meglio approfondire la situazione complessiva della città di Milano è stata elaborata anche una mappa di concentrazioni con dati messi a disposizione dalla società U-Series Srl ottenuti tramite campionamenti all'interno di pozzetti fognari in diverse zone del territorio urbano. I risultati di questi campionamenti, eseguiti però in anni solari diversi, sono stati utili per meglio valutare il contributo del suolo come causa del rilascio di radon.

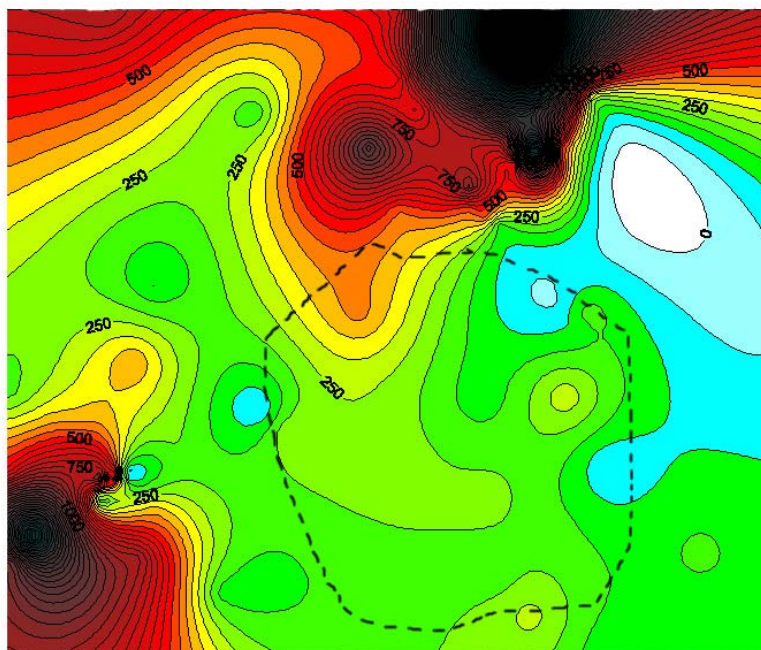


Figura 5.25: Carta di distribuzione delle concentrazioni di radon nella città di Milano e nell'area Nord-Ovest elaborata utilizzando campionamenti (U-Series Srl) condotti in pozzetti fognari.

Anche i campionamenti nei pozzetti fognari hanno evidenziato la zona Nord-Ovest della città e della sua prima periferia come particolarmente caratterizzata da alte concentrazioni di radon.

Dal punto di vista geologico la città di Milano si trova nella zona di media pianura alluvionale costituita da depositi alluvionali recenti e antichi e dai fluvioglaciali wurmiani, come precedentemente descritto.

Analogamente a quanto visto sopra riportiamo due sezioni geologiche che attraversano la città di Milano, una in direzione Nord-Sud (Fig. 5.27) e una direzione Est-Ovest (Fig. 5.26), messe a disposizione dalla Provincia di Milano – Assessorato all'Ambiente ed elaborate nell'ambito dello studio sulle "Risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano".

In Figura 5.26 è riportata parte della sezione Est- Ovest che interessa la provincia all'altezza di Milano, contraddistinta dal fatto che si raggiungono i maggiori spessori dell'acquifero tradizionale della pianura (circa 70 m).

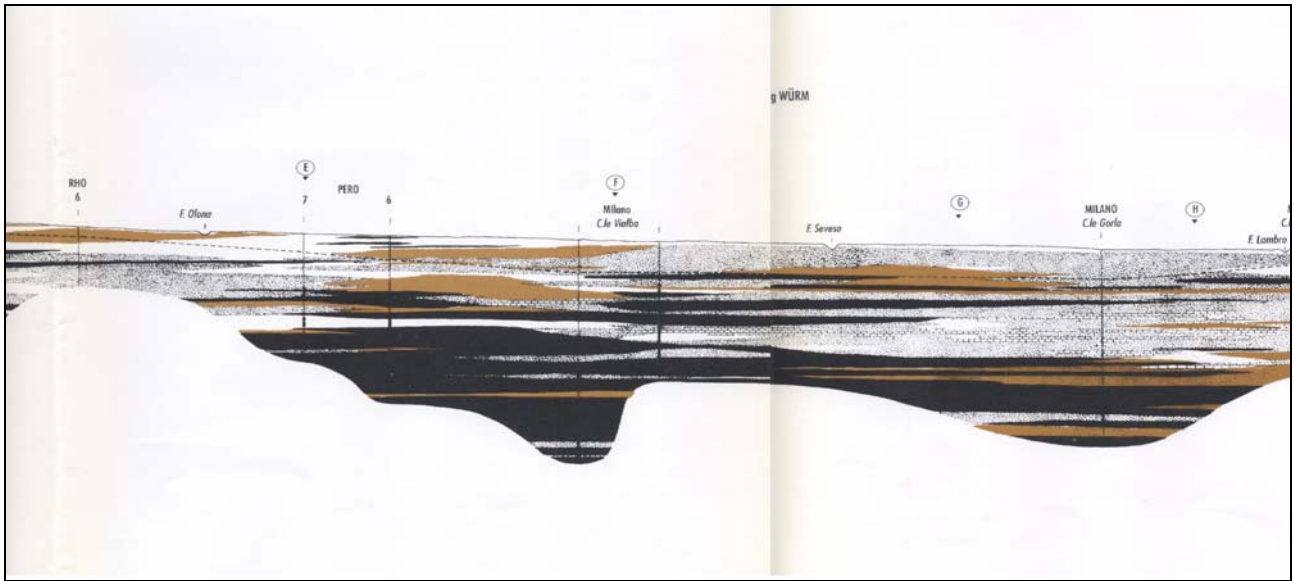


Figura 5.26a: Sezione geologica (numero 10) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente – Parte II.

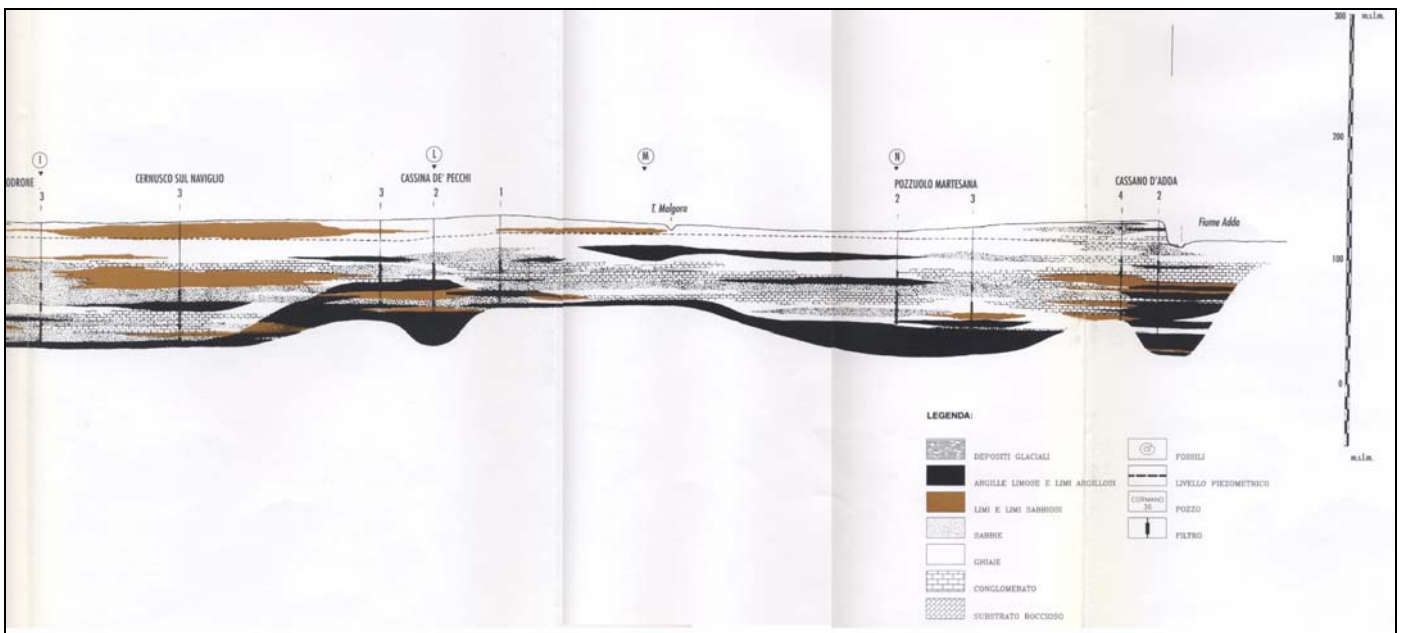


Figura 5.26b: Sezione geologica (numero 10) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente – Parte III.

Dall'analisi delle sezioni si è ipotizzato che la causa del rilascio di radon in diverse zone della città sia correlabile agli strati argillosi formatisi in ambienti riducenti e che possono contenere uranio precipitato che costituirebbe una sorgente di radon. Gli strati argillosi in diversi punti possono essere più o meno inglobati in materiale sabbioso che funge da barriera alla risalita di radon oppure sormontati da livelli ghiaiosi permeabili.

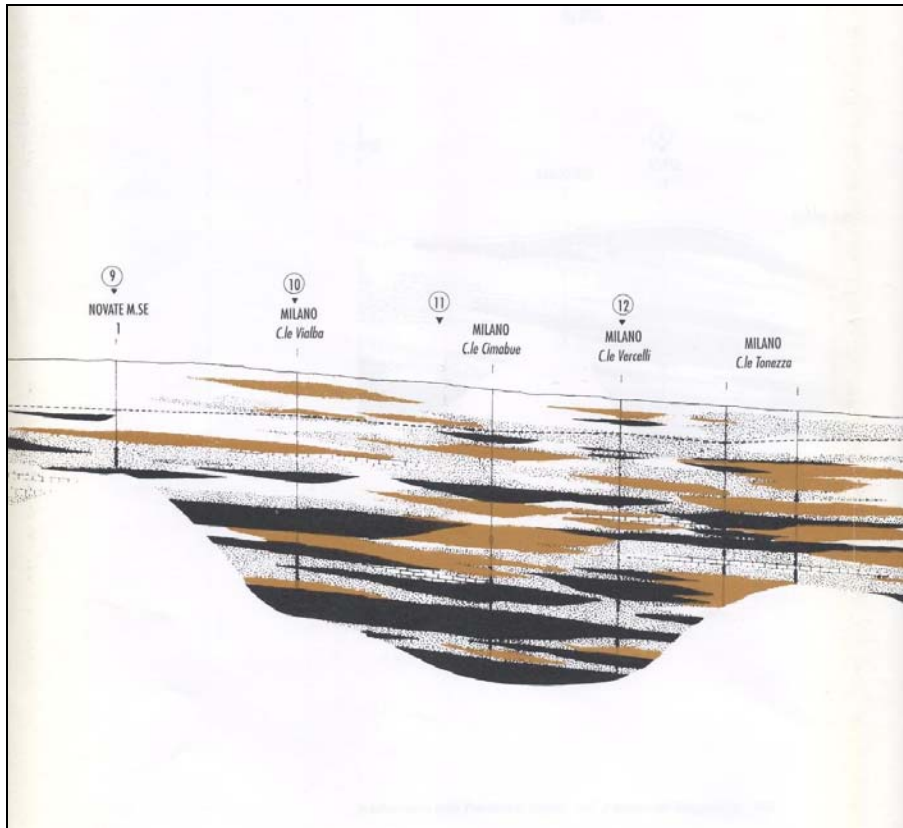


Figura 5.27a: Sezione geologica (lettera F) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente – Parte II.

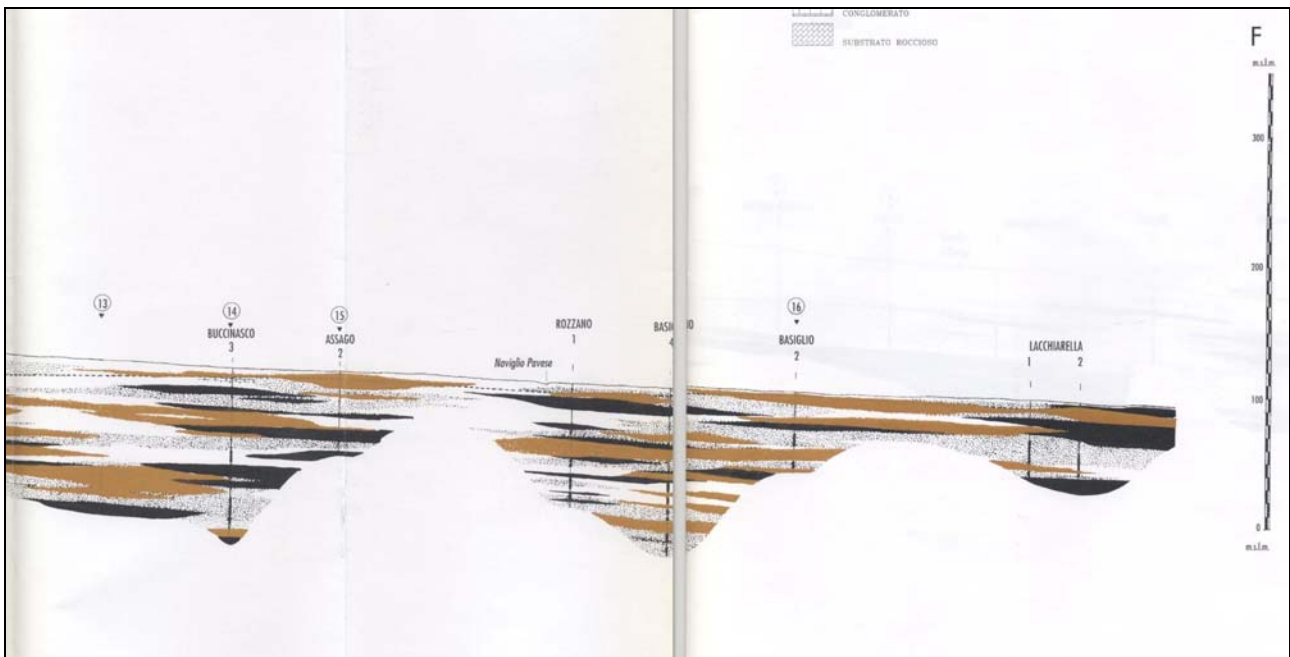


Figura 5.27b: Sezione geologica (lettera F) fornita dalla Provincia di Milano - Assessorato all' Ambiente – Parte III.

La variabilità e complessità in cui le diverse litologie si alternano nel sottosuolo della zona in esame non permettono di distinguere singole zone chiaramente più a rischio.

Nel complesso si può comunque evidenziare come, anche se apparentemente da una prima analisi delle litologie presenti non sembrerebbe possibile un alto rilascio, in realtà per i motivi sopra ipotizzati il territorio cittadino va considerato a rischio e in particolare gli interventi antropici nel sottosuolo in una città densamente urbanizzata come Milano, alterando la successione litologica presente, possono portare ad un incremento delle condizioni di rilascio del radon.

Infine occorre far presente che la città di Milano è risultata nell'ambito del progetto MINNI del Ministero dell'ambiente per il monitoraggio dell'aria, la città a più elevata concentrazione di particolato solido aereodisperso d'Italia, condizioni che sono dovute non solo al rilascio di inquinanti ma anche alle negative condizioni atmosferiche, alcuni studi specifici (Vecchi et al., 2007) hanno evidenziato che le condizioni atmosferiche negative impediscono anche la dispersione del radon (Grafico 5.1), per cui la presenza di aree ad elevata concentrazione spesso puntiforme soprattutto nei quadranti Nord della città di Milano possono produrre condizioni estremamente sfavorevoli per la salute dell'uomo.

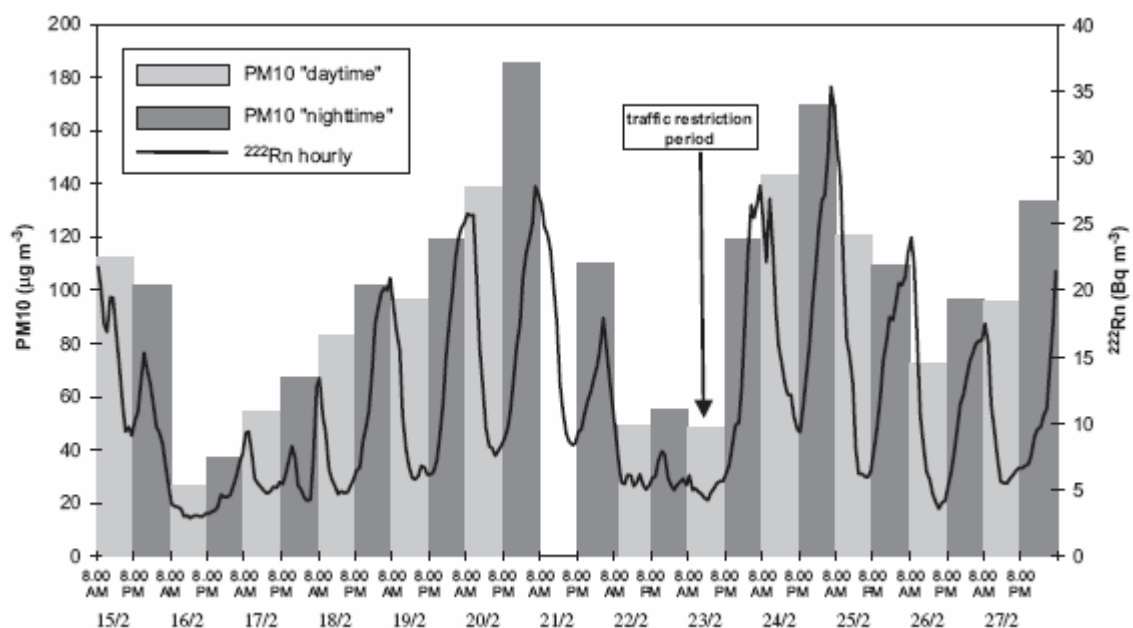


Grafico 5.1: Concentrazioni di PM10 (grigio chiaro ore diurne; grigio scuro ore notturne) con la concentrazione di radon oraria (linea nera continua) nel periodo 15 – 27 febbraio 2003 (il 22-23 feb. Periodo di restrizione del traffico).

5.2.2 Regione Emilia Romagna

La regione Emilia Romagna si conferma una regione caratterizzata essenzialmente da basse concentrazioni; la carta mette però in evidenza concentrazioni anomale particolarmente elevate in alcune zone della regione.

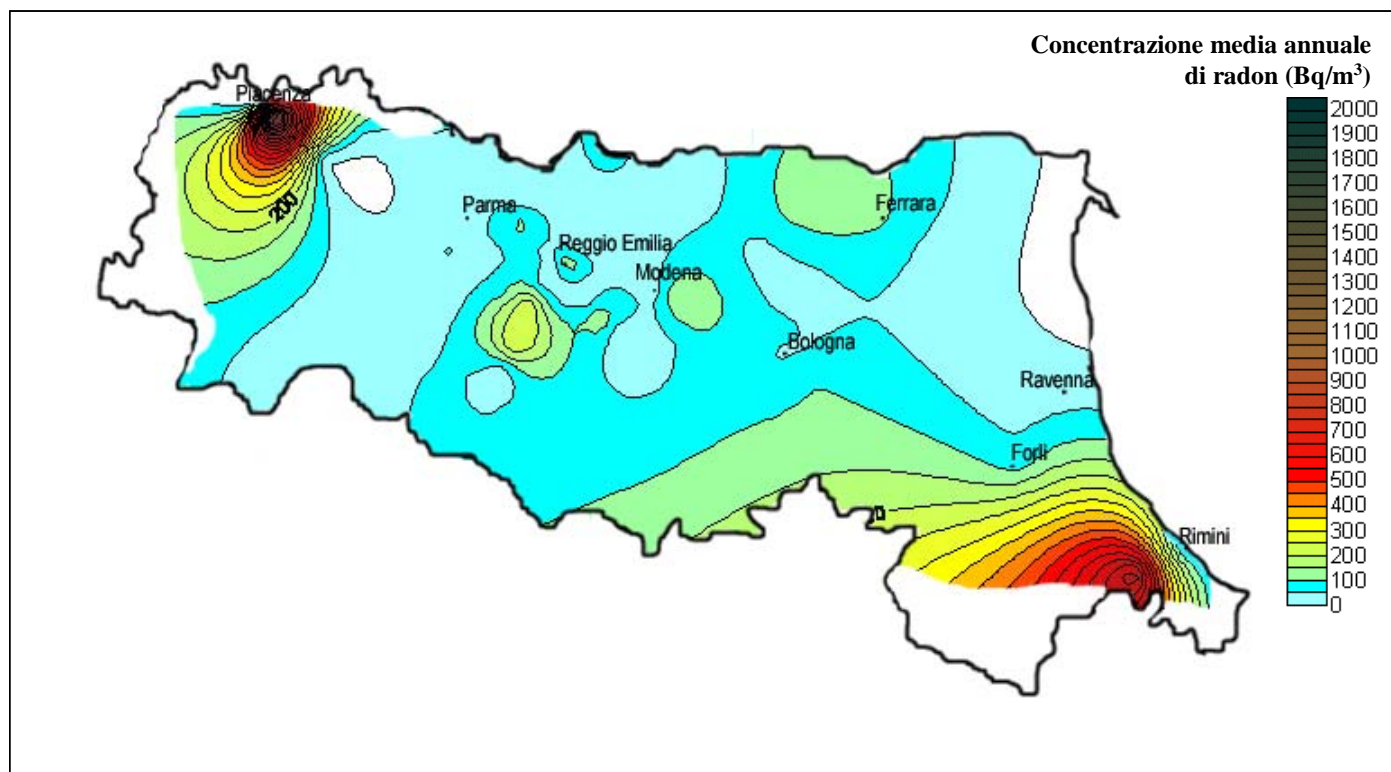


Figura 5.28: Carta di distribuzione delle concentrazioni medie annuali di radon (Bq/m³) nella regione Emilia – Romagna con relativa scala.

In particolare la concentrazione media annuale di radon ottenuta dai risultati dei campionamenti per la città di Piacenza è pari a 231 Bq/m³, superiore quindi ai 200 Bq/m³ raccomandati per le abitazioni; alte concentrazioni sono state riscontrate anche in alcuni comuni della zona appenninica.

Considerazioni geologiche:

I risultati ottenuti evidenziano come in Emilia Romagna il rilascio di radon non sia trascurabile in alcune zone dell'Appennino, in particolare al limite tra la montagna e la pianura e nell'area di Piacenza.

Come mostrato nel paragrafo 5.2.1.1, nel settore piacentino (Fig. 5.29) si trova una zona di alto morfologico che favorisce l'apporto di radon, in quanto i depositi di pianura alluvionale avendo uno spessore inferiore non costituiscono una efficace barriera alla risalita del radon veicolato dalla presenza di faglie.

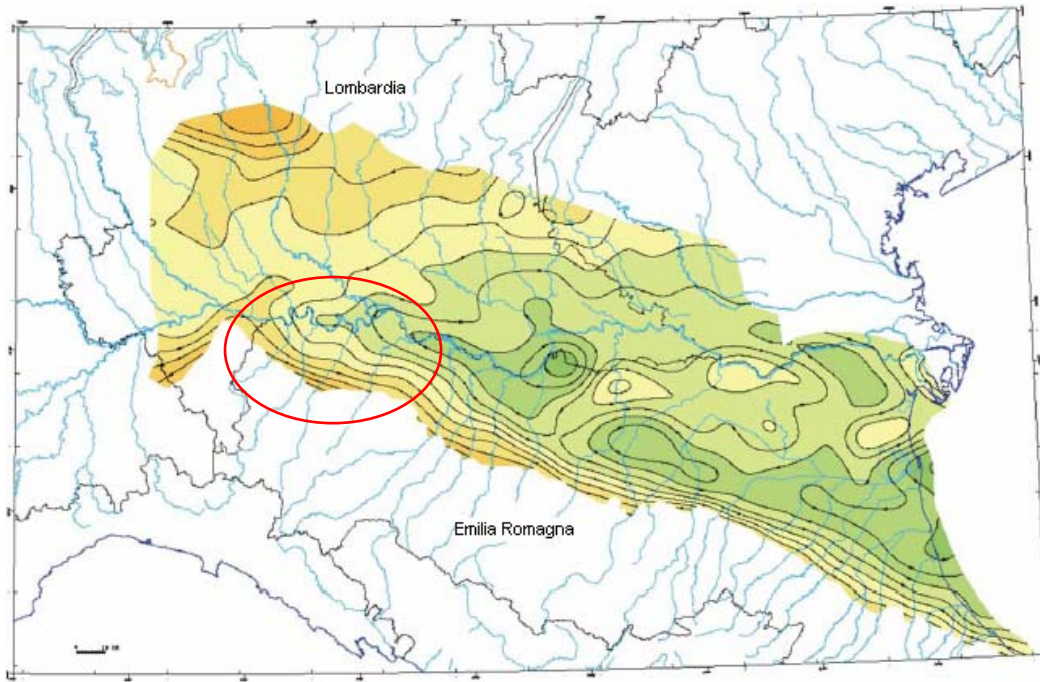


Figura 5.29: Superficie stratigrafica 0.45 Ma con in evidenza l'area settentrionale del piacentino (“Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica).

Nel profilo sismico mostrato in figura 5.30 si evidenzia la presenza della zona di alto strutturale a sinistra, mentre a destra la coltre sedimentaria limita la risalita del gas; in figura è delineata anche la presenza di una falda.

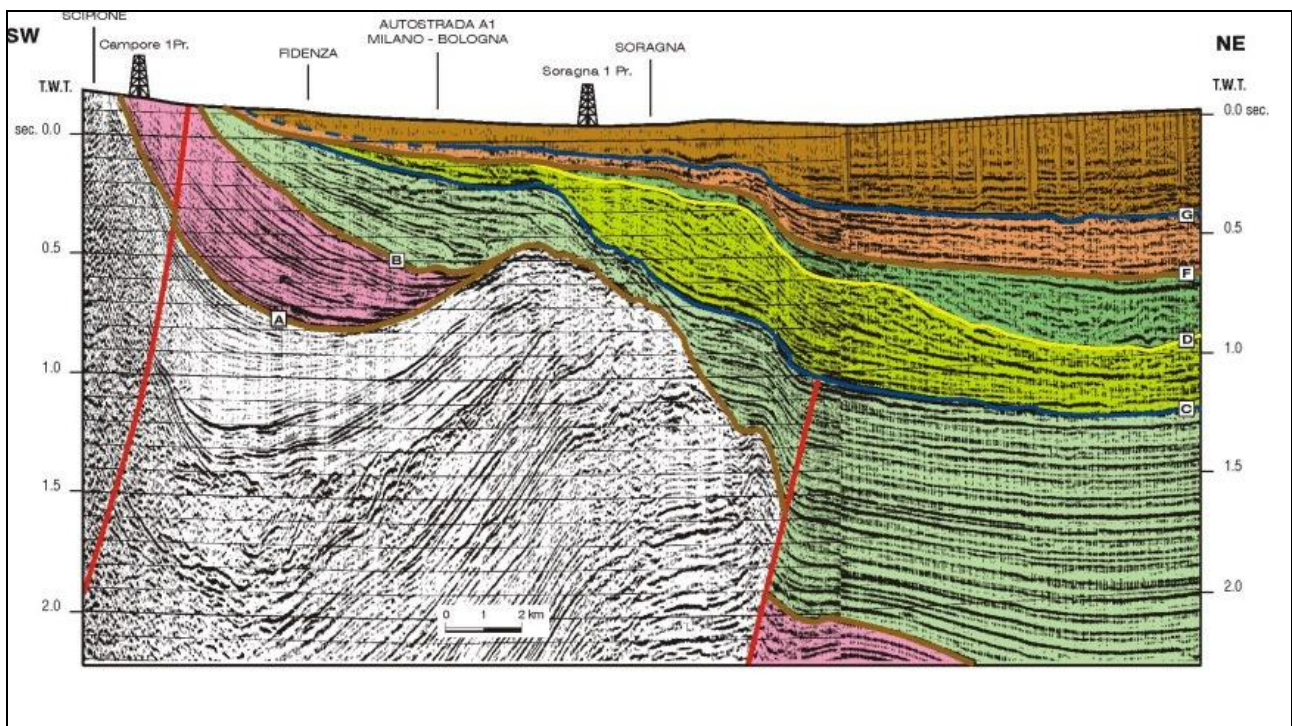


Figura 5.30: Profilo sismico interpretato (“Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia Romagna)

Tutto il margine pedeappenninico è caratterizzato da faglie trasversali come evidenziato nella Figura 5.31; la presenza di faglie favorisce la veicolazione del radon in superficie dagli strati profondi.

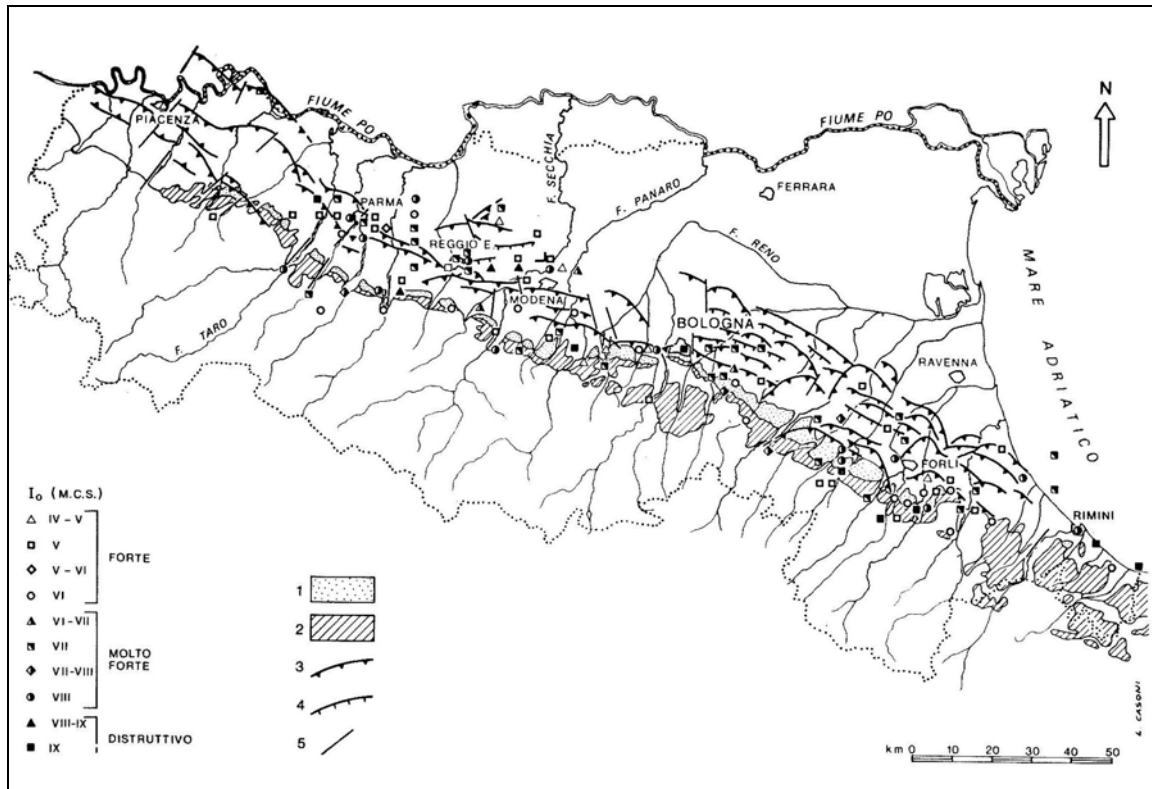


Figura 5.31: Epicentri e faglie attive nell’area del “Sovrascorrimento pedeappenninico”. 1) Quaternario marino; 2) Pliocene; 3) Faglie inverse non affioranti; 4) Faglie dirette non affioranti; 5) Faglie trascorrenti (Elmi e Zecchi, 1982).

Il profilo sismico riportato in Figura 5.32 evidenzia come la zona di pianura alluvionale a causa della spessa coltre di sedimenti costituita da argille e limi (Pleistocene medio) caratterizzati da bassa permeabilità impedisca la risalita del radon (zona al centro del profilo); nel secondo profilo (Fig. 5.33) è evidente il passaggio del limite tra l’Appennino e la pianura con la presenza di un alto strutturale e di una faglia.

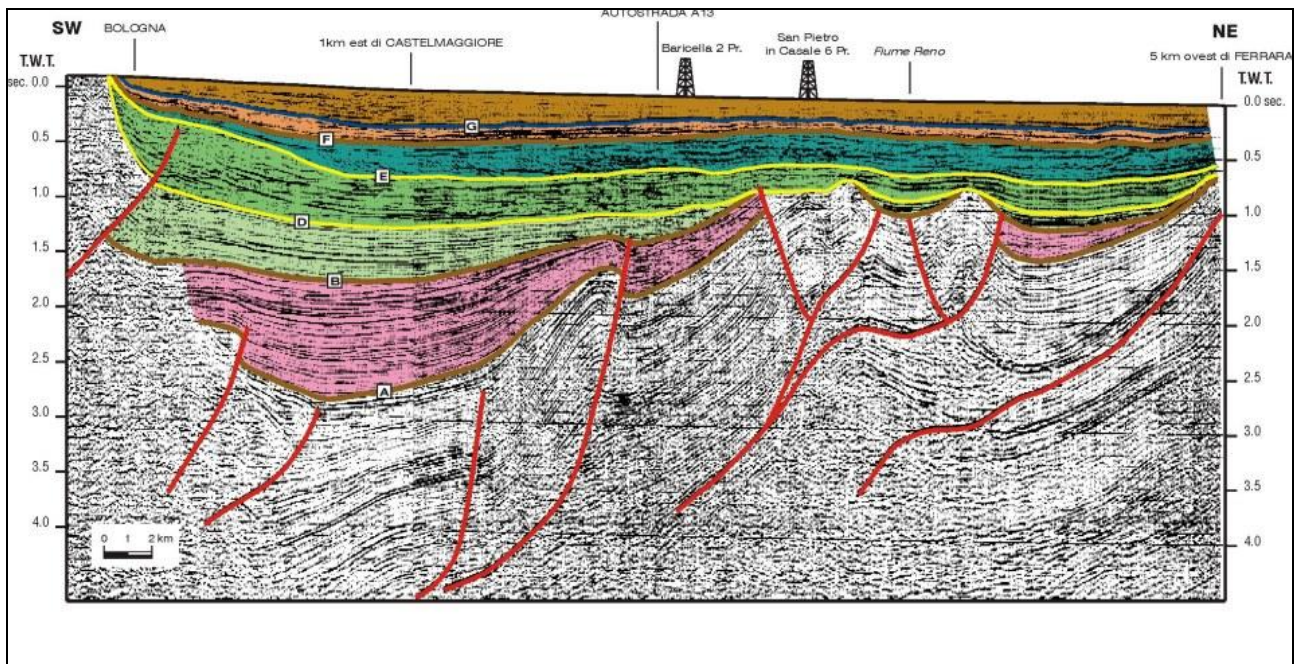


Figura 5.32: Profilo sismico interpretato (“Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia Romagna)

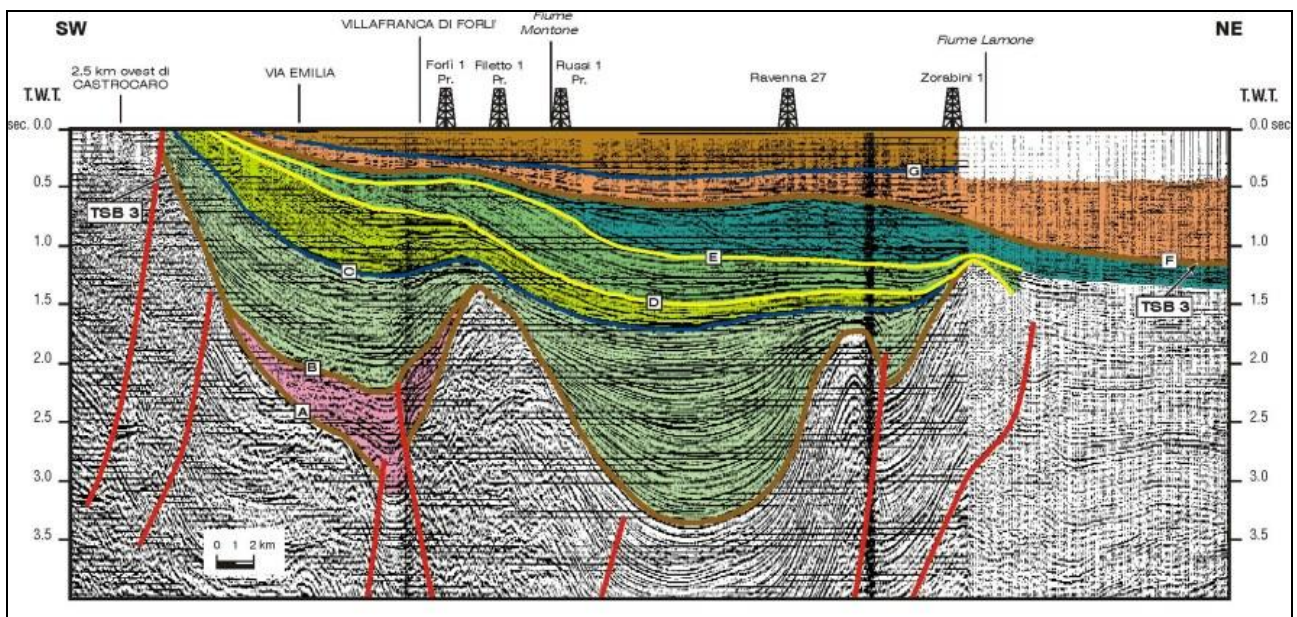


Figura 5.33: Profilo sismico interpretato (“Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia Romagna).

In particolare questa zona pedemontana a sud della regione è caratterizzata dalla presenza di sorgenti termali. Le sorgenti termali appenniniche sono state spiegate con la circolazione in profondità delle acque meteoriche, che si infiltrano nel sottosuolo e risalgono in superficie attraverso le faglie (Merlo et al., 1988); si osserva inoltre che tutte le principali sorgenti termali

appenniniche, come ad esempio Bagno di Romagna (Fig. 5.34), sono ubicate a monte del fronte che provoca il raddoppio del basamento cristallino e quindi la risalita delle unità più profonde (successione carbonatica mesozoica, successioni oligo-mioceniche tosco-romagnole) a discapito della copertura alloctona "Liguride" che in queste località risulta fortemente ridotta o addirittura assente (finestre tettoniche).

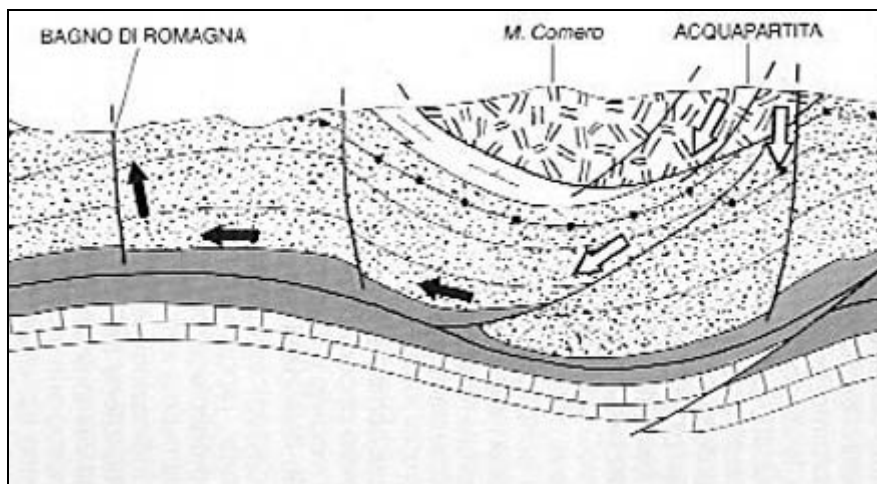


Figura 5.34: Circolazione idrotermale di Bagno di Romagna (“Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia Romagna).

La dinamica dei fluidi che è guidata dai gradienti di pressione influenza fortemente la concentrazione di radon; il radon infatti può essere veicolato con la risalita veloce delle acque profonde.

Concentrazioni di radon leggermente superiori alla media sono state riscontrate nel ferrarese, in particolare nell’area geotermica di Casaglia che presenta particolari caratteristiche geologiche ed idrauliche. A poche centinaia di metri dalla superficie fisica è presente un “alto strutturale roccioso”, che costituisce il culmine geologico della dorsale ferrarese. In corrispondenza di tale formazione geologica sono stati individuati alcuni serbatoi di acqua ad elevata temperatura. Come detto precedentemente l’alto strutturale e la presenza di faglie prossime alla superficie (Fig. 5.32) possono favorire un aumento delle concentrazioni di radon anche se in misura sicuramente minore rispetto alle aree sopra descritte.

5.2.3 Regione Toscana

La distribuzione della concentrazione media annuale di radon, che si ricorda è stata definita con misure in ambienti urbani, ha messo in evidenza la forte eterogeneità del rilascio di radon per cui non è possibile trattare la regione nel suo complesso e che fortunatamente la maggior parte delle città ricadono in zone a basso rilascio.

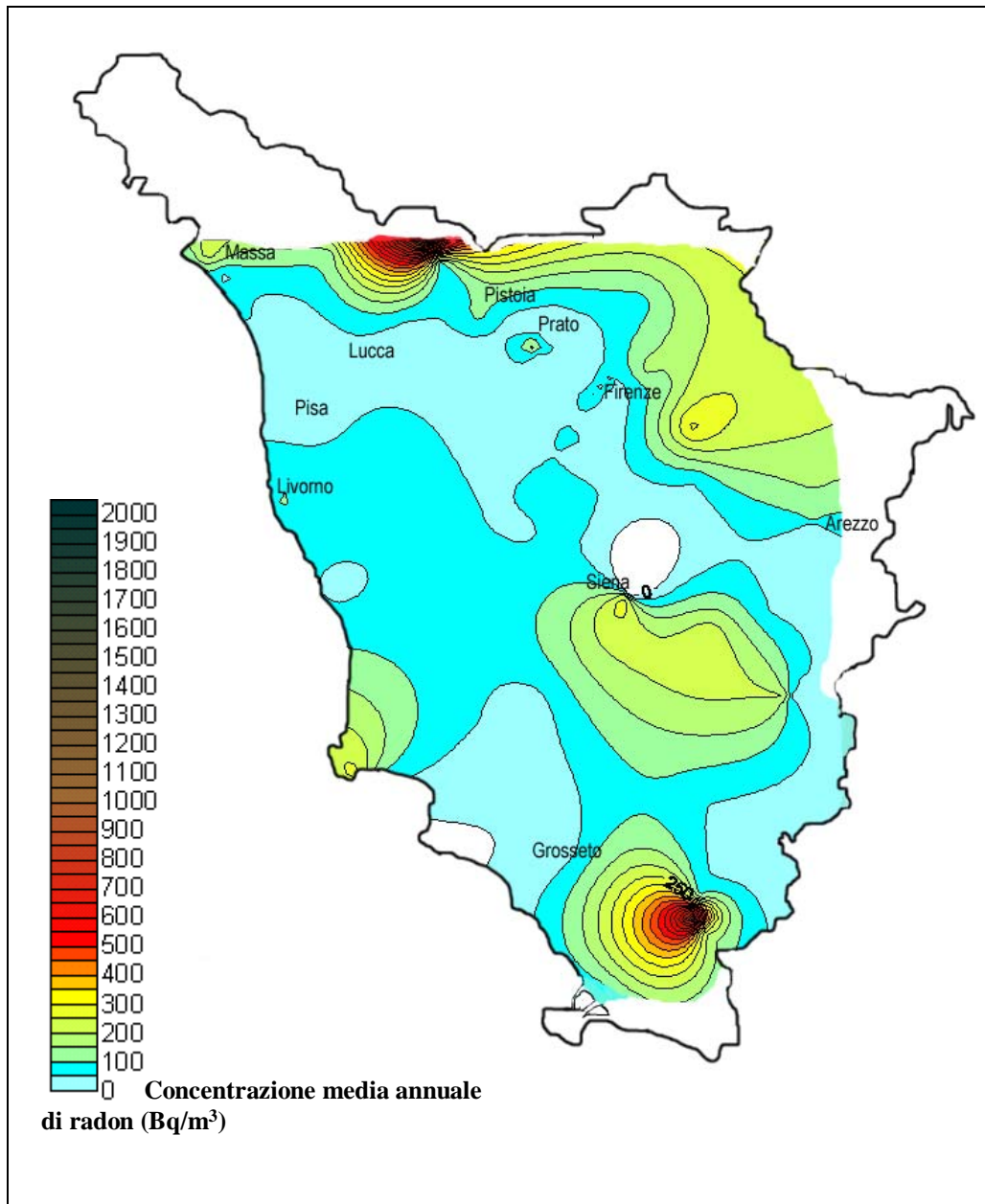


Figura 5.35: Carta di distribuzione della concentrazione media annuale di radon indoor (Bq/m³) nella Regione Toscana con relativa scala.

In particolare si evidenziano due aree caratterizzate da alte concentrazioni di radon: nella parte settentrionale dell'Appennino toscano e a sud di Grosseto.

Considerazioni geologiche:

L'area nella parte settentrionale dell'Appennino toscano in cui la distribuzione di radon indoor evidenzia valori mediamente superiori ai 200 Bq/m³ fa parte dell'Appennino tosco-emiliano che è caratterizzato da numerose strutture tettoniche.

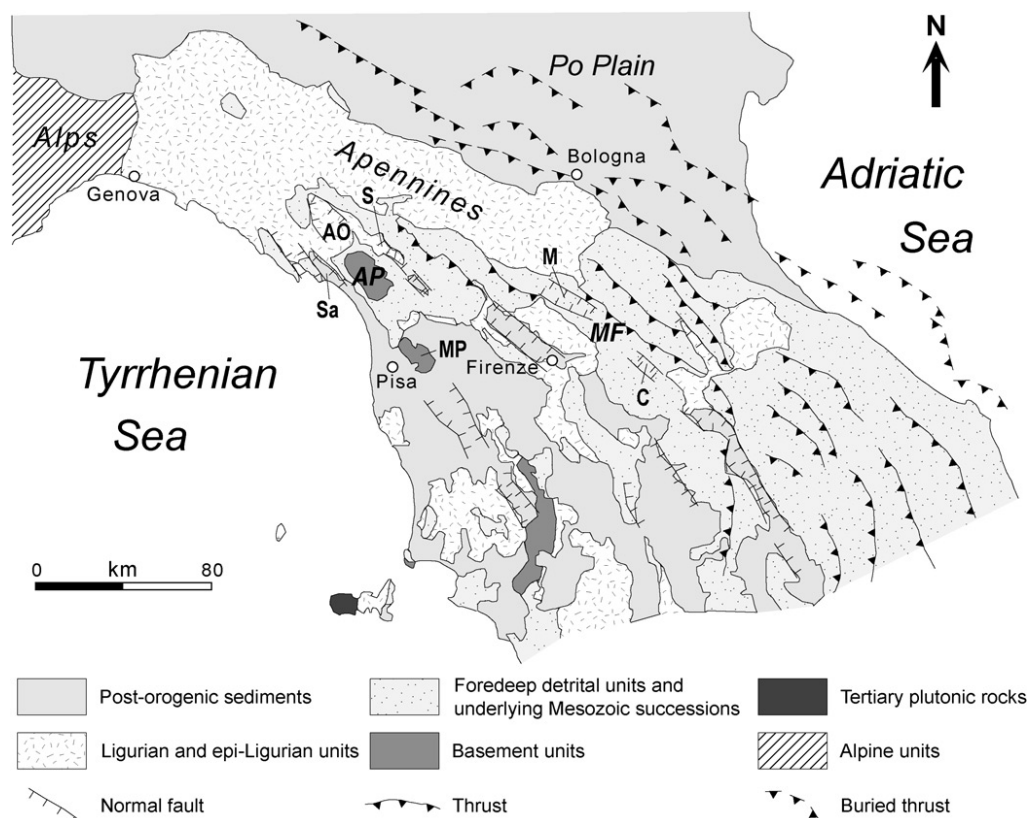


Figura 5.36: Carta geologica schematica degli Appennini settentrionali: AP Alpi Apuane, MF Monte Falterona, MP Monti Pisani, Sa bacino di Sarzana, AO bacino di Aulla-Olivola, S bacino del Serchio, M bacino del Mugello, C bacino del Casentino (Balestrieri et al., 2003).

Come descritto nel precedente paragrafo la presenza di queste strutture (fronti di sovrascorrimento e faglie) può favorire la risalita del radon dagli strati più profondi.

In particolare i valori più elevati di concentrazioni di radon sono stati riscontrati nella zona del comune di Cutigliano che, come evidenziato dal dettaglio della carta geologica della Regione Toscana, si trova in prossimità di due vicini fronti.

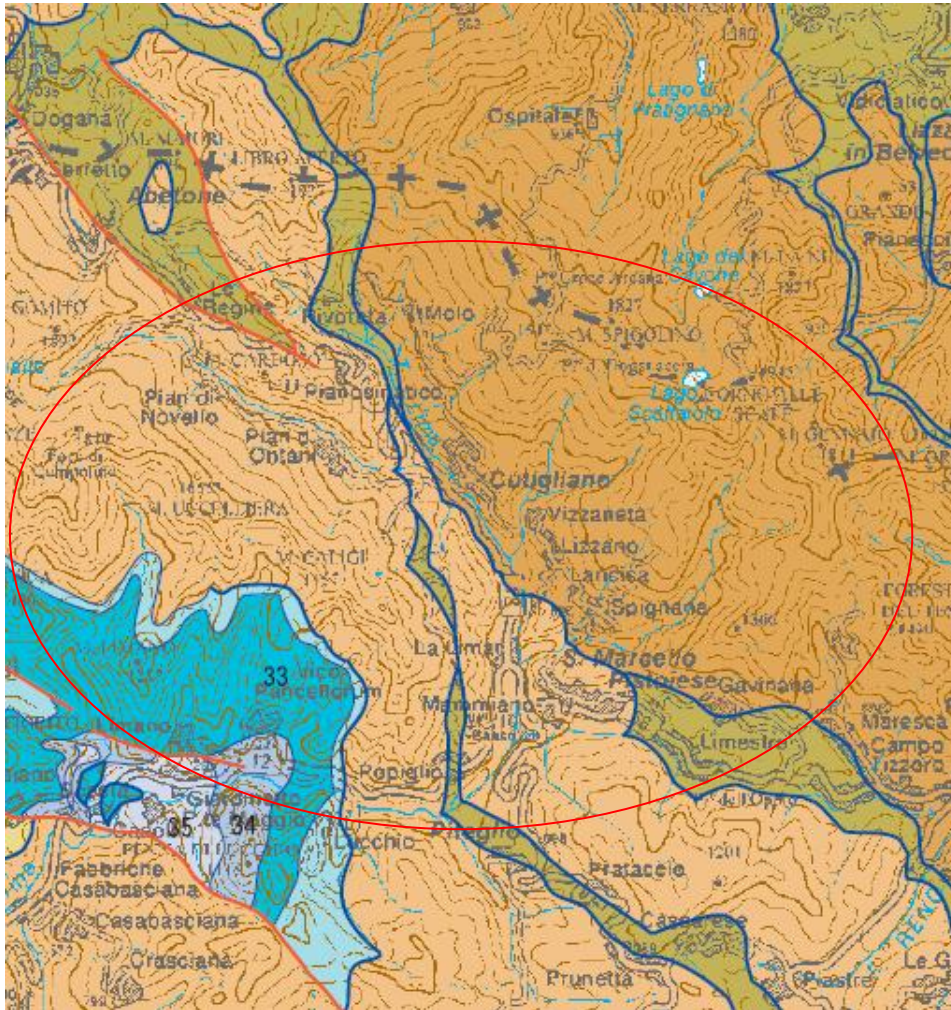


Figura 5.37: Estratto della Carta Geologica della Toscana (Direzione generale delle politiche territoriali e ambientali – Servizio Geologico, Regione Toscana); la linea blu rappresenta i contatti tra le unità tettoniche principali, sovrascorrimenti.

L'area è inoltre caratterizzata dalla presenza di sorgenti termali; in particolare ai piedi dell'Appennino pistoiese si trova il noto comprensorio delle Terme di Montecatini. Nel corso del 2007 sono stati effettuati circa un centinaio di campionamenti indoor ad hoc nella zona del comune termale per un periodo di circa sei mesi. L'indagine su piccola scala ha messo in evidenza il carattere estremamente locale del comportamento del radon e come sia solo possibile delineare zone ad alto rischio ma non sia possibile caratterizzarle con un valore medio di radon certo e univoco. Infatti tra i sei complessi nei quali sono stati condotti i campionamenti soltanto in uno è stata riscontrata una media intorno ai 200 Bq/m^3 .

Sito campionamento	Numero punti misura	Concentrazione media di radon (Bq/m ³)
Sito A	11	41
Sito B	10	68
Sito C	23	40
Sito D	36	180
Sito E	13	32
Sito F	10	60

Tabella 5.2: Campionamenti ad hoc condotti nel comprensorio del comune Terme di Montecatini

La zona meridionale della toscana è un'area in cui il rischio radon è noto, facendo parte della zona del magmatismo toscano – laziale, che è stata ampiamente studiata (Beaubien et al., 2003).

La successione e l'assetto attuale delle unità della Toscana meridionale sono il prodotto di una lunga e complessa storia geologica ed è qui ben rappresentata praticamente tutta l'evoluzione dell'Appennino settentrionale. Si hanno infatti strutture e motivi tettonici di fasi compressive e distensive; affiorano le unità più antiche e quelle più recenti. Si trovano depositi ed apparati vulcanici, come corpi ignei intrusivi, da cui le diffuse ed importanti mineralizzazioni e le attività geotermiche.

In particolare (Figura 5.38) a sud della Provincia di Grosseto si trova il complesso vulcanico del Monte Amiata, l'”Area del tufo” nei territori comunali di Pitigliano e Sorano, caratterizzata dalla presenza e diffusione di rocce tufacee, e l'apparato di origine vulcanica del Vulsino. Sono presenti inoltre fenomeni di manifestazioni termali, quali le celebri terme di Saturnia.

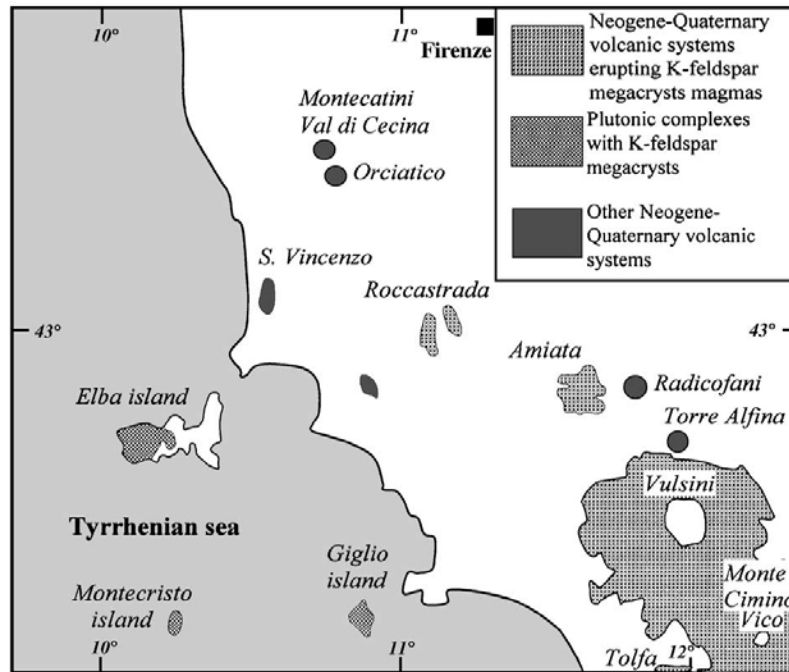


Figura 5.38: Mappa schematica dell'Italia centrale con i principali affioramenti magmatici intrusivi ed effusivi del magmatismo Neogenico – Quaternario (Perini et al., 2003).

In particolare elevati valori di radon sono stati trovati nell'area di depositi di travertino del quaternario nella zona tra Montemerano e Saturnia e nella zona del sistema Vulsino tra la Toscana meridionale e l'alto Lazio. In quest'ultima zona in particolare si trovano due edifici vulcanici adiacenti: il complesso vulcanico del Monte Cimino e il vulcano di Vico.

La natura delle vulcaniti Vulsine è caratterizzata da magmatismo sovrassaturo in silice con valori di alcali spostati verso il potassio; inoltre a differenza delle zone a magmatismo basico, le rocce del magmatismo toscano-laziale presentano alti contenuti di uranio.

Riportiamo a titolo di esempio in tabella 5.3 le concentrazioni di elementi in traccia nelle rocce del primo periodo di attività del Vico (Perini et al., 2000); dagli alti valori di torio si possono desumere alte concentrazioni di uranio, considerando il loro rapporto costante in rocce magmatiche.

Locality:	Vallerano	Vallerano	Vallerano	Vallerano	Faggianello	Castello di Petrignano	i Cappuccini	S. Martino al Cimino	Vallerano	S. Martino al Cimino	Vallerano	Vallerano	Vallerano
Section:	4	4	4	4	2		3	1	1	1	4	4	4
Sample:	VCO 160	VCO 161	VCO 108	VCO 109B	VCO 94B	VCO 41	VCO 80	VCO 178NB	VCO 109N	VCO 178N	VCO 112	VCO 111	VCO 110
Material:	P	P	P	P	P	L	S	S	S	S	S	P	P
Type:	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-free	Lct-bearing	Lct-bearing	Lct-bearing
SiO ₂	69.1	67.3	66.6	64.6	63.4	62.7	59.3	59.4	58.3	56.4	56.2	54.7	54.5
TiO ₂	0.20	0.26	0.29	0.34	0.39	0.41	0.54	0.55	0.57	0.69	0.71	0.72	0.74
Al ₂ O ₃	14.3	15.0	15.3	15.8	16.8	17.4	18.1	17.9	18.1	18.3	18.4	18.3	18.0
Fe ₂ O ₃	0.94	1.22	1.37	1.54	1.51	2.82	2.42	2.79	2.99	3.75	4.68	3.11	3.64
FeO	0.80	0.84	0.92	1.16	1.36	0.40	1.80	1.72	1.68	2.03	1.12	2.52	2.40
MnO	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.13	0.13	0.12
MgO	0.29	0.39	0.40	0.54	0.61	0.71	1.16	1.22	1.37	1.95	2.19	1.98	2.25
CaO	1.58	1.89	2.02	2.37	2.65	2.81	3.66	3.79	4.39	5.14	5.27	4.94	5.43
Na ₂ O	2.60	2.73	2.44	2.35	2.49	3.25	2.24	2.36	2.21	1.99	3.21	2.32	2.02
K ₂ O	7.43	7.76	7.65	7.75	8.86	8.66	9.44	9.13	8.93	8.36	5.82	6.65	6.24
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.03	0.06	0.07	0.09	0.15	0.15	0.17	0.26	0.27	0.24	0.29
LOI	2.70	2.47	2.92	3.32	1.74	0.61	1.03	0.89	1.18	1.07	2.06	4.40	4.34
A.I.	0.86	0.86	0.80	0.77	0.82	0.85	0.77	0.77	0.73	0.67	0.63	0.60	0.56
Sc*	2.3	2.6	2.6	3.2	nd	4.1	nd	nd	5.6	8.6	8.7	8.0	8.5
V	23	35	37	53	63	74	102	109	117	149	147	134	149
Cr	2	3	2	1	5	5	9	5	4	15	20	16	18
Co	bdl	2	1	3	3	6	7	7	7	13	14	13	14
Ni	19	19	17	17	17	22	16	15	13	18	21	19	20
Cu	2	1	2	6	7	11	10	9	9	12	12	12	17
Zn	52	55	52	56	56	63	62	66	65	72	70	76	71
Rb	730	712	623	602	581	694	506	516	479	428	534	459	469
Sr	209	300	369	518	795	746	1462	1337	1543	1640	1451	1315	1321
Ba	109	169	188	375	496	714	1529	1303	1685	1788	1658	1476	1348
Pb	261	257	194	219	182	196	151	159	147	137	148	154	131
Y	69	71	60	68	56	64	58	57	52	51	58	57	52
Zr	363	424	406	406	408	555	384	403	376	365	396	434	375
Nb	37	37	33	31	28	39	22	24	20	19	21	25	23
Hf*	11.3	10.5	9.6	9.6	nd	12.3	nd	nd	8.4	8.4	8.4	9.5	8.3
Ta*	3.0	2.7	2.8	2.8	nd	3.1	nd	nd	1.7	1.5	1.5	1.7	1.7
Th*	165	155	127	124	nd	167	nd	nd	71.1	62.0	75.8	82.0	72.0
La	118	128	129	131	124	171	125	118	109	119	115	122	106
Ce	255	277	265	267	253	312	223	226	216	228	253	265	235

Tabella 5.3: Analisi dei principali ossidi (%) e elementi in traccia (ppm) nelle rocce del primo periodo di attività del Vico (Perini et al., 2000).

Particolarmente significativi sono i risultati delle analisi condotte in Conticelli et al., 2002 dove è riportata la concentrazione di uranio in ppm per campioni di rocce vulcaniche potassiche e ultrapotassiche provenienti dalla Toscana meridionale e dalla provincia di Roma; dalla tabella 5.4 si può notare come nei campioni di rocce laviche il contenuto di uranio e torio è nettamente al di sopra dei valori medi per le rocce presenti nel territorio italiano.

Sample	Pb (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
ORC 1	–	119	18.1	18.670	15.642	38.956 ^{IGGI}
VS 29	57	61	0.7	18.652	15.643	38.810 ^{IGGI}
VS 76	–	30	–	18.647	15.641	38.771 ^{IGGI}
CP 54	2	24	3.8	18.667	15.664	38.993 ^{IGGI}
VS 184	33	58.3	–	18.671	15.662	38.984 ^{IGGI}
VS 123	–	24.8	–	18.710	15.701	39.101 ^{IGGI}
CP 10	33	22	6.6	18.735	15.702	39.086 ^{IGGI}
Bols 301	–	49.8	8.7	18.668	15.670	39.025 ^{IGGI}
Bols 282	–	32	–	18.741	15.663	38.969 ^{IGGI}
VS 189	63	48.4	–	18.731	15.657	38.938 ^{IGGI}
VS 67	–	29	5.2	18.748	15.656	38.937 ^{IGGI}
BR 01	–	55.3	12.6	18.734	15.654	38.944 ^{IGGI}
BR 03	–	41	9.3	18.722	15.646	38.907 ^{IGGI}
BR 29	–	46	10.2	18.705	15.640	38.988 ^{IGGI}
SVK 1	–	36	–	18.728	15.648	38.877 ^{IGGI}
SVK 1	–	–	–	18.735	15.658	38.931 ^{IGGI}
SVK 7	–	124	–	18.740	15.663	38.953 ^{IGGI}
VS 44	–	14	0.7	18.507	15.624	38.715 ^{IGGI}
VS 4li	–	14	0.7	18.220	15.626	38.332 ^{IGGI}
SD 75	–	14	0.7	18.612	15.597	38.755 ^{IGGI}

Campione	Affinità	Distretto	Località	Roccia
ORC1	Lamproite	Val d’Era	Orciatico Village	Laccolith
VS29	Lamproite	Paglia	Torre Alfina	Lava
VS 76	Lamproite	Paglia	Torre Alfina	Enclave
CP 54	Transitional	Capraia	Capraia Island	Lava
VS 184	Transitional	Paglia	Radicofani	Lava
VS 123	Transitional	Paglia	Radicofani	Lava
CP 10	HKCa	Capraia	Capraia Island	Lava
Bols 301	KS	Vulsini	Selva del Lamone	Lava
Bols 282	HKS	Vulsini	Case Collina	Pumice
VS 189	HKS	Vulsini	Fiordini	Lava
VS 67	HKS	Vulsini	Commenda	Lava
BR 01	HKS	Sabatini	Bracciano	Lava
BR 03	HKS	Sabatini	Bracciano	Lava
BR 29	HKS	Sabatini	Monte Maggiore	Lava
SVK 1	Kamafugite	San Venanzo	Pian di Celle quarry	Lava
SVK 7	Kamafugite	Cuppaello	Cuppaello quarry	Lava
VS 44	Granulite	Paglia	Torre Alfina	Xenolite
VS 4li	Anorthosite	Paglia	Torre Alfina	Xenolite
SD 75	Gneiss	Paglia	Torre Alfina	Xenolite

Tabella 5.4: a) Concentrazioni di U, Th, Pb e composizioni isotopiche del piombo; b) Campioni studiati e loro provenienza (Conticelli et al., 2002).

In particolare la concentrazione di Uranio è superiore a quella di rocce magmatiche di tipo basico in altre zone appenniniche (Bianchini et al., 2008), il cui valore è compreso tra 1 e 3 ppm (Tab. 5.5).

Campione	Mt. Queglia lamprophyres		Pietre Nere mafic rocks		
	1	2	1	2	3
Th	9,49	9,40	6,40	9,06	5,79
U	2,99	3,00	1,58	2,46	1,46

Tabella 5.5: Contenuto uranio e torio in traccia (ppm) di magmi mafici (Bianchini et al., 2008).

5.2.4 Regione Puglia

Analogamente alle altre regioni indagate, è stata elaborata una carta delle concentrazioni medie annuali di radon nella Regione Puglia poiché dall'analisi dei dati ottenuti dalla campagna indoor risultava una media regionale di circa 190 Bq/m³, valore molto elevato rispetto a quanto trovato nell'Indagine Nazionale e per la quale la regione Puglia era stata finora considerata a basso rischio.

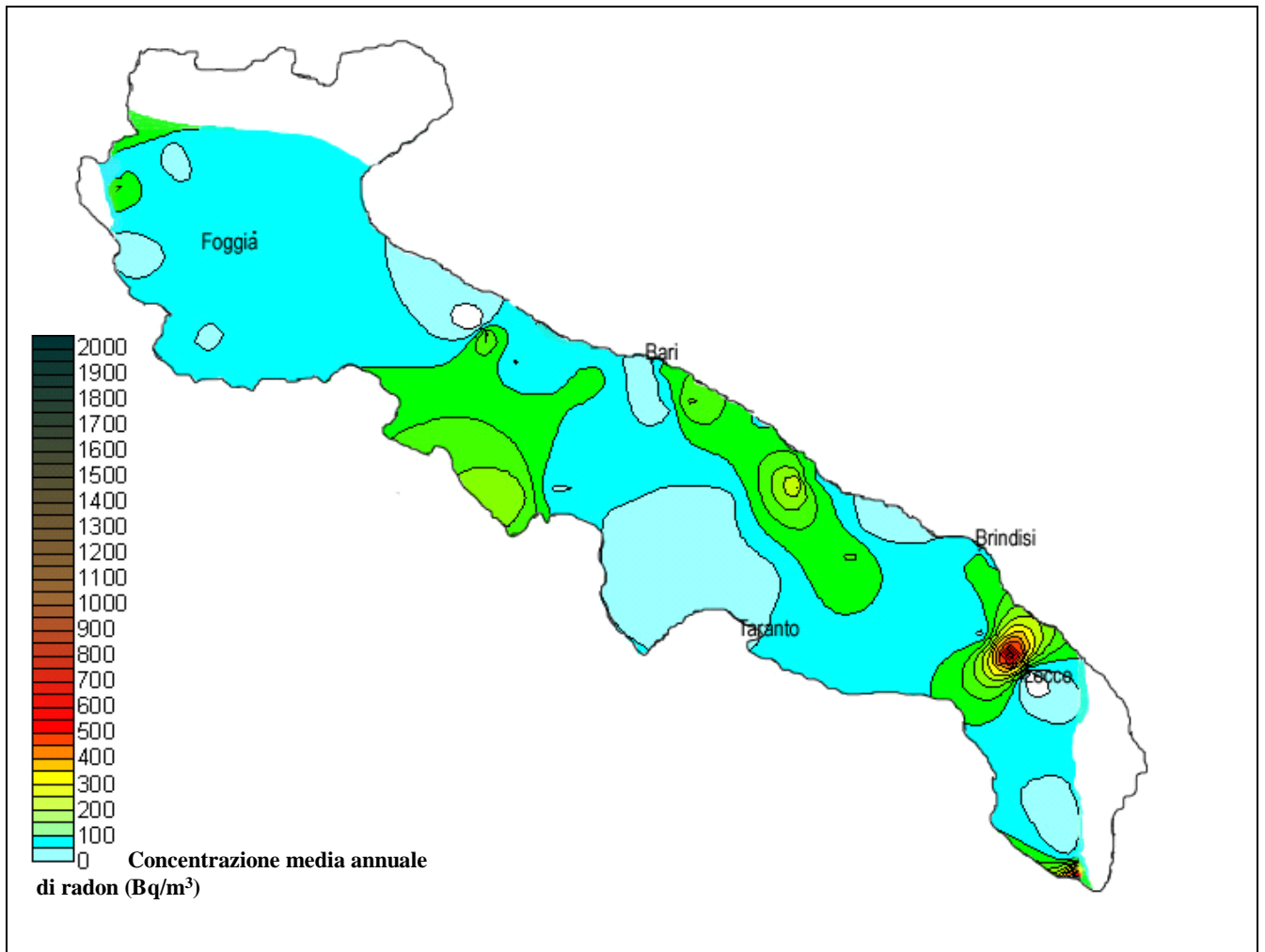


Figura 5.39: Carta di distribuzione della concentrazione media annuale di radon indoor (Bq/m^3) nella Regione Puglia con relativa scala.

Analizzando la distribuzione dei dati di campionamento la mappa evidenzia come questi si distribuiscano nella zona meridionale della regione, in particolare nell'area di Lecce.

Considerazioni geologiche:

Lo studio della problematica del rischio radon in questa regione caratterizzata da estesi affioramenti di rocce carbonatiche risulta particolarmente complesso. Uno studio approfondito dell'area partendo dai dati ottenuti nell'indagine indoor oggetto di tesi è stato condotto nell'ambito della tesi di dottorato del Dott. M. Taroni, "Sviluppo di metodologie per lo studio di aree a rischio radon".

Lo studio è stato condotto nella zona Nord – Occidentale di Lecce (Figura 5.40) attraverso una raccolta di dati disponibili in letteratura riguardo le caratteristiche geologiche del territorio in particolare valutando la presenza discontinuità tettoniche che possono favorire l'eventuale rilascio di radon; sono state inoltre condotte analisi su campioni di rocce, misure nei terreni per la

valutazione della concentrazione di Radon e misure di concentrazione di gas in alcuni campioni d'acqua ad uso potabile e non.

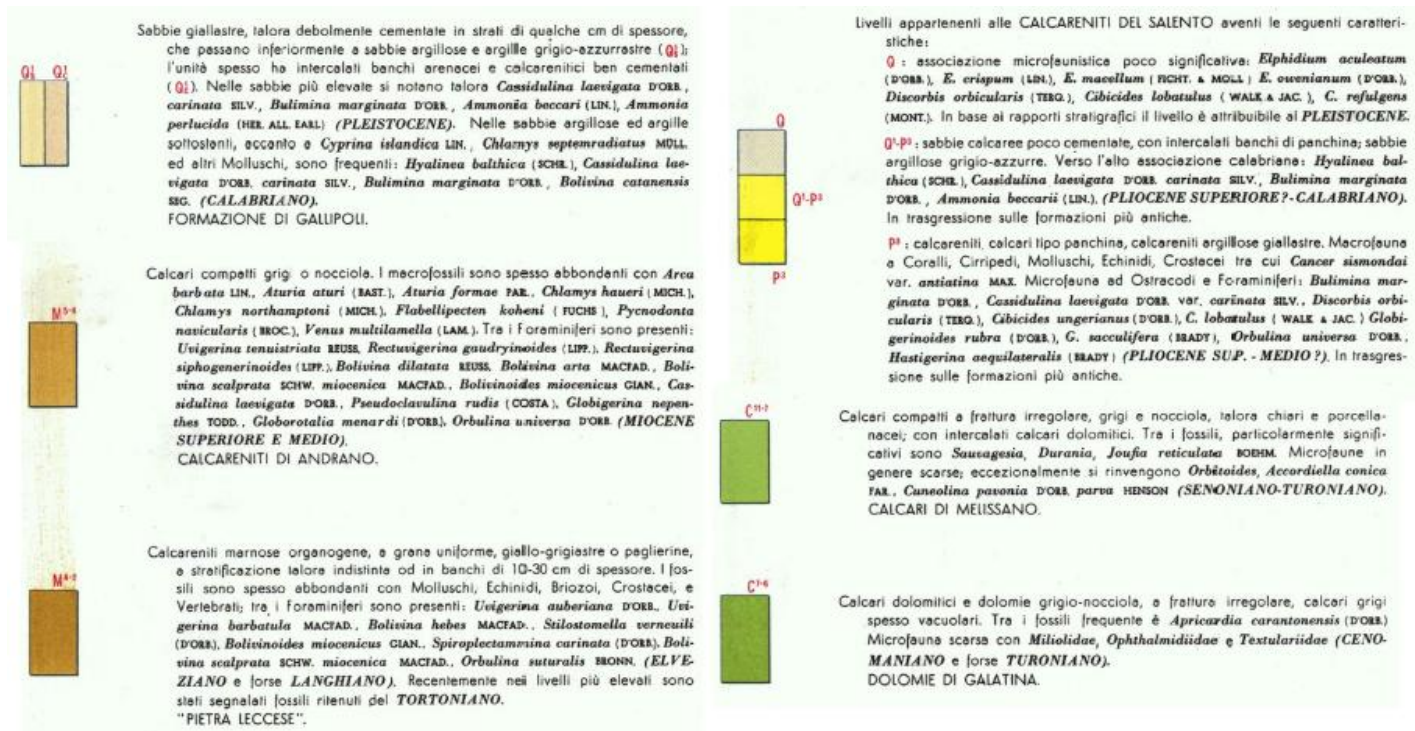
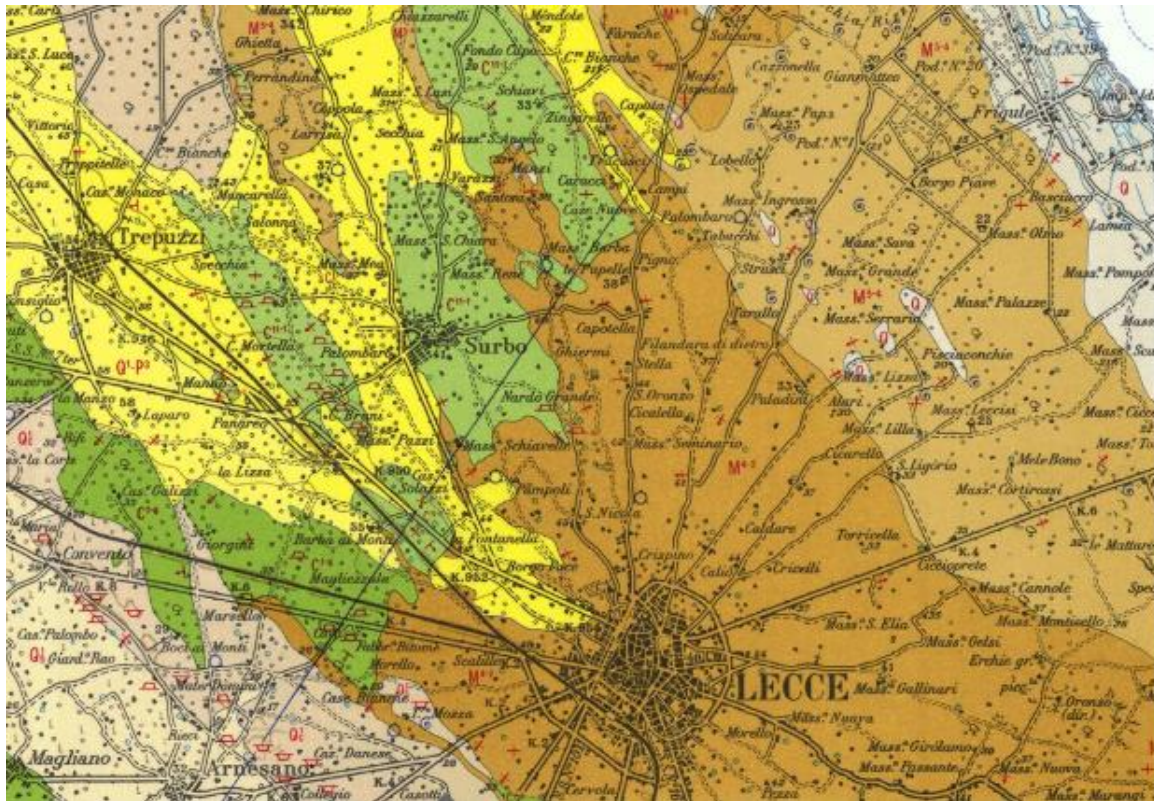


Figura 5.40: Legenda ed estratto della carta geologica della carta geologica – Foglio n.204 Lecce, scala 1:100000.

I sedimenti presenti nella zona sono caratterizzati da forti differenze fra di loro di permeabilità, come risulta evidente dalla carta di permeabilità (Fig. 5.41) pubblicata dal SIT della Provincia di Lecce. In particolare i calcari cretaceo-oligocenici hanno acquisito una porosità secondaria in seguito a locali fenomeni di carsismo.

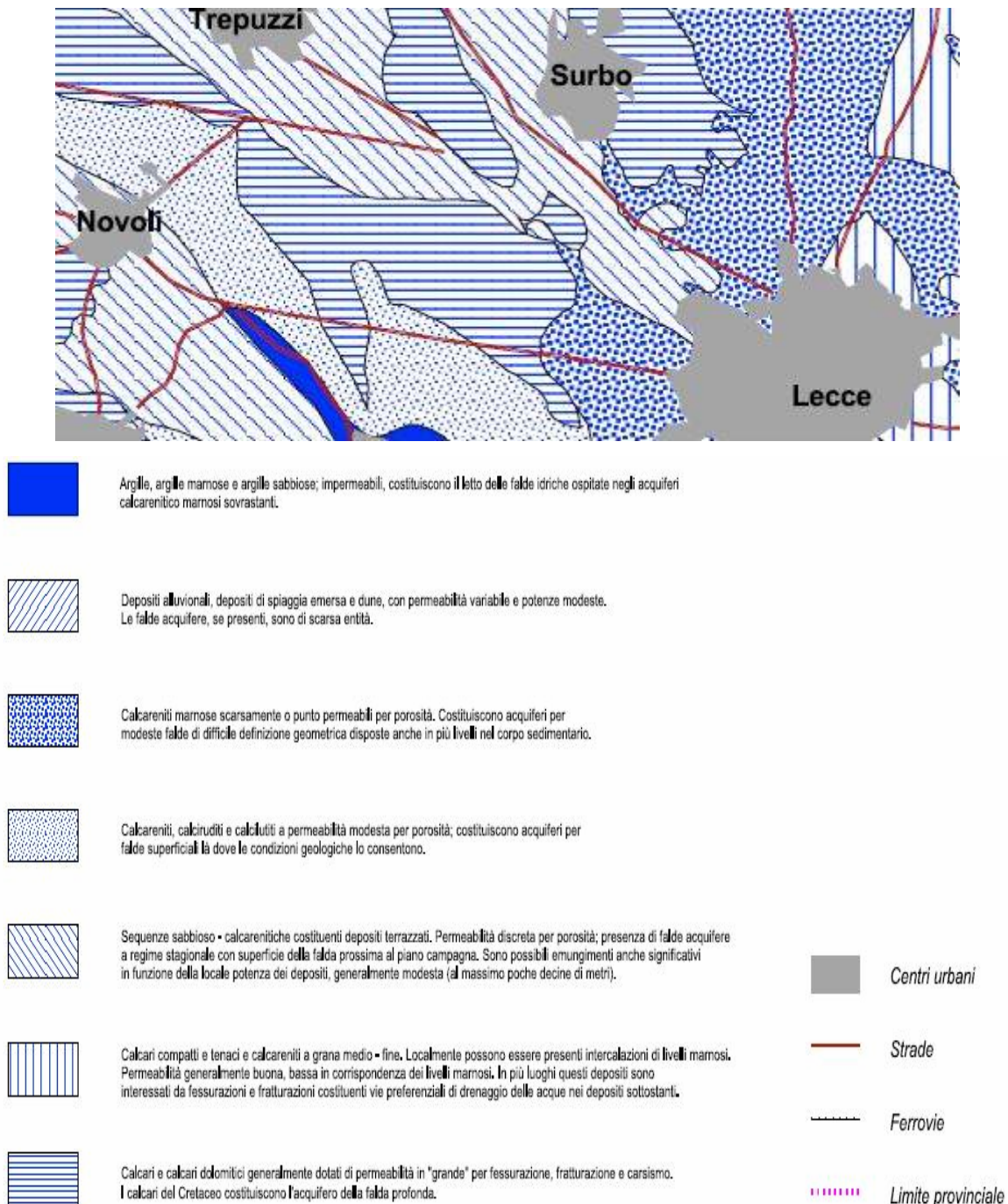


Figura 5.41: Carta della permeabilità della zona Nord – Ovest di Lecce.

Dalla figura 5.41 risulta particolarmente interessante come le situazioni a rischio si collochino in aree al limite del passaggio fra litologie caratterizzate da diversa permeabilità.

L'estratto (Fig. 5.42) della carta della neotettonica del Salento (Ciaranfi et al., 1988) nella zona di Lecce permette di notare la presenza di alcune faglie note (↔↔) o supposte (——). Il fenomeno del carsismo che riguarda l'area prevede instabilità meccanica del sottosuolo e un potenziale incremento del rischio radon.



Figura 5.42: Estratto della carta neotettonica delle Murge e del Salento, Lecce.

Stabilito il potenziale rischio radon legato ai parametri strutturali del sottosuolo, ovvero porosità, permeabilità e carsismo, per valutare quale fosse la possibile sorgente di radon nell'ambito del lavoro sopra citato erano stati effettuati dei campionamenti delle litologie affioranti per ognuna delle formazioni geologiche presenti nell'area di studio. In tabella 5.6 sono riportati i valori degli elementi in traccia dei campioni raccolti.

Campioni	Altamura- Galatone	Altamura	Pietra Leccese	Gravina- Galatone	Galatone – misto depositi marini terrazzati
Sc	34,37	42,47	41,72	129,46	50,05
Rb	1,33	0,83	1,23	4,22	2,17
Sr	323,83	94,78	185,02	497,76	301,53
Zr	0,13	0,33	0,09	0,67	0,09
Nb	0,19	0,44	0,28	0,82	0,26
Hf	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Ta	0,19	0,51	0,20	0,30	0,27
Th	0,03	-0,02	-0,02	0,00	-0,02
U	3,30	5,95	6,68	12,59	6,70

Tabella 5.6: Elementi in tracce di campioni roccia delle litologie affioranti nella zona di studio (tesi di dottorato “Sviluppo di metodologie per lo studio di aree a rischio radon”, M. Taroni).

Dalla tabella si evince che le concentrazioni di uranio sono leggermente al di sopra della media mondiale di uranio presente nelle rocce carbonatiche (Ivanovich e Harmon, 1992). L'ampia superficie di scambio delle rocce carbonatiche per fessurazioni e fratturazioni può portare ad un significativo aumento dell'emanazione di radon.

Nell'ambito dello studio erano stati inoltre condotti campionamenti nei suoli e nelle acque della zona di studio. Dai risultati dei campionamenti erano emerse concentrazioni di radon molto variabili all'interno delle singole aree geologiche; le formazioni dei depositi marini terrazzati misti a galatone e la pietra leccese hanno mostrato concentrazioni significativamente più elevate di quelle di gravina e altamura. Le variazioni all'interno della singola litologia sono da imputare alla struttura del sottosuolo, degradata da carsismo e fratturazione irregolare. La leggerissima anomalia geochemica della concentrazione di uranio si giustificerebbe attraverso gli ambienti di formazione riducenti riscontrati nell'area di studio.

Si ipotizza che in ambienti indoor il rilascio possa essere notevolmente incrementato proprio a causa dell'intervento antropico che va ad intaccare i primi strati di suolo.

5.3 Confronto con i risultati delle campagne eseguite nella tesi con i dati regionali ARPA

Nel Capitolo 3 è stata sintetizzata la situazione in Italia riguardo al rischio radon e sono state identificate le regioni che hanno avviato indagini in questo campo. Nel presente paragrafo sono quindi riportate alcune considerazioni riguardo ai risultati del lavoro di tesi e i risultati ottenuti dalle ARPA delle regioni indagate, ovvero Lombardia, Emilia Romagna, Toscana. Ad eccezione della regione Puglia in cui non è stata effettuata una mappatura del territorio né avviata alcuna indagine di monitoraggio se non un breve studio riassuntivo dei dati ottenuti dall'Indagine Nazionale (Lattarulo et al., ARPA Puglia).

La regione Lombardia è stata una delle prime ad attivare un programma di indagine (De Bartolo et al., 2005) per l'individuazione delle radon prone areas (2003-2005), utilizzando tecniche geostatistiche per l'elaborazione dei dati (Arrigoni et al., "Radon gas monitoring survey for the determination of Radon Prone Areas in Lombardia").

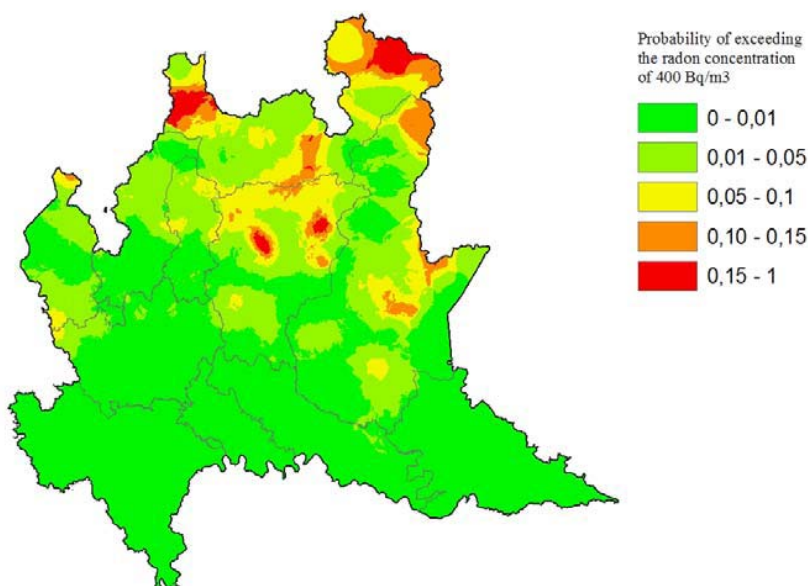


Figura 5.43: Carta di probabilità di superamento del valore di concentrazione di radon pari a 400 Bq/m³ ottenuta tramite tecniche di kriging da uno studio condotto dall'ARPA Lombardia, Arrigoni et al..

In Figura 5.43 è riportato il risultato ottenuto dall'ARPA Lombardia in termini di probabilità di superamento dell'80% del livello d'azione previsto dalla normativa italiana per i luoghi di lavoro (D.Lgs. 241/00). Per meglio evidenziare i risultati ottenuti riportiamo la carta ottenuta nel presente lavoro di tesi. Ad eccezione della zona alpina a Nord della regione meno densamente abitata e per questo motivo da noi non studiata approfonditamente, è stata messa in evidenza anche nel presente

lavoro di tesi la zona ad alte concentrazioni di radon evidenziata dalla carta elaborata dall'ARPA Lombardia, ovvero la zona preappenninica compresa nelle province di Bergamo e Brescia, nota per le formazioni ad alto contenuto di uranio.

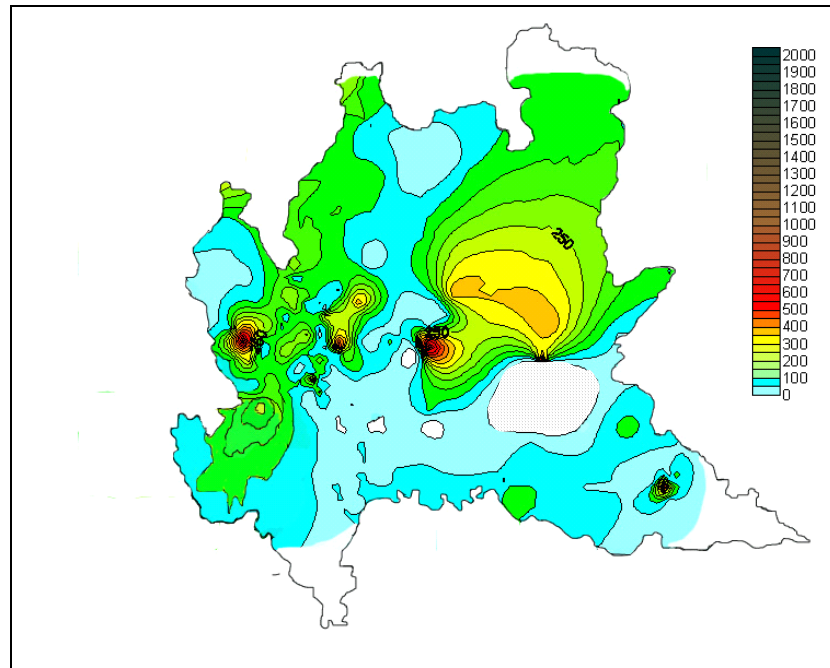


Figura 5.1: Carta di distribuzione delle concentrazioni medie di radon annuali (Bq/m^3) nella regione Lombardia

La carta elaborata dall'ARPA non ha evidenziato invece la possibilità di fenomeni di rilascio di radon nella fascia preappenninica occidentale e in particolare a nord della provincia di Milano, oltre ad aver considerato minimo il fattore di rilascio nella città di Milano. Questa differenza può essere ricondotta alla strategia di campionamento seguita dall'ARPA Lombardia nella cui indagine i campionamenti sono stati condotti in piani terra di edifici con cantina o vespaio. Nel presente lavoro i campionamenti sono invece stati condotti in piani sotterranei; ciò ha permesso di meglio individuare zone potenzialmente soggette all'accumulo di radon proveniente dal sottosuolo. Inoltre in città densamente sfruttate dal punto di vista edificativo come la città di Milano è importante non trascurare questa componente di maggior rischio.

I dati Arpa evidenziano anomale concentrazioni in alcune province che sono in accordo con le anomalie individuate in questo lavoro (Tab. 5.7).

PROVINCIA	% misure con valori inferiori a 200 Bq/m ³	% misure con valori tra 200 e 400 Bq/m ³	% misure con valori tra 400 e 800 Bq/m ³	% misure con valori maggiori di 800 Bq/m ³	n° punti indagati
BG	75.1	15.8	6.6	1.6	594
BS	82.8	11.7	4.3	0.5	809
CO	87.9	10.6	1.1	0.0	264
CR	100.0	0.0	0.0	0.0	150
LC	82.2	11.5	3.8	1.4	287
LO	100.0	0.0	0.0	0.0	87
MI	93.3	6.3	0.4	0.0	255
MN	98.7	1.3	0.0	0.0	150
PV	98.2	1.8	0.0	0.0	340
SO	70.6	20.7	7.3	1.4	425
VA	79.2	14.5	5.2	0.3	289
Totale Lombardia	84.5	11.1	3.7	0.6	3650

Tabella 5.7: Determinazione delle radon prone areas in Lombardia: distribuzione percentuale dei valori di concentrazione media annuale e distribuzione dei punti di misura nelle diverse province (De Bartolo et al., 2005).

Anche la regione Emilia Romagna attraverso l'ARPA regionale ha in corso un'indagine per valutare le radon prone areas. Nell'elaborazione iniziale delle carte sono stati utilizzati i dati ottenuti dalle indagini negli edifici scolastici e dall'Indagine Nazionale (Paragrafo 4.3).

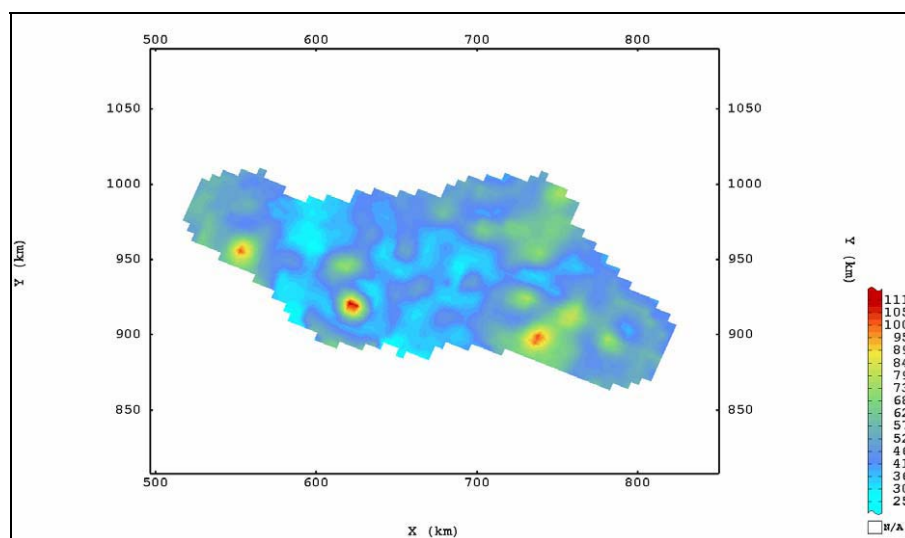


Figura 5.44: Carta ad isovalori dei livelli di radon indoor (Bq/m³) nella Regione Emilia Romagna ottenuta dall'ARPA (Bruno e Sgallari, 2007).

I risultati ottenuti dall'ARPA concordano con i risultati ottenuti dal presente lavoro di tesi, ovvero, anche se sostanzialmente la regione si può definire caratterizzata da basse concentrazioni di radon, si possono presentare degli "hot spot" di concentrazioni anomale nella zona pedemontana.

Per quanto riguarda la regione Toscana, l'ARPA ha avviato una nuova indagine che prevede campionamenti più fitti nelle zone considerate più a rischio sulla base di considerazioni geologiche ovvero nelle aree che sono state identificate anche nel presente lavoro di tesi.

La nuova campagna si basa inoltre sui risultati ottenuti nella precedente riportata in figura 5.45 in termini di percentuale di superamento del valore raccomandato per le abitazioni di 200 Bq/m^3 (Giannardi et al., 2001). La carta non sembra rilevare il possibile rischio derivante dalle strutture tettoniche presenti lungo l'Appennino tosco-emiliano.

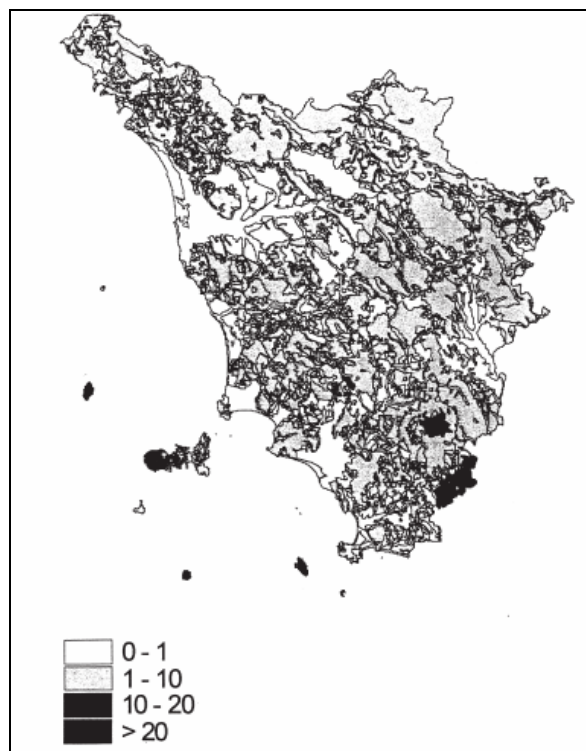


Figura 5.44: Toscana: percentuale stimata di superamento del livello di 200 Bq/m^3 nelle diverse unità litologiche (Giannardi et al., 2001).

Come detto sopra l'unico lavoro pubblicato dalla regione Puglia riassume i dati ottenuti dall'Indagine Nazionale dove sono state rilevati valori leggermente più alti nel leccese ma con valori mediamente più bassi e sempre al di sotto dei 400 Bq/m^3 , non facendo considerando quindi la zona del leccese soggetta a possibile alto rischio. Questo può essere anche conseguenza della metodologia di campionamento che era stata utilizzata nell'Indagine Nazionale.

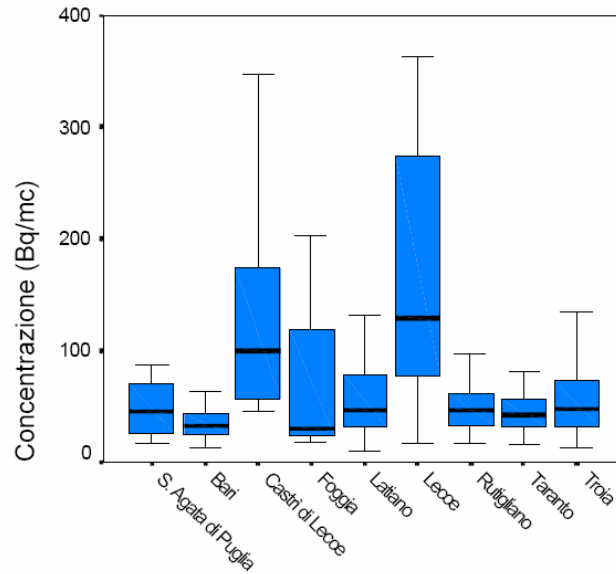


Figura 5.44: Concentrazione radon nel secondo semestre (Autunno-Inverno) tratto da Lattaruolo et al., ARPA Puglia.

Le concentrazioni riportate in figura 5.44 si riferiscono ai campionamenti nel semestre invernale, che dovrebbe rappresentare la condizione di massimo rischio.

5.4 Valutazione del comportamento radon in siti ad elevata concentrazione mediante campagne in continuo.

Al fine di indagare il comportamento del radon in ambienti indoor per capirne i meccanismi di accumulo e gli eventuali fattori orari e stagionali che ne influenzano la diffusione, in due fra i siti caratterizzati da concentrazioni particolarmente elevate sono state affiancati al monitoraggio con rivelatori passivi campionamenti di radon in continuo che permettono di valutare l'andamento orario delle concentrazioni. A questo scopo è stato utilizzato il monitore modello "Radon Scout" della Sarad messo a disposizione dalla società U-Series Srl e descritto nel paragrafo 2.3.

1) Campionamento in un edificio sito a Viterbo:

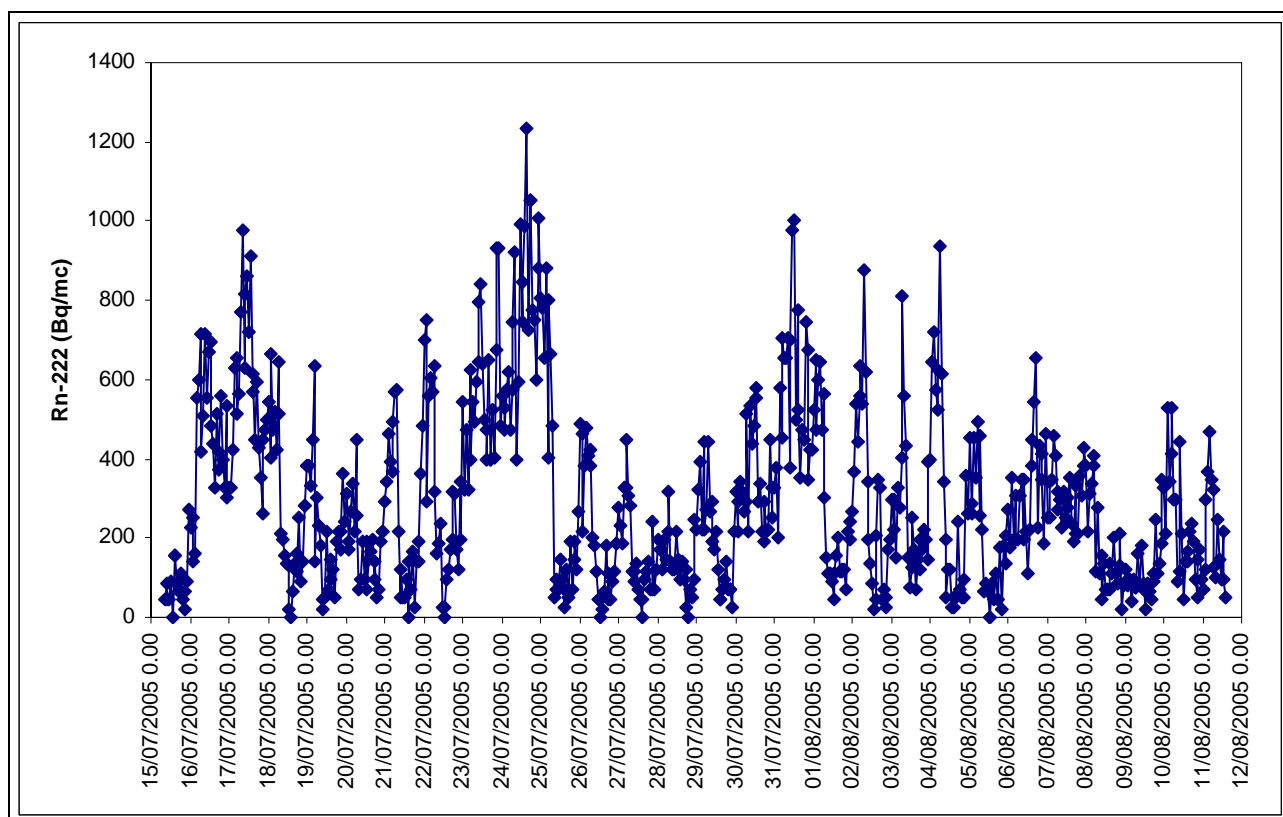


Figura 5.45: Campionamento orario della concentrazione di radon (Bq/m^3) con monitor in continuo in un sito di Viterbo.

Dall'analisi del campionamento condotto nel periodo 15 luglio – 12 agosto risulta innanzitutto presente una ciclicità nelle ore in cui la concentrazione rilevata (campionamenti orari) è mediamente più elevata, all'incirca superiore ai $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Analizzando questi periodi si è rilevato che le maggiori concentrazioni sono concentrate nei giorni 16-17 luglio, 23-24 luglio, 30-31 luglio, 7-8 agosto che corrispondono ai giorni di sabato e domenica. Le maggiori concentrazioni sono state quindi riscontrate quando i locali adibiti ad attività lavorativa sono chiusi e gli impianti di ventilazione spenti. Analizzando in dettaglio la figura 5.45 si nota come i picchi giornalieri siano prevalentemente concentrati tra le 0.00 e le 6.00 del mattino; il radon tende quindi ad accumularsi nelle ore notturne per poi diminuire all'entrata in funzione dei sistemi di ventilazione.

Per quanto riguarda l'accumulo del radon in ambienti indoor non è quindi trascurabile l'effetto antropico legato alla ventilazione forzata che in questo caso ha condotto a una diminuzione del rischio, con il passaggio da una concentrazione media di $297 \text{ Bq}/\text{m}^3$ a una di $126 \text{ Bq}/\text{m}^3$ se si considera il solo orario lavorativo.

2) Campionamento in edificio sito a nord di Lecce:

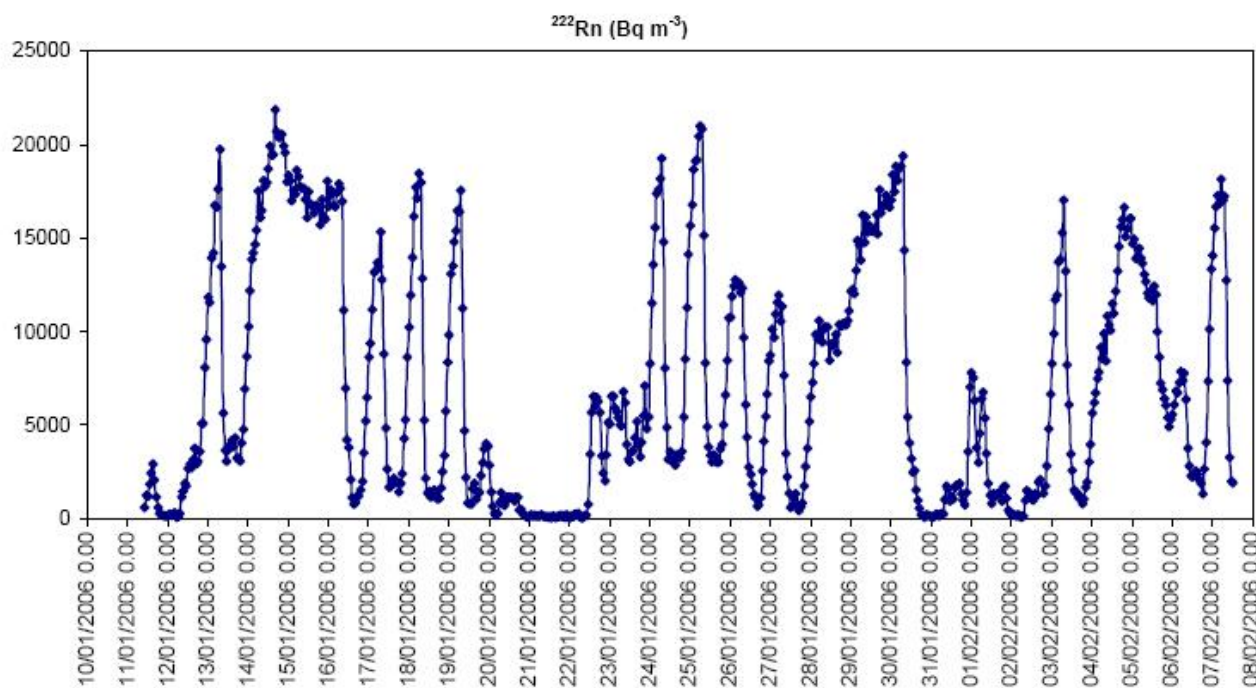


Figura 5.46: Campionamento orario della concentrazione di radon (Bq/m^3) con monitore in continuo in un sito a Nord di Lecce.

Dall'analisi del campionamento condotto nel periodo 10 gennaio – 08 febbraio risulta presente una ciclicità anche se non così evidente come nel caso precedente. Analizzando questi periodi si è rilevato che le maggiori concentrazioni sono presenti nei giorni 14-15 gennaio, 29-30 gennaio, 5-6 febbraio che corrispondono ai giorni di sabato e domenica, tranne nel caso di sabato e domenica 21-22 gennaio. Le maggiori concentrazioni sono state quindi riscontrate quando i locali adibiti ad attività lavorativa sono chiusi e gli impianti di ventilazione presenti spenti. Analizzando in dettaglio la figura 5.46 si nota come i picchi giornalieri siano prevalentemente concentrati tra le 0.00 e le 6.00 del mattino; anche in questo caso il radon tende quindi ad accumularsi nelle ore notturne per poi diminuire all'entrata in funzione dei sistemi di ventilazione, nello specifico la variazione giorno – notte delle concentrazioni è amplificata da effetti antropici.

Nel sito di studio le concentrazioni rilevate sono particolarmente elevate con picchi superiori ai 15000 Bq/m^3 e valori medi superiori ai 1000 Bq/m^3 anche durante l'orario lavorativo.

Nel periodo estivo (19 giugno – 6 luglio 2008) è stato condotto un campionamento analogo nello stesso sito di misura per valutare eventuali effetti stagionali; tuttavia nel frattempo erano state condotte azioni di rimedio al fine di bonificare l'ambiente che hanno reso inutilizzabili le misure acquisite.

Per la valutazione degli effetti antropici e per capire i meccanismi che regolano l'ingresso del radon in presenza di questi è utile l'utilizzo di un'opportuna camera radon descritta nel capitolo seguente. Si sottolinea che per l'identificazione delle aree a rischio non è opportuno tenere in considerazione l'eventuale diminuzione del rischio dovuto alla presenza di ventilazione forzata, in quanto in edifici abitativi di norma non è presente oppure potrebbe venir meno a causa di un non corretto funzionamento della ventilazione stessa; si è ritenuto quindi corretto condurre la campagna considerando concentrazioni medie giornaliere.

CAPITOLO 6: IMPORTANZA DELLE MISURE IN UN LABORATORIO CON CAMERA RADON

Nell'ambito di tesi è stato evidenziato in alcune aree il legame tra alte concentrazioni di radon negli ambienti indoor e la tipologia di sottosuolo, ma per meglio comprendere come il radon diffonde e si accumula negli ambienti chiusi si può studiare il suo comportamento in laboratorio mediante l'utilizzo di una camera radon in cui sia possibile controllare i parametri che lo influenzano. Nel capitolo verranno illustrate alcune delle problematiche affrontate nella progettazione di una camera radon, in fase di realizzazione nell'ambito di un progetto esecutivo della società U-Series Srl e alcune cooperative edificatrici dell'Emilia – Romagna.

6.1 Caratteristiche di una camera radon

Requisito indispensabile per valutare l'ingresso del radon dal sottosuolo ad un ambiente indoor è la conoscenza dei meccanismi che governano il trasporto, la diffusione e l'accumulo del radon in un ambiente chiuso. Diversi parametri influenzano la concentrazione del radon, in particolare la pressione, il volume e il rate di ventilazione dell'ambiente confinato in esame, l'umidità, la permeabilità dei materiali e alcune caratteristiche costruttive (Nazaroff and Nero, 1988). La dipendenza da questi numerosi fattori comporta che la prevedibilità del comportamento reale del radon in situ risulta particolarmente complessa, nonostante la conoscenza teorica dei meccanismi di produzione e trasporto del radon, e anche due edifici adiacenti possono essere caratterizzati da concentrazioni di radon molto diverse. Notevoli discrepanze sono state riscontrate tra misurazioni in campo e calcoli teorici (Andersen et al., 1994; Robinson et al., 1995) e i vari modelli sviluppati hanno mostrato delle limitazioni nei test in situ (Andersen, 2001). Allo scopo di capire il comportamento del radon negli ambienti indoor è quindi importante poter disporre in laboratorio di uno strumento, la camera radon, in cui è possibile controllare i singoli parametri che lo influenzano. L'aspetto più innovativo della camera di prova di questo tipo risiede proprio nella possibilità di controllare e modificare i flussi d'aria interni, di modificare il microclima, di utilizzare una sorgente esterna di radon in modo controllato e quindi nella possibilità di sperimentare le capacità assorbenti di alcuni materiali. L'obiettivo è inoltre quello di realizzare una camera sufficientemente grande per poter permettere di ricreare al suo interno delle condizioni del tutto simili a quelle reali, anche per quanto riguarda la posa di materiali costruttivi.

La camera radon inoltre può svolgere un'altra importante funzione, ovvero può essere utilizzata per valutare il contributo dei materiali da costruzione utilizzati nell'aumento della concentrazione di radon in ambienti indoor. L'UNSCEAR (2000) ha valutato questo contributo pari al 10 – 20% tra le possibili sorgenti di radon negli ambienti chiusi.

I materiali utilizzati in edilizia possono avere un contributo di radionuclidi naturali estremamente vario e potrebbe essere di grande interesse la realizzazione di una banca dati con i valori di emanazione per i materiali più comunemente utilizzati, in quanto mancano a livello nazionale dati sistematici sulle concentrazioni di radionuclidi e sulle quote d'uso dei diversi materiali: esistono soltanto indagini e studi effettuati per iniziativa di singoli enti o gruppi di ricerca. Riportiamo ad esempio il contenuto di radionuclidi Ra-226, Th-232 e K-40 nei materiali più utilizzati in edilizia (Risica et al., 1999 – Tab. 6.1).

Materiale da costruzione o additivo	²²⁶ Ra (Bq/kg)		²³² Th (Bq/kg)		⁴⁰ K (Bq/kg)	
	Media	Min-Max	Media	Min-Max	Media	Min-Max
Pozzolana	164	33 – 352	229	53 – 481	1341	374 – 2000
Ceneri volanti	160	130 – 170	130	100 – 150	420	330 – 470
Tufo	209	136 – 316	349	99 – 542	1861	1245 – 2335
Cemento	42	7 – 98	66	9 – 240	369	80 – 846
Calcestruzzo	22	21 – 23	16	16	237	253 – 290
Laterizi	29	0 – 67	26	3 – 51	711	198 – 1169
Piastrelle	43	31 – 55	36	18 – 56	689	474 – 1026
Sabbia	18	0 – 24	22	6 – 27	530	379 – 750
Ghiaia	15	11 – 21	14	13 – 16	157	100 – 248
Gesso	8	0 – 16	3	1 – 8	160	59 – 277
Calcare	12	12	1	1	5	5
Argilla	37	29 – 45	40	31 – 49	550	412 – 687
Marmo	4	1 – 13	1	0 – 3	8	0 – 30
Granito	89	24 – 378	94	36 – 358	1126	738 – 1560
Porfido	41	25 – 51	59	45 – 73	1388	114 – 1633
Peperino	159	109 – 256	171	152 – 231	1422	1312 – 1790

Tabella 6.1: Esempio di dati pubblicati di concentrazioni di radionuclidi in vari materiali da costruzione (Risica et al., 1999)

6.2 Progetto realizzato

Nell'ambito del presente lavoro sono state affrontate diverse problematiche legate alla fase di progettazione scientifica di una camera radon per studiarne i punti di forza e le debolezze.

Vengono qui riportati alcuni degli importanti parametri che sono stati studiati a livello progettuale:

- Dimensionamento della camera

Il dimensionamento della camera è un parametro molto importante in quanto molti esperimenti che possono essere condotti dipendono proprio da questo fattore, in particolare per studiare il comportamento dei figli del radon (frazione “attached” e “unattached”) responsabili dei danni alla salute delle persone esposte e il sinergismo con i fattori che ne influenzano il comportamento.

E' quindi stata progettata una camera di dimensioni calpestabili di volume pari 32 mc (dimensioni in pianta di 5,3 x 2,5 m e altezza di 2.9 m).

E' stato inoltre utilizzato per la camera un sistema modulare che permette di dividere l'ambiente di 32 mc in sottoambienti per valutare la diffusione in ambienti adiacenti e utilizzare vari moduli di mandata e ripresa dell'aria. Le dimensioni della camera rendono possibile l'inserimento contemporaneamente di più campioni costruttivi al suo interno e l'installazione di un generatore di aerosol per valutare la frazione “attached” dei figli del radon.

Come si può notare in figura 6.1 una camera di tali dimensioni permette di valutare anche l'esalazione di radon su materiali da costruzione già come se fossero in posa in un edificio, come si può notare da un esempio in figura 6.1, ma in una scala maggiore rispetto a quest'ultimo.



Figura 6.1: Esempio di camera radon per la misura di emanazione di radon in materiali da costruzione posati (camera radon, progetto ZEOGY-BOARD, Grecia, “Misure del rateo di esalazione del radon da zeoliti”).

- Isolamento e scelta dei materiali

Importante, sia ai fini di sicurezza nel caso si voglia ricreare un'atmosfera ad alte concentrazioni di radon sia nel caso si volessero valutare coefficienti di emanazione caratterizzati da valori molto bassi, è assicurare l'isolamento e la tenuta della camera.

Inoltre sempre ai fini di misure di bassa radioattività è importante la scelta del materiale utilizzato che deve avere bassissimi ratei di esalazione; per questo motivo si è subito esclusa la possibilità di utilizzo di parti in muratura. Si è deciso quindi di utilizzare per il rivestimento interno acciaio inossidabile AISI 304 dello spessore di 2 mm che impedisce ai prodotti di decadimento di "attaccarsi" alle pareti della camera. La camera è costituita da una struttura portante di tubolari e travi di lamiera piegata e rivestita internamente da fogli di lamiera di acciaio inox che sono stati anche testati per escludere contaminazioni con materiali radioattivi. La struttura presenta poi flange ermetiche per tenere la camera a tenuta. L'involucro così costituito è stato quindi coibentato mediante pannelli rigidi di polistirene espanso estruso per uno spessore di 10 cm. Il rivestimento esterno della camera è stato realizzato mediante una pannellatura di fogli di materiale plastico.

Le porte utilizzate per l'ingresso delle persone e del materiale e degli strumenti per la misura devono essere a tenuta stagna.

- Sistema di condizionamento e filtraggio:

Fornire la camera radon di un impianto di climatizzazione permette di controllare la circolazione dell'aria all'interno della camera e di regolare i parametri ambientali. L'impianto di climatizzazione potrà essere regolato a piacere rispetto all'ambiente esterno e controllato on-line. Un secondo sistema, indipendente dal primo, permette l'immissione in qualunque punto dell'ambiente di altri flussi di gas traccianti. In entrambi i modi è possibile identificare e visualizzare i percorsi dei filetti dell'aria all'interno della sala, e quindi rilevare la presenza di zone di ristagno dell'aria e le caratteristiche di diffusione di inquinanti per differenti tipologie impiantistiche e per differenti portate di aria esterna. Il sistema di immissione del gas Radon è costituito da una serie di sorgenti solide di Radio-226, genitore del Radon-222, ad attività nota e ad esalazione di gas nota; un sistema di misura della concentrazione del gas e dei suoi figli permetterà un controllo preciso e costante nel tempo della concentrazione del gas nella stanza. Dato l'elevato volume della camera, per le caratteristiche del gas stesso, in particolare alta densità e distanza media percorsa in atmosfera di circa 63 μm , è necessario uniformare l'atmosfera, in previsione anche dell'immissione di inquinanti, con dei ventilatori assiali posti sul fondo della camera che permettono un ricircolo forzato dell'aria senza creare turbolenze non corrispondenti a quelli presenti nella realtà. La possibilità di utilizzare ventilatori a velocità variabile può anche permettere di introdurre regimi turbolenti o laminari nelle correnti presenti nella camera per futuri studi di dispersione e

distribuzione dell'inquinante. L'impianto è stato progettato in modo tale per cui l'accensione di uno solo o di entrambi i ventilatori consente di tenere la camera in una situazione di sovrappressione, uguale pressione o depressione rispetto agli ambienti circostanti. E' stato previsto inoltre a monte del sistema di ingresso un sistema di generazione di polveri e aerosol con caratteristiche note. La peculiarità deve essere quella che non sia possibile un inquinamento delle atmosfere in nessun senso, né dalla camera verso il laboratorio né viceversa.

- Controllo dei parametri ambientali:

La diffusione del radon è fortemente influenzata dai parametri ambientali, quindi per studiarne il comportamento in ambienti indoor è molto importante mantenerne il controllo. La temperatura all'interno della camera Radon è regolata utilizzando un sistema di sonde termo-igrometriche con segnale on line ed una serie di sensori passivi che collezionano dati. Un umidificatore e un deumidificatore posti all'interno della camera permettono di modificare l'umidità relativa, con la possibilità di utilizzare i comandi in remoto. La temperatura può essere mantenuta tra i + 15 °C e + 40 °C con precisione $\pm 1^\circ\text{C}$, mentre l'umidità relativa può essere regolata tra il 15% ed il 95% ($\pm 2,5\%$), potendo così simulare le tipiche condizioni ambientali in ambienti chiusi.

6.3 Fase di realizzazione

Terminata la fase di progettazione della camera radon ideata al fine di investigare le possibili tecniche di controllo del radon e dei prodotti di decadimento del radon in ambienti indoor e per valutare l'emissione di radon dai geomateriali, la camera è ad oggi in fase di realizzazione.

La camera è essenzialmente costituita da

- sala di prova,
- filtro di accesso alla camera (Air Lock),
- sistema HVAC (Heat, Ventilation and air conditioning),
- sistema di controllo dei parametri termo-igrometrici,
- sistema di immissione di gas Radon e monitoraggio della sua concentrazione,
- sistema di ventilazione e omogeneizzazione dell'atmosfera interna.

Inizialmente per meglio comprendere le soluzioni da adottare per quanto riguarda il controllo dei parametri ambientali e di ventilazione è stata progettata e realizzata una camera radon di prova di dimensioni ridotte pari a circa 2 m³ (Fig. 6.2).



Figura 6.2: Camera di prova da 2 m³.

Inizialmente è stata realizzata la struttura portante in ferro, il rivestimento interno in acciaio AISI 304, le flange e la porta a tenuta stagna per garantire l’ermeticità della camera (Fig. 6.3).



Figura 6.3: Parete “destra” della camera radon

Il circuito di riscaldamento è stato installato mediante l’utilizzo di pannelli radianti a secco e con un proprio dispositivo di regolazione indipendente e sensori di temperatura.

In diversi punti della camera sono state predisposte una serie di flange per l’ingresso dei circuiti dell’impianto elettrico e dei sensori controllati da remoto per mantenere la tenuta e sul soffitto sono stati predisposti gli alloggiamenti per i circuiti (Fig. 6.4).



Figura 6.4: Posizionamento dei circuiti sopra al soffitto.

Si è svolta inoltre la procedura di controllo di composizione e tenuta della camera: mediante l'utilizzo di un sistema a gas traccianti sono state valutate le possibili perdite delle giunture dovute alla composizione architettonica della camera e tramite macchina termografica sono state valutate le eventuali perdite di calore e ponti termici nelle giunture.

Per l'assenza di saldature interne, la facilità di decontaminazione, la presenza di un polmone esterno per il ricambio dell'aria in condizioni quasi stazionarie, la possibilità di regolare finemente i principali parametri ambientali, la presenza di una pre-camera di ampio volume e la presenza di pannelli modulari che ne consentono l'espandibilità funzionale, una volta completata, la camera radon, che risulterà per dimensioni la più grande progettata in Italia, costituirà uno strumento unico di indagine e di misura utile a diversi fini; ad essa si potranno associare e sviluppare diverse tematiche, come la valutazione dell'esposizione legata all'emanazione di radon dai materiali da costruzione e l'individuazione e lo sviluppo di metodologie per l'abbattimento dell'inquinamento indoor.

CAPITOLO 7

DISCUSSIONE DEI DATI E CONCLUSIONI

I rischi sanitari connessi all'esposizione al radon hanno richiesto la definizione di piani di indagine a livello nazionale e regionale su cui basare lo sviluppo di politiche atte a prevenirne e diminuirne il rischio. In Italia la Direttiva 96/29/Euratom, in materia di radon, è stata recepita relativamente agli ambienti residenziali e di lavoro attraverso il Decreto Legislativo n. 241 del 26/05/2000, che fissa il livello d'azione (limite di esposizione) in termini di concentrazione media annuale in 500 Bq/m^3 per i luoghi di lavoro; mentre non è stata ancora licenziata una normativa che stabilisca per il territorio italiano i limiti di concentrazione nelle abitazioni. Per quanto riguarda le campagne di misura finalizzate alla stima del rischio a livello nazionale, l'unica indagine risale al periodo 1989 – 1998, realizzata da APAT (ora ISPRA), dall'Istituto Superiore di Sanità e dalle ARPA regionali, che ha fornito una valutazione su grande scala dell'esposizione al radon per la popolazione italiana. Questa indagine è stata condotta solo nei centri abitati senza tener conto delle caratteristiche edificative e delle geometrie degli edifici per cui è stato complesso comparare i dati ottenuti nei vari edifici essendo riferiti a piani e strutture diverse. In Italia solo alcune regioni, in adempimento del Decreto Legislativo n. 241 del 26/05/2000 hanno autonomamente avviato delle campagne per l'identificazione delle "radon prone areas" senza riferirsi ad un protocollo comune di analisi per cui ogni Regione ha definito criteri ed approcci autonomi che spesso sono risultati non confrontabili con quelli adottati dalle altre regioni. L'assenza di linee guida ha quindi comportato difficoltà nel confronto dei dati e una maggiore incertezza sulla definizione di una carta nazionale del rischio e quindi attualmente le classificazioni del rischio per esposizione a radon del territorio italiano possono essere considerate qualitative.

Il lavoro di tesi ha affrontato le problematiche di rilevamento del radon e i criteri di elaborazione dei dati. Le ricerche si sono focalizzate su: - definizione delle metodologie idonee per la misura in ambienti indoor e stesura di protocolli operativi per il monitoraggio, - standardizzazione delle misure e comparazione con altri laboratori europei, partecipando al progetto di interconfronto per la misura del radon organizzato dall'ente tedesco BfS (Bundesamt für Strahlenschutz), - verifica delle ricadute sul rilevamento di radon indoor delle fluttuazioni stagionali (inverno / anno solare), - comparazione del rilascio radon con la geologia delle macroaree individuate, - progettazione di una camera radon per la valutazione dei contributi antropici legati alle caratteristiche chimiche e

petrografiche dei materiali da costruzione sia naturali sia artificiali che possono presentare valori anomali di uranio, con un incremento del rischio intorno al 10-20% (UNSCEAR 2000).

Quest'ultimo punto è stato sviluppato progettando una camera radon, in fase di realizzazione presso i laboratori della società U-Series di Bologna, nell'ambito di un progetto sviluppato in collaborazione con alcune cooperative edili dell'Emilia Romagna. Per il progetto esecutivo è stato affrontato il dimensionamento, filtraggio, il controllo dei parametri ambientali e i materiali costruttivi idonei a isolare la camera radon dalle possibili sorgenti interne ed esterne.

Per quanto riguarda l'acquisizione ed elaborazione dei dati di questo studio è stato applicato l'approccio metodologico utilizzato negli ultimi anni a livello internazionale (Dubois et al., 2007; Zhu et al., 2001), ovvero sono state eseguiti campionamenti indoor utilizzando la strumentazione passiva validata tramite l'interconfronto suddetto; quindi i dati ottenuti sono stati restituiti in carte tematiche di distribuzione della concentrazione di radon tramite la georeferenziazione dei dati e l'elaborazione con tecniche geostatistiche, accompagnate da considerazioni geologiche per meglio definire le aree in questione. Infine la disponibilità di numerose analisi ha consentito approfondimenti nell'interpretazione dei dati per le regioni Lombardia, con i casi studio della Provincia di Milano e Milano città, l'Emilia Romagna, la Toscana e la Puglia.

Risultati del confronto fra il presente lavoro e la letteratura:

L' unica campagna nazionale di rilevamento radon (basato su un totale di 5361 misure distribuite sull'intero territorio nazionale – Bochicchio et al., 2005) è stata utilizzata per definire le regioni a rischio radon nonostante l'esiguità di dati disponibili soprattutto per alcune regioni, ciò in base alla considerazione che il rischio da esposizione è definito dal superamento di soglie limite e che quindi sono aree sensibili quelle in cui vengono riscontrati superamenti dei limiti. Nella redazione del lavoro suddetto il rischio è stato definito sulla base delle medie delle misure effettuate per ogni regione. Nel presente lavoro di tesi, pur avendo eseguito misure indoor in aree urbane come nell'Indagine Nazionale APAT, non parliamo di rischio ma esclusivamente di esposizione a radon. Il numero di misure eseguite per questo lavoro (5425) è statisticamente equivalente al numero di misure eseguite nell'Indagine Nazionale (5361) ed in entrambi i casi per 5 regioni il peso statistico delle misure è più significativo mentre per le altre il numero di misure è relativamente basso con due regioni in cui i dati sono inferiori a 30 nel rilevamento APAT e 3 nel rilevamento di questo studio. In tutte e due i lavori le misure riguardano centri abitati in quanto finalizzati a verificare i contributi indoor di esposizione della popolazione residente, dati che comunque forniscono elementi per considerazioni più generali e possibili correlazioni con fattori geologici, responsabili delle

anomalie geochimiche riscontrate. Per meglio comprendere le differenze fra il rilascio di radon definito dai dati di letteratura e quello da noi riscontrato, i dati di letteratura sono stati rielaborati in base alle caratteristiche degli ambienti monitorati, ed è emerso che l'Indagine Nazionale ha indagato solo l'1 % di ambienti sotterranei, il 20 % al 1° piano, il 39% al 2° piano e i restanti ai piani superiori; mentre per la campagna effettuata in questo lavoro (5425 misure) sono stati presi in considerazione solo ambienti sotterranei.

L'elaborazione dei dati prodotti in questo studio a livello regionale ha permesso di stilare un quadro generale della situazione in Italia e la riformulazione di una carta tematica di concentrazione media annuale di radon che per un confronto con la campagna Indagine Nazionale APAT è stata definita con gli stessi criteri. Si evidenzia che la campagna nazionale APAT ha prodotto una sottostima del rischio per alcune regioni italiane quale ad esempio la Puglia, essendo i nostri dati mediamente più alti, mentre per alcune regioni come Lombardia e Lazio, sono stati confermati i dati di concentrazione radon. Ad esempio nel caso della regione Puglia l'ampliamento delle aree rilevate hanno permesso di identificare anomalie locali (es provincia di Lecce) precedentemente non identificate in cui alte concentrazioni hanno fatto innalzare il valore della concentrazione media regionale.

In accordo con la letteratura (Sesana et al., 2003) che grazie al monitoraggio eseguito in esterno nella città di Milano dal 1997 al 2000 ha potuto evidenziare la maggiore concentrazione di radon nei periodi invernali (novembre, dicembre, gennaio), anche nel nostro caso i campionamenti condotti nel trimestre invernale hanno evidenziato concentrazioni medie maggiori rispetto alle medie relative all'intero anno (Figura 4.4); dato che non è da imputare esclusivamente all'accumulo del radon indoor e all'utilizzo dei locali che in inverno sono meno areati, ma anche alle condizioni meteorologiche del periodo invernale.

Rilascio Radon a scala regionale:

La carta di distribuzione delle concentrazioni indoor ottenuta per la Regione Lombardia ha evidenziato diverse aree a rischio, dovute a fattori geologici che tengono conto della eterogeneità geologica dell'area in esame. In particolare le concentrazioni più elevate in cui si hanno superamenti del limite di 200 Bq/m^3 sono concentrate in alcuni settori dell'area nord-orientale della regione Lombardia, in accordo con i risultati della campagna condotta dall'ARPA regionale eseguita nel periodo 2003 – 2005. L'analisi geologica ha permesso di ipotizzare che le anomalie riscontrate possono essere legate all'alto contenuto di uranio, progenitore del radon, in alcune rocce

nell'area in questione, ed in particolare alla presenza nel territorio di Novazza (BG) del più importante giacimento di uranio italiano. Concentrazioni leggermente superiori alla media sono state riscontrate anche nelle zone facenti parte della "Serie dei Laghi". Tutte queste zone montane in seguito all'erosione glaciale e fluviale hanno alimentato con litologie che possono essere arricchite in uranio (scisti neri bituminosi, vulcaniti acide, leuco-graniti) i sedimenti alluvionali, aumentandone il fondo radioattivo. Occorre evidenziare che la campagna condotta dall'ARPA ha interessato ambienti ubicati al piano terra, ovvero in ambienti meno esposti ad accumulo radon rispetto a quelli sotterranei oggetto della nostra indagine, questo particolare rilevante spiega perché noi abbiamo riscontrato concentrazioni mediamente più elevate, ma con una distribuzione spaziale comparabile come evidenziato precedentemente nella tabella 5.7. I nostri dati hanno evidenziato elevate concentrazioni nella zona a Nord della Provincia di Milano e a Nord e Nord-Ovest di Milano città. Per valutare se le anomalie riscontrate avessero significato statistico è stata programmata una campionatura in pozzetti fognari (dati trattati separatamente non elaborati nelle carte di distribuzione in quanto acquisiti in condizioni diverse) attraverso la quale sono state confermate concentrazioni anomale distribuite coerentemente con i dati delle misure indoor eseguite per questo lavoro. Lo studio geologico della zona con l'ausilio in particolare degli studi stratigrafici condotti dalla Provincia di Milano ha messo in evidenza come il sottosuolo della provincia di Milano sia caratterizzato da rocce sedimentarie di origine terrigena prevalentemente ghiaiosa che contengono intercalazioni limoso - sabbiose - torbose. La forte eterogeneità del sottosuolo rende difficile e complessa l'identificazione delle aree a maggior rischio di rilascio radon ma permette comunque di formulare ipotesi sull'origine delle anomalie di rilascio radon. I sedimenti fluviali recenti poggiano su una sequenza glaciale e fluvio - lacustre ghiaioso - sabbiosa altamente permeabile con intercalazioni di argille e/o argille siltose che essendo queste ultime associate ad ambiente palustri segnalano locali condizioni anossiche riducenti. I depositi argillosi lacustri (piccoli laghi intramorenici) grazie ai processi di riduzione possono essere stati sede di deposizione di livelli arricchiti in uranio. L'elevata permeabilità delle ghiaie che intrappolano le intercalazioni argillose ricche in torba consente la rapida migrazione del radon da essi rilasciato verso la superficie, per cui possono risultare locali anomalie di rilascio del gas radioattivo e quindi rappresentare un'importante sorgente di gas radon.

I dati stratigrafici hanno permesso di osservare una buona correlazione fra gli spessori dei livelli di argille di ambiente riducente, la prossimità di questi livelli alla superficie e le zone in cui abbiamo riscontrato un' elevata concentrazione di radon. Questo dato ad oggi qualitativo dovrà essere

confermato da studi di maggior dettaglio ma comunque è sufficiente a supportare l'ipotesi che proprio questi terreni possano essere la sorgente delle alte concentrazioni rilevate non solo nelle aree montane ma anche a spot nella pianura alluvionale. Il rilascio di radon può essere amplificato dalla presenza di sottoservizi e da strutture sotterranee dovute alle antropizzazioni comuni nel territorio urbano della città di Milano, fattori che possono portare alle concentrazioni superiori a 1000 Bq/m³ riscontrate in questo lavoro ad esempio in alcuni pozzetti fognari.

Infine occorre far presente che la città di Milano è risultata nell'ambito del progetto MINNI del Ministero dell'ambiente per il monitoraggio dell'aria, la città a più elevata concentrazione di particolato solido aereodisperso d'Italia, condizioni che sono dovute non solo al rilascio di inquinanti ma anche alle negative condizioni atmosferiche, alcuni studi specifici (Vecchi et al., 2007) hanno evidenziato che le condizioni atmosferiche negative impediscono anche la dispersione del radon, per cui la presenza di aree ad elevata concentrazione spesso puntiforme soprattutto nei quadranti Nord della città di Milano possono produrre condizioni estremamente sfavorevoli per la salute dell'uomo.

I numerosi dati relativi alla Regione Emilia-Romagna hanno consentito di confermare che generalmente si hanno basse concentrazioni di radon ad eccezione di "hot spot" ubicati preferenzialmente nella transizione fra l'area collinare e la pianura alluvionale. Dalla carta di distribuzione realizzata si rilevano anomalie nella pianura piacentina ed in particolare nelle zone pedemontane in accordo con i dati dell'analisi condotta dall'ARPA Emilia Romagna. Le basse concentrazioni delle aree alluvionali ed in particolare della pianura ferrarese sono dovuti alla generale presenza di depositi alluvionali a granulometria fine che non permettono la rapida risalita del gas radon, che come è noto ha un breve periodo di dimezzamento (3,8 giorni), risalita possibile solo dove importanti strutture tettoniche interrompono i livelli poco permeabili. Non a caso le aree a maggior rilascio di radon coincidono con le aree a maggiore sismicità. Quindi il rilascio di radon segnala sistemi più o meno importanti di fratturazione e faglie che favoriscono la risalita del gas dagli strati più profondi, aree che spesso coincidono con le zone termali o ad anomalia geotermica. Una delle aree anomale è coincidente con le manifestazioni idrotermali di Bagno di Romagna, in cui si ha risalita veloce delle acque che può essere accompagnata da quella del radon.

La distribuzione della concentrazione di radon nella Regione Toscana ha evidenziato due aree ad alte concentrazioni di radon, una nell'Appennino settentrionale che è in continuità con la zona appenninica emiliana-romagnola che rappresenta l'estensione in Toscana delle problematiche di rilascio radon associato alle connessioni con strutture tettoniche ed aree idrotermali e una seconda

area della Toscana meridionale che coincide con la zona del magmatismo toscano-laziale, questa ultima caratterizzata da prodotti magmatici differenziati in cui si hanno concentrazioni di uranio particolarmente elevate. Questi prodotti vulcanici definiscono un'area interregionale denominata nella letteratura geologica area del magmatismo toscano-laziale, in cui valori particolarmente elevati di concentrazione radon sono stati riscontrati nella zona del viterbese.

Infine per quanto riguarda le concentrazioni di radon nella Regione Puglia, valori anomali sono stati localizzati prevalentemente nel settore nord della provincia di Lecce. Le litologie associate alle anomalie sono rocce di piattaforma carbonatica corrispondenti a paleobacini lagunari di ambiente riducente. I rilasci di elevate concentrazioni da un'indagine in situ sono risultati associati non solo al grado di arricchimento in uranio delle rocce sorgenti ma anche a fattori naturali ed antropici locali quali ad esempio la presenza di cavità sotterranee, dovute nel caso delle cause naturali ai fenomeni localizzati di carsismo favoriti da fessurazioni e fratturazioni (carsismo) e nel caso di fattori antropici a sbancamenti effettuati per ricavare ambienti sotterranei, soprattutto posti auto e cantine. Queste cavità possono, infatti, portare alla presenza di "hot spot" di incremento delle concentrazioni di radon in ambienti indoor.

La presenza di ambienti sotterranei con forti anomalie di concentrazioni di radon ci ha indotti a eseguire in due aree test una campagna di campionamento in continuo. Tale indagine ha evidenziato forti fluttuazioni del radon fra le giornate lavorative e quelle festive mettendo in luce la possibilità di incidere sul rilascio radon con un controllo della ventilazione, dato di cui occorrerà tener conto nei piani di abbattimento delle concentrazioni radon.

L'applicazione della metodologia sviluppata per l'individuazione di aree ad alte concentrazioni di radon potrà essere utilizzata per l'adozione di azioni di rimedio mirate e per fornire suggerimenti utili a colmare le lacune della normativa nazionale o ai fini della stesura di piani edilizi, in particolare in zone fortemente antropizzate dove anche il sottosuolo viene ampiamente sfruttato.

BIBLIOGRAFIA

- Åkerblom G and Mellander H, 1997: Geology and radon. In Radon Measurements by Etched Track Detectors. Ed. Durrani S and Ilić R. World Scientific. pp. 21-49.
- Arrigoni et al., “Radon gas monitoring survey for the determination of Radon Prone Areas in Lombardia” – ARPA Lombardia, http://ita.arpalombardia.it/ITA/area_download
- Balestrieri M.L., M. Bernet, M.T. Brandon, V. Picotti, P. Reiners, M. Zattin (2003) Pliocene and Pleistocene exhumation and uplift of two key areas of the Northern Apennines, *Quaternary International* 101–102: 67–73.
- Baysson H., S. Billon, D. Laurier, A. Rogel and M. Tirmarche (2003) Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France, *Radiation Protection Dosimetry* 104:245-252.
- Beaubien S.E., G. Ciotoli, S. Lombardi (2003) Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123: 63-80.
- BEIR VI (Committee on Health Risks of Exposure to Radon – National Research Council) Health Effects of Exposure to Radon. National Academy Press, Washington, D.C., 1999.
- Bianchini G., L. Beccaluva, F. Siena (2008) “Post-collisional and intraplate Cenozoic volcanism in the rifted Apennines/Adriatic domain”, *Lithos* 101: 125–140.
- Bochicchio F., G. Campos-Venuti, S. Piermattei, C. Nuccetelli, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri, M. Magnoni, G. Agnesod, G. Sgorbati, M. Bonomi, L. Minach, F. Trotti, M.R. Malisan, S. Maggiolo, L. Gaidolfi, C. Giannardi, A. Rongoni, M. Lombardi, G. Cherubini, S. D’Ostilio, C. Cristofaro, M. Pugliese, V. Martucci, A. Crispino, P. Cuzzocrea, A. Sansone Santamaria, M. Cappai (2005) Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions, *Radiation Measurements* 40, 686 – 694.
- Boriani A, Origoni Giobbi E, Borghi A, Caironi V (1990) The evolution of the “Serie dei Laghi” (Strona-Ceneri and Scisti dei Laghi): the upper component of the Ivrea-Verbanò crustal section; Southern Alps, North Italy and Ticino, Switzerland. *Tectonophysics* 182: 103–118.
- Bossew, P and Lettner, H. (2007) Investigations on Indoor Radon in Austria, Part 1: Seasonality of Indoor Radon Concentration, *Journal of Environmental Radioactivity*, 98: 329-345.
- Bossew, P., Dubois, G., Tollefsen, T. (2008). Investigations on Indoor Radon in Austria, Part 2: Geological classes as categorical external drift for spatial modelling of the radon potential. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99: 81-97.
- Brogna Anna, Santo La Delfa, Viviana La Monaca, Salvatore Lo Nigro, Daniela Morelli, Giuseppe Patane', Giovanni Tringali (2007) Measurements of indoor radon concentration on the south-eastern flank of Mount Etna volcano (Southern Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 165: 71–75.

- Carta Geologica della Toscana (Direzione generale delle politiche territoriali e ambientali – Servizio Geologico, Regione Toscana), 2004.
- Ciaranfi N. Pieri P. Ricchetti G. (1988), "Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centromeridionale)". Mem. Soc. Geol. It., Vol. 41, pp. 449 - 460.
- Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome di Trento e Bolzano, "Linee guida per le misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei", 1993.
- Conticelli S., D'Antonio M., Pinarelli L. e Civetta L. (2002) "Source contamination and mantle heterogeneity in the genesis of Italian potassic and ultrapotassic volcanic rocks: Sr – Nd – Pb isotope data from Roman Province and Southern Tuscany, *Mineralogy and Petrology* 74: 189-222.
- De Bartolo D., Alberici A., Gallini R., Maggioni T., Arrigoni S., Cazzaniga P., Cugini A., Olivieri F., Romanelli M., Gallinari G., Piano di monitoraggio per l'individuazione delle radon prone areas nella regione Lombardia, AIRP Convegno Nazionale di Radioprotezione, Catania 15-17 sett. 2005.
- Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230 "Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti". Gazzetta Ufficiale n. 136 Suppl. Ordinario, 13 giugno 1995.
- Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241 "Attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti". Gazzetta Ufficiale n. 203 Suppl. Ordinario, 31 agosto 2000.
- Dubois, G., Bossew, P., Friedmann, H. (2007). A geostatistical autopsy of the Austrian indoor radon survey (1992-2002). *Science of the Total Environment*, 377: 378-395.
- Durrani S.A. e R. Radomir Ilic, "Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment", World Scientific, Singapore (1997).
- Elmi C. E R. Zecchi (1982), Note sulle sismicità del Pedepennino emiliano-romagnolo. In: G. Cremonini, e Lucchi: Guida alla geologia del margine appenninico-padano, 201-204, Guida Geol. Reg. S.G.I. Bologna.
- ENEA, Evaluation of gamma and alpha doses due to natural radioactivity of building materials, volume ISSN/1120-5563, 1993.
- ERRICCA2 – "An Evaluation of Radon Mapping Techniques in Europe" (2005)
- 90/143/Euratom: Raccomandazione della commissione, del 21 febbraio 1990, sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti chiusi, Gazzetta Ufficiale n. L 080 del 27.03.1990 (pag. 0026 - 0028).
- Facchini U., Gianluigi Valli, R. Vecchi "Il Radon nella Casa" - Ist. di Fisica Gen. Applicata - Università di Milano - Maggio 1999.
- Gaidolfi L., Sogni R., L'individuazione delle aree ad alto rischio radon: l'esperienza in corso nella regione Emilia – Romagna, ARPA Piacenza.

- Gaidolfi L., Malisan M.R., Bucci S., Cappai M., Bonomi M., Verdi L., Bochicchio F., Radon measurement in kindergardens and schools of six Italian regions, *Radiat. Prot. Dosim.* 78(1): 73-76, 1998.
- <http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon.html>
- “Geografia e numeri della Regione Lombardia” (2003) Regione Lombardia – Territorio e urbanistica.
- Giannardi C., F. Giovannini, S. Bucci, S. Gambi, F. Trotti, E. Caldognetto, G. Fusato, In progress identification of radon prone areas: Toscana and Veneto, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 97, No 4, pp. 349–354 (2001).
- Iakovleva V. S., Ryzhakova N. K. (2003) Spatial and temporal variations of radon concentration in soil air, *Radiation Measurements* Vol. 36, 1-6: 385-388.
- “Interlaboratory Intercomparison 2008 Report” - BfS (German Federal Office for Radiation Protection).
- Junge C.E. (1963) *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press.
- Lattarulo et al., Indagine radon nelle abitazioni della Regione Puglia, ARPA Puglia
- Miles J.C.H. e Appleton J.D., Mapping variation in radon potential both between and within geological units, *J. Radiol. Prot.* 25 (2005) 257–276.
- Moroni M., “Il radon nella pianificazione territoriale”, convegno INPUT, Politecnico di Bari, 27-29 giugno 2001.
- Nazaroff W.W., Nero A.V.Jr. *Radon and its decay products in indoor air*. Wiley Interscience, New York (1988).
- Nikezic D. e Yu K.N. (2004) Formation and growth of tracks in nuclear track materials, *Materials Science and Engineering R* 46, 51–123.
- Oliver M.A e A.L. Khayratb (2001) A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil, *Computers & Geosciences* 27: 939–957.
- Papastefanou C. (2002) An overview of instrumentantion for measuring radon in soil gas and groundwaters, *Journal of Environmental Radioactivity* 63, 271–283.
- Perini G., Tepley III F.G., Davidson J.P., Conticelli S. (2003) The origin of K-feldspar megacrysts hosted in alkaline potassic rocks from central Italy: a track for low-pressure processes in mafic magmas, *Lithos* 66: 223– 240.
- Perini Giulia, Sandro Conticelli, Lorella Francalanci, Jon P. Davidson (2000) “The relationship between potassic and calc-alkaline post-orogenic magmatism at Vico volcano, central Italy”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 95_2000.247–272.

- Pinarelli L., M. A. Bergomi, A. Boriani, E. Giobbi (2008) Pre-metamorphic melt infiltration in metasediments: geochemical, isotopic (Sr, Nd, and Pb), and field evidence from Serie dei Laghi (Southern Alps, Italy), *Mineral Petrol* 93: 213–242.
- Pinel J., T. Fearn, S.C. Darby and J.C.H. Miles (1995) Seasonal Correction Factors for Indoor Radon Measurements in the United Kingdom, *Radiation Protection Dosimetry*, 58:127-132.
- PNR – Piano Nazionale Radon, Ministero della Salute (2002).
- Provincia di Milano – Assessorato all’Ambiente “Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano”, 1995.
- Quindo’s Poncela L.S., P.L. Fernánde z, J. Go´mez Arozamena, C. Sainz, J.A. Fernánde z, E. Suarez Mahou, J.L. Martin Matarranz, M.C. Casco´n (2004), Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain, *Environment International* 29: 1091– 1096.
- Raspa, 1995, “Dispense di geostatistica applicata”, corso di laurea in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio, Facoltà di Ingegneria dell’Università di Roma “La Sapienza”.
- Regione Lombardia – D.G. Territorio e Urbanistica, “Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia”, 2002.
- S. Risica et al., Radioactivity in building materials: experimental methods, calculations and an overview of the italian situation, in *Radon in the Living Environment*, Atene, 1999.
- Rogers V.C., Nielson K.K., Multiphase Radon Generation and transport in porous materials, *Health Physics*, Vol.60. No.6, pp.807-815,1991.
- Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia Romagna, “Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna”: http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/acque/rel_scientif/riserve_idriche_sotterr_01.htm.
- Sesana, L., Caprioli, E., Marcazzan, G.M. (2003) Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *J. Environ. Radioact.* 65, 147-160.
- Tesi di dottorato “Sviluppo di metodologie per lo studio di aree a rischio radon”, Mattia Taroni, 2008.
- Tommasino L. (1998). Radon, *Encyclopedia of Analytical Science*, pp. 4359-4368.
- UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. Report to the general assembly, with annexes, 2000.
- Vecchi R., G. Marcazzan, G. Valli (2007) A study on nighttime-daytime PM10 concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of Milan (Italy), *Atmospheric Environment* 41, 2136 – 2144.

- Zhu H.-C., Charlet J.M., Tondeur F.. Mapping indoor radon using geostatistical approach. In: Barnett I, Neznal M, editors. Proc. Radon Investigations in the Czech Republic VI and 3rd Int. Workshop on Geological Aspects of Radon Risk Mapping. Czech Geological Survey & Radon corp., 1996b:51_61.
- Zhu, H. C., Charlet, J. M. and Poffijn, A., 2001, Radon risk mapping in southern Belgium: an application of geostatistical and GIS techniques: The Science for Total Environment n°272, p. 203-210.
- Zuffardi, “Giacimentologia e prospezione mineraria”, Pitagora Editrice Bologna, 1982.
- www.epa.gov/radon

RINGRAZIAMENTI

Il miei più sentiti ringraziamenti alle persone che hanno reso possibile la realizzazione di questo lavoro, ovvero la mia tutor Prof.ssa Carmela Vaccaro, il mio co-tutore Dott. Paolo Bartolomei e l'Ing. Massimo Esposito della U-Series Srl.

Un ringraziamento a tutti i colleghi della U-Series, in particolare a Mattia per il supporto tecnico nella realizzazione delle carte.

Un speciale ringraziamento per il “supporto” morale in questi tre anni ai miei genitori e a Marco.