

# Valutazione delle concentrazioni di radon nel settore bancario: risultati di una indagine condotta in un gruppo bancario di rilevanza nazionale

PATRIZIA URSO, M. RONCHIN, BARBARA LIETTI\*, A. IZZO\*\*, G. COLLOCA\*\*, D. RUSSIGNAGA\*\*, P. CARRER

Dipartimento di Medicina del Lavoro, Ospedale "L. Sacco", Università degli Studi di Milano

\* Centro Internazionale per gli Antiparassitari e la Prevenzione Sanitaria, Azienda Ospedaliera "L. Sacco", Milano

\*\* Gruppo Intesa Sanpaolo, Servizio di Prevenzione e Protezione - Italia

## KEY WORDS

Radon; bank buildings; explanatory factors

## SUMMARY

**«Evaluation of radon levels in bank buildings: results of a survey on a major Italian banking group».** **Background:** Radon, the second cause of lung cancer after smoking, is a natural, radioactive gas, which originates from the soil and pollutes indoor air, especially in closed or underground spaces. Italian legislation recommends an action level of 500 Bq/m<sup>3</sup> per year for occupational exposure in underground premises. **Objectives:** Since banks usually use various underground premises (archives, safe-deposit room), a study was made of the radon levels on such premises with the aim of identifying useful monitoring strategies. **Methods:** 134 branches of a major Italian banking group were examined using 1817 nuclear track dosimeters at ground level and underground level premises. The branches were located in 7 Italian regions in the north (Piedmont, Lombardy, Veneto), centre (Lazio) and south (Campania, Apulia, Sicily). Information on measurement points was recorded in a technical sheet and statistical analysis was carried out. **Results:** Annual underground measurements gave an average concentration of 157 Bq/m<sup>3</sup>, with 5,1% for 400 < C < 500 Bq/m<sup>3</sup> and 2,9% for C > 500 Bq/m<sup>3</sup>. Seasonal variability was reflected in a significant decrease in concentrations between winter and spring ( $\Delta_{\text{mean}}\% = -47,3\%$ ) and good stability between autumn and winter ( $\Delta_{\text{mean}}\% = 3\%$ ); moreover quarterly concentrations account for 85% of the variability of the corresponding annual level. A multiple linear regression model ( $R^2 = 0,33$ ) indicated geographic location as the principal factor in radon accumulation, followed by underground level, humidity, use, lack of windows, heating and natural ventilation, and direct contact of at least one wall with ground rock; whereas the safe-deposit room structure seems to protect from radon accumulation. Moreover, the ground level measurement results were significantly associated with the corresponding underground average concentrations ( $p < 0,001$ ). **Conclusions:** The results could be a useful tool in planning a monitoring strategy for assessment of bank worker exposure, especially for banking groups with a large number of branches.

## RIASSUNTO

Il radon è un gas naturale radioattivo, proveniente dal sottosuolo e da alcuni materiali da costruzione, che si concentra nell'aria indoor, soprattutto in locali interrati e privi di aerazione. Esso è attualmente considerato il secondo fattore di rischio di neoplasia polmonare dopo il fumo di sigaretta e la legislazione italiana ne richiede la valutazione

Pervenuto il 7.1.2008 - Accettato il 6.3.2008

Corrispondenza: Dr.ssa Patrizia Urso, Dipartimento di Medicina del Lavoro, Azienda Ospedaliera "L. Sacco", Università degli Studi di Milano, Via G.B. Grassi 74, 20157 Milano - E-mail: patrizia.urso@unimi.it

*dell'esposizione, per i lavoratori addetti ad attività svolte in ambienti sotterranei, indicando il valore di 500 Bq/m<sup>3</sup> per anno come livello di azione. Le banche, caratterizzate da locali interrati generalmente destinati ad archivio e conservazione di beni preziosi, sono stati oggetto del presente studio, svolto in collaborazione con un gruppo bancario di rilevanza nazionale, al fine di analizzare il fenomeno dell'accumulo del radon negli edifici bancari e di orientare le successive strategie di monitoraggio. Le misure sono state eseguite in 134 filiali distribuite in 7 regioni italiane con 1817 dosimetri a traccia nucleare, di cui 473 in acquisizione annuale ai piani sotterranei. Queste ultime hanno fornito un valore medio di concentrazione pari a 157 Bq/m<sup>3</sup>, con il 5% compreso tra i 400 e i 500 Bq/m<sup>3</sup> e il 3% superiore ai 500 Bq/m<sup>3</sup>. L'analisi dell'andamento dei livelli di radon in relazione alla variabilità stagionale ha evidenziato concentrazioni maggiori nei mesi freddi dell'anno, con un decremento molto marcato nel passaggio tra l'inverno e la primavera ( $\Delta_{medio}\%=-47,3\%$ ) e trascurabile tra i trimestri freddi ( $\Delta_{medio}\%=3\%$ ); inoltre la variabilità della concentrazione annuale risulta riconducibile ai corrispondenti 4 trimestri per l'85%. Lo studio di un modello di regressione lineare multipla ( $R^2=0,33$ ) ha permesso di riconoscere nella posizione geografica il fattore principale per l'accumulo del radon, seguita poi dalla posizione del locale al sotterraneo, dalla destinazione d'uso, dall'assenza di finestre apribili, di riscaldamento, di ventilazione naturale, dalla presenza di condensa e dal contatto diretto di almeno una parete col terreno, mentre sembra influire negativamente il contatto delle pareti con il caveau. Focalizzando l'attenzione alle misure al piano terra si evidenzia inoltre una dipendenza significativa dalla concentrazione media del piano sottostante ( $p<0,001$ ). Gli uffici risultano i locali meno soggetti all'accumulo del radon e, fra i locali privi di postazione fissa, il caveau appare il più isolato rispetto all'ingresso del gas radioattivo, giocando inoltre un ruolo protettivo per un locale ad esso adiacente. I risultati ottenuti potranno essere utilizzati per pianificare la valutazione dell'esposizione dei lavoratori, soprattutto per gruppi bancari con un elevato numero di filiali.*

## INTRODUZIONE

### Aspetti generali

Il radon (Rn-222) è un gas naturale radioattivo, chimicamente inerte, derivante dal decadimento dell'uranio (U-238); quest'ultimo elemento, diffuso ubiquitariamente nella crosta terrestre, è maggiormente presente in alcuni materiali come tufo, pozzolana, lave e alcuni graniti.

Il radon, provenendo dalle rocce del sottosuolo, può facilmente infiltrarsi all'interno degli edifici, dove può accumularsi, in particolare nei locali sotterranei, spesso a contatto col terreno e poco aerati.

Il radon penetra negli edifici soprattutto per convezione termica sfruttando crepe, fessure, aperture tecniche; alcuni materiali da costruzione degli edifici, inoltre, possono essere una fonte di rilascio nell'ambiente.

Le concentrazioni di radon all'interno di un edificio possono dipendere in modo rilevante anche da altri fattori come l'andamento temporale della temperatura e della pressione atmosferica, ed in particolare il loro rapporto tra ambiente interno ed

esterno, e le caratteristiche di ventilazione naturale e/o forzata di ogni singolo locale.

La recente introduzione delle misure di risparmio energetico, inoltre, può aver determinato, soprattutto nei mesi freddi, un possibile aumento delle concentrazioni di radon indoor.

Tutti i fattori descritti determinano una grande variabilità delle concentrazioni di radon presenti all'interno di edifici diversi ubicati in aree geograficamente limitrofe e anche tra locali diversi dello stesso edificio, soprattutto in relazione alle diverse condizioni di utilizzo.

### Aspetti legislativi

La norma di riferimento è il 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), che introduce il tema dell'esposizione dei lavoratori a sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti; in particolare il Decreto individua le attività lavorative di interesse, richiede la valutazione dell'esposizione al ra-

don, indicandone i tempi di attuazione, e fissa un livello di azione per gli ambienti di lavoro pari a una concentrazione di radon di 500 Bq/m<sup>3</sup>.

Il Decreto indica la misura della concentrazione di radon nei locali sotterranei espressa come media annuale, la necessità di attivare azioni di rimedio, organizzative e/o strutturali, al superamento del valore d'azione (500 Bq/m<sup>3</sup>), e la ripetizione della misura entro un anno al superamento della concentrazione di 400 Bq/m<sup>3</sup>.

Relativamente all'esposizione in ambito residenziale occorre segnalare la raccomandazione della Comunità Europea n. 90/143/EURATOM "Sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon in ambienti chiusi", finalizzata a sensibilizzare gli Stati membri e a promuovere l'attuazione di provvedimenti che riducano l'esposizione della popolazione generale. La raccomandazione individua livelli di riferimento e livelli di progetto di 400 Bq/m<sup>3</sup> e 200 Bq/m<sup>3</sup> per decidere azioni di rimedio rispettivamente nelle abitazioni esistenti e di nuova costruzione.

L'importanza di intervenire negli ambiti residenziali venne ripresa dal Piano Sanitario Nazionale 1998/2000, approvato con DPR 23.7.98 (31), che individua tra gli obiettivi di salute il miglioramento del contesto ambientale prevedendo in particolare tra "gli obiettivi, realisticamente perseguibili nel contesto italiano, la riduzione del rischio di tumore polmonare derivante dall'esposizione a radon mediante la riduzione della sua concentrazione nelle abitazioni ed in altri luoghi chiusi".

Il Piano Sanitario Nazionale 2006/2008 (32), nel capitolo "Ambiente e salute", torna ad affrontare l'argomento indicando come "In analogia ad altri paesi europei, è necessario attuare un programma d'interventi a scala nazionale per ridurre l'esposizione al radon negli ambienti confinati" prevedendo anche "norme costruttive specifiche anti-radon per le nuove costruzioni".

Si segnala infine l'esperienza della Regione Veneto che, con Delibera della Giunta Regionale N. 79 del 18/01/2002 (18), ha individuato preliminarmente le aree ad elevata concentrazione di radon ("radon prone areas")<sup>1</sup> e i relativi Comuni interessati, provvedendo inoltre a definire il livello di riferimento per l'adozione degli interventi di rime-

dio nelle abitazioni, per le nuove costruzioni ed anche per le costruzioni esistenti, nella concentrazione media annua di gas radon di 200 Bq/m<sup>3</sup>.

### Aspetti sanitari

Le conoscenze sulla emissione di radiazioni ionizzanti di tipo alfa, tipica del gas radon e della sua progenie, e l'aumentato rischio di neoplasia polmonare nei soggetti che lo inalano, hanno seguito un lungo percorso storico.

Eccessi di mortalità per cause respiratorie tra i minatori della Boemia e della Sassonia venivano descritti già dal XV-XVIII secolo, seppure non potessero ovviamente venire correlati all'esposizione a radon.

Negli anni '20 e '30 del secolo passato il rilievo di elevati livelli di radon nelle miniere della Cecoslovacchia e l'elevata frequenza di tumori nei lavoratori portano ad ipotizzare una correlazione tra esposizione a radon e comparsa della malattia (28, 38). Tale ipotesi inizia ad essere confermata a partire dagli anni '50 e '60 sulla base di studi epidemiologici su coorti di minatori; identiche evidenze epidemiologiche vengono raccolte anche nelle decadi successive e di tali studi viene presentata una sintesi nel 1988 ad opera del National Research Council (8).

Negli anni '80 istituzioni autorevoli sanciscono la correlazione tra esposizione a radon e neoplasia polmonare (23) e conseguentemente classificano il radon come cancerogeno certo (classe 1) per l'uomo (22). Anche negli anni successivi, ancora da studi epidemiologici su coorti lavorative di minatori, arrivano ulteriori conferme sull'eccesso di mortalità per neoplasia polmonare da esposizione

<sup>1</sup> Zone geografiche o luoghi di lavoro caratterizzati da una elevata probabilità di incontrare alte concentrazioni di attività di radon; vengono definite tali quando la percentuale degli edifici che presentano una concentrazione di radon superiore ad un determinato valore di riferimento supera un valore percentuale prestabilito.

Il Decreto Legislativo 241/2000 demanda alle regioni la individuazione delle "radon prone areas" secondo linee guida e criteri elaborati dalla Sezione Speciale della Commissione Tecnica di cui all'art. 9 del D.Lgs. 230/95, che non risulta ad oggi insediata.

a radon (4, 26, 35). A partire dagli anni '80 si inizia a registrare anche un progressivo interesse scientifico per la valutazione dei rischi determinata dall'esposizione a radon in ambienti di lavoro diversi da quelli minerari e in ambienti domestici dove, usualmente, la popolazione trascorre la maggior parte della giornata (24, 34, 36, 37, 40).

Gli effetti correlati all'esposizione residenziale sono stati recentemente affrontati in uno studio epidemiologico (10) su 7.148 casi di neoplasia polmonare e 14.208 controlli distribuiti in 9 paesi europei; la popolazione era stata indagata in 13 studi caso-controllo in cui erano disponibili misure sull'esposizione a radon e una accurata anamnesi circa l'abitudine al fumo di sigaretta.

Gli autori concludono che l'esposizione a radon residenziale costituisce un pericolo apprezzabile e individuano una relazione dose-risposta lineare senza soglia, che si mantiene significativa anche sotto i 200 Bq/m<sup>3</sup>, valore raccomandato in ambito Europeo come riferimento per l'esposizione a radon nelle abitazioni (6).

Un aspetto rilevante, esaminato già negli studi sulle popolazioni di minatori, è l'interazione tra radon ed esposizione a fumo di sigaretta; seppure con i limiti di tali studi, dovuti alle differenze del disegno, alla incompleta disponibilità di informazioni sull'abitudine al fumo degli esposti, alla variabilità delle misure di radon, si evidenzia un rischio relativo per i fumatori 2-3 volte più alto rispetto ai non fumatori (7, 27).

La presenza di una interazione tra radon e fumo di sigaretta viene confermata anche da studi condotti in ambito residenziale; essi permettono inoltre di concludere che la sinergia tra i due fattori di rischio è sicuramente maggiore di un semplice effetto additivo tra i due (10).

Nel 2006 in Europa la neoplasia polmonare ha rappresentato la più importante causa di morte per neoplasia, con una stima di circa 334.800 decessi pari al 19,7% del totale (13). Si stima che l'esposizione residenziale a radon in Europa sia responsabile di circa il 9% delle morti per neoplasia polmonare e del 2% di tutte le morti per neoplasia (11).

In conclusione, nonostante le conoscenze attuali, anche relativamente alle variabili che influenzano la

relazione tra esposizione, dose assorbita e risposta, siano maggiormente consolidate, l'esposizione a gas radon rappresenta ancora un importante problema di sanità pubblica, soprattutto in relazione alla definizione di valori limite di esposizione, soprattutto per gli ambienti residenziali, e all'applicazione di tecniche che ne riducano significativamente la concentrazione ambientale.

## OBIETTIVI

Il settore bancario, dove è frequente l'utilizzo di caveaux, magazzini e archivi, in genere ubicati in locali sotterranei, rappresenta quindi un comparto lavorativo interessato alla tutela della salute dei lavoratori da esposizione a radon.

Lo studio è stato condotto, oltre che per rispondere agli adempimenti di legge, con i seguenti obiettivi:

- 1) ottenere indicazioni sui valori medi della concentrazione di radon, su base regionale, verificando in che misura le differenze regionali siano rispettate da quelle dell'indagine nazionale sulle abitazioni condotta dall'Istituto Superiore di Sanità (1, 5, 30);

- 2) valutare la relazione tra il livello misurato in un intero anno e in diversi trimestri dello stesso anno;

- 3) verificare l'esistenza di una relazione tra le concentrazioni di radon presenti ai piani interrati e quelle ai piani terra corrispondenti;

- 4) individuare alcuni dei fattori determinanti nell'accumulo di radon all'interno degli edifici bancari.

## MATERIALI E METODI

In attesa di indicazioni normative sulle modalità operative di esecuzione delle misure, gli autori hanno avviato lo studio seguendo le indicazioni contenute nelle Linee Guida della Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome (2003) e di specifiche indicazioni fornite da un'apposita commissione dell'Associazione Bancaria Italiana (ABI).

Considerata la mancata emanazione del Decreto attuativo previsto da D.Lgs. 241 e la mancata definizione nella maggior parte degli ambiti regionali delle aree ad elevata concentrazione di radon ("radon prone areas") occorre sottolineare come ancora numerosi aspetti tecnico-organizzativi necessitino di essere approfonditi. Tra questi si segnalano l'accuratezza e la riproducibilità delle misure, la necessità di estendere le misure ai piani fuori terra occupati in permanenza dal personale, l'approccio da utilizzare nei confronti dell'utenza, la possibilità di individuare aree geografiche in cui eseguire prioritariamente le indagini, le modalità operative di esecuzione delle misure su intervalli più brevi di un anno, la valutazione dei tempi di esposizione dei lavoratori, infine, l'individuazione delle caratteristiche costruttive e di destinazione lavorativa, determinanti le concentrazioni di radon nei diversi ambienti e oggetto di intervento per un contenimento del rischio.

### Piano di misure

Il monitoraggio del radon è stato realizzato in 134 filiali di diversa dimensione e tipologia costruttiva, con presenza variabile di impianti di ventilazione e climatizzazione. Le misure hanno incluso la posa di dosimetri per periodi annuali, trimestrali e settimanali.

Lo studio è stato effettuato in sette regioni italiane, distribuite in modo da rappresentare l'intero territorio nazionale in quanto 3 (Piemonte, Lombardia, Veneto) sono appartenenti all'area nord del Paese, 3 (Campania, Puglia, Sicilia) a quella sud e 1 (Lazio) al centro. La scelta delle regioni è stata orientata anche dalla concentrazione media di radon, ricavata dall'indagine nazionale dell'Istituto Superiore di Sanità (1, 5), che, sebbene condotta in edifici residenziali a quota prevalentemente pari o superiore al piano terra, rimane al momento l'unico riferimento su scala nazionale.

Le sedi bancarie da studiare sono state selezionate in modo proporzionale al numero di filiali presenti sul territorio regionale e comunque almeno una per ogni capoluogo di provincia, ove presente.

In tabella 1 si riporta il quadro complessivo del piano di monitoraggio.

**Tabella 1** - Regioni coinvolte nel monitoraggio del radon indoor in 134 filiali bancarie, relativi valori medi regionali estratti dall'Indagine Nazionale dell'Istituto Superiore di Sanità per le abitazioni. Viene riportato inoltre il numero di filiali studiate in ogni regione

*Table 1 - Regions involved in radon monitoring of 134 bank buildings, with corresponding average regional concentration from the National survey for residential dwellings conducted by the Italian National Institute of Health. The number of branches examined in each region is also reported*

Regione	Concentrazione media regionale (Bq/m <sup>3</sup> )	N. Filiali
Sicilia	35	10
Puglia	52	10
Veneto	58	25
Piemonte	69	25
Campania	95	20
Lombardia	111	19
Lazio	119	25

### Strumenti di misura

Le misure annuali e trimestrali sono state condotte con dosimetri passivi a tracce nucleari prodotti e analizzati dall'istituto di radioprotezione ENEA (Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente di Bologna). Il dosimetro dell'ENEA è composto da una camera a diffusione in cui è contenuto un rivelatore su cui si verificano gli impatti delle particelle alfa prodotti dal decadimento del radon, costituito da Poly Allyl Diglicol Carbonato (PADC), ovvero un polimero organico commercialmente denominato CR-39. Il rivelatore consiste in una lastrina di dimensioni 24,7x36,7 mm<sup>2</sup> e spessore di 1,40 mm ed è identificato da un codice numerico laser inciso sulla sua faccia inferiore. Inoltre, le caratteristiche tecniche della camera di diffusione permettono l'ingresso del solo gas radon, poiché le pareti interne e la calotta sovrastante racchiudono un'intercapedine le cui dimensioni e geometrie prevengono l'ingresso della progenie del radon (<sup>222</sup>Rn) e del thoron (<sup>220</sup>Rn) (19).

Per l'effettuazione delle misure settimanali sono stati utilizzati dosimetri ad elettretti E-Perm (Short Term) ad alta sensibilità, prodotti ed analizzati da Mi.am srl. Il dosimetro è di tipo integrato, basato sulla misura della variazione di potenziale indotta

su un elettrete. Quest'ultimo è un disco di Teflon con potenziale elettrostatico stabile che, in presenza di radioattività alfa, si riduce in modo proporzionale al numero di particelle interagenti. La perdita di potenziale, misurata mediante voltmetro digitale e valutata in funzione nell'intervallo di tempo di esposizione, permette quindi la valutazione della concentrazione media di radon nell'ambiente attraverso l'impiego di appropriati fattori di calibrazione (21).

### **Procedura di monitoraggio**

Considerando la numerosità delle filiali e la loro dislocazione in più aree geografiche, con operatori diversi per ogni regione, si è rivelato decisivo predisporre una procedura di intervento certificata nel sistema qualità dell'Azienda, al fine di mantenere il controllo e la qualità del monitoraggio.

A tal fine è stata standardizzata la procedura relativa a tutte le attività necessarie, dalla preparazione del sopralluogo (approvvigionamento), all'attività in filiale (analisi degli ambienti e posa dei rivelatori), al recupero dei rivelatori (in filiale o da remoto), con l'univoca definizione delle responsabilità (responsabile di Progetto e Responsabile Qualità) e dei tempi necessari (periodiche riunioni di avanzamento dei lavori).

Sono stati posati 1933 dosimetri CR-39 Enea, di cui 1817 sono stati recuperati e analizzati alla fine del monitoraggio.

Le misure sono state effettuate in tutti gli ambienti sotterranei, definiti come ambienti con almeno tre pareti interamente sotto al piano di campagna, indipendentemente dal diretto contatto con il terreno circostante (9). Sono stati esclusi dal piano di monitoraggio i locali interrati a ininfluenza permanente di lavoratori (ad es. spogliatoi, ambienti di passaggio, locali tecnologici e simili).

In ogni filiale è stato inoltre eseguito il campionamento in almeno 2 punti di misura nei piani terra, in genere nei locali adiacenti all'ambiente in cui ha sbocco la scala di collegamento, preferendo, ove possibile, quelli occupati dal personale.

Al fine di valutare l'influenza della variabilità climatica sulla concentrazione di radon, nel piano sotterraneo di ciascuna filiale sono stati posizionati

due rivelatori CR-39 Enea nello stesso punto di misura (prevalentemente nel caveau o nell'archivio). Il primo è stato lasciato in acquisizione continua per un anno mentre il secondo è stato sostituito con cadenza trimestrale, rispettando la scelta del punto misura, al fine di coprire il medesimo arco temporale del dosimetro in acquisizione continua con le misure di 4 trimestri successivi. I trimestri non sono stati scelti in corrispondenza delle stagioni ma del passaggio tra esse (Novembre-Gennaio; Febbraio-Aprile; Maggio-Luglio; Agosto-Ottobre).

Inoltre sono stati lasciati in acquisizione in successione settimanale 12 coppie di dosimetri a elettrete E-Perm (Miam) in due diverse filiali della Lombardia, al fine di valutare la variabilità settimanale.

### **Scheda tecnica di sopralluogo**

Allo scopo di raccogliere tutte le informazioni utili per lo studio, con particolare riguardo per l'individuazione dei fattori determinanti nell'accumulo del radon, è stata compilata una "Scheda di Filiale" sia in formato cartaceo che elettronico, (in ambiente Office Excel 2003 della Microsoft).

Nella scheda sono state registrate, per ogni dosimetro posato, note relative alla posizione geografica della filiale (regione; provincia; città), all'identificazione univoca di filiale e locale (polo immobiliare; codice di filiale e di locale), alle caratteristiche del locale (livello del piano; classe dimensionale; destinazione d'uso; presenza di condensa o umidità; ventilazione; climatizzazione; aperture dirette verso l'esterno; contatto delle pareti perimetrali con caveau, altro locale, terreno, esterno o non rilevabile; contatto del pavimento con vespaio areato, altro piano, terreno o non rilevabile), caratteristiche del dosimetro (codice; date di posa e di recupero; tempo di esposizione; tipologia; eventuali dosimetri appaiati; tecnico coinvolto nella posa; codice di riconoscimento nel trasporto al laboratorio).

### **Elaborazione dei dati**

L'elaborazione statistica dei dati è stata effettuando utilizzando il software SPSS 14.

Oltre all'analisi descrittiva del campione, si è proceduto alla valutazione della distribuzione con test di Kolmogorov-Smirnov e se ne è verificata la log-normalità.

Lo studio della variazione di concentrazione di radon in funzione del periodo dell'anno è stata effettuato mediante le variazioni percentuali nel caso di misure medie, oppure, nel caso di confronti puntuali, con *t*-test per dati appaiati sul logaritmo della concentrazione. Il modello di regressione lineare multipla è stato applicato per valutare la correlazione fra la misura annuale e quelle di ogni singolo trimestre.

Nel caso dell'individuazione dei fattori determinanti dell'accumulo del radon indoor si è utilizzato un modello di regressione lineare multipla in cui la variabile indipendente è il logaritmo naturale della concentrazione. Fra le variabili registrate è stata esclusa dall'analisi statistica la categoria "non rilevabile" relativa al contatto delle pareti del locale in esame in quanto priva di informazioni significative.

Per indagare l'influenza che la presenza più o meno marcata di radon indoor nei locali sotterranei assume sulla concentrazione nel livello sovrastante, si è studiata la relazione tra le misure annuali dei locali sotterranei con quelli del piano di campagna corrispondente, sia con regressione lineare semplice e *t*-test per campioni indipendenti sulle relative concentrazioni medie, sia con regressione lineare multipla, includendo le specifiche caratteristiche dei locali del piano terra.

Infine è stato indagato l'andamento della concentrazione in funzione della destinazione d'uso dei lo-

cali e si è effettuato uno studio specifico per il caveau, caratteristico del settore bancario, includendolo come fattore predittivo in un modello di regressione lineare multipla relativo ai soli piani sotterranei e ai locali senza permanenza costante di personale.

Il livello di significatività per tutti i test utilizzati è stato scelto pari a 0,05.

## RISULTATI

### Valori di concentrazione di radon

Un quadro riepilogativo complessivo dei risultati delle misure effettuate nel piano terra e nel piano sotterraneo delle 134 filiali con cadenza sia annuale che trimestrale è presentato nella tabella 2. Nelle tabelle 3 e 4 sono invece riportati i risultati delle sole misure annuali svolte rispettivamente al livello sotterraneo e al piano terra.

I risultati sono mostrati graficamente in figura 1.

### Variabilità temporale delle concentrazioni di radon

#### Confronto di misure trimestrali

Il campione di misure utile a questo specifico approfondimento è risultato di numerosità pari a 88 set di dosimetri, ove per set si intende un rivelatore annuale e i relativi 4 a posa trimestrale.

Le variazioni delle concentrazioni medie trimestrali sono visualizzabili nel grafico in figura 2.

**Tabella 2** - Risultati dell'analisi descrittiva delle misure annuali e trimestrali sia nei piani terra che nei seminterrati  
*Table 2* - Results of descriptive analysis for annual and quarterly measurements at ground and underground levels

Regione	Sicilia	Puglia	Veneto	Lombardia	Piemonte	Lazio	Campania	7 regioni
N. misure	141	147	285	315	361	253	315	1817
$C_{\text{media aritmetica}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	56	100	68	95	120	146	265	121
$C_{\text{media geometrica}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	40	74	49	67	75	105	157	78
$C_{\text{mediana}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	38	76	41	63	70	111	182	70
$C_{\text{max}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	374	349	553	468	747	842	3618	3618
Deviazione Standard	60	85	82	87	142	238	371	209
Errore Standard	5	7	5	5	8	15	21	5
$C_{\text{min}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	1	4	2	1	2	8	2	1
%Mis[400<C<500Bq/m <sup>3</sup> ]	0	0,7	0,4	1,6	2,8	3,2	7,3	2,6
%Mis>500 Bq/m <sup>3</sup>	0	0	0,7	0	4,4	2	12,4	3,4

**Tabella 3** - Risultati dell'analisi descrittiva delle misure annuali effettuate nei piani sotterranei*Table 3 - Results of descriptive analysis for annual measurements at underground levels*

Regione	Sicilia	Puglia	Veneto	Lombardia	Piemonte	Lazio	Campania	7 regioni
N. misure	38	39	80	63	97	71	85	473
$C_{\text{media aritmetica}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	66	137	71	124	152	180	302	157
$C_{\text{media geometrica}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	46	105	52	91	102	132	197	98
$C_{\text{mediana}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	49	125	42	82	95	169	198	92
Deviazione Standard	56	92	73	104	141	148	370	202
Errore Standard	9	15	8	13	14	18	40	9
$C_{\text{max}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	210	349	370	468	568	842	2564	2564
$C_{\text{min}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	9	16	22	18	20	24	18	9
%Mis[400<C<500Bq/m <sup>3</sup> ]	0	0	0	4,8	6,2	5,6	14,1	5,5
%Mis>500 Bq/m <sup>3</sup>	0	0	0	0	3,1	4,2	8,2	2,8

**Tabella 4** - Risultati dell'analisi descrittiva delle misure annuali effettuate nei piani terra*Table 4 - Results of descriptive analysis for annual measurements at ground levels*

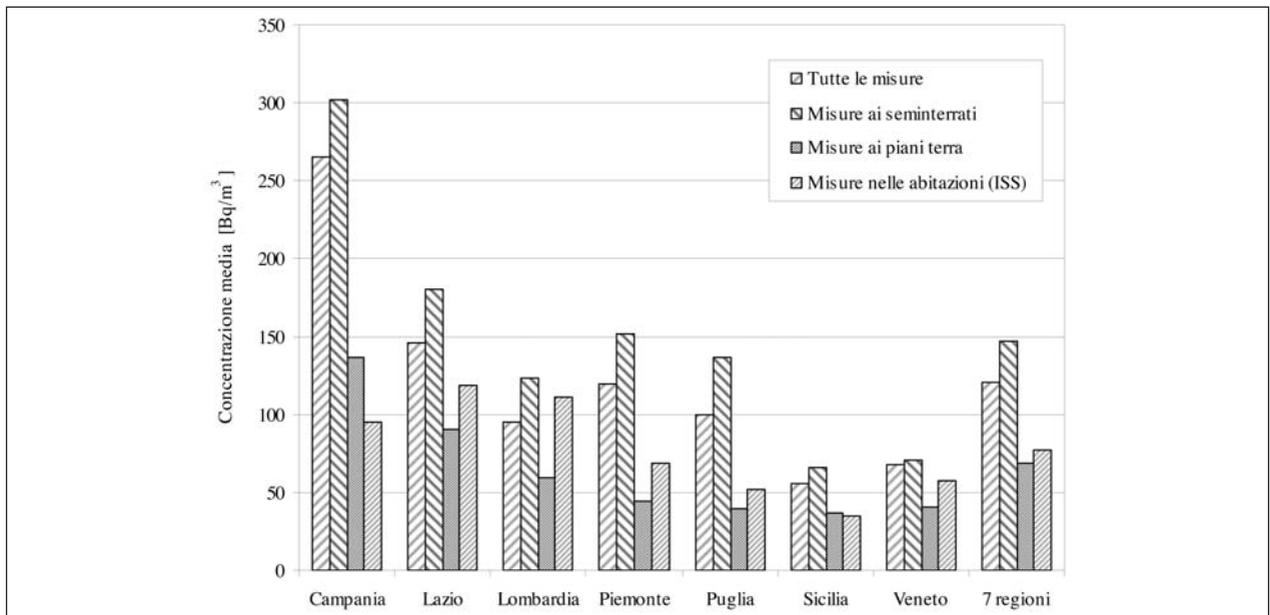
Regione	Sicilia	Puglia	Veneto	Lombardia	Piemonte	Lazio	Campania	7 regioni
N. Misure	21	17	29	41	42	30	40	220
$C_{\text{media aritmetica}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	37	40	41	59	44	91	134	68
$C_{\text{media geometrica}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	27	36	31	51	37	69	93	47
$C_{\text{mediana}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	21	40	32	48	33	64	92	43
Deviazione Standard	29	16	37	43	31	80	131	77
Errore Standard	6	4	7	7	5	15	21	5
$C_{\text{max}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	112	70	159	245	152	360	620	620
$C_{\text{min}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	8	17	2	23	12	19	3	2
%Mis[400<C<500Bq/m <sup>3</sup> ]	0	0	0	0	0	0	0	0
%Mis>500 Bq/m <sup>3</sup>	0	0	0	0	0	0	5,0	0,9

L'analisi dei logaritmi delle concentrazioni trimestrali evidenzia una differenza significativa ( $p < 0,05$ ) solo tra il trimestre Maggio-Luglio, corrispondente al periodo di transizione tra la primavera e l'estate, e tutti gli altri trimestri, come mostrato in tabella 5, in cui vengono riportate anche le rispettive variazioni percentuali medie della concentrazione. Il caso di variazione percentuale media maggiore si presenta nel passaggio tra il trimestre Febbraio-Aprile e quello Maggio-Luglio, in cui la concentrazione media diminuisce in modo drastico (-47,3%) coerentemente con l'innalzamento generale della temperatura ambientale; la variazione minore si ha invece tra i trimestri Novembre-Gennaio e Febbraio-Aprile, rappresentativi del periodo freddo dell'anno.

Considerando la concentrazione annuale come risultante delle concentrazioni rilevate nei quattro trimestri corrispondenti, il modello di regressione lineare multipla applicata ai relativi logaritmi naturali fornisce un  $R^2$  di 0,85 e tutti i trimestri, tranne maggio-luglio, risultano significativamente associati in modo positivo alla concentrazione annuale, come mostrato in tabella 6.

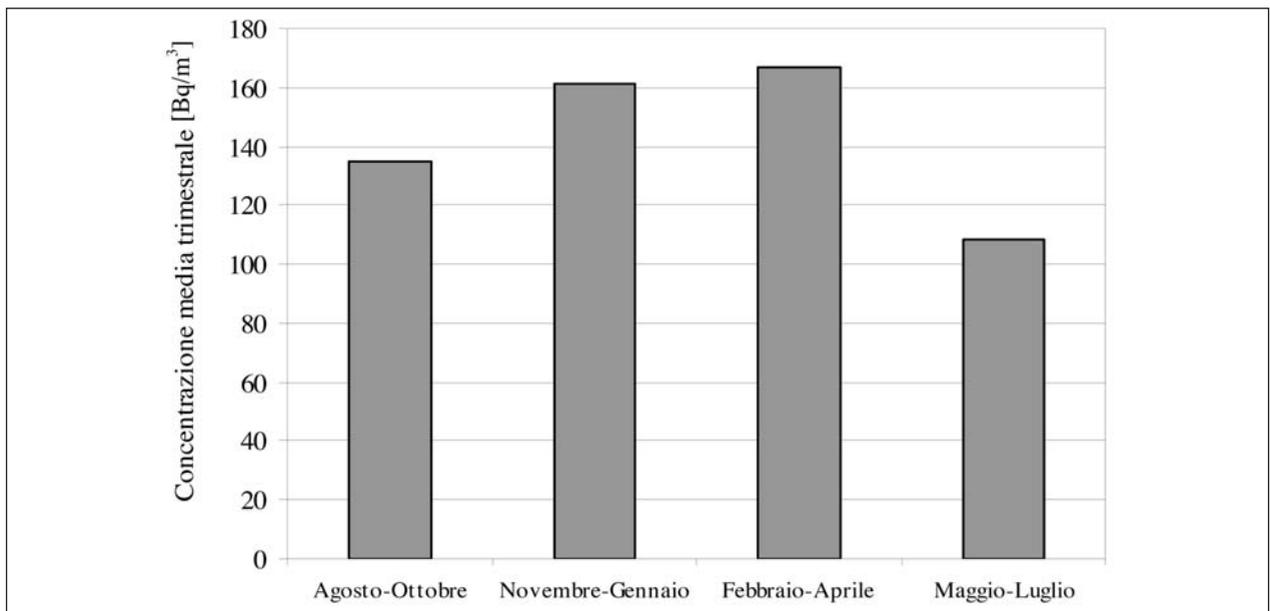
#### *Confronto di misure settimanali*

Al fine di valutare l'andamento settimanale del periodo invernale e primaverile è stato effettuato uno studio con 12 rivelatori ad elettretre posizionati in due filiali della Lombardia (Cusano Milanino e



**Figura 1** - Valori medi di concentrazione regionale per tutte le misure dello studio, per le misure annuali ai seminterrati e ai piani terra. Vengono riportati inoltre i risultati dell'indagine nazionale dell'Istituto Superiore di Sanità (1999)

*Figure 1* - Regional average concentration for the whole set of measurements, for annual measurements at ground and underground levels. Results from a national survey by the Italian National Institute of Health are also reported (1999)



**Figura 2** - Andamento della concentrazione media trimestrale di radon in 88 filiali in trimestri successivi

*Figure 2* - Average radon concentration trend in 88 branches for successive quarters

Merate). Ogni coppia di elettretti è stata in acquisizione per una settimana, coprendo un periodo che va dal 31/01/05 al 25/04/05, salvo che per la coppia corrispondente alla settimana del 21/02/05 che è

andata perduta. Si è studiato quindi il periodo di passaggio climatico tra l'inverno e la primavera.

La variazione delle relative concentrazioni medie delle settimane invernali (31/01/05-14/03/05) ri-

**Tabella 5** - Variazioni percentuali medie e relativi livelli di significatività per le concentrazioni di ogni singolo trimestre rispetto ai restanti tre*Table 5 - Average percentage variation and corresponding significance level for each quarter compared to the other 3*

Febbraio/Aprile	$\Delta C_{\text{medio}}\%$	Novembre/Gennaio	Maggio/Luglio	Agosto/Ottobre
	p	-3,3%	-47,3%	-8,8%
		0,972	0,000	0,384
Maggio/Luglio	$\Delta C_{\text{medio}}\%$	Febbraio/Aprile	Agosto/Ottobre	Novembre/Gennaio
	p	47,3%	35,5%	42,3%
		0,000	0,000	0,000
Agosto/Ottobre	$\Delta C_{\text{medio}}\%$	Febbraio/Aprile	Maggio/Luglio	Novembre/Gennaio
	p	8,8%	-35,5%	8,0%
		0,384	0,000	0,259
Novembre/Gennaio	$\Delta C_{\text{medio}}\%$	Febbraio/Aprile	Maggio/Luglio	Agosto/Ottobre
	p	3,3%	-42,3%	8,0%
		0,972	0,000	0,259

**Tabella 6** - Risultati del modello di regressione lineare sul logaritmo della concentrazione annuale come variabile dipendente in relazione ai logaritmi naturali delle concentrazioni dei 4 trimestri corrispondenti*Table 6 - Multiple linear regression results for logarithm of annual radon concentration as dependent variable and the corresponding 4 quarters as determinant variables*

Trimestre	B	CI per B al 95%		beta	t	sig
Ln C [Agosto - Ottobre]	0,320	0,189	0,452	0,335	4,856	0,000
Ln C [Novembre - Gennaio]	0,496	0,357	0,635	0,537	7,100	0,000
Ln C [Febbraio - Aprile]	0,127	0,012	0,243	0,139	2,198	0,031
Ln C [Maggio - Luglio]	0,001	-0,076	0,079	0,002	0,038	0,970

I parametri riportati in tabella sono: il coefficiente di regressione (B), il limite di confidenza al 95% per ogni coefficiente di regressione (CI), il coefficiente di regressione standardizzato (beta), il valore del test t (t), il livello di significatività a due code di t (sig)

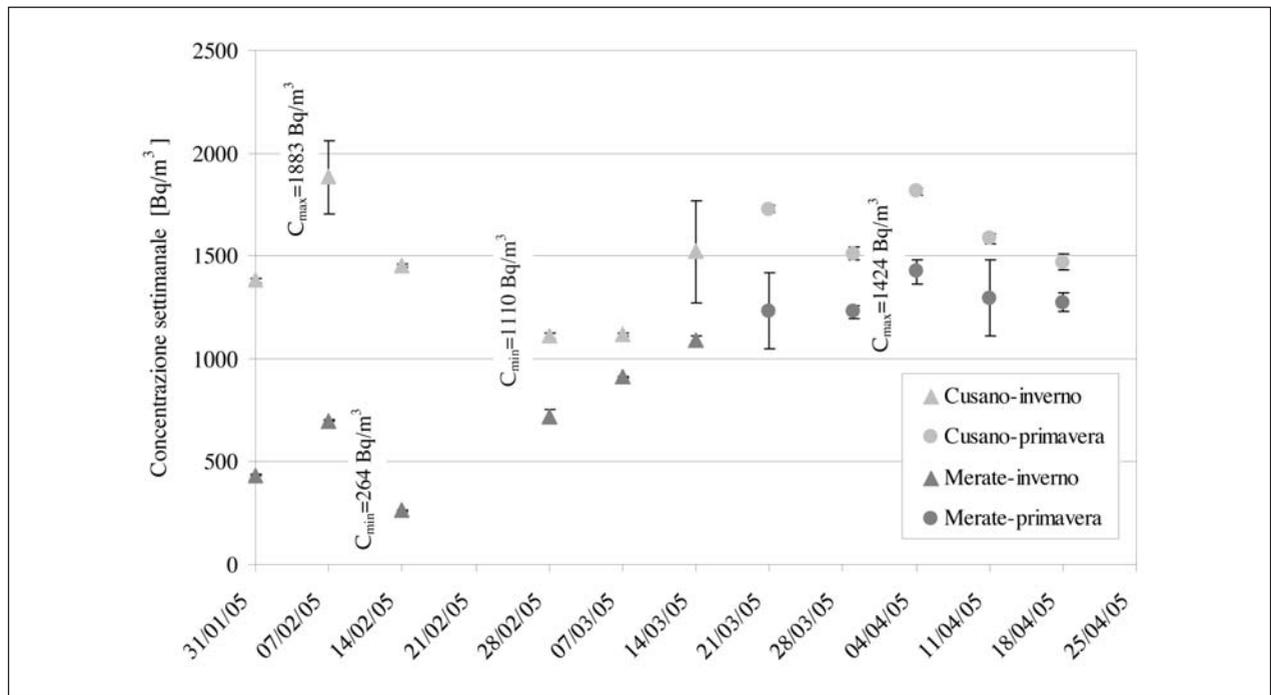
spetto a quelle primaverili (21/03/05- 25/04/05) è di 210 Bq/m<sup>3</sup> per Cusano Milanino ( $\Delta C_{\text{media}}\% = 14\%$ ) e di 603 Bq/m<sup>3</sup> a Merate ( $\Delta C_{\text{media}}\% = 63\%$ ).

La variazione di concentrazione di ogni settimana presenta un andamento molto differenziato nel periodo invernale per entrambi gli edifici bancari, fornendo ( $C_{\text{max}} - C_{\text{min}}$ )=773 Bq/m<sup>3</sup> e D. St./ $C_{\text{media}} = 20\%$  per Cusano Milanino; mentre ( $C_{\text{max}} - C_{\text{min}}$ )=825 Bq/m<sup>3</sup> e D. St./ $C_{\text{media}} = 44\%$  per Merate. Il periodo primaverile assume invece un andamento più omogeneo, infatti si ha ( $C_{\text{max}} - C_{\text{min}}$ )=346 Bq/m<sup>3</sup> e D. St./ $C_{\text{media}} = 9\%$  per Cusano Milanino; ( $C_{\text{max}} - C_{\text{min}}$ )=197 Bq/m<sup>3</sup> e D. St./ $C_{\text{media}} = 6\%$  per Merate. I dati sono descritti in figura 3.

### Studio di fattori determinanti per la concentrazione di radon negli edifici bancari

L'analisi delle caratteristiche dei locali monitorati ha evidenziato la disomogeneità numerica dei gruppi categorici ad esse associati. Di conseguenza si è ritenuto necessario procedere all'accorpamento di alcune di esse, in modo da avere un campione statistico bilanciato in termini di numerosità, compatibilmente con il significato fisico delle variabili predittive.

La variabile descrivente il piano di giacenza del pavimento non è stata inclusa nel modello in quanto non è stato possibile identificarne la tipologia



**Figura 3** - Andamento della concentrazione settimanale in due filiali della Lombardia (Merate (a) e Cusano Milanino (b)) nel periodo tra il 31/01/05 e 25/04/05 acquisita con dosimetri ad elettrete

*Figure 3* - Weekly radon concentration trend in two branches of Lombardy (Merate (a) and Cusano Milanino (b)) during the period 31/01/05 - 25/04/05, obtained with electret dosimeters

nel 49% dei casi per quanto riguarda il campione totale delle misure e nel 70% per il campione delle misure ai soli piani sotterranei; nel caso del piano terra, invece, l'85% dei casi è rappresentato dalla presenza di un piano sottostante, per cui la valutazione statistica del fattore determinante è risultata comunque non attendibile.

I fattori determinanti per cui sono stati effettuati gli accorpamenti, con i relativi parametri categorici che li descrivono, sono riportati nella tabella 7.

*a) Studio di fattori determinanti nella concentrazione di radon sia nei piani sotterranei che nei piani terra degli edifici bancari*

Il modello, impiegato per l'analisi delle sole misure annuali sia ai piani sotterranei che ai piani terra, per un totale di 693 misure, è risultato significativo con un coefficiente di determinazione  $R^2=0,33$ . Le variabili indipendenti che sono risultate significative sono riportate nella tabella 8.

*b) Studio di fattori determinanti per la concentrazione di radon nei piani sotterranei degli edifici bancari*

Il modello è stato analizzato per le sole misure annuali ai piani sotterranei per un totale di 473 misure e risulta significativo con un coefficiente di determinazione  $R^2=0,23$ . Le variabili indipendenti risultanti significative sono riportate nella tabella 9.

*c) Studio di fattori determinanti per la concentrazione di radon nei piani terra*

Il modello è stato analizzato per le sole misure annuali ai piani terra in cui fosse presente anche il piano sotterraneo. Il campione di dosimetri utile a questo specifico approfondimento è risultato di numerosità pari a 219.

La destinazione d'uso è stata suddivisa in 2 categorie invece che 3 poiché il numero di caveaux è risultato irrilevante e si è scelto di accorpate tale modalità di utilizzo alla generica categoria dei locali sen-

**Tabella 7** - Riepilogo dei fattori geografico/strutturali delle filiali monitorate in cui è stato necessario effettuare accorpamenti al fine di equilibrare numericamente le categorie incluse come fattori determinanti in un modello di regressione lineare multipla rispetto al logaritmo naturale della concentrazione annuale di radon

*Table 7 - Summary of geographical/structural factors of monitored bank buildings that were grouped in order to obtain numerically comparable categories to be included as determinant factors in a multiple regression model where the natural logarithm of annual radon concentration is the dependent variable*

Fattore determinante	Categorie	Accorpamento
Destinazione d'uso	archivio, caveau, magazzino, anti-caveau, locale tecnico, postazione di lavoro, ufficio, altro	1 = ufficio, postazione di lavoro 2 = caveau 3 = archivio, magazzino, anti-caveau, locale tecnico, altro
Classe dimensionale	Area < 50 m <sup>2</sup> , 50 < Area < 200 m <sup>2</sup> ; Area > 200 m <sup>2</sup>	1 = Area > 50 m <sup>2</sup> 2 = Area < 50 m <sup>2</sup>
Aperture verso l'esterno	totale assenza, porta, finestra sigillata, finestra apribile, foro	1 = finestra apribile 2 = assenza di finestra apribile
Impianto di climatizzazione	solo riscaldamento, riscaldamento/raffrescamento, solo raffrescamento, assente	1 = presenza di riscaldamento 2 = assenza di riscaldamento
Ventilazione	naturale diretta, naturale indiretta, artificiale diretta, artificiale indiretta, assente	1 = ventilazione naturale diretta o indiretta 2 = assenza di ventilazione naturale diretta o indiretta

**Tabella 8** - Quadro riassuntivo dei fattori significativi nel modello di regressione lineare multipla in cui la variabile dipendente è il logaritmo della concentrazione annuale di radon sia ai piani sotterranei che ai piani terra. Il set completo dei fattori determinanti comprende la posizione geografica, le caratteristiche del locale riguardanti le dimensioni, la tipologia d'uso, l'affaccio delle pareti, il riscaldamento, la ventilazione e la presenza di condensa. Le misure sono state effettuate con dosimetri CR-39

*Table 8 - Summary of significant factors derived from a multiple linear regression where the natural logarithm of annual radon concentration at ground and underground level is the dependent variable. The complete set of determinant factors included geographic position, characteristics about room size, use, adjacent rooms, heating, ventilation and presence of humidity. Measurements were made with CR-39 dosimeters*

Fattore	B	CI per B al 95%	beta	t	sig	
Regione	0,152	0,118	0,186	0,282	8,721	0,000
Livello locale	0,310	0,035	0,584	0,144	2,217	0,027
Destinazione d'uso	0,163	0,032	0,293	0,131	2,441	0,015
Assenza di finestre apribili	0,211	0,043	0,378	0,095	2,474	0,014
Assenza di riscaldamento	0,285	0,128	0,441	0,145	3,562	0,000
Assenza di ventilazione naturale (diretta e/o indiretta)	0,256	0,120	0,391	0,127	3,703	0,000
Contatto di almeno una parete con caveau	-0,316	-0,482	-0,150	-0,133	-3,735	0,000
Contatto di almeno una parete con terreno	0,207	0,066	0,347	0,102	2,892	0,004
Presenza di condensa e/o umidità	0,207	0,020	0,393	0,077	2,177	0,030

I parametri riportati in tabella sono: il coefficiente di regressione (B), il limite di confidenza al 95% per ogni coefficiente di regressione (CI), il coefficiente di regressione standardizzato (beta), il valore del test t (t), il livello di significatività a due code di t (sig)

**Tabella 9** - Quadro riassuntivo dei fattori significativi nel modello di regressione lineare multipla in cui la variabile dipendente è il logaritmo della concentrazione annuale di radon ai piani sotterranei. Il set completo dei fattori determinanti comprende la posizione geografica, le caratteristiche del locale riguardanti le dimensioni, la tipologia d'uso, l'affaccio delle pareti, il riscaldamento, la ventilazione e la presenza di condensa. Le misure sono state effettuate con dosimetri CR-39

**Table 9** - Summary of significant factors derived from a multiple linear regression where the natural logarithm of annual radon concentration at underground level is the dependent variable. The complete set of determinant factors included geographic position, characteristics about room size, use, adjacent rooms, heating, ventilation and presence of humidity. Measurements were conducted with CR-39 dosimeters

Fattore	B	CI per B al 95%	beta	t	sig	
Regione	0,147	0,102	0,191	0,271	6,502	0,000
Destinazione d'uso	0,215	0,061	0,369	0,119	2,749	0,006
Assenza di riscaldamento	0,313	0,143	0,483	0,156	3,621	0,000
Assenza di ventilazione naturale (diretta e/o indiretta)	0,273	0,110	0,436	0,142	3,284	0,001
Contatto di almeno una parete con caveau	-0,299	-0,490	-0,108	-0,144	-3,073	0,002
Contatto di almeno una parete con terreno	0,165	0,005	0,325	0,087	2,023	0,044
Presenza di condensa e/o umidità	0,250	0,049	0,451	0,110	2,439	0,015

I parametri riportati in tabella sono: il coefficiente di regressione (B), il limite di confidenza al 95% per ogni coefficiente di regressione (CI), il coefficiente di regressione standardizzato (beta), il valore del test t (t), il livello di significatività a due code di t (sig)

za postazione di lavoro fissa ("Non ufficio"). Il modello risulta significativo con un coefficiente di determinazione  $R^2=0,56$ .

Le variabili indipendenti risultanti significative sono riportate in tabella 10.

Il confronto tra il valore medio del seminterrato e quello del piano terra mostra che le concentrazioni ai due piani sono significativamente diverse ( $p<0,001$ ).

Lo studio della regressione lineare semplice in cui il logaritmo della concentrazione media del piano sotterraneo viene usato come unico fattore predittivo rispetto al logaritmo della concentrazione media al corrispondente piano superiore, ne spiega la variabilità per circa il 45%. È opportuno sottolineare che in 9 filiali il worst case del piano terra risulta maggiore rispetto a worst case del seminterrato

**Tabella 10** - Quadro riassuntivo dei fattori significativi nel modello di regressione lineare multipla in cui la variabile dipendente è il logaritmo della concentrazione annuale di radon ai piani terra. Il set completo dei fattori determinanti comprende il logaritmo naturale della concentrazione al piano sottostante, la posizione geografica, le caratteristiche del locale riguardanti le dimensioni, la tipologia d'uso, l'affaccio delle pareti, il riscaldamento, la ventilazione e la presenza di condensa. Le misure sono state effettuate con dosimetri CR-39

**Table 10** - Summary of significant factors derived from a multiple linear regression where the natural logarithm of annual radon concentration at ground level is the dependent variable. The complete set of determinant factors included natural logarithm of corresponding underground concentration, geographic position, characteristics about room size, use, adjacent rooms, heating, ventilation and presence of humidity. Measurements were conducted with CR-39 dosimeters

Fattore	B	CI per B al 95%	beta	t	sig	
Ln (Concentrazione Media) al sotterraneo	0,514	0,046	0,579	0,579	11,107	0,000
Regione	0,067	0,023	0,111	0,156	2,979	0,003
Contatto di almeno una parete con terreno	0,778	0,209	1,346	0,322	2,695	0,008
Assenza di finestre apribili(*)	0,157	-0,001	0,351	0,109	1,962	0,051

(\*) al limite della significatività

I parametri riportati in tabella sono: il coefficiente di regressione (B), il limite di confidenza al 95% per ogni coefficiente di regressione (CI), il coefficiente di regressione standardizzato (beta), il valore del test t (t), il livello di significatività a due code di t (sig)

(4% dei casi). La variazione percentuale massima è stata al di sotto del 10% in 4 casi ma ha raggiunto il 206% in una filiale ( $\Delta C=107 \text{ Bq/m}^3$ ). Si specifica che il fenomeno non risulta associato al superamento dei livelli di azione, in quanto i valori di radon non sono stati mai superiori a  $250 \text{ Bq/m}^3$  né al piano terra né al sotterraneo delle filiali in cui si è verificato il fenomeno.

*d) Studio della concentrazione nei locali in base alla destinazione d'uso*

La distribuzione delle tipologie d'uso relative ai locali monitorati è mostrata in figura 4.

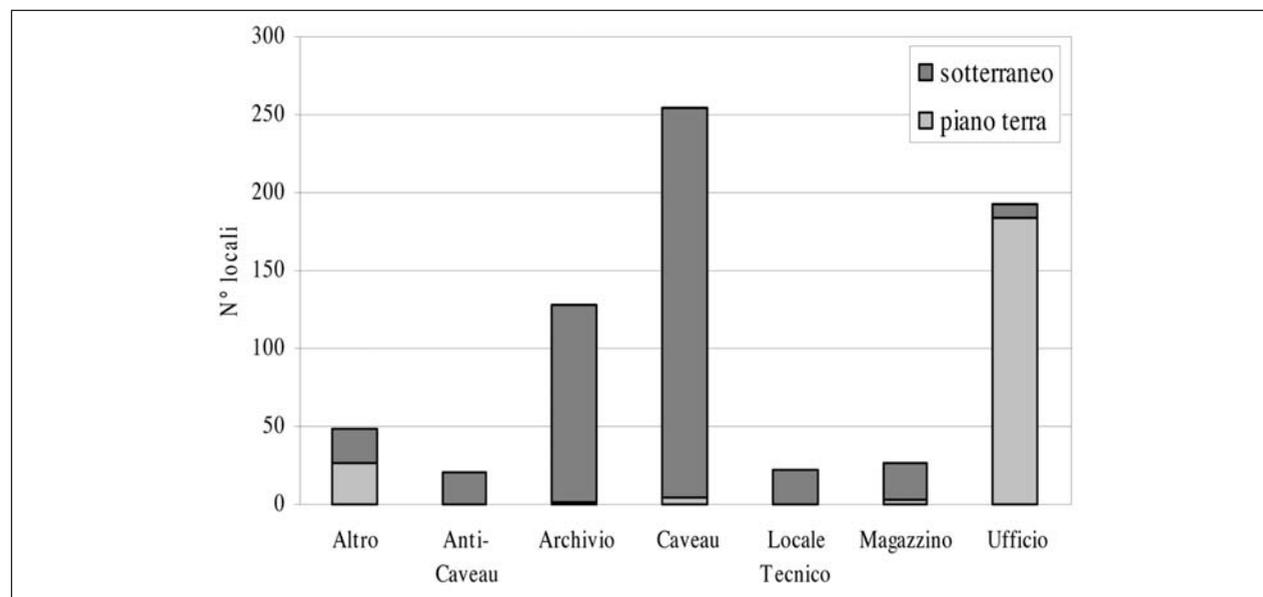
L'andamento delle concentrazioni medie di radon rispetto ad ogni tipologia d'uso presente nelle 134 filiali in esame è riportata nella figura 5, sia per il piano terra che per il sotterraneo.

Lo studio dell'andamento delle concentrazioni nel caso in cui la destinazione d'uso del locale sia il caveau, effettuata ai soli piani sotterranei, escludendo gli uffici, ha mostrato che il modello di regressione lineare multipla, risultante significativo, è in grado di spiegare la variabilità del logaritmo della concentrazione per il 21%. In questo caso il modello è stato costruito includendo come variabili indi-

pendenti le sole risultate significative per il piano sotterraneo (par. b) e la variabile relativa all'utilizzo del locale come caveau in sostituzione di quella relativa alla generica destinazione d'uso. In tabella 11 vengono riportati i fattori e i coefficienti associati.

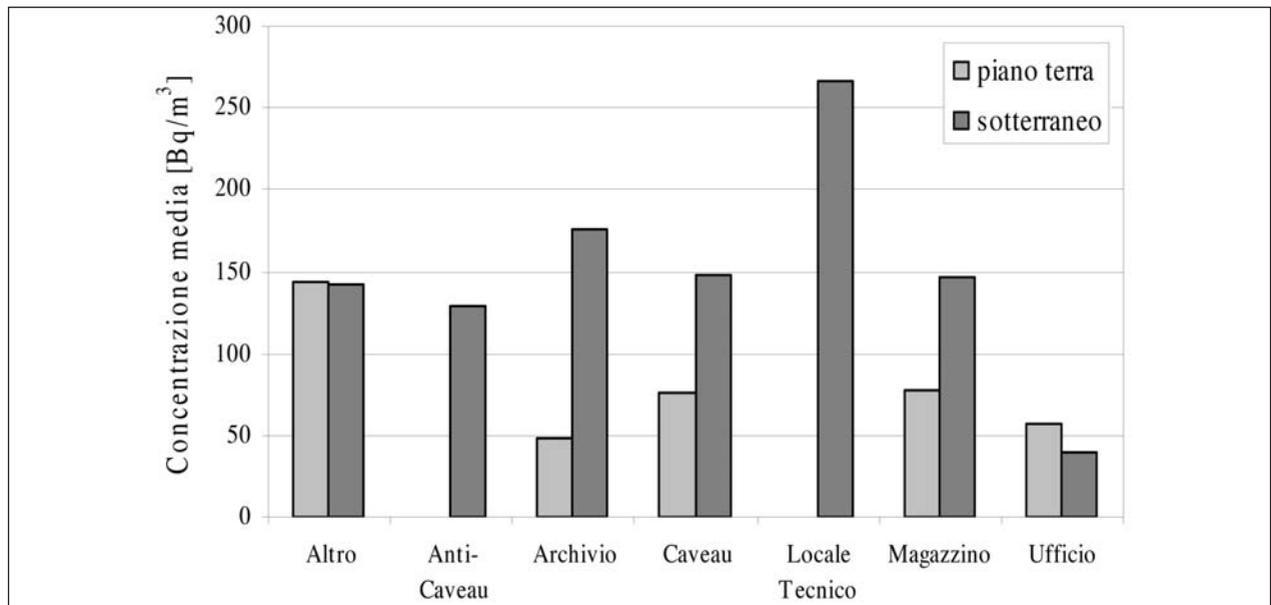
## DISCUSSIONE

Il quadro complessivo delle misure annuali e trimestrali nelle 7 regioni Italiane in studio mostra una marcata dipendenza dei livelli medi di radon dal territorio regionale di appartenenza. In particolare, per quanto riguarda i locali indicati dal D.Lgs. 241/00, cioè quelli posti ai piani sotterranei, le regioni con concentrazione media più bassa sono la Sicilia e il Veneto (rispettivamente  $C_{\text{media}}=66 \text{ Bq/m}^3$  e  $C_{\text{media}}=71 \text{ Bq/m}^3$ ), mentre risulta medio/alta per la Lombardia e la Puglia (rispettivamente  $C_{\text{media}}=124 \text{ Bq/m}^3$  e  $C_{\text{media}}=137 \text{ Bq/m}^3$ ), alta per il Piemonte e il Lazio (rispettivamente  $C_{\text{media}}=152 \text{ Bq/m}^3$  e  $C_{\text{media}}=180 \text{ Bq/m}^3$ ) e abbastanza elevata per la Campania ( $C_{\text{media}}=302 \text{ Bq/m}^3$ ). I risultati delle misure annuali ai piani terra sono un inferiori a  $60 \text{ Bq/m}^3$  a eccezione del Lazio e della Campania, che mantengono livelli piuttosto elevati (rispettivamente  $C_{\text{media}}=91$



**Figura 4** - Distribuzione della destinazione d'uso dei locali del piano terra e del sotterraneo per le 134 filiali bancarie in studio

*Figure 4* - Number of premises for each type of use at ground and underground levels of the 134 branches involved in the study



**Figura 5** - Andamento della concentrazione media annuale di radon in base alla destinazione d'uso e al piano del locale nelle 134 filiali bancarie in studio

*Figure 5 - Annual average radon concentration according to the different use of premises at ground and underground levels for the 134 branches involved in the study*

**Tabella 11** - Quadro riassuntivo dei fattori significativi nel modello di regressione lineare multipla in cui la variabile dipendente è il logaritmo della concentrazione annuale di radon ai piani sotterranei. I fattori determinanti inclusi nel modello sono: posizione geografica, caratteristiche del locale riguardanti l'utilizzo come caveau, l'affaccio delle pareti, il riscaldamento, la ventilazione e la presenza di condensa. Le misure sono state effettuate con dosimetro CR-39

*Table 11 - Summary of significant factors derived from a multiple linear regression where the logarithm of annual radon concentration at underground level is the dependent variable. The complete set of determinant factors included geographic position, room characteristics regarding use as caveau, walls bordering on safe or rocks, heating, ventilation and presence of humidity. Measurements were conducted with CR-39 dosimeters*

Fattore	B	CI per B al 95%	beta	t	sig	
Regione	0,143	0,098	0,188	0,264	6,256	0,000
Uso come caveau	-0,217	-0,378	-0,055	-0,113	-2,628	0,009
Assenza di riscaldamento	0,315	0,145	0,484	0,156	3,642	0,000
Assenza di ventilazione naturale (diretta e/o indiretta)	0,319	0,157	0,480	0,167	3,883	0,000
Contatto di almeno una parete con caveau	-0,372	-0,548	-0,197	-0,180	-4,169	0,000
Contatto di almeno una parete con terreno	0,198	0,037	0,358	0,105	2,423	0,016
Presenza di condensa e/o umidità	0,242	0,047	0,437	0,108	2,440	0,015

I parametri riportati in tabella sono: il coefficiente di regressione (B), il limite di confidenza al 95% per ogni coefficiente di regressione (CI), il coefficiente di regressione standardizzato (beta), il valore del test t (t), il livello di significatività a due code di t (sig)

Bq/m<sup>3</sup> e  $C_{media}=134$  Bq/m<sup>3</sup>). Il 3% dei casi dell'intero set di misure (che include misure sia annuali che trimestrali al piano terra e al sotterraneo) supera il livello di azione di 500 Bq/m<sup>3</sup>; nel caso delle misure annuali ai piani terra e ai sotterranei questo accade rispettivamente nel 3% e 1% dei casi.

È importante sottolineare che tale tipo di indagine coinvolge prevalentemente le città ed è quindi poco rappresentativo dei territori meno popolati, in cui la presenza delle filiali bancarie è drasticamente ridotta. Questo può essere un motivo per cui le regioni che includono l'arco alpino nel loro territorio

mostrano valori medi meno elevati di quanto ci si aspettasse, in particolare per la regione Lombardia.

Un paragone fra i risultati ottenuti e l'indagine nazionale nelle abitazioni condotta dall'Istituto Superiore di Sanità (1, 5), ad oggi l'unico riferimento su scala nazionale presente in letteratura, ha mostrato che le concentrazioni medie maggiormente confrontabili a quelle dell'indagine nazionale sulle abitazioni risultano quelle rilevate ai piani terra di Sicilia, Puglia e Veneto mentre sono più bassi i valori trovati per Lombardia e Piemonte. Le discrepanze riscontrate non sorprendono in quanto tale paragone è comunque molto approssimativo dato che i due studi non sono confrontabili né in termini di finalità né di strategia di monitoraggio.

Lo studio dell'influenza della variabilità climatica stagionale sulla concentrazione di radon mostra che la concentrazione media è confrontabile nei mesi generalmente più freddi dell'anno [Novembre-Gennaio/Febraio-Aprile] ( $\Delta_{\text{medio}}\%=-3,3\%$ ), mentre la massima variazione si manifesta come decremento della concentrazione nel passaggio tra i mesi freddi e i mesi caldi [Febbraio-Aprile/Maggio-Luglio] ( $\Delta_{\text{medio}}\%=-47,3\%$ ). Si segnala inoltre che il livello medio delle concentrazioni nel trimestre di passaggio tra la primavera e l'estate [Maggio-Luglio] risulta inferiore ai restanti tre in modo sempre significativo ( $p<0,05$ ). Guardando la concentrazione annuale come la risultante delle concentrazioni dei singoli trimestri, il modello di regressione lineare multipla ha fornito un  $R^2=0,85$  e il trimestre che maggiormente contribuisce alla determinazione del valore annuale è risultato Novembre-Gennaio ( $B=0,496$ ,  $p<0,001$ ), indicandolo come il più rappresentativo del livello annuale, mentre non mostra correlazione il trimestre Maggio-Luglio ( $B=0,001$ ,  $p=0,970$ ). I risultati confermano quanto riportato dalla letteratura e sono riconducibili alla diversificazione dei gradienti di temperatura, e quindi di pressione, tra l'interno e l'esterno degli edifici nei mesi freddi e caldi, accentuati dal relativo utilizzo di impianti di riscaldamento e raffrescamento, il che genererebbe processi convettivi tali da "aspirare" il gas radon dall'esterno (soprattutto dal suolo) verso l'interno nei periodi freddi più che in quelli caldi ("effetto camino") (12, 16, 25, 29, 30, 33); inoltre va anche considerata, come ulteriore

fattore associato alla diminuzione di radon indoor nel periodo estivo, la maggiore frequenza nell'apertura delle finestre (2, 20, 39).

Lo studio delle misure settimanali non ha portato a nessun risultato di interesse, evidenziando solo una maggiore variabilità dei risultati relativi alle settimane dei mesi più freddi e una relativa confrontabilità in quelli primaverili.

Lo studio dei possibili fattori determinanti i livelli di radon nei locali indagati è stato effettuato mediante l'applicazione di un modello di regressione lineare multipla sui logaritmi naturali delle concentrazioni dei dati relativi sia alla totalità delle misure che ai sottoinsiemi corrispondenti ad ogni singolo piano (sotterraneo e piano terra). Considerando la totalità delle misure effettuate, il modello statistico spiega il 33% della variabilità dei valori di concentrazione log-trasformati e la localizzazione geografica è risultata essere il fattore con capacità predittiva maggiore; altri fattori, positivamente associati alla presenza di radon, sono: il livello del locale, il contatto di almeno una sua parete con terreno o roccia, la destinazione d'uso, l'assenza di finestre apribili, di riscaldamento, di ventilazione naturale diretta o indiretta nonché la presenza di condensa; sembra avere invece un ruolo protettivo nei confronti dell'ingresso del gas radioattivo che il locale sia confinante almeno su una parete con un caveau. Questi risultati si sono mantenuti ancora validi quando il modello è stato applicato alle sole misure dei piani sotterranei ( $R^2=0,23$ ), fatta eccezione per il fattore relativo all'assenza di finestre apribili, probabilmente perché numericamente poco rappresentativo (85% dei locali sotterranei del campione non è provvisto di finestre apribili).

Nell'applicazione del modello alle misure del solo piano terra, si è ritenuto opportuno includere fra le variabili predittive la concentrazione media del piano sottostante. Questa si è effettivamente rivelata molto significativa ( $p<0,001$ ), seguita dalla variabile geografica, dal contatto diretto delle pareti con il terreno e, solo al limite della significatività, dall'assenza di finestre apribili ( $p=0,051$ ), con un coefficiente di determinazione del modello pari a 0,56.

Si sottolinea che la natura dei materiali da costruzione degli edifici in esame non è stata inclusa

nel set di fattori predittivi dei modelli descritti a causa della complessità di una raccolta standardizzata di questo dato, che rappresenta comunque una potenziale variabile esplicativa in grado di influenzare i livelli di radon indoor, com'è noto dalla letteratura (3, 17, 30).

Si segnala che nel 4% dei casi il valore rilevato al piano terra è risultato più alto di quello al piano sottostante; sulla base di questo risultato appare opportuno, qualora le caratteristiche peculiari dei locali lo suggeriscano, considerare l'eventualità di concentrazioni non trascurabili di radon al piano terra anche in caso di valori contenuti al seminterrato.

Per quanto riguarda l'influenza della modalità di utilizzo del locale, si è riscontrato un andamento diverso nell'accumulo del radon in base all'attività a cui l'ambiente lavorativo è stato dedicato. I locali con concentrazioni medie più alte sono risultati i locali tecnici e gli archivi. La destinazione d'uso meno favorevole alla presenza di radon è quella dell'ufficio, in cui si rilevano concentrazioni in media più basse, indipendentemente dal piano in cui si trova, probabilmente per il maggior numero di ricambi d'aria dovuto alla permanenza del personale. L'utilizzo di un ambiente come caveau, tipico del settore bancario, sembra implicare una schermatura all'ingresso del radon rispetto a tutti gli altri locali non adibiti a uso ufficio. Infatti se un locale è adibito a caveau oppure ha almeno una parete ad esso adiacente, l'accumulo dell'agente cancerogeno sembra ridursi (rispettivamente  $\beta = -0,113$  e  $p < 0,01$ ;  $\beta = 0,180$  e  $p < 0,001$ ). La causa di questo fenomeno potrebbe essere ricondotta alla specifica struttura di un locale di sicurezza, per cui l'isolamento dall'esterno risulta una caratteristica che riduce la penetrazione di radon.

Il modello applicato mostra una ragionevole coerenza con i meccanismi fisici legati all'accumulo di radon indoor riportati in letteratura (3, 14, 15, 17, 29). I parametri indagati non sono comunque sufficienti a descrivere da soli la complessità dei meccanismi di accumulo del radon; altri fattori importanti potrebbero essere, ad esempio, i materiali di costruzione, la situazione geomorfologica, presenza di crepe, il tipo di pavimento e l'effettiva frequenza di funzionamento degli impianti di condizionamento o dell'apertura delle finestre.

## CONCLUSIONI

In definitiva lo studio ha fornito un quadro significativo delle priorità da scegliere nelle successive campagne di misura e di intervento per affrontare il rischio da radon nel settore bancario, indicando la modalità di misura ragionevolmente più opportune e i principali fattori di impatto nell'accumulo dell'agente cancerogeno nei locali lavorativi sotterranei, ottenendo peraltro risultati in buon accordo con la letteratura.

NO POTENTIAL CONFLICT OF INTEREST RELEVANT TO THIS ARTICLE WAS REPORTED

## BIBLIOGRAFIA

1. AGENZIA PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE E PER I SERVIZI TECNICI: *Annuario dei dati ambientali*. Ed, 2003
2. ARAFA W, EL SAMMAN H, ASHRY A: Airborne  $^{222}\text{Rn}$  concentration in an egyptian village. *Health Physics* 2002; *83*: 105-109
3. BARROS-DIOS JM, RUANO-RAVINA A, GASTELU ITURRI J, FIGUEIRAS A: Factor underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain. *Environmental Research* 2007; *103*: 185-190
4. BELLI S, COMBA P, GERMANI D, e coll: La medicina del lavoro. *Med Lav* 1989; *80*: 467-478
5. BOCHICCHIO F, CAMPOS VENUTI G, NUC CETELLI C, et al: Results of the representative Italian national survey on radon indoors. *Health Physics* 1996; *71*: 743-750
6. COMMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES: *Commission recommendation on the protection of the public against indoor exposure to radon - 90/143/Euratom*
7. COMMITTEE ON HEALTH RISKS OF EXPOSURE TO RADON: *Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI)*. Washington: National Academy Press, 1999
8. COMMITTEE ON THE BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATIONS: *Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters: BEIR IV*. Washington: NRC, National Academy Press, 1988
9. COORDINAMENTO 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*, 6 Febbraio 2003
10. DARBY S, HILL D, AUVINEN A, et al: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 2005; *6*: 330-223

11. DARBY S, HILL D, DEO H, et al: Residential radon and lung cancer detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7.148 persons with lung cancer and 14.208 without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 2006; 32: s84
12. DUSHE C, KUMMEL M, SCHULZ H: Investigations of enhanced outdoor radon concentration in Johannegeorgenstadt (Saxony). *Health Physics* 2003; 84: 655-663
13. FERLAY J, AUTIER P, BONIOL M, et al: Estimates of the cancer incidence and mortality in Europe in 2006. *Annals of Oncology* 2007; 18: 581-592
14. FISHER EL, FIELD RW, SMITH BJ, et al: Spatial variation of residential radon concentrations: the Iowa radon lung cancer study. *Health Physics* 1998; 75: 506-513
15. GERKEN M, KREIENBROCK L, WELLMANN J, et al: Models for retrospective quantification of indoor radon exposure in case-control studies *Health Physics* 2000; 78: 268-278
16. GROVES-KIRKBY CJ, DENMAN AR, CROCKETT RGM, et al: Time-integrating radon gas measurements in domestic premises: comparison of short-, medium- and long-term exposures. *Journal of Environmental Radioactivity* 2006; 86: 92-109
17. GUNBY JA, DARBY SC, MILES JCH, et al: Factors affecting indoor radon concentration in the United Kingdom *Health Physics* 1993; 64: 2-12
18. [http://www.arpa.veneto.it/agenti\\_fisici/docs/ri/delibera\\_n79.zip](http://www.arpa.veneto.it/agenti_fisici/docs/ri/delibera_n79.zip)
19. <http://www.bologna.enea.it/attivita/DepliantIRP.pdf>
20. [http://www.gt-analytic.at/engl/about\\_radon.htm](http://www.gt-analytic.at/engl/about_radon.htm)
21. <http://www.miam.it/eperm.html>
22. INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER: *Man-made Mineral Fibres and Radon*. Lyon: IARC, 1988 (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human)
23. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION: *Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters*. Oxford: ICRP Pergamon Press 50, 1987
24. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION: *Protection against Radon-222 at Home and at Work*. Oxford: Publication 65, Pergamon Press, 1993
25. KREWSKI D, MALLIK R, ZIELINSKI J, LETOURNOEAU E: Modelling seasonal variation in indoor radon concentrations. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2005; 15: 234-243
26. LUBIN JH, BOICE JR JD, EDLING C, et al: Lung cancer in radon exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. *J Natl Cancer Inst* 1995; 87: 817-27
27. LUBIN J, BOICE J, EDLING C, et al: *Radon and lung cancer risk: a joint analysis of eleven underground miners studies*. NHI Publication, January 1994; No 94: 3644
28. LUDWIG P, LORENSER S: Untersuchungen der grubenluft in den Schneeberger gruben auf den gehalt an radiumemanation. *Z Physik* 1924; 22: 178-185
29. MAGALHAES MH, AMARAL ECS, SACHETT I, ROCHEDO ERR: Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. *Journal of environmental Radioactivity* 2003; 67: 131-143
30. MINISTERO DELLA SALUTE: Piano Nazionale Radon, 2002
31. MINISTERO DELLA SALUTE: *Piano Sanitario Nazionale 1998-2000 : un patto di solidarietà per la salute*. Roma: Decreto del presidente della Repubblica 23 luglio 1998, 1999
32. MINISTERO DELLA SALUTE: *Piano Sanitario Nazionale 2006/2008*, Roma ([http://www.ministerosalute.it/imgs/C\\_17\\_pubblicazioni\\_507\\_allegato.pdf](http://www.ministerosalute.it/imgs/C_17_pubblicazioni_507_allegato.pdf))
33. MOMCILOVIC B, LYKKEN G: Seasonality of <sup>214</sup>Bi activity in the human body and of <sup>222</sup>Rn concentration in home ambient air *Health Physics. The Radiation Safety Journal* 2007; 92: 484-487
34. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION: *Radon Exposure of the US Population - Status of Problem*. Bethesda: National Council on Radiation Protections and Measurements, 1991: 16
35. SAMET JM: *Diseases of uranium miners and other underground miners exposed to radon. Environmental and Occupational Medicine*. Boston: Little Brown and Co, 1992.
36. SAMET JM, SPENGLER JD, eds: *Introduction in Indoor Air Pollution. A Health Perspective*. Baltimore: John Hopkins University Press, 1991
37. PERSHAGEN G, AKERBLUM G, AXELSON O, et al: Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *N Engl J Med* 1994; 330: 159-164
38. PIRCHAN A, SIKL H: Cancer of the lung in miners of Jachymov. *Am J Cancer* 1932; 16: 681-722
39. WILKENING M, WICKE A: Seasonal variation of indoor Rn at a location in the southwestern United States. *Health Physics* 1986; 51: 427-436
40. WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Indoor Air Quality. A Risk-Based Approach to Health Criteria for Radon Indoors*. Copenhagen: Doc. BUR/ICP/CEH 108(S), World Health Organization Regional Office for Europe, 1993

RINGRAZIAMENTI: *La realizzazione del presente lavoro è stata possibile grazie alla capacità professionale, all'impegno e alla dedizione profusi dal prof. Marco Maroni, mancato improvvisamente il 29 giugno 2006*