

INQUINAMENTO INDOOR: IL CASO DEL RADON

Nonostante il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e di impianti radiogeni di vario genere, il maggior contributo all'esposizione totale delle popolazioni alle radiazioni ionizzanti deriva dalle sorgenti naturali le cui fonti principali sono costituite dai raggi cosmici, dalla radiazione gamma terrestre, dal toron (Rn-220) e dal radon (Rn-222) e relativi prodotti di decadimento e dai radionuclidi interni al corpo. Il radon presenta aspetti peculiari rispetto agli altri inquinanti indoor non solo per le sue origini naturali, ma anche per la sua presenza in ogni luogo. I risultati di studi recenti dimostrano che l'esposizione al radon è un grave fattore di rischio, tanto che l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro inserisce il radon nella classe I.

Despite of the large use of radioactive substances and of radiogenic plants of different nature, the highest contribution to the total exposure of the populations to ionizing radiations comes from natural origins such as cosmic rays, earth gamma radiations, toron and radon. Recent researches show that radon is a very dangerous pollutant with the particular characteristic of the ubiquaruetly and natural provenance. Recently IARC indicated radon as first class cancerogenic agent.

Articles appearing in this journal are indexed in Environmental periodicals bibliography (Usa); Informascience (France); Institute of scientific information (ex Urss).

Nota

L. Campanella, Dipartimento Chimica, Università La Sapienza, Roma.

L'uomo, come è noto, durante la sua esistenza è sempre esposto alle radiazioni di origine cosmica e a quelle emesse dalle sostanze radioattive presenti nel suolo, nell'aria e nelle acque. Il termine radiazione viene abitualmente usato per descrivere fenomeni apparentemente assai diversi tra loro, quali l'emissione di luce da una lampada, di calore da una fiamma, di particelle elementari da una sorgente radioattiva, ecc. Caratteristica comune a tutti questi tipi di emissione è il trasporto di energia nello spazio. Questa energia viene ceduta quando la radiazione è assorbita nella materia. Ciò si può dimostrare constatando un aumento di temperatura in prossimità del punto in cui è avvenuto l'assorbimento, non è però l'unico effetto. Infatti, la luce può impressionare una lastra fotografica, il calore può generare un incendio, le particelle ionizzanti possono danneggiare l'organismo umano. L'azione lesiva delle particelle ionizzanti sull'organismo è una diretta conseguenza dei processi fisici di eccitazione e ionizzazione degli atomi e delle molecole dei tessuti biologici dovuti agli urti delle particelle, che sono dette appunto particelle ionizzanti o anche radiazioni ionizzanti, quando hanno energia sufficiente per produrre questi processi. A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta si usa distinguere tra radiazioni ionizzanti e radiazioni indirettamente ionizzanti. Sono direttamente ionizzanti le particelle cariche (elettroni, particelle beta, particelle alfa, etc.); sono invece indirettamente ionizzanti i fotoni (raggi X e raggi gamma), i neutroni, etc. Le particelle cariche, dotate di massa e di carica elettrica, e i neutroni, dotati di massa ma non di carica elettrica, sono radiazioni corpuscolari. I fotoni invece non hanno massa, né carica elettrica, sono radia-

zioni elettromagnetiche che si propagano con la velocità della luce. Le particelle cariche più comuni sono le particelle alfa e le particelle beta, che vengono emesse nei decadimenti radioattivi. Le prime si compongono di due neutroni e due protoni. Le altre sono del tutto simili agli elettroni, ma contrariamente a questi possono avere carica sia negativa che positiva. I neutroni sono emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente e nelle reazioni nucleari. Le radiazioni ionizzanti si propagano nello spazio e interagiscono con la materia vivente e non. I meccanismi di integrazione sono diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato. Ne segue una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali. Il maggior contributo all'esposizione totale della popolazione alle radiazioni ionizzanti, malgrado il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e di impianti radiogeni di vario genere, deriva dalle sorgenti naturali, le cui fonti principali costituite dai raggi cosmici, dalla radiazione gamma terrestre, dal Rn-220 (Toron) e Rn-222 (Radon), e dai rispettivi prodotti di decadimento e dai radionuclidi interni al corpo.

Generalità sul radon

Il radon è un gas nobile radioattivo naturale, inodore e incolore, che si presenta in tre isotopi: Rn-219, Rn-220 e Rn-222. È generato dal decadimento radioattivo del radio-226 presente ovunque, in concentrazioni variabili, nella crosta terrestre. Essendo un gas, viene emesso dal suolo nell'atmosfera, ove si disperde rapidamente non raggiungendo, se non in casi eccezionali, concentrazioni ritenute pericolose. Tuttavia se viene emesso all'interno degli edifici (o in luoghi con poca aerazione,

tipicamente miniere) il ridotto ricambio d'aria fa sì che si concentri fino a valori che aumentano di molto il rischio di effetti sanitari. La presenza di un edificio, inoltre, ha l'effetto di "aspirare" il radon presente nel suolo sottostante. Si misura in unità di attività: Bq/m³ (Becquerel per metro cubo). Di conseguenza, la concentrazione di radon negli edifici è molto variabile, sia in termini temporali (variazioni giorno/notte, variazioni con cicli meteorologici, e variazioni stagionali) sia in termini spaziali. Queste particolarità fanno sì che, per le valutazioni del rischio associato, siano necessarie misure che possono stimare la concentrazione media annuale. Riassumendo, le principali sorgenti di radon in ambienti chiusi sono: il suolo, i materiali da costruzione, l'aria esterna, l'acqua ed il gas naturale.

Formazione del radon dall'uranio e dal torio

È evidente che, trovandosi normalmente in natura, esso deve essere continuamente prodotto da qualche radionuclide primordiale: la catena di decadimento radioattiva cui fa parte il radon, infatti, comincia con l'uranio. L'uranio decade per produrre radio che, a sua volta, dà luogo al radon. In particolare, i tre radionuclidi primordiali che danno origine ai tre isotopi del radon sono U-238, Th-232, U-235 (figura 1), che sono i capostipiti delle tre famiglie radioattive naturali. Ciascun capostipite è instabile: esso decade emettendo una particella α e portando alla formazione di un altro isotopo radioattivo che, essendo instabile anche lui, decade a sua volta; il processo accompagnato da decadimenti in cui sono emessi tutti i tipi di radiazioni α , β e γ continua fino alla formazione di un isotopo stabile: in tutti i tre casi si tratta di un isotopo del piombo.

Questa serie di reazioni nucleari è chiamata serie della disintegrazione radioattiva.

Tecniche di rilevamento delle concentrazioni di radon indoor

Poiché gli effetti biologici del radon sono dovuti soprattutto ai suoi prodotti di decadimento,

gli strumenti di misura dovrebbero rilevare direttamente i "figli" del radon. Il più delle volte, comunque, vengono effettuate misure del gas radon. Uno dei motivi principali per cui si misura il Rn-222 (gas) è che con bassi costi si possono fare misure integrate per molti mesi in migliaia di luoghi contemporaneamente; invece per i "figli" questo comporterebbe costi elevatissimi. La strumentazione usata si basa principalmente sulla rilevazione delle particelle α , la quale consente di impiegare diverse tecniche di misura ad alta sensibilità. Una classificazione delle tecniche si basa sul campionamento del gas, che può essere effettuato per tempi brevi o lunghi e in modo passivo o in modo attivo: sono passive le tecniche in cui il gas entra nel sistema di rilevazione per diffusione naturale e sono indicate per lunghi periodi di misura (dell'ordine dell'anno); sono attive le tecniche che, con l'ausilio di pompe, forzano l'ingresso del gas nel sistema di rilevamento. Esse sono indicate per fornire risultati istantanei o per monitorare in continuo l'anda-

mento della concentrazione di radon.

I metodi per la misura del radon (e dei suoi prodotti di decadimento) sono diversi. Esistono, le "camere a scintillazione": esse sono strumenti in grado di "vedere" quando avviene una collisione fra una particella e una speciale superficie presente nel contatore. Nel caso delle particelle α , prodotte dal decadimento di Rn, Po-214, Po-218, questa superficie è ricoperta di solfuro di zinco opportunamente drogato con argento e, quando viene colpita da tali particelle, emette un sottile raggio luminoso. Il processo è noto come "scintillazione" e la luce emessa è rilevata da un fotomoltiplicatore. Il numero di impulsi elettrici, che derivano dalla conversione dell'energia luminosa in energia elettrica nel fotomoltiplicatore, è direttamente proporzionale al numero di particelle α . Questo strumento può essere usato sia nel caso in cui il campionamento venga effettuato a breve termine, sia nel caso di quello a lungo termine. Esistono, poi, i classici rilevatori a carbone che sfruttano la capacità da parte del carbone di assorbire le radiazioni γ , emesse dal radon e dai suoi figli, che vengono poi rilevate con un detector per raggi γ (ioduro di sodio). È un metodo che si presta per i campionamenti a breve termine (alcuni giorni), è passivo ed economico. Lo svantaggio principale è legato al tempo di dimezzamento del radon: il rivelatore a carbone, dopo l'esposizione, deve essere spedito velocemente ai laboratori di analisi prima che l'attività delle radiazioni γ decada a livelli non più rilevabili. È degli anni '80 una tecnica di misura delle particelle α emesse dal radon, che ha avuto grande diffusione per le sue caratteristiche di semplicità, facilità d'uso, poco ingombro e basso costo.

Si tratta di un sistema di tipo passivo, consistente in rivelatori a stato solido di tracce (Solid State Nuclear Track Detector), che si basano sulla rilevazione delle tracce (20-70 mm) lasciate dalle particelle α su un sottile foglio di plastica (nitrato di cellulosa, policarbonato, allidigli-

Tabella 1- Contenuto di radio-226 in alcuni materiali da costruzione

Materiale	Concentrazione di radio (Bq/Kg)
Mattoni argilla	20 - 200
Calcestruzzo	10 - 80
Cemento	10 - 50
Calcestruzzo con scisti alluminiferi	300 - 2500
Tufo	100 - 600
Granito	100 - 200
Fosfogesso	500-2000
Gesso naturale	5 - 20

Tabella 2 - Valori medi di radio riscontrati in Italia in alcuni tipi di materiali da costruzione

Materiale	Regione	C.(Bq/Kg)
Tufo	Campania	130 - 220
Tufo	Lazio	390 - 550
Pozzolana	Campania	215 - 230
Pozzolana	Lazio	440 - 510
Lava	Campania	709
Polvere vulcanica	Campania	108
Peperino grigio	Lazio	242
Peperino rosso	Lazio	256
Porfido Lombardia	300 -	477

colcarbonato), insensibile alle radiazioni g. Essi vengono lasciati nel luogo di interesse per settimane fino a 1 anno. Un opportuno trattamento chimico con idrossido di sodio o di potassio a temperatura di alcune decine di gradi, rende le tracce visibili ai normali microscopi. Il numero delle tracce, o meglio la densità, è proporzionale alla concentrazione di radon.

L'estrema semplicità di questo metodo di misura permette di effettuare indagini su vasta scala. Questo è un tipico rilevatore passivo, nel senso che l'aria viene campionata senza l'ausilio di pompe e, dunque, per un lungo periodo di tempo. È infatti, possibile effettuare per un breve (1-10 giorni) o per un lungo periodo di tempo (qualche mese o un anno): le misure del primo tipo sono effettuate a scopo di screening, ad esempio per discriminare velocemente, nel caso di indagini di un edificio, tra livelli di concentrazione alti, medi e bassi, perché non consentono di avere un quadro completo sulla presenza di radon in un ambiente. La concentrazione di radon, infatti, subisce notevoli fluttuazioni nel tempo a causa di vari fattori, come il tipo di suolo, le caratteristiche di costruzione, le abitudini delle persone, le condizioni atmosferiche, il variare delle stagioni: ad esempio, l'accumulo di elevate concentrazioni di radon risulta favorito nel periodo invernale piuttosto che in estate a causa della scarsa ventilazione dei locali o durante la notte anziché di giorno. I risultati vanno, perciò, maneggiati con attenzione.

Per ottenere risultati più attendibili è necessario effettuare monitoraggi per lunghi periodi: maggiore è la durata del campionamento, minore è la variabilità delle misure. In genere i livelli di azioni delle leggi o delle raccomandazioni si basano sulla stima della concentrazione media annuale, quindi misure di pochi giorni non sono rappresentative. Per questo tipo di misure sono indicati i detectors passivi, sia per la loro maneggevolezza, sia per i loro costi contenuti. Per un accurato monitoraggio è importante considerare con attenzione dove collocare i detectors. Essi andrebbero posti

in stanze del pianterreno scelte tra quelle più frequentate (camere da letto) poiché si passa lì la maggior parte del tempo. Per piccole abitazioni è necessario un solo misuratore.

Nel caso di edifici più grandi occorre almeno 1 detector ogni 100 m² di superficie abitabile. Gli apparecchi di misura non vanno posti in stanze poco frequentate come ripostigli, cantine o seminterrati e soprattutto non in cucina e bagno.

Vie e meccanismi di ingresso del radon nelle abitazioni

Il radon penetra:

- Attraverso l'intercapedine del muro d'ambito.
- Attraverso crepe o fessurazioni presenti.
- I punti di congiunzione piano di calpestio muro in evoluzione.
- Il pozzetto di raccolta delle acque.
- Gli spazi vuoti tra i condotti di servizio e le membrature portanti.
- Fessurazioni presenti nelle pareti perimetrali verticali.
- Emissione dai materiali da costruzione.
- Esalazione dall'acqua domestica.
- Ingresso attraverso l'aria esterna.

Lavori sperimentali a livello internazionale mostrano che il suolo è la via di ingresso più importante per il radon indoor. Il suolo emana radon praticamente ovunque: il radio, l'uranio e il torio sono, infatti, presenti su tutta la crosta terrestre; tuttavia, in presenza di particolari situazioni geologiche locali, si possono constatare emissioni anomale. Il suolo, costituito da roccia, materiale organico, minerali, liquidi, contiene dell'aria in cui può trovarsi mescolato il gas radon, prodotto da una sorgente di radio vicina. Dal suolo il radon può entrare in casa mediante un meccanismo di diffusione dovuto al fatto che, in assenza di movimento dell'aria, il radon diffonde attraverso il suolo da un punto ad alta concentrazione ad uno a bassa. La porosità del suolo influenza la velocità di diffusione del gas. Il meccanismo principale, però, è quello basato sulla differenza di

pressione tra ambiente esterno (dove la pressione è alta) e interno (dove la pressione è bassa) attraverso canali privilegiati di flusso all'interno delle abitazioni, quali pozzi e spaccature nelle cantine, crepe nelle fondazioni, giunture nelle tubature dell'acqua potabile e del gas naturale. Tale differenza di pressione è dovuta essenzialmente a due fenomeni: "effetto camino" e "effetto vento".

Quando l'esterno è più freddo dell'interno, tipicamente in inverno e di notte, l'aria calda interna è più leggera e tende perciò a salire ed uscire attraverso le fessure e aperture presenti nella parte superiore delle case.

Ciò comporta la depressurizzazione del resto dell'abitazione con conseguente richiamo dall'esterno, in particolare dal suolo, verso l'interno. La casa si comporta come un camino e il fenomeno è detto, appunto, "effetto camino". Il vento crea intorno alla casa un campo di pressione che si esercita sulle pareti e sul suolo dalla parte della costruzione da cui soffia il vento, spingendo il gas radon dentro casa. Inoltre il vento riesce spesso a produrre una suzione dell'aria della casa: l'effetto è simile al soffiare del vento sulla cima di un camino che induce un'aspirazione, anche quando non c'è un effetto camino dovuto alla differenza di temperatura, e perciò detto "effetto vento". Tra gli altri effetti ambientali, degno di nota è quello provocato dalla pioggia che determina innalzamenti del livello di radon interno: l'acqua piovana, infatti, saturando il suolo, impedisce al radon di diffondere nell'atmosfera. Ciò comporta un ingresso maggiore di radon in casa anche dovuto a una pressione idraulica.

I materiali da costruzione

Anche i materiali da costruzione possono rappresentare una sorgente rilevante di radon indoor, se contengono notevoli quantità di radio.

L'emanazione di radon dai materiali da costruzione dipende oltre che dalla concentrazione di radio, anche dalla frazione di radon prodotto che viene rilasciata, influenzata dalla poro-

sità del materiale e dalle finiture del materiale stesso. Il contenuto di radio -226 è variabile da materiale a materiale; i livelli più alti si riscontrano nel tufo, pozzolane, nel gesso e nei cementi contenenti scisti alluminiferi (Tabella 1).

Le concentrazioni nei mattoni e nel cemento ricavati da luoghi con elevati livelli di radioattività naturale possono essere elevate. Alcuni materiali naturali usati nell'edilizia di natura vulcanica (tufi e pozzolane) contengono alcune centinaia di Bq/Kg di radio, rappresentando, così, una fonte potenziale di radon maggiore rispetto ai mattoni pieni e forati. Il legno non contribuisce, invece, all'aumento della concentrazione di radon indoor, perché gli alberi non assorbono il radio nelle loro cellule. L'emissione di radon dipende dal coefficiente di diffusività che può variare molto anche nell'ambito dello stesso materiale. Essendo impossibile eliminare il contributo da parte dei materiali da costruzione, è necessario un attento esame dei materiali, prima di essere impiegati nelle costruzioni.

L'acqua domestica

Se la sorgente di radio è collocata vicino ad un pozzo, il radon si troverà sciolto nell'acqua e rimarrà lì confinato fino a quando non avrà modo di essere rilasciato in aria. Infatti, in presenza di aria, il radon disciolto nell'acqua passa facilmente in forma gassosa [27]. Perciò, quando l'acqua viene usata, il radon passa velocemente come gas nell'aria; laddove la concentrazione è molto alta, essa può anche contribuire in modo significativo ad elevare i livelli di radon indoor. La concentrazione di radon in acqua è in genere molto più elevata di quella nell'aria, però i livelli a cui queste concentrazioni diventano di interesse per la salute sono differenti nei due mezzi. Infatti l'ingestione di radon attraverso l'acqua potabile non costituisce un pericolo se non a livelli di centinaia di migliaia di pC/L. Come si può notare, le particelle a non riescono ad attraversare un foglio di carta, per cui esse sono incapaci di attraversare la mucosa gastrica per

danneggiare tessuti di organi vitali così come fanno, invece, nel caso del polmone. Solo quantità molto alte di radon nell'acqua possono tradursi in livelli significativi nell'aria: ciò avviene perché c'è solo un parziale trasferimento di radon dall'acqua all'aria e soprattutto perché il volume di acqua usato è piccolo rispetto al volume di aria dentro casa. L'EPA ha constatato che l'uso di acqua contenente 10.000 Bq/m³ di radon in media provoca un incremento del livello di radon interno di 1 Bq/m³. Tale rapporto varia in relazione al tipo di attività: con l'uso di acqua calda si libera una gran quantità di radon, per cui l'incremento interno di 1 Bq/m³, si può avere ogni 300 o ogni 100 Bq/m³ misurati nell'acqua. Come per il radon nell'aria anche in acqua la concentrazione varia moltissimo da casa a casa nello stesso luogo.

Il gas domestico

In alcune zone il gas naturale utilizzato per cucinare e per il riscaldamento, contiene elevate concentrazioni di radon, che viene rilasciato durante la combustione. Normalmente questa sorgente non è ovunque significativa e può essere monitorata nei punti di distribuzione. Il livello tipico di radon nel gas naturale è ca. 1000 Bq/m³, anche se è un valore che varia in continuazione.

L'aria esterna

In genere essa agisce come fattore di diluizione, poiché contiene basse concentrazioni di radon. I livelli di radon dipendono principalmente dalla pressione atmosferica e seguono l'andamento del tempo, con valori più alti di notte. Recenti misure rivelano valori di alcune decine di Bq/m³; concentrazioni di radon abbastanza alte nell'aria esterna si riscontrano vicino a sorgenti di radio. L'aria sopra gli oceani ha valori molto bassi (0,1 Bq/m³), dovuti alla minima presenza di radio nel mare e all'alta solubilità del radon nell'acqua a basse temperature. Pertanto, la concentrazione nell'aria esterna delle isole e regioni costiere è più bassa rispetto a quella dei paesi continentali. Il valore medio della

concentrazione esterna di radon è 5-10 Bq/m³ per le aree continentali e qualcosa in meno nelle regioni costiere. In genere le quantità ordinarie di radon presenti nell'aria esterna non destano preoccupazione dal punto di vista sanitario.

Distribuzione sul territorio

Il radon proveniente dal sottosuolo trova all'interno delle abitazioni, canali privilegiati di flusso; il problema della radioattività naturale in genere, internamente alle case, è stato affrontato dalle autorità nazionali dei Paesi industrializzati in modi e tempi assai differenti nel corso degli ultimi trent'anni. Quando, sulla base di modelli fisici, dosimetrici di studi sugli animali e studi epidemiologici sull'uomo, l'esposizione al radon è stata collegata con il rischio di cancro al polmone, in vari Paesi sono iniziati studi volti a stabilire la distribuzione del radon interno sul territorio.

Distribuzione a livello mondiale

Gli Stati Uniti, la Svezia e la Gran Bretagna rappresentano le nazioni che per prime affrontano il problema radon. Varie indagini sono state condotte negli anni '80 sia da organismi centrali che da imprese private o nell'ambito della ricerca universitaria. Altri Paesi europei, come la Francia, hanno approntato studi per determinare la distribuzione del radon interno, ma si tratta di studi non ancora in grado di fornire un valore medio nazionale rappresentativo. Nella tabella 3 sono riportate le concentrazioni medie annuali misurate in alcuni Paesi, fornite dall'UNSCEAR nel 2000.

Distribuzione sul territorio italiano

Anche in Italia sono stati eseguiti diversi studi con lo scopo di determinare la concentrazione di radon all'interno delle abitazioni. La natura geologica del territorio italiano fa presumere che esistano elevati valori di concentrazione di radon indoor. Infatti è stata evidenziata l'importanza assunta dalla radioattività superficiale dei suoli e l'esistenza di "punti caldi" sul

territorio con livelli di radon piuttosto alti. In generale, comunque, in tutta Italia vengono riscontrati livelli più alti della media mondiale anche in aree non particolarmente radioattive in superficie, livelli che potrebbero essere dovuti alla permeabilità del terreno.

Nella tabella 4 sono indicati i livelli di riferimento per il gas radon nei sistemi abitativi raccomandati da alcuni Paesi e da alcune Organizzazioni. Sul finire degli anni '80 l'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA) e l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) hanno avviato un'indagine nazionale, in collaborazione con le Regioni e le strutture sanitarie, eseguita su un campione rappresentativo di circa 5000 abitazioni collocate in 200 comuni con lo scopo di valutare sia l'esposizione media della popolazione italiana alla radioattività nelle abitazioni, sia la distribuzione della concentrazione di radon indoor.

L'indagine si è svolta tra il 1988 e il 1994 su tutto il territorio nazionale con la sola eccezione della Calabria e della Sicilia; nel 1997 è stata svolta l'indagine anche nelle due regioni. Come sistema di misura sono stati adottati i rivelatori a stato solido di tracce.

La concentrazione media di radon è risultata essere di circa 70 Bq/m³: tale valore è da considerarsi medio-alto se paragonato con la media mondiale (pari a ca. 46 Bq/m³) stimata dall'UNSCEAR nel 2000. Il 5% delle abitazioni presenta concentrazioni superiori a 200 Bq/m³ e l'1% a 400 Bq/m³. Tra gli obiettivi dello studio condotto c'è stato, da un lato, quello di verificare eventuali correlazioni tra la concentrazione di radon nei sistemi abitativi ed alcuni parametri, quali la geologia del suolo, distanza dal suolo, le caratteristiche climatiche del luogo, i materiali da costruzione adoperati. Le peculiarità geologiche dei suoli (presenza di aree granitiche, di zone carsiche, di rocce vulcaniche) e le proprietà dei materiali da costruzione utilizzati (soprattutto in termini di contenuto di uranio, torio e radio e di permeabilità) influenzano in maniera determinante

Tabella 3 – Concentrazioni medie annuali di alcuni paesi

Paese	Concentrazione media annuale (Bq/m ³)
Australia	11
USA	46
Canada	34
Svezia	108
Germania	50
Cecoslovacchia	140
Gran Bretagna	20
Spagna	6
Paesi Bassi	29
Albania	120
India	57

Tabella 4 – Livelli di riferimento raccomandati (espressi in Bq/m³)

Paese/Organizzazione	Abitazioni esistenti	Abitazioni future
Belgio	250	250
Canada	800	800
CEC	400	200
EPA (USA)	150	150
Finlandia	400	200
Germania	250	250
ICRP (1984)	400	200
ICRP (1993)	200-	600 -
Irlanda	200	200
Norvegia	200	200
Svezia	400	200
Gran Bretagna	200	200

la variabilità riscontrabile tra i livelli di radon indoor tra una zona e l'altra del Paese (figura 8): dai 20-40 Bq/m³ registrati in regioni come la Basilicata, la Liguria, le Marche si passa a ca. 100 Bq/m³ in Lombardia, Friuli Venezia Giulia, Lazio e Campania.

La situazione normativa in Italia

Per quanto riguarda la normativa si deve distinguere tra ambienti di lavoro e ambienti domestici.

Per gli ambienti di lavoro è stato pubblicato il 31 agosto 2000 il Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241 di attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti. Nel decreto sono indicati gli adempimenti dei datori di lavoro (controlli, misure, even-

tuali azioni di risanamento, etc.) nei confronti del problema del radon. Tra gli ambienti di lavoro rientrano anche le scuole. È stabilito, tra gli altri, un livello di azione di 500 Bq/m³, superato il quale devono essere adottati provvedimenti volti a ridurre l'esposizione al radon. Fin da subito dovranno essere misurati tutti gli ambienti di lavoro sotterranei. Entro 5 anni le Regioni dovranno indicare le aree in cui stabilire l'obbligo di effettuare controlli della concentrazione di radon anche negli ambienti di lavoro in superficie.

Per gli ambienti domestici non vi sono, attualmente, normative italiane.

Deve essere sottolineato che le esposizioni in ambienti domestici possono essere, in molti casi, superiori, in virtù del maggior tempo di permanenza e per il fatto che molto di questo tempo è trascorso di notte, durante la quale le concentrazioni sono, generalmente, superiori alla media.

Molti Paesi hanno emanato delle raccomandazioni nelle quali si indicano dei livelli di azioni superati i quali, appunto, si raccomanda di adottare provvedimenti per ridurre la concentrazione di radon. Una raccomandazione della Comunità Europea (90/143/EURATOM del 21/02/90) suggerisce di intervenire con azioni di rimedio nel caso vi siano livelli di radon superiori a 400 Bq/m³ in abitazioni esistenti, mentre per le abitazioni nuove il valore di riferimento è posto pari a 200 Bq/m³.

Solo pochi Paesi hanno invece imposto per legge livelli massimi di concentrazione superati i quali vi è l'obbligo di intervenire.

Effetti sanitari e rischio associato

Il principale effetto sanitario causato dal radon e dai suoi prodotti di decadimento è il tumore polmonare prodotto dalle interazioni delle radiazioni alfa con i nuclei delle cellule dell'apparato respiratorio.

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), della Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO), ha valuta-

to la cancerogenicità del radon nel 1988 e lo ha inserito nel gruppo 1, in cui, attualmente, sono classificate le 75 sostanze, misture o condizioni di esposizione che sono state riconosciute come cancerogene per gli esseri umani.

L'Agenzia per la Protezione Ambientale degli Stati Uniti (US EPA) ha inserito il radon nel gruppo A, in cui sono classificate le sostanze definite come cancerogene per l'uomo. Le evidenze sulla cancerogenicità del radon derivano da studi molecolari, cellulari, sugli animali e soprattutto da studi epidemiologici. Il meccanismo di induzione del tumore da parte delle radiazioni è un processo complesso, non ancora noto, che avviene in più stadi, che possono essere influenzati, ognuno, da altri fattori. Per quantificare il rischio sanitario per la popolazione associato all'esposizione al radon e ai suoi prodotti di decadimento, la tendenza attuale è

quella di basarsi principalmente sugli studi epidemiologici sui minatori. Diversi modelli di calcolo per la valutazione dell'aumento di rischio di tumore polmonare sono stati sviluppati e discussi negli ultimi decenni. La principale assunzione che viene fatta in questi modelli è la linearità senza soglia tra il rischio di tumore polmonare e l'esposizione al radon.

Tale assunzione è in parte giustificata e spiegabile dal fatto che, in particolare per i livelli di esposizione rilevati normalmente negli edifici residenziali, raramente una cellula epiteliale del polmone sarà attraversata da più di una singola radiazione alfa nel corso della vita umana. La probabilità di insorgenza di un tumore non dipende, quindi, dal numero di radiazioni che attraversano una cellula, ma dal numero totale delle cellule colpite che è proporzionale all'esposizione.

Il passaggio di una singola

particella alfa attraverso il nucleo della cellula causa importanti cambiamenti nel genoma (viene danneggiato il DNA), incluse mutazioni e trasformazioni.

Nella maggior parte dei casi tali danni sono riportati, ma potenzialmente si possono formare cellule modificate che si riproducono dando origine ad un processo cancerogeno. In definitiva, sembra che sia una singola interazione tra una singola cellula e una singola radiazione alfa, in assenza di regolari processi di riparazione, il principale evento dal quale scaturisce lo sviluppo del tumore.

Tra i vari fattori che entrano in gioco nel meccanismo di formazione del tumore è senz'altro da porre l'accento sul fumo. La combinazione tra fumo e radon ha un effetto sinergico, più che sommatorio.

Deve essere sottolineato che le stime effettuate sono affette da una notevole incertezza. Ad

esempio l'EPA afferma che il numero di 15000 casi per anno di tumori polmonari, è la migliore stima, ma il valore può variare da 7000 a 30000. Vi è, comunque, un consenso generale sul fatto che l'esposizione al radon rappresenta dopo il fumo diretto, la seconda causa di morte per tumore polmonare. L'esposizione al radon è stata presa in considerazione nel Piano Sanitario Nazionale 1998-2000 del Ministero della Sanità. Nel documento è riportata una stima sull'incidenza dei tumori polmonari attribuibili al radon: il 5-20% di tutti i tumori polmonari.

Annualmente in Italia vi sono circa 36.000 casi di tumore polmonare; ciò significa che il radon è ritenuto responsabile di ca. 1800-7200 casi ogni anno. Oltre, i risultati di alcuni studi ecologici hanno indicato un possibile effetto del radon per alcuni tipi di leucemie e tumori non polmonari. ■