ISSN 2282-5746

# Fisica in Medicina

*Periodico trimestrale di formazione, informazione e aggiornamento dell' Associazione Italiana di Fisica Medica*

aifm
ASSOCIAZIONE ITALIANA DI FISICA MEDICA

*Supplemento al N. 1- 2015*

# RADON
# MONITORAGGIO, NORMATIVA E RISCHI PER LA SALUTE UMANA

FEDERAZIONE ITALIANA RICERCHE SULLE RADIAZIONI

V WORKSHOP INTERDISCIPLINARE FIRR

**Sala Conferenze della Scuola di Medicina**
**Seconda Università degli Studi di Napoli**

**Napoli 28 novembre 2014**

FEDERAZIONE ITALIANA RICERCHE SULLE RADIAZIONI

## V WORKSHOP INTERDISCIPLINARE FIRR

# RADON
# MONITORAGGIO, NORMATIVA E RISCHI PER LA SALUTE UMANA

**Sala Conferenze della Scuola di Medicina**
**Seconda Università degli Studi di Napoli**
**Via Santa Maria di Costantinopoli, 104**

**Napoli 28 novembre 2014**

## Programma

8.30 Apertura dei Lavori e Saluto Autorità

Rettore SUN
*Giuseppe Paolisso*

Presidente FIRR
*Donatella Tirindelli Danesi*

I Sessione:
Moderatori: *Raffaele De Vita (FIRR), Francesco Schillirò (SIRM)*

9.00 **Natura origine e diffusione del radon**
*Leonardo Chiatti (AIFM)*

9.30 **Tecniche di misura del radon e dei suoi prodotti di decadimento**
*Francesco Cardellini (ENEA)*

10.00 **L'esposizione al radon negli ambienti di lavoro: livelli medi, criticità e modalità di attuazione della normativa vigente**
*Rosabianca Trevisi (AIRP-INAIL)*

10.30 **Il radon negli ambienti scolastici della Campania**
*Mariagabriella Pugliese (SIRR)*

11.00 discussione

II Sessione:
Moderatori: *Luisa Begnozzi (AIFM), Carmela Marino (SIRR)*

11.30 **Quali rischi per la salute**
*Andrea Magistrelli, (SIRM) Francesco Schillirò (SIRM)*

12.00 **Dalla normativa attuale nazionale alla direttiva europea 59/2013 per il Radon: cosa cambia?**
*Sandro Sandri (AIRP)*

III Sessione:
Moderatori: *Roberto Moccaldi (AIRM), Antonio Rotondo (SIRM)*

12.30 **Monitoraggio dei livelli di radon indoor presso la Seconda Università di Napoli**
*Antonio D'Onofrio ( UNINA2)*

13.00 **La rilevazione del radon e del Toron con strumenti attivi ad elevata risoluzione**
*Carlo Sabbarese (UNINA2)*

13.30 14.30 Discussione e conclusioni

## Con il Patrocinio

Seconda Università degli Studi di Napoli

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

## Consiglio Direttivo FIRR

D. Tirindelli Danesi (Presidente),R. De Vita (Segretario/Tesoriere)
L. Begnozzi, A. Lazzari (AIFM);O. Geatti, M. Chianelli (AIMN)
R. Corvò, A. Morganti (AIRB); R. Moccaldi, G. De Luca (AIRM)
M.C. Cantone, A. Giovanetti (AIRP); F. Coppolino, F. Schillirò, (SIRM); C. Marino (SIRR)

## Comitato Organizzativo FIRR

R. De Vita (FIRR), M. Pacilio (AIFM), M. Chianelli (AIMN), A. Morganti (AIRB),
R. Moccaldi (AIRM), A. Giovanetti (AIRP), A. Magistrelli (SIRM), A. Campa (SIRR)

## Informazioni generali

Il Workshop, è accreditato dall'**AIFM**
(Provider Nazionale n. 416-111511)

Crediti formativi ECM n° 6
per tutte le Professioni

## Segreteria Scientifica e Organizzativa FIRR

*Federazione Italiana Ricerche sulle Radiazioni*

*associazione senza fini di lucro*
*c/o Unità Biologia delle Radiazioni e Salute dell'Uomo*
*ENEA - Centro Ricerche Casaccia s.p. 016 - Via Anguillarese 301 - 00123 Roma*
*Tel.: 06 30484671 – Fax: 06 30484891*
*radiazionifirr@enea.it - devita@enea.it - - http://firr.casaccia.enea.it*

**INDICE**

**Natura origine e diffusione del radon** 7
*Leonardo Chiatti (AIFM)*

**Tecniche di misura del radon e dei suoi prodotti di decadimento** 12
*Francesco Cardellini (ENEA-Roma)*

**Il radon negli ambienti scolastici della Campania** 17
*Mariagabriella Pugliese (SIRR)*

**Quali rischi per la salute** 20
*Andrea Magistrelli, (SIRM) Francesco Schillirò (SIRM)*

**Dalla normativa attuale nazionale alla direttiva europea 59/2013 per il radon: cosa cambia?** 24
*Sandro Sandri (AIRP)*

**Livelli di Radon in luoghi di lavoro di tre università campane** 27
*Antonio D'Onofrio ( UNINA2), Carlo Sabbarese (UNINA2)*

# NATURA, ORIGINE E DIFFUSIONE DEL RADON

**Leonardo Chiatti (AIFM)**
**U.O. Fisica Sanitaria ASL Viterbo**

email: fisica1.san@asl.vt.it

## INTRODUZIONE

Lo scopo di questo contributo è quello di fornire un riassunto conciso delle caratteristiche essenziali del Radon, con particolare riferimento alla sua natura chimica e le proprietà nucleari, la sua origine e la sua diffusione nell'ambiente. Si vuole fornire una panoramica veloce degli aspetti più importanti dal punto di vista radioprotezionistico e sanitario, propedeutica ad ulteriori approfondimenti che sono oggetto delle successive presentazioni di questo workshop.

## PROPRIETÀ CHIMICHE E FISICHE

Il Radon è un elemento chimico, precisamente l'elemento di numero atomico 86; il suo simbolo è Rn. Alla pressione atmosferica esso solidifica a -71 °C e bolle a -61 °C, quindi alle normali temperature ambientali si presenta sempre in forma gassosa. E' molto denso: la sua densità a pressione atmosferica ed alla temperatura di 0 °C è 9,73 g/l, circa 8 volte quella dell'aria.

Il Radon appartiene al Gruppo VIII della Tavola Periodica degli Elementi, quello dei "gas nobili" ossia degli elementi che presentano lo strato elettronico più esterno completamente saturato ed hanno pertanto una reattività chimica bassissima. Nonostante questa loro "inerzia", tuttavia, anche essi formano dei composti. Il Radon, in particolare, reagisce con l'acqua dando origine a dei cosiddetti "clatrati". L'unità base di questi composti è costituita da uno o più atomi di Radon solvatati da molecole di acqua. I clatrati sono molto instabili e per riscaldamento o agitazione meccanica il Radon torna nuovamente libero in forma gassosa. Tuttavia la esistenza di questi composti rende l'acqua un buon vettore di Radon.

Organoletticamente il Radon è incolore, insapore ed inodore e pertanto sfugge alla rivelazione diretta dei sensi umani.

Da un puto di vista nucleare, sono noti 39 isotopi del Radon, tutti radioattivi, con un numero di massa variabile da 195 a 229. Tuttavia gli isotopi presenti in natura, i soli ai quali dedicheremo la nostra attenzione, sono solamente tre. Essi sono il $Rn^{222}$, il Radon propriamente inteso o "emanazione del Radio"; il $Rn^{220}$, chiamato anche Thoron o "emanazione del Torio"; il $Rn^{219}$, chiamato anche Actinon o "emanazione dell' Attinio". Il termine oramai storico "emanazione" è a dire il vero un pò desueto oggi, ma rende bene la origine di questi differenti isotopi, come vedremo.

## PROPRIETÀ NUCLEARI

Sia il Radon, che il Thoron e l' Actinon sono alfa-emettitori puri:

$$Rn^{222} \rightarrow Po^{218} + \alpha \quad \text{emivita} = 3{,}82 \text{ gg}$$
$$Rn^{220} \rightarrow Po^{216} + \alpha \quad \text{emivita} = 54{,}5 \text{ sec}$$
$$Rn^{219} \rightarrow Po^{215} + \alpha \quad \text{emivita} = 3{,}92 \text{ sec .}$$

La presenza di questi isotopi nel mondo naturale è dovuta alla loro appartenenza a tre distinte famiglie radioattive, rispettivamente quella dell' Uranio (capostipite $U^{238}$), quella del Torio (capostipite $Th^{232}$) e quella dell' Attinio (capostipite $U^{235}$). Le tre catene di decadimento sono illustrate rispettivamente in Fig.1, Fig.2, Fig.3 (fonte: Wikipedia).

Come si vede, i tre isotopi del Radon sono generati dal

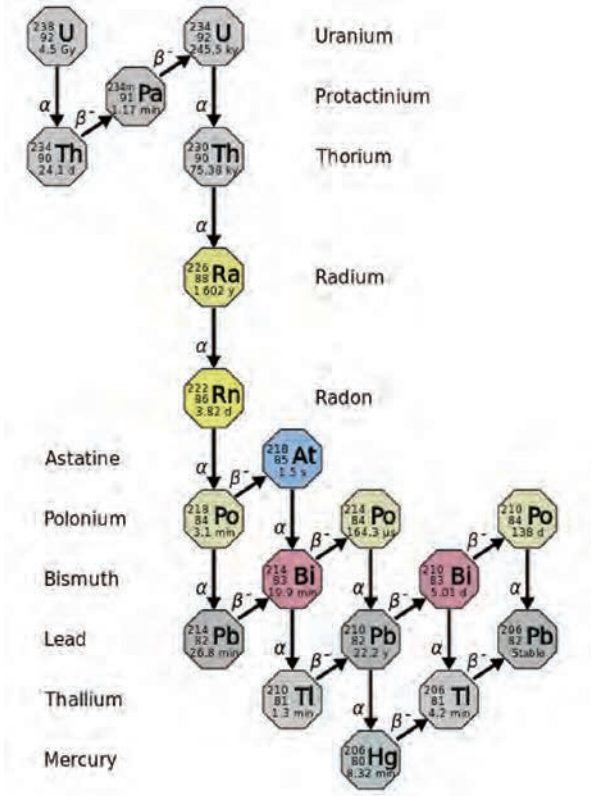



Fig.1; Famiglia dell'Uranio.

decadimento alfa di tre distinti isotopi del Radio, rispettivamente il $Ra^{226}$, il $Ra^{224}$ ed il $Ra^{223}$.

Questi tre isotopi del Radio sono distribuiti in modo abbastanza ubiquitario nelle rocce e nei terreni, che sono quindi la effettiva sorgente di isotopi del Radon nell'ambiente terrestre.

A questo punto possiamo già delineare la dinamica di

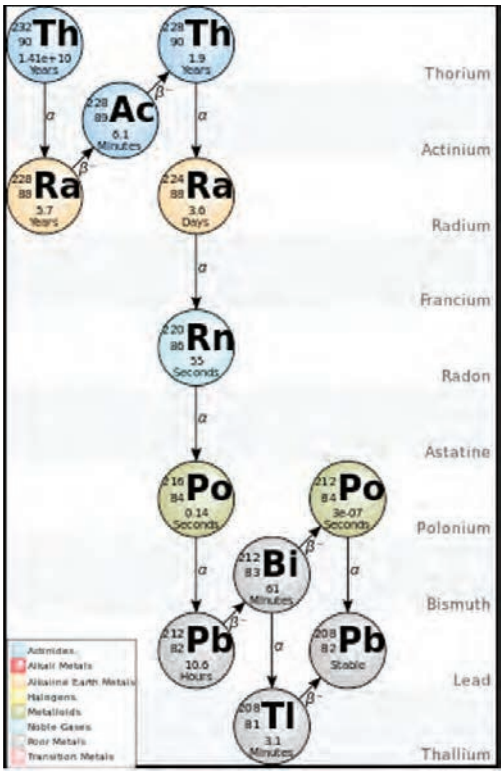



Fig.2; Famiglia del Torio.

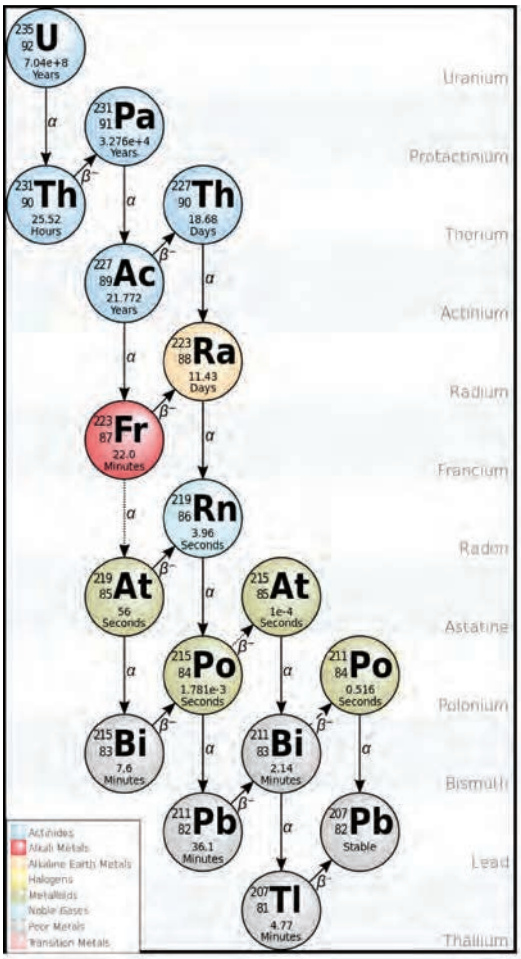



Fig. 3; Famiglia dell'Attinio.

questi isotopi sulla base dei dati che abbiamo fin qui elencato.

Gli elementi minerali della crosta terrestre contengono isotopi del Radio appartenenti alle tre famiglie. Il decadimento di questi isotopi produce il corrispondente isotopo del Radon. Poiché il Radon è un gas nobile, esso non si combina con gli elementi della matrice minerale e, data la sua natura gassosa, migra all'interno di tale matrice. Tale migrazione avverrà sia per semplice diffusione entro la matrice, sia per percolazione attraverso le microfessure, le superfici di clivaggio e gli interstizi in essa presenti. In tal caso, essa sarà fortemente facilitata. Quindi in materiali porosi e/o fessurati la migrazione sarà più agevole.

Una quota del Radon prodotto raggiungerà l'atmosfera e si diluirà in essa, processo favorito dalle correnti d'aria; si ha così il Radon *outdoor*.

Una quota minima penetrerà negli edifici e si concentrerà negli ambienti confinati al loro interno dando luogo al cosiddetto Radon *indoor*. Il problema sanitario è naturalmente ristretto a questa forma di Radon, data l'estrema diluizione del Radon outdoor.

La forte differenza delle emivite dei tre isotopi del Radon conduce ad una importante differenza nei loro livelli di concentrazione indoor. Infatti l'Actinon, con la sua brevissima emivita, difficilmente riesce ad uscire dalla matrice d'origine (non ne ha il tempo). Il Thoron, d'altra parte, riesce ad uscire ma rimane sempre molto vicino alla parete nella quale è stato originato, formando un alone di pochi centimetri di spessore. Sicché il Radon indoor è costituito quasi per intero dal solo isotopo 222, al quale restringeremo le nostre considerazioni.

Come si vede, l'emivita del $Rn^{222}$ è molto più lunga del periodo di permanenza di una data quantità d'aria nel polmone, per cui quasi tutto il Radon inspirato viene espirato prima che decada. L'esposizione interna diretta da Radon è quindi poco significativa da un punto di vista sanitario. Comunque, il Radon è in equilibrio secolare con i suoi figli (Po, Pb, Bi) che, a differenza del padre, sono solidi e come tali aderiscono al pulviscolato atmosferico sempre presente negli ambienti confinati. Questi figli vengono inalati con il pulviscolato (o liberi) e aderiscono alle mucose delle vie aeree, soprattutto nelle zone di maggior ristagno (alveoli). Essendo alfa e beta-emettitori essi irradiano l'epitelio alveolare, diventando così fattore di rischio per il carcinoma alveolare [ad oggi l'unica patologia associabile con certezza a tale processo]. È possibile che anche i figli del Thoron (che, a differenza del padre, non rimangono confinati in prossimità della parete) contribuiscano a tale effetto detrimentale.

## IL PERCORSO DEL RADON

Dato che il problema sanitario associato al Radon è costituito dalla sua radioattività, conviene parlare della concentrazione di Radon in aria esprimendola direttamente in Becquerel al metro cubo ($Bq/m^3$), ovvero in disintegrazioni radioattive per secondo in un metro cubo. Per dare una idea, i livelli tipici di Radon outdoor sono compresi in 5-10 $Bq/m^3$, mentre in ambienti

chiusi la concentrazione di attività arriva facilmente a 50 Bq/m³. In ambienti sotterranei senza ricambio d'aria si può arrivare a migliaia di Bq/m³. Ci riferiamo qui alla attività del padre, ma i figli sono in equilibrio con esso. Un valore di 300 Bq/m³ è il limite di azione raccomandato dalle più recenti direttive europee.

| Pietra Ornamentale | Tipo | Provincia | Ra-226 Bq/Kg | Th-232 Bq/Kg | K-40 Bq/Kg |
|---|---|---|---|---|---|
| MONTE BIANCO | Gneiss | AO | 166 | 86 | 832 |
| PIETRA DI LUSERNA | Gneiss | CN | 125 | 114 | 1276 |
| SIENITE GRIGIA A GRANA FINE | Sienite | VC | 364 | 256 | 1264 |
| GRANITO ROSATO S. PAOLO CERVO | sienite | VC | 239 | 189 | 1206 |
| GRANITO BIANCO DI CAMPIGLIO | sienite | VC | 269 | 173 | 1181 |
| ROSA CERVO | Granito | VC | 348 | 197 | 1210 |
| PEPERINO ROSATO | Peperino | VT | 124 | 162 | 1351 |
| PEPERINO GRIGIO | Peperino | VT | 121 | 160 | 1340 |
| BASALTINA | Basalto | VT | 498 | 712 | 2354 |

Tabella 1; Concentrazione di progenitori del Radon in alcune pietre ornamentali (è riportato inoltre il K40). Estratto da "Il Radon nella Casa - di U. Facchini, Gianluigi Valli, R. Vecchi - Ist. di Fisica Gen. Applicata - Universita' di Milano - Maggio 1991.

Il Radon entra negli edifici essenzialmente attraverso due vie: il sottosuolo ed i materiali da costruzione. Per quanto riguarda il sottosuolo, va rilevato che gli isotopi del Radio sono distribuiti in maniera abbastanza ubiquitaria sia nelle rocce magmatiche (tufi, pozzolane, basalti), sia in quelle metamorfiche (gneiss) sia in quelle sedimentarie (argille), anche se in quantità variabili.
Il contenuto di Radon nel suolo è ovviamente dipendente dalla concentrazione di questi isotopi, ed è fortemente dipendente dal luogo. A titolo di esempio, in Fig.4 è riportata la mappa geologica dell' Alto Lazio (provincia di Viterbo) con sovrimpressi dei punti di misura di una campagna eseguita alcuni anni fa da Arpa Lazio (dott. Tentolini). La concentrazione di Radon misurata su campioni di suolo interamente sbriciolati è riportata secondo un codice di colore. La variabilità in funzione del luogo è evidente.

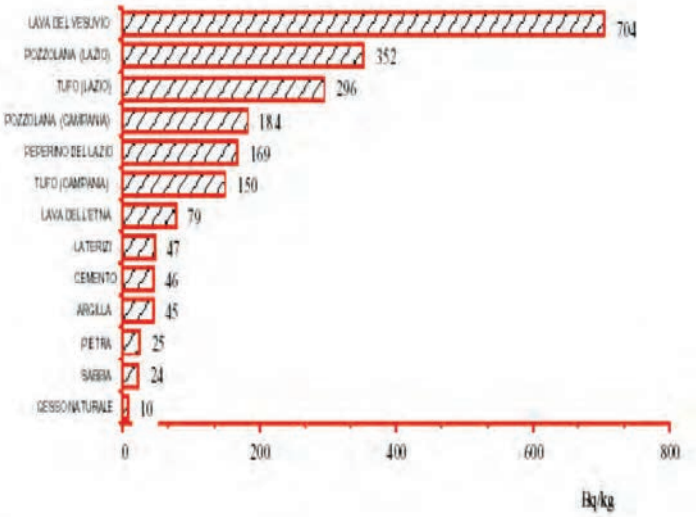



Fig. 5; Concentrazione di Ra226 in alcuni materiali da costruzione portanti/leganti.
Fonte: G. Sciocchetti, AAI - NT III.2 - Radon nell'Alto Lazio.

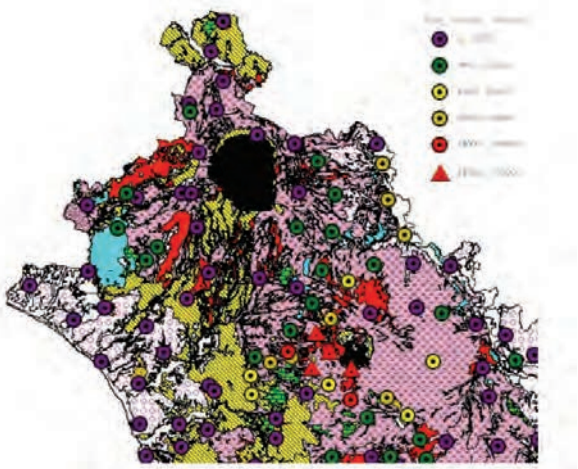


Fig. 4; Concentrazioni di Radon nel suolo dell' Alto Lazio.
Fonte: Arpa Lazio.

Per quanto riguarda invece i materiali da costruzione, in Tabella 1 sono riportate le concentrazioni di progenitori del Radon in alcune pietre ornamentali. Di particolare rilievo risultano essere il tufo, le pozzolane, il peperino ed i materiali basaltici. La Figura 5 mostra invece le concentrazioni di Radon in alcuni materiali da costruzione usati come leganti o portanti.
Mentre l'ingresso di Radon in un edificio dai materiali da cotruzione non richiede ulteriori spiegazioni, è necessario un approfondimento per quanto riguarda l'input dal suolo. Il Radon entra nei piani bassi o interrati/semi-interrati di un edificio attraversando il pavimento e le eventuali pareti in comunicazione con il suolo. Tale attraversamento può avvenire per diffusione, ma è enormemente facilitato se sono presenti interstizi o fratture nel pavimento e nelle pareti.
L'agevolazione del processo è massima quando sono presenti scale con accesso diretto al sottosuolo, il ché può avvenire con cantine o depositi scavati direttamente nella roccia.

L'ingresso di Radon non è costante, ma presenta almeno una variabilità diurna ed una stagionale. In linea di massima, la concentrazione di Radon in un edificio cresce durante la notte e diminuisce nel corso della mattinata; il picco notturno tende poi ad essere maggiore d'inverno e minore d'estate. Questa variabilità è dovuta alla modulazione indotta da due effetti: l'effetto camino e l'effetto vento.

L'effetto camino è causato dalla differenza di temperatura tra il vano interrato/semi-interrato ed il suolo circostante; questo gradiente di temperatura provoca il risucchio del Radon all'interno del vano. Di norma tale gradiente è maggiore di notte che di giorno, e maggiore d'inverno che d'estate, a causa del riscaldamento del vano; ciò determina le variabilità descritte.

In edifici esposti a venti dominanti su una facciata si ha una pressione locale (dinamica) maggiore sulla facciata esposta e minore sulla facciata opposta, che rimane "in ombra". Questo gradiente di pressione può contribuire al risucchio di Radon nei vani bassi ed in ciò consiste l'effetto vento.

È necessario precisare che la concentrazione indoor non è connessa in modo semplice e diretto alla concentrazione di Radon nel suolo sul quale l'edificio poggia. Molti altri fattori sono determinanti, ad esempio: la ventilazione degli ambienti (un maggiore ricambio d'aria con l'esterno ostacola l'accumulo del gas), la presenza/assenza di vani interrati/semi-interrati in collegamento con il resto dell' edificio (che sono potenziali camere di accumulo per il gas), la già menzionata presenza di interstizi o fessure nelle opere in muratura o nei pavimenti a contatto con il suolo, la eventuale presenza di intercapedini sotto l'edificio o tra le pareti esterne sotto il piano di campagna ed il suolo (che riduce notevolmente l'ingresso di gas), i materiali da costruzione, la presenza/assenza di intonacatura (questa ostacola il flusso di Radon attraverso le pareti) e così via.

Come si intuisce, molto dipende anche dalle finalità dell' edificio e dagli stili di vita degli occupanti. Ad esempio un edificio pubblico come un municipio od una scuola resta chiuso durante il fine settimana, ed in corrispondenza di tale periodo si ha un accumulo di Radon che invece non si manifesta in un' abitazione privata; l'abitudine di "cambiare aria" alla mattina, aprendo le finestre anche di inverno per qualche minuto, conduce alla espulsione dell'accumulo notturno di gas, e così via.

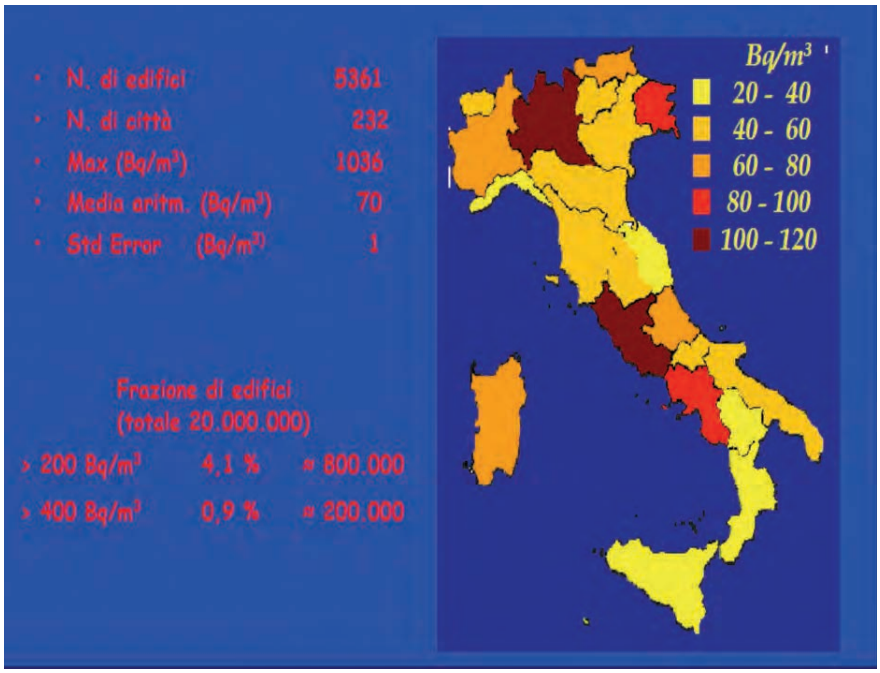



Fig.6; Risultati della storica indagine ISS-ISPRA.

## IL RADON INDOOR IN ITALIA

Sono state svolte diverse campagne di misurazione della concentrazione di Radon indoor nelle abitazioni e negli edifici pubblici in Italia. In questa presentazione introduttiva ci limitiamo a presentare la mappa risultante da una indagine nazionale condotta da ISS ed ISPRA negli anni 1980-90 (Fig. 6). In tale mappa sono riportati i valori medi per regione, mediante un codice a colori. Si vede facilmente che la situazione è fortemente disomogenea in funzione della regione ma si potrebbe dimostrare, analizzando altri dati relativi a campagne regionali sulle quali non ci dilunghiamo, anche una forte disomogeneità all'interno delle singole regioni. Ad esempio la Lombardia, che risulta essere una delle regioni a maggior "rischio", in realtà è interessata al fenomeno solamente in corrispondenza delle sue provincie più settentrionali.

Ad ogni modo si stima una concentrazione media nazionale di 70-75 Bq/m$^3$, con un 4 % di edifici al disopra di 200 Bq/m$^3$. Se si tiene conto che la concentrazione media mondiale, stimata dall' UNSCEAR, è di 40 Bq/m$^3$ si può dire che il Radon indoor costituisce, a livello nazionale, un problema al quale prestare attenzione.

Naturalmente l'edificio entro il quale il Radon penetra può essere indifferentemente un ambiente di vita o di lavoro. Il Radon è dunque un problema sia di radioprotezione ambientale che occupazionale. Mentre la esposizione occupazionale è normata da un decreto (il D. Lgs 241 del 26/05/2000, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 31/08/2000) per la esposizione in ambienti di vita il riferimento normativo è costituito da Direttive Euratom e linee guida.

## CONTROMISURE

In teoria, un edificio dovrebbe essere costruito con modalità tali da impedire al Radon l'ingresso. Gli accorgimenti in questo senso sono praticamente a costo zero se adottati in sede progettuale: fondamenta a vespaio aerate, intercapedini tra mura e suolo, uso di materiali da costruzione a basso contenuto di Radio, progettazione accurata degli interstizi. Al momento l'adozione di questi accorgimenti è lasciata alla sensibilità del progettista data la generale assenza di specifiche disposizioni nei regolamenti edilizi.

Per gli edifici esistenti si possono porre in atto azioni di rimedio tese a ricondurre la concentrazione indoor al disotto del livello di azione, qualora essa sia stata misurata (con misuratori passivi a tracce o a carboni attivi) e sia risultata superiore a tale livello. Tali azioni rientrano grosso modo in due grandi classi; alla prima classe appartengono tutte quelle azioni mirate a risucchiare il Radon che entra nell' edificio convogliandolo in un pozzo di concentrazione, dal quale viene poi aspirato ed espulso; questi sistemi possono essere ad aspirazione passiva o anche attiva, con delle pompe attivate a periodi regolari.

Appartengono invece alla seconda classe quelle azioni che tendono ad impedire l'ingresso di Radon nell'edificio mettendo in pressurizzazione l'edificio stesso rispetto al suolo; queste tecniche sono necessariamente attive.

L'adozione di queste azioni dovrebbe essere decisa solamente dopo un accurato campionamento della concentrazione media mediante misuratori passivi, complementata da una misurazione della dinamica del Radon in tempo reale con misuratori attivi solamente se necessaria. L'efficacia delle azioni intraprese dovrebbe essere verificata con successive misurazioni della concentrazione media.

I costi sono normalmente contenuti, sia per quanto riguarda le misure (sono disponibili anche dei kit) che per quanto riguarda le azioni di rimedio.

## SUGGERIMENTI BIBLIOGRAFICI


[1] Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome, *Linee guida perle misure di concentrazione di radon in aria nei luoghi di lavoro sotterranei*, Roma 6 febbraio 2003.

[2] ISS-ANPA, *Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni*,ISTISAN Congressi 34, (1994).

[3] Bochicchio et al., *Results of the representative Italian national survey on radonindoors. Health Phys. 71 (5): 743-750; 1996.*

[4] Bochicchio et al., *Results of the National Survey on Radon Indoors in All the 21Italian Regions. Proc.Workshop"RADON in the Living Environment", 19-23 April 1999,Athens, Greece, 997-1006; 1999.*

# TECNICHE DI MISURA DEL RADON E DEI SUOI PRODOTTI DI DECADIMENTO IL SISTEMA DI TARATURA DELL'INMRI-ENEA PER LE MISURE DI RADON

**Francesco Cardellini**
(ENEA-Roma)

e-mail: Francesco.cardellini@casaccia.enea.it

**INTRODUZIONE**

Il radon ($^{222}Rn$) ha un tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$) di 3,82 giorni ed è un gas nobile radioattivo prodotto dal decadimento del radio-226 ($^{226}Ra$ $T_{1/2}$ di 1600 anni) che a sua volta fa parte della catena di decadimento dell'uranio-238 ($^{238}U$). Il gas radon è naturalmente prodotto da tutte le rocce che contengono questi radionuclidi, ampiamente presenti anche in Italia. Essendo un gas inerte il radon può sfuggire dal sottosuolo e raggiungere l'atmosfera o gli edifici. Nei luoghi chiusi come gallerie, miniere, locali interrati e abitazioni il radon può invece accumularsi e diventare pericoloso per la salute.

Esiste un secondo isotopo del radon, detto comunemente toron ($^{220}Rn$, $T_{1/2}$ di 55,6 secondi) prodotto dal decadimento del $^{224}Ra$, che a sua volta fa parte della catena di decadimento del torio-238 ($^{232}Th$).

Anche se il $^{232}Th$ è ampiamente diffuso in molte rocce ed è spesso più abbondante del $^{238}U$, il toron è meno presente del radon nell'atmosfera. Infatti, causa della sua vita media molto breve, il toron non può diffondere nel terreno per lunghe distanze e può raggiungere gli ambienti di vita solo se i suoi precursori ($^{232}Th$, $^{228}Ra$, $^{224}Ra$ ecc.) sono presenti nei materiali da costruzione.

Le catene di decadimento del $^{222}Rn$ e del $^{220}Rn$ sono illustrate nelle figure n°1 e 2 rispettivamente.

Tra i prodotti di decadimento del radon e del toron ci sono degli emettitori alfa che, come vedremo in seguito, rappresentano il principale rischio per la salute.

In sintesi possiamo dire che la catena di decadimento del $^{222}Rn$ è caratterizzata da un capostipite a vita media piuttosto lunga e da progenie a vita media breve. Dunque il radon si può diffondere uniformemente nell'ambiente dove produce i suoi pericolosi prodotti di decadimento.

Invece la catena di decadimento del $^{220}Rn$ è caratterizzata da un capostipite a vita media molto corta e da progenie a vita media lunga (il tempo di dimezzamento del $^{212}Pb$ è di quasi 11 ore). Dunque il toron si diffonde solo a pochi centimetri di distanza dalle pareti in cui è prodotto, ma il $^{212}Pb$ si diffonde uniformemente nell'ambiente creando un rischio per la salute.

Mentre il radon ed il toron sono gas inerti i loro prodotti di decadimento sono metalli molto reattivi che, se inalati, per lo più si depositano nel sistema respiratorio dove producono poi le loro radiazioni ionizzanti di cui le particelle alfa sono le più pericolose. Il gas radon è, infatti, la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo, essendo attribuibili ad esso circa il 10% dei casi osservati [1]. Per limitare i rischi di esposizione al radon le indicazioni dell'OMS, riprese dalle normative europee, prevedono il monitoraggio della concentrazione di attività di radon negli ambienti di lavoro e nelle abitazioni e l'attuazione di interventi di bonifica ove si riscontrino concentrazioni eccessive. In Italia il decreto legge n°241 del 2000, che riprende la direttiva 9639 EURATOM, stabilisce il limite di 500 Bq $m^{-3}$ per i luoghi di lavoro. Per quanto riguarda le abitazioni, la raccomandazione 90/143/EURATOM stabilisce un limite

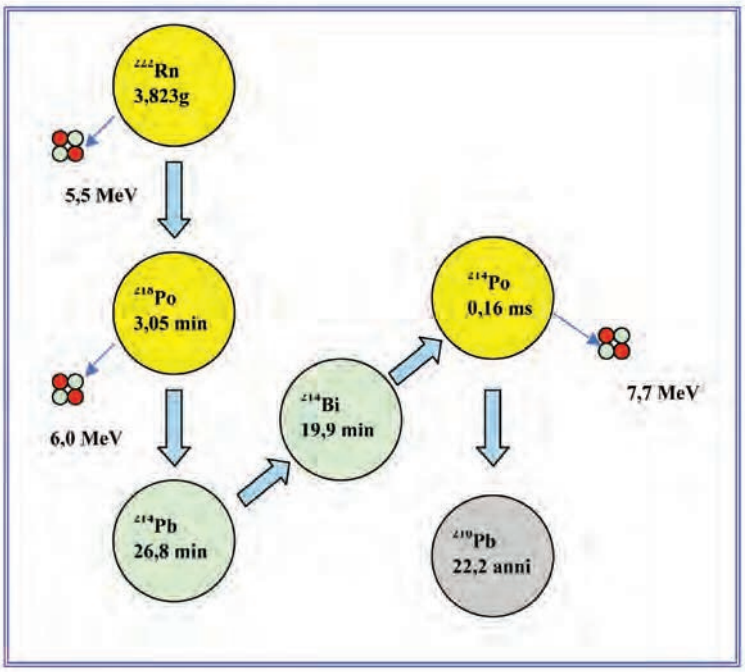



Figura 1: catena di decadimento del Radon-222 con le indicazioni delle emissioni di radiazioni alfa e beta.

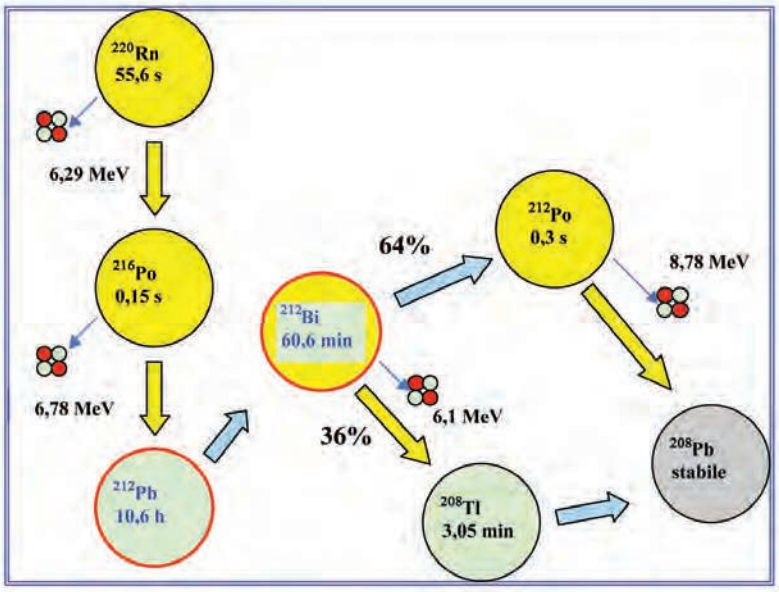



Figura 2: catena di decadimento del Radon-220 (toron) con le indicazioni delle emissioni di radiazioni alfa e beta

Figura 3: Monitore di radon basato su cella a scintillazione.

Figura 5 - Schema del circuito primario per la realizzazione di atmosfera campione di 222Rn in aria.

di 200 Bq $m^{-3}$ per le case di nuova costruzione e di 400 Bq $m^{-3}$ per le abitazioni già esistenti. In Italia il servizio di monitoraggio del radon è effettuato dalle sedi provinciali delle ARPA regionali, dall'ISPRA, dall'ISPESL e da alcuni laboratori universitari o privati.

Al fine di assicurare la riferibilità metrologica delle misurazioni di radon, l'INMRI-ENEA ha sviluppato campioni di riferimento e sistemi per la taratura della strumentazione maggiormente utilizzata in questo campo.

## SISTEMI DI MONITORAGGIO DEL RADON IN ARIA

Schematicamente i sistemi di misura del radon in aria si possono dividere in due grandi categorie. La prima categoria è costituita da dispositivi elettronici complessi che misurano e registrano la concentrazione di radon in funzione del tempo, per un periodo di tempo anche superiore a due settimane. Nel seguito questi dispositivi saranno indicati come monitori. La grande maggioranza dei monitori si basa su celle di misura con un volume compreso tra 0,25 L e 0,7 L, dotate di un filtro in ingresso che permette l'entrata dell'aria da campionare, ma non del particolato atmosferico. Queste celle possono essere di tre diverse tipologie:

1) le celle di Lucas, o a scintillazione, sono internamente rivestite di solfuro di zinco attivato con argento che emette luce quando è colpito dalle radiazioni alfa del radon e della sua progenie. I fotoni emessi sono poi rivelati da un fotomoltiplicatore accoppiato otticamente alla cella (vedi figura n°3)

2) le camere a ionizzazione in cui la radiazione alfa ionizza l'aria atmosferica presente nella cella di misura e produce un impulso elettrico che è amplificato e registrato (vedi figura n°4)

.3) le camere a raccolta elettrostatica in cui un forte campo elettrico, dell'ordine di 7-10 kV $m^{-1}$, convoglia i prodotti di decadimento del $^{222}Rn$ o del $^{222}Rn$ su un rivelatore a stato solido. Le radiazioni $\alpha$ emesse dai prodotti di decadimento sono analizzate da questo sensore che le classifica in base all'energia, permettendo di distinguere la progenie del radon da quella del toron. Le altre due classi di monitori citate non offrono, invece, questa possibilità.

La seconda categoria di strumenti di misura del radon comprende vari tipi di dispositivi passivi ad integrazione, comunemente detti dosimetri, che misurano il valore medio della concentrazione di radon in un ambiente per un lungo periodo di tempo, generalmente compreso fra tre e sei mesi. L'integrale della concentrazione di attività di radon nel tempo è detto "esposizione al

radon" e si misura in kBq h $m^3$. Nella maggioranza dei casi questi dispositivi sono costituiti da un rivelatore a tracce nucleari protetto da un contenitore esterno del volume di qualche decina di centimetri cubi. L'elemento sensibile è un polimero trasparente (area 1÷2 $cm^2$) in cui le radiazioni $\alpha$ prodotte dal radon e dalla sua progenie lasciano delle microscopiche tracce. Dopo l'esposizione negli ambienti da controllare queste tracce vengono contate con un microscopio e, dal loro numero, si risale al valore medio della concentrazione di radon nell'ambiente in esame. Il polimero maggiormente utilizzato è noto commercialmente come CR39 (Columbia Resin, 1939). Dopo l'esposizione al radon il dosimetro è sottoposto ad un attacco chimico (sviluppo) che evidenzia le tracce nucleari e ne permette la lettura mediante un microscopio a bassi ingrandimenti. La densità di tracce osservata è proporzionale all'esposizione subita.

I monitori sono adeguati ad individuare con misure di breve durata le aree ed i locali maggiormente esposti al rischio radon, mentre i dosimetri a tracce nucleari sono indicati per le campagne di misura di lungo periodo su un gran numero di locali. Sia i dosimetri sia i monitori devono in ogni caso essere sottoposti ad operazioni di taratura affinché le loro misure siano affidabili.

## IL CAMPIONE PRIMARIO DELL'INMRI-ENEA PER LE MISURE DI RADON

Così come per tarare una bilancia bisogna usare dei pesi campione, così per tarare un monitori di radon bisogna avere a disposizione un ambiente di cui sia ben nota la concentrazione di radon.

Lo scopo principale del campione primario per le misure di radon è dunque la realizzazione di un'atmosfera campione di radon in aria, con cui tarare i monitori primari per la misura di concentrazione di attività di radon in aria.

Il radon necessario viene prelevato da gorgogliatori contenenti una soluzione stabilizzata di $^{226}Ra$ la cui attività è riferibile a campioni NIST [2]. Il circuito primario, schematicamente rappresentato in figura n°5, è costituito da un gruppo sorgenti (gorgogliatori), da un cilindro di alluminio della capacità di circa 112 L dove si realizza l'atmosfera di riferimento e dal monitore primario. Questi elementi sono collegati tra loro da un circuito chiuso, in cui l'aria contenente radon è fatta circolare da una pompa con portata di circa 0,2 L/min.

La procedura di taratura del monitore primario è concettualmente molto semplice:

1) Si usano sorgenti tarate di $^{226}Ra$ chiuse da oltre un mese, cosicché al loro interno si è prodotta una pari attività di $^{222}Rn$.

2) Mediante gorgogliamento si trasferisce il $^{222}Rn$ dalla sorgente al circuito, ottenendo la concentrazione di attività di riferimento dopo circa un'ora.

3) Il monitore collegato al circuito registra una serie di misure del radon presente nel circuito. Per ora il monitore registra solo dei conteggi, a cui non è ancora associato un valore di concentrazione di radon.

4) Terminata la serie di misure si calcola una media e si confronta il valore ottenuto con il "valore vero della concentrazione di radon". Dal rapporto tra la concentrazione di riferimento ed i conteggi del monitore si calcola il coefficiente di taratura del monitore primario.

Per la taratura del monitore primario si è effettuata una serie di sei prove con tre diversi gorgogliatori, tutti con un'attività di circa 1500 Bq. Lo scarto tipo della serie di misure è risultato pari all' 1,2%. Il principale limite alla riproducibilità delle misure è costituito dalla precisione con cui è nota l'attività di ogni singolo gorgogliatore e dalla difficoltà di estrarre completamente il radon dai gorgogliatori stessi. L'incertezza relativa sul coefficiente di taratura è di 1,5 % (k=1).

## IL SISTEMA DI ESPOSIZIONE CONTROLLATA DEI DOSIMETRI

L'esposizione controllata di dosimetri per radon rappresenta la maggior parte dell'attività di servizio dell'INMRI-ENEA per le misure di radon (figura n° 6). I committenti sono gli organismi che svolgono servizi di sorveglianza sul rischio radon, già citati nell'introduzione. Rileviamo che la taratura investe tutto il complesso del sistema di misura e cioè: il dosimetro (costituito dal rivelatore e dal contenitore), il sistema di sviluppo ed il sistema di lettura. La taratura è quindi necessaria quando si avvia un nuovo laboratorio, quando si acquista una nuova partita di rivelatori, quando si modificano le condizioni di sviluppo o si modifica il sistema di lettura. Sono inoltre consigliabili controlli a scadenza biennale come è già prassi di alcune ARPA.

Considerando che i dosimetri vengono generalmente lasciati in misura per tre o sei mesi (circa 2160 o 4300 ore) e che i livelli di attenzione si collocano a 500 Bq $m^{-3}$, possiamo dire che le esposizioni di maggiore interesse si collocano intorno ai valori di 1 e 2 MBq h $m^{-3}$,

Figura 6: Esposizione di dosimetri passivi nella camera radon da 220 litri.

ma spesso ci sono richieste esposizioni a valori più alti, fino a 20 MBq h $m^{-3}$.

Presso l'INMRI le esposizioni possono essere effettuate in due diverse camere radon, una del volume di 1027 L e l'altra del volume di 220 L. La più grande è una camera climatica dotata di un sistema di regolazione e controllo della temperatura e dell'umidità relativa. I dosimetri sono collocati nelle camere radon con uno o due monitori di riferimento per la registrazione della concentrazione di attività di radon. L'incertezza sul valore di esposizione è attualmente stimata non superiore al 5 %. I dosimetri esposti sono restituiti al committente che esegue lo sviluppo e la lettura delle tracce nucleari lasciate dalle particelle alfa sui rivelatori. Dal rapporto tra la densità di tracce lette ed il valore della esposizione subita dai dosimetri, il committente determina la sensibilità della partita di dosimetri.

I risultati di una taratura sono illustrati in figura n° 7 dove è riportato il grafico della densità di tracce in funzione dell'esposizione per otto diverse esposizioni, alcune fatte nella camera da 220 L ed altre in quella da 1027 L. Si può notare, in figura 5, la linearità della risposta fino a oltre 4600 kBq h $m^{-3}$. Lo scarto massimo osservato tra la densità di tracce lette e la retta dei minimi quadrati è di 1,5 %. I dati si riferiscono alla caratterizzazione di un nuovo sistema di lettura sviluppato dalla Croce Rossa Italiana [3].

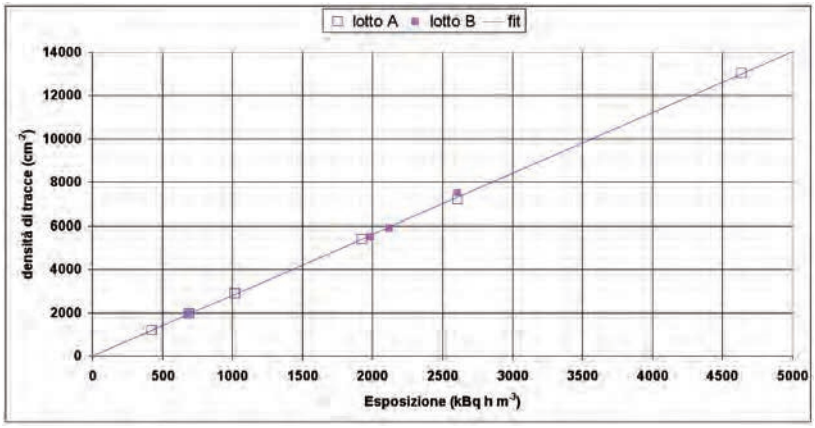



Figura 7: Analisi dei risultati di una serie di esposizioni di dosimetri passivi. Nel grafico si riporta la densità di tracce media di diversi gruppi di dosimetri in funzione della esposizione al radon subita.

In media presso il nostro istituto si eseguono annualmente circa 25 esposizioni certificate di dosimetri, cui vanno aggiunte numerose esposizioni di prova. L'impegno di maggior rilievo nel settore è stata la prima campagna di interconfronto nazionale sulla misura della concentrazione di attività di radon con rivelatori di tipo passivo organizzata nel 2006 dall'APAT e dall'INMRI-ENEA [4]. La campagna ha coinvolto 26 laboratori i quali hanno fornito un totale di circa 1400 dosimetri. L'INMRI ha effettuato le esposizioni controllate al radon e fornito i valori di riferimento.

Nell'estate del 2014 si è realizzato un interconfronto per misure di radon nella galleria Maria Curie-Skłodowska a Lurisia in Piemonte. La galleria fu scavata per estrarre materiale da costruzione e si trovarono minerali di uranio. La circostanza attirò l'attenzione dei fisici impegnati nelle prime ricerche pionieristiche sulla radioattività e la M. Curie svolse un periodo di studio e lavoro in quella galleria. La grotta è caratterizzata da una concentrazione di radon molto elevata e variabile, da una temperatura stabile di 11°C e da una altissima umidità relativa. E' la prima volta in Italia ed una delle prime in Europa che si realizza una esercitazione di questo tipo in condizioni particolarmente difficili. L'iniziativa ha riscosso molto interesse anche a livello internazionale,

L'INMRI ha effettuato le tarature di tutti i monitori attivi di radon usati (tre MR1 e tre AlphaGuard). I risultati della prova sono ancora in fase di elaborazione.

## MISURE DEI PRODOTTI DI DECADIMENTO DEL RADON E DEL TORON

Come si è detto i prodotti di decadimento del radon (RDP) e del toron (ThDP) rappresentano un rilevante rischio per la salute. I RDP in aria hanno, a grandi linee, il seguente comportamento: il $^{218}Po$ appena generato reagisce in pochi secondi con le molecole di acqua o altre molecole presenti in tracce formando dei cluster dal diametro di 0,5-2nm. Questri cluster possono sia aderire alle pareti o, in alternativa, al articolato atmosferico. Questi processi sono in competizione ed avvengono in pochi minuti. Il tempo di permanenza in aria della polveri, eventualmente contenenti ioni radioattivi, è, invece, di diverse ore.

L'INMRI-ENEA ha attivato una cooperazione con l'Università di Cassino ed ha eseguito una lunga serie di prove per lo studio delle interazioni tra i RDP ed il particolato atmosferico di cui descriviamo alcuni risultati. Lo strumento per la misura dei RDP è illustrato in figura n° 8 ed è costituito da due diversi campionatori che aspirano l'aria e raccolgono i RDP su due diversi filtri, uno adatto a raccolgiere i soli cluster nanometrici e l'altro anche il particolato atmosferico con gli eventuali radionuclidi ad esso

Figura 8: I due campionatori dello strumento di misura dei prodotti di decadimento del radon e del toron.

attaccati. Ad ognuno dei due filtri è associato uno spettrometro alfa che misura le emissioni dei prodotti di decadimento raccolti.

Negli esperimenti si è prodotto artificialmente dell'aerosol con la combustione di candele, bastoncini di incenso e spiratine di repellente per zanzare, oppure scaldando olio per frittura o pentole di acqua e salata, simulando così quanto può accadere negli ambienti domestici.

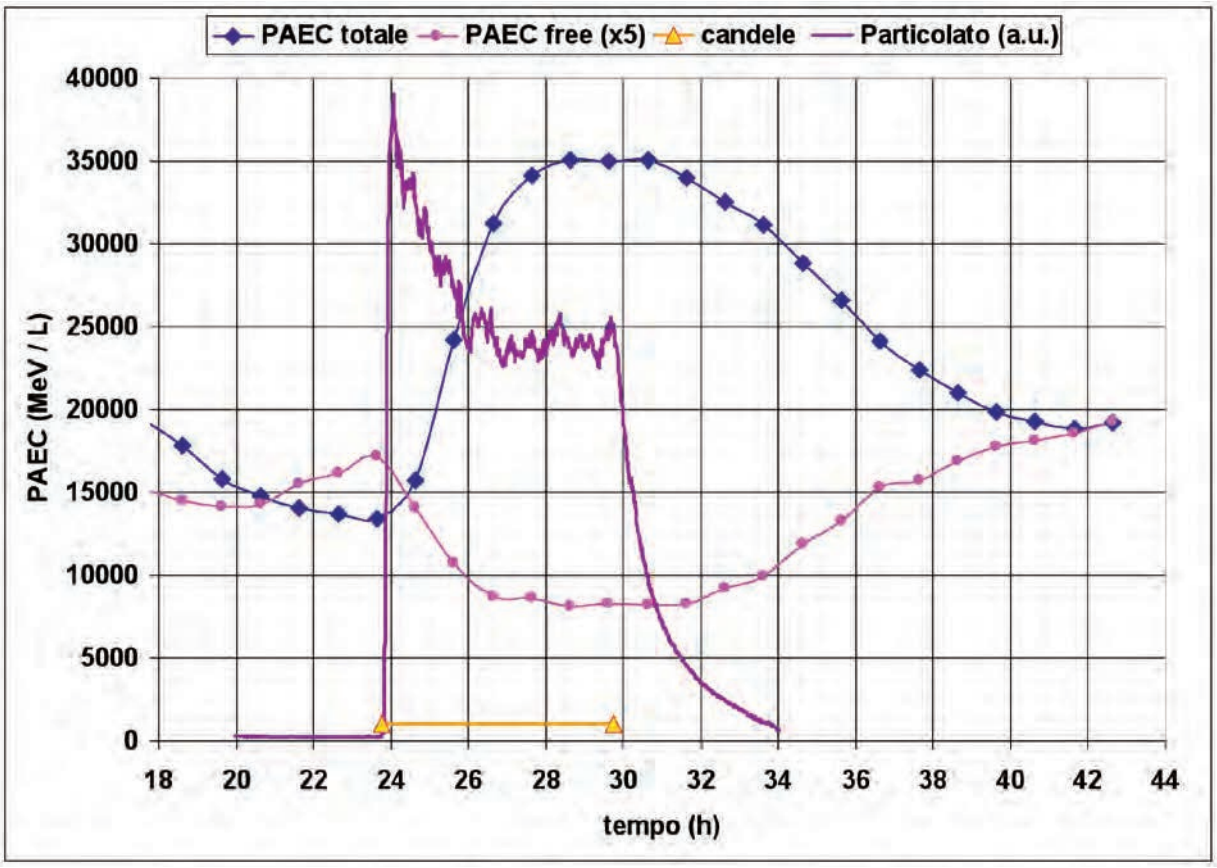



Figura 9: L'aerosol prodotto dalla combustione delle candele (traccia continua) determina un aumento dei RDP complessivamente presenti in aria (PAEC totale) ed una diminuzione di quelli in cluster nanometrici (PAEC free).

In generale si è osservato che l'aumento delle polveri produce un grande aumento della quantità dei RDP che restano sospesi in aria ed una parallela diminuzione della frazione libera, cioè i cluster nanometrici vedi figura n° 9. Queste variazioni sembrano non essere collegate alle dimensioni medie degli aerosol.

## CONCLUSIONI

Il sistema di misura del gas radon-222 è ben stabilito da anni e l'INMRI-ENEA offre a riguardo un efficiente sistema di taratura e collaudo che ha avuto una serie di ricadute tecnico scientifiche sia per i committenti che per l'INMRI-ENEA. Alcune di queste sono qui riportate.

1) Miglioramento dei risultati ottenuti negli interconfronti: i laboratori italiani che hanno partecipato ad interconfronti esteri con riferibilità ai sistemi di misura dell'INMRI-ENEA hanno ottenuto risultati molto buoni.

2) Controllo di qualità nei laboratori: la possibilità di effettuare tarature in condizioni diverse e su un ampio intervallo di valori di concentrazione o di esposizione ha portato, in diversi casi, ad evidenziare alcuni limiti della strumentazione utilizzata. A seguito di ulteriori analisi è stato possibile apportare le opportune correzioni ottenendo un netto miglioramento delle prestazioni del laboratorio.

3) Collaborazioni con università ed aziende private per lo sviluppo ed il collaudo di prototipi di monitori di radon.

## Bibliografia


[1] R. Trevisi, (2009) *Aspetti teorici ed operativi per la protezione dal radon nei luoghi di lavoro, a cura di Rosabianca Travisi*, Rapporto ISPESL 2009.

[2] P. De Felice, Xh. Myteberi, (1996), *The 222Rn Reference Measurement System Developed at ENEA*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 369, 445-451.

[3] C. Fontana, F. Cardellini, A. Marchetti, P. Bennati, A. Zoffranieri, U. Angeloni, (2008) *Riscontri dosiometrici e test di sensibilità su lotti di CR-39 analizzati con il nuovo sistema di misura semiautomatico per rivelatori a tracce nucleari nel servizio misure radioattività ambientale Lab. Centrale CRI*, Atti del convegno Nazionale di Radioprotezione, Cinquantenario AIRP Pisa 5-6 giugno 2008

[4] G. Torri, R. G. Boschetto, A. M. Sotgiu, P. Leone , M. Cavaioli, F. Cardellini, G. Cotellessa, R. F. Laitano, M. Pagliari, G. Sciocchetti, P. De Felice, (2007), *Risultati del primo interconfronto nazionale sulla misura della concentrazione di attività di radon con metodi passivi*, Atti del Convegno Nazionale di Radioprotezione, Associazione Italiana di Radioprotezione, Vasto Marina, 1-3 ottobre 2007.

# IL RADON NEGLI AMBIENTI SCOLASTICI DELLA CAMPANIA

**Mariagabriella Pugliese**
Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Napoli Federico II
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli

e-mail: pugliese@na.infn.it

## INTRODUZIONE

La problematica relativa all'esposizione della popolazione alle radiazioni ionizzanti di origine naturale, in particolare al gas radon, necessita di essere affrontata non solo in ambito istituzionale (università, enti di ricerca, asl, inail...), ma va comunicata alla popolazione intera che ancora oggi non percepisce l'esposizione al radon come un rischio per la propria salute.

A tal fine, è stato messo a punto un metodo innovativo che permette a noi ricercatori di far ricerca insieme agli studenti, misurando la concentrazione di attività di gas radon negli ambienti scolastici. La conoscenza dell'ambiente in cui ciascuno studente vive, delle problematiche connesse al territorio, degli strumenti necessari a ricavare un dato scientificamente valido, è stata la chiave del successo di una serie di esperimenti effettuati dal 2005 ad oggi negli ambienti scolastici della Campania, finanziati dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (ENVIRAD, ENVIRAD/SPLASH, RADIOLAB). I risultati sono molteplici: il coinvolgimento di oltre 5000 studenti, di molti docenti che hanno lavorato in modo sinergico sull'aspetto interdisciplinare del radon, la comunicazione della problematica alla popolazione che risiede sul territorio su cui insistono gli istituti scolastici coinvolti, e non ultimo la misura della concentrazione di attività di radon in oltre 30 edifici scolastici e in molte abitazione campane.

## LA MISURA DEL RADON NEGLI AMBIENTI SCOLASTICI

Il gas radon è stato classificato dall'Agenzia Internazionale di Ricerca sul Cancro dell'Organizzazione Mondiale della Sanità come cancerogeno del gruppo 1 e come la seconda causa di tumore al polmone dopo il fumo di tabacco. Sebbene la pericolosità del radon non rappresenti una novità, solo nel 2000 è stato pubblicato il D. lgs. 241 [1] (recepisce la Direttiva 96/29/EURATOM), che introduce la regolamentazione dell'esposizione al radon, inserendola nel contesto più generale della legislazione in materia di tutela dei lavoratori dai rischi in ambito lavorativo (D. lgs. 81/08 e s.m.i.). Il D. lgs. 81/08, infatti, per la protezione dal rischio da radon fa riferimento alla normativa specifica, e quindi al D. lgs. 241/00, che si applica ad ogni tipologia di attività lavorativa, comprese quelle svolte in ambito scolastico. La misura della concentrazione di radon non è attualmente un obbligo per tutti gli ambienti di lavoro, ma la valutazione dell'esposizione degli edifici scolastici è un'azione fondata su ragioni di opportunità per la destinazione e le modalità d'uso particolari di queste strutture.

La scuola è infatti un luogo particolarmente significativo da monitorare e da tutelare dal rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti perchè frequentato da bambini e ragazzi che vi trascorrono un gran numero di ore e da lavoratori quali personale docente e non docente. Inoltre gli edifici scolastici sono in gran numero edifici bassi, costituiti cioè da pochi piani, e ciò contribuisce a renderli potenzialmente luoghi con elevata concentrazione di radon. È importante sottolineare che la normativa italiana (D. lgs. 241/00) non prevede per gli ambienti scolastici la valutazione della dose in caso di superamento dei 500 Bq/m$^3$ pertanto questo valore rappresenta l'unico limite di cui tener conto.

Essendo la Campania una delle regioni italiane che presenta i valori di concentrazione di attività media di radon più elevati (95 Bq/m$^3$)[2], si è ritenuto necessario avviare subito dopo l'entrata in vigore del decreto una mappatura del radon nelle scuole campane, in particolare nelle zone in cui vi è un'elevata concentrazione, come la penisola sorrentina e l'isola di Ischia.

## IL METODO

Le misure di concentrazione di attività di radon sono eseguite coinvolgendo gli studenti delle scuole in cui viene effettuato il monitoraggio.

Grazie all'esperienza maturata nel corso degli anni mediante i progetti ENVIRAD ed ENVIRAD /SPLASH, si è deciso di coinvolgere nel progetto RADIOLAB solo gli studenti delle scuole superiori e di svolgere le attività inerenti il progetto durante l'orario extrascolastico.

Il progetto RADIOLAB è un esperimento di durata triennale (inizio anno scolastico 2013/14, termine anno

scolastico 2015/2016), che prevede un approccio interdisciplinare allo studio del radon con il coinvolgimento dei docenti di biologia, chimica, matematica, informatica, arte, lingua inglese, fisica. RADIOLAB si propone come obiettivo quello di mettere a punto un percorso didattico scientifico che possa essere utilizzato da tutti i docenti delle scuole superiori che ne facessero domanda all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.
Le misure di concentrazione di attività di radon vengono effettuate con rivelatori di tracce nucleari, film Kodak LR-115 su di un periodo di un anno (semestre caldo e semestre freddo). Gli studenti partecipano attivamente alla fase di progettazione del monitoraggio (scelta delle aule, dei laboratori, degli uffici, dislocazione dei rivelatori sui diversi piani dell'edificio), al posizionamento dei rivelatori, alla sensibilizzazione della popolazione scolastica sull'importanza della misura, alla compilazione di una scheda sulla quale riportare le caratteristiche degli edifici scolastici e dei locali monitorati (anno di costruzione, materiale di costruzione utilizzato, numero di piani, dimensioni del locale, areazione, numero di porte e finestre, destinazione d'uso), al ritiro dei rivelatori stessi, nonchè all'analisi dei risultati ottenuti.
La preparazione dei rivelatori, il confezionamento e il trattamento chimico post esposizione sono stati effettuati presso il Laboratorio di Radioattività (La.Ra.) del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, laboratorio certificato ISO 9001 e accreditato ISO/IEC 17025 per le prove di radon in aria.
Gli elettreti E Perm sono utilizzati al solo fine didattico, per far comprendere il comportamento del gas radon.
La campagna di misure viene estesa ad abitazioni o particolari ambienti di lavoro presenti sul territorio che gli studenti e i docenti individuano come potenziali prone areas. Questa attività consente un maggiore coinvolgimento degli studenti, delle loro famiglie e favorisce la comunicazione della problematica alla popolazione. Inoltre produce risultati scientificamente validi [3, 4, 5, 6].
Alla fine dell'anno scolastico, gli studenti presentano i risultati mediante elaborati e organizzazione di giornate tematiche che coinvolgono la popolazione.

## LA PERCEZIONE DEL RISCHIO

Un ulteriore goal del progetto RADIOLAB vuole essere quello di ottenere dati sulla percezione del rischio da esposizione al radon da parte degli studenti e della popolazione. A tal fine tutti gli studenti delle scuole che aderiscono al progetto sono invitati a rispondere ad un questionario sulla percezione del rischio disponibile sulla pagina web degli istituti di appartenenza.
La percezione del rischio da esposizione alle radiazioni è spesso errata, in particolare viene considerato un rischio l'esposizione alle radiazioni non ionizzanti piuttosto che a quelle ionizzanti.

Una volta appreso il comportamento del gas radon e la pericolosità per la salute ad esso associata, gli studenti imparano a gestire il rischio e a farsi promotori nella comunicazione e divulgazione scientifica, inerente la problematica della radioattività ambientale, in particolare del problema radon.
Ciò consente di centrare uno degli obiettivi di HORIZON 2020, la "dissemination".

## RISULTATI

I risultati fino ad ora ottenuti sono molteplici:
35 scuole coinvolte in Campania con 820 studenti impegnati nel progetto e nelle misure di radon e circa 6000 studenti "avvisati" della problematica, mediante seminari aperti a tutta la popolazione scolastica;
Realizzazione di giornate in piazza nei comuni in cui insistono le scuole coinvolte in RADIOLAB, con gli studenti protagonisti della comunicazione scientifica alla cittadinanza (vedi Fig. 1);

Fig. 1. Studenti "professori per un giorno" a Sorrento in Piazza Angelina Lauro, 5 giugno 2014.

La concentrazione media di attività di radon negli ambienti scolastici della Campania è pari a 144±8 Bq/m$^3$. Questo valore è più alto del valor medio nelle abitazioni campane è 95±6 Bq/m$^3$, e ciò ha una duplice interpretazione: a) gran parte degli edifici scolastici coinvolti in questo studio si sviluppano su due livelli, b) in alcuni ambienti scolastici - laboratori scientifici, informatici, linguistici, nonchè in biblioteche, archivi - il ricambio d'aria è minore, quindi si ha una concentrazione di radon maggiore [7]. In Fig. 2 sono riportati gli andamenti della concentrazione media di radon in funzione della destinazione d'uso dei locali, sia per il semestre caldo che per quello freddo. Si osserva che il valore di concentrazione è in ogni caso più elevato nel semestre freddo e che in locali adibiti a laboratori o uffici la concentrazione sia maggiore;
Gli ambienti scolastici degli edifici costruiti in tufo presentano una concentrazione media di radon maggiore rispetto a quelli di nuova costruzione costruiti in cemento armato, e sono quelli in cui viene superato il valore di 500 Bq/m$^3$;
Il liceo "Scotti - Einstein" di Ischia ha messo in atto un'azione di rimedio nel locale adibito a Presidenza,

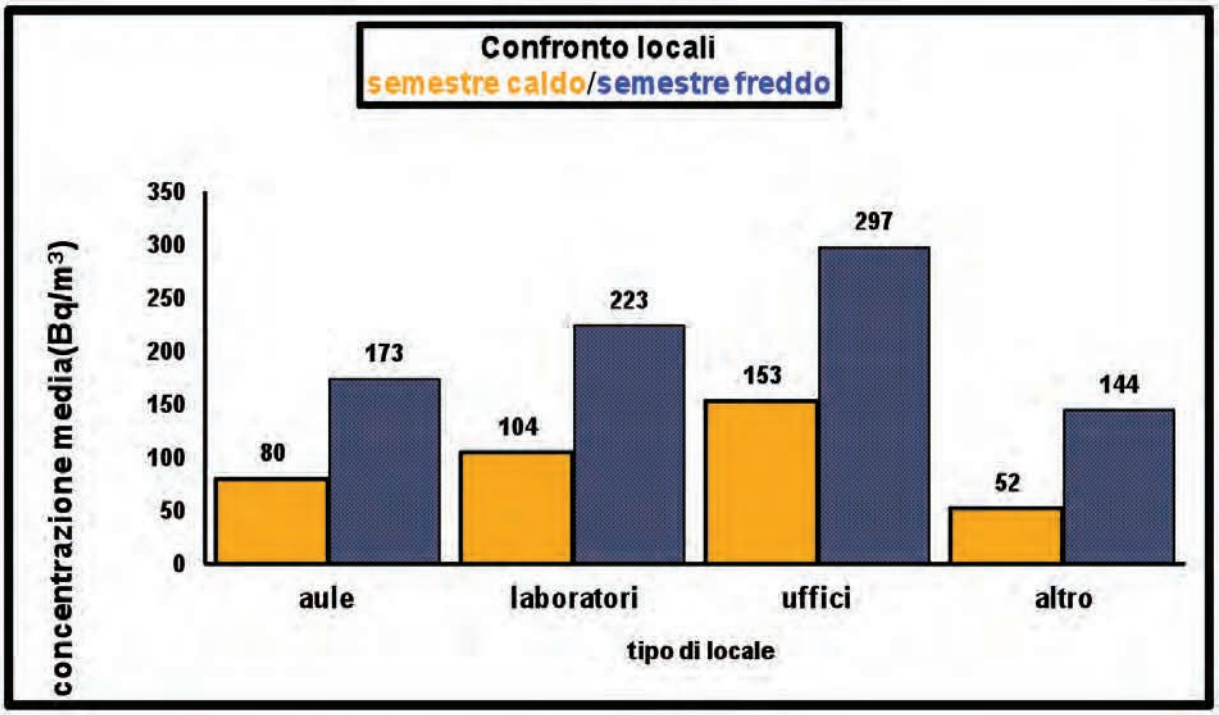



Fig. 2. Dipendenza della concentrazione di attività di radon in funzione della destinazione d'uso dei locali e del semestre in cui sono state effettuate le misure.

locale che è stato sotto indagine per circa due anni dopo che ripetute misure avevano confermato un valore di concentrazione molto elevato (circa 1300 Bq/m$^3$). Sono stati effettuati lavori di rimozione del pavimento e di messa in posa del massetto che era inesistente. Al termine di questi lavori è stata ripetuta la misura di concentrazione di radon e il valore è risultato essere al di sotto dei 500 Bq/m$^3$.

## CONCLUSIONI

I risultati sino ad ora ottenuti indicano che la via intrapresa nel coinvolgere la popolazione scolastica nelle misure di concentrazione di attività di radon negli ambienti scolastici è proficua, e l'obiettivo del progetto RADIOLAB di mettere a punto un percorso didattico scientifico che possa essere utilizzato da tutti i docenti che ne facessero domanda all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è non lontano dall'essere raggiunto.

## BIBLIOGRAFIA

[1] D.lgs. 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. Supplemento ordinario alla G.U.R.I. n. 203 del 31.8.2000 Seriegenerale.

[2] F. Bochicchio, G. Campos-Venuti, S. Piermattei, C. Nuccetelli, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri, M. Magnoni , G. Agnesod, G. Sgorbati , M. Bonomi, L. Minach, F. Trotti, M.R. Malisan , S. Maggiolo , L. Gaidolfi, C. Giannardi, A. Rongoni, M. Lombardi, G. Cherubini, S. D'Ostilio, C. Cristofaro, M. Pugliese, V. Martucci, A. Crispino, P. Cuzzocrea, A. Sansone Santamaria, M. Cappa, Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions, Rad. Meas. 40 (2005) 686 - 694.

[3] M. Quarto, M. Pugliese, V. Roca, Gamma dose rate measurements in dwellings of Campania region, South Italy, J. Environ. Radioact. †115 (2013), 114 - 117.

[4] M. Pugliese, M. Quarto, and V. Roca, Radon concentrations in air and water in the thermal spas of Ischia island, Indoor and Built Env. 23 (2014), 823 ñ 827.

[5] M. Quarto, M.† Pugliese, F. Loffredo and V. Roca, Indoor radon concentration measurements in some dwellings of the Penisola Sorrentina, South Italy, Radiat. Prot. Dosim. 156:2 (2013), 207 ñ 212.

[6] M. Pugliese, M. Quarto, F. Loffredo, a. Mazzella and V. Roca, Indoor radon concentration in dwellings of Ischia Island, J. of Env. Prot., 4 (2013), 37 ñ 39.

[7] G. Venoso, F. De Cicco, B. Flores, L. Gialanella, M. Pugliese, V. Roca, C. Sabbarese, Radon concentrations in schools of the Neapolitan area, Rad. Meas. 44 (2009) 127-130.

# QUALI RISCHI PER LA SALUTE

**Andrea Magistreli[1], Francesco Schillirò[2], Giovanna Miloro[3]**
[1]Ospedale Pediatrico Bambino Gesù IRCCS (Roma)
[2]Seconda Università degli Studi, Napoli
[2]Casa di Cura Villa delle Querce (Napoli)

e-mail: amagistrel@sirm.org

## INTRODUZIONE

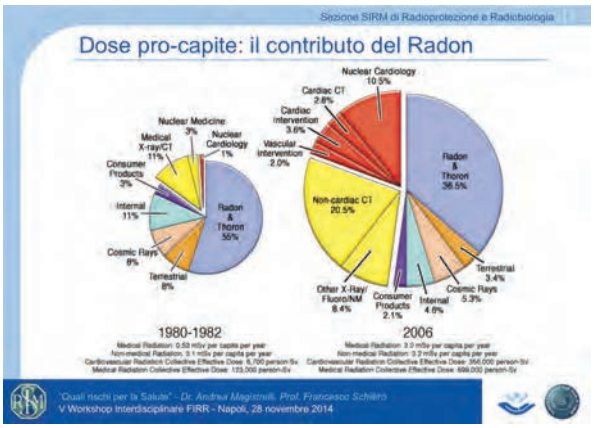
Il radon (Rn), come ricordato in precedenza, è un elemento chimico naturale, radioattivo, appartenente alla famiglia dei cosiddetti gas nobili o inerti che deriva dal decadimento naturale del radio che a sua volta ha origine dal decadimento dell'uranio e del thorio. Questi elementi sono presenti, in quantità molto variabile, in tutta la crosta terrestre e quindi anche nei materiali da costruzione che da questa derivano (tufo, laterizio, granito, cemento, etc). Pertanto è un elemento che contribuisce in maniera significativa (oltre il 50%) alla dose media pro-capite del fondo di radioattività naturale cui siamo quotidianamente esposti, anche se la sua concentrazione risulta essere estramente variabile nel tempo e nello spazio (figura 1). Le caratteristiche del terreno, le condizioni climatiche, l'areazione dell'edificio sono responsabili di una forte variabilità della concentrazione "indoor" di Rn (misurata come Bq/m$^3$, dove 1 Bq corrisponde alla trasformazione di 1 nucleo atomico/s). Il Rn, essendo un gas inerte, è incolore, inodore, insapore e non può essere avvertito dai sensi umani. L'inalazione di Rn è considerata molto pericolosa per la salute umana tanto che l'organizzazione mondiale della sanità (WHO), attraverso l'International Agency for Research on Cancer (IARC), ha classificato il Rn appartenente al gruppo 1 delle sostanze cancerogene per l'essere umano, ovvero quelle tra cui è stata stabilita una relazione causale tra esposizione e tumori umani, dimostrata da diversi studi epidemiologici che analizzeremo in seguito. Il Rn deve essere considerato quindi la seconda causa di tumore polmonare dopo il fumo, con cui ha un effetto sinergico, e la prima causa di k polmone nella popolazione di non fumatori. Non esiste un valore soglia di concentrazione al di sotto del quale l'esposizione al Rn non comporti un rischio tanto che oggi la teoria più accreditata è che la maggioranza dei k polmone Rn-relati siano determinati da una esposizione a basse/moderate concentrazioni di Rn ovvero la situazione più comune sul territorio nazionale italiano. Altri effetti sulla salute, come ricorda il manuale della WHO sul Radon Indoor, sono stati analizzati ma senza ottenere evidenze significative.

## COME AGISCE IL RADON

L'uranio-238 è il capostipite di una catena naturale che, attraverso successivi decadimenti del nucleo, si trasforma in elementi e isotopi diversi fino a raggiungere l'isotopo stabile del piombo-206. A ogni processo di decadimento nucleare sono emesse radiazioni ionizzanti di diverso tipo: alfa, beta, gamma o combinazioni di esse.

Come ricorderete i diversi tipi di radiazioni che possono essere emesse durante il processo di decadimento nucleare hanno caratteristiche diverse che influenzano la loro tendenza a interagire con la materia. In particolare:

- le radiazioni alfa hanno origine dal decadimento




radioattivo di atomi instabili con emissione di una particella alfa, composta da due protoni e due neutroni, altamente ionizzante e con un basso potere di penetrazione dovuto alla loro carica elettrica e all'elevata sezione d'urto. Trasferiscono alte energie (circa 10 MeV) di radiazioni ionizzanti e sono definite ad alto LET;

- le radiazioni beta sono una forma di radiazione ionizzante costituita da elettroni (β-) o positroni (β+) ad alta energia con capacità di penetrazione ridotta ( è sufficiente una lamella di pochi millimetri di alluminio) comunque dieci volte superiore alle particelle alfa, ma con un potere ionizzante pari a un decimo. Trasferiscono anche loro alte energie di radiazioni ionizzanti e sono definite ad alto LET;

- le radiazioni gamma sono più penetranti della radia-

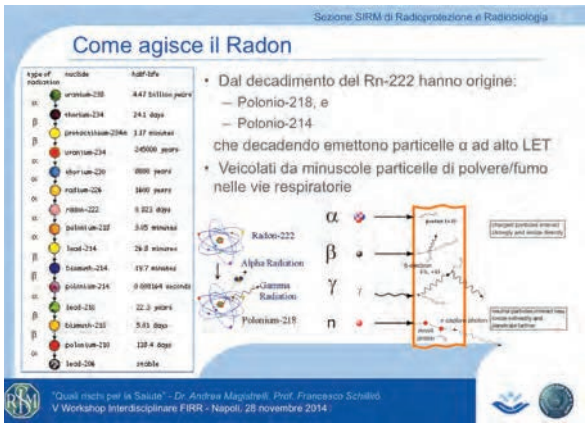
zione particellare prodotta da altre forme di decadimento (alfa e beta) a causa della minor tendenza a interagire con la materia (e quindi risultano essere più penetranti) essendo essi fotoni ad alta energia, ma meno ionizzanti. L'intensità di una radiazione gamma viene dimezzata da 1 cm di piombo o 6 cm di cemento. Sono definite a basso LET in quanto trasferiscono una bassa energia di radiazioni ionizzanti nell'interazione con la materia (0,2-3 keV/mm).

L'isotopo di maggior interesse per la salute umana è il radon-222 che ha un tempo di decadimento di pochi giorni (tempo di dimezzamento 3,8 giorni) con emissione di radiazioni ionizzanti di tipo alfa e "nascita" dei cosiddetti prodotti di decadimento o "figli", tra cui il polonio-218 (tempo di dimezzamento 3,05 minuti) e il polonio-214 (tempo di dimezzamento 26,8 minuti) che decadendo emettono a loro volta radiazioni alfa. Il radon-222, in quanto gas inerte, non reagisce con altre sostanze e di conseguenza così come viene inspirato, viene espirato; tuttavia il processo di decadimento genera dei prodotti "figli" elettricamente carichi che attaccandosi al particolato presente in aria possono essere inalati e fissarsi sulle superfici dei tessuti polmonari. Il decadimento nucleare dei due isotopi del polonio (Po-218 e Po-214) come visto avviene in tempi rapidissmi con emissione di radiazioni alfa ad alto LET che colpiscono l'epitelio polmonare (figura 2). Tali radiazioni possono danneggiare le cellule con un meccanismo diretto di ionizzazione nella macromolecola, determinando la rottura della membrana nucleare o mitocondriale, la rottura della guaina proteica o di un singolo/doppio filamento di DNA. I danni prodotti sono generalmente riparati dai meccanismi biologici ad eccezione della rottura del doppio filamento di DNA che può portare a morte cellulare o a mutazione di tipo degenerativo innescando un processo cancerogeno.

Il principale effetto sulla salute (e l'unico per il quale si abbiano al momento evidenze epidemiologiche) legato all'esposizione al Rn è un aumento statisticamente significativo del rischio di tumore polmonare, soprattutto nei fumatori in cui il rischio assoluto incrementa di 15-20 volte rispetto ai non fumatori, tanto che a livello mondiale il Rn considerato, insieme al fumo ed alla formaldeide uno degli inquinanti più pericolosi negli ambienti chiusi.

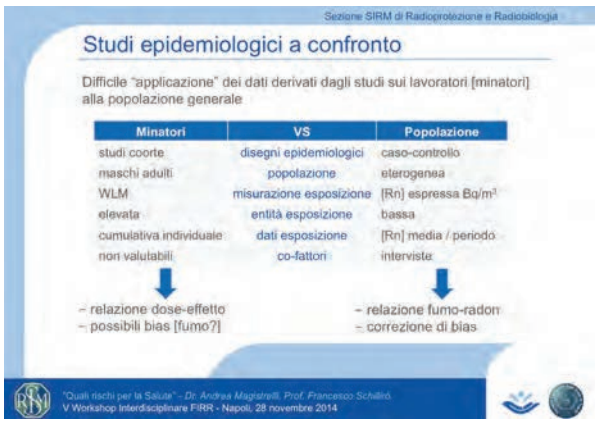
## STUDI EPIDEMIOLOGICI

Diversi studi epidemiologici, sia su esposizioni occupazionali dei minatori sia residenziali della popolazione, hanno fornito dati complementari e consistenti relativi agli effetti cancerogeni del Rn. Gli studi fatti sulle coorti di minatori sotterranei si basano su dati annuali di esposizione professionale per l'intero periodo lavorativo di ogni individuo e pertanto sono in grado di analizzare la relazione dose-effetto tenendo conto di fattori come l'età al momento dell'esposizione, la durata dell'esposizione, l'età din isorgenza della neoplasia.



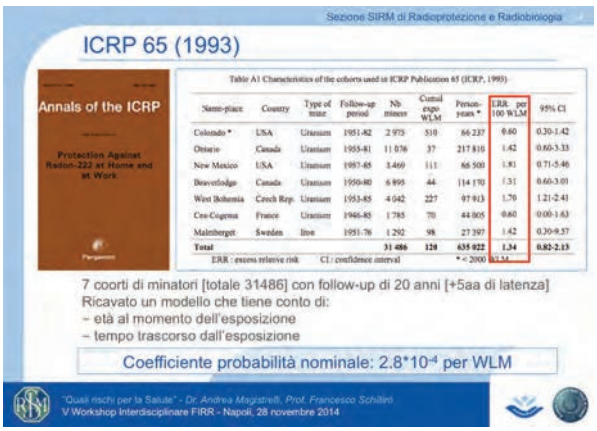

Tuttavia questi studi non tengono in considerazioni dei co-fattori importanti come lo stile di vita ed il fumo di sigaretta.

La possibilità di applicare i dati ed il modello degli studi occupazionali su coorti di minatori alla popolazione generale ha sembre generato incertezza per diversi motivi tra cui la diversa popolazione di studio (maschi adulti vs popolazione con donne e bambini) e la diversa esposizione ambientale (arsenico, quarzo, gas di scarico vs ambiente domestico). Per questo motivo all'inizio degli anni '90 sono stati creati una serie di studi residenziali *pooled*, con modelli di studio simile, per consentire un'analisi complessiva di tutti dati e dare un maggior peso statistico ai risultati. Questi studi, tra l'altro, si avvalgono spesso d'interviste dettagliate dei singoli soggetti in modo da ridurre i bias legati al fumo di tabacco e/o all'esposizione ad altri potenziali agenti cancerogeni polmonari sia in ambiente domenstico che lavorativo. Tuttavia un punto debole di questi studi è la stima dell'entità dell'esposizione domestica al radon che richiederebbe una valutazione di un periodo di almeno 30 anni precedente la diagnosi di cancro al polmone, in molti casi approssimativa (figura 3).




## STUDI OCCUPAZIONALI

La prima pubblicazione ad analizzare congiuntamente i dati proveninenti da diverse coorti di minatori esposti per stimare l'eccesso di mortalità da neoplasia polmonare è stata l'ICRP 65 del 1993 (figura 4). Tale pubblicazione ha analizzato 7 coorti di minatori (Colorado, Ontario, New Mexico, Beaverlodge, Boemia occiden-




tale, CEA-COGEMA, Malmberget) per un totale di 31.486 minatori con un eccesso di rischio relativo (ERR) per 100 WLM stimato di 1.34 (95% CI = 0.82-2.13) e ricavando un modello che tenendo conto di età al momento dell'esposizione e tempo trascorso dall'esposizione ha consentito di stimare un coefficiente di rischio nominale pari a $2{,}8 \times 10^{-4}$ per WLM ($8 \times 10^{-5}$ per mJ h $m^{-3}$).

A questa meta-analisi ne sono seguite altre su coorti di minatori esposti a livelli medio-alti di Rn, con dati più o meno sovrapponibili a quanto riportato nell'ICRP 65:

- Lubin et al (1994): 11 coorti di minatori [7 ICRP 65 + 4 nuove] riportando un ERR 0,49 per 100 WLM (95% CI = 0,2-1);
- NRC (1998): 11 coorti di minatori riportando un ERR 0,59 per 100 WLM
- UNSCEAR (2009): 9 coorti di minatori riportando un ERR 0,59 per 100 WLM (95% CI = 0,35-1).

Tuttavia una recente analisi aggregata delle coorti di minatori francesi e cechi esposte a bassi livelli di esposizione cumulativa fatta da Tomášek et al (2008) riferisce una associazione significativa tra esposizione al Rn e mortalità da K polmone anche a bassi livelli cumulativi di esposizione (in media 46,8 WLM) con un ERR stimato di 1,6 per 100 WLM (CI 1-2,3).

Basandosi sul modello di rischio dello studio di Tom·öek et al (2008) e del BEIR VI (NRC, 1998), e utilizzando il tasso di incidenza della neoplasia nella popolazione studiata, un gruppo di lavoro dell'ICRP ha ricalcolato e pubblicato nell'ICRP 115 (2010) il nuovo coefficiente di rischio nominale che è pari $5 \times 10^{-4}$ per WLM (14x10-5 per mJ h $m^{-3}$).

## STUDI RESIDENZIALI

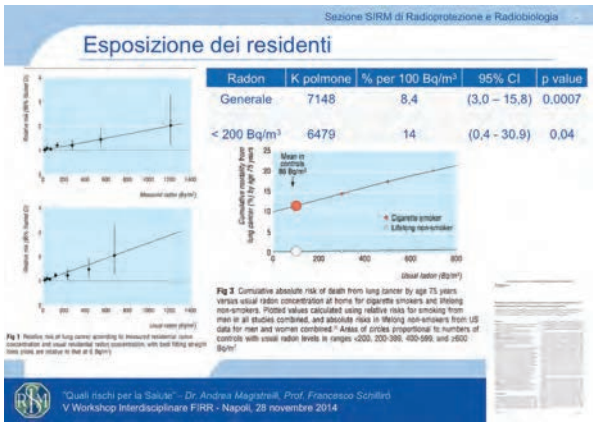
Come detto in precedenza la difficile applicazione dei dati e modelli di studio occupazionali sulla popolazione generale ha portato verso la fine degli anni '80, primi anni '90, alla creazione di numerosi studi residenziali caso-controllo *pooled*. Tali studi sono stati disegnati in modo da poter procedere ad una analisi ìcongiuntaî dei risultati per aumentare il peso statistico e valutare quindi in maniera attendibile l'associazione tra l'esposizione abitativa al Rn e lo sviluppo di neoplasie polmonari, anche tenendo conto della storia individuale dei singoli soggetti (esposizione al Rn ad eccezione dei 5 anni precedenti la diagnosi, fumatori/non fumatori, eventuale esposizione professionale al Rn o altri cancerogeni) e, almeno per gli studi europei delle informazioni annuali circa la concentrazione residenziale di Rn.

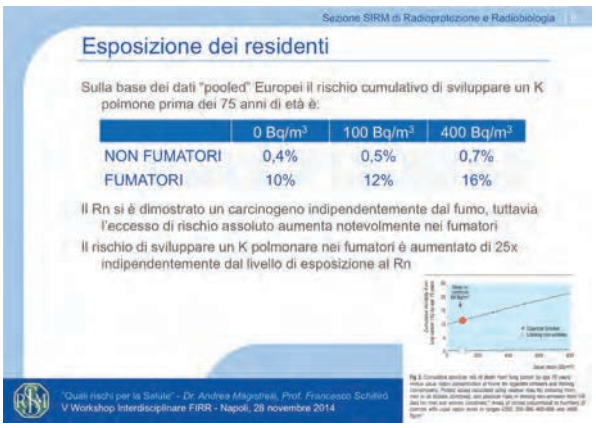
In letteratura i diversi studi residenziali sono stati raggruppati in 3 pubblicazioni "globali" relative a macroaree geografiche quali:

- l'Europa (Darby et al., 2006), basato su 13 studi con ERR 1,08 per 100 Bq/m3 (95% CI 1,03-1,16);
- il Nord America (Krewski et al., 2006), basato su 7 studi con ERR 1,10 per 100 Bq/$m^3$ (95% CI 0,99-1,26);
- la Cina (Lubin et al, 2004), basato su 2 studi con ERR 1,13 per 100 Bq/$m^3$ (95% CI 1,01-1,36).

Ogni singola analisi congiunta ha dimostrato un incremento del rischio di neoplasia polmonare all'aumentare della concentrazione indoor di Rn con ERR molto simili tra loro e statisticamente compatibili.

La stima combinata dei 3 studi (Europa, Nord America e Cina), fatta nella pubblicazione UNSCEAR 2009, è stata di 1,09 per 100 Bq/$m^3$ e ovviamente tiene conto degli aggiustamenti fatti per le abitudini al fumo. Se poi si utilizzano i solo dati casi-controllo "completi" (ovvero quelli in cui si conosce in maniera attendibile l'esposizione individuale cumulativa) la stima dell'ERR sale a 1,11 per 100 Bq/$m^3$. Inoltre, come riportato nel lavoro di Darby et al (2005) se si considerano tutte le incertezze che derivano dall'estrema variabilità della concentrazione ambientale di Radon e si attuano delle correzioni, l'ERR stimato risulta essere superiore al 16% (5-32%) per 100 Bq/$m^3$. Sempre nello studio *pooled* europeo, limitando l'analisi solo ai casi-controllo esposti ad una concentrazione annuale relativamente bassa vi è evidenza di un aumentato rischio di neoplasia polmonare anche per esposizione a medio-lungo termine a concentrazioni di Rn inferiori a 200 Bq/$m^3$. Il rischio cumulativo di sviluppare una neoplasia polmonare prima dei 75 anni di età nella popolazione esposta a concentrazioni di Rn pari a 0, 100 e 400 Bq/$m^3$ rispettivamente di 0,4%, 0,5% e 0,7% a dimostrazione di come il Rn sia, indipendentemente dal fumo, un cancerogeno. Tuttavia una esposizione alle medesime concentrazioni di Rn nei fumatori comporta un rischio cumulativo di 15-20 volte superiore, rispettivamente






10%, 12% e 16% (figure 5-6).

**ALTRI EFFETTI SULLA SALUTE**

Oltre al tumore polmonare sono stati studiati altri possibili effetti cancerogeni dell'esposizione al Rn, tuttavia nessuno degli studi epidemiologici pubblicati sino ad oggi dimostra, in maniera consistente, una associazione

tra esposizione al Rn e insorgenza di neoplasie (figura 7).

**CONCLUSIONI**

Il Radon è un gas inerte onnipresente in natura classificato come carcinogeno di gruppo 1 essendo stato dimostrato in diversi studi epidemiologici un nesso causale con lo sviluppo di neoplasie polmonari, seconda causa dopo il fumo di sigaretta con cui ha un effetto sinergico (rischio aumentato nei fumatori di 15-20 volte). Il fumo di sigaretta rimane in ogni caso la più importante causa di cancro ai polmoni.

La popolazione e le persone sono esposte al Radon prevalentemente in ambienti chiusi (abitazione domestica, luoghi di lavoro, etc) e la probabilità di contrarre una neoplasia polmonare è proporzionale alla concentrazione in aria del Radon, al tempo trascorso nei vari ambienti di vita e al consumo di tabacco.

In base ai dati dello studio europeo il rischio relativo aumenta del 16% per 100 Bq/m$^3$, secondo una relazione lineare esposizione/rischio. Se applichiamo i dati dello studio europeo (ERR 1,16 per 100 Bq/m$^3$) alla situazione italiana in cui la concentrazione media di Rn negli ambienti residenziali è pari a 70 Bq/m$^3$ si può stimare che circa l'11% degli oltre 31000 nuovi casi di tumore polmonare che ogni anno si registrano in Italia sono attribuibili (almeno in parte) al Radon.

» quindi fondamentale attuare una situazione di controllo, soprattutto negli ambienti chiusi con una concentrazione medio-bassa di Radon, per ridurre quanto più possibile la morbilità e mortalità da neoplasia polmonare nella popolazione.

**BIBLIOGRAFIA CONSIGLIATA**


Darby S, Hill D, Auvinen A et al (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Brit Med J 330: 223-227

Darby S, Hill D, Deo H et al (2006) Residential radon and lung cancer ñ detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. Scand J Work Environ Health 32: 1-84

Gray A et al (2009) Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. Brit Med J 2009;338:a3110

Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM et al (2006) A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. J Toxicol Environ Health Part A 69: 533-597

ICRP, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2)

ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1)

Lubin JH et al (1994) Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miner studies. National Institutes of Health (NCI)

Lubin JH, Wang ZY, Boice Jr JD et al (2004) Risk of lung cancer and residential radon in China : *pooled* results of two studies. Int J Cancer 109: 132-137

NRC (1998) Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Board on Radiation Effects Research. Health effects of exposure to radon. BEIR VI report

Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces - Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2006 Report Volume II Annex E pp 197-334

Tomášek L et al (2008) Lung cancer in French and Czech uranium miners - risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure. Radiat Res 169: 125-137

WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Zeeb H, Shannoun F. ISBN 978-92-4-154767-3

Bochicchio F et al (2005) Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. Radiation Measurements 40:686-694


**LEGENDA**

Bq - Becquerel
Bq/m$^3$ - Bequerel/metro cubo
LET - trasferimento lineare di energia
MeV - Megaelettronvolt

# DALLA NORMATIVA NAZIONALE ATTUALE ALLA DIRETTIVA EUROPEA 59/2013: COSA CAMBIA?

**Sandro Sandri**
ENEA IRP-FUAC di Frascati (RM)

e-mail: sandro.sandri@enea.it

**INTRODUZIONE**

Il 17/1/2014 è stata pubblicata nella Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea una nuova direttiva comunitaria in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti. La direttiva è entrata in vigore il 7/02/2014 e, nel rispetto dei tempi normativi, dovrà essere recepita nelle legislazioni nazionali europee entro quattro anni, ovvero entro il 6/2/2018.

La direttiva pubblicata a inizio anno è la 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre 2013, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga contestualmente le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom.

Si tratta di una direttiva che raccoglie la innovazioni normative e tecnologiche degli ultimi dieci anni nel settore della protezione dalle radiazioni ionizzanti e che dovrà essere considerata ancor prima del suo recepimento nella nostra normativa nazionale, alla stregua di una norma di buona tecnica. La direttiva contiene la nuova filosofia dettata dall'ICRP, l'autorevole International Commission on Radiological Protection, con le raccomandazioni del 2007, contenute nella pubblicazione n. 103 della Commissione.

Uno degli aspetti particolarmente innovativi contenuti nella nuova direttiva riguarda la limitazione della concentrazione di gas radon nelle abitazioni civili, introdotta per la prima volta in una norma europea. Gli imprenditori del settore edilizio dovranno pertanto adottare in modo sistematico soluzioni finalizzate a contenere la diffusione del radon nelle abitazioni.

**QUADRO NORMATIVO ATTUALE**

Con l'introduzione del D.Lgs. 26 maggio 2000 n. 241 che ha modificato e integrato il D.Lgs. 17 marzo 1995 n. 230 l'Italia ha a suo tempo recepito le precedenti direttive europee in materia affrontando il problema dell'esposizione al radon nei luoghi di lavoro. Non esiste ancora una normativa nazionale per l'esposizione al radon nelle abitazioni, a questo proposito sono state emesse solo alcune leggi regionali.

Il D.Lgs. n. 230 del 1995 è stato poi ulteriormente modificato ed integrato da altri decreti, in particolare dal D. Lgs. 9 maggio 2001 n. 257, e pertanto nel seguito si citerà questo corpo di leggi con la dicitura D.Lgs. 230/95 e s.m.i. (successive modifiche ed integrazioni).

La normativa nazionale al capo III bis del D.Lgs 230/95 e s.m.i. indica le procedure e gli obblighi inerenti i controlli e le azioni di rimedio relativamente all'esposizione al radon nei luoghi di lavoro. L'intervento riguarda alcune tipologie di luoghi di lavoro ovvero tutti i luoghi di lavoro sotterranei (in particolare tunnel, sottovie, catacombe, grotte) ed ogni luogo di lavoro nel caso in cui si trovi in zone definite ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon (tali zone devono essere individuate da regioni e province autonome). Il controllo deve essere relativo alla concentrazione media annuale ed è fondamentale per valutare il superamento o meno di uno dei limiti indicati dalla legge stessa.

La responsabilità di far effettuare i controlli previsti dalla legge è chiaramente attribuita all'esercente dell'attività che comporta il rischio di esposizione al radon. In particolare tale responsabilità comporta l'obbligo di effettuare misurazioni di concentrazioni di attività di radon medie in un anno entro ventiquattro mesi dall'inizio dell'attività. Naturalmente i ventiquattro mesi decorrono dal momento dell'individuazione delle zone o luoghi di lavoro ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon da parte di regioni e province autonome.

Per le misurazioni l'esercente si avvale di organismi riconosciuti dalla legge (articolo 107, comma 3 del D.Lgs. 230/95 e s.m.i.) o, nelle more dei riconoscimenti, di organismi idoneamente attrezzati, che rilasciano una relazione tecnica contenente il risultato della misurazione.

La legge nazionale attuale fissa il livello di azione in termini di 500 Bq $m^{-3}$ di concentrazione di attività di radon media in un anno.

In caso di superamento del livello di azione fissato gli esercenti inviano, entro un mese dal ricevimento della relazione sulle misure effettuate, una comunicazione in cui è indicato il tipo di attività lavorativa nonché la relazione preparata dall'organismo che ha effettuato le misurazioni, alle Agenzie regionali e delle province autonome competenti per territorio, agli organi del Servizio sanitario nazionale competenti per territorio e alla Direzione provinciale del lavoro.

La legge prevede inoltre l'istituzione di un archivio nazionale a cura del Ministero del lavoro e della previdenza sociale, tramite i dati trasmessi dalla Direzione provinciale del lavoro. Il Ministero del lavoro a richiesta, fornisce i dati archiviati alle autorità di vigilanza ed agli altri ministeri interessati.

In linea di principio le grandezze misurate non dovrebbero superare il livello di azione fissato dalla legge ma il decreto ed i suoi allegati prevedono comunque i seguenti obblighi nei vari casi:

a) Nel caso in cui sia superato l'80 per cento del livello di azione, l'esercente assicura nuove misurazioni nel corso dell'anno successivo.
b) Nel caso di superamento del livello di azione, l'esercente, avvalendosi di un esperto qualificato, pone in essere azioni di rimedio idonee a ridurre le grandezze misurate al di sotto del predetto livello, tenendo conto del principio di ottimizzazione, e procede nuovamente alla misurazione al fine di verificare l'efficacia delle suddette azioni. Le operazioni devono essere completate entro tre anni dal rilascio della relazione contenente il risultato delle misurazioni effettuate e sono effettuate con urgenza correlata al superamento del livello di azione.
c) Ove, nonostante l'adozione di azioni di rimedio, le grandezze misurate risultino ancora superiori al livello prescritto, l'esercente deve adottare i provvedimenti previsti dal D.Lgs. 230/95 e s.m.i., al capo VIII, per la protezione sanitaria dei lavoratori esposti a radiazioni ionizzanti, con alcune esenzioni, fintanto che ulteriori azioni di rimedio non riducano le grandezze misurate al di sotto del predetto livello di azione.
d) L'esercente non è tenuto alle azioni di rimedio citate in precedenza se dimostra, avvalendosi di un esperto qualificato, che nessun lavoratore è esposto ad una dose superiore a 3 mSv/anno; questa disposizione non si applica agli esercenti di asili-nido, di scuola materna o di scuola dell'obbligo.

Se le misure indicano superamenti del livello d'azione entra quindi in gioco la figura dell'esperto qualificato, inoltre nel caso in cui sia questo professionista indichi di classificare come lavoratori esposti coloro che operano nell'ambiente con presenza di radon, sarà anche necessario effettuare la sorveglianza sanitaria attraverso medici competenti o autorizzati.

La valutazione effettuata dall'esperto qualificato finalizzata alla classificazione dei lavoratori si basa sull'applicazione del fattore convenzionale di conversione indicato nell'allegato I-bis al D.Lgs. 230/95 e s.m.i. secondo il quale per unità di esposizione al radon espressa in Bq h $m^{-3}$ si hanno 3 $10^{-9}$ Sv di dose efficace.

La normativa indica comunque la necessità di continuare ad applicare azioni di rimedio anche durante la fase di sorveglianza fisica, lasciando intendere che valori costantemente al di sopra dei livelli di azione non saranno facilmente tollerati dagli organi di controllo.

In figura 1 è riassunto con uno schema a blocchi il processo logico da seguire ai sensi di legge per l'effettuazione dei controlli relativi alla concentrazione di radon negli ambienti di lavoro a rischio.

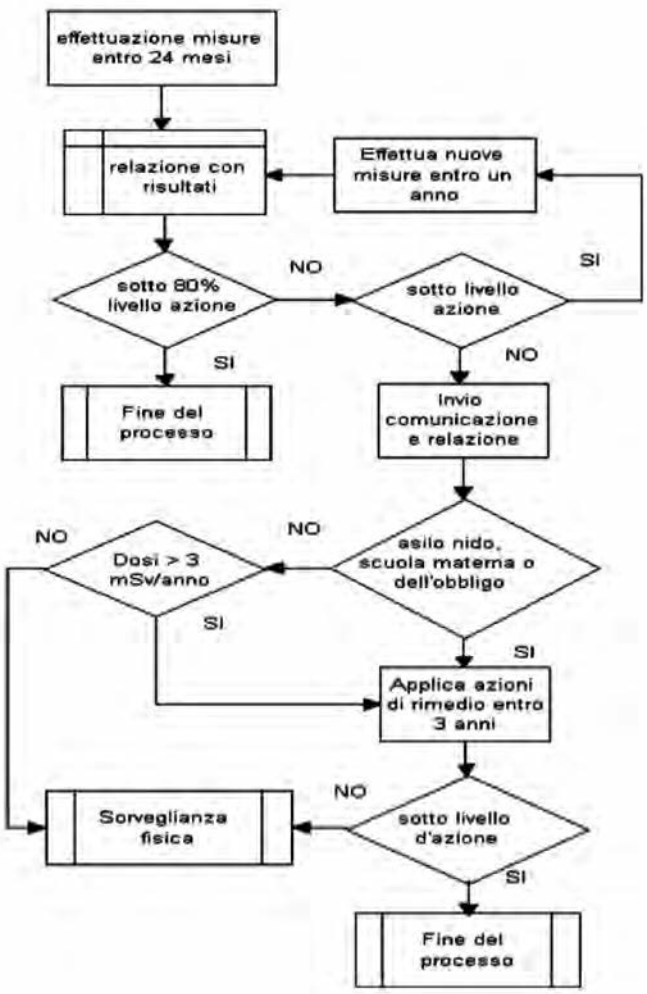



Figura 1 – Attuale procedura nazionale per le misure di radon nei luoghi di lavoro

## IL RADON NELLA NUOVA DIRETTIVA

La direttiva dedica ampio spazio all'esposizione al radon in quanto si ritiene che siano necessari piani d'azione nazionali per far fronte ai rischi di lungo termine derivanti dall'esposizione a questo gas radioattivo di origine naturale. È riconosciuto tra l'altro che la combinazione di consumo di tabacco ed elevata esposizione al radon comporta un rischio individuale di carcinoma polmonare sostanzialmente più elevato rispetto ai due fattori considerati separatamente e che il consumo di tabacco amplifica il rischio derivante dall'esposizio-

ne al radon a livello della popolazione. È importante allora che gli Stati membri affrontino entrambi questi rischi sanitari.

L'esposizione al radon rientra tra le situazioni di esposizione esistenti ed è riportata nell'elenco dell'allegato XVII della direttiva.

Trattandosi di una situazione di esposizione esistente, per il radon la direttiva individua dei livelli di riferimento piuttosto che dei limiti di dose e ritiene che questi debbano essere rispettati dagli Stati membri a meno di informare la Commissione nel caso in cui si voglia adottare un livello di riferimento superiore a 300 Bq $m^{-3}$, che è quello raccomandato nella 57/2013.

Nella Direttiva si considera in particolare il caso in cui il radon penetri dal suolo nei luoghi di lavoro situati in ambienti chiusi, ritenendo che tale situazione dovrebbe essere considerata una situazione di esposizione esistente dato che la presenza di radon è in larga misura indipendente dalle attività umane svolte all'interno del luogo di lavoro stesso. Tali esposizioni possono essere significative in determinate zone o in specifici luoghi di lavoro indicati dagli Stati membri e, in caso di superamento del livello di riferimento nazionale, si dovrebbero adottare misure appropriate per ridurre la concentrazione di radon e l'esposizione. Qualora i livelli continuino ad essere superiori al livello di riferimento nazionale, le attività umane svolte all'interno del luogo di lavoro non dovrebbero essere considerate "pratiche". Tuttavia, gli Stati membri dovrebbero provvedere affinché tali luoghi di lavoro siano notificati e, nel caso in cui l'esposizione dei lavoratori possa superare una dose efficace di 6 mSv all'anno o un corrispondente valore di esposizione al radon integrato nel tempo, sia assicurata una gestione come quella per le situazioni di esposizioni pianificate, con l'applicazione di limiti di dose che dovrebbero determinare i requisiti di protezione operativa da applicare.

Si tratta insomma di un approccio intermedio tra quelli tipici per le situazioni di esposizione esistenti e quelli delle situazioni di esposizione pianificate. In particolare all'articolo 54 della nuova direttiva si affronta in modo specifico il problema del radon nei luoghi di lavoro. Gli aspetti salienti di questo articolo sono:

1. Gli Stati membri stabiliscono livelli di riferimento nazionali per le concentrazioni di radon nei luoghi di lavoro. Il livello di riferimento per la media annua della concentrazione di attività aerea non deve essere superiore a 300 Bq $m^{-3}$, a meno che un livello superiore non sia giustificato dalle circostanze esistenti a livello nazionale.
2. Gli Stati membri dispongono che le misurazioni del radon siano effettuate:

a) in luoghi di lavoro all'interno delle zone individuate, situate al pianterreno o a livello interrato, tenendo conto dei parametri contenuti nel piano d'azione

b) in specifiche tipologie di luoghi di lavoro identificate nel piano d'azione nazionale.

3. Nelle zone all'interno dei luoghi di lavoro in cui la concentrazione di radon (come media annua) continua a superare il livello di riferimento nazionale nonostante le azioni intraprese conformemente al principio di ottimizzazione di cui al capo III, gli Stati membri dispongono che tale situazione sia notificata.

Il limite di concentrazione nei luoghi di lavoro è lo stesso che la direttiva raccomanda anche all'interno di altri ambienti chiusi.

In pratica come recepimento delle più recenti raccomandazioni ICRP, la direttiva riduce il livello di riferimento per radon in aria in ambienti chiusi sia di lavoro sia residenziali a 300 Bq $m^{-3}$ medi annuali, dai 500 Bq $m^{-3}$ previsti dall'attuale D.lgs 230/95 e s.m.i. per i soli luoghi di lavoro.

Inoltre si indica la necessità di adottare degli specifici piani d'azione a cura di ogni Stato membro e le specifiche di questo piano sono riportate all'articolo 103 della Direttiva stessa dove si dice che:

1. Gli Stati membri definiscono un piano d'azione nazionale che affronta i rischi di lungo termine dovuti alle esposizioni al radon nelle abitazioni, negli edifici pubblici e nei luoghi di lavoro per qualsiasi fonte di radon, sia essa il suolo, i materiali da costruzione o l'acqua. Il piano d'azione tiene conto degli aspetti elencati nell'allegato XVIII ed è aggiornato periodicamente.
2. Gli Stati membri provvedono affinché siano adottate misure appropriate per prevenire l'ingresso del radon in nuovi edifici. Tali misure possono comportare l'introduzione di prescrizioni specifiche nelle norme edilizie nazionali.
3. Gli Stati membri individuano le zone in cui si prevede che la concentrazione di radon (come media annua) superi il pertinente livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici.

**CONCLUSIONI**

Il recepimento della direttiva 59/2013 vedrà quindi una maggiore attenzione al rischio di esposizione al gas radon di lavoratori e popolazione nel suo insieme. Il cambiamento riguarderà essenzialmente una riduzione dei limiti di concentrazione ammessi nei luoghi di lavoro e l'estensione dei nuovi limiti a tutti gli ambienti chiusi, incluse le civili abitazioni.

Il tutto dovrà essere regolato dal Piano Nazionale Radon che è un progetto già in avanzata fase di sviluppo nel nostro Paese e sarà ben definito al momento dell'entrata in vigore della nuova normativa.

# LIVELLI DI RADON IN LUOGHI DI LAVORO DI TRE UNIVERSITÀ CAMPANE

**Antonio D'Onofrio, V. Mastrominico, Carlo Sabbarese**
Dipartimento di Matematica e Fisica, Seconda Università degli studi di Napoli

e-mail: carlo.sabbarese@unina2.it

**RIASSUNTO**
Sono state eseguite circa 600 misure in 300 ambienti di lavoro di 15 edifici di tre università della regione Campania. I locali nei quali sono state eseguite le misure sono destinati ad uffici, laboratori, aule e biblioteche. Sono state eseguite due misure consecutive, della durata di sei mesi, per ottenere una media basata su un intero anno. I rivelatori utilizzati sono i SSNTD con film LR115. I risultati mostrano un'attività specifica media superiore al valore medio regionale e consentono un'analisi dettagliata dell'ambiente universitario. L'attività specifica media annuale è risultata pari a 145 Bq/m3 e la percentuale di valori che superano i 500 Bq/m3 e i 200 Bq/m$^3$ è di circa il 5% e 17% rispettivamente; i valori di dose media che superano i 3mSv per anno è circa il 3%.

**INTRODUZIONE**
La regione Campania presenta livelli di radioattività naturale superiore rispetto ad altre regioni della penisola italiana. Il radon riveste un ruolo di primo piano per le caratteristiche del sottosuolo e dei materiali da costruzione di origine locale che sono prevalentemente di origine vulcanica (Gialanella et al., 1988). Diverse indagini di misure di radon indoor sono state effettuate negli ultimi venti anni (Sabbarese et al, 1993; Bochicchio et al, 1996; Sabbarese et al, 2000, Venoso et al., 2008). I risultati dell'indagine nazionale sul radon, eseguita negli anni '90, classifica questa regione con una concentrazione media (97 Bq/m$^3$) superiore del 30% al valore medio nazionale (74 Bq/m$^3$) (Bochicchio et al, 1996), ma non particolarmente elevata grazie alle condizioni climatiche favorevoli che permettono più scambi d'aria interna con l'esterno. Comunque, hot spots sono diffusi sul territorio; infatti, misure mirate ad evidenziare livelli anomali di radon in edifici sono state eseguite (Sabbarese et al., 2000) al fine di studiare eventuali azioni correttive.
Sulla base del Dlgs 241 del 26 maggio 2000 il governo italiano ha recepito la direttiva europea 96/291 Euratom del 13 maggio 1996 sulla protezione dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti. Per il radon, questa legge prescrive di non superare il livello di azione di 500 Bq/m$^3$, inteso come attività specifica media annuale del radon in aria negli ambienti di lavoro interrati e seminterrati.
In questo contesto, s'inserisce il presente lavoro relativo agli ambienti universitari di tre università della regione Campania: Seconda Università degli studi di Napoli (S.U.N.), Università degli studi di Salerno, Università degli studi del Sannio. Queste università sono dislocate rispettivamente nelle province di Caserta e Napoli, Salerno e Benevento. Sono stati investigati 300 luoghi di lavoro (uffici, aule, laboratori, biblioteche).

**OBIETTIVO E DESCRIZIONE DELL'INDAGINE**
Lo scopo principale dell'indagine è quello di conoscere i livelli di radon in ambienti di lavoro anche per predisporre preliminari azioni di remidio in ambienti con elevati livelli.
I principali scopi dell'intero programma sono stati:
- Stima dei livelli di radon nei luoghi di lavoro di edifici di alcune università della regione Campania;
- Confronto dei risultati sulla base dei materiali da costruzione, del suolo sottostante l'edificio e dell'uso al quale è adibito;
- Confronto dei risultati col valore di riferimento definito dalla legge e calcolo della dose per i lavoratori.
- Evidenziare locali bisognosi di azioni di rimedio.

**MATERIALI E METODI**
Il tempo di misura è di un anno, come suggerito dalla direttiva. In questo intervallo di tempo sono state effettuate due misurazioni in semestri consecutivi; la prima dal dicembre 2002 al giugno 2003 e la seconda fino al dicembre 2003.
I rivelatori utilizzati sono i SSNTDs con film LR115 e con una camera di decadimento cilindrica inserita in una bustina di polietilene (Campos Venuti et al., 1987). Il montaggio, il posizionamento, l'attacco chimico e l'analisi dei rivelatori sono stati fatti nel Laboratorio di Radioattività Ambientale della S.U.N.. I rivelatori sono

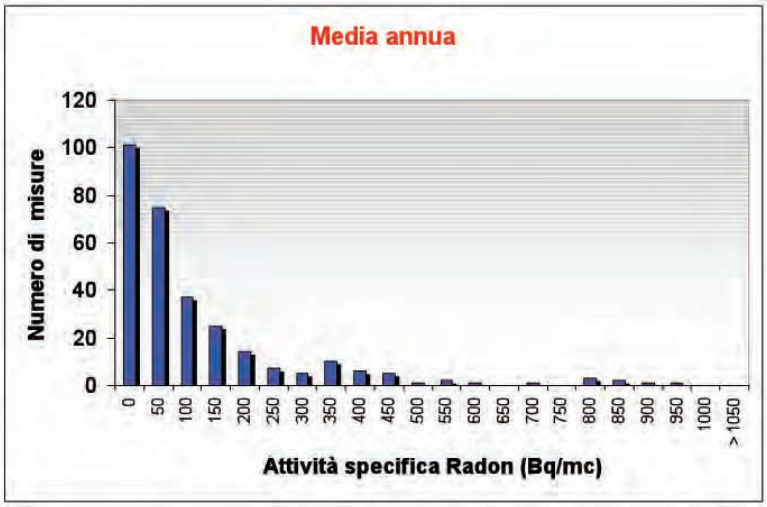
stati posizionati negli ambienti prescelti secondo i ben noti criteri di posizionamento. I luoghi di misura sono stati scelti in modo da ottenere una distribuzione pressocchè uniforme per piano e per destinazione d'uso del locale per ogni edificio investigato.
La procedura di misura è costituita da tre fasi: (i) trattamento chimico; (ii) misura dello spessore residuo del rivelatore; (iii) conteggio delle tracce.
Il trattamento chimico dei rivelatori è stato effettuato con una soluzione di NaOH 10% peso/volume per 95' a 60° C. Lo spessore residuo dei rivelatori è stato misurato tramite un comparatore micrometrico. Questa misura è necessaria per apportare una correzione che tiene conto della diminuizione del numero di tracce con l'aumentare dello spessore.
Il conteggio delle tracce dei rivelatori è stato effettuato attraverso uno scanner ottico attraverso una procedura opportunamente messa a punto e calibrata (De Cicco et al., 2013). La calibrazione è stata eseguita sulla base di esposizioni di riferimento all'interno di una camera di radon dell'Istituto INMRI del ENEA-Casaccia.
La procedura di calcolo della attività specifica è eseguita sulla base della procedura descritta in Campos Venuti et al., (1987), che prevede la correzione della densità di traccia per il fondo e per lo spessore residuo.
Poiché è importante tradurre l'attività specifica in termini di rischio per la salute umana, calcoliamo la dose equivalente efficace alla quale è esposto ogni lavoratore moltiplicando tale attività specifica per il tempo di permanenza espresso in ore e per il fattore di conversione pari a 3.10-9 Sv/h per ogni Bq/m$^3$. Il tempo di permanenza medio considerato è di 6h al giorno che per un anno, con l'esclusione dei giorni festivi, dei sabato e delle domeniche e del periodo di ferie, ammonta a 1320 h.

**RISULTATI E DISCUSSIONE**

I risultati delle misure semestrali effettuate sono stati espressi in termini di attività specifica media annuale e di dose efficace equivalente. In Tabella 1, per brevità, sono riportati i valori medi annuali relativi ai dipartimenti e alle facoltà delle tre università (l'attuale divisione in dipartimenti è diversa rispetto a quella al periodo di misura, ma i locali hanno conservato la stessa destinazione d'uso).
La distribuzione dei risultati, raggruppati per intervalli di 50 Bq/m3, dell'intero insieme di misure è riportato in Figura 1. La media e la mediana di tutti le attività specifiche di Radon determinate sono 145 Bq/m$^3$ e 92 Bq/m$^3$, rispettivamente. Il valore minimo è di 3 Bq/m$^3$ e il valore massimo è 1257 Bq/m$^3$. La percentuale di valori che superano il valore di 500 Bq/m$^3$ è circa il 5% del numero totale di locali investigati; e quella che supera i 200 Bq/m$^3$ è circa il 17%.
I valori medi delle attività specifica del primo e del secondo semestre sono pari a 123 Bq/m$^3$ e 181 Bq/m$^3$, rispettivamente; gli intervalli di variabilità nei due semestri sono 4 ÷ 1006 Bq/m$^3$ e 2 ÷ 1547 Bq/m3, rispettivamente. L'aumento medio riscontrato nel secondo semestre potrebbe essere giustificato da una diminuzione del tasso di ventilazione, in quanto il secondo semestre ha compreso l'estate; ossia, il mese di agosto quando molti locali oggetto di studio sono rimasti chiusi, e gli altri mesi estivi quando in molti locali venivano usati sistemi di condizionamento.
I valori di dose annuale stimata (Figura 2) variano all'interno dell'intervallo (0.01 ÷ 4.98) mSv con valore medio di 0,57 mSv e mediana di 0,29 mSv. La percentuale di valori che superano i 3 mSv è il 3%.
I valori massimi di dose e di attività specifica sono stati misurati nei dipartimenti di Biochimica e Biofisica, nel centro storico di Napoli, dove sottosuolo e materiali da costruzione sono costituiti di tufo napoletano di origine vulcanica, e in cui il cambiamento d'aria interna non è risultato molto frequente durante il periodo di misura. I valori minimi sono stati misurati presso il Dipartimento di Clinica Internistica situato al di fuori del centro storico di Napoli, in un edificio di più recente costruzione in cui il mattone di cemento è il materiale utilizzato per le pareti e l'aerazione è risultata maggiore che altrove.
Nella facoltà di Psicologia è stata riscontrata una attività specifica media di radon superiore rispetto altre facoltà di Caserta. Questo risultato trova giustificazione nel fatto che tutti i locali della facoltà di Psicologia si trovano al piano terra e, durante il tempo di misura, è risultato un basso ricambio d'aria.
Nella facoltà di Ingegneria Civile della città di Benevento i livelli di radon sono risultati superiori a quelli della facoltà di Scienze Biologiche e Economia situati nella stessa città, perché l'edificio della prima è molto antico e costruito in tufo napoletano, mentre gli edifici delle altre due facoltà sono più recenti e senza tufo.
I locali sono stati divisi anche sulla base del materiale da costruzione prevalente. Dalla Figura 3 risulta evidente che il valore medio massimo si ha per il tufo che è anche il materiale più diffuso negli edifici selezionati.
E' stata eseguita anche un'analisi che tenesse in conto il piano di posizionamento del locale di misura. In un stesso edificio, a parità di altre condizioni, è generalmente rispettato un andamento decrescente con l'altezza del piano a dimostrazione della maggiore influenza del suolo.
I risultati sono stati suddivisi anche sulla base della destinazione del locale (ufficio, aula, laboratorio, biblioteca) e le relative attività specifiche medie sono riportate in Tabella 2. Anche se le differenze tra i valori medi non sono elevate, si può vedere che è mediamente più elevato nelle biblioteche e più basso nelle aule.
Infine, facendo la distinzione per università è scaturito che la Seconda Università degli studi di Napoli, dove sono state eseguite più misure, presenta il valore medio annuo più elevato di Radon (165 Bq/m$^3$). Questi risultati sono dovuti agli antichi edifici costituiti da tufo e pietrame.

| Dipartimento/Facoltà | Università - Città | N. | Media attività specifica (Intervallo) ($Bq/m^3$) | Media dose efficace equivalente (Intervallo) (mSv/y) |
|---|---|---|---|---|
| Dipartimento di Scienze Ambientali | S. U. N. - Caserta | 17 | 66 ± 10 ( 26 ÷ 176 ) | 0.26 ± 0.04 ( 0.10 ÷ 0.69 ) |
| Dipartimento di Scienze della Vita | S. U. N. - Caserta | 10 | 66 ± 14 ( 4 ÷ 134 ) | 0.26 ± 0.05 ( 0.02 ÷ 0.53 ) |
| Dipartimento di Matematica | S. U. N. - Caserta | 8 | 97 ± 11 ( 54 ÷ 162 ) | 0.38 ± 0.04 ( 0.21 ÷ 0.64 ) |
| Facultà di Scienze MM.NN.FF e di Scienze Ambientali | S. U. N. - Caserta | 11 | 130 ± 15 ( 73 ÷ 169 ) | 0.50 ± 0.06 ( 0.29 ÷ 0.67 ) |
| Dipartimento e Facoltà di Psicologia | S. U. N. - Caserta | 10 | 391 ± 37 ( 178 ÷ 588 ) | 1.55 ± 0.15 ( 0.70 ÷ 2.33 ) |
| Dipartimento e Facoltà di Ingegneria Civile ed Aerospaziale | S. U. N. - Aversa (Ce) | 29 | 247 ± 53 ( 45 ÷ 1257 ) | 0.98 ± 0.21 ( 0.18 ÷ 4.98 ) |
| Dipartimento di Lettere e Filosofia | S. U. N. - S. Maria Capua Vetere (Ce) | 26 | 185 ± 21 ( 43 ÷ 426 ) | 0.73 ± 0.08 ( 0.17÷1.69 ) |
| Facoltà di Economia | S. U. N. - Capua (Ce) | 16 | 33 ± 4 ( 15 ÷ 84 ) | 0.13 ± 0.02 ( 0.06 ÷ 0.33 ) |
| Dipartimento di Biochimica e Biofisica | S. U. N. - Napoli | 27 | 468 ± 55 ( 97 ÷ 1110 ) | 1.85 ± 0.22 ( 0.38 ÷ 4.39 ) |
| Departimento di Internistica Clinica | S. U. N. - Napoli | 40 | 21 ± 3 ( 3 ÷ 110 ) | 0.08 ± 0.01 ( 0.02 ÷ 0.17 ) |
| Departimento di Chirurgia Generale ed Emergenza Chirurgica | S. U. N. - Napoli | 10 | 31 ± 6 ( 11 ÷ 70 ) | 0.12 ± 0.02 ( 0.04 ÷ 0.28 ) |
| Facoltà di Ingegneria Civile | Università del Sannio - Benevento | 15 | 208 ± 22 ( 107 ÷ 435 ) | 0.82 ± 0.09 ( 0.42 ÷ 1.72 ) |
| Facoltà di Scienze Biologiche | Università del Sannio - Benevento | 18 | 112 ± 33 ( 31 ÷ 500 ) | 0.44 ± 0.13 ( 0.12 ÷ 1.98 ) |
| Facoltà di Economia Aziendale | Università del Sannio - Benevento | 19 | 67 ± 9 ( 34 ÷ 205 ) | 0.26 ± 0.03 ( 0.13 ÷ 0.81 ) |
| Facoltà di Scienze MM.NN.FF | Università di Salerno - Baronissi (Sa) | 40 | 62 ± 9 ( 3 ÷ 233 ) | 0.23 ± 0.03 ( 0.01÷ 0.92 ) |

Tabella 1. Attività specifica e dose equivalente efficace media annuale dei locali di tutti i dipartimenti e le facoltà interessate all'indagine.




Attività specifica di Radon (Bq/m$^3$)

Figura 1. Distribuzione valori medi annui delle attività specifica di Radon di tutte le misure effettuate.

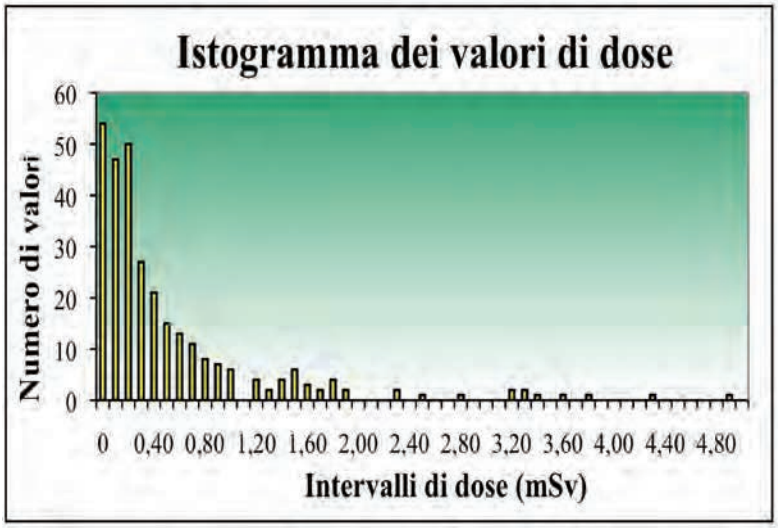



Figura 2. Distribuzione dei valori stimati di dose efficace equivalente derivante da Radon di tutte le misure effettuate.

Poiché non ci sono indagini nazionali e/o regionali di Radon in luoghi di lavoro, un confronto tra i risultati della presente indagine è possibile solo con i risultati ottenuti in locali residenziali e in locali scolastici. L'attività specifica media annuale è circa il doppio del valore medio italiano (70 Bq/m$^3$), il 152% del valore medio regionale (95 Bq/m3) (Bochicchio et al., 1996) ed il 134% del valore medio ricavato in Sabbarese et al., (1993) per edifici residenziali tra Baronissi (Sa) e l'area vesuviana. Il confronto con i valori ottenuti nelle scuole campane (Venoso et al., 2008) mostra un ottimo accordo sia con la media (144 Bq/m$^3$) che con la mediana (86 Bq/m$^3$) a dimostrazione delle comuni caratteristiche delle sorgenti naturali.

## CONCLUSIONI

La determinazione dei livelli di radon e delle relative dosi nei luoghi di lavoro di tre università degli studi della regione Campania ha fornito un'attività specifica media annuale pari a 145 Bq/m$^3$ e la percentuale di valori che superano i 500 Bq/m$^3$ e i 200 Bq/m$^3$ è di circa il 5% e 17% rispettivamente; i valori di dose media che superano i 3mSv per anno è circa il 3%.

I risultati confermano che l'attività specifica del radon negli ambienti interni è influenzata dalle caratteristiche del terreno sottostante l'edificio, dai materiali di

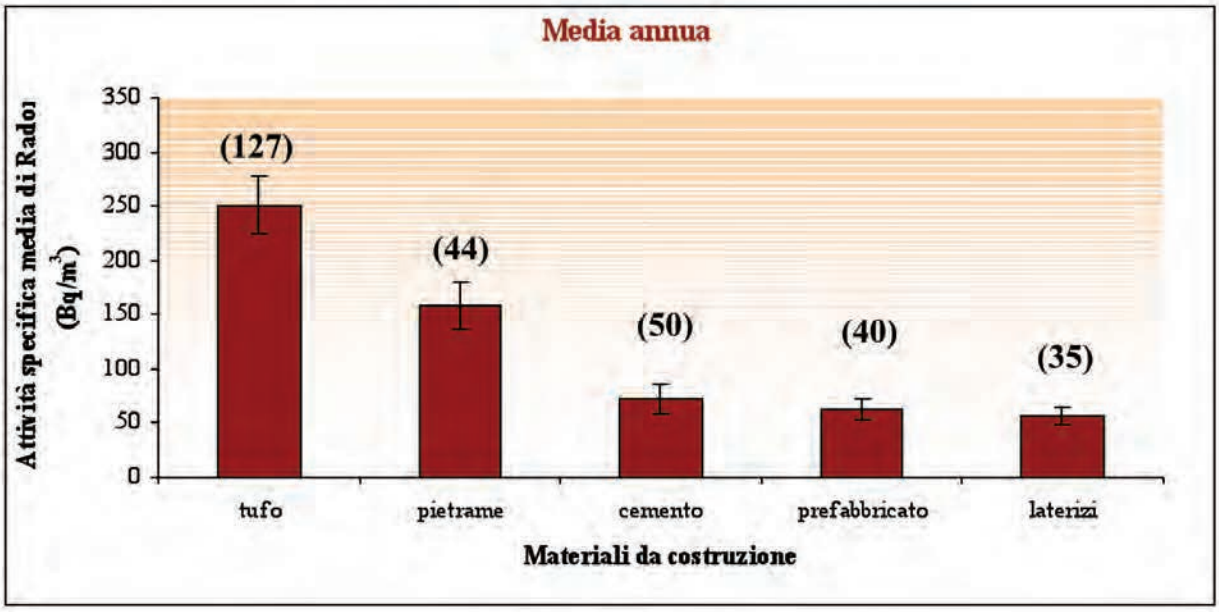



Figura 3. Attività specifica media annua di Radon in funzione dei materiali da costruzione delle pareti. In parentesi è riportato il numero di locali aventi quel materiale.

| Tipo di locale | N. misure | Att. Spec. media ($Bq/m^3$) |
|---|---|---|
| Biblioteche | 15 | 174 ± 12 |
| Laboratori | 57 | 162 ± 8 |
| Uffici | 207 | 138 ± 3 |
| Aule | 21 | 136 ±10 |

Tabella 2. Confronto tra i valori medi ottenuti in locali a diversa destinazione.

| Università | N. misure | Att. Spec. media ($Bq/m^3$) |
|---|---|---|
| S.U.N. | 203 | 167 ± 17 |
| Univ. del Sannio | 53 | 122 ± 15 |
| Univ. di Salerno | 40 | 59 ± 8 |

Tabella 3. Confronto tra i valori medi ottenuti nelle tre università.

costruzione delle pareti, dal tasso di ventilazione e dalle abitudini di vita degli occupanti. Confronti sono stati fatti con altre indagini eseguite nella regione Campania. I risultati del presente lavoro sono stati la base per predisporre un'indagine più ampia in molti più locali della S.U.N. che tra pochi mesi verrà conclusa e permetterà di avere una visione aggiornata e più dettagliata.

## BIBLIOGRAFIA


Bochicchio F., Campos Venuti G., Nuccetelli S., Risica S., Tommasino L., Torri G. (1996). Results of the Representative Italian National Survey on Radon Indoors. Health Phys. 71, 5, 741-748.

CamposVenuti, G., Grisanti, A., Grisanti, G., Risica, S., Simula, S., Borio, R., (1987). An indoor radon study to test the methodology for a National survey. Radiat. Prot. Dosimetry 24, 379–382.

De Cicco, F., M. Pugliese, V. Roca, C. Sabbarese, (2013). Validation of the use of a scanner for track counting and thickness measurement of the LR115 radon detectors. Radiation Protection Dosimetry 1–6.

Gialanella, G., Napolitano, M., Roca, V., SperanzaP.R. (1988). Natural and artificial levels of radioactivity in soil of the Campania regio. In: Proc. Seventh Int. Cong. Of the IRPA, Sydney, 10-17 April.

Sabbarese C., De Martino S., Gialanella G., Roca V., Baldassini P.G., Cotelessa G., Sciocchetti G. (1993). A survey of indoor 222Rn in the Campania region. Radiation Protection Dosimetry, 48 (3), 257-263.

Sabbarese, C, A. D'Onofrio, M. Pugliese, V. Roca, F. Terrasi, P. Vollaro. High levels of Radon concentrations in the Neapolitan area. In: Proceedings of 5th Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects, September 4-7, 2000 Monaco, Germania.

Venoso G., F., De Cicco, B. Flores, L. Gialanella, M. Pugliese, V. Roca, C. Sabbarese (2009). Radon concentrations in schools of theNeapolitan area. Radiation Measurements, 1-4, 25-28.