Variazioni stagionali inverse della concentrazione di radon indoor e relativo impatto sui protocolli di misura

Di Carlo C.[1], Venoso G.[1], Ampollini M.[1], Caccia B.[1], Carpentieri C.[1], Pozzi S.[1], Bochicchio F.[1]

[1]*Istituto Superiore di Sanità, Centro Nazionale per la Protezione dalle Radiazioni e Fisica Computazionale, Viale Regina Elena 299, 00161, Roma*

christian.dicarlo@iss.it

ABSTRACT

La concentrazione di radon indoor segue generalmente cicli stagionali con livelli più alti nei mesi "freddi" e più bassi in quelli "caldi". La significatività della stagionalità che ne consegue dipende principalmente dalla temperatura e dalle condizioni climatiche dell'area; in particolare dai cambiamenti di quei parametri atmosferici che governano l'ingresso di radon dal sottosuolo (i.e. stack effect e wind effect). Ne risultano, ad esempio, variazioni più intense nella concentrazione di radon tra periodo caldo e periodo freddo in regioni in cui la temperatura invernale è più bassa.

Tuttavia, la suddetta periodicità è modificata da parametri "individuali" come le abitudini degli occupanti (i.e. cambiamenti nel numero di ricambi d'aria di ciascun ambiente), i pattern di occupazione, e le caratteristiche costruttive dell'edificio (i.e. materiali e tipologia della costruzione). Quanto detto si riflette in variazioni stagionali differenti, anche significativamente, tra edifici della stessa regione e determina situazioni inverse in cui la concentrazione di radon nel periodo primaverile ed estivo può superare quella registrata in autunno e inverno. Generalmente, ci si riferisce a queste situazioni con l'espressione "reverse seasonal variation".

Variazioni stagionali inverse possono dar luogo a significative sottostime dell'effettiva concentrazione media di radon indoor laddove vengano realizzate campagne di misura che prevedono esposizioni di durata inferiore ad un anno, e.g. misure nel trimestre invernale con successiva stima della media annua con eventuale ricorso a fattori di correzione stagionali spazialmente mediati.

Nell'ambito del seguente lavoro, la concentrazione di radon è stata misurata in sette abitazioni differenti, scelte in base ai risultati di una precedente campagna con obiettivi differenti. Il periodo di osservazione, compreso tra quattro e ventinove semestri è stato scelto, per ciascuna abitazione, in relazione alla frequenza e all'entità delle variazioni stagionali inverse registrate. Le misure, di durata semestrale, hanno interessato un minimo di due locali (ma fino a quattro) per ciascuna abitazione e sono state realizzate con tre tipologie distinte di rivelatori passivi (i.e. Solid State Nuclear Track Detector). Alle misure realizzate mediante passivi è stato associato, per una delle abitazioni considerate, il monitoraggio orario con rivelatori continui (AlphaGUARD PQ2000 PRO e Tesla Tera TSR3) per un periodo complessivo di quattro anni.

Il rapporto tra la concentrazione di radon nel semestre "caldo" e in quello "freddo" è stato calcolato, per ciascun locale delle sette abitazioni, per un totale di quattordici anni. I risultati restituiti dagli SSNTDs e delle successive elaborazioni delle misure dei CRMs, mettono in luce come i protocolli di misura che prevedono periodi di monitoraggio inferiori a un anno possano condurre a bias significativi che si traducono in considerevoli sottostime, se il periodo considerato corrisponde o comprende il periodo invernale, o in significative sovrastime, se la misura viene condotta durante la stagione primaverile o estiva. È stato inoltre dimostrato come l'eventuale utilizzo di fattori di correzione stagionali, pratica comune in alcuni stati europei possa condurre a peggioramenti ulteriori di sovrastime e sottostime.

ISBN 9788888648484

INTRODUZIONE

Variazioni temporali della concentrazione di radon indoor (nel seguito “radon” e “Rn” verranno utilizzati in maniera equivalente per riferirsi all’isotopo 222 di tale radionuclide) sono state, nel tempo, studiate da diversi autori. Una prima componente periodica a breve termine su scala giornaliera è ben riconosciuta ed è associata al regolare ciclo giorno/notte di temperatura e pressione, oltre alle abitudini di vita degli occupanti dei locali indoor (*living habits and patterns*). Due altre componenti correlate ai fattori metereologici interessano significativamente la variabilità: la prima, di natura aperiodica, è associata a fenomeni climatici episodici (ad es., pioggia o neve) di breve durata (i.e. tempi dell’ordine di ore-giorni) e media durata (i.e. tempi dell’ordine settimane); la seconda, di natura periodica, è correlata con il “ritmo metereologico” delle quattro stagioni (Bossew and Lettner, 2007).

Queste componenti di variabilità sono state osservate in molti paesi europei (e.g. Karpińska et al., 2004; Miles, 2012) con una concentrazione di radon indoor che segue un ciclo stagionale con livelli medi più alti nei mesi “freddi” e più bassi in quelli “caldi”. L’entità del ciclo che ne risulta dipende dalla temperatura interna ed esterna oltre che dalle condizioni metereologiche dell’area. Tale periodicità è inoltre modificata generalmente da parametri *specifici,* come le abitudini degli abitanti (che hanno impatto sulla ventilazione dei locali) e le caratteristiche dell’edificio. Pertanto, l’andamento della concentrazione media stagionale di radon risulta specifico per ciascun ambiente indoor tanto da determinare situazioni con andamenti stagionali atipici. Tra questi, vi sono le variazioni stagionali inverse (*inverse seasonal variations*), caratterizzate da concentrazioni medie di radon maggiori nei mesi più “caldi” in abitazioni aventi specifiche caratteristiche (Bochicchio et al., 2005; Friedmann, 2005; Wilson et al., 1991).

L’importanza di investigare i fenomeni messi in evidenza da questi lavori è giustificata dall’uso, estremamente diffuso in alcuni paesi, dei fattori di correzione stagionali (*seasonal correction factors,* SCFs) (e.g. Baysson et al., 2003; Kozak et al., 2011; Pinel J., 1995) per stimare la concentrazione media annuale di radon sulla base di misure della durata di pochi mesi. Per quanto riguarda l’Italia, anche se è abbastanza diffuso l’uso di protocolli di misura che prevedono l’esposizione di rivelatori di radon per più periodi consecutivi della durata complessiva di un anno (che non prevedano, cioè, l’uso di SCFs), non sono rari i casi (dovuti, ad esempio, a perdita di dosimetri) per i quali risulta necessario applicare una correzione, basata sugli andamenti stagionali tipici, a misure di durata inferiore a dodici mesi al fine di “annualizzarne” il risultato (Bochicchio et al., 2005).

Questo lavoro ha l’obiettivo di valutare l’impatto delle variabilità stagionali inverse sui valori medi annuali stimati utilizzando i comuni protocolli di misura della concentrazione di radon media annuale, in termini della quale è espresso il livello di riferimento previsto dalle normative nazionali ed internazionali. Tale valutazione sarà effettuata sulla base dei dati di variabilità stagionali inverse acquisiti nell’arco di circa 15 anni in un caso-studio costituito da un gruppo di abitazioni con caratteristiche simili situate in un comune della Provincia di Roma.

MATERIALI E METODI

INDIVIDUAZIONE DELLE ABITAZIONI DEL CASO-STUDIO

Nell’ambito di una campagna volta a valutare la variabilità *year-to-year* della media annua della concentrazione di radon indoor su un campione di oltre 80 abitazioni (Bochicchio et al., 2009),

ISBN 9788888648484

sono state individuate due abitazioni (nel seguito indicate come *House 1* e *House 2*), site in un piccolo comune poco distante da Roma, caratterizzate da una variabilità stagionale inversa molto pronunciata accompagnata da concentrazioni medie annue estremamente significative.

Le abitazioni sono posizionate sulla riva settentrionale del Lago di Bracciano (Figura 1), sul clivo collinare che su di esso si affaccia, e distano meno di un chilometro l'una dall'altra. Il bacino è di origine vulcanica, come l'intera area di appartenenza all'apparato orografico del distretto vulcanico sabatino. Studi approfonditi hanno interessato l'evoluzione strutturale e geologica dell'area (De Rita et al., 2008): la ricostruzione della configurazione pre-vulcanica e delle successive sequenze vulcaniche, congiuntamente ai risultati di carotaggi, hanno restituito sezioni stratigrafiche estremamente dettagliate del suolo su cui sono in appoggio le abitazioni della zona. Il lago si trova attualmente 164 m sopra il livello del mare, mentre la prima e la seconda abitazione si trovano rispettivamente a 190 e 200 metri s.l.m.

Entrambe le abitazioni sono strutturate su due piani e sono prive di vespaio.

Dopo aver osservato, per entrambe le abitazioni, variabilità stagionali inverse anche negli anni successivi, il caso-studio è stato esteso ad altre cinque abitazioni con caratteristiche simili: due adiacenti all'*House 1* e tre adiacenti all'*House 2* (Figura 1). L'obiettivo di tale estensione è quello di verificare se le variabilità stagionali inverse siano attribuibili alle caratteristiche comuni delle abitazioni oggetto dello studio.

Figura 1 – Posizione delle sette abitazioni oggetto di misura.

TECNICHE E PROTOCOLLI DI MISURA

Dispositivi passivi basati su rivelatori a tracce nucleari

Le misure di concentrazione media annua di radon nei locali monitorati sono state realizzate, a partire dall'anno 2003, mediante dispositivi di tipo passivo basati su rivelatori a tracce nucleari (SSNTDs) esposti, ogni anno, per periodi consecutivi di sei mesi. In ciascun locale monitorato, per ogni semestre di misura, sono stati posizionati, uno accanto all'altro, due dispositivi allo scopo di valutare la precisione in campo (*in-field precision*) della tecnica di misura utilizzata[1].

[1] La valutazione della precisione delle misure in campo non sarà riportata in questo lavoro.

ISBN 9788888648484

Tre tipologie differenti di dispositivi passivi sono state impiegate nel corso della campagna:

i) CR-39 prodotti da *Intercast Spa* con camera a diffusione (holder) *Radout* progettata da *mi.am*;

ii) CR-39 prodotti da *TASL Ltd* con holder progettato da *Tasl Ltd*;

iii) LR 115 in holder ENEA sigillato all'interno di una bustina di polietilene.

Per i primi 8 anni, sono stati utilizzati esclusivamente dispositivi basati su rivelatori LR 115, con densità di tracce misurata per mezzo di *spark counter* (Azimi-Garakani et al., 1988). Come è noto (Campi et al., 2004; De Cicco et al., 2013), questa tecnica è caratterizzata da significative deviazioni dalla risposta lineare anche ad esposizioni contenute (i.e. maggiori di 1000 kBq m^{-3} h) come conseguenza del fenomeno della sovrapposizione delle tracce. Tale fenomeno è responsabile di un aumento significativo dell'incertezza di misura per esposizioni medio-alte e, per esposizioni molto alte (> 4000 kBq m^{-3} h), della completa saturazione del rivelatore, rendendo impossibile il conteggio delle tracce (Campi et al., 2004): in quest'ultimo caso è possibile associare alla misura solo l'estremo inferiore del valore di concentrazione di radon. Ciò considerato, a partire dal 2007, sono stati utilizzati dispositivi basati su rivelatori CR-39 – con lettura delle tracce mediante sistema integrato e automatizzato di analisi immagini – per i quali la risposta risulta lineare in un intervallo di esposizioni più esteso.

Per tutto l'anno 2012, per un totale di due semestri, entrambe le tipologie di SSNTDs, LR 115 e CR-39, sono stati impiegate al fine di valutare l'accordo – confermato, poi, dai dati – tra le concentrazioni di radon restituite dal primo e dal secondo sistema.

Come evidenziato in Tabella 1, fatta eccezione per le prime due abitazioni, con quattro e tre stanze rispettivamente monitorate, per tutte le altre abitazioni sono state condotte misure esclusivamente in due stanze: soggiorno e camera da letto.

Tabella 1 - Informazioni relative alla durata ed alla tipologia del monitoraggio della concentrazione di radon nelle sette abitazioni coinvolte nel caso-studio.

	N° stanze	Inizio del monitoraggio	Fine del monitoraggio	N° periodi di sei mesi	Tipo di dispositivi
House 1	4	22/11/2003	08/07/2018	29	*i*, *ii*, *iii*
House 2	3	22/11/2004	13/07/2010	7	*ii*, *iii*
House 3	2	19/05/2007	05/06/2009	4	*ii*
House 4	2	19/05/2007	05/06/2009	4	*ii*
House 5	2	03/06/2007	10/07/2010	5	*ii*, *iii*
House 6	2	10/12/2007	17/07/2010	4	*ii*, *iii*
House 7	2	10/12/2007	17/07/2010	4	*ii*, *iii*

i) CR-39 prodotti da *Intercast Spa* con holder *mi.am*
ii) CR-39 prodotti da *TASL Ltd* con holder *Tasl Ltd*
iii) LR 115 con holder ENEA

Rivelatori attivi (Continuous Radon Monitors – CRMs)

A partire dal 2008, in una delle quattro stanze della prima abitazione (*House 1*) la concentrazione di radon è stata misurata mediante un rivelatore a camera a ionizzazione (*Pulsed Ion Chamber*, PIC) (AlphaGUARD PQ2000 Pro, Saphymo, GmbH). Siffatto CRM, con una volume attivo di 0.56 L, è caratterizzato da una sensibilità di 0.05 cpm Bq^{-1} m^3 (Genitron

ISBN 9788888648484

InstrumentGmbH, 2012). Con tale strumento è stato possibile monitorare ora per ora l'andamento della concentrazione di radon, in modo da poter individuare i periodi dell'anno con le concentrazioni più alte. Oltre al radon, sono stati monitorati i parametri ambientali più comuni quali temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica all'interno del locale considerato.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Per ciascuna delle abitazioni del caso-studio e per ciascun semestre di misura, è stato stimato il valor medio "semestrale" come media aritmetica della concentrazione di radon indoor nelle stanze monitorate: tale scelta appare giustificata dalla ridotta variabilità spaziale all'interno di una stessa casa.

Di seguito i risultati sono illustrati separatamente per: i) *House 1* e le due abitazioni adiacenti ad essa (*House 3* e *House 4*); *House 2* e le abitazioni adiacenti (*House 5*, *6* e *7*).

HOUSE 1 ED ABITAZIONI ADIACENTI AD ESSA

I risultati delle misure semestrali realizzate con dispositivi di tipo passivo sono riportati in Figura 2, relativamente all'abitazione *House 1* (nel periodo 2004–2017) ed alle abitazioni ad esso adiacenti (*House 3* and *House 4*) nel periodo 2007–2009.

Con riferimento a questo gruppo di abitazioni, *House 1* ed *House 4* hanno concentrazioni medie (sia annuali che semestrali) di gran lunga maggiori rispetto a quelle di *House 3*. In particolare, *House 1* (nel corso dei 14 anni interessati dal monitoraggio) ha concentrazioni medie annuali generalmente maggiori di 500 Bq m^{-3} (ed in alcuni casi anche superiori a 1000 Bq m^{-3}). Per questa abitazione, le concentrazioni semestrali superano, anche i 2000 Bq m^{-3} per due semestri "caldi". *House 4*, invece, ha concentrazioni medie semestrali generalmente superiori a 3000 Bq m^{-3}. Occorre sottolineare che le abitazioni *House 1* ed *House 4* sono seconde case, usate sporadicamente durante i fine-settimana ed in qualche mese estivo. Pertanto, i valori di esposizione degli occupanti, considerando i ridotti tempi di occupazione, rimangono contenuti. Inoltre, la sporadica presenza umana consente di escludere per queste abitazioni l'influenza delle abitudini degli occupanti sulle variabilità stagionali osservate.

Per quanto riguarda le variabilità semestrali, solo per *House 1* si sono osservate (nel corso di alcuni anni di misura) concentrazioni maggiori nel semestre estivo. I risultati mostrano, per l'abitazione *House 1*, variazioni "semestrali" inverse della concentrazione di radon indoor estremamente significative per i primi 4 anni, i.e. dal 2004 al 2008. Con riferimento a quest'ultimo periodo, il rapporto tra la concentrazione di radon fatta registrare nel semestre cosiddetto "caldo" (primavera-estate) e quella relativa al semestre invernale (autunno-inverno) è sempre maggiore di 1, con un valor medio di 3.7 (range: 2.7–4.2). Nel periodo 2004–2008, la concentrazione di radon indoor si mantiene sempre al di sopra di 1500 Bq m^{-3}, con un valor massimo di circa 3000 Bq m^{-3}.

A partire dal 2009, e fino alla conclusione del monitoraggio (nel 2017), le evidenze di variazioni stagionali inverse divengono sporadiche, ridotte unicamente al 2011 e al 2013, con un valor medio del rapporto tra semestre "caldo" e "freddo" pari ad 1 (range: 0.3–1.6). Questa tendenza è accompagnata da una significativa riduzione (di circa il 55%) della concentrazione di radon durante i semestri "caldi", e da un ancor più importante aumento (di oltre il 90%) nei livelli misurati nel periodo invernale. Tale riduzione è motivata dalla traslazione subita dai periodi di esposizione semestrale dal 2010 a causa di ritardi (via via accumulatisi nel corso degli anni)

ISBN 9788888648484

nelle fasi di ritiro e consegna dei dispositivi di misura: ciò ha fatto sì che la distinzione tra semestri “caldi” e “freddi” divenisse più sfumata.

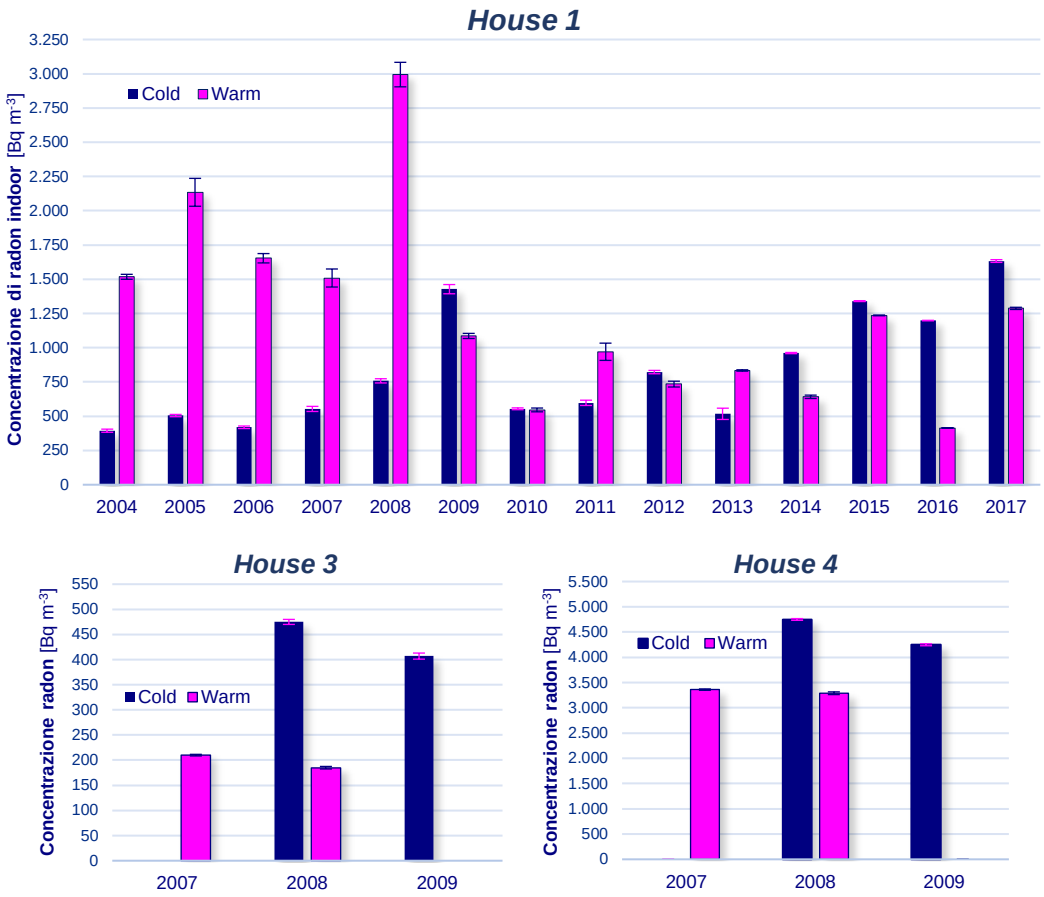

Figura 2 - Concentrazioni medie semestrali di radon, misurate dal 2014 al 2017, nell’*House 1* (box in alto) e, dal 2007 al 2009, nelle case ad esso adiacenti *House 3* (box in basso a sinistra) e House 4 (box in basso a destra).

Studio dell’andamento orario della concentrazione di radon in House 1

Al fine di meglio comprendere le differenti componenti periodiche e aperiodiche responsabili delle variazioni stagionali inverse osservate, un rivelatore attivo è stato posizionato in una delle stanze di *House 1*. Il periodo di monitoraggio è stato scelto in corrispondenza dei due semestri, estivo e invernale, del 2008 e per la medesima estensione temporale nel 2009. I risultati delle misure sono riportati in Figura 3.

Come chiaramente osservabile, in corrispondenza delle mensilità comprese tra maggio e agosto, la concentrazione di radon subisce bruschi incrementi, di durata e importanza estremamente variabile. Questi periodi *di picco* sono, infatti, caratterizzati da una durata compresa tra un minimo di una o due settimane e un massimo di un mese e da concentrazioni *di picco* variabili tra 1 kBq m^{-3} e 20 kBq m^{-3}.

ISBN 9788888648484

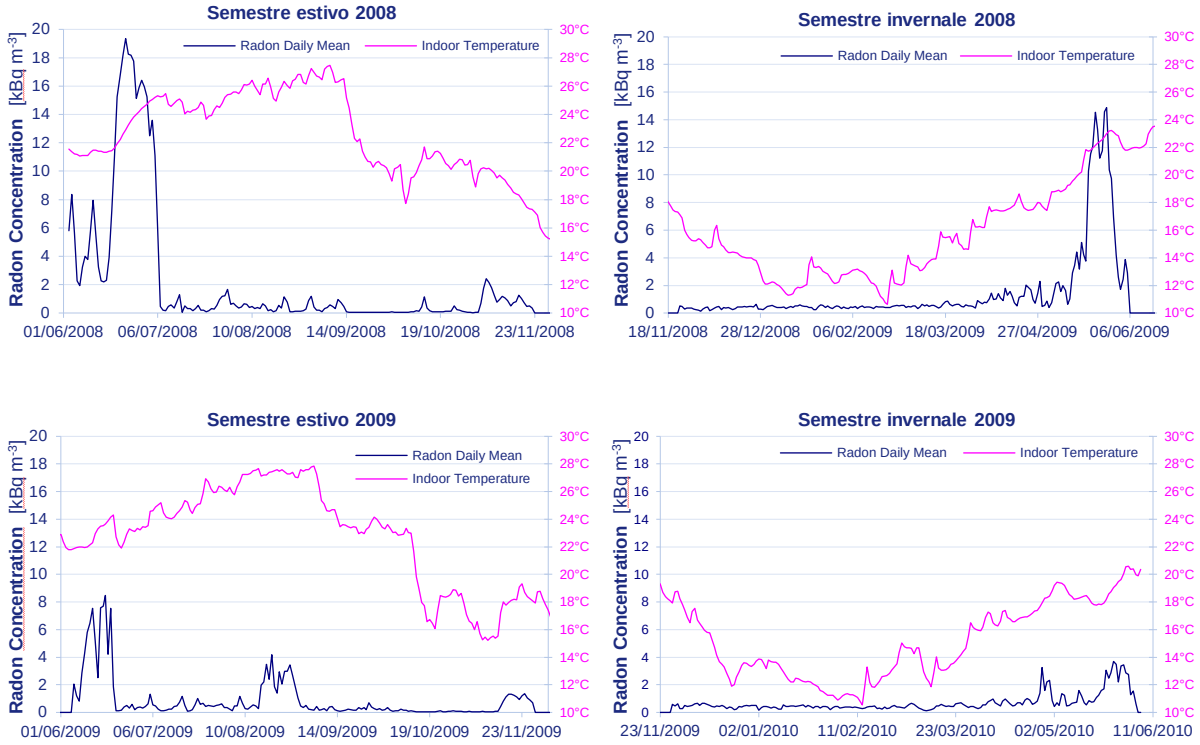

Figura 3 - Grafici della concentrazione media giornaliera di radon in *House 1* nei 4 semestri monitorati del periodo 2008–2009. Per ciascuno dei semestri, è riportato anche l'andamento della temperatura all'interno del medesimo ambiente.

Oltre alle variazioni giorno notte, in Figura 3 non risultano apprezzabili, se di modesta entità (<500 Bq m^{-3}), componenti periodiche e aperiodiche, per effetto della scala delle ordinate scelta per la rappresentazione.

Analizzando singolarmente tutti gli incrementi osservati nel corso dei quattro semestri oggetto di misure, le differenti situazioni *di picco* possono essere ricondotte alle due tipologie riportate in Figura 4:

1 Periodi *di picco* in cui la concentrazione di radon, fatta eccezione per componenti aperiodiche a medio termine (associate prevalentemente alle abitudini degli occupanti) e di entità ridotta, cresce fino a valori di diversi kBq m^{-3} salvo poi stabilizzarsi su detti valori con una decrescita lenta a medio termine, i.e. settimane, (Figura 4, grafico di sinistra).
2 Periodi *di picco* in cui si evidenziano le attività quotidiane degli occupanti che producono una ventilazione naturale degli ambienti, (Figura 4, grafico di destra).

All'andamento osservato al punto 1 si sovrappone, quindi, una componente con periodicità fissa a breve termine (i.e. giornaliera) associata all'incremento dei ricambi d'aria durante le prime ore del mattino per effetto dell'intervento degli occupanti sullo stato di apertura e chiusura degli infissi. Per questo secondo gruppo è importante osservare come la concentrazione di radon, bruscamente ridotta dall'apertura di porte e finestre, venga repentinamente ripristinata al valore precedente all'apertura, i.e. fino a 10 kBq m^{-3}, nel giro di qualche ora.

ISBN 9788888648484

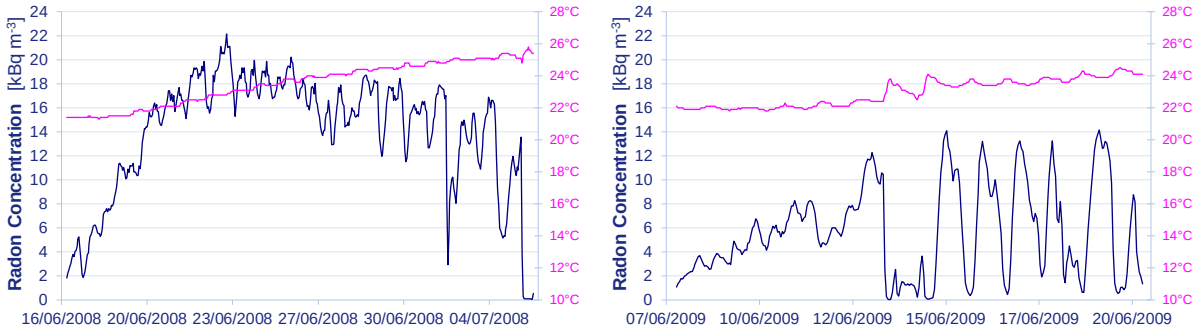

Figura 4 - Differenti andamenti osservati per la concentrazione di radon durante i periodi di picco e relativa temperatura registrata nel medesimo locale. Da sinistra verso destra, in accordo alla numerazione del testo, periodi di picco di tipo 1 e 2.

HOUSE 2 ED ABITAZIONI ADIACENTI AD ESSA

I risultati delle misure semestrali relativamente all'abitazione *House 2* (nel periodo 2005–2010) e alle abitazioni ad esso adiacenti (*House 5*, *House 6 ed House 7)* sono riportati in Figura 5.

Con riferimento a questo gruppo di abitazioni, *House 2* ed *House 5* hanno, per diversi semestri concentrazioni medie superiori a 500 Bq m^{-3} e, nel caso di *House 5,* anche maggiori di 2000 Bq m^{-3}. Così come osservato in precedenza per le *House 1* e *4*, anche *House 5* è una seconda casa utilizzata saltuariamente e, quindi, relativamente all'effettiva esposizione degli occupanti valgono le stesse considerazioni riportate nella sezione precedente.

Per quanto riguarda *House 2*, variazioni stagionali inverse sono state riscontrate negli anni 2005, 2006 e 2009, cioè in 3 dei 4 anni per i quali sono disponibili dati in entrambi i semestri. Suddette variazioni, in termini di rapporto tra la concentrazione fatta registrare nel semestre "caldo" e quella misurata nel semestre "freddo", appaiono meno pronunciate di quelle relative a *House 1*, con un valor medio di 1.7 (range: 0.9–3.2). Per ciò che concerne la concentrazione di radon indoor nel semestre "caldo", essa si mantiene per tutto il periodo di monitoraggio inferiore ad 800 Bq m^{-3}, con valori dispersi con $\sigma_{k=1}$=100 Bq m^{-3} attorno ad una media di 665 Bq m^{-3}. Questa significativa riduzione, se comparata con quanto osservato nella prima abitazione (i.e. $AM_{House\ 1}$=1962 Bq m^{-3}), non si riscontra nel semestre freddo dove la concentrazione misurata durante i sei anni di monitoraggio è sostanzialmente equivalente a quella osservata per *House 1* (AM≈500 Bq m^{-3}).

Infine, contrariamente a quanto evidenziato per il primo gruppo di abitazioni, la scelta di 3 case nelle immediate vicinanze di *House 2* ha consentito l'individuazione di una terza evidenza di variazioni stagionali inverse, *House 5*. Per quest'ultima, con riferimento all'unico anno, il 2009, per il quale sono disponibili misure per entrambi i semestri, si osserva una concentrazione doppia nel periodo estivo (i.e. 2400 Bq m^{-3}) rispetto a quello invernale. Relativamente alle ultime due abitazioni – i.e. *House 6* e *7* – una sostanziale riduzione dei livelli di radon indoor (con concentrazioni rispettivamente sempre inferiori a 200 e 400 Bq m^{-3}) accompagna il mancato riscontro di stagionalità inverse in detti livelli.

ISBN 9788888648484

Figura 5 - Concentrazioni medie semestrali di radon, misurate dal 2015 al 2010, in *House 2* (box in alto a sinistra) e, dal 2008 al 2010, nelle case ad esso adiacenti *House 5* (box in alto a destra) e House 6 (box in basso a sinistra). In *House 7* (box in basso a destra) le misure si riferiscono al periodo 2008–2010.

IMPATTO DELLE VARIAZIONI STAGIONALI INVERSE SUI PROTOCOLLI DI MISURA

In diversi Paesi la valutazione della concentrazione media annua di radon indoor viene effettuata sulla base di misure la cui durata è inferiore ad un anno (World Health Organization, 2009) con l'adozione di fattori di correzione stagionali *ad hoc,* diversi da regione a regione. Spesso si utilizza un periodo di misura di circa 3 mesi (IAEA, 2013) con alcuni Stati (ad esempio, Svezia e Finlandia) che raccomandano l'esecuzione durante la stagione fredda.

Misure con rivelatori passivi di durata inferiore ad un anno, in caso di stagionalità inversa più o meno pronunciata, conducono quindi a sovrastime della concentrazione di radon indoor media annuale. Un esempio dell'impatto delle variazioni stagionali sui dati acquisiti nell'*House 1* del presente studio è illustrato in Figura 6. In tale figura, utilizzando i dati disponibili ora per ora per l'anno 2008, sono state calcolate: le medie trimestrali (in blu) stimate a partire dal primo giorno di ciascun mese dell'anno; le medie stagionali (in grigio) e la media annuale (in fucsia).

Dalla Figura 6 si osserva chiaramente come, misure trimestrali realizzate nel periodo compreso tra marzo e luglio, restituiscano valori di concentrazione superiori (anche di un fattore 3) a quello che sarebbe stato ottenuto con misura annuale. Discorso opposto per i mesi compresi tra settembre e gennaio, in cui misure trimestrali restituirebbero una sottostima (di un fattore 3-4) dell'effettivo valor medio annuo.

ISBN 9788888648484

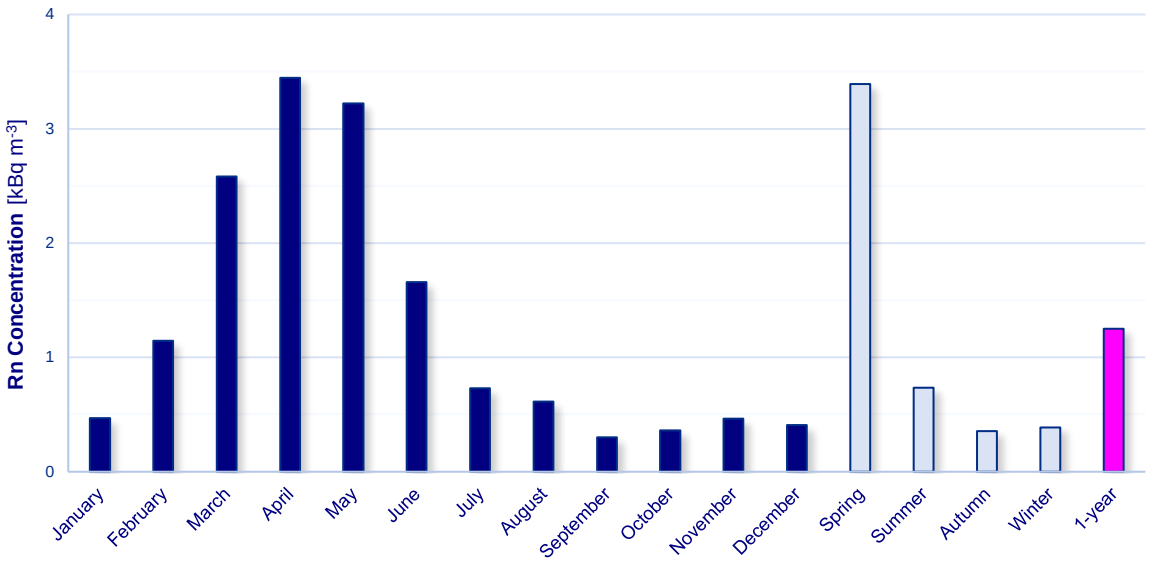

Figura 6 - Il grafico a barre in blu riporta la concentrazione di radon media trimestrale misurata a partire dal mese in ascissa. Il grafico a barre in grigio riporta la concentrazione di radon media stagionale misurata a partire dalla stagione in ascissa. Il valore medio annuo (in fucsia) effettivo è inoltre riportato per consentire il confronto.

Inoltre, osservando la Figura 6, è fondamentale mettere in evidenza come l'utilizzo di fattori di correzione stagionali contribuisca a peggiorare la stima della concentrazione media annuale. In particolare, il valore restituito da una misura trimestrale in alcuni mesi "caldi" (ad es., aprile, maggio), già sovrastimata rispetto alla media annua effettiva, verrebbe ulteriormente incrementata dall'applicazione di detti coefficienti, aggravando la sovrastima. Analogo discorso vale per alcuni mesi "freddi" (es. dicembre e gennaio) per i quali l'adozione di fattori di correzione ridurrebbe ulteriormente la già-sottostima della media annuale. Quest'ultima eventualità potrebbe portare alla mancata identificazione, in alcuni casi, del superamento del livello di riferimento previsto dalla direttiva 2013/59/Euratom (European Commission, 2013). Per questo motivo, appare preferibile effettuare misure della durata di un anno per la valutazione della concentrazione media annuale in abitazioni con caratteristiche simili a quelle del presente caso-studio e di altri studi in letteratura (e.g. poste su pendio ed esposte a Sud) (Gammage et al., 1992; Wilson et al., 1991).

CONCLUSIONI

I risultati del presente caso-studio confermano l'impatto delle variazioni stagionali inverse sulle stime di concentrazione media annuale se queste ultime sono ottenute sulla base di misure di pochi mesi. Concentrazioni medie più alte nel periodo "caldo" sono state riscontrate in 3 delle 7 abitazioni (con caratteristiche simili) oggetto dello studio, confermando quanto riportato in letteratura in merito ad edifici posti su pendio ed esposti a Sud, ma evidenziando come il fenomeno non sia determinabile unicamente dalla conoscenza delle caratteristiche dell'edificio e dell'orografia del territorio.

Per questo tipo di abitazioni, risulta comunque preferibile evitare misure di concentrazione di radon di durata inferiore ad un anno e l'adozione di fattori di correzione stagionale medi.

Inoltre, relativamente ad eventuali azioni di risanamento occorre prestare attenzione a che, in fase di progettazione, siano attentamente valutati gli effetti di ventilazione naturale e forzata, e, in fase di valutazione dell'efficacia, si prevedano misure di verifica *anche* nei mesi estivi.

ISBN 9788888648484

BIBLIOGRAFIA

Azimi-Garakani, D., Flores, B., Piermattei, S., Susanna, A.F., Seidel, J.L., Tommasino, L., Torri, G., 1988. *Radon Gas Sampler for Indoor and Soil Measurements and its Applications*. Radiat. Prot. Dosimetry 24, 269–272.

Baysson, H., Billon, S., Laurier, D., Rogel, A., Tirmarche, M., 2003. *Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France*. Radiat. Prot. Dosimetry 104, 245–252.

Bochicchio, F., Ampollini, M., Antignani, S., Bruni, B., Quarto, M., Venoso, G., 2009. *Results of the first 5 years of a study on year-to-year variations of radon concentration in Italian dwellings*. Radiat. Meas. 44, 1064–1068.

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

Bossew, P., Lettner, H., 2007. *Investigations on indoor radon in Austria, Part 1: Seasonality of indoor radon concentration*. J. Environ. Radioact. 98, 329–345.

Campi, F., Caresana, M., Ferrarini, M., Garlati, L., Palermo, M., Rusconi, R., 2004. *Uncertainty evaluation of radon measurements with LR115 detector and spark counter*. Radiat. Prot. Dosimetry 111, 59–64.

De Cicco, F., Pugliese, M., Roca, V., Sabbarese, C., 2013. *Dependence of the LR-115 radon detector calibration factor on track density*. Appl. Radiat. Isot. 78, 108–112.

De Rita, D., Di Filippo, M., Rosa, C., 2008. *Structural evolution of the Bracciano volcano-tectonic depression, Sabatini Volcanic District, Italy*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 110, 225–236.

European Commission, 2013. *Council Directive 2013/59/Euratom*. Off. J. Eur. Union 56, 216.

Friedmann, H., 2005. *Final results of the Austrian Radon Project*. Health Phys. 89, 339–348.

Gammage, R.B., Dudney, C.S., Wilson, D.L., Saultz, R.J., Bauer, B.C., 1992. *Subterranean transport of radon and elevated indoor radon in hilly karst terrains*. Atmos. Environ. Part A, Gen. Top. 26, 2237–2246.

Genitron InstrumentGmbH, 2012. *AlphaGUARD Portable Radon Monitor* 1–59.

IAEA, 2013. *National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings*. IAEA Anal. Qual. Nucl. Appl. 35.

Karpińska, M., Mnich, Z., Kapała, J., 2004. *Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland*. J. Environ. Radioact. 77, 101–109.

Kozak, K., Mazur, J., Kozłowska, B., Karpińska, M., Przylibski, T.A.A., Mamont-Cieśla, K., Grzaadziel, D., Stawarz, O., Wysocka, M., Dorda, J., Zebrowski, A., Olszewski, J., Hovhannisyan, H., Dohojda, M., KapaŁa, J., Chmielewska, I., KŁos, B., Jankowski, J., Mnich, S., Kołodziej, R., Grządziel, D., Stawarz, O., Wysocka, M., Dorda, J., Żebrowski, A., Olszewski, J., Hovhannisyan, H., Dohojda, M., KapaŁa, J., Chmielewska, I., KŁos, B., Jankowski, J., Mnich, S., Kołodziej, R., 2011. *Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon*. Appl. Radiat. Isot. 69, 1459–1465.

Miles, J., 2012. *Temporal Variation of Radon Levels in Houses and Implications for Radon Measurement Strategies*. Radiat. Prot. Dosimetry 93, 369–375.

Pinel J., et al., 1995. *Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom*. Radiat. Prot. Dosimetry 58, 127–132.

Wilson, D.L., Gammage, R.B., Dudney, C.S., Saultz, R.J., 1991. *Summertime elevation of 222rn levels in huntsville, alabama*. Health Phys. 60, 189–197.

World Health Organization, 2009. *Indoor Radon a Public Health Perspective*. Int. J. Environ. Stud. 67, 108.

ISBN 9788888648484