

Deliberazione della Giunta Regionale 25 novembre 2022, n. 61-6054

L.r. 5/2010. Individuazione, ai sensi dell'art.11, comma 3, del D.lgs. 101/2020, delle "aree prioritarie", già "zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon", ai sensi dell'art.10 sexies del D.lgs. 230/1995 e disposizioni attuative del Piano regionale di Prevenzione 2020-2025, di cui alla d.g.r. 16-4469 del 29.12.2021.

A relazione degli Assessori Icardi, Marnati:

Premesso che l'articolo 11 della Legge regionale 18 febbraio 2010, n. 5 "Norme sulla protezione dai rischi da esposizioni a radiazioni ionizzanti" stabilisce che:

al comma 1, la Regione si doti di strumenti idonei per la individuazione, la prevenzione e la riduzione dei rischi connessi alla esposizione al gas radon ed alla radioattività di origine naturale;

al comma 2, in particolare, la Giunta regionale individui, con propria deliberazione, su proposta dell'ARPA, le zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon ai sensi dell'articolo 10 sexies del D.lgs. 230/1995, sulla base delle linee guida e dei criteri emanati dalla Commissione di cui all'articolo 10 septies, e le zone caratterizzate dalla presenza di radioattività naturale;

al comma 3, nelle more della definizione delle suddette linee guida e criteri, la Regione, avvalendosi del supporto dell'ARPA, effettui una prima mappatura delle suddette aree e che l'elenco venga pubblicato sul Bollettino ufficiale della Regione (BUR).

Premesso, altresì, che sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 201 del 12.08.2020 è stato pubblicato il Decreto legislativo 31 luglio 2020 n. 101 "Attuazione della Direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le Direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della Legge 4 ottobre 2019, n. 117", che abroga, tra l'altro, il D.lgs. 230/1995 e che:

all'articolo 10, comma 1, sancisce che entro dodici mesi dalla data della sua entrata in vigore, con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, su proposta dei Ministri dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e della salute, di concerto con i Ministri dello sviluppo economico, del lavoro e delle politiche sociali e delle infrastrutture e dei trasporti, d'intesa con la Conferenza Stato-Regioni, sentito l'ISIN e l'Istituto superiore di sanità (ISS), venga adottato il Piano nazionale d'azione per il radon, concernente i rischi di lungo termine dovuti all'esposizione al radon;

al successivo comma 2, lettera b), precisa che il suddetto Piano individua, tra l'altro i criteri per la classificazione delle zone in cui si prevede che la concentrazione di radon come media annua superi il livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici;

all'articolo 11, comma 1, è stabilito che le Regioni e le Province autonome di Trento e Bolzano, entro ventiquattro mesi dall'entrata in vigore del Piano nazionale d'azione per il radon, sulla base delle indicazioni e dei criteri tecnici ivi contenuti individuino le aree in cui si stima che la concentrazione media annua di attività di radon in aria superi il livello di riferimento in un numero significativo di edifici;

al successivo comma 2, stabilisce che l'elenco delle aree venga pubblicato da ciascuna Regione e Provincia Autonoma sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana;

al comma 3, prevede che, fino al termine di cui al comma 1, Regioni e le Province autonome di Trento e Bolzano, sulla base di metodologie documentate, effettuino le misurazioni di radon, acquisiscano i relativi dati e individuino le aree prioritarie nelle quali la stima della percentuale di edifici che supera il livello di 300 Bq/m^3 è pari o superiore al 15 per cento, procedendo alla pubblicazione dell'elenco con le modalità di cui al comma 2. La percentuale degli edifici è determinata con indagini o misure di radon effettuate o riferite o normalizzate al piano terra.

Richiamato che tra i Programmi Predefiniti (PP), in cui si declina il Piano regionale di Prevenzione 2020-2025, approvato con D.G.R. 16-4469 del 29 dicembre 2021, in attuazione del Piano nazionale della prevenzione 2020-2025, il PP09 “Ambiente, clima e salute” contempla, in particolare, l’Azione 9.10 “Campagne di sensibilizzazione sui rischi da radiazioni”, che prevede, tra l’altro, di effettuare una campagna di sensibilizzazione del rischio radon residenziale con particolare riferimento a quelle aree del territorio regionale che saranno definite come prioritarie, in base alla mappatura delle concentrazioni, di cui all’articolo 11 del D.lgs. 101/2020. Successivamente saranno attuate iniziative di sensibilizzazione, con particolare riferimento alle aree maggiormente interessate dalla presenza di radon.

Dato atto che con nota prot. n. 42036 del 6.5.2021 il Settore regionale “Emissione e Rischi Ambientali” della Direzione Ambiente, Energia e Territorio ha chiesto ad ARPA Piemonte di dare corso a quanto stabilito all’articolo 11, comma 3, del D.lgs. 101/2020 attraverso un aggiornamento dell’attività di mappatura del radon già in corso, comunicando gli esiti delle valutazioni effettuate.

Preso atto che con nota prot. n. 57356 del 22.6.2022 ARPA Piemonte ha trasmesso il documento “*La mappa del radon in Piemonte: un aggiornamento alla luce dell’emanazione del D.lgs 101/2020*” e che tale nuova mappatura del radon apporta importanti migliorie alla precedente, prodotta dalla medesima Agenzia nel 2009; in particolare:

- a seguito della disponibilità di nuovi dati è stato sviluppato un modello che permette di stimare le medie radon sulle aree realmente edificate e non più su generico confine amministrativo;
- è stata utilizzata la nuova carta geologica del Piemonte alla scala 1:250.000, resasi disponibile a partire dal 2012 e molto più precisa e affidabile di quella impiegata precedentemente.

Dato atto che, come da verifiche del sopra richiamato Settore regionale “Emissione e Rischi Ambientali”, con il supporto del Settore “Prevenzione, sanità pubblica veterinaria e sicurezza alimentare” della Direzione regionale Sanità e Welfare:

poiché nella norma nazionale è stabilito che “la percentuale degli edifici è determinata con indagini o misure di radon effettuate o riferite o normalizzate al piano terra”, ma non vengono date ulteriori indicazioni tecniche sulle modalità di definizione delle aree prioritarie, coerentemente con l’impostazione già utilizzata nel 2009, ARPA Piemonte ha individuato il Comune come unità territoriale di base su cui costruire la mappa regionale;

nella tabella 3.1 del suddetto documento, conservato agli atti, sono indicati i 37 Comuni piemontesi individuati come “aree prioritarie”, cioè aree nelle quali la stima della percentuale di edifici situati al piano terra che superano i 300 Bq/m³ in termini di concentrazione media annua di attività di radon, è superiore al 15% ($P_{>300} > 15\%$ al piano terra);

l’individuazione delle aree prioritarie permette di avviare le attività finalizzate a dare attuazione al sopra richiamato PP09 del Piano regionale di prevenzione (PRP) 2020-2025, con particolare riferimento alle campagne di comunicazione e sensibilizzazione del rischio radon residenziale, di cui all’Azione 9.10.

Visto il D.lgs. n. 101/2020;

vista la legge regionale n. 5/2010;

vista la D.G.R. 16-4469 del 29/12/2021.

Attestata l’assenza degli effetti diretti ed indiretti, del presente provvedimento, sulla situazione economico-finanziaria e sul patrimonio regionale, ai sensi della D.G.R. 1-4046 del 17 ottobre 2016, come modificata dalla D.G.R. 1-3361 del 14 giugno 2021.

Attestata la regolarità amministrativa del presente provvedimento, ai sensi della D.G.R. 1-4046 del 17 ottobre 2016, come modificata dalla D.G.R. 1-3361 del 14 giugno 2021.

Tutto ciò premesso, la Giunta regionale, unanime,

delibera

- di individuare, ai sensi dell'articolo 11, comma 3, del decreto legislativo 101/2020 e dell'articolo 11, commi 2 e 3, della legge regionale 5/2010, nonché nelle more dell'approvazione del Piano nazionale d'azione per il radon, quali "aree nelle quali la stima della percentuale di edifici situati al piano terra che superano i 300 Bq/m³, in termini di concentrazione media annua di attività di radon, è superiore al 15% ("aree prioritarie)", già "zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon ex articolo 10 sexies del d.lgs. 230/1995", quelle riportate nell'Allegato A, quale parte integrante e sostanziale della presente deliberazione, come proposte da ARPA Piemonte nel documento "La mappa del radon in Piemonte: un aggiornamento alla luce dell'emanazione del D.lgs 101/2020";
- di demandare, per il combinato disposto dell'articolo 11, comma 2, del Decreto legislativo 101/2020 e dell'articolo 11, comma 3, della Legge regionale 5/2010, alla Direzione regionale Ambiente, Energia e Territorio, Settore Emissioni e Rischi Ambientali, di provvedere alla pubblicazione dell'elenco delle aree, di cui alla presente deliberazione, sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana e, insieme al soprarichiamato studio di ARPA Piemonte, sul Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte;
- di demandare alla Direzione regionale Sanità e Welfare di avviare, nell'ambito della mappatura di cui alla presente deliberazione, le attività finalizzate a dare attuazione all'Azione 9.10 "Campagne di sensibilizzazione sui rischi da radiazioni" del Programma Predefinito 09 del Piano regionale di prevenzione (PRP) 2020-2025, approvato con D.G.R. 16-4469 del 29 dicembre 2021, con particolare riferimento alle campagne di comunicazione e sensibilizzazione del rischio radon residenziale;
- di dare atto che il presente provvedimento non comporta oneri aggiuntivi per il bilancio regionale.

La presente deliberazione sarà pubblicata sul Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte, ai sensi dell'art. 61 dello Statuto e dell'art. 5 della legge regionale 22/2010, nonché ai sensi dell'articolo 40 del D.lgs. 33/2013 sul sito istituzionale dell'Ente, nella sezione "Amministrazione trasparente".

(omissis)

Allegato

LR 5/2010. Individuazione, ai sensi dell'articolo 11, comma 3, del d.lgs 101/2020, delle "aree nelle quali la stima della percentuale di edifici che supera il livello di 300 Bq/m³ è pari o superiore al 15 per cento ("aree prioritarie)", già "zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon" ai sensi dell'articolo 10 sexies del d.lgs. 230/1995"

COMUNI individuati come "aree prioritarie" *	P_{>300}>15% al piano terra (percentuale di edifici situati al piano terra che superano i 300 Bq/m ³ , in termini di concentrazione media annua di attività di radon)
Andorno Micca	29
Angrogna	27
Aurano	25
Bellinzago Novarese	43
Bognanco	26
Brondello	16
Brossasco	17
Buriasco	19
Campiglia Cervo	95
Candelo	48
Cannobbio	22
Ceresole Reale	21
Chiusa di Pesio	15
Druogno	24
Entracque	17
Gaglianico	25
Gaiola	15
Giffenga	20
Macugnaga	28

COMUNI individuati come “aree prioritarie” *	P_{>300}>15% al piano terra (percentuale di edifici situati al piano terra che superano i 300 Bq/m ³ , in termini di concentrazione media annua di attivita' di radon)
Melle	15
Moiola	25
Noasca	15
Oleggio Castello	17
Pagno	15
Perosa Argentina	20
Peveragno	36
Quargnento	20
Re	26
Roccavione	17
Rosazza	67
Roure	16
Santa Maria Maggiore	27
Traversella	23
Venasca	18
Vigliano Biellese	34
Villar Pellice	20
Vinadio	16

* fonte “La mappa del radon in Piemonte: un aggiornamento alla luce dell’emanazione del d.lgs 101/2020” elaborato da ARPA Piemonte su istanza della Regione Piemonte



**La mappa del radon in Piemonte:
un aggiornamento alla luce
dell'emanazione del D. Lgs. 101/2020**

*Arpa Piemonte – Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici
Struttura Semplice Radiazioni Ionizzanti e Siti Nucleari*

La mappa del radon in Piemonte: un aggiornamento alla luce dell'emanazione del D. Lgs. 101/2020

Arpa Piemonte – Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici

Responsabile: Giovanni d'Amore

Struttura Semplice Radiazioni Ionizzanti e Siti Nucleari

Responsabile: Mauro Magnoni

Autori: Mauro Magnoni^(§), Enrico Chiaberto^(§), Serena Elena^(§), Paolo Falletti^(),
Rosamaria Tripodi^(§), Anna Prandstatter^(§)*

Si ringrazia Riccardo Costa Laia^(§) per l'assistenza all'editing

^(§) Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici

^() Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali*

INDICE

Capitolo 1 - Introduzione	4
1.1 Perché una nuova mappa	4
1.2 Radon e salute	5
1.3 Aspetti normativi.....	11
Capitolo 2 - Lo studio del radon in Piemonte.....	14
2.1 La mappa radon del 2009	14
2.2 Il nuovo modello radio-geo-litologico	15
Capitolo 3 – La nuova mappa del radon in Piemonte.....	26
3.1 La rappresentazione cartografica dei dati	26
3.2 Indicatori statistici e modalità di calcolo	26
3.3 Le <i>aree prioritarie</i>, l'esposizione media e le nuove mappe del radon in Piemonte	32
Capitolo 4 – Conclusioni.....	45
4.1 Significato e utilizzo delle mappe radon.....	45
4.2 Sviluppi e prospettive	45
Appendice 1 – La radioattività e il radon: generalità e unità di misura	47
Appendice 2 – Prevenzione del rischio e interventi di mitigazione	50
Appendice 3 - Metodi di misura del radon	54
Bibliografia	58

CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE

1.1 PERCHÉ UNA NUOVA MAPPA

La pubblicazione da parte di ARPA Piemonte di una prima mappa del radon della Regione Piemonte risale ormai a più di 10 anni fa' (*La mappatura del radon in Piemonte*, ARPA Piemonte, 2009), un tempo sufficientemente lungo nel corso del quale sono intervenuti diversi cambiamenti, anche normativi, che suggeriscono la necessità di una rivisitazione del vecchio lavoro. D'altra parte, già nella appena citata pubblicazione del 2009 (paragrafo 4.1, pag. 68) era stato chiaramente anticipato che il lavoro svolto, lungi dall'essere definitivo, era solo un primo passo, sia pur importante, verso un sempre maggiore approfondimento della tematica radon.

Il principale motivo che giustifica la necessità dell'emissione di un nuovo rapporto sulla mappatura del radon in Piemonte è di natura normativa. Il 27 agosto 2020 è stato infatti pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica il Decreto Legislativo 101 (D. Lgs. 101/2020) come atto di recepimento della Direttiva Euratom 59/2013. Con l'entrata in vigore di tale norma viene dato esplicitamente mandato alle Regioni di produrre una classificazione dei rispettivi territori regionali dal punto di vista del rischio di esposizione al radon (art. 11 del D. Lgs. 101/2020) fornendo anche, fin da subito, i fondamentali criteri tecnici per l'esecuzione concreta del lavoro. È quindi in quest'ottica che si è mossa ARPA Piemonte, per conto della Regione. Ne è scaturita una profonda rivisitazione del lavoro del 2009, in modo da renderlo coerente con gli attuali obiettivi normativi: la costruzione di una mappa, da pubblicare sulla Gazzetta Ufficiale, in cui siano individuate le cosiddette *aree prioritarie*, cioè quelle porzioni di territorio regionale in cui il rischio di esposizione al radon è significativamente superiore alla media.

Ad ogni modo, indipendentemente dalle nuove richieste normative, esiste anche un'altra ragione che avrebbe comunque suggerito l'opportunità di un aggiornamento del lavoro del 2009: l'ampliarsi e l'affinarsi delle conoscenze sia sul versante puramente sperimentale, con la disponibilità di nuove misurazioni dirette del radon, che sul versante della radio-geolito-logia, cioè sul contenuto in radioattività delle varie geo-litologie, aveva ormai reso superato il modello in base al quale era stata elaborata la mappa del 2009. Vedremo più in dettaglio nel seguito come tale modello sia stato profondamente rivisto e migliorato grazie a nuovi strumenti resisi via via disponibili: *in primis* una nuova carta geologica del Piemonte e poi anche la possibilità di avere informazioni cartografiche di dettaglio circa l'estensione delle aree edificate in ciascun Comune. Tutto ciò ha condotto a cambiare significativamente il modello del 2009 il quale, pur mantenendo sostanzialmente la stessa struttura matematica, è stato nella sostanza ampiamente modificato e migliorato dal punto di vista dell'affidabilità e della coerenza scientifica. Si entrerà nei dettagli di questo importante aspetto nel Capitolo 2, mentre nel prosieguo di questo Capitolo introduttivo verranno brevemente richiamati alcuni importanti temi generali riguardanti la questione radon dal punto di vista del rischio

per la salute e dell'attuale assetto normativo, da poco innovato a seguito dell'emanazione del D. Lgs. 101/2020 citato in premessa.

1.2 RADON E SALUTE

Il radon è un gas nobile radioattivo di origine naturale presente sia nell'ambiente esterno che nell'ambiente interno a causa del decadimento radioattivo dell'uranio. L'uranio, infatti, è un elemento ubiquitario nella crosta terrestre, decade spontaneamente (cioè si trasforma) in altri elementi radioattivi, dando origine a un gruppo di altri radioelementi, tra cui appunto il radon, e tutti insieme costituiscono una catena o famiglia radioattiva; per un maggiore approfondimento di questi e di altri concetti base sulla radioattività e sul radon si può fare riferimento all'Appendice 1.

Nella seguente Figura 1.1 è mostrato lo schema di decadimento della famiglia radioattiva avente per capostipite l'uranio-238 (^{238}U): in tale schema sono evidenziati tutti i vari elementi della famiglia con la loro emivita (o tempo di dimezzamento), espressa in diverse unità di misura (a=anni; g=giorni; m=minuti; μs =microsecondi) e con l'indicazione della modalità di decadimento: alfa o beta.

In giallo è evidenziato il radon, prodotto per decadimento alfa dal ^{226}Ra (radio). Esso ha un'emivita di 3,82 giorni e, essendo un gas nobile, non interagisce chimicamente con gli elementi presenti nell'ambiente; è quindi in grado, muovendosi per diffusione all'interno del reticolo cristallino delle rocce dove è stato prodotto, di fuoriuscire in atmosfera, accumulandosi, talvolta in modo consistente, soprattutto negli ambienti poco aerati. È in questi casi che il radon può essere una minaccia per la salute.

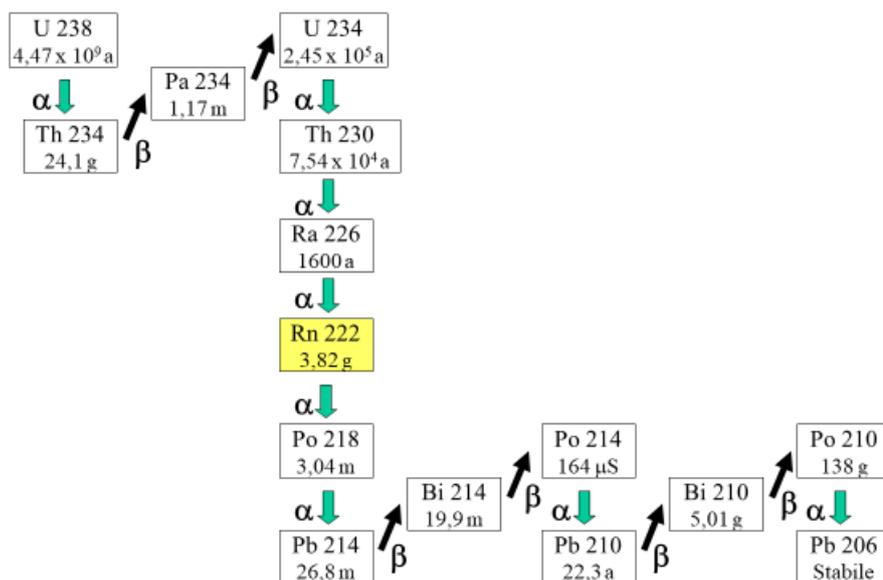


Figura 1.1 – Famiglia radioattiva dell'uranio: a metà catena è evidenziato il radon (^{222}Rn)

È infatti fin dal 1988 che il radon è stato ufficialmente riconosciuto quale agente cancerogeno certo (gruppo 1, secondo la classificazione dello IARC, l'Istituto per la Ricerca sul Cancro dell'OMS); si trattava in realtà di una evidenza già ben nota ai ricercatori del settore già da diversi decenni: studi epidemiologici effettuati sui minatori negli Stati Uniti d'America e poi anche in altri Paesi avevano chiaramente messo in luce una correlazione tra l'esposizione al radon e il tumore polmonare. A seguito di tali studi, effettuati poi, negli anni '90 del secolo scorso, anche considerando l'esposizione al radon della popolazione nelle proprie abitazioni, è stato possibile stimare che il radon e i suoi prodotti di decadimento sono la seconda causa del tumore polmonare dopo il fumo da sigaretta.

Normalmente, per semplicità, si parla di esposizione al radon, ma in realtà bisognerebbe più correttamente riferirsi insieme al *radon e ai suoi figli a vita breve* (prodotti di decadimento). Ciò con cui abbiamo a che fare è infatti una miscela di elementi radioattivi, costituiti appunto dal radon e da altri elementi radioattivi, da esso generati, detti appunto anche figli o prodotti di decadimento a vita breve. Si tratta di elementi radioattivi metallici, caratterizzati appunto da un'emivita particolarmente breve, dell'ordine dei minuti o anche meno: sono radioisotopi del polonio, del piombo e del bismuto, per la precisione: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po . Essi, attaccandosi al particolato ultrafine presente in atmosfera ($\varnothing < 1 \mu\text{m}$), vengono poi facilmente inalati fino a raggiungere in profondità bronchi e alveoli, come si può vedere dalla seguente Figura 1.2 in cui sono mostrate le varie componenti dell'apparato

respiratorio, ciascuna con evidenziate le dimensioni caratteristiche di ritenzione del particolato atmosferico stesso.

I prodotti di decadimento sono quindi trattenuti nei più profondi distretti polmonari, mentre il radon, essendo un gas, viene riemesso con gli atti respiratori; i radionuclidi sottopongono quindi le cellule basali dell'epitelio bronchiale a un intenso irraggiamento da parte delle particelle α emesse dai radioisotopi del polonio ^{218}Po e ^{214}Po .

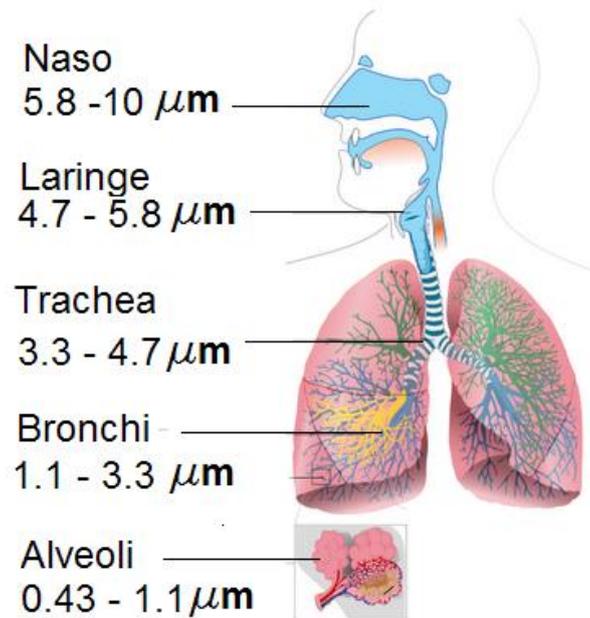


Figura 1.2 – Componenti dell'apparato respiratorio e dimensioni del particolato "intercettabile" nei vari stadi

È questo il meccanismo fisico che si pensa stia alla base della carcinogenicità del radon. Una prima chiara dimostrazione del fatto che l'esposizione al radon potesse causare un incremento dell'incidenza di patologie tumorali a carico dei polmoni si ebbe, come già accennato poco sopra, nel secondo dopoguerra, con i primi studi epidemiologici sui minatori, soprattutto delle miniere sotterranee di uranio negli Stati Uniti, che misero per primi in evidenza una stretta relazione lineare tra esposizione al radon e incremento dell'incidenza dei tumori polmonari (si veda in Figura 1.3).

L'incremento dell'incidenza dei tumori polmonari si può esprimere in modo rigoroso tramite l'impiego del cosiddetto rischio relativo RR , definito come l'incremento del rischio (probabilità di incidenza) che si osserva per una data esposizione w rispetto al rischio osservato ad esposizione nulla. La relazione è quindi del tipo:

$$RR = 1 + \beta \cdot w$$

in cui β è un opportuno coefficiente ricavato sperimentalmente dagli studi epidemiologici, mentre w è l'esposizione al radon, grandezza che si ottiene moltiplicando la concentrazione del radon C (Bq/m^3) a cui si è esposti per il tempo di esposizione t .

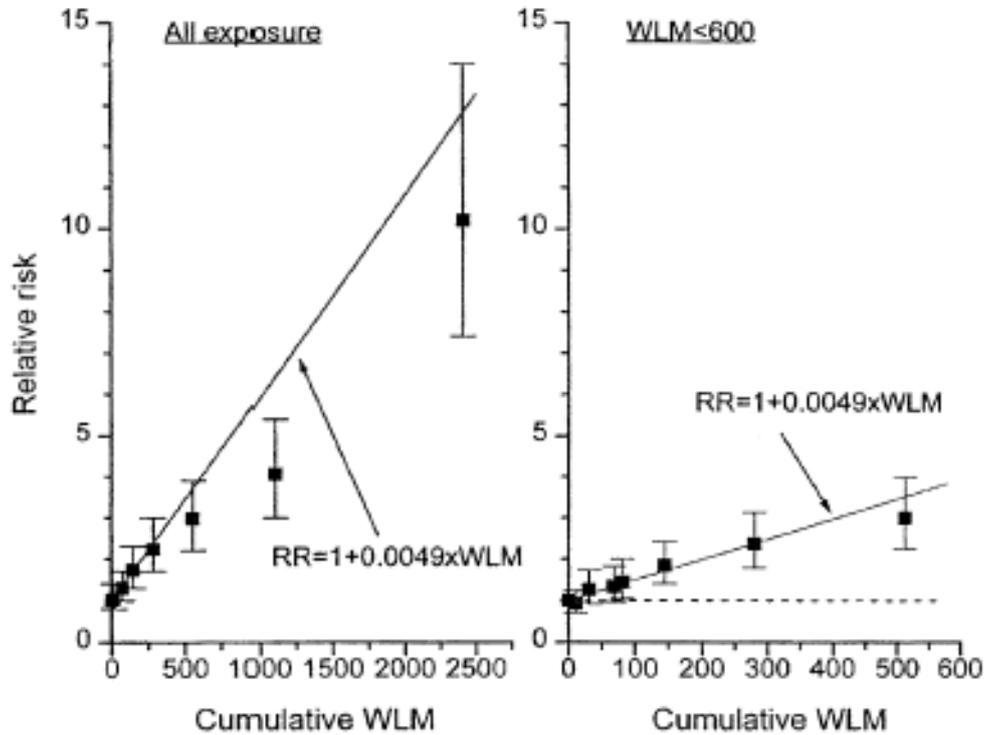
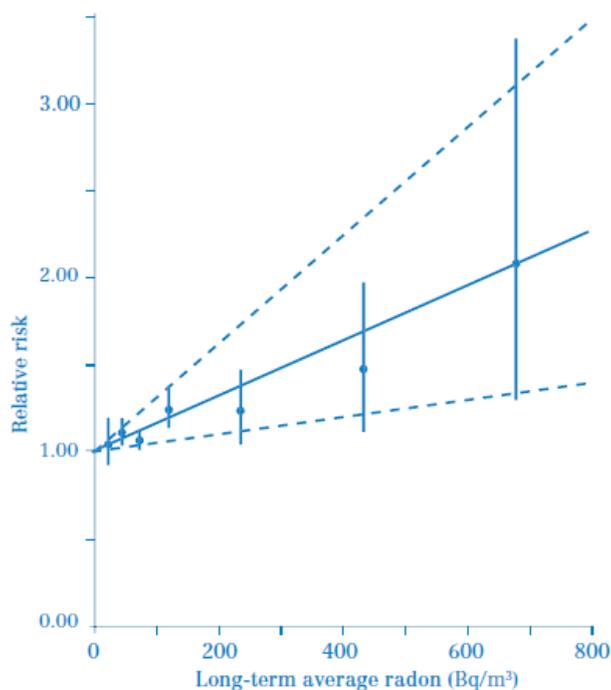


Figura 1.3 – Rischio relativo di tumore polmonare per minatori in funzione dell'esposizione cumulativa al radon (lifetime exposure), da Lubin JH et al., 1995. L'esposizione è espressa in Working Level Month.

Successive ricerche, effettuate a partire dagli anni '90 del secolo scorso, misero poi in evidenza che una relazione molto simile si poteva ricavare anche studiando l'esposizione residenziale al radon. La maggiore difficoltà di questi studi, dovuta al fatto che i livelli di radon erano mediamente molto più bassi nelle abitazioni rispetto alle miniere, indussero i ricercatori a rivalutare complessivamente i singoli studi mediante analisi complessive, dette appunto *pooled* le quali, mettendo insieme tutti i dati, aumentavano considerevolmente la potenza statistica dei singoli studi. Uno dei principali lavori di questo genere, condotto sotto la guida di Sarah Darby (Darby et al., 2005), condusse a un risultato che confermò sostanzialmente, anche per il radon "residenziale", quanto già si sapeva grazie agli studi sui minatori: il radon mostrava dunque il suo potere cancerogeno anche per normali esposizioni domestiche.

Il rischio relativo venne stimato da questo studio in $RR=1,08$, corretto poi in $RR=1,16$ per tenere conto delle incertezze, relativamente ad un'esposizione continuativa a $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$, come si può vedere nella seguente Figura 1.4. Si noti come in questo caso il rischio relativo

sia espresso in funzione della concentrazione di attività del radon C (Bq/m^3), intesa come concentrazione media a cui si è esposti nell'arco di tutta la vita.



Source: Darby et al. 2005
Relative risks and 95% confidence intervals are shown for categorical analyses and also best fitting straight line.
Risks are relative to that at 0 Bq/m^3 .

Figura 1.4 – Rischio relativo di tumore polmonare per esposizione residenziale al radon: analisi *pooled* di 13 studi epidemiologici europei (Darby et al., 2005).

Parlando di rischio relativo e studi epidemiologici non si può fare a meno di parlare di un importantissimo fattore di confondimento: il fumo da sigaretta che, notoriamente, è considerato la causa principale del tumore al polmone. Diversi studi hanno messo in evidenza che, distinguendo tra fumatori e non fumatori, l'andamento del rischio relativo risultava assai simile in entrambi i casi. Questo fatto stava ad indicare l'esistenza di un'interazione sinergica di tipo moltiplicativo tra radon e fumo di sigaretta. E, dal momento che il fumo di sigaretta è di gran lunga la causa principale del tumore polmonare ne consegue che una gran parte dei tumori polmonari attribuibili al radon riguarderebbe i fumatori. Ciò è ben messo in evidenza dalla seguente Figura 1.5 che mette a confronto il rischio assoluto per fumatori e non fumatori: si può quindi affermare a buon diritto che la più efficace opera di riduzione del rischio radon stia nel contrastare l'abitudine al fumo.

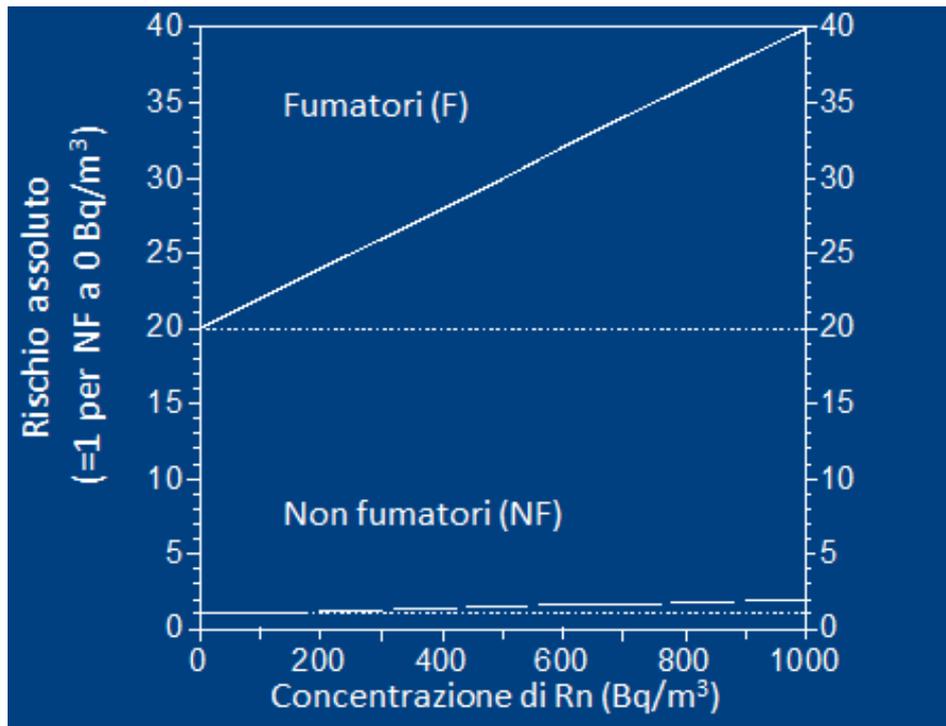


Figura 1.5 – Rischio assoluto per fumatori e non fumatori (tratto da Forastiere e Bochicchio, progetto EPIAMBNET, 2015)

Resta comunque il fatto che l'esposizione al radon, per quanto essa possa avere esiti di incremento del rischio assoluto ben diversi a seconda che l'esposto sia o meno un fumatore, è comunque una condizione che riguarda potenzialmente tutta la popolazione nel suo insieme: un fatto gravido di conseguenze sul piano pratico dei piani di prevenzione.

Se infatti l'esposizione professionale al radon dei minatori, riguardando un numero relativamente esiguo di individui, poteva ragionevolmente essere relegata all'ambito dell'igiene del lavoro, il fatto che il rischio radon continui ad essere chiaramente rivelabile anche a livelli di esposizione che si possono tranquillamente incontrare nelle normali abitazioni, ha evidentemente un grosso impatto sociale. Da qui la necessità di programmi nazionali e locali per la riduzione del rischio, programmi che non possono prescindere dalla conoscenza della distribuzione del rischio radon nei territori. Il radon è infatti sì ubiquitario, ma la sua presenza non è affatto geograficamente omogenea ed uniforme. Con questo lavoro si vuole così fornire *in primis* alle autorità, ma anche alle aziende e ai singoli cittadini, uno strumento utile per la comprensione, la gestione e, auspicabilmente, la riduzione del rischio radon in tutti i Comuni del Piemonte.

1.3 ASPETTI NORMATIVI

I controlli ai sensi di legge sulla radioattività naturale e sul radon in particolare vennero introdotti per la prima volta nella legislazione italiana nell'anno 2000, con l'emanazione del Decreto Legislativo n° 241 del 26 maggio 2000. Tale Decreto dava attuazione a una importante Direttiva europea, la n° 29/1996 Euratom che, radunando in un unico atto normativo tutti i principali aspetti della radioprotezione, fissava per la prima volta in modo organico degli standard comuni di sicurezza per l'esposizione alle radiazioni ionizzanti (*Basic Safety Standards*) per tutti i Paesi dell'Unione Europea.

In tale norma venne in particolare regolamentata l'esposizione alla radioattività naturale nelle attività lavorative; in questo ambito il radon venne riconosciuto come la principale e più diffusa causa di esposizione alla radioattività naturale e, per tale motivo, vennero introdotti precisi e stringenti obblighi di misura in determinati ambienti lavorativi. Venne anche prevista l'adozione di provvedimenti in caso di superamento di un limite, denominato significativamente Livello di Azione, espresso come la concentrazione di attività media annua C (Bq/m^3) registrata in un qualunque luogo di lavoro. Il valore del Livello di Azione per tutti i luoghi di lavoro è stato poi fissato dalla normativa nazionale di recepimento della Direttiva in $500 Bq/m^3$, superati i quali il datore di lavoro aveva in generale l'obbligo di procedere a una bonifica in modo da condurre la concentrazione media al di sotto di quel valore. L'obbligo di misurazione sussisteva per tutti i luoghi di lavoro interrati ma, in linea di principio, avrebbe potuto essere esteso anche a particolari tipologie di ambienti ritenuti a rischio oppure a tutte le costruzioni che si trovano su porzioni di territorio dove più alta è la probabilità di trovare elevate concentrazioni di radon; si tratta di zone che nella letteratura scientifica venivano a suo tempo indicate come *radon prone areas* e che ora, con la nuova normativa, sono indicate come *aree prioritarie*. In pratica però tale estensione non ebbe luogo per una serie di ragioni tutte riconducibili però sostanzialmente alla mancata pubblicazione di atti e decreti attuativi (Guide tecniche, regolamenti, ecc.) che i vari governi che si sono succeduti dal 1995 ad oggi non furono in grado di emanare.

In questa complessa e intricata situazione è intervenuto nell'estate del 2020 il D. Lgs. 101/2020, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 27 agosto 2020, che recependo la più recente Direttiva in materia, la 59/2013 Euratom, ha cambiato di nuovo le carte in tavola. La nuova Direttiva europea è infatti andata a sostituire i vecchi *Basic Safety Standards* (BSS) europei, finora basati sulla Direttiva 29/1996 Euratom, contestualmente abrogata. Alcune delle più significative modifiche introdotte dalla nuova Direttiva e quindi a cascata anche dal nuovo Decreto (D. Lgs. 101/2020), riguardano proprio il radon: non solo viene stabilita la necessità per ogni Paese di dotarsi di un Piano Nazionale Radon, ma si considera finalmente come meritevole di interesse anche l'esposizione del pubblico nella propria abitazione. Inoltre, in

conformità a quanto suggerito dall'ICRP¹ (si veda in particolare la pubblicazione ICRP n°110 del 2010), sulla base di una rivalutazione del rischio radon alla luce degli ultimi studi disponibili, vengono di fatto abbassati i vecchi "limiti di legge", espressi in termini di concentrazione di attività media annuale: viene infatti introdotto, in sostituzione del vecchio Livello di Azione per i luoghi di lavoro (*Action Level*) di 500 Bq/m³, un nuovo valore limite, chiamato Livello di Riferimento (*Reference Level*) pari a 300 Bq/m³ che oltretutto, aspetto non secondario, riguarderà indifferentemente sia le abitazioni che i luoghi di lavoro.

Oltre al valore numerico, significativamente più basso rispetto a prima (300 Bq/m³ contro 500 Bq/m³), il significato del Livello di Riferimento è anche un po' diverso rispetto a quello del vecchio Livello d'Azione. Infatti, mentre il Livello d'Azione indicava un limite perentorio, superato il quale era necessario intervenire in qualche modo ma il cui rispetto esauriva le attività di prevenzione da attuare, il Livello di Riferimento rappresenta invece un'indicazione più generale orientata alla prevenzione e riflette l'impostazione di vari organismi internazionali (tra cui in particolare l'Organizzazione Mondiale per la Sanità): si vuole infatti sottolineare, anche con la scelta di un nome diverso, non tanto la cogenza propria di un Limite, quanto piuttosto l'opportunità di ridurre le concentrazioni di radon al livello più basso ragionevolmente ottenibile, che è poi l'approccio sotteso al famoso principio ALARA (*all exposure shall be kept As Low As Reasonable Achievable*) che, come è noto, sta alla base della radioprotezione.

Ma la parte forse più innovativa sul versante radon e che ha anche un impatto concreto sulle politiche di prevenzione è contenuta nell'art. 11 del Decreto 101/2020: essa tratta infatti dell'individuazione delle cosiddette *aree prioritarie*, cioè quelle zone del territorio nazionale in cui i livelli di concentrazione indoor sono superiori alla media e perciò in esse si devono attuare più stringenti misure di prevenzione, meglio specificate poi all'art. 19 del suddetto Decreto. Nell'articolo 11 del Decreto si fornisce, nelle more dell'emanazione delle indicazioni del Piano Nazionale Radon, un criterio per una prima individuazione di tali aree.

Vengono infatti definite come *aree prioritarie* (al comma 3 dell'art. 11) quelle porzioni di territorio nei quali la stima della percentuale di edifici che superano come media annua i 300 Bq/m³ (Livello di Riferimento) è superiore al 15%. Tale percentuale si riferisce agli edifici situati al piano terra. In tal modo viene per la prima volta fornita una precisa indicazione tecnica per la definizione di "mappe radon" ufficiali che le Regioni, ai sensi del comma 2

¹ ICRP, *International Commission on Radiological Protection*: associazione scientifica di diritto britannico che raccoglie esperti di radiazioni provenienti da tutto il mondo ed esprime periodicamente Raccomandazioni sugli aspetti di radioprotezione, sulla base di una accurata *review* della più recente letteratura scientifica in materia.

del medesimo articolo 11, sono poi tenute a pubblicare sulla Gazzetta Ufficiale. Nella norma non vengono date ulteriori indicazioni tecniche sulle modalità di definizione delle suddette aree. Pertanto, coerentemente con l'impostazione già adottata nel 2009, in cui si era stato utilizzato il Comune come unità territoriale di base su cui costruire la mappa regionale, si è mantenuta tale scelta anche per questa nuova versione della mappa.

CAPITOLO 2 - LO STUDIO DEL RADON IN PIEMONTE

2.1 LA MAPPA RADON DEL 2009

I primi studi del radon in Piemonte risalgono agli anni '90, quando venne eseguito un esteso programma di monitoraggio del radon nell'ambito della Campagna Nazionale promossa dall'Istituto Superiore di Sanità e dall'ANPA (poi ISPRA, ora ISIN). Il monitoraggio fu condotto negli anni 1990-1991 (Figura 2.1), e tramite esso fu possibile calcolare il valor medio della concentrazione radon nelle abitazioni del Piemonte (69 Bq/m^3).

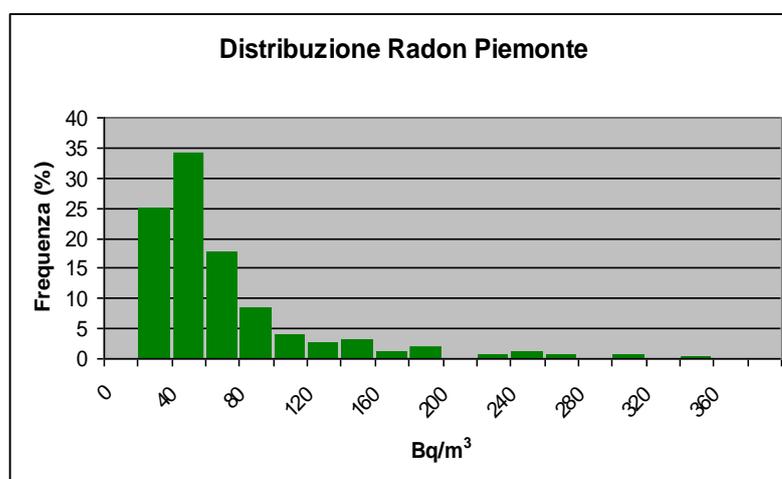


Figura 2.1 - Istogramma della distribuzione percentuale delle concentrazioni radon in abitazioni del Piemonte

Alle prime 400 misure della Campagna Nazionale, si erano poi aggiunti nel corso degli anni molti altri dati con i quali si era ottenuto un quadro sempre più dettagliato della distribuzione del radon in Piemonte. Dal 2001 in poi, i monitoraggi avevano interessato anche gli edifici scolastici in modo da stimare l'esposizione al radon della popolazione più giovane e quindi potenzialmente più sensibile ai rischi connessi alle radiazioni.

La mappatura radon del 2009 nacque da un preciso adempimento istituzionale che ARPA Piemonte aveva svolto su incarico della Regione. Il legislatore nazionale aveva infatti assegnato alle Regioni il compito di individuare le "aree ad alta probabilità di elevate concentrazioni di radon" (art.10 sexies del D.Lvo n°241/2000) tenendo conto, per quanto riguarda gli aspetti più propriamente tecnici, di criteri definiti a livello nazionale.

La mappa radon 2009 utilizzava una base dati di circa 2470 punti di misura, raccolti nell'arco di 15 - 20 anni, per i quali era disponibile una media annuale della concentrazione radon. Tale mole di dati, piuttosto eterogenea, sia per tipologia di piano sia per tipologia di destinazione d'uso degli edifici monitorati era poi stata resa omogenea con opportune

elaborazioni di "normalizzazione". La prima "normalizzazione" aveva permesso di ricondurre al piano terra tutte le misure eseguite originariamente a piani diversi. La scelta del piano terra era stata fatta ritenendo che tale piano fosse più direttamente correlabile con le proprietà emissive dei suoli e quindi più adatta per caratterizzare il territorio regionale dal punto di vista radon. L'altra "normalizzazione" aveva riguardato invece i dati riferiti agli edifici scolastici che erano stati ricondotti a quelli delle abitazioni in modo da poter utilizzare anch'essi nell'elaborazione della mappatura.

Nonostante la mole di dati radon a disposizione, il numero di Comuni piemontesi dei quali si disponeva un valore medio radon ricavato da misure sperimentali risultava limitato rispetto al numero dei Comuni esistenti all'epoca: 353 su un totale di 1206.

Per ottenere quindi un valore rappresentativo per tutte le municipalità del Piemonte era stato sviluppato e validato un modello predittivo di correlazione tra radon e le caratteristiche radio-geo-litologiche del territorio in modo da avere una stima delle concentrazioni di radon su base Comunale anche laddove non erano disponibili dati sperimentali. Per lo sviluppo di questo modello si era partiti da una carta geologica nella quale erano rappresentati una quarantina di litotipi; ad essa erano stati poi sovrapposti i dati radon sperimentali georeferenziati, in modo da poter associare a ciascuna misura una ben precisa classe litologica. Era stato così possibile calcolare una "media litologica" per ogni generica litologica, partendo dai dati sperimentali di radon che ricadono in ciascuna classe. Era quindi stata sovrapposta, alla carta geo-litologica del Piemonte, quella delle suddivisioni amministrative, in modo da poter calcolare una media radon ponderata sulle varie aree radio-geo-litologiche caratteristiche di ogni territorio Comunale. In tal modo, a partire da ciò, è stato possibile assegnare un valore medio radon anche per a Comuni in cui i dati sperimentali erano assenti o insufficienti.

2.2 IL NUOVO MODELLO RADIO-GEO-LITOLOGICO

Dal 2009, data in cui ARPA pubblicò una prima mappatura del radon in Piemonte, con un dettaglio a livello municipale, le conoscenze sulla distribuzione territoriale del radon, attraverso l'aggiunta di nuove misure di radon negli edifici e di radioattività nelle rocce e nei suoli, sono considerevolmente aumentate. La mappatura radon del Piemonte del 2009, basata su un modello predittivo a partire dalle caratteristiche radio-geo-litologiche, consentiva già di ottenere una stima delle concentrazioni di radon su base comunale nei Comuni privi di dati sperimentali.

Con questa nuova versione della mappa del radon sono state portate importanti migliorie. In particolare, con il nuovo modello che sarà illustrato in dettaglio nei prossimi paragrafi, sviluppato grazie alla disponibilità di nuovi dati, si arrivano a stimare le medie radon sulle aree realmente edificate e non più solo sul generico confine amministrativo. In tal modo, si

giunge ad una più precisa e realistica corrispondenza tra medie radon calcolate ed effettiva esposizione al radon della popolazione.

Un altro aspetto di sostanziale miglioramento rispetto al lavoro svolto in passato è stato l'utilizzo della nuova carta geologica del Piemonte alla scala 1:250.000, resasi disponibile a partire dal 2012, molto più precisa ed affidabile di quella impiegata precedentemente.

Infine, oltre a questi aspetti tecnici, un aggiornamento della mappa piemontese si imponeva anche per ragioni meramente amministrative: infatti, a seguito di diversi accorpamenti era considerevolmente variato anche il numero dei Comuni che compongono la Regione, passati a 1181 dai precedenti 1206.

Nei successivi sottoparagrafi si entrerà nel dettaglio dei principali aspetti tecnici del modello adottato, con un particolare *focus* sui nuovi dati di concentrazione di radon disponibili, nonché sulle nuove informazioni di tipo litologico e geologico e della radioattività naturale presente nei suoli e nelle rocce che, opportunamente organizzate in uno schema teorico-sperimentale, hanno consentito la creazione di questa nuova mappatura.

2.2.1 ANALISI E ARMONIZZAZIONE DEL CAMPIONE DEI DATI DI CONCENTRAZIONE RADON

I dati di concentrazione radon su cui si basa il presente lavoro sono 4373 suddivisi tra abitazioni (3432), scuole (1337), e luoghi di lavoro (356) di tipo "ufficio con accesso di pubblico", assimilati nel trattamento alla tipologia scolastica (figura 2.3). A sua volta il punto di misura è distribuito su piani differenti secondo le percentuali riportate in figura 2.4. L'intera banca dati conta soltanto le misure di durata conforme all'anno per evitare che le ben note fluttuazioni stagionali del radon costituiscano una fonte di distorsione del campione. La variabilità delle concentrazioni dovute alla posizione rispetto al piano terra è stata invece risolta normalizzando i dati con fattori opportunamente calcolati, in base a considerazioni di tipo statistico. È ben noto da svariati studi, infatti, che i dati di concentrazione radon rilevati in ogni area, si distribuiscono con buona approssimazione secondo una distribuzione log-normale la cui funzione densità di probabilità è così espressa:

$$f(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{e^{-\frac{(\ln(C)-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{C} \quad (1)$$

dove:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(C_i) = \ln(MG)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(C_i) - \mu]^2} = \ln(DSG)$$

in cui MG , DSG sono, rispettivamente la media geometrica e la deviazione standard geometrica così definite:

$$MG = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n C_i} = e^\mu$$

$$DSG = e^{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(C_i) - \mu]^2}} = e^\sigma$$

Si può dimostrare inoltre che la mediana della distribuzione log-normale è uguale alla media geometrica, mentre la moda, cioè il massimo della distribuzione, è data dalla relazione:

$$MAX = e^{\mu - \sigma^2}$$

Considerando i sottoinsiemi di dati riferiti a generici piani (PX), si può supporre che anch'essi si distribuiscano secondo delle log-normali:

$$f(C_{PX}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{PX}} \frac{e^{-\frac{(\ln(C_{PX}) - \mu_{PX})^2}{2\sigma_{PX}^2}}}{C_{PX}}$$

dove $\mu_{PX} = \ln(MG_{PX})$, $\sigma_{PX} = \ln(DSG_{PX})$. Analogamente avremo dunque che MG_{PX} , DSG_{PX} sono rispettivamente la media geometrica e la deviazione standard geometrica relativi alla distribuzione del piano PX .

Ipotizzando una relazione di tipo lineare ($C_{PX} = k_X C_{PT}$) tra la concentrazione al piano terra (C_{PX}) e quella ad un generico piano (C_{PT}), con k_X una costante di normalizzazione incognita, si ottengono le seguenti relazioni tra parametri dei vari piani:

$$\mu_{PX} = \ln k_X + \mu_{PT}$$

$$\sigma_{PX} = \sigma_{PT}$$

in cui k_x può essere ricavato dal rapporto delle medie geometriche delle distribuzioni a piani differenti:

$$k_x = \frac{e^{\mu_{PX}}}{e^{\mu_{PT}}} \quad (2)$$

In figura 2.2 è mostrato il grafico della distribuzione log-normale ottenuta coi dati regionali normalizzati al piano terra.

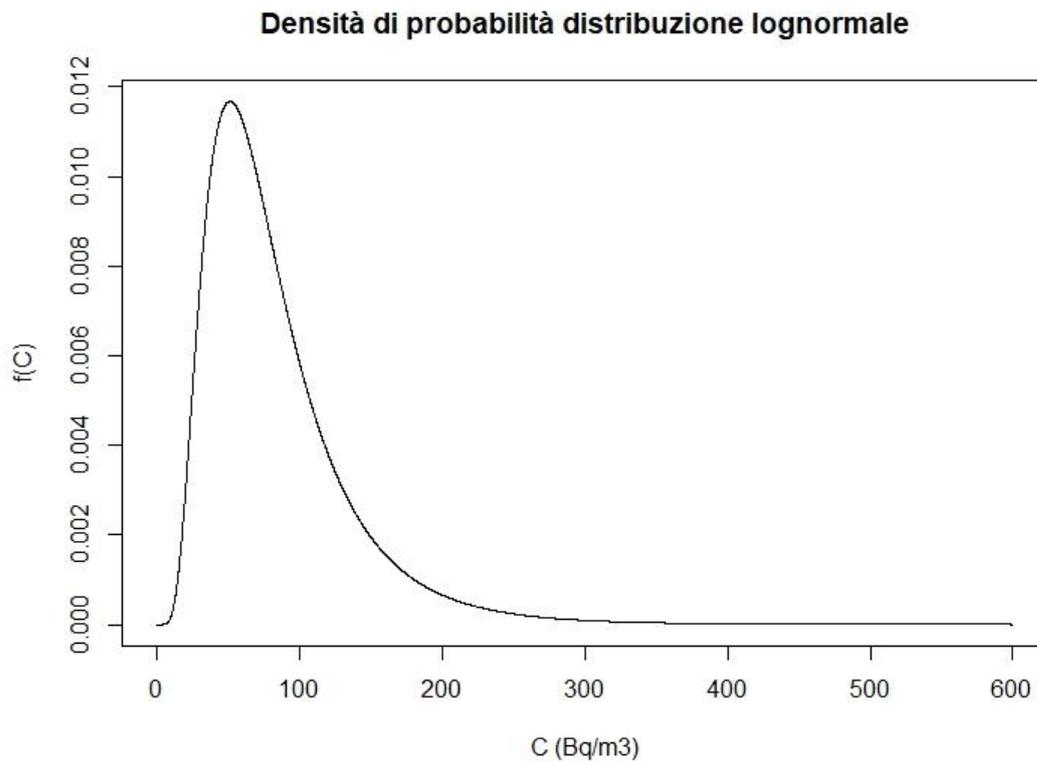


Figura 2.2 – Funzione densità di probabilità log-normale per i dati di concentrazione radon normalizzati al piano terra e per abitazione come tipologia edilizia.

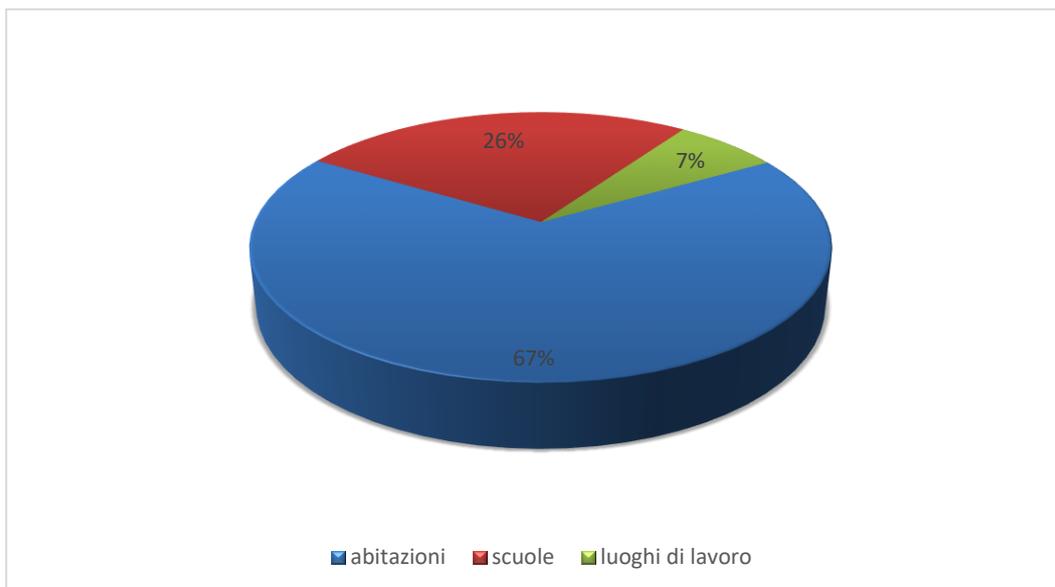


Figura 2.3 – Distribuzione delle misure per tipologia di utilizzo dell'edificio

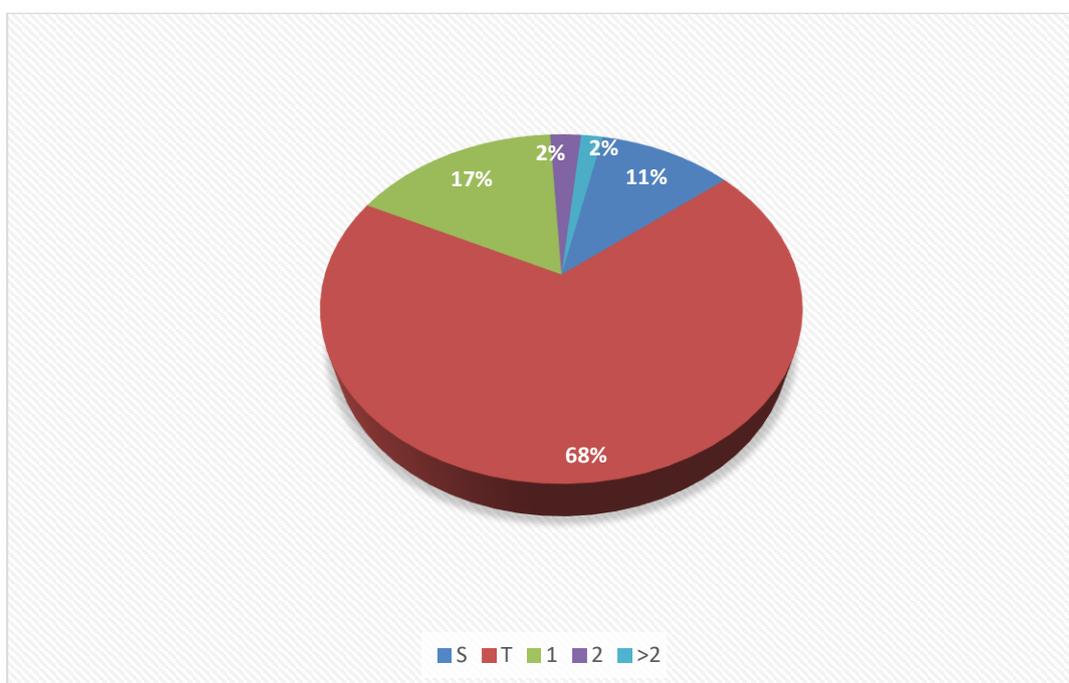


Figura 2.4 – Distribuzione delle misure secondo il piano (S=sotterraneo, T=piano terra, 1=piano primo, 2=piano secondo)

2.2.2 LA SCELTA DELLE UNITÀ DI SUDDIVISIONE DEL PIEMONTE

Parallelamente a un'analisi puramente statistica dei dati, è stata effettuata anche una classificazione del territorio in base alle unità radio-geo-litologiche presenti in Piemonte: si tratta di una suddivisione basata sia sulla natura geologica che sul contenuto di radioattività naturale delle diverse rocce. In particolare, le classi radio-geo-litologiche in cui è stata suddivisa la Regione sono state elaborate sulla base di ipotesi di natura geologica e geochemica (Falletti et al. 2016) che giustificano le minori o maggiori quantità di uranio, avvalendosi anche della conferma sperimentale fornita da misure eseguite mediante spettrometria gamma con rivelatori al germanio iperpuro (HPGe) su 440 campioni di rocce prelevate in tutto il Piemonte.

2.2.3 LA CLASSIFICAZIONE IN UNITÀ RADIO-GEO-LITOLOGICHE

Le oltre 200 unità di legenda della carta geologica del Piemonte alla scala 1:250.000 (ARPA Piemonte, 2012) sono state riprofilate in 37 unità radio-geo-litologiche caratterizzate dall'ipotesi di omogeneità di contenuto radioattivo, pur mantenendo una loro significatività dal punto di vista geologico. Gli accorpamenti o divisioni sono stati effettuati ponendo i dati della spettrometria gamma in relazione ai caratteri litologici, stratigrafici e genetici delle unità.

Le unità delle catene alpina e appenninica sono state definite in accordo con i criteri classici relativi all'evoluzione metamorfica e strutturale del prisma orogenico e alla localizzazione delle unità nel quadro paleogeografico precollisionale. Nell'individuazione delle unità radio-geo-litologiche i criteri di gerarchizzazione su base esclusivamente geologica sono stati integrati dai dati dell'analisi spettrometrica, distinguendo le unità vulcaniche e vulcanoclastiche del Paleozoico superiore sia nelle unità variamente metamorfiche del margine europeo sia nelle unità del margine africano; con analogo criterio ortogneiss e metagranitoidi sono stati tenuti distinti dal basamento polimetamorfico nelle unità Monte Rosa, Gran Paradiso e Dora-Maira e i graniti permiani del basamento subalpino costituiscono una classe a sé stante.

I depositi fluviali, fluvioglaciali e glaciali quaternari in generale presentano valori bassi di potenziale radon di origine geologica; tuttavia, si osserva una significativa variabilità rispetto alla radioattività naturale in relazione alla natura litologica degli apporti clastici. In alcuni bacini di alimentazione la componente detritica derivante da rocce ad elevato potenziale radiogenico è quantitativamente rilevante; da questo punto di vista la suddivisione delle unità quaternarie della carta geologica del Piemonte alla scala 1:250.000 in bacino alessandrino, bacino cuneese e bacino padano occidentale risulta troppo generica. Per queste ragioni a partire dai depositi del Pleistocene superiore le unità sono distinte sulla base dei macrobacini idrografici principali attuali. Analogamente sono stati distinti i depositi glaciali dei tre principali anfiteatri morenici subalpini presenti in Piemonte.

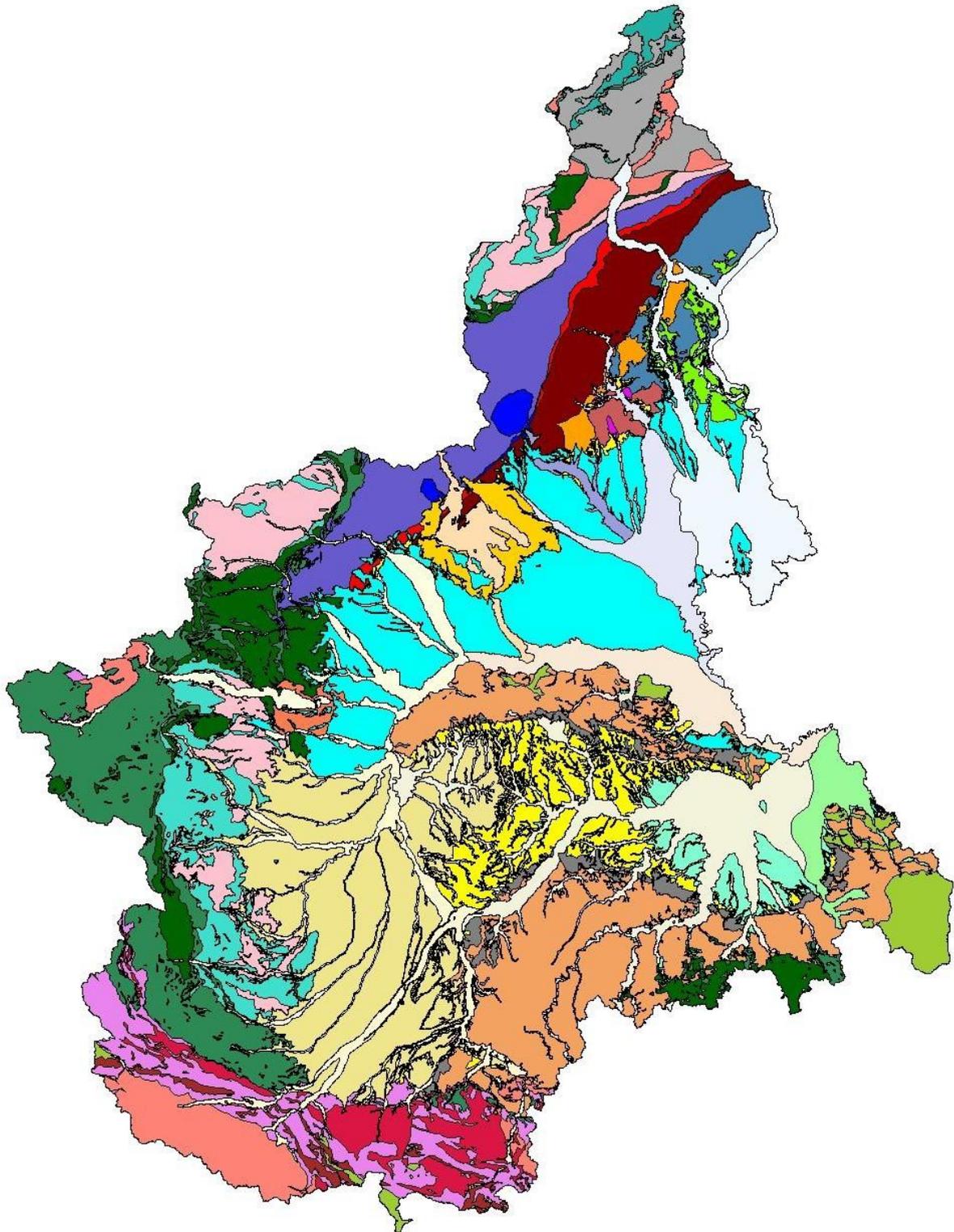


Figura 2.4 – Classificazione in unità radio-geo-litologiche

Tabella 2.1 – Legenda unità radio-geo-litologiche

	Depositi fluviali della pianura del Po; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali delle valli Scrivia, Curone e Staffora; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali di Belbo-Bormida-Orba, medio-basso Tanaro e Banna; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali di alto Tanaro, Stura di Demonte, Grana-Maira, Varaita, alto Po, Pellice-Chisone, Chisola; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali di Orco, Malone, Stura di Lanzo, Ceronda, Dora Riparia, Sangone, Po torinese; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali della Dora Baltea
	Depositi fluviali di Sesia e Cervo; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali di Ticino, Toce, Agogna, Terdoppio; Pleistocene superiore – attuale
	Depositi fluviali, fluvioglaciali e glaciali del bacino cuneese; Pleistocene inferiore - medio
	Depositi fluviali del Torrente Cervo
	Depositi fluviali e fluvioglaciali del bacino padano occidentale; Pleistocene inferiore - medio
	Depositi glaciali dell’anfiteatro morenico di Rivoli-Avigliana. Pleistocene - Olocene
	Depositi glaciali dell’anfiteatro morenico di Ivrea e di Cuorgnè. Pleistocene - Olocene
	Depositi glaciali degli anfiteatri morenici del Verbano e di Orta, lembi isolati di depositi glaciali entrovallivi (Verbano). Pleistocene - Olocene
	Depositi fluviali del bacino alessandrino; Pleistocene inferiore - medio
	Depositi marini, transizionali e continentali pliocenici
	Depositi evaporitici e terrigeni messiniani
	Unità terrigene cenozoiche del Bacino terziario piemontese, Monferrato, Collina di Torino ed epiliguri
	Unità sedimentarie e metasedimentarie cenozoiche del bacino di avanfossa alpino
	Plutoni della Valle del Cervo, di Brosso-Traversella e di Miagliano e relative aureole di contatto; vulcaniti e vulcanoclastiti oligoceniche
	Unità flyschoidi cretacico superiori - paleoceniche
	Unità sedimentarie e metasedimentarie mesozoiche brianzonesi e delfinesi
	Unità vulcaniche e vulcanoclastiche permiane brianzonesi e delfinesi, talora metamorfiche

	Massiccio dell'Argentera; basamento brianzonese; Zona di Acceglio; massiccio d'Ambin; unità Gran San Bernardo; unità Camughera-Moncucco
	Coperture sedimentarie mesozoiche delle unità pennidiche inferiori; unità vallesane
	Unità pennidiche inferiori della Val d'Ossola
	Unità Monte Rosa, Gran Paradiso, Dora-Maira e Valosio: ortogneiss e metagranitoidi
	Unità Monte Rosa, Gran Paradiso, Dora-Maira e Valosio: rocce polimetamorfiche e coperture metasedimentarie
	Successioni mesozoiche e metasedimenti di origine oceanica o di margine continentale
	Metabasiti e metaultrabasiti di origine oceanica
	Unità Sesia-Lanzo
	Zona del Canavese
	Successioni mesozoiche sudalpine
	Vulcaniti e vulcanoclastiti permiane sudalpine
	Graniti permiani sudalpini
	Serie dei laghi
	Zona Ivrea-Verbano

2.2.4 IL MODELLO DI GENERAZIONE DELLE MEDIE COMUNALI

La mancanza di un numero soddisfacente di dati sperimentali in tutti i 1181 Comuni del Piemonte (numero dei Comuni piemontesi aggiornato al 2019) rende necessaria l'adozione di un metodo alternativo per la stima dei valori di radon. Per tutte le superfici comunali si è quindi utilizzato un modello basato sulla correlazione esistente tra le misure di radon sperimentali e la sottostante classificazione in unità radio-geo-litologiche, per ciascuna delle quali è stata valutata la concentrazione indoor media di radon, riferita al piano terra (ML). Nella ragionevole ipotesi di distribuzione log-normale dei dati di concentrazione radon anche per ciascuna unità radio-geo-litologica, il valor medio al piano terra è dato da $ML = e^{\mu + \sigma^2/2}$, dove μ è la media del logaritmo naturale delle concentrazioni di radon mentre σ è la sua deviazione standard: note μ e σ , calcolate sperimentalmente in ciascuna unità a partire dai dati di concentrazione di radon indoor disponibili, è stato quindi possibile stimare la media per tutte le unità radio-geo-litologiche. Inoltre, dai medesimi dati, si può facilmente arrivare a stimare le diverse medie comunali grazie a un semplice modello teorico che consiste nel calcolo, per ogni Comune, della media ponderata comunale μ_j a partire dalle μ_k radio-geo-litologiche presenti nel territorio comunale stesso. Pertanto, se nel

generico Comune j insistono ipoteticamente P diverse aree radio-geo-litologiche, varrà la seguente relazione:

$$\mu_j = \sum_{k=1}^P \frac{AL_k \cap AC_j}{AC_j} \cdot \mu_k \quad (3)$$

dove AL_k è l'area della k -esima area radio-geo-litologica mentre AC_j è l'area totale del j -esimo Comune². La media comunale per il j -esimo Comune, stante l'ipotesi di log-normalità della distribuzione, sarà quindi data semplicemente da $ML_j = e^{\mu_j + \frac{\sigma_j^2}{2}}$. Seguendo questo approccio è stato così possibile attribuire a ciascun Comune, indipendentemente dalla disponibilità di dati sperimentali, una stima del suo valor medio di radon. Non solo, sempre grazie all'ipotesi di log-normalità della distribuzione dei dati, sarà anche possibile stimare altri importanti indicatori come si vedrà nel capitolo successivo.

Per ottenere, a partire dalla media comunale al piano terra, la media complessiva, cioè quella che si otterrebbe campionando casualmente su tutti i piani, parametro che è rappresentativo dell'effettiva esposizione della popolazione, occorre un'opportuna rielaborazione dai dati che viene effettuata riprendendo le considerazioni svolte nel precedente paragrafo 2.2.1. Supponendo infatti di avere un campione sperimentali di dati al piano terra, in una certa area, è possibile procedere ad una rielaborazione delle misure in modo da ottenere un insieme di dati assimilabile a quello che si sarebbe ottenuto da un campionamento effettuato su piani eterogenei.

A tal fine si può procedere nel seguente modo: dalle concentrazioni del radon al piano terra, in una data area comunale, si ricava la distribuzione ad un generico piano, utilizzando il parametro k precedentemente definito (si veda paragrafo 2.2.1). La media complessiva, riferita cioè al campione "reale", con le abitazioni distribuite su tutti i piani, si ottiene cioè come media ponderata tra le medie delle concentrazioni radon per differenti piani, utilizzando come pesi le probabilità di incidenza degli stessi piani nell'edificio residenziale del Piemonte. Quest'ultima informazione si può ricavare dal campione rappresentativo di abitazioni estratto in occasione della Campagna Nazionale e distinguendo in esso le tipologie abitative in relazione a tre differenti categorie: città, pianura (<400 m.s.l.m.) e montagna (tabella 2.2).

Tabella 2.2 – Distribuzione percentuale dei piani abitati per città, comuni di pianura e comuni di montagna

Piano	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Città	0,0	5,6	19,6	18,7	15,9	13,1	9,3	6,5	4,7	2,8	1,9	1,9
Pianura	4,8	47,6	39,2	4,2	2,8	1,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Montagna	0,0	63,9	26,2	4,9	3,3	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

² Come già anticipato nella parte introduttiva del paragrafo 2.2, ci si riferisce qui alle sole aree edificate che, evidentemente, sono le sole rilevanti per la stima dell'esposizione al radon della popolazione

Una volta calcolate le medie comunali complessive per ogni Comune si può infine ottenere la concentrazione media di radon per l'intera Regione, ponderando i valori comunali in ragione della popolosità di ogni area considerata³. Il metodo qui sommariamente descritto è stato testato e validato: per una discussione scientifica più approfondita si rimanda al lavoro recentemente pubblicato su una rivista specializzata (si veda in bibliografia; Chiaberto, Falletti e Magnoni, 2022).

³ Le elaborazioni numeriche sono state eseguite con applicativi open source, sviluppando un codice in linguaggio R: uno script produce automaticamente le cartografie e gli indicatori di interesse a partire dalle misure di radon georeferenziate, dai dati comunali e dalla classificazione in unità radio-geo-litologiche, facilitando le operazioni di aggiornamento e revisione periodica a seguito dell'incremento dei dati disponibili.

CAPITOLO 3 – LA NUOVA MAPPA DEL RADON IN PIEMONTE

3.1 LA RAPPRESENTAZIONE CARTOGRAFICA DEI DATI

Esistono diverse possibili modalità di suddivisione del territorio per ottenere una mappa del radon che restituisca un adeguato dettaglio tecnico scientifico e sia facilmente fruibile dal punto di vista amministrativo, consentendo ai Comuni un utilizzo della stessa per eventuali pianificazioni urbanistiche in grado di promuovere azioni volte a una limitazione dell'esposizione al radon.

Coerentemente con il precedente lavoro del 2009, anche in questo caso sono state scelte come unità di calcolo le aree comunali che attualmente (2021) in Piemonte sono in tutto 1181 e che rappresentano una suddivisione assai fine del territorio. Per l'elaborazione delle mappe si è fatto uso dei software open source R Language e QGIS.

3.2 INDICATORI STATISTICI E MODALITÀ DI CALCOLO

Gli indicatori scelti per la rappresentazione cartografica del radon in Piemonte, stimati per tutti i Comuni, sono due:

- 1) il valor medio delle concentrazioni, inteso sia come valor medio riferito al piano terra che come valor medio complessivo, ottenuto cioè considerando tutte le abitazioni distribuite su diversi piani
- 2) la percentuale $P_{>LR}$ di abitazioni eccedenti il livello di riferimento $LR = 300 \text{ Bq/m}^3$ stabilito dall'art. 11 del Decreto Legislativo 101/2020. In base al suddetto articolo sono poi definite le *aree prioritarie*, cioè quelle porzioni di territorio in cui, per gli edifici al piano terra, $P_{>LR} > 15\%$.

Il calcolo di tali indicatori è stato eseguito basandosi sull'ipotesi che, per ogni suddivisione comunale, la concentrazione di attività radon segua una distribuzione log-normale:

$$f_i(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln(C)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{C}$$

dove i parametri μ e σ (media e deviazione standard dei logaritmi delle concentrazioni) per ogni i -esimo Comune possono essere sperimentalmente stimati a partire da n osservazioni, nel modo seguente:

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln C_i \quad (4a)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\ln C_i - \mu_i)^2} \quad (4b)$$

Come è noto tali parametri, nell'ipotesi di log-normalità, sono legati alle corrispondenti medie aritmetiche (MA_i) e geometriche (MG_i) dalle seguenti formule:

$$MA_i = e^{\mu_i + \frac{\sigma_i^2}{2}} \quad MG_i = e^{\mu_i} \quad (5)$$

E proprio la verifica della congruenza tra i valori ottenuti con queste formule e quelli che si ottengono sperimentalmente⁴, può essere considerato un primo test elementare dell'aderenza o meno dei dati sperimentali rispetto l'ipotesi di log-normalità. Per la caratterizzazione di una log-normale è spesso utilizzata, in luogo della σ , la deviazione standard geometrica, DSG , ad essa strettamente legata, essendo definita, per ogni generico Comune i , nel modo seguente:

$$DSG_i = e^{\sigma_i}$$

Nel caso di non disponibilità di un sufficiente numero di dati sperimentali in una data unità di campionamento (Comune), cioè nella stragrande maggioranza dei casi, si è proceduto, sempre nell'ipotesi di log-normalità della distribuzione dei dati, ad assegnare l'appropriato valore di μ_i seguendo il modello radio-geo-litologico presentato nel capitolo precedente e utilizzando quindi la formula (3) introdotta e discussa nel paragrafo 2.2.4.

Per ottenere il corrispondente valore di DSG_i in questi casi e quindi essere in grado di determinare la distribuzione log-normale anche per i Comuni privi o con pochi dati sperimentali, si possono utilizzare approcci differenti. Un primo approccio prevede il calcolo sperimentale delle varie DSG_i a partire dai valori di μ e σ delle unità radio-geo-litologiche che insistono nel i -esimo Comune, stimate con formule simili a quelle utilizzate per la media⁵. In alternativa si può quindi far ricorso a un secondo metodo, proposto proprio per superare il problema della incertezza nella stima di σ_i , quello suggerito da Price e colleghi in una pubblicazione del 1997, riportata in bibliografia. Price osservò infatti che le DSG sperimentalmente ottenute in una determinata area tendevano a un valore asintotico all'aumentare della popolosità del campione. Seguendo questo approccio e utilizzando le DSG sperimentali disponibili si è effettivamente ottenuto anche nel nostro caso un

⁴ La media aritmetica di n dati è data ovviamente da $MA_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n c_k$, mentre quella geometrica si calcola con la formula: $MG_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n c_k}$

⁵ Le DSG (o, che è lo stesso, le σ) sono calcolate per ciascun Comune a partire dal medesimo set di dati sperimentali riferiti però alle diverse unità radio-geo-litologiche presenti nei rispettivi territori

andamento molto simile a quello che venne trovato da Price e colleghi: come si vede dalla figura 3.1 il valore della *DSG* sembra effettivamente tendere a un valore asintotico unico, nel nostro caso stimato a 1,74 ($\sigma=0,56$). Seguendo questa impostazione tutte le unità comunali avranno perciò la medesima *DSG* e si differenzieranno tra loro solo per il diverso valore di μ_j .

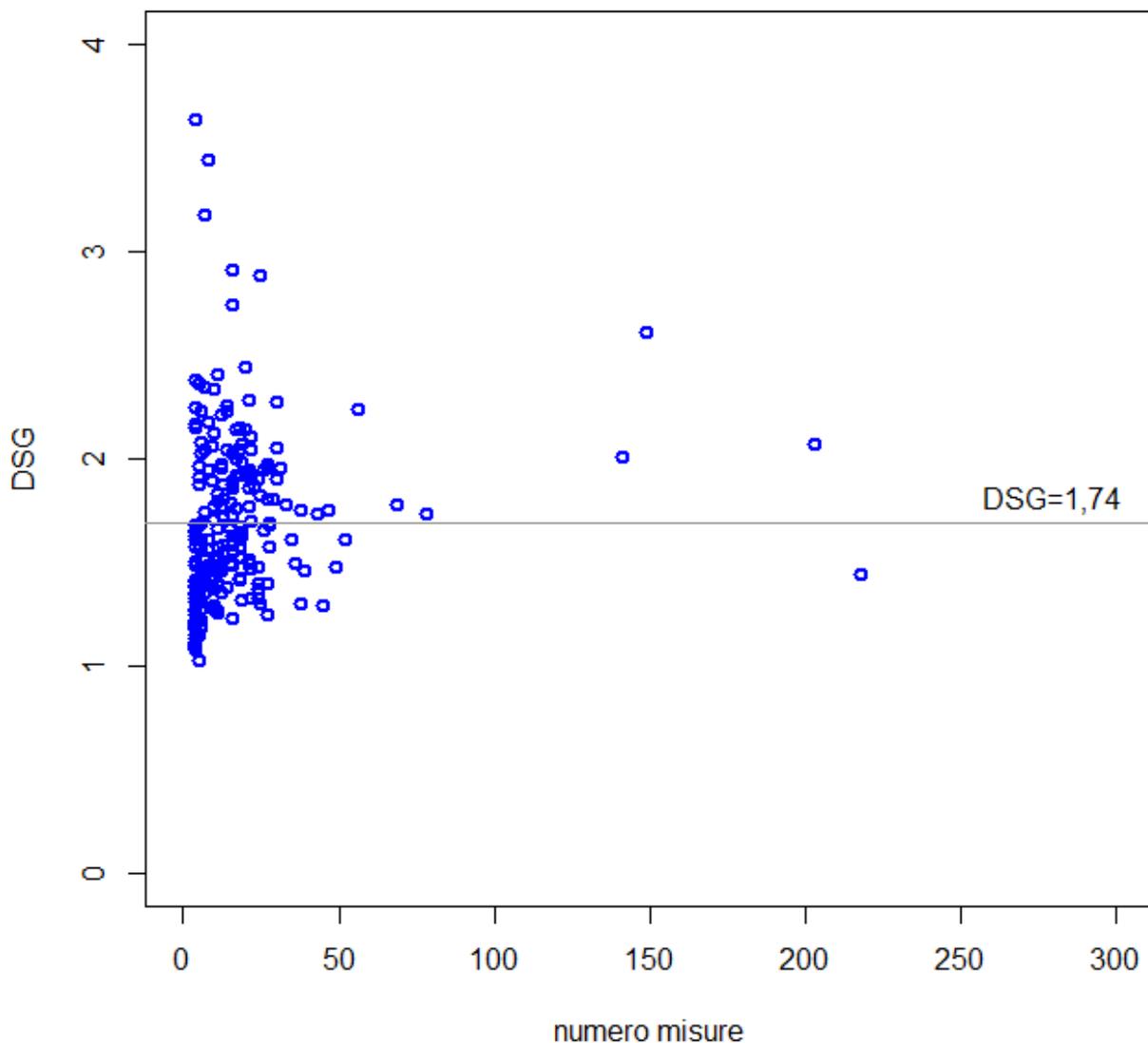


Figura 3.1 – Grafico sperimentale che evidenzia la convergenza della *DSG* ad un valore limite costante all’aumentare della popolosità del campione. Nel nostro caso $DSG=1,74$.

L’utilizzo per il calcolo della *DSG* dei due metodi sopra descritti, nonostante essi si differenzino grandemente sul piano concettuale, non conduce poi nella pratica a risultati sostanzialmente differenti in termini di classificazione dei Comuni. Si è quindi scelto di seguire un approccio “misto”, applicando entrambi i metodi, a seconda dei casi, come verrà meglio precisato in seguito.

Va sottolineato che la scelta della DSG (o della σ , che è lo stesso) influenzano grandemente l'altro indicatore statistico fondamentale, da calcolarsi per ciascuna unità di campionamento i -esima: la percentuale $P_{>LR}$ che, nella generica area i , la concentrazione di attività del radon superi il Livello di Riferimento LR. Tale probabilità, espressa in termini percentuali è data da:

$$P_{>LR} = 100 \cdot \int_{LR}^{\infty} f_i(c, \mu_i, \sigma_i) dc \quad (6)$$

in cui la funzione sotto il segno di integrale si riferisce alla distribuzione delle concentrazioni al piano terra, come richiesto dalla norma. Per il calcolo concreto di $P_{>LR}$ si possono usare diversi approcci matematici, a seconda che i parametri della funzione di distribuzione μ_i e σ_i siano stati ottenuti sperimentalmente oppure tramite il modello radio-geo-litologico⁶. Per quel che riguarda i valori da assegnare ai parametri, nel nostro caso si ha LR= 300 Bq/m³ mentre il valore critico per $P_{>LR}$, cioè della probabilità di superare il Livello di Riferimento stabilito dalla legge, ovvero $P_{>300}$ è pari al 15%: tale infatti è, in base all'art. 11 del D. Lgs. 101/2020, la percentuale soglia, oltrepassata la quale una certa area viene individuata come *aree prioritaria* e perciò meritevole di particolari attenzioni ed interventi da parte delle autorità, con l'obiettivo di ridurre l'esposizione della popolazione quindi il rischio radiologico ad essa associato. La definizione di tali *aree prioritarie* è in effetti uno degli scopi principali di questo lavoro.

Ai fini dell'esecuzione pratica dei calcoli che hanno portato alla definizione delle mappe dei valori medi comunali e all'individuazione delle aree prioritarie, cioè quei territori per i quali vale $P_{>300} > 15\%$, i Comuni del Piemonte sono stati distinti in 3 categorie.

La prima categoria comprende i Comuni per i quali erano disponibili almeno 10 misure sperimentali annuali di radon, la seconda quella con un numero di dati sperimentali ≥ 4 e < 10 , la terza i rimanenti. Il primo gruppo conta 137 Comuni: per essi i parametri della log-normale sono stati quindi calcolati sperimentalmente, secondo le espressioni (4a) e (4b); per il secondo gruppo (89 Comuni) è stato seguito un approccio ibrido, con calcolo sperimentale del parametro μ e un valore fisso per σ , valutato col metodo mostrato in Figura 3.1, mentre per il terzo gruppo, il più numeroso, quello dei Comuni privi o con poche misure sperimentali (ben 955 Comuni), è stato pienamente applicato il modello radio-geo-litologico, illustrato nel capitolo precedente.

Per il primo gruppo di numerosità ($N \geq 10$) l'approccio è stato puramente sperimentale. L'elaborazione dei dati ottenuta è stata inoltre confrontata con il calcolo modellistico (μ e σ stimati dal modello al fine di verificare l'affidabilità del modello stesso (Figura 3.2). Il risultato di questa validazione è stato soddisfacente: il rapporto medio tra la media

⁶ Per i Comuni per i quali si disponevano abbastanza dati il calcolo dell'integrale è effettuato utilizzando il Beta model (si veda in bibliografia, Murphy and Organo, 2008, p. 297). Per i Comuni per i quali si è fatto uso del modello, il calcolo è stato invece effettuato utilizzando direttamente la funzione log-normale

sperimentale e quella stimata a partire dalla radio-geo-litologia è risultato infatti pari a 0,89 con $R^2=0,83$ con un significativo miglioramento della correlazione rispetto alla precedente mappatura (2009) dove il rapporto tra media sperimentale e stimata era risultato essere pari a 0,82 con $R^2=0,49$.

Come si evince inoltre dall'istogramma degli scarti tra medie stimate e sperimentali (Figura 3.3) si può valutare un'incertezza di 50 Bq/m³ nella stima generale delle medie. Pertanto, in un'ottica conservativa nel calcolo dell'indicatore $P_{>LR}$ si è considerato come valore per l'estremo inferiore di integrazione nella (6) un valore ridotto della medesima quantità: $LR=300-50=250$.

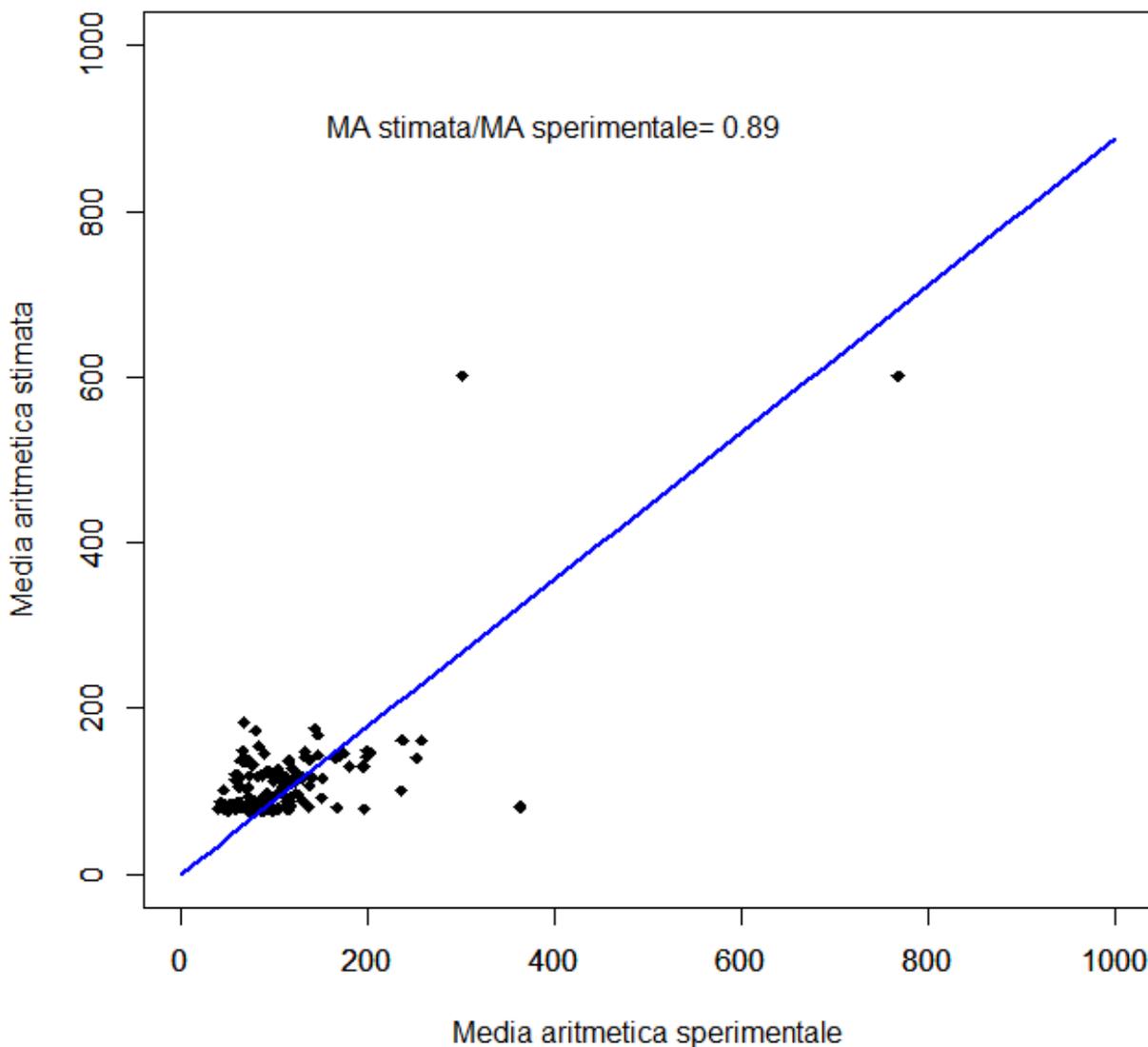


Figura 3.2 – Confronto tra medie sperimentali e medie calcolate con il modello utilizzato nelle unità con più di 10 misure: rapporto.

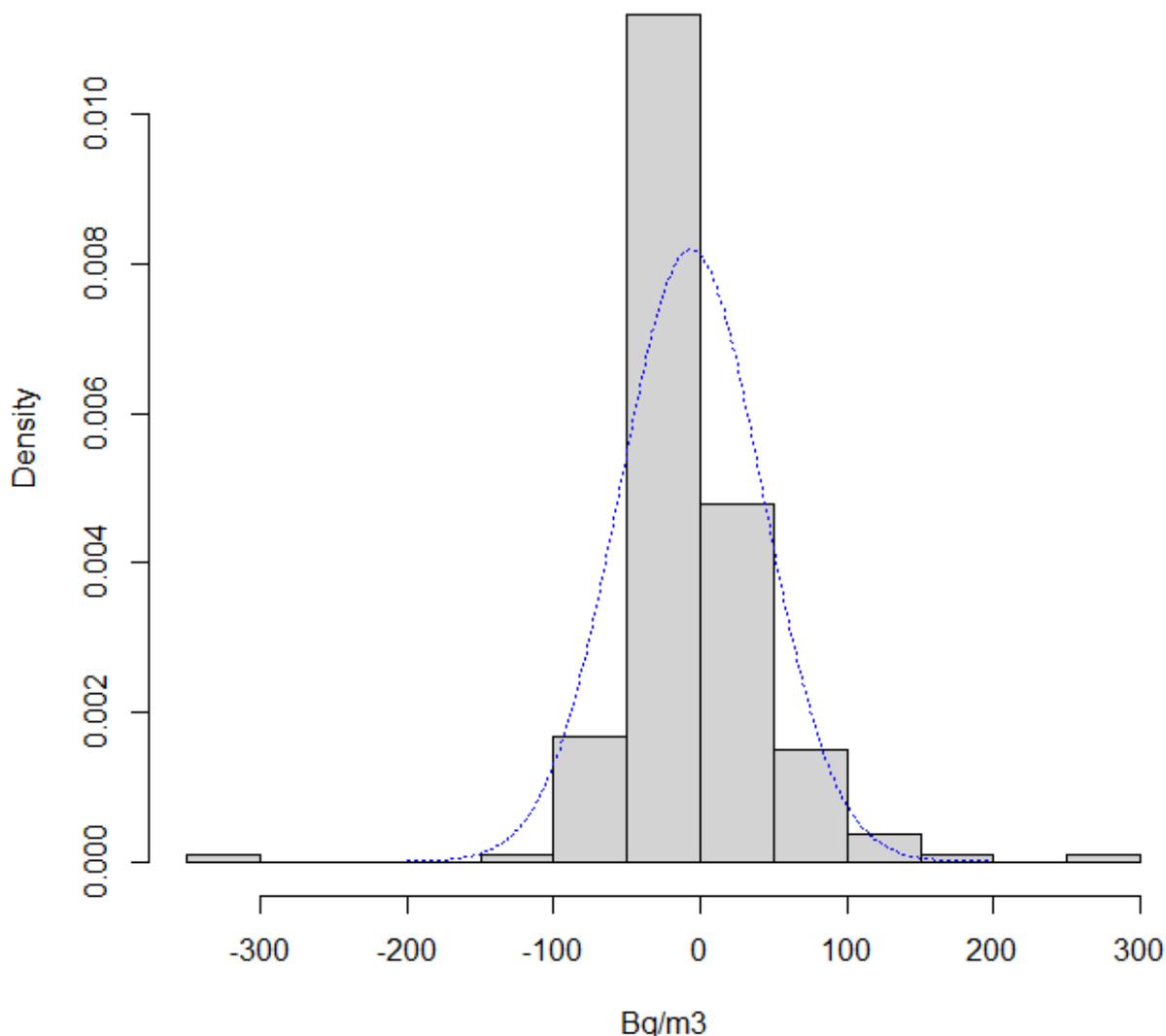


Figura 3.3 – Confronto tra medie sperimentali e medie calcolate con il modello utilizzato nelle unità con più di 10 misure: istogramma degli scarti (deviazione standard 50 Bq/m³)

Oltre a quei Comuni che, in base al valore del $P_{>LR}$, si evidenziano come aree prioritarie si è ritenuto di classificare alcuni altri Comuni come *aree di attenzione*: si tratta di un elenco aggiuntivo rispetto alle aree prioritarie, privo di qualunque effetto giuridico non facendo riferimento ad alcuna norma di legge, ma che consente di meglio indirizzare in futuro i nuovi studi ed approfondimenti.

In modo particolare confluiscono in questa categoria tutti Comuni per i quali il valore di $P_{>LR}$ è compreso fra il 10% e il 15%. Ad essi sono stati poi aggiunti altri Comuni con valori di $P_{>LR}$ inferiori, ma per i quali il territorio esteso e la tipologia delle litologie in esso presenti facevano comunque presumere una potenziale criticità oppure laddove risultavano più marcate le differenze tra valori sperimentali e modellistici o si trovavano in vicinanza di aree prioritarie, presentando caratteristiche simili.

In conclusione, i Comuni piemontesi individuati come *aree prioritarie*, cioè aree nelle quali per gli edifici al piano terra vale la condizione $P_{>300} > 15\%$ sono in tutto 37, pari a circa il 3% dei Comuni della Regione. Ai Comuni ricompresi in questo elenco si dovranno quindi applicare le disposizioni di cui agli articoli 16 e 19 del Lgs. 101/2020, tra cui in particolare: l'obbligatorietà della misura del radon per tutti i luoghi di lavoro che si trovano in locali semisotterranei e al piano terra, l'attivazione da parte della Regione di campagne di misura *ad hoc*, nonché la promozione di interventi formativi, informativi e di bonifica delle situazioni critiche al fine di ridurre l'esposizione al radon della popolazione residente.

Accanto a queste 37 aree comunali che saranno appunto definite *aree prioritarie* ai sensi di legge (art. 11 D. Lg. 101/2020) e il cui elenco sarà pubblicato sul Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte e sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica, sono state affiancate diverse *aree di attenzione*, individuate in base ai criteri sopra esposti e in cui ricadono ulteriori 241 Comuni.

3.3 LE AREE PRIORITARIE, L'ESPOSIZIONE MEDIA E LE NUOVE MAPPE DEL RADON IN PIEMONTE

3.3.1 AREE PRIORITARIE ED ESPOSIZIONE MEDIA

L'elenco dei Comuni i cui territori, in base alle considerazioni e ai calcoli descritti nel precedente paragrafo, sono classificati come *aree prioritarie* è riportato nella seguente Tabella 3.1. Sono rappresentate in rosso in Figura 3.7.

Per ciascun Comune sono mostrati anche il valore dei principali indicatori⁷ nonché i parametri statistici μ e σ delle distribuzioni log-normali sottostanti.

⁷ Cioè la media geometrica e la media aritmetica comunale, riferite al piano terra, come stabilito dall'art. 11 comma 3 del D. Lgs. 101/2020

Tabella 3.1 – Comuni individuati come aree prioritarie

Comune	μ Piani terra	σ Piani terra	Media Geometrica Piani terra (Bq/m ³)	Media Aritmetica Piani terra (Bq/m ³)	Media Aritmetica (Bq/m ³)	P _{>300} (%) Piani terra	Stima popolazione ai piani terra esposta a più di 300 Bq/m ³
Andorno Micca	5,15	0,56	173	205	189	29	632
Angrogna	5,02	0,75	152	199	189	27	150
Aurano	4,77	1,07	118	195	196	25	16
Bellinzago Novarese	5,40	0,56	222	236	243	43	1920
Bognanco	5,06	0,56	158	172	173	26	38
Brondello	4,72	0,80	112	159	146	16	29
Brossasco	4,74	0,80	115	163	149	17	121
Buriasco	4,81	0,76	123	165	156	19	127
Campiglia Cervo	6,48	0,57	651	768	705	95	321
Candelo	5,47	0,89	236	363	328	48	1818
Cannobio	4,97	0,67	144	180	171	22	523
Ceresole Reale	4,84	0,56	126	137	140	21	21
Chiusa di Pesio	4,49	0,96	89	147	134	15	358
Druogno	5,07	0,56	159	204	175	24	150
Entracque	4,75	0,79	116	164	150	17	88
Gaglianico	5,05	0,67	156	196	183	25	464
Gaiola	4,69	0,78	109	153	140	15	58
Giffenga	4,86	0,76	129	177	163	20	12
Macugnaga	5,02	0,83	152	237	200	28	108
Melle	4,70	0,79	109	155	142	15	31
Moiola	5,01	0,71	150	199	181	25	40
Noasca	4,56	0,56	96	181	107	15	16
Oleggio Castello	4,82	0,68	124	151	148	17	159
Pagno	4,68	0,79	108	152	140	15	41
Perosa Argentina	4,93	0,67	139	174	164	20	435
Peveragno	5,23	0,73	187	253	227	36	1262
Quargento	4,71	0,88	111	167	155	20	133
Re	5,08	0,56	161	201	177	26	126
Roccavione	4,79	0,56	120	147	133	17	313
Rosazza	5,66	0,35	287	301	283	67	37
Roure	4,71	0,79	111	158	144	16	91
Santa Maria Maggiore	5,09	0,66	162	203	189	27	218
Traversella	4,71	1,06	111	236	182	23	51
Venasca	4,77	0,80	117	166	152	18	169
Vigliano Biellese	5,16	0,82	174	258	229	34	1324
Villar Pellice	4,87	0,71	130	169	158	20	143
Vinadio	4,72	0,78	112	157	144	16	70

Le *aree di attenzione*, individuate secondo i criteri discussi nel precedente paragrafo, sono invece elencate nella seguente Tabella 3.2 e rappresentate in giallo nella Figura 3.7.

Tabella 3.2 – Aree di attenzione

Comune	Note
Airasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Aisone	P>LR compreso tra 10 e 15%
Alagna Valsesia	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Alto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Alto Sermenza	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Ameno	P>LR compreso tra 10 e 15%
Antrona Schieranco	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Arola	P>LR compreso tra 10 e 15%
Arona	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Bagnasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Bagnolo Piemonte	P>LR compreso tra 10 e 15%
Balocco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Bannio Anzino	P>LR compreso tra 10 e 15%
Barge	P>LR compreso tra 10 e 15%
Bastia Mondovì	P>LR compreso tra 10 e 15%
Beinette	P>LR compreso tra 10 e 15%
Benna	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Bibiana	P>LR compreso tra 10 e 15%
BIELLA	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Bobbio Pellice	P>LR compreso tra 10 e 15%
Borgo San Dalmazzo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Borgomezzavalle	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Boves	P>LR compreso tra 10 e 15%
Bra	P>LR compreso tra 10 e 15%
Bricherasio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Brosso	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Buronzo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Busca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Calasca-Castiglione	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Caltignaga	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Cambiasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cameri	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Campiglione Fenile	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cannero Riviera	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cantalupa	P>LR compreso tra 10 e 15%
Caprauna	P>LR compreso tra 10 e 15%
Caprezzo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Caraglio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Caramagna Piemonte	P>LR compreso tra 10 e 15%
Carcoforo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Carde'	P>LR compreso tra 10 e 15%
Carignano	P>LR compreso tra 10 e 15%
Carmagnola	P>LR compreso tra 10 e 15%
Carru'	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cartignano	P>LR compreso tra 10 e 15%
Casalgrasso	P>LR compreso tra 10 e 15%
Castagnole Piemonte	P>LR compreso tra 10 e 15%
Castelletto Cervo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie

Castelletto Monferrato	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Castelletto Stura	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cavallerleone	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cavallermaggiore	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cavour	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cellarengo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Centallo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Ceppo Morelli	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cercenasco	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Cerrina Monferrato	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cervasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Cervere	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Cherasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Chialamberto	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Clavesana	P>LR compreso tra 10 e 15%
Coazze	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Cossato	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Cossogno	P>LR compreso tra 10 e 15%
Costigliole Saluzzo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Craveggia	P>LR compreso tra 10 e 15%
Crissolo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Cumiana	P>LR compreso tra 10 e 15%
CUNEO	P>LR compreso tra 10 e 15%
Demonte	P>LR compreso tra 10 e 15%
Dogliani	P>LR compreso tra 10 e 15%
Dormelletto	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Dronero	P>LR compreso tra 10 e 15%
Dusino San Michele	P>LR compreso tra 10 e 15%
Envie	P>LR compreso tra 10 e 15%
Farigliano	P>LR compreso tra 10 e 15%
Faule	P>LR compreso tra 10 e 15%
Feletto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Felizzano	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Fenestrelle	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Formigliana	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Fossano	P>LR compreso tra 10 e 15%
Frassinò	P>LR compreso tra 10 e 15%
Frossasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Fubine	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Gambasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Garessio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Garzigliana	P>LR compreso tra 10 e 15%
Gattico-Veruno	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Genola	P>LR compreso tra 10 e 15%
Giaveno	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Groscavallo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Gurro	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Intragna	P>LR compreso tra 10 e 15%
Inverso Pinasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Inverio	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Isasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
La Loggia	P>LR compreso tra 10 e 15%

Lagnasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Lesa	P>LR compreso tra 10 e 15%
Lesegno	P>LR compreso tra 10 e 15%
Lessolo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Lessona	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Lisio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Locana	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Lombriasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Lu e Cuccaro Monferrato	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Luserna San Giovanni	P>LR compreso tra 10 e 15%
Lusernetta	P>LR compreso tra 10 e 15%
Macello	P>LR compreso tra 10 e 15%
Malesco	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Manta	P>LR compreso tra 10 e 15%
Marene	P>LR compreso tra 10 e 15%
Maretto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Margarita	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Marmora	P>LR compreso tra 10 e 15%
Martiniana Po	P>LR compreso tra 10 e 15%
Masera	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Massazza	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Massello	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Mattie	P>LR compreso tra 10 e 15%
Meina	P>LR compreso tra 10 e 15%
Miagliano	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Miazzina	P>LR compreso tra 10 e 15%
Momo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Monasterolo di Savigliano	P>LR compreso tra 10 e 15%
Monchiero	P>LR compreso tra 10 e 15%
Montanera	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Montecrestese	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Montescheno	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Moretta	P>LR compreso tra 10 e 15%
Morozzo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Mottalciata	P>LR compreso tra 10 e 15%
Murello	P>LR compreso tra 10 e 15%
None	P>LR compreso tra 10 e 15%
Nucetto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Occhieppo Superiore	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Oggebbio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Oleggio	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Oncino	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Ormea	P>LR compreso tra 10 e 15%
Osasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Osasio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Ostana	P>LR compreso tra 10 e 15%
Paesana	P>LR compreso tra 10 e 15%
Pamparato	P>LR compreso tra 10 e 15%
Pancalieri	P>LR compreso tra 10 e 15%
Paruzzaro	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Penango	P>LR compreso tra 10 e 15%
Perrero	P>LR compreso tra 10 e 15%

Pettinengo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Pianfei	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Piasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Piedicavallo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Pinasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Pinerolo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Piobesi Torinese	P>LR compreso tra 10 e 15%
Piscina	P>LR compreso tra 10 e 15%
Pollone	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Polonghera	P>LR compreso tra 10 e 15%
Pomaretto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Ponderano	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Porte	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Pradleves	P>LR compreso tra 10 e 15%
Prali	P>LR compreso tra 10 e 15%
Pralungo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Pramollo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Prarostino	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Premeno	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Priola	P>LR compreso tra 10 e 15%
Quaregna Cerreto	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Racconigi	P>LR compreso tra 10 e 15%
Revello	P>LR compreso tra 10 e 15%
Rifreddo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Riva presso Chieri	P>LR compreso tra 10 e 15%
Roatto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Roburent	P>LR compreso tra 10 e 15%
Rocca de' Baldi	P>LR compreso tra 10 e 15%
Roccabruna	P>LR compreso tra 10 e 15%
Roccasparvera	P>LR compreso tra 10 e 15%
Roletto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Ronco Biellese	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Ronco Canavese	P>LR compreso tra 10 e 15%
Rora'	P>LR compreso tra 10 e 15%
Rossana	P>LR compreso tra 10 e 15%
Ruffia	P>LR compreso tra 10 e 15%
Sagliano Micca	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Salmour	P>LR compreso tra 10 e 15%
Saluzzo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Salza di Pinerolo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Sampeyre	P>LR compreso tra 10 e 15%
San Damiano Macra	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
San Germano Chisone	P>LR compreso tra 10 e 15%
San Paolo Solbrito	P>LR compreso tra 10 e 15%
San Pietro Val Lemina	P>LR compreso tra 10 e 15%
San Salvatore Monferrato	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
San Secondo di Pinerolo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Sandigliano	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Sanfre'	P>LR compreso tra 10 e 15%
Sanfront	P>LR compreso tra 10 e 15%
Sant'Albano Stura	P>LR compreso tra 10 e 15%
Savigliano	P>LR compreso tra 10 e 15%

Scalenghe	P>LR compreso tra 10 e 15%
Scarnafigi	P>LR compreso tra 10 e 15%
Sommariva del Bosco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Sordevolo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Tarantasca	P>LR compreso tra 10 e 15%
Tavigliano	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Toceno	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Tollegno	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Torre Pellice	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Torre San Giorgio	P>LR compreso tra 10 e 15%
Trarego Viggiona	P>LR compreso tra 10 e 15%
Trasquera	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Trinita'	P>LR compreso tra 10 e 15%
Trontano	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Valchiusa	P>LR compreso tra 10 e 15%
Valdengo	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Valdieri	P>LR compreso tra 10 e 15%
Valle Cannobina	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Valloriate	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Vanzone con San Carlo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Vernante	P>LR compreso tra 10 e 15%
Verrone	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Verzuolo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Vignolo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Vigone	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Villafalletto	P>LR compreso tra 10 e 15%
Villafranca Piemonte	P>LR compreso tra 10 e 15%
Villanova Biellese	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Villanova Solaro	P>LR compreso tra 10 e 15%
Villar Perosa	P>LR compreso tra 10 e 15%
Villar San Costanzo	P>LR compreso tra 10 e 15%
Villarboit	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie
Villette	P>LR compreso tra 10 e 15%
Viola	P>LR compreso tra 10 e 15%
Virle Piemonte	P>LR compreso tra 10 e 15%
Vottignasco	P>LR compreso tra 10 e 15%
Zumaglia	geograficamente o geologicamente affine ad aree prioritarie

In ciascuna unità di campionamento, oltre agli indicatori richiesti dalla normativa, cioè i valori medi annuali riferiti al piano terra e alle corrispondenti percentuali di edifici che superano come media annuale i 300 Bq/m³, sono stati calcolati anche i valori medi complessivi, relativi cioè all'intero patrimonio edilizio residenziale, distribuito su tutti i piani. Ciò è particolarmente importante perché consente tra l'altro di stimare anche il valore medio regionale della concentrazione di attività del radon, nonché stimare a livello regionale qual è la percentuale complessiva di abitazioni che supera il Livello di Riferimento di 300 Bq/m³ nonché la relativa popolazione esposta.

Per quanto riguarda l'esposizione media al radon della popolazione in Piemonte il valore medio è risultato essere pari a 71,4 Bq/m³. Si tratta di un valore molto vicino a quello stimato

precedentemente, nella prima Campagna Nazionale del 1990-1991 e nel lavoro del 2009 (rispettivamente 69 Bq/m³ e 71 Bq/m³). Il valore di $P_{>300}$, cioè la percentuale di abitazioni in tutta la Regione Piemonte in cui si supera il livello di riferimento di 300 Bq/m³, è risultato pari allo 0,6 %. Si può quindi valutare che in Piemonte circa 27000 persone siano esposte a concentrazioni superiori ai 300 Bq/m³. La popolazione totale nei comuni individuati come prioritari è invece complessivamente circa 72500, mentre quella esposta ai piani terra a più di 300 Bq/m³ si avvicina a 12000 persone.

In pratica approssimativamente il 45% delle persone esposte in Piemonte a concentrazioni superiori al Livello di Riferimento abita al piano terra delle zone definite prioritarie, costituite dal 3% dei Comuni.

3.3.1 CARTOGRAFIA

Sulla base ai dati ottenuti in questo studio si possono elaborare diverse mappe radon. In Figura 3.4 è mostrata la mappa dei valori medi comunali normalizzati al piano terra, mentre in figura 3.5 le medie aritmetiche ottenute considerando tutto il patrimonio edilizio residenziale, a qualunque piano. In Figura 3.6 è rappresentata la mappa con le percentuali di abitazioni al piano terra che eccedono il Livello di Riferimento LR=300 Bq/m³. Nella Figura 3.7 è riportata infine una mappa che evidenzia le cosiddette *aree prioritarie* (in rosso), cioè quei Comuni, 37 in tutto, per i quali tali percentuali eccedono il livello del 15%. In essa sono evidenziate anche con il colore giallo le *aree di attenzione*.

Tramite queste mappe è possibile avere una stima dell'esposizione media al radon di tutta la popolazione del Piemonte, con un dettaglio a livello comunale.

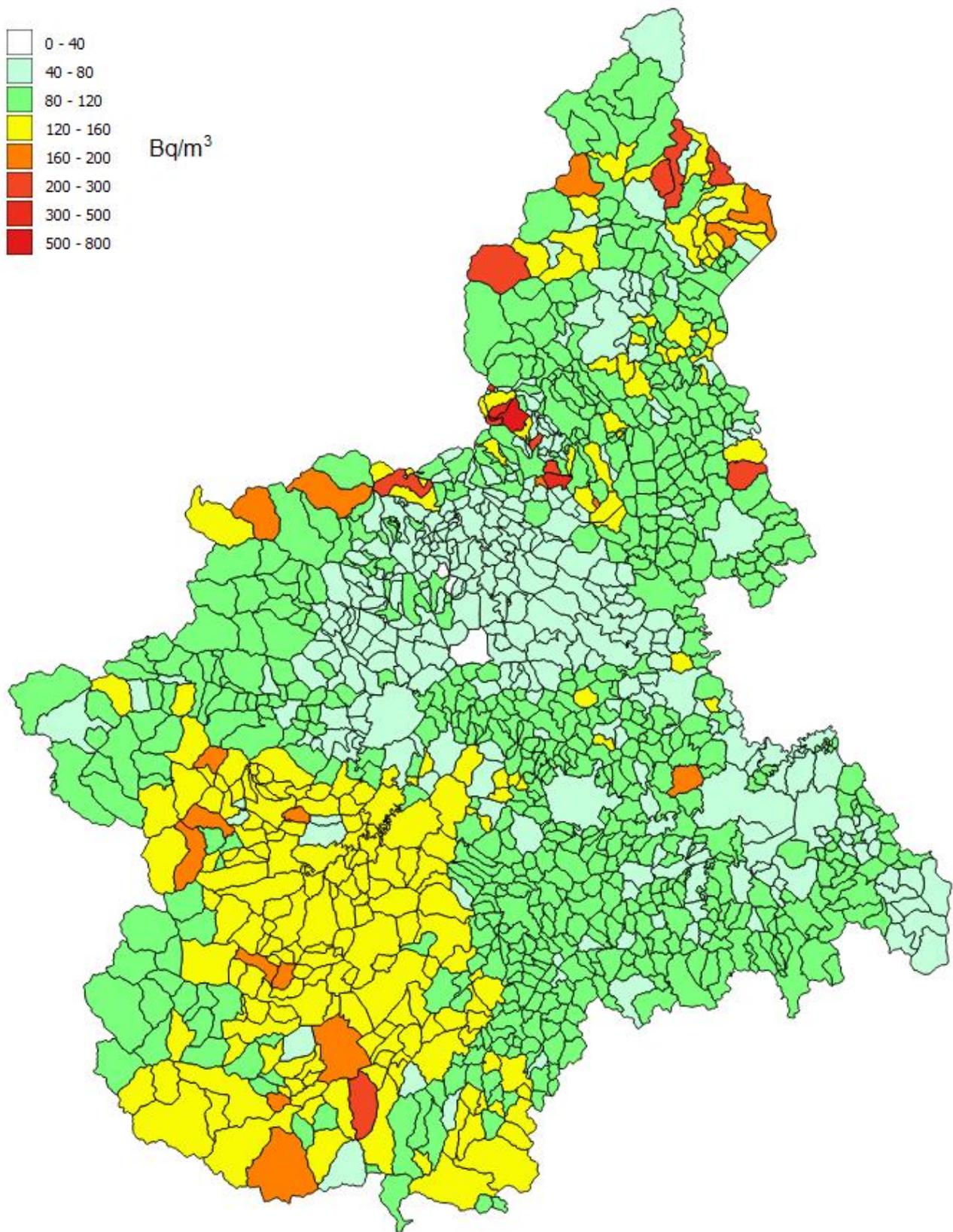


Figura 3.4 – Medie comunali al piano terra

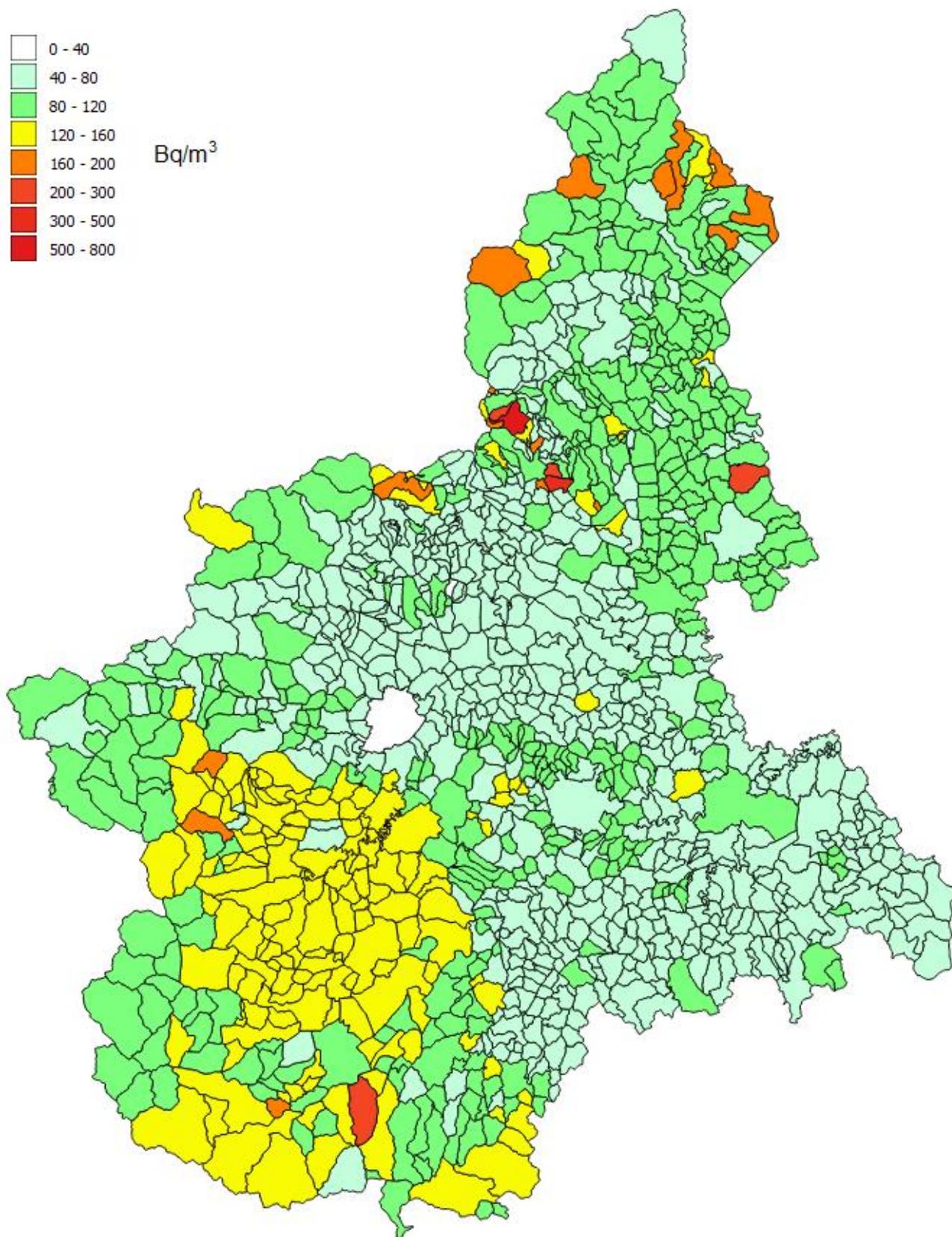


Figura 3.5 – Medie comunali complessive

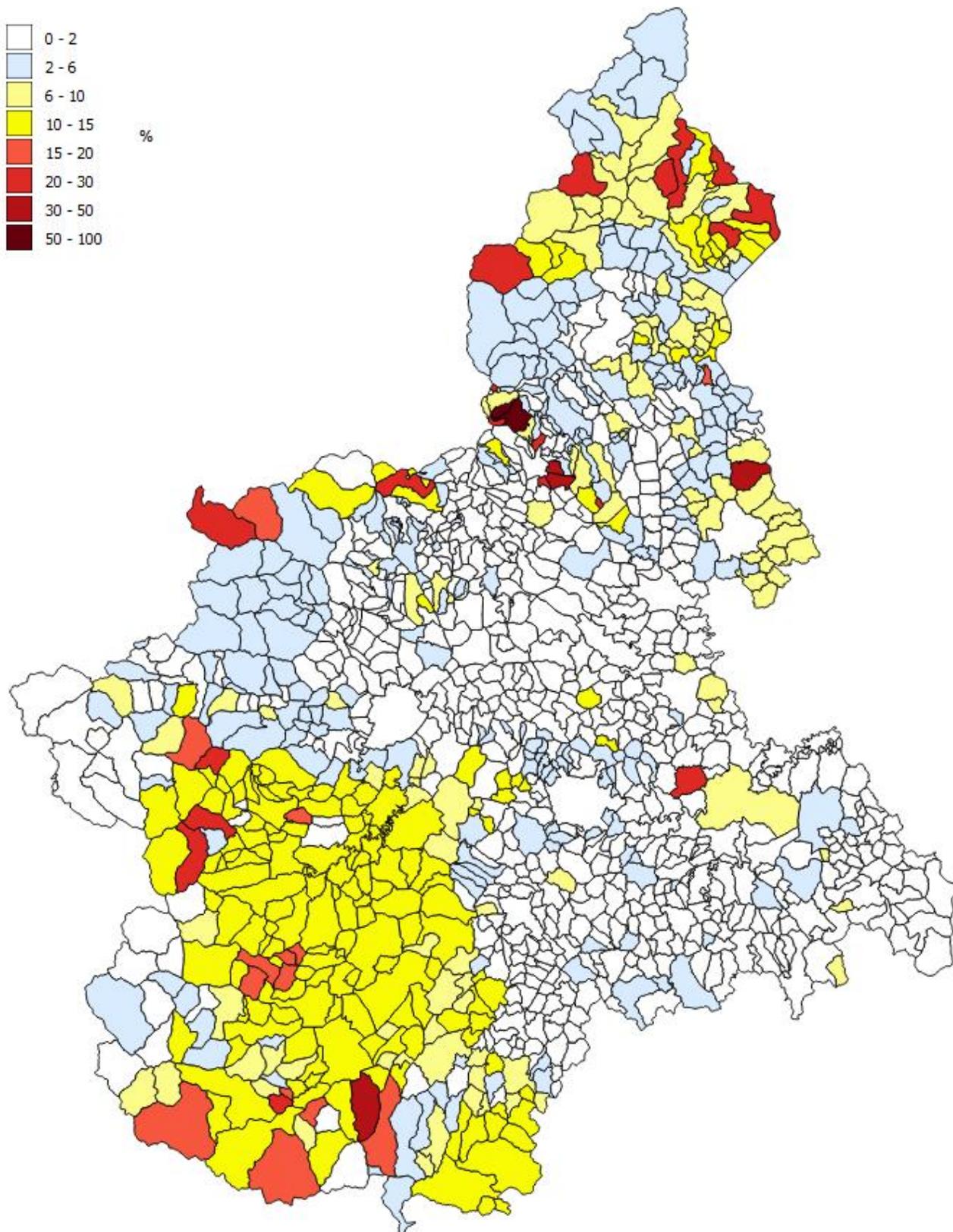


Figura 3.6 – Percentuale di abitazioni al piano terra che eccede il Livello di Riferimento di 300 Bq/m³

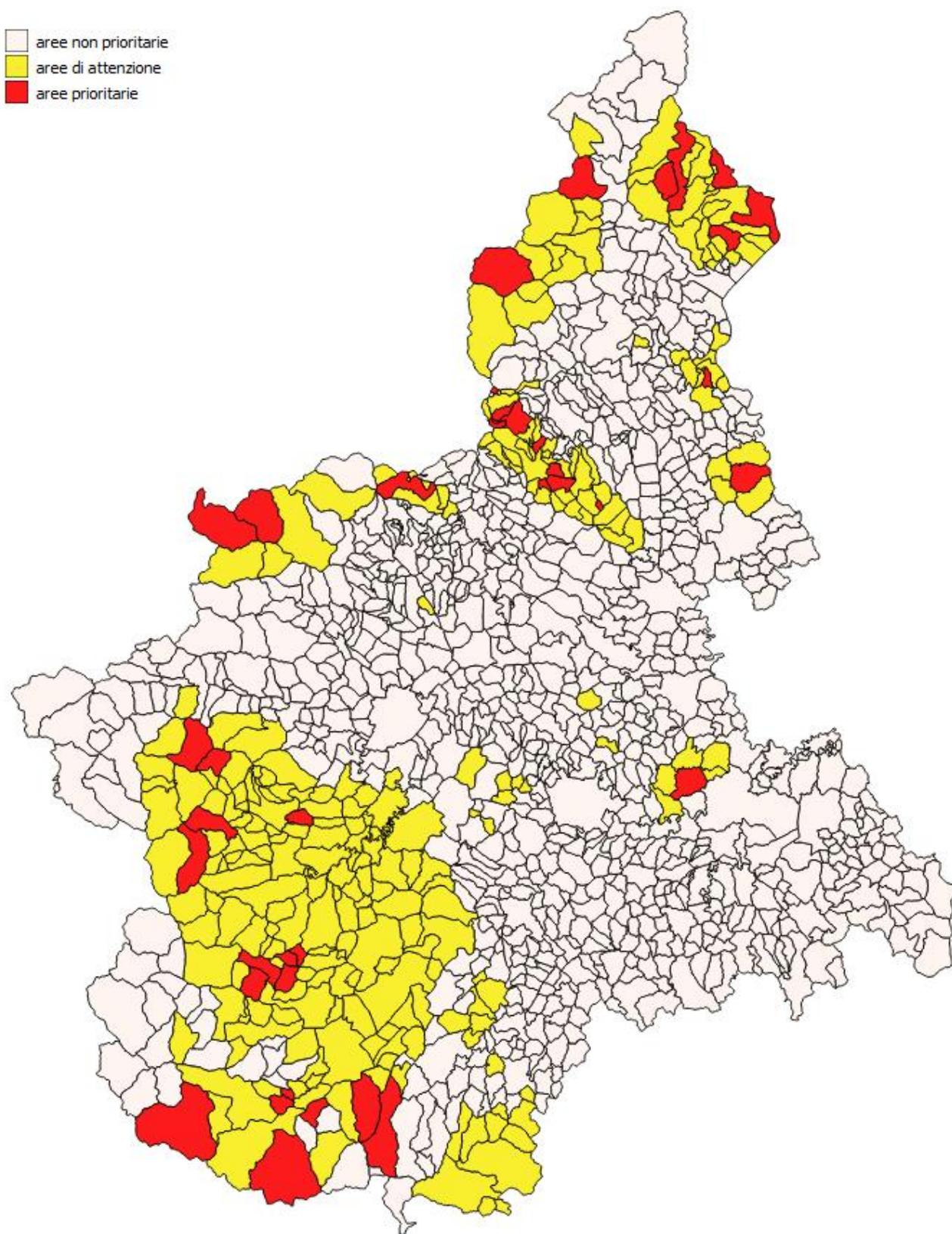


Figura 3.7 – Individuazione delle aree prioritarie ai sensi dell'art. 11 comma 3 del D. Lgs. 101/2020

3.3.2 CORRELAZIONE CON LA DISTRIBUZIONE DELLE UNITÀ GEOLOGICHE

La distribuzione geografica delle *aree prioritarie* individuate mostra una buona correlazione con la presenza di radionuclidi nelle unità geologiche.

Nel dettaglio è evidente la relazione con il magmatismo postcollisionale alpino, a cui sono riferibili il Plutone di Brosso-Traversella (Traversella) e il Plutone della Valle del Cervo (Campiglia Cervo, Rosazza). Sono *aree prioritarie* anche alcuni comuni in cui la componente clastica derivante dal Plutone della Valle del Cervo è rilevante nei depositi alluvionali quaternari (Andorno Micca, Candelo, Gaglianico, Giffenga, Vigliano Biellese).

Nella Provincia di Cuneo si riconosce chiaramente la connessione con le unità metasedimentarie vulcanoclastiche e i porfiroidi di età permiana (Chiusa di Pesio, Moiola, Peveragno, Roccavione).

In tutto l'arco alpino piemontese sono presenti comuni dove la presenza di radon è correlata agli ortogneiss e ai metagraniti derivanti dai graniti ercinici tardopaleozoici. In particolare le rocce granitoidi fanno parte delle unità pennidiche superiori Monte Rosa (Druogno, Macugnaga, Re, Santa Maria Maggiore), Gran Paradiso (Ceresole Reale, Noasca) e Dora-Maira (Angrogna, Brondello, Brossasco, Melle, Perosa Argentina, Roure, Venasca, Villar Pellice). Sono individuabili anche i metagranitoidi dell'unità Brianzese Gran San Bernardo (Bognanco) e dell'unità elvetica-delfinese Argentera (Entracque, Vinadio).

Per i restanti comuni individuati come aree prioritarie (Bellinzago Novarese, Buriasco, Cannobio, Oleggio Castello, Quargnento) si deve ipotizzare una componente significativa di clasti di rocce ad alto contenuto di radionuclidi nei depositi quaternari su cui sono localizzati gli abitati, e/o un apporto di radon da aree più remote in relazione alla fratturazione del substrato profondo. Per Aurano, in relazione ad una attività mineraria storica, si può avanzare l'ipotesi della presenza di filoni mineralizzati con minerali radioattivi.

CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI

4.1 SIGNIFICATO E UTILIZZO DELLE MAPPE RADON

È già stato detto in precedenza che qualunque mappa del radon, per quanto dettagliata e precisa essa sia, non potrà mai sostituire pienamente la conoscenza puntuale che si ottiene mediante l'effettuazione di una misura sperimentale. È un concetto che conviene ribadire anche nelle conclusioni. La natura intrinsecamente aleatoria del fenomeno radon, testimoniata eloquentemente dalla distribuzione log-normale delle sue concentrazioni, impedisce di inferire un dato affidabile semplicemente a partire dal dato cartografico. Quello che si può ricavare dalle mappe radon prodotte, è piuttosto una indicazione generale sul valore medio che ci si aspetta in un dato Comune e anche una stima della probabilità che il valore in Bq/m³ della concentrazione di attività del radon presente nelle abitazioni superi un determinato valore.

Le mappe radon non hanno però solo una funzione genericamente conoscitiva ma contengono anche un forte risvolto pratico: ciò vale in particolare per la mappa riportata in Figura 3.4: grazie ad essa è stato infatti possibile individuare, ai sensi dell'art. 11 del D. Lgs. 101/2020, i 37 Comuni piemontesi i cui territori sono da classificare come *aree prioritarie* in relazione all'esposizione al radon. Si tratta di zone in cui il rischio da esposizione al radon è significativamente superiore alla media e, per questo motivo, saranno destinatarie di particolari attenzioni, con un'applicazione più stringente di alcune norme di prevenzione e anche tramite la promozione da parte della Regione, con il supporto di ARPA Piemonte, di politiche di informazione, prevenzione e risanamento.

Non deve tuttavia essere scordato che il concetto di *aree prioritarie* è stato introdotto nella legislazione allo scopo di meglio indirizzare le risorse da destinare alla prevenzione, ma senza far dimenticare che, sia pure con una minore urgenza, la tematica radon riguarda comunque tutto il territorio regionale. La natura del rischio radon è infatti intrinsecamente ubiquitaria. Va quindi sempre applicato, in via generale, il famoso e universale concetto ALARA (*As Low As Reasonable Achievable*), uno dei cardini della radioprotezione che altro non è che la declinazione in ambito radioprotezionistico del più generale principio di precauzione: l'esposizione di popolazione e lavoratori dovrebbe essere mantenuta sempre al livello più basso ragionevolmente ottenibile.

4.2 SVILUPPI E PROSPETTIVE

Una volta completata e adottata la mappa del radon le politiche di prevenzione potranno finalmente avere a disposizione un utile strumento informativo. Le attività radon si potranno quindi indirizzare su interventi mirati, volti ad individuare aree particolarmente critiche. Ciò potrebbe comportare la necessità di effettuare estese campagne di misura su

territori limitati, caratterizzati da concentrazioni molto elevate. In questo contesto diventerà quindi sempre più importante la promozione di corrette azioni di bonifica, volte a ridurre le concentrazioni di radon entro livelli accettabili.

Sono possibili diversi approcci a questo problema ed è difficile dare qui, in astratto, una semplice indicazione valida per ogni situazione: la scelta andrà fatta caso per caso, valutando attentamente la situazione. In appendice 2 sono riportati i criteri generali a cui devono ispirarsi queste attività, con alcuni esempi assai schematici. Senza dubbio questo sarà un campo di attività in grande espansione a cui ARPA Piemonte, che anche in questo settore può vantare una certa esperienza, dedicherà certamente la sua attenzione nel prossimo futuro.

APPENDICE 1 – LA RADIOATTIVITÀ E IL RADON: GENERALITÀ E UNITÀ DI MISURA

La radioattività è un fenomeno naturale che riguarda taluni elementi della Tavola di Mendeleev caratterizzati da instabilità nucleare: la loro composizione, in termine di numero di neutroni N e numero di protoni Z è cioè tale da non consentire la sopravvivenza del nucleo così com'è per un tempo indefinito. In questi casi l'elemento radioattivo, detto anche radioisotopo o radionuclide, emette una radiazione (di solito α o β) altamente ionizzante proveniente dal nucleo stesso che, così facendo, si trasforma in un altro elemento che a sua volta può essere o meno radioattivo.

Questo processo spontaneo viene chiamato decadimento radioattivo ed è descritto matematicamente da una funzione esponenziale decrescente nel tempo t , data da:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

in cui la quantità di radioisotopo presente al tempo t è data da $A(t)$, A_0 è la quantità all'istante iniziale (al tempo $t=0$), mentre λ è la costante di decadimento, un parametro fisico che caratterizza in modo univoco ciascun radioelemento.

La grandezza impiegata per indicare una certa quantità di radioattività si chiama attività ed è di solito indicata con la lettera maiuscola A ; la sua unità di misura nel Sistema Internazionale è il Becquerel, corrispondente a una disintegrazione al secondo, così chiamata in onore di Henri Becquerel, scopritore della radioattività nel 1896.

Nel caso del radon, trattandosi di un elemento presente nell'aria che respiriamo, la quantità rilevante è la concentrazione di attività, corrispondente cioè all'attività presente nell'unità di volume. L'unità di misura nel SI per la concentrazione di attività è pertanto il Becquerel al metro cubo, Bq/m³ ed è quindi con questa grandezza che sono espresse le misure di radon e i relativi valori di riferimento normativi.

Per descrivere un decadimento radioattivo, nella pratica si fa spesso uso, in luogo di λ , del concetto molto più facilmente comprensibile di tempo di dimezzamento o emivita, definito come il tempo necessario affinché una data quantità di radioattività inizialmente presente a un dato istante iniziale si dimezzi. Esso viene di solito indicato col simbolo $t_{1/2}$ ed è legato alla costante di decadimento λ dalla seguente relazione:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Si può facilmente verificare che, trascorsi 5-6 tempi di dimezzamento, la quantità di sostanza radioattiva presente si è ormai ridotta a una frazione trascurabile di quella iniziale. Ciò viene efficacemente evidenziato dal grafico della curva esponenziale di decadimento radioattivo, riferita in particolare al radon e mostrato nella seguente Figura A.1:

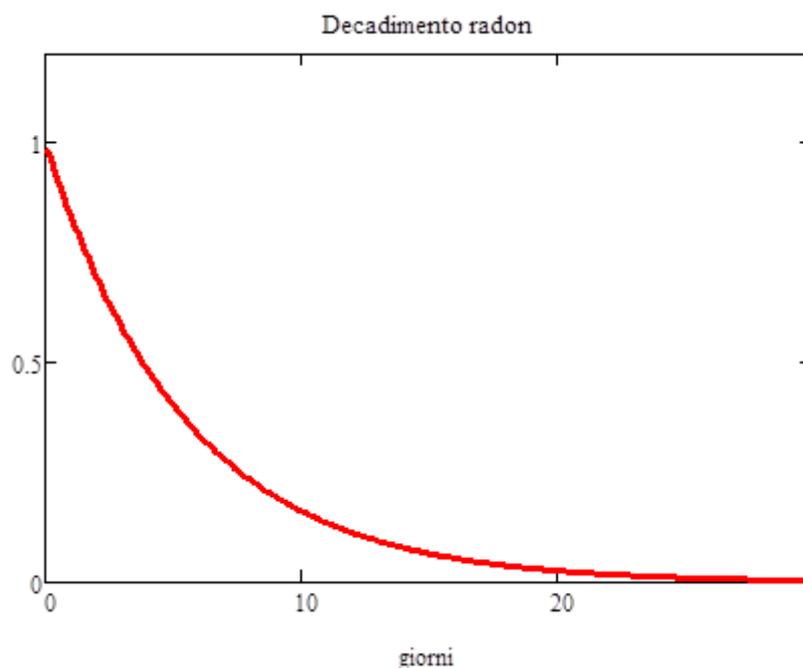


Figura A.1 – Curva di decadimento del radon: si può osservare che, trascorsi 20 giorni dall’istante iniziale, corrispondenti a poco più di 5 tempi di dimezzamento, la quantità di radon residua è quasi nulla.

Per valutare gli effetti sulla salute dell’esposizione al radon (o anche di qualunque altro radionuclide) in un dato tempo t è necessario introdurre una nuova grandezza, detta appunto esposizione, spesso indicata con la lettera w e definita come l’integrale nel tempo della concentrazione di attività:

$$w = \int_0^t C(t)dt$$

in cui $C(t)$ è una funzione che descrive l’andamento nel tempo della concentrazione di attività. Più semplicemente essa può essere indicata anche come un prodotto $w=C \cdot t$, dove C è il valore medio della concentrazione di attività nel tempo t . Nel caso del radon, l’unità di misura dell’esposizione oggi più comunemente utilizzata è il kBq·h/m³ (kiloBecquerel per ora su metro cubo). Storicamente, soprattutto al tempo dei primi studi epidemiologici, venne impiegato il Working Level Month (simbolo WLM), una grandezza definita a partire da considerazioni piuttosto complesse che non possono essere svolte in questa sede (per una trattazione chiara di questo aspetto si veda ad esempio il classico testo di Nazaroff e Nero, 1988).

Il Working Level Month dipende non solo dalla concentrazione di radon gas, ma anche da quella dei suoi figli a vita breve (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po) la cui presenza, pur essendo ovviamente legata al radon stesso, può variare in modo a volte considerevole. Per quantificare la presenza dei figli a vita breve in rapporto al radon è stato introdotto un parametro, detto fattore di equilibrio, indicato con la lettera F . Il fattore di equilibrio può variare tra un minimo di zero (assenza di figli a vita breve), a un massimo di 1 (completo

equilibrio tra radon e figli. In una tipica abitazione il valore del fattore di equilibrio è assunto in media pari a 0,4. In conseguenza di ciò, dal punto di vista numerico, per una esposizione al radon in una tipica abitazione vale approssimativamente la seguente equivalenza: 1 WLM \approx 260 kBq·h/m³.

APPENDICE 2 – PREVENZIONE DEL RISCHIO E INTERVENTI DI MITIGAZIONE

Nel caso in cui i livelli di radon risultassero superiori ai valori di riferimento proposti (e in particolare superassero il valore di riferimento stabilito dal Decreto Legislativo 101/2020, cioè 300 Bq/m³), è opportuna l'effettuazione di azioni di risanamento atte a contenere i livelli di radon entro limiti più accettabili. Tali interventi sarebbero da considerarsi senz'altro obbligatori in caso di superamento del livello di riferimento di 300 Bq/m³, ma potrebbero anche essere presi in considerazione per livelli inferiori, al fine di ridurre ulteriormente il rischio. Un tale approccio è anzi esplicitamente suggerito dall'OMS-WHO, anche per tutte quelle abitazioni che superano i 100 Bq/m³, il valore di riferimento proposto dall'OMS, giustificato dal fatto che, come per tutte le esposizioni alle radiazioni ionizzanti a basse dosi, anche per il radon non c'è attualmente evidenza di un effetto soglia al di sotto del quale l'esposizione a una data concentrazione di radon può essere considerata intrinsecamente sicura.

Per il dettaglio di tali interventi si rimanda a pubblicazioni specializzate. Ad esempio la Linea Guida pubblicata da APAT (ora ISIN), in collaborazione con il sistema nazionale delle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (si veda il dettaglio della pubblicazione in bibliografia), fornisce alcune indicazioni di massima, individuando e discutendo le tecniche di risanamento più diffuse.

A titolo meramente esemplificativo sono qui di seguito riportate alcune figure che illustrano in modo sintetico le idee che stanno dietro alle principali azioni di bonifica. Esse possono essere suddivise in due grandi categorie:

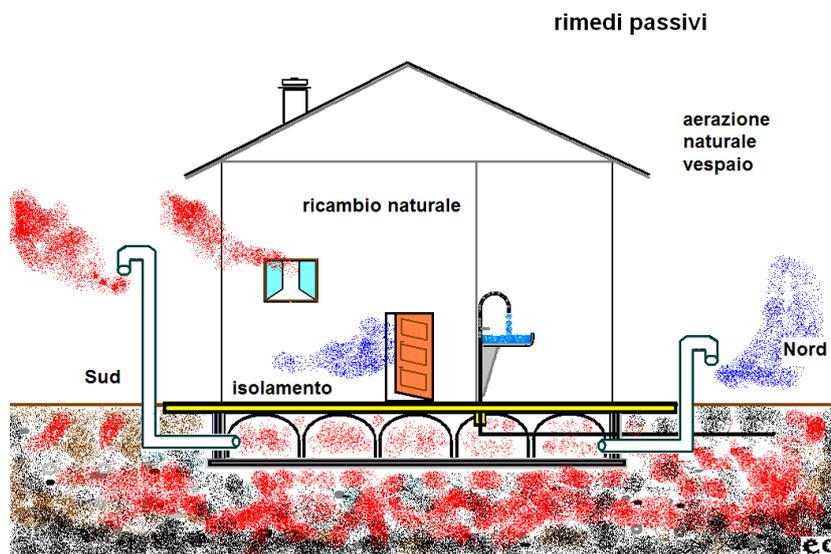
- a) azioni con metodi passivi: sfruttano accorgimenti costruttivi che generano spontanei movimenti dell'aria, favorendone il ricambio e allontanando il radon; hanno il grosso vantaggio di non richiedere il costante impiego di energia elettrica ma non sempre sono efficaci e/o attuabili
- b) azioni con metodi attivi: sono basati su dispositivi più o meno complessi, dotati di motori elettrici; ve ne sono anche di molto semplici e poco costosi, devono comunque essere adattati alla situazione specifica

La scelta di un metodo piuttosto che un altro dipende alla singola situazione ed è quindi difficile, quasi impossibile, fornire criteri generali. È quindi importante rivolgersi a professionisti che abbiano già esperienza in questo campo. In tutti i casi si dovrà comunque aver cura di verificare l'efficacia di tali azioni di rimedio mediante misure di radon effettuate prima e dopo l'intervento di bonifica.

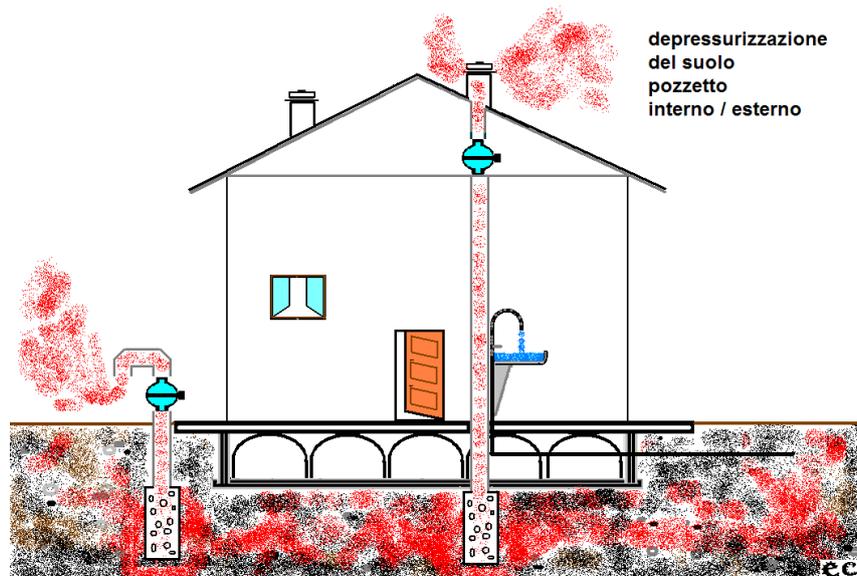
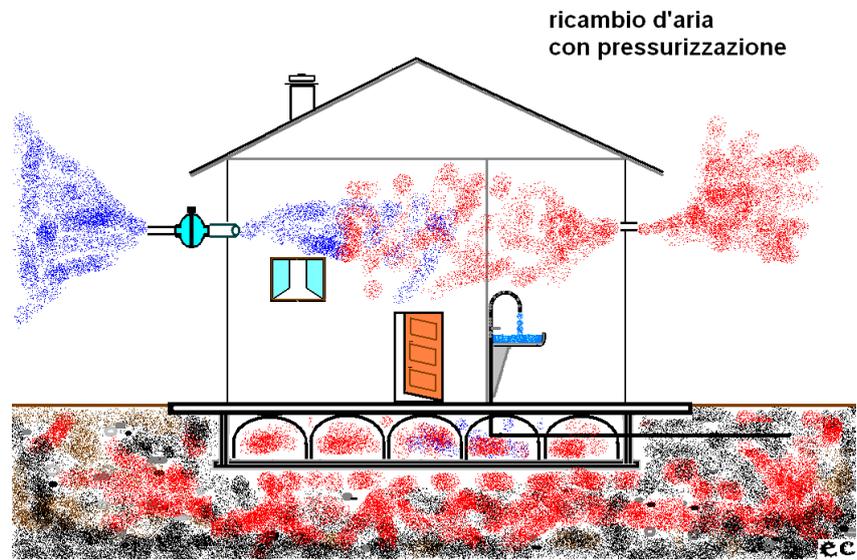
I metodi qui illustrati sono presentati più o meno in ordine di crescente complessità: si parte dai più semplici, dal costo quasi sempre irrisorio, per arrivare a dispositivi ed impianti

complessi che possono richiedere un più consistente impegno economico. Difficilmente però, anche nei casi più difficili, il costo complessivo di un'operazione di bonifica richiede investimenti superiori a qualche migliaio di euro.

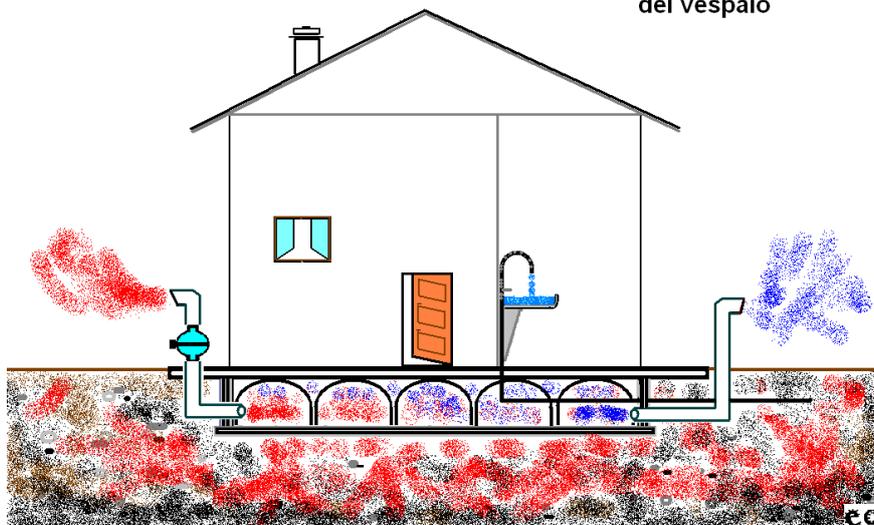
Azioni di rimedio con metodi passivi



Azioni di rimedio con metodi attivi



aerazione forzata
del vespaio



APPENDICE 3 - METODI DI MISURA DEL RADON

Quasi tutte le tecniche di misura impiegate per la determinazione dei livelli di concentrazione del gas radon e dei suoi figli a vita breve, si basano sulla rivelazione della radiazione α emessa durante il decadimento radioattivo.

Il campionamento di qualunque agente inquinante può essere classificato, a seconda della tipologia, come istantaneo o integrato e, rispetto alle caratteristiche strumentali, come attivo o passivo. Un sistema di misura attivo necessita di un'alimentazione elettrica e di dispositivi elettronici che rivelano "istantaneamente" l'inquinante. Viceversa, un sistema di misura è definito passivo quando non necessita di alcun tipo di alimentazione elettrica e utilizza dei componenti chiamati appunto rivelatori passivi in grado di registrare l'inquinante mediante alcune modifiche delle caratteristiche chimico-fisiche dei rivelatori stessi.

Tra i sistemi di misura del gas radon disponibili, le tecniche passive hanno incontrato nel corso degli anni un consistente successo, derivante dalla semplicità di utilizzo in campo e dal basso costo. Inoltre, con l'impiego di questa tipologia di strumenti si può determinare il valor medio della concentrazione di attività radon integrato su un lungo intervallo di tempo (anche un anno solare).

Il valore della concentrazione media annuale, è d'altra parte indicato dalla normativa quale parametro fondamentale per verificare i Livelli di Riferimento, e quindi questo ha senza dubbio rappresentato un vincolo nella scelta della tecnica di misura.

Per le nostre campagne d'indagine sono state impiegate tecniche passive utilizzando in particolare due diversi tipi di rivelatori a tracce nucleari: l'LR115 per quelle di più vecchia data e il CR39 tutt'oggi impiegato. Ogni sistema di misura passivo è composto di una parte sensibile il "rivelatore" alloggiato in un dispositivo di misura, detto dosimetro.

I rivelatori impiegati a questo scopo, conosciuti anche con il nome di rivelatori a tracce nucleari, sono materiali che possiedono una struttura molecolare che li rende adatti a rivelare il passaggio delle particelle α . Le principali caratteristiche sono la bassa conducibilità elettrica e la bassa conducibilità termica (isolanti). Esistono diversi tipi di materiali capaci di rivelare le particelle α ma complessivamente essi si possono raggruppare in due categorie:

- vetri e cristalli inorganici;
- polimeri sintetici organici.

Una particella α passando attraverso il rivelatore cede energia. L'energia ceduta crea nella struttura del materiale un danno permanente, costituito essenzialmente da un'alterazione

delle caratteristiche chimico-fisiche della struttura molecolare: una variazione della densità, la distruzione del reticolo molecolare e la formazione di nuove molecole. L'insieme di queste modificazioni va sotto il nome di danno o traccia latente. In corrispondenza di ogni traccia latente il materiale risulta indebolito. In conseguenza di ciò, le tracce latenti, inizialmente di dimensioni ultramicroscopiche (circa 10^{-8} m), possono essere rese visibili ai sistemi di lettura, elettronici o ottici, tramite un opportuno attacco chimico. Indipendentemente dal tipo di rivelatore impiegato, il numero di tracce che si formano nel materiale sensibile sarà proporzionale al numero di particelle α emesse dal radon e dai suoi prodotti di decadimento nel volume sensibile del dosimetro impiegato.

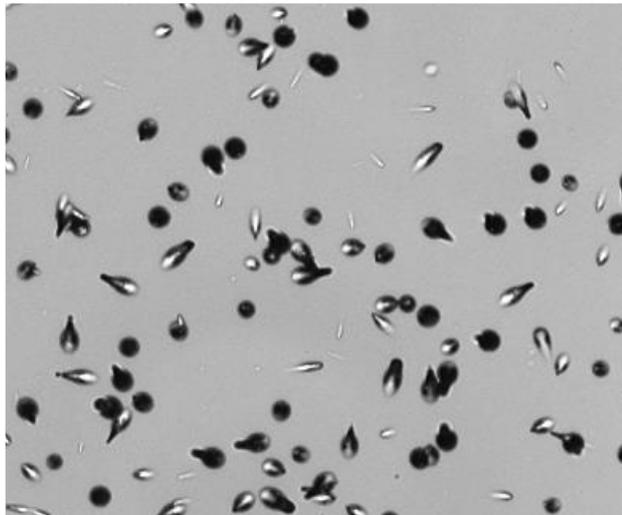


Figura A3.1 - Tracce del radon e dei figli a vita breve nei rivelatori CR39

Il dosimetro ANPA/ARPA, impiegato in buona parte delle nostre indagini, è un'evoluzione del dispositivo ENEA – ANPA, già utilizzato nella Campagna Nazionale (svolta in Piemonte nel 1990-1991) per il monitoraggio del gas radon, realizzatasi in Italia a partire dal 1989. Il dosimetro originale ospitava rivelatori di tipo LR115 ed era costituito da un telaio in plastica e due coperchi dello stesso materiale. Nell'assetto attuale in ciascun coperchio è stata ricavata una sede per ospitare un rivelatore CR39. Il nuovo dosimetro possiede, rispetto al suo predecessore, alcune peculiarità di notevole rilievo, pur rispettando le linee costruttive essenziali. È, infatti, identico nelle dimensioni, nella geometria di rivelazione (cilindrica) e nelle sue modalità di impiego, garantendo la continuità di approccio metodologico usato nelle prime campagne di misura svolte da ARPA. Presenta però il vantaggio di essere costruito con un materiale plastico antistatico che migliora le caratteristiche di omogeneità del campo elettrico nel volume sensibile, in modo da rendere più omogenea la registrazione delle tracce sui CR39.

Una volta assemblato, il dosimetro viene inserito in una busta in polietilene a bassa densità (Figura A3.2), permeabile al radon ma non ai suoi figli a vita breve.



Figura A3.2 - Dosimetro ANPA/ARPA con il rivelatore CR39



Figura A3.3 – Dosimetro ARPA Piemonte in configurazione di misura con busta di polietilene

Per il riconoscimento e il conteggio delle tracce si utilizza un sistema a microscopia ottica denominato “Politrack”, sviluppato dalla ditta Miam: è interfacciato ad un PC dedicato che permette di effettuare automaticamente il riconoscimento e il conteggio di tracce nucleari sui rivelatori esposti.

Più recentemente è stato adottato un nuovo dosimetro, il Radout, sviluppato da Miam: esso è, sempre basato sul rivelatore CR-39 ma è di più semplice assemblaggio e minor costo: non necessita infatti del sacchetto di polietilene come barriera per i figli del radon e impiega un solo rivelatore CR-39 di dimensioni ridotte (Figura A3.4).



Figura A3.3 – Dosimetro Radout, pronto per la misura (chiuso) e in fase di assemblaggio: è visibile nell'alloggiamento interno il rivelatore CR-39

Il laboratorio radon che ha curato questa ricerca è afferente alla struttura Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari del Dipartimento Tematico Rischi Fisici e Tecnologici di ARPA Piemonte ed è accreditato UNI CEI EN ISO/IEC 17025 (certificato ACCREDIA n.0203) per la misura del radon in aria mediante dosimetri passivi. È anche organismo idoneamente attrezzato ai sensi dell'art. 17 comma 7 del D. Lgs. 101/2020 e, pertanto, è abilitato a fornire servizi di misura del radon ai sensi di legge.

BIBLIOGRAFIA

1. WHO *Handbook on indoor radon – A public health perspective*. WHO 2009;
2. ICRP65 - *Protection Against Rn-222 at Home and at Work*, Annals of the ICRP Vol 23 N°2, 1993;
3. Magnoni M. and Tofani S., *Indoor radon measurements in anomalous sites of Piedmont, Italy, Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 56, pp 327-329; 1994;
4. *Indagine sull'esposizione alla radioattività naturale nelle abitazioni del Piemonte, Regione Piemonte*; USSL n°40 Ivrea. 1994;
5. Decreto Legislativo n. 230/1995 e ss.mm.ii.
6. Decreto Legislativo n. 241/2000
7. Commissione Europea, Direttiva 1996/29 EURATOM
8. Commissione Europea, Direttiva 2013/59 EURATOM
9. Commissione Europea, Raccomandazione 90/143 EURATOM.
10. Lubin JH, Boice JD Jr, Edling C, Hornung RW, Howe GR, Kunz E, Kusiak RA, Morrison HI, Radford EP, Samet JM, et al., *Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure*, [J Natl Cancer Inst.](#) 1995 Jun 7;87(11):817-27.
11. Darby S. et al., *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*, *BMJ* Volume 330; 2005;
12. Bochicchio F. et al. *Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions*, *Radiation Measurements*, Vol. 40, pp 686-694; 2005;
13. Regione Piemonte – *La mappatura del radon in Piemonte*, www.arpa.piemonte.it. ISBN 978-88-7479-117-0, Rapporto ARPA 2009;
14. ICRP115 – *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*, Annals of the ICRP Vol 40 No1, 2010;
15. Licitra G., d'Amore G., Magnoni M., *Physical Agents in the Environment and Workplace*, Cap. 13. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton FL (2018).
16. Chiaberto E., Magnoni M., Serena E., Procopio S., Prandstatter A. and Righino F., *“Radon potential mapping in Piemonte (North-West Italy): An experimental approach”*, *European Physical Journal*, Web of Conferences, 24, 06003 (2012);
17. Falletti P. et al. *Arpa Piemonte - Carta geologica del Piemonte alla scala 1:250.000*, 2012;
18. ICRP126 – *Radiological Protection against Radon Exposure*, Annals of the ICRP Vol 43 N°3, 2014;
19. Falletti et al. *Radionuclidi naturali nelle rocce del Piemonte: verso la definizione del potenziale geogenico radon*, Atti VI Convegno ARPA-AIRP Agenti fisici Alessandria, 2016;
20. Chiaberto E., Falletti P. and Magnoni M., *“Radon mapping in Piedmont (North-West Italy): a radio-geo-lithological approach”*, *Journal of the European Radon Association* 2022, 3: 7719 <http://dx.doi.org/10.35815/radon.v3.7719>
21. Nero and Nazaroff, *Radon and its Decay Products in Indoor Air*, New York, 1988, John Wiley & Sons.

22. Price P.N., Predictions and maps of country mean indoor radon concentrations in the mid-atlantic states, *Health Phys.* 72(6):893-906; 1997.
23. Murphy P. and Organo C., A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of the outliers, *Journal of Radiological Protection*, 28, (2008), 293-302.
24. APAT, Linee Guida per le Misure di Radon in Ambienti Residenziali, Pubblicazione RTI CTN_AGF 4/2004
25. Raccomandazione del Sottocomitato Scientifico del progetto CCM "Avvio del Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio del tumore polmonare in Italia", CCM-ISS, approvata il 10 novembre 2008.
26. APAT, Linee Guida Relative ad Alcune Tipologie di Azioni di Risanamento per la Riduzione dell'Inquinamento da Radon, RTI CTN_AGF 4/2005.