

Individuazione delle aree prioritarie in Valle d'Aosta ai sensi dell'art. 11 del d.lgs. 101/2020 e s.m.i.

Sommario

1.	Introduzione.....	2
2.	Il radon	2
2.1	Cos'è il radon.....	2
2.2	La normativa sul radon	3
3.	Il radon in Valle d'Aosta	5
3.1.	Armonizzazione della base dati	7
4.	L'approccio geo-litologico	12
4.1.	Le unità radio-geo-litologiche distinte in Valle d'Aosta.....	13
4.2.	Il modello	17
5.	La mappa del radon in Valle d'Aosta	19
5.1.	Modello con ponderazione sull'area comunale	20
5.2.	Modello con ponderazione sull'edificato comunale	21
5.3.	Analisi dati.....	26
6.	Definizione delle aree prioritarie	28
7.	Bibliografia	32

1. Introduzione

Il 27 agosto 2020 è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica il **Decreto Legislativo 101/2020**), recepimento della Direttiva Euratom 59/2013, successivamente integrato e corretto dal d.lgs. 203/2022. Tale norma prevede che le Regioni producano una classificazione dei rispettivi territori dal punto di vista del rischio di esposizione al radon (art. 11 del D. Lgs. 101/2020), fornendo i criteri tecnici utilizzati. Il 21 febbraio 2024 è stato pubblicato, ai sensi dell'articolo 10 del suddetto decreto legislativo il **Piano Nazionale d'azione per il radon (PNAR) 2023-2032**, che contiene gli obiettivi per affrontare i rischi a lungo termine dell'esposizione al radon nei luoghi di lavoro e nelle abitazioni.

L'ARPA Valle d'Aosta ha creato un impianto metodologico ed una prima mappatura del territorio regionale, a partire dai dati fino ad oggi raccolti, che ha permesso di individuare le **aree prioritarie** come definite dalla normativa (paragrafo 2). Questo lavoro è stato effettuato in collaborazione con l'ARPA Piemonte nell'ambito della "CONVENZIONE DI COLLABORAZIONE OPERATIVA TRA L'AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE AMBIENTALE DEL PIEMONTE E L'AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA VALLE D'AOSTA SUI TEMI "ATTIVITA' SCIENTIFICHE DI MONITORAGGIO DELL'AMBIENTE ALPINO E DI STUDIO DEL POTENZIALE GEOGENICO RADON" del 26/03/2019.

2. Il radon

2.1 Cos'è il radon

Il radon è un elemento chimico radioattivo gassoso che ha la caratteristica di essere incolore, insapore, inodore e quindi non essere percepibile dai sensi umani. In natura esistono tre isotopi del radon: ^{222}Rn (radon propriamente detto), ^{220}Rn (toron) e ^{219}Rn (actinon), prodotti nelle serie radioattive rispettivamente dell' ^{238}U del ^{232}Th e dell' ^{235}U . Ai fini della mappatura, si considera solo l'isotopo ^{222}Rn , in quanto è quello maggiormente presente nelle abitazioni a causa del suo relativo lungo tempo di dimezzamento (4 giorni circa) e del fatto che l' ^{238}U è l'isotopo di uranio maggiormente presente nella crosta terrestre. Il tempo di dimezzamento di qualche giorno permette al radon di percorrere distanze relativamente lunghe rispetto al luogo di formazione e di accumularsi in ambienti chiusi. Il radon decade emettendo una particella alfa: i prodotti di decadimento del radon, chiamati anche "*figli del radon*", sono ioni che decadono emettendo particelle alfa, beta e gamma. Essendo ioni, sono chimicamente attivi e si attaccano facilmente al

particolato presente in aria che, una volta inalato, può essere trattenuto nei polmoni un tempo sufficiente a farli decadere. I primi quattro prodotti di decadimento del radon - ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po - hanno tempi di dimezzamento brevi (da frazioni di secondo a pochi minuti) e sono chiamati “figli a vita breve”; quelli successivi - ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po – vivono mediamente più a lungo e sono chiamati “figli a vita lunga”. Per semplicità si parla di esposizione al radon, riferendosi anche *ai suoi figli a vita breve*. La serie radioattiva prosegue dopo il decadimento dei figli del radon, fino ad arrivare al nucleo stabile del ^{206}Pb .

La concentrazione di attività di radon in aria si misura in Becquerel su metro cubo (Bq/m^3), che corrisponde al numero di decadimenti radioattivi al secondo che avvengono in un metro cubo di aria.

L'esposizione al radon presente nell'aria delle abitazioni aumenta il rischio di contrarre un tumore polmonare e, per alcuni Paesi, si è stimato essere responsabile di una percentuale che va dal 3% al 14% di tutti i tumori polmonari (ISS, 2019).

I risultati di 13 studi epidemiologici (ISS, 2019) condotti in Paesi europei (incluso quello effettuato in Italia), hanno dimostrato:

- un significativo aumento di rischio di tumore polmonare all'aumentare dell'esposizione al radon;
- l'esistenza di un forte effetto sinergico tra fumo di sigaretta e radon;
- l'evidenza del rischio di tumore polmonare anche (per esposizioni prolungate di alcuni decenni) a livelli di concentrazione di radon medio-bassi (inferiori a $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$);
- un aumento di rischio di tumore polmonare del 16% per ogni $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$ di incremento di concentrazione media di radon (tenendo conto delle incertezze questa stima varia da 5% al 31%).

2.2 La normativa sul radon

Visto l'impatto che il radon ha sulla salute umana, a livello Europeo e nazionale sono stati emanati Regolamenti, Direttive e Decreti ai fini della riduzione dell'esposizione della popolazione alle concentrazioni di radon.

La Direttiva europea 59/2013 Euratom ha aggiornato i 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 Decreto (D. Lgs. 101/2020), riguardano il radon: non solo viene stabilita la necessità per ogni Paese di dotarsi di un Piano Nazionale Radon, ma si prende in considerazione anche l'esposizione al radon del pubblico nella propria abitazione, non limitandosi ai luoghi di lavoro come fatto precedentemente. Inoltre, in conformità a quanto suggerito dall'ICRP (ICRP, 2010) sulla base di una rivalutazione del rischio radon alla luce degli ultimi studi disponibili, è introdotto il Livello di Riferimento (Reference Level) pari a **300 Bq/m³**, che riguarda indifferentemente sia le abitazioni che i luoghi di lavoro. Il significato del Livello di Riferimento rappresenta 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 sottolineare non tanto la coerenza 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 sta alla base della radioprotezione.

Come previsto dalla normativa, la mappatura ha anche l'obiettivo di individuare le **aree prioritarie** (al comma 3 dell'art. 11 – D. Lgs. 101/2020), definite come quelle porzioni di territorio in cui la stima della percentuale di edifici che superano come media annua i 300 Bq/m³ (Livello di Riferimento) è superiore al **15% (10% a partire dal VI° anno dall'entrata in vigore del PNAR, pertanto a partire dal 2028)**. Tale percentuale di edifici si riferisce a misure effettuate, o normalizzate, 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 del medesimo articolo 11, sono tenute a pubblicare sulla Gazzetta Ufficiale. Nella norma non vengono date ulteriori indicazioni tecniche sulle modalità di definizione delle suddette aree. Pertanto, si sono presi in considerazione i Comuni come unità territoriali di base su cui costruire la mappa regionale. Si ricorda anche che il PNAR ha, tra i suoi obiettivi, anche:

- la riduzione della concentrazione di radon nei luoghi di lavoro con concentrazione superiore ai 300 Bq/m³;
- la riduzione della concentrazione di radon in almeno il 50% delle abitazioni (sia private che appartenenti al patrimonio di edilizia residenziale pubblica) ricadenti nelle aree prioritarie e in cui sia stata riscontrata una concentrazione superiore ai 200 Bq/m³, dando priorità a quelle con concentrazione superiore ai 300 Bq/m³;

- la verifica che il livello di concentrazione sia inferiore ai 200 Bq/m³ nelle abitazioni costruite dopo il 31 dicembre 2024.

3. Il radon in Valle d'Aosta

La campagna ARPA di caratterizzazione dell'intero territorio regionale è iniziata nel 1991 e viene effettuata su base comunale. Per la definizione del numero di abitazioni da prendere in considerazione in ogni campagna comunale si tiene conto del numero di abitanti. Vengono posizionati dispositivi in 1 abitazione ogni 100 abitanti, con un minimo, per i comuni più piccoli, di 10 abitazioni (ove possibile). Inoltre, per garantire una copertura completa del territorio, si cerca di scegliere abitazioni in modo da coprire tutte le diverse frazioni del comune.

Il rilievo fatto in ogni abitazione ha la durata di un anno, suddiviso in due periodi semestrali: ottobre-marzo (semestre invernale) e aprile-settembre (semestre estivo).

Tutte le misure sono effettuate con rivelatori passivi a tracce su film sottile (LR115) o rivelatori passivi a tracce in plastica (CR39).

I siti di posizionamento dei rivelatori sono scelti privilegiando le abitazioni occupate durante tutto l'anno, nei locali in cui si trascorrono più ore (es. soggiorno, camere da letto). Vengono scelti, quando possibile, locali al piano terra, al piano rialzato o al primo piano, sia perché maggiormente soggetti all'emanazione di radon dal suolo, sia per ottenere dati confrontabili su tutto il territorio regionale al fine di individuare le zone intrinsecamente più soggette a radon, al netto dell'importante fattore di variabilità costituito dalla riduzione delle concentrazioni al crescere del piano dell'edificio. In ogni caso, ogni rilievo è accompagnato da una accurata acquisizione di informazioni su tutti gli aspetti strutturali dell'edificio, dei suoi servizi e del suo utilizzo, aspetti che possono incidere sulle concentrazioni rilevate all'interno.

Le misure di concentrazione media annua su cui si basa questo studio sono **800**, effettuate principalmente in abitazioni residenziali, ma anche in alcuni luoghi di lavoro. Per il calcolo degli indicatori statistici sperimentali su base comunale, sono stati presi in considerazione solamente quei comuni in cui sono disponibili le misurazioni in almeno **8** punti distinti: non è stato sempre possibile raggiungere l'obiettivo iniziale di almeno 10 abitazioni per comune, si è comunque ritenuto il numero di 8 abitazioni valido dal punto di vista statistico. In tal modo si sono potuti prendere in considerazione **45** comuni sul totale dei 74 del territorio regionale.

In Figura 1 è riportata la distribuzione in frequenza delle misure di concentrazione media annua di attività di radon in Valle d'Aosta. In rosso è indicato il valore di riferimento normativo (300 Bq/m³)

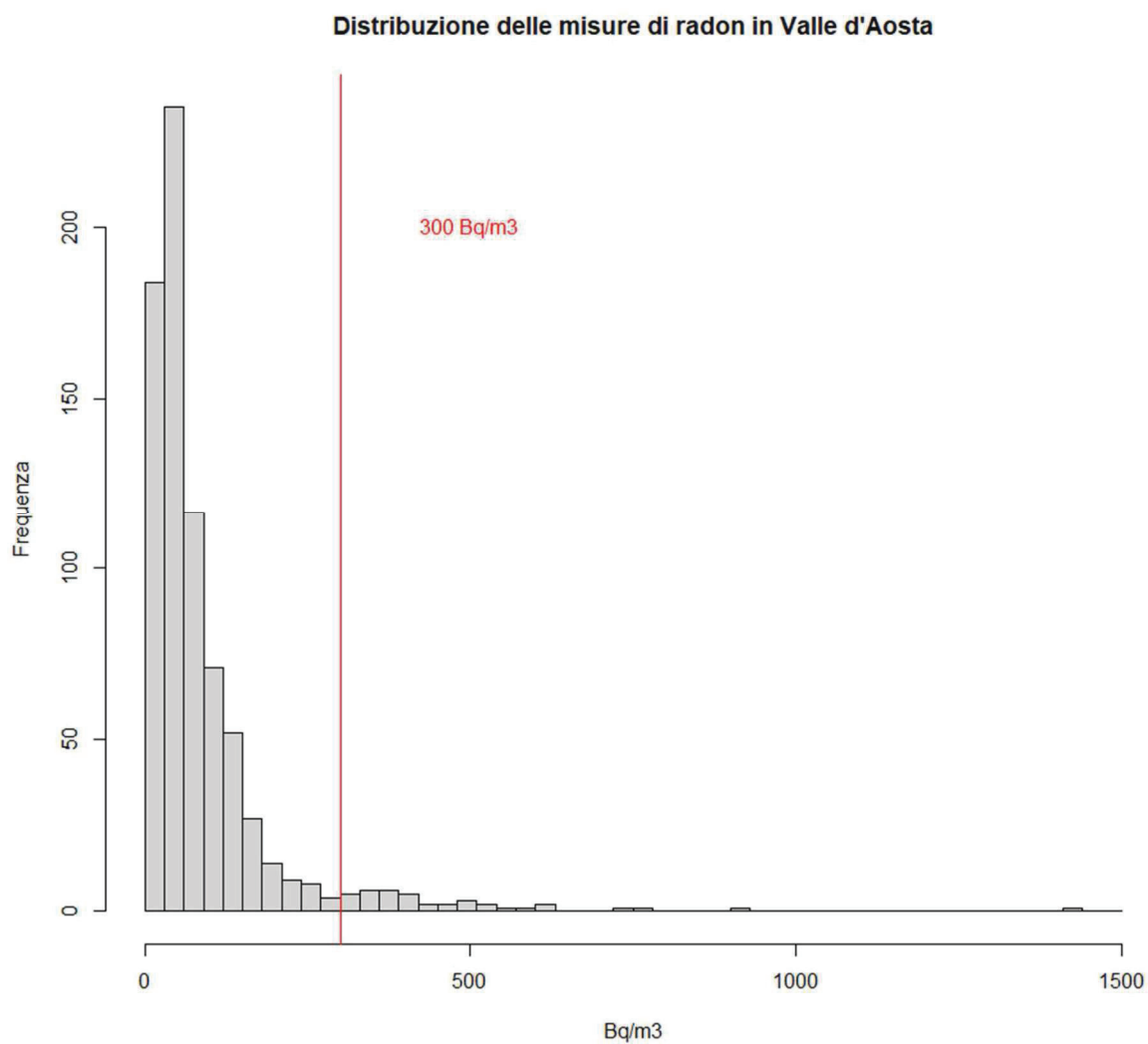


Figura 1 Distribuzione in frequenza delle misure di concentrazione media annua di attività di radon in Valle d'Aosta. In rosso è indicato il valore di riferimento normativo (300 Bq/m³)

Nella tabella seguente è riportata la statistica descrittiva dei dati:

Numero comuni (>= 8 misure)	45
Numero misure	800
Valore concentrazione minimo [Bq/ m³]	8
Valore concentrazione massimo [Bq/ m³]	1424

Media aritmetica [Bq/ m ³]	92
Mediana [Bq/ m ³]	57
Media geometrica [Bq/ m ³]	61
% > 100 Bq/ m ³	26%
% > 200 Bq/ m ³	9%
% > 300 Bq/ m ³	5%

Tabella 1 Statistica descrittiva delle concentrazioni di radon in Valle d'Aosta

Lo scopo di questo lavoro è l'individuazione di un metodo per l'estrapolazione dei livelli di radon nelle zone in cui non si hanno a disposizione le misurazioni dirette, al fine di poter avere una mappa del rischio radon in Valle d'Aosta e poter individuare le **aree prioritarie**. L'attività è stata svolta per mezzo dei seguenti passi:

- Normalizzare le misure di concentrazione annua di radon al piano terra, cioè ricavare, per gli edifici in cui sono disponibili solo misure ai piani diversi dal piano terra, valori di concentrazione media annua di attività di radon riferita al piano terra.
- Trovare un metodo per avere informazioni sui livelli di radon anche nelle zone non coperte dalle misure sperimentali.
- Creare la mappa del rischio radon in Valle d'Aosta e individuare le aree prioritarie.

3.1. Armonizzazione della base dati

La normativa prevede che, al fine della mappatura del territorio e per l'individuazione delle aree prioritarie, si considerino solamente le misure al piano terra o effettuate ad altri piani ma "ricondotte" al **piano terra**. Questa scelta è dettata dal fatto che tale piano è più direttamente correlabile con le proprietà emissive dei suoli e quindi più adatto per caratterizzare il territorio dal punto di vista radon. Per effettuare la normalizzazione delle misure al piano terra si sono utilizzate tecniche statistiche che hanno permesso di calcolare dei coefficienti moltiplicativi da applicare alle misure effettuate in piani diversi dal piano terra (es: seminterrato o piano primo e superiori).

È noto dalla letteratura scientifica che i dati di concentrazione di radon rilevati in ogni area si distribuiscono con buona approssimazione secondo una distribuzione log-normale, la cui funzione densità di probabilità è:

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

in cui:

C : concentrazione di attività di radon;

$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(C_i)$ (media dei logaritmi naturali delle concentrazioni)

$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(C_i) - \mu)^2}$ (deviazione standard dei logaritmi naturali delle concentrazioni)

dove C_i è la concentrazione relativa all'i-esimo dato sperimentale.

Valgono anche le seguenti relazioni:

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

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

$MA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} = MG \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2}}$ media aritmetica

Considerando che le distribuzioni delle concentrazioni di radon riferite ai diversi piani seguano delle distribuzioni log-normali, si ottiene per il generico piano P_X :

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

Ipotizzando una relazione lineare tra la concentrazione al piano terra C_{PT} e quella ad un generico piano C_{PX} :

$$C_{PX} = k_x C_{PT}$$

con k_x costante di normalizzazione incognita tra il piano P_X ed il piano terra P_T si ottengono le seguenti relazioni tra parametri dei vari piani:

$$\mu_{PX} = \ln(k_x) + \mu_{PT}$$

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

Nella realtà questa ultima relazione non è strettamente verificata, in quanto la deviazione standard dei logaritmi naturali delle concentrazioni può variare al variare del piano.

Dalle relazioni precedenti, si ricava:

$$k_x = \frac{e^{\mu_{PX}}}{e^{\mu_{PT}}} = \frac{MG_{PX}}{MG_{PT}} = \frac{MA_{PX}}{MA_{PT}}$$

che indica che la costante di normalizzazione si può ricavare dal rapporto delle medie geometriche e/o medie aritmetiche delle concentrazioni misurate al piano generico e quelle al piano terra. I due rapporti sperimentalmente possono differire: nel presente lavoro si è scelto di utilizzare il rapporto delle medie geometriche, in quanto nelle ipotesi di distribuzione log-normale la stima di μ e di conseguenza di MG è da considerarsi più robusta di quella della media aritmetica (MA).

Piano	Coefficiente di normalizzazione k
-1/-0.5	1.62
0	1
0.5	0.70
1	0.56
2	0.52

Tabella 2 Coefficienti di normalizzazione utilizzati per ricondurre le misure effettuate al piano terra

Si osserva che la base dati utilizzata contiene misure che sono state raccolte dal 1991 al 2020, cioè in quasi 30 anni. In un periodo così lungo le caratteristiche costruttive delle abitazioni sono cambiate, soprattutto ultimamente con l'efficientamento energetico degli edifici e l'applicazione di cappotti termici e serramenti con un elevato isolamento. I coefficienti di normalizzazione trovati, ed in generale la base dati su cui effettuare l'analisi, potranno pertanto essere rivisti in futuro.

Nei grafici seguenti sono riportati le distribuzioni delle concentrazioni di radon misurate nei diversi piani. Si può osservare (Figura 2) che tutte le distribuzioni sono approssimabili con una funzione log-normale e che, al diminuire dei piani, i valori delle misure generalmente aumentano, confermando che i piani più a contatto con il terreno sono quelli che subiscono maggiormente l'esalazione del radon dal terreno.

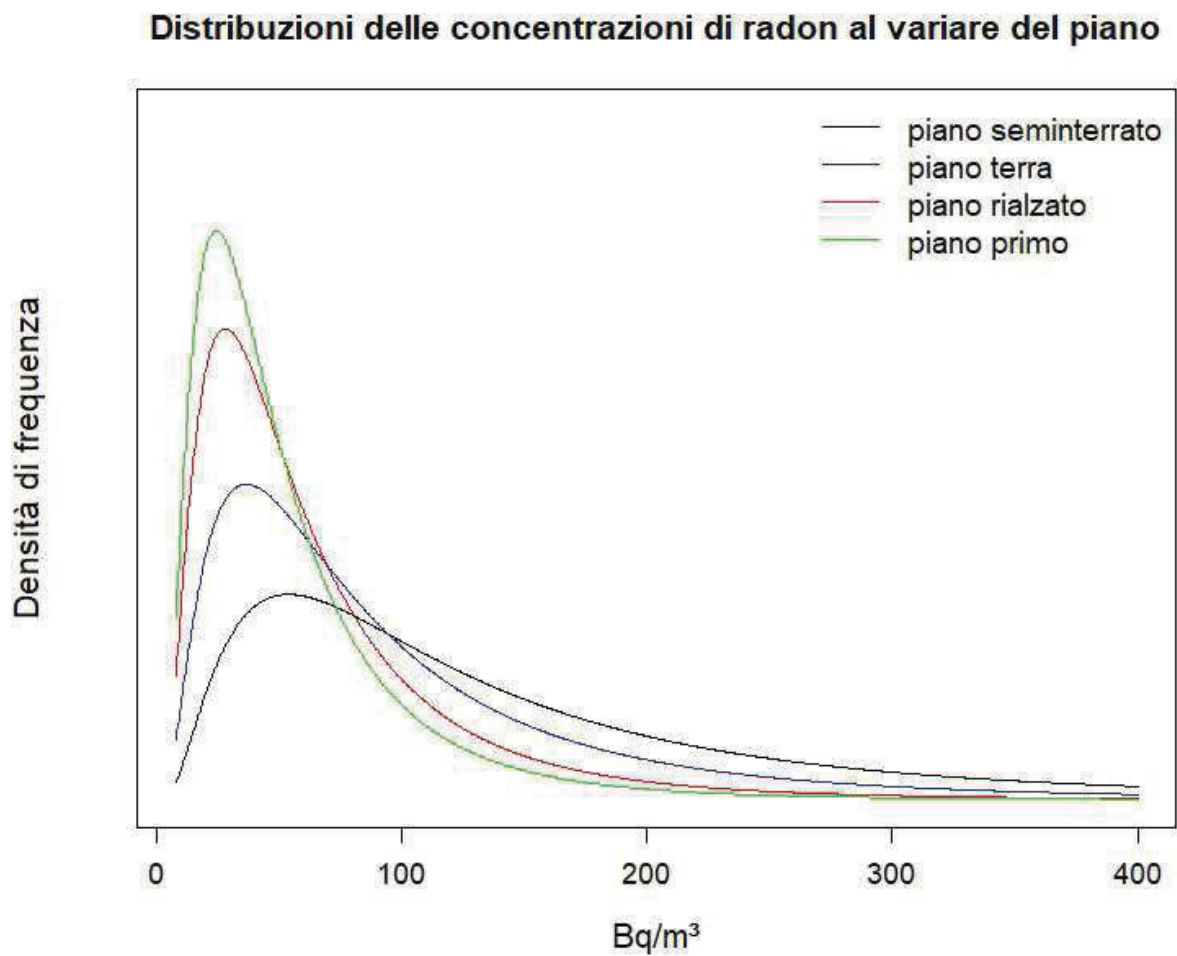


Figura 2 Distribuzioni in frequenza delle concentrazioni di radon misurate ai diversi piani

Una volta effettuata la normalizzazione, si ottiene una base dati omogenea, come richiesto dalla normativa, da utilizzare per la costruzione della mappatura del rischio. In Figura 3 sono mostrate le distribuzioni delle concentrazioni di radon non normalizzate, quelle misurate al piano terra e quelle normalizzate al piano terra.

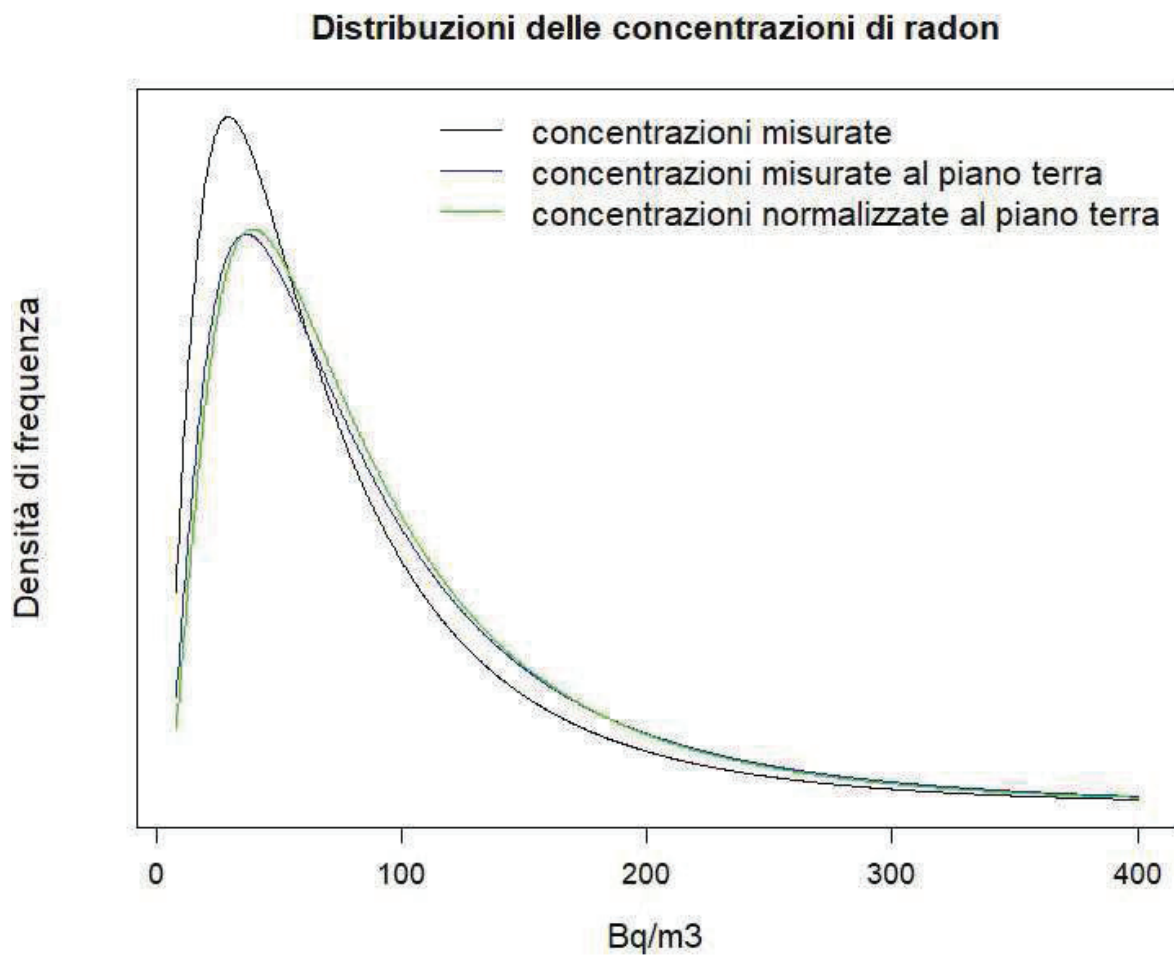


Figura 3 Distribuzioni delle concentrazioni di radon non normalizzate, normalizzate e al piano terra

Il campione di misure di radon selezionato (misure annuali) e normalizzato (“ricondotte” al piano terra) secondo i criteri descritti è stato quindi rappresentato in forma cartografica (Figura 4). Come si può vedere le misure non coprono tutti i comuni del territorio regionale, occorre quindi procedere con l’elaborazione di un modello che permetta la valutazione del rischio radon su tutta la regione.

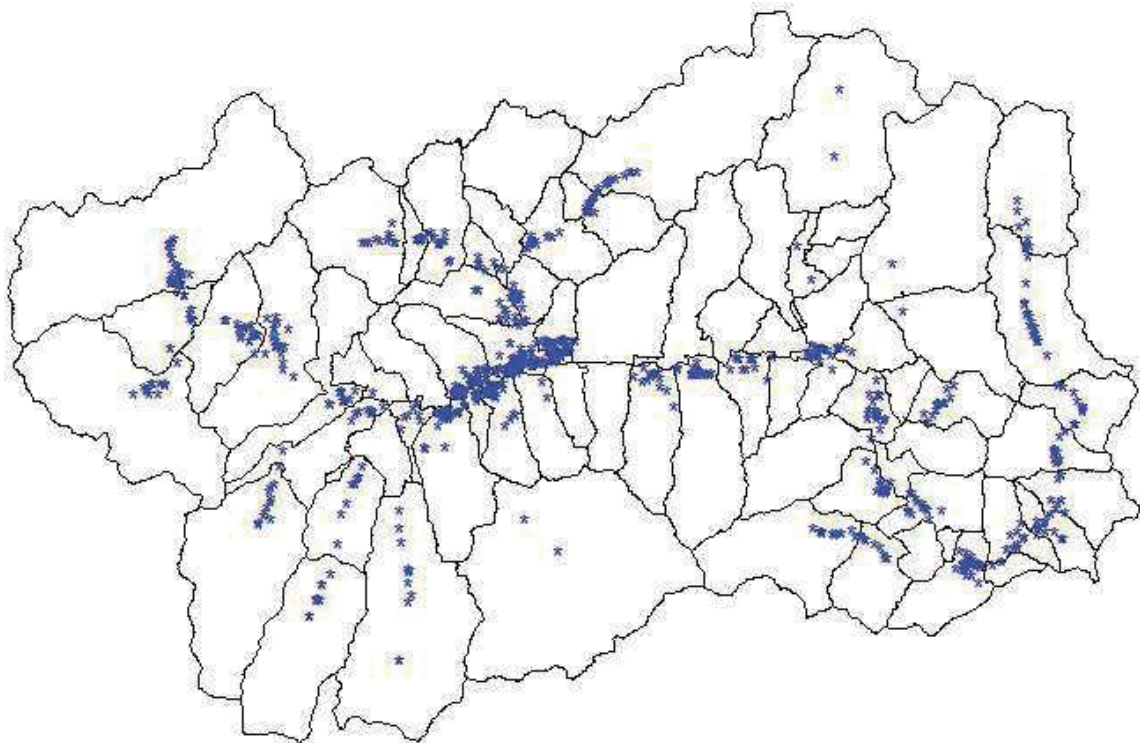


Figura 4 Punti di misurazione delle concentrazioni annuali di attività di radon

4. L'approccio geo-litologico

L'estrapolazione dei livelli di radon in aree in cui mancano misure sperimentali dirette è un problema che può essere affrontato in vari modi. Un approccio molto seguito in questi ultimi anni è quello geostatistico che, a partire da un insieme di dati territoriali georeferenziati, è in grado di costruire mappe che interpolano i dati sperimentali in modo tale da andare a costituire una superficie continua che, in ogni punto, è in grado di fornire il valore della variabile in gioco. La base teorica della geostatistica riposa sull'assunzione che dati tra loro vicini tendono ad essere tra loro più simili di quelli lontani e sul calcolo di una quantità, detto *variogramma* (o *semivariogramma*), che descrive in qualche modo tale correlazione spaziale. L'applicazione di un tale schema teorico al radon, soprattutto nel caso della Valle d'Aosta (e del vicino Piemonte), presenta delle difficoltà legate alla presenza di discontinuità geologiche e geomorfologiche molto marcate che possono influenzare anche in modo considerevole i livelli di radon. Tali difficoltà potrebbero probabilmente essere in parte aggirate o comunque ridotte con l'aggiunta di altri punti sperimentali che vadano ad infittire la rete di dati disponibili. In questa fase, però, si è ritenuto più prudente non fare uso della geostatistica e di esplorare piuttosto la possibilità di impiegare in senso predittivo eventuali

correlazioni esistenti tra i livelli di radon, le tipologie litologiche e il loro contenuto di radioattività naturale.

4.1. Le unità radio-geo-litologiche distinte in Valle d'Aosta

Le unità geologiche della Valle d'Aosta presentano una sezione completa delle unità che costituiscono la catena alpina, sviluppandosi dalle rocce del margine europeo a Nord-Ovest fino alle rocce del margine africano a Sud-Est, separate dalle rocce che derivano dall'oceano mesozoico che separava l'Europa dall'Africa prima della collisione tra le due masse continentali che ha portato alla formazione delle Alpi. Tutte le unità sono interessate da un'impronta metamorfica alpina prevalentemente polifasica; le rocce pre-mesozoiche coinvolte nella catena sono in gran parte state interessate da eventi orogenici precedenti, con il risultato di una storia complessa di deformazione e metamorfismo.

Le circa 70 unità di legenda della carta geologica della Valle d'Aosta alla scala 1:100.000 (Bonetto et al., 2010) sono state accorpate in 13 unità radiogeolitologiche (Tabella 3) in base ai dati della spettrometria gamma e tenendo conto dei caratteri litologici, stratigrafici e genetici delle unità. La spettrometria gamma è una tecnica analitica che permette di individuare e quantificare la presenza di radionuclidi in matrici solide e liquide. In questo studio sono stati prelevati diversi campioni di rocce sul territorio valdostano e piemontese per valutare la radioattività naturale (^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K). Le unità sono state individuate seguendo i classici criteri connessi all'evoluzione strutturale e metamorfica della catena alpina e all'ubicazione delle unità nel quadro paleogeografico anteriore alla chiusura dell'oceano mesozoico, in riferimento al segmento alpino della Tetide occidentale nel Giurassico superiore, e quindi anteriore alla formazione della catena stessa; questa collocazione naturalmente influenza la posizione strutturale delle stesse nella pila delle falde.

Lo schema generale di classificazione delle unità rispecchia quindi le tradizionali distinzioni in elementi strutturali maggiori separati da superfici tettoniche di importanza regionale; questi sistemi tettonici comprendono unità accomunate non solo dall'evoluzione cinematica durante la storia collisionale, ma anche da una precisa affinità genetica, in relazione al quadro paleografico anteriore alla convergenza oceanica e alla collisione continentale, e sono pertanto indicati anche con il termine di dominio. In sintesi si distinguono, dall'esterno della catena (margine europeo) verso l'interno (margine africano), ossia da NW verso SE, e dal basso verso l'alto strutturale:

- il **dominio elvetico**, che rappresenta la parte del paleomargine europeo coinvolta nell'orogenesi alpina, che in Valle d'Aosta comprende il Massiccio del Monte Bianco e le unità ultraelvetiche (M. Chetif e falde scollate di coperture);
- il **dominio pennidico**, che corrisponde alle unità derivanti dal mare mesozoico scomparso a causa della collisione continentale e che comprende tutte le unità ad affinità oceanica (**dominio oceanico** o piemontese) e un gruppo di unità indicate come **falde pennidiche**, tradizionalmente articolate in:
 - Pennidico inferiore, che in Valle d'Aosta comprende solo falde di copertura completamente sradicate: Zona Sion-Courmayeur, Zona del Versoyen e zona del Piccolo San Bernardo, quest'ultima talora anche attribuita al Pennidico medio;
 - Pennidico medio: unità Gran San Bernardo, basamento polimetamorfico del Rutor, coperture scollate Brianzonesi;
 - Pennidico superiore: Monte Rosa, Arcesa-Brusson, Gran Paradiso.

Le unità oceaniche (zona piemontese) a Nord della Dora sono distinte nell'unità inferiore Zermatt-Saas, a metamorfismo eclogitico, e unità superiore - Zona del Combin; tra le due sono inserite unità scollate di coperture permo-mesozoiche; a Sud della Dora questa distinzione è meno netta, ma litologie e impronta metamorfica sono analoghe. Le unità oceaniche si distinguono per la classica sequenza serpentiniti (derivanti dal metamorfismo delle rocce del mantello superiore) – metagabbri (crosta oceanica) – metabasalti (fondali oceanici) – calcescisti (metasedimenti);

- il **dominio austroalpino**, costituito dalla parte del paleomargine africano coinvolta nella catena alpina a vergenza europea; in Valle d'Aosta si distinguono due unità principali: la Falda Dent Blanche, la quale, insieme a numerosi lembi minori, è sovrascorsa sulle unità pennidiche; la Zona Sesia-Lanzo, grande elemento interno allungato in direzione SW-NE, distinto in complesso esterno degli gneiss minuti, caratterizzato da retrocessione metamorfica in facies scisti verdi, e complesso interno dei micascisti eclogitici, con prevalente metamorfismo eoalpino di alta pressione e bassa temperatura, eclogitico e in facies scisti blu.

Le unità pennidiche, oceaniche e austroalpine formano nell'insieme un grande corpo polideformato ubicato in corrispondenza della zona di sutura tra le due placche litosferiche europea ed africana e

separato e svincolato da esse tramite due grandi discontinuità crostali: il Fronte Pennidico verso l'esterno (in sovrascorrimento sul dominio Elvetico) e la Linea Insubrica verso l'interno.

Nella zona Sesia-Lanzo sono presenti filoni e corpi subvulcanici, espressione del magmatismo postmetamorfico oligocenico, molto diffusi ma che non arrivano mai a costituire veri e propri plutoni come nelle vicine aree piemontesi (Val Chiusella e Valle Cervo).

Il quadro della geologia regionale si completa con i depositi glaciali, recenti e in formazione, ampiamenti diffusi sui versanti della valle principale e delle valli secondarie, e con i depositi alluvionali delle Dora Baltea. Sono presenti significative piane alluvionali di fondovalle anche in alcune vallate tributarie.

I dati dell'analisi spettrometrica e le considerazioni relative al potenziale geogenico delle rocce hanno portato ad una suddivisione delle unità radiolitologiche che modifica la gerarchia tradizionale delle unità geologiche sinteticamente sopra descritta, consentendo ulteriori accorpamenti per analogie litologiche nelle unità Elvetiche e Brianzonesi, ma nello stesso tempo rendendo significative ulteriori distinzioni, ad esempio distinguendo le unità vulcaniche e vulcanoclastiche del Paleozoico superiore. Sono state così create le **unità radio-geo-litologiche o *urgl***.

Sulla base delle concentrazioni di ^{40}K sono stati inoltre distinti graniti, metagranitoidi e ortogneiss dall'incassante basamento polimetamorfico nelle unità Elvetiche (Massiccio del Monte Bianco), nelle Unità Brianzonesi (Pennidico Medio) e nelle unità Pennidiche superiori (Monte Rosa e Gran Paradiso); si tratta peraltro di rocce interamente riconducibili al magmatismo tardo ercinico (età delle intrusioni tra 310 e 270 milioni di anni fa).

Nelle seguenti Tabella 3 e Figura 5 sono riportate le unità radio-geo-litologiche individuate.

Unità radio-geo-litologica (<i>urgl</i>)	sigla
Coperture sedimentarie mesozoiche elvetiche, ultraelvetiche e brianzonesi	11
Unità vulcaniche e vulcanoclastiche ultraelvetiche e brianzonesi	12
Unità Elvetiche: Massiccio del Monte Bianco – granito del Monte Bianco; Unità Brianzonesi (Pennidico medio): metagraniti	13o
Unità Elvetiche: Massiccio del Monte Bianco – basamento polimetamorfico pregranitico; Unità Brianzonesi: basamento polimetamorfico pregranitico	13p

Coperture sedimentarie delle Unità Pennidiche inferiori; Zona Sion-Courmayeur e Zona del Versoyen; zona del Piccolo San Bernardo	14
Unità Pennidiche superiori (Monte Rosa, Arcesa-Brusson, Gran Paradiso): metagraniti e ortogneiss	16
Unità Pennidiche superiori (Monte Rosa, Arcesa-Brusson, Gran Paradiso): basamento polimetamorfico pregranitico e coperture sedimentarie paleozoiche metamorfiche	17
Successioni mesozoiche e metasedimenti di origine oceanica o di margine continentale	18
Metabasiti e metaultrabasiti di origine oceanica	19
Depositi fluviali	1f
Depositi fluviali della Dora di Veny e della Dora di Ferret	1fa
Unità Austroalpine: Dent Blanche e Sesia-Lanzo	20
Depositi glaciali	3c

Tabella 3 Le unità radio-geo-litologiche (urgl) presenti in Valle d'Aosta

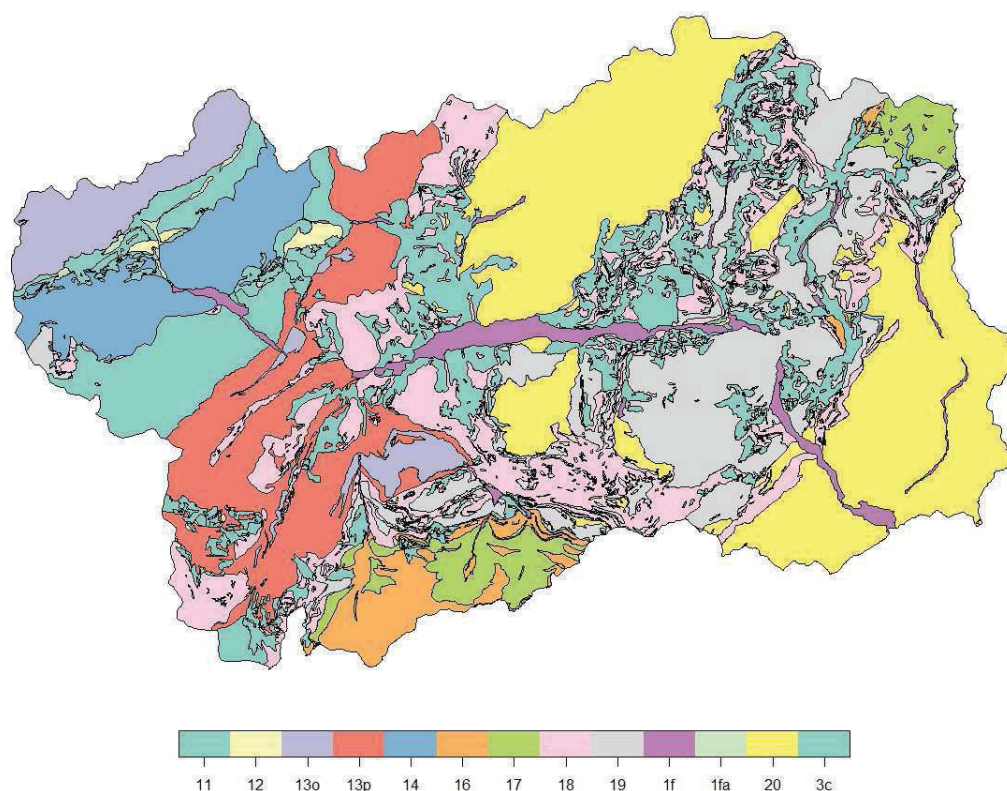


Figura 5 Unità radio-geo-litologiche presenti in Valle d'Aosta

4.2. Il modello

Acquisita la carta radio-geo-litologica della Regione, si sono sovrapposti i dati di radon georeferenziati: si è così potuto calcolare la media litologica ML_k per ogni generica classe litologica k . L'idea di fondo che sta alla base di questo approccio è quella che ciascuna classe litologica abbia una "particolarità radiometrica" tale da poter essere impiegata come strumento predittivo laddove mancano i dati sperimentali.

In Figura 6, è presentata la mappa delle *urgl* colorate in base alla media delle concentrazioni di radon misurate o normalizzate al piano terra.

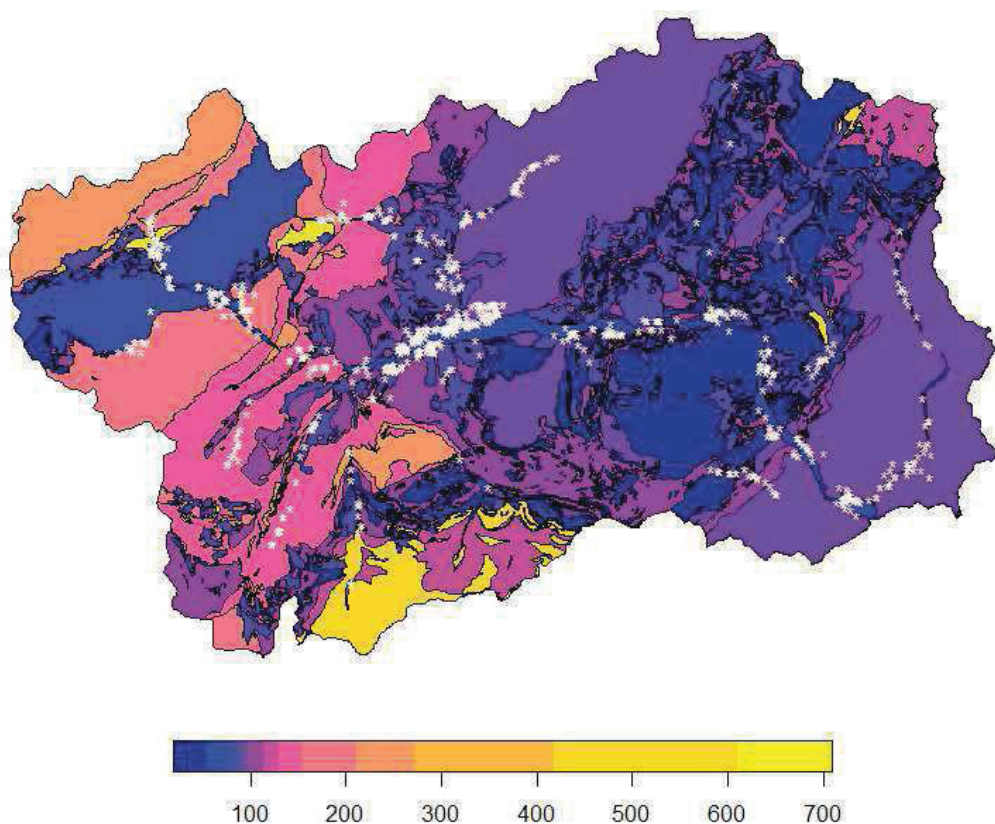


Figura 6 Concentrazione media di attività di radon (Bq/m^3) delle unità radio-geo-litologiche (urgl) in cui è stata suddivisa la Valle d'Aosta. Le medie sono state calcolate a partire dalle misure sperimentali che insistono su ciascuna urgl; nel caso di assenza di misure il valore medio è stato preso dalla stessa urgl definita per la regione Piemonte (ARPA Piemonte). In bianco i punti di misura utilizzati.

In Figura 7 è mostrato il grafico della media delle concentrazioni di radon all'interno di ogni urgl. Si può osservare che i valori spaziano da un minimo di $55 Bq/m^3$ ad un massimo di quasi $700 Bq/m^3$.

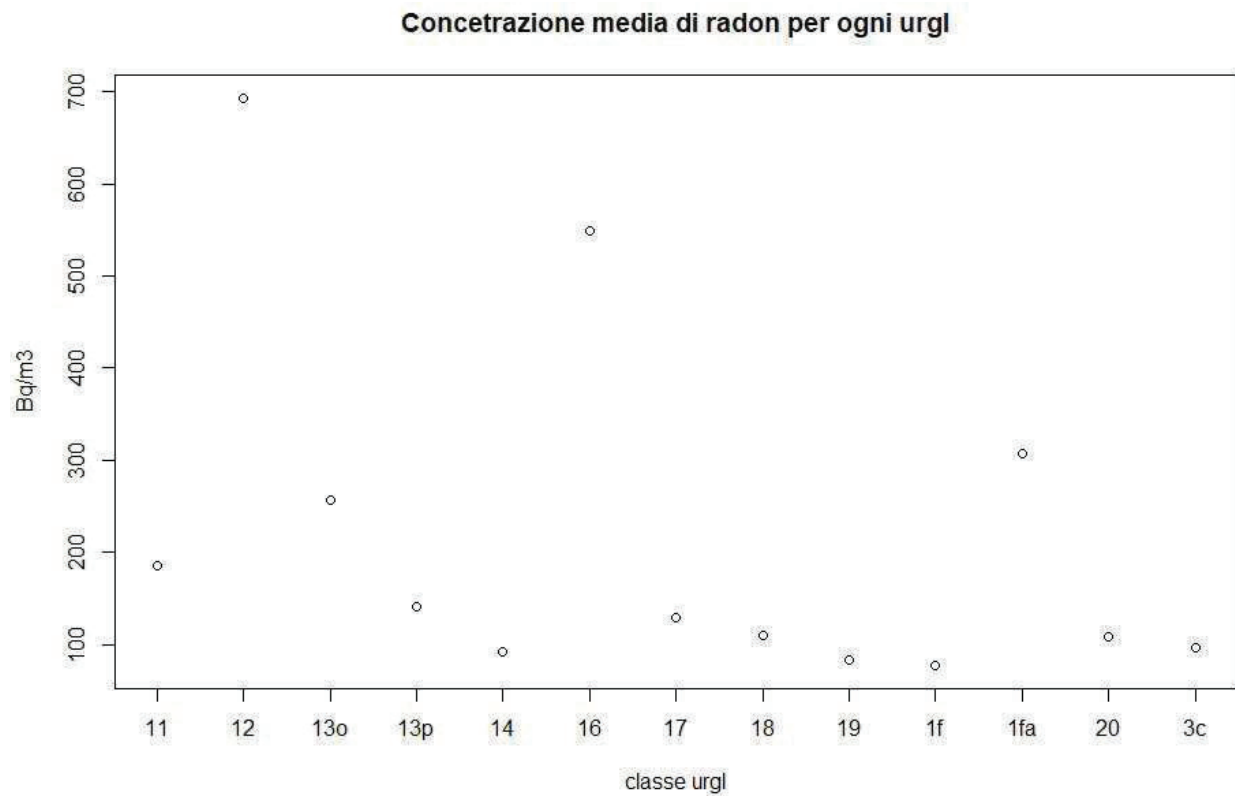


Figura 7 Concentrazione radon media per ogni urgl.

Sovrapponendo alle classi litologiche la carta regionale con le suddivisioni amministrative comunali, si ottiene una suddivisione del territorio di ciascun comune in termini di classi radio-geo-litologiche (*urgl*). A partire dalle medie litologiche si può stimare la media comunale. Ipotizzando che le concentrazioni di radon per ogni *urgl* seguano una distribuzione log-normale, si può stimare la media comunale come media ponderata delle μ relative all'area delle *urgl* che insistono sul territorio comunale. Matematicamente, se nel generico comune j insistono ipoteticamente p diverse aree radio-geo-litologiche, varranno le seguenti relazioni:

$$\mu_j = \sum_{k=1}^p \mu_k \frac{AL_k \cap AC_j}{AC_j}$$

Equazione 4-1 Calcolo della μ con ponderazione sull'area

$$\sigma_j^2 = \sum_{k=1}^p \sigma_k^2 \frac{AL_k \cap AC_j}{AC_j}$$

Equazione 4-2 Calcolo della σ^2 con ponderazione sull'area

dove AL_k è l'area della k -esima area radio-geo-litologica mentre AC_j è l'area totale del j -esimo comune. A partire da μ_j e σ_j^2 si può calcolare la media aritmetica del j -esimo comune tramite la relazione precedentemente presentata:

$$ML_j = e^{\mu_j + \frac{\sigma_j^2}{2}}$$

Equazione 4-3 Calcolo della media aritmetica a partire dai parametri μ e σ^2 della log-normale

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 indicatori necessari per l'individuazione delle aree prioritarie. In Figura 8 è presentato il dettaglio delle *urgl* che insistono sul territorio del comune di Aosta.

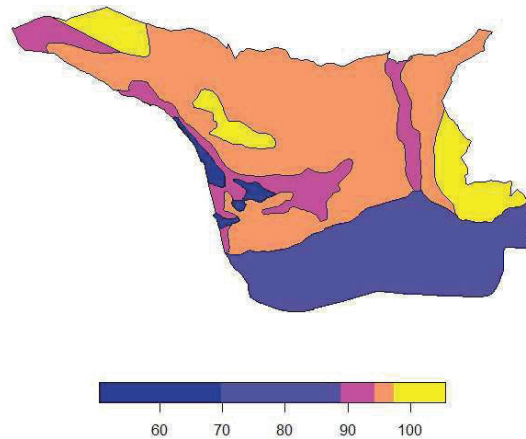


Figura 8 Urgl presenti nel territorio del comune di Aosta. I diversi colori identificano le medie della concentrazione di attività di radon (Bq/m³) di ciascuna urg.

5. La mappa del radon in Valle d'Aosta

Per le unità comunali in cui sono presenti almeno 8 misure (considerato come limite minimo a livello statistico) sono stati calcolati i seguenti indicatori, utili per la definizione delle aree prioritarie ai sensi del d.lgs. 101/2020:

- MA_S : Media aritmetica sperimentale;
- μ_S : media sperimentale dei logaritmi naturali delle concentrazioni;
- σ_S : deviazione standard sperimentale dei logaritmi naturali delle concentrazioni;
- MG_S : Media geometrica sperimentale;

- DSG_S : deviazione standard geometrica sperimentale.

In Figura 9 è riportata la mappa di concentrazione media di attività di radon (MA_S) su base comunale a partire dai dati sperimentali.

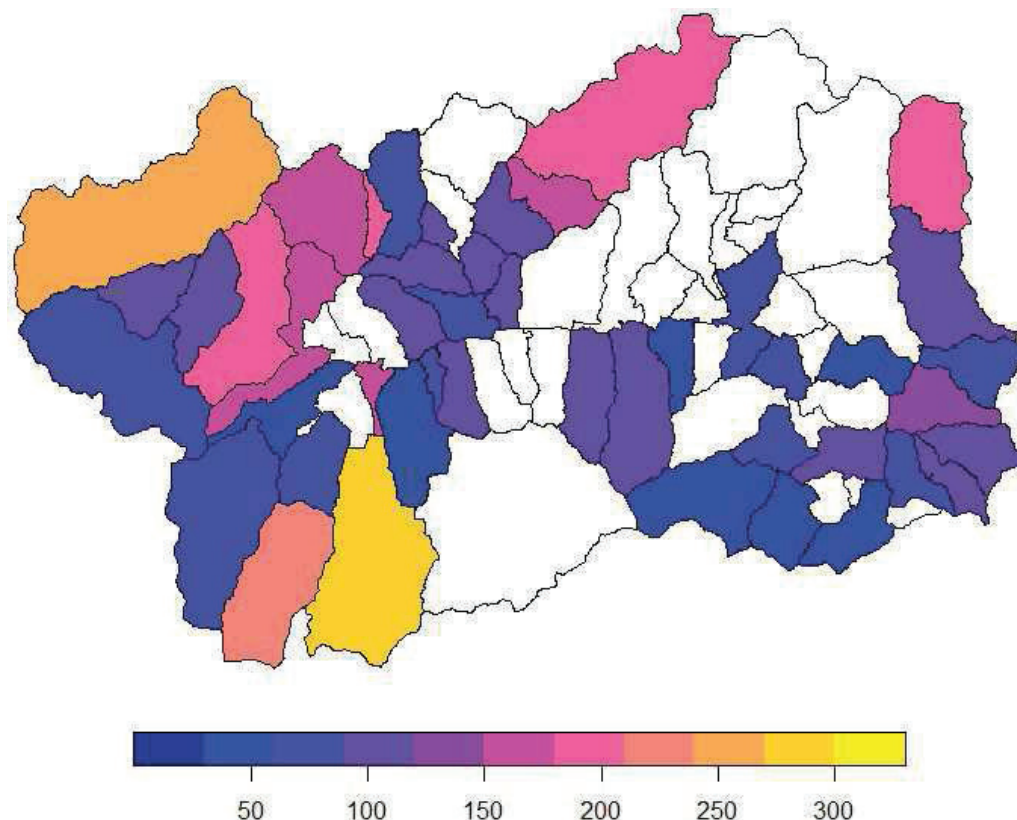


Figura 9 Medie comunali sperimentali (MA_S) di concentrazione di attività di radon misurata o normalizzata al piano terra (Bq/m^3) calcolate per i comuni con almeno 8 misure.

5.1. Modello con ponderazione sull'area comunale

Definito il modello radio-geo-litologico con ponderazione sull'area delle *urgl* che incide su ogni territorio comunale, si è proceduto a calcolare per ogni comune e relativamente alle concentrazioni di attività di radon normalizzate al piano terra:

- MA_PA : Media aritmetica da modello ponderato sull'area (Equazione 4-3);
- μ_PA : media dei logaritmi naturali delle concentrazioni da modello ponderato sull'area (Equazione 4-1);
- σ_PA : deviazione standard dei logaritmi naturali delle concentrazioni da modello ponderato sull'area (Equazione 4-2);

- MG_PA : Media geometrica da modello ponderato sull'area;
- DSG_PA : deviazione standard geometrica da modello ponderato sull'area.

In Figura 10 è riportata la mappa di concertazione media di radon valutata con il modello a ponderazione sull'area (MA_PA) tramite l'Equazione 4-3

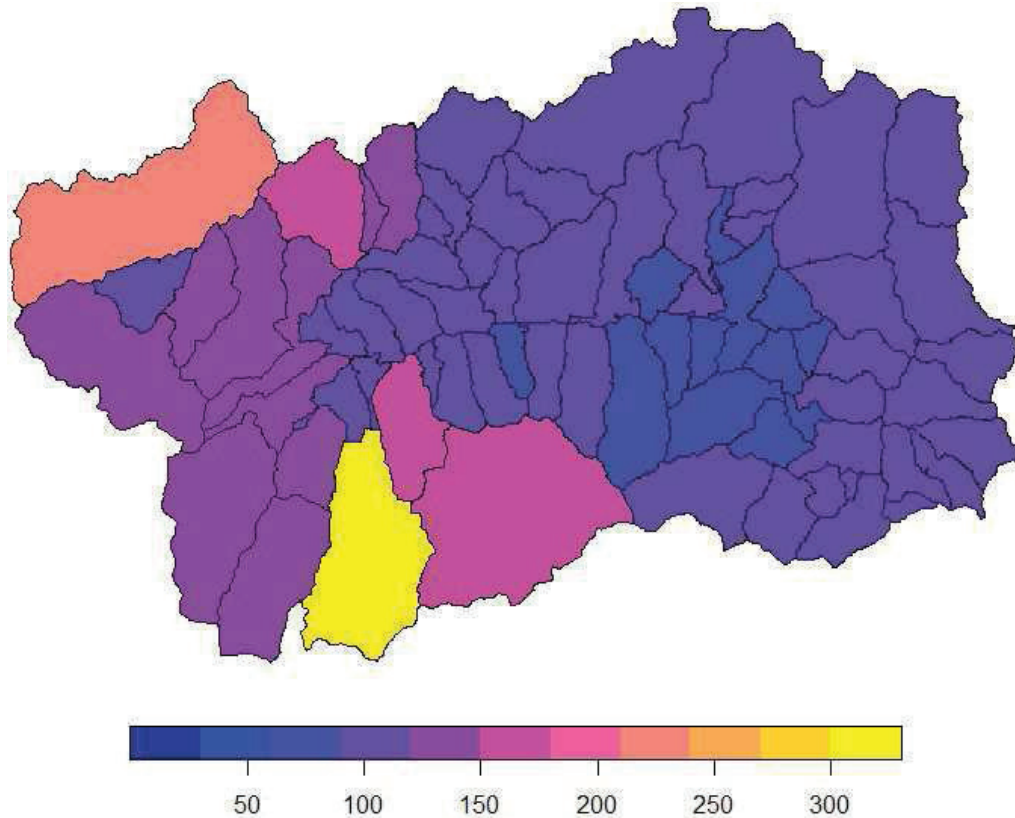


Figura 10 Medie comunali (MA_PA) da modello con ponderazione sull'area delle concentrazioni di radon (Bq/m3).

5.2. Modello con ponderazione sull'edificato comunale

Un ulteriore affinamento della mappatura è stato effettuato considerando per il calcolo della media comunale la sola area occupata dagli edifici e non tutta quella comunale, in modo da non far pesare nel calcolo zone in cui non sono presenti fabbricati o addirittura zone non edificabili. Il calcolo è stato condotto con le stesse modalità del paragrafo precedente, dove AL_k e AC_j , rispettivamente l'area della k -esima area radio-geo-litologica e l'area totale del j -esimo comune, sono riferite solo alla parte di territorio edificata. Sono stati aggiunti quindi i seguenti indicatori al set del paragrafo precedente relativi ad ogni comune:

- MA_PE : Media aritmetica da modello ponderato sull'edificato;
- μ_PE : media dei logaritmi naturali delle concentrazioni da modello ponderato sull'edificato;

- σ_{PE} : deviazione standard dei logaritmi naturali delle concentrazioni da modello ponderato sull'edificato;
- MG_{PE} : Media geometrica da modello ponderato sull'edificato;
- DSG_{PE} : deviazione standard geometrica da modello ponderato sull'edificato.

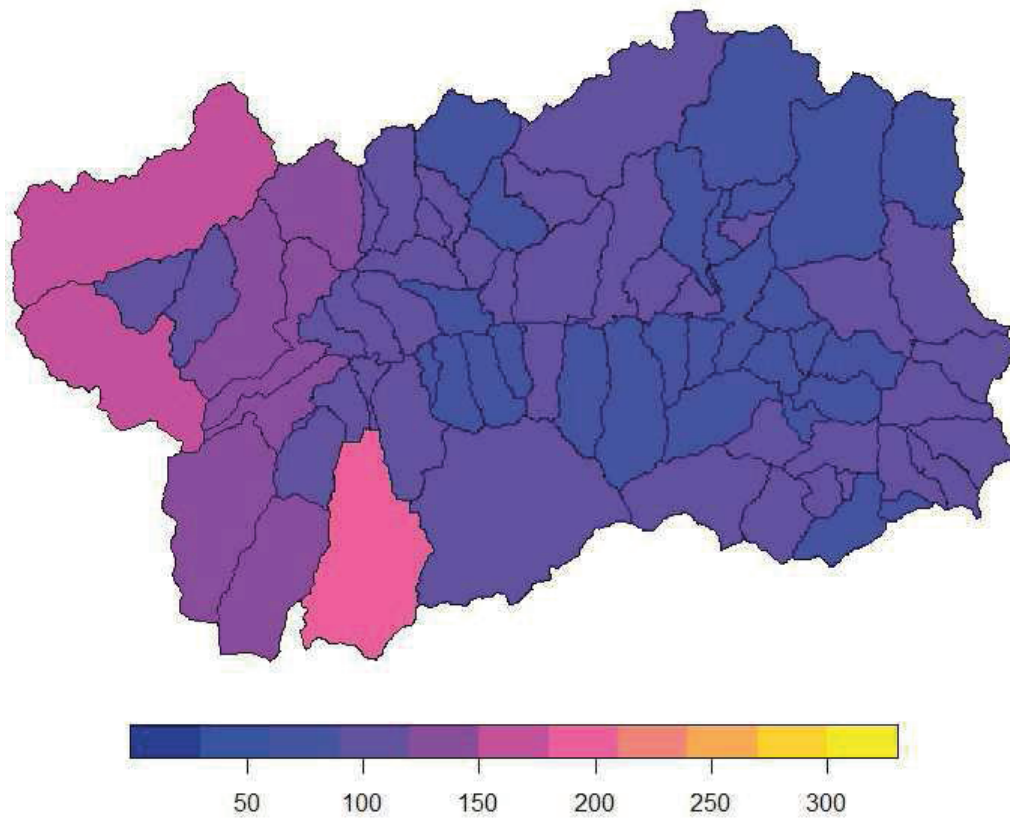


Figura 11 Medie comunali (MA_{PE}) da modello con ponderazione sull'edificato delle concentrazioni di radon (Bq/m^3).

Nella tabella seguente sono riportati i valori degli indicatori.

<i>CODICE ISTAT</i>	<i>COMUNE</i>	<i>POPOLAZIONE</i>	<i>NUMERO MISURE</i>	<i>MA_S (Bq/m³)</i>	<i>MA_PA (Bq/m³)</i>	<i>MA_PE (Bq/m³)</i>	<i>μ_S</i>	<i>μ_PA</i>	<i>μ_PE</i>	<i>σ_S</i>	<i>σ_PA</i>	<i>σ_PE</i>	<i>MG_S (Bq/m²)</i>	<i>MG_PA (Bq/m²)</i>	<i>MG_PE (Bq/m²)</i>	<i>DSG_S (Bq/m³)</i>	<i>DSG_PA (Bq/m³)</i>	<i>DSG_PE (Bq/m³)</i>
1	ALLEIN	211	8	107	95	96	4.61	4.25	4.26	0.39	0.78	0.78	100	70	71	1.48	2.18	2.18
2	ANTEY-SAINT-ANDRE'	540	2		82	84		4.11	4.14		0.77	0.75		61	63		2.17	2.12
3	AOSTA	33186	77	61	90	88	3.88	4.22	4.21	0.62	0.75	0.73	48	68	67	1.85	2.11	2.08
4	ARNAD	1243	14	91	107	95	4.00	4.36	4.28	0.97	0.79	0.74	54	78	72	2.64	2.21	2.10
5	ARVIER	832	11	58	126	130	3.95	4.48	4.51	0.49	0.85	0.84	52	88	91	1.64	2.33	2.33
6	AVISE	300	11	159	145	130	4.96	4.62	4.51	0.49	0.84	0.84	143	102	91	1.64	2.33	2.32
7	AYAS	1386	1		91	88		4.17	4.20		0.82	0.75		65	67		2.28	2.11
8	AYMAVILLES	2112	28	50	173	105	3.78	4.78	4.32	0.52	0.87	0.81	44	119	75	1.69	2.38	2.25
9	BARD	108	0		107	107		4.37	4.37		0.78	0.78		79	79		2.18	2.17
10	BIONAZ	219	12	199	111	111	5.18	4.40	4.40	0.51	0.79	0.79	179	81	81	1.67	2.19	2.19
11	BRISOGNE	948	0		95	93		4.25	4.26		0.77	0.74		70	71		2.16	2.09
12	BRUSSON	870	1		106	92		4.30	4.20		0.85	0.80		74	67		2.34	2.23
13	CHALLAND-SAINT-ANSELME	735	13	53	96	88	3.88	4.25	4.19	0.43	0.79	0.76	48	70	66	1.54	2.21	2.14
14	CHALLAND-SAINT-VICTOR	546	0		101	89		4.30	4.19		0.80	0.77		73	66		2.22	2.16
15	CHAMBAVE	886	13	49	82	88	3.72	4.11	4.19	0.61	0.78	0.75	41	61	66	1.85	2.19	2.13
16	CHAMOIS	109	0		93	88		4.20	4.19		0.81	0.76		67	66		2.25	2.13
17	CHAMPDEPRAZ	717	0		78	82		4.05	4.14		0.79	0.73		57	63		2.19	2.07
18	CHAMPORCHER	373	11	47	91	94	3.73	4.16	4.23	0.49	0.83	0.79	42	64	69	1.64	2.29	2.21
19	CHARVENSOD	2360	2		96	88		4.26	4.21		0.79	0.74		71	67		2.19	2.09
20	CHATILLON	4390	21	74	84	85	4.19	4.12	4.16	0.46	0.79	0.75	66	62	64	1.58	2.21	2.12
21	COGNE	1321	2		153	106		4.55	4.29		0.98	0.86		94	73		2.67	2.37
22	COURMAYEUR	2660	32	258	230	162	5.04	5.09	4.80	1.00	0.83	0.76	155	163	121	2.71	2.29	2.14
23	DONNAS	2374	29	44	107	84	3.61	4.37	4.19	0.57	0.77	0.70	37	79	66	1.77	2.17	2.01
24	DOUES	502	1		97	95		4.26	4.27		0.80	0.75		71	71		2.23	2.12
25	EMARESE	220	0		78	75		4.04	4.01		0.79	0.79		57	55		2.20	2.21
26	ETROUBLES	472	11	89	126	94	4.38	4.49	4.26	0.46	0.83	0.75	80	89	71	1.59	2.28	2.12
27	FENIS	1780	18	98	87	79	4.49	4.15	4.12	0.45	0.80	0.70	89	63	62	1.56	2.23	2.01

<i>CODICE ISTAT</i>	<i>COMUNE</i>	<i>POPOLAZIONE</i>	<i>NUMERO MISURE</i>	<i>MA_S (Bq/m³)</i>	<i>MA_PA (Bq/m³)</i>	<i>MA_PE (Bq/m³)</i>	μ_S	μ_{PA}	μ_{PE}	σ_S	σ_{PA}	σ_{PE}	<i>MG_S (Bq/m²)</i>	<i>MG_PA (Bq/m²)</i>	<i>MG_PE (Bq/m²)</i>	<i>DSG_S (Bq/m³)</i>	<i>DSG_PA (Bq/m²)</i>	<i>DSG_PE (Bq/m³)</i>
28	FONTAINEMORE	425	9	103	110	110	4.33	4.39	4.39	0.86	0.78	0.78	76	81	81	2.37	2.19	2.19
29	GABY	424	10	90	110	108	4.34	4.39	4.38	0.60	0.78	0.78	77	81	80	1.83	2.19	2.18
30	GIGNOD	1696	16	101	103	93	4.39	4.33	4.25	0.70	0.78	0.75	81	76	70	2.00	2.19	2.11
31	GRESSAN	3404	29	102	94	87	4.30	4.23	4.20	0.76	0.79	0.73	73	69	67	2.13	2.21	2.08
32	GRESSONEY-LA-TRINITE'	330	10	183	103	82	4.93	4.31	4.10	0.71	0.80	0.78	139	75	60	2.03	2.23	2.18
33	GRESSONEY-SAINT-JEAN	794	19	97	108	100	4.30	4.37	4.29	0.80	0.79	0.80	73	79	73	2.22	2.21	2.23
34	HONE	1147	0		107	100		4.37	4.32		0.77	0.76		79	75		2.17	2.13
35	INTROD	640	0		112	113		4.37	4.41		0.83	0.79		79	82		2.30	2.21
36	ISSIME	378	10	133	110	101	4.67	4.39	4.32	0.74	0.78	0.76	107	81	76	2.10	2.19	2.13
37	ISSOGNE	1315	15	71	89	96	4.11	4.16	4.24	0.56	0.80	0.81	61	64	69	1.76	2.23	2.24
38	JOVENCAN	715	10	69	98	89	4.07	4.25	4.21	0.58	0.83	0.75	58	70	67	1.78	2.29	2.11
39	LA MAGDELEINE	109	0		96	90		4.25	4.22		0.80	0.76		70	68		2.22	2.13
40	LA SALLE	2025	24	203	143	142	5.01	4.64	4.60	0.76	0.81	0.84	149	103	100	2.15	2.25	2.31
41	LA THUILE	812	12	84	135	154	4.18	4.59	4.69	0.74	0.80	0.83	65	98	109	2.09	2.22	2.29
42	LILLIANES	432	13	116	110	107	4.37	4.39	4.37	0.92	0.78	0.77	79	81	79	2.51	2.19	2.17
43	MONTJOVET	17559	22	68	80	84	4.13	4.08	4.14	0.42	0.77	0.77	62	59	63	1.53	2.17	2.15
44	MORGEX	2046	21	91	120	94	4.31	4.52	4.29	0.63	0.73	0.70	74	92	73	1.87	2.08	2.02
45	NUS	2993	0		97	90		4.27	4.20		0.79	0.78		71	67		2.19	2.18
46	OLLOMONT	158	0		107	87		4.32	4.16		0.85	0.77		75	64		2.33	2.17
47	OYACE	208	13	156	110	108	4.90	4.40	4.38	0.63	0.79	0.78	134	81	80	1.88	2.19	2.18
48	PERLOZ	459	12	64	110	108	4.02	4.39	4.38	0.58	0.78	0.78	56	81	80	1.79	2.19	2.18
49	POLLEIN	1516	0		85	78		4.16	4.13		0.76	0.68		64	62		2.14	1.97
50	PONTBOSET	170	10	54	110	110	3.41	4.38	4.38	1.02	0.80	0.80	30	80	80	2.79	2.23	2.22
51	PONTEY	795	0		79	82		4.07	4.17		0.77	0.70		58	65		2.17	2.02
52	PONT-SAINT-MARTIN	3545	0		100	86		4.32	4.20		0.75	0.71		75	67		2.13	2.02
53	PRE'-SAINT-DIDIER	979	13	96	94	93	4.41	4.37	4.36	0.61	0.58	0.58	83	79	78	1.84	1.79	1.79
54	QUART	4084	0		104	96		4.34	4.27		0.78	0.76		77	72		2.18	2.14
55	RHEMES-NOTRE-DAME	81	11	214	132	139	5.06	4.52	4.58	0.84	0.85	0.84	158	92	98	2.31	2.33	2.32

<i>CODICE ISTAT</i>	<i>COMUNE</i>	<i>POPOLAZIONE</i>	<i>NUMERO MISURE</i>	<i>MA_S (Bq/m³)</i>	<i>MA_PA (Bq/m³)</i>	<i>MA_PE (Bq/m³)</i>	μ_S	μ_{PA}	μ_{PE}	σ_S	σ_{PA}	σ_{PE}	<i>MG_S (Bq/m²)</i>	<i>MG_PA (Bq/m²)</i>	<i>MG_PE (Bq/m²)</i>	<i>DSG_S (Bq/m³)</i>	<i>DSG_PA (Bq/m²)</i>	<i>DSG_PE (Bq/m³)</i>
56	RHEMES-SAINT-GEORGES	166	10	89	126	107	4.32	4.49	4.37	0.62	0.83	0.78	76	89	79	1.86	2.30	2.19
57	ROISAN	1001	13	116	102	98	4.32	4.33	4.30	0.93	0.77	0.76	75	76	74	2.53	2.16	2.14
58	SAINT-CHRISTOPHE	3482	42	91	104	100	4.37	4.35	4.32	0.51	0.77	0.75	79	78	75	1.67	2.16	2.13
59	SAINT-DENIS	370	0		94	94		4.20	4.22		0.83	0.81		66	68		2.30	2.25
60	SAINT-MARCEL	1306	14	97	90	84	4.53	4.18	4.17	0.29	0.80	0.72	93	66	65	1.34	2.22	2.05
61	SAINT-NICOLAS	320	1		113	108		4.37	4.32		0.85	0.85		79	75		2.33	2.34
62	SAINT-OYEN	198	15	193	130	104	4.96	4.53	4.35	0.80	0.83	0.77	143	93	78	2.22	2.28	2.16
63	SAINT-PIERRE	3239	0		105	97		4.30	4.24		0.84	0.82		74	70		2.31	2.26
64	SAINT-RHEMY	330	12	168	166	149	4.56	4.79	4.64	1.06	0.80	0.85	96	120	104	2.89	2.23	2.35
65	SAINT-VINCENT	4458	2		83	86		4.12	4.16		0.77	0.76		61	64		2.16	2.14
66	SARRE	4746	47	113	100	91	4.44	4.27	4.21	0.74	0.82	0.77	85	72	68	2.10	2.26	2.15
67	TORGNON	555	0		95	89		4.24	4.20		0.79	0.76		70	67		2.20	2.14
68	VALGRISENCE	192	12	73	128	139	4.13	4.49	4.58	0.58	0.85	0.84	62	89	98	1.79	2.34	2.32
69	VALPELLINE	591	13	119	108	90	4.33	4.38	4.23	0.93	0.78	0.72	76	80	69	2.53	2.18	2.06
70	VALSAVARENCE	166	11	282	321	207	5.06	5.01	4.72	1.21	1.23	1.11	157	150	112	3.34	3.43	3.03
71	VALTOURNENCHE	2246	2		92	88		4.21	4.19		0.79	0.76		67	66		2.21	2.13
72	VERRAYES	1288	0		90	91		4.21	4.23		0.76	0.75		67	69		2.15	2.12
73	VERRES	2575	1		85	78		4.15	4.08		0.77	0.75		63	59		2.15	2.12
74	VILLENEUVE	1269	8	172	105	98	4.98	4.31	4.24	0.55	0.83	0.83	146	74	70	1.74	2.29	2.30

Tabella 4 Indicatori statistici calcolati a livello comunale

5.3. Analisi dati

Nell'analisi dei dati propedeutica alla definizione delle aree prioritarie, occorre tenere in considerazione il contesto in cui si sono effettuate le misure di concentrazione di attività di radon e i punti di forza e debolezza del modello.

Le misure sono state effettuate nel corso di 25-30 anni, durante i quali le abitazioni possono essere state oggetto di ristrutturazioni più o meno invasive e con tecniche costruttive sempre più moderne, soprattutto per quello che riguarda l'efficientamento energetico. La posa di un cappotto termico od il cambio dei serramenti può andare ad incidere notevolmente sulle dinamiche di ingresso e accumulo del radon, in alcuni casi favorendo l'aumento delle concentrazioni indoor. Inoltre, malgrado gli sforzi effettuati, non si può essere certi che il numero di misure e la loro distribuzione sui territori comunali sia uniforme. In particolare, è possibile che le misure si concentrino su una specifica *urgl* e non siano rappresentative di tutto il territorio comunale. Anche la normalizzazione delle misure al piano terra introduce un'ulteriore fonte di incertezza: i coefficienti utilizzati (Tabella 2) sono stati ottenuti a partire dalle medie delle misure disponibili e quindi affetti da una certa variabilità. Dall'altra parte, benché il modello (sia con ponderazione sull'area comunale, sia con ponderazione sull'edificato comunale) fornisca informazioni su tutta la regione, soffre anch'esso, in alcuni casi, di una bassa statistica di base. Per il calcolo degli indicatori di alcune *urgl*, infatti, sono state utilizzate poche misure che, anche se suffragate dalle analisi in spettrometria gamma del tenore di U^{238} nelle rocce e per questo non escluse dal calcolo, non possono essere ritenute statisticamente robuste. Inoltre, per quanto riguarda il modello ponderato sull'edificato, occorre tenere presente che i limiti tra le *urgl* sono individuati sulla base della cartografia geologica regionale disponibile, il cui dettaglio non consente una precisione metrica, in particolare nelle aree antropizzate. Per questa ragione l'attribuzione a una specifica *urgl* di un edificio situato in posizione prossima a un limite geologico può risultare incerta.

Nelle figure seguenti sono mostrati alcuni grafici di sintesi relativi alle medie aritmetiche delle concentrazioni di attività di radon sperimentali e quelle ottenute con i modelli.

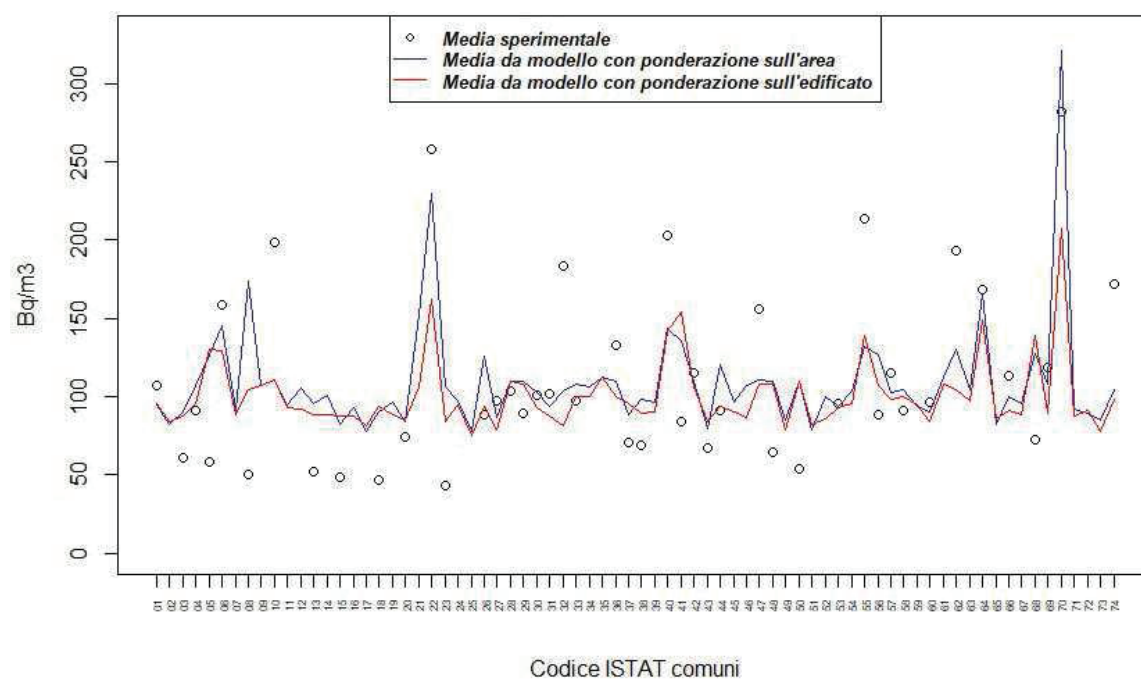


Figura 12 Confronto tra le concentrazioni medie comunali sperimentali e le medie calcolate con il modello con ponderazione dell'area comunale e quello con ponderazione solo sull'edificato.

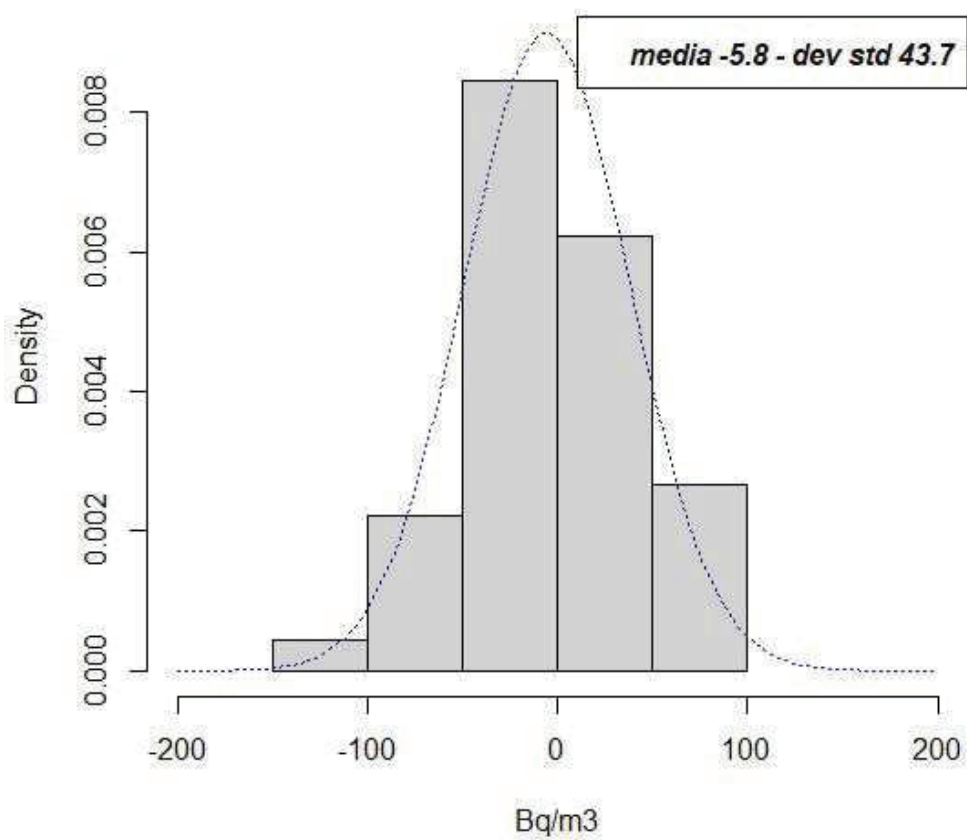


Figura 13 Scarto tra medie comunali sperimentali e medie calcolate con il modello che pondera sull'area delle urlg che insistono sul comune.

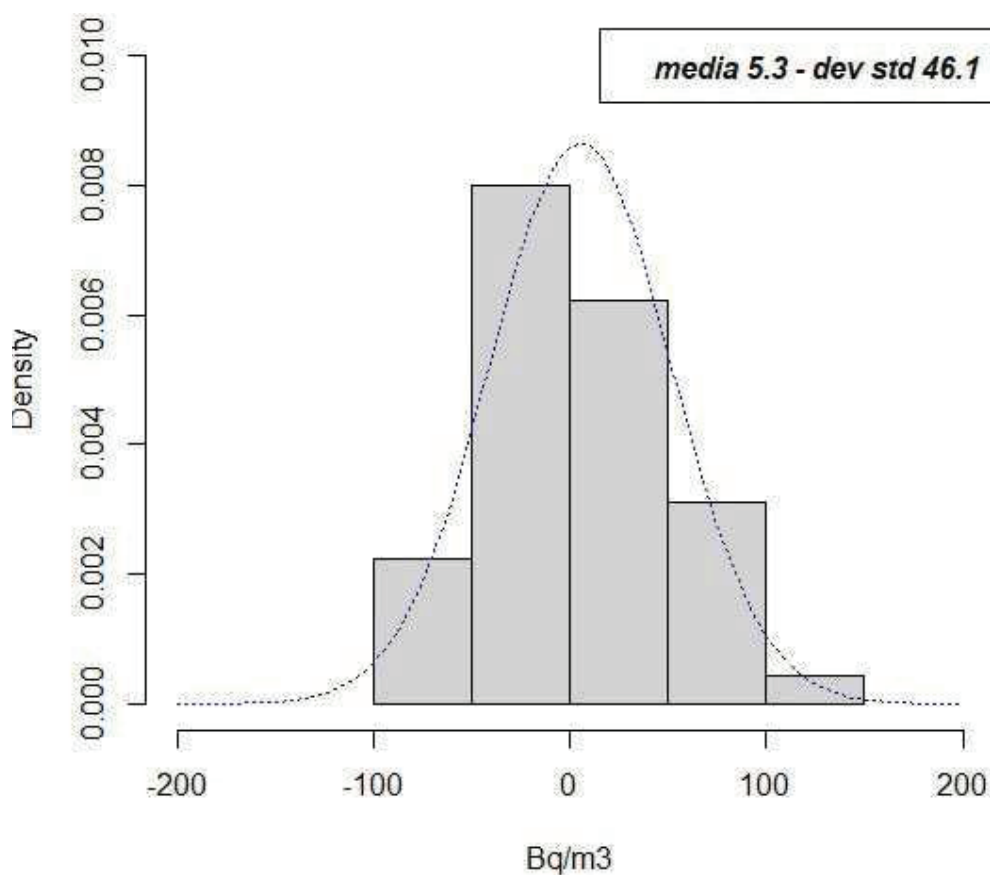


Figura 14 Scarto tra medie comunali sperimentali e medie calcolate con il modello che pondera sull'edificato delle urlg che insistono sul comune.

Come si evince dai grafici, la media delle differenze tra le misure sperimentali ed i modelli è inferiore ai 10 Bq/m³ per entrambe le ponderazioni e la deviazione standard si attesta su valori ti poco inferiori ai 50 Bq/m³. Questo significa che mediamente i modelli confermano i dati sperimentali, ma che in alcuni casi si possono avere differenze anche significative (circa 100 Bq/m³), come mostrato in Figura 12. Il motivo sta nel fatto che in generale i modelli per loro natura smorzano i valori estremi.

6. Definizione delle aree prioritarie

Il PNAR prevede diverse azioni atte a definire le aree prioritarie:

- l'azione 1.1 ha l'obiettivo di stabilire le indicazioni operative per la realizzazione di indagini territoriali sui livelli di concentrazione di radon negli edifici, per l'identificazione delle aree prioritarie e per l'individuazione degli edifici con concentrazioni superiori al livello di riferimento;

- l'azione 1.2 ha l'obiettivo di definire criteri e indicatori di natura geologica per caratterizzare il territorio a supporto delle strategie per ridurre i rischi a lungo termine dovuti all'esposizione al radon;
- l'azione 1.7 ha l'obiettivo di definire i criteri di individuazione delle aree prioritarie successivi al criterio riportato all'articolo 11, comma 3, del decreto legislativo 31 luglio 2020, n.101. Detto criterio consiste nel ritenere prioritaria quell'area ove la stima della percentuale di edifici che supera il livello di **300 Bq/m³** è pari o superiore al **15%**. Tale percentuale di edifici si riferisce a misure effettuate o normalizzate al piano terra. Il PNAR stabilisce quindi che dall'entrata in vigore rimane valido il criterio riportato dal decreto legislativo 31 luglio 2020 n.101 e che a partire dal VI anno siano incluse tra le aree prioritarie quelle zone in cui si stima che il superamento dei livelli di riferimento avvenga in un numero di edifici superiore al **10%**.

Il PNAR prevede anche la possibilità di una revisione dei criteri di individuazione delle aree prioritarie e dei livelli di riferimento.

L'approccio misto misure-analisi geolitologica, seguito nel presente studio, è sostanzialmente lo stesso previsto dal PNAR, anche se nel Decreto non ne sono state dettagliate le metodologie, soprattutto matematiche.

Il calcolo dell'indicatore che permette la determinazione delle aree prioritarie è effettuato considerando come unità territoriale il comune. Questa assunzione offre un vantaggio dal punto di vista amministrativo, con particolare riferimento alle iniziative che possono essere attuate come supporto alle misure, supporto agli interventi di risanamento, nonché ulteriori indagini di approfondimento. Matematicamente, con le assunzioni fatte sulla distribuzione delle concentrazioni di radon al piano terra, il calcolo dell'indicatore (probabilità $P_{>LR}$ che, nella generica area comunale i , la concentrazione di attività del radon superi il Livello di Riferimento LR) equivale a valutare il seguente integrale:

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

in cui $LR = 300 \text{ Bq/m}^3$ e la funzione $f_i(c, \mu_i, \sigma_i)$ è la distribuzione delle concentrazioni di radon al piano terra per l' i -esimo comune. Il valore critico per $P_{>LR}$, cioè la probabilità di superare il Livello di Riferimento stabilito dalla legge, ovvero $P_{>300}$, è 15% (10% nella seconda fase del PNAR). I

parametri μ_i, σ_i che caratterizzano la distribuzione sono mostrati nella Tabella 4 e possono essere quelli sperimentali se presenti (_S), quelli ricavati dal modello con ponderazione sull'area (_PA) e quelli relativi al modello con ponderazione sull'edificato (_PE). Il calcolo è stato effettuato considerando i dati sperimentali per i comuni con almeno 8 misure (considerato come limite minimo a livello statistico) e il modello con la ponderazione sull'edificato per gli altri. Un parametro fondamentale per la descrizione della distribuzione log-normale ed il successivo calcolo dell'indicatore $P_{>30}$ è rappresentato dalla σ_i o dalla corrispondente Deviazione Standard Geometrica (*DSG*). Nel caso di poche misure sperimentali la valutazione della *DSG* è affetta da una grande incertezza e quindi si è scelto di valutare una **DSG asintotica**, applicando un metodo proposto da Price (Price P.N., 1997), che osservò come le *DSG* sperimentalmente ottenute in una determinata area tendono ad un valore asintotico all'aumentare della popolosità del campione. Considerando le *DSG* comunali in funzione della numerosità del campione, si ottiene il grafico di Figura 15 in cui è presente anche il valore asintotico pari a 2.09. Nel campione statistico, è stato tolto il comune di Aosta, in quanto non rappresentativo della maggioranza degli altri comuni valdostani.

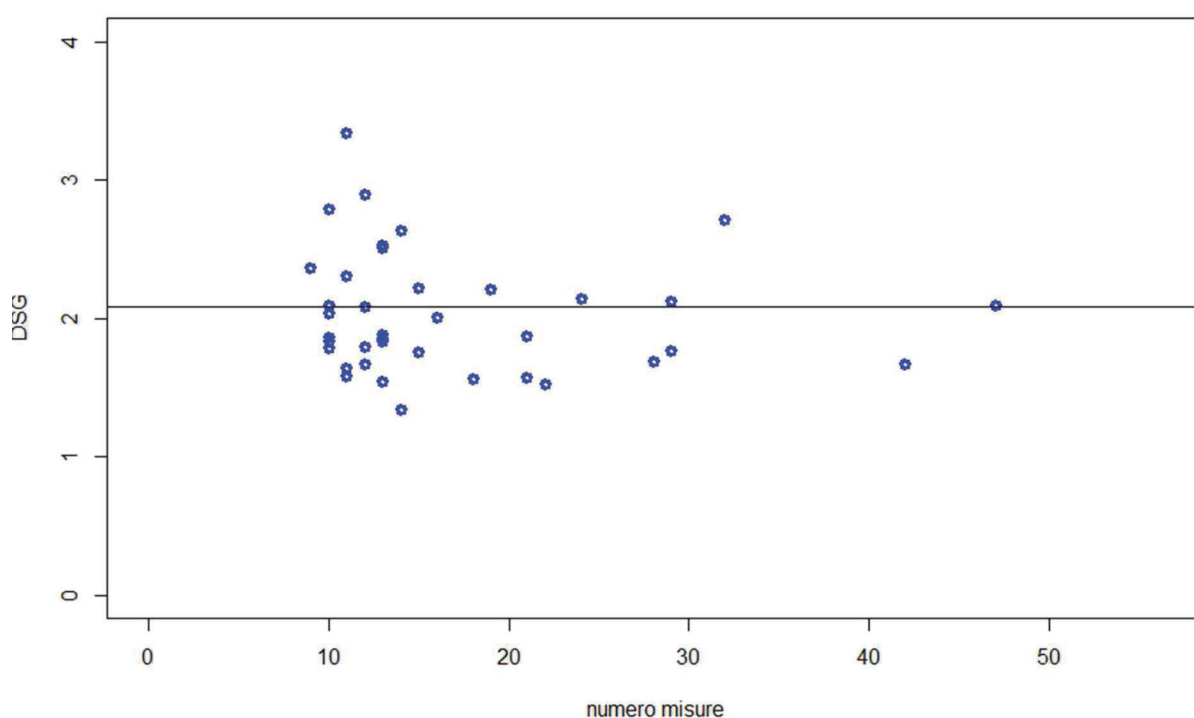


Figura 15 *DSG* sperimentali in funzione del numero di misure per ogni comune con più di 8 valori ad esclusione del comune di Aosta. È graficato anche il valore asintotico (2.09).

Nel calcolo dell'indicatore $P_{>300}$, si è scelto di considerare il massimo tra il valore della DSG calcolata per il comune oggetto del calcolo (σ_i) e la DSG asintotica ($\sigma_{asintotica}$). Questa è una scelta cautelativa e supportata dalle seguenti osservazioni:

- Nel caso $\sigma_i > \sigma_{asintotica}$ le misure sperimentali possono riflettere una situazione di maggiore variabilità rispetto al valore asintotico dovuta ad una reale complessità del territorio;
- Nel caso $\sigma_i < \sigma_{asintotica}$ è possibile che le misure non afferiscano alla totalità delle urgì, presentando quindi una variabilità inferiore a quella asintotica che però può non essere realistica.

Nella Figura 16 sono presentati in rosso i 9 comuni in cui risulta $P_{>30} > 15\%$ e che quindi costituiscono le aree prioritarie per la Regione autonoma Valle d'Aosta (AVISE, BIONAZ, COURMAYEUR, GRESSONEY-LA-TRINITE', LA SALLE, RHEMES-NOTRE-DAME, SAINT-OYEN, VALSAVARENCHÉ e VILLENEUVE) ed in giallo quelli in cui $P_{>300} > 10\%$ che rappresentano i comuni che nella seconda fase del PNAR entreranno a far parte delle aree prioritarie (OYACE e SAINT-RHEMY-EN-BOSSES).

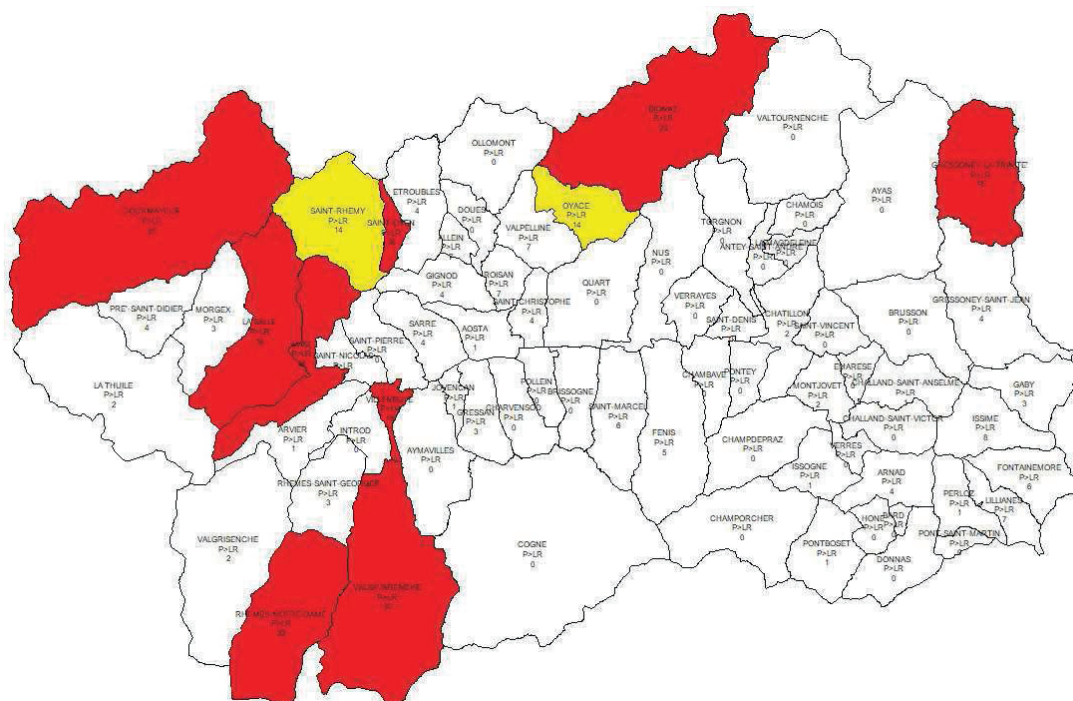


Figura 16 Mappa regionale con evidenziati in rosso i comuni con $P_{>30} > 15\%$ e in giallo quello con $P_{>300} > 10\%$

7. Bibliografia

ARPA Piemonte. (s.d.). *La mappatura del radon in Piemonte*.

Chiaberto E., Falletti P., Magnoni M. (2022). Radon mapping in Piedmont (North-West Italy): a radio-geo-lithological approach. *Journal of the European Radon Association*. Tratto da <http://dx.doi.org/10.35815/radon.v3.7719>

Chiaberto, Salvi et al. (2021). Verso un'armonizzazione delle mappe radon nazionale. Bollettino AIRP - Anno XLVIII | Volume 179 | Numero 1-6 | Dicembre 2021.

D.Lgs. 31 luglio 2020, n. 101, in Gazzetta Ufficiale n. 198 del 23 agosto 2020..

DPCM 11 gennaio 2024, Adozione del Piano nazionale d'azione per il radon 2023-2032.

Falletti et al. (2016). Radionuclidi naturali nelle rocce del Piemonte: verso la definizione del potenziale geogenico radon. *VI Convegno ARPA-AIRP Agenti fisici Alessandria*.

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

ISS. (2019). <http://radon.iss.it/category/effetti-sulla-salute/>. Tratto da <http://radon.iss.it/>.

Price P.N. (1997). Predictions and maps of country mean indoor radon concentrations in the mid-atlantic states. *Health Phys*, 72(6):893-906.

Hanno collaborato alla redazione della presente proposta:

Per la Sezione Agenti fisici ed Energia: Filippo Berlier, Marisa Ducourtil e Massimo Faure Ragani.



L'incaricato di funzione dell'area operativa AGF

Filippo Berlier



Filippo Berlier
30.05.2025 08:22:08
GMT+02:00

Visto, La responsabile della sezione AGFE

Valeria Bottura



Valeria Bottura
30.05.2025 08:15:30
GMT+01:00