
La mappatura del radon in Piemonte

“Il radon: un progetto per il Piemonte”

Relazione tecnica a conclusione
dell'attività finanziata dalla
Regione Piemonte
(DGR n°48-15256 del 30 marzo 2005)

ARPA Piemonte – Centro Regionale Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti
Via Jervis, 30 – 10015 Ivrea (TO)
Responsabile: Giovanni d'Amore

Responsabile del progetto: Mauro Magnoni^(*)

Gruppo di Ricerca:

Franco Righino^(*)

Mauro Magnoni^(*)

Enrico Chiaberto^(*)

Salvatore Procopio^(*)

Elena Serena^(*)

Anna Prandstatter^(*)

Francesco Martire^(**)

Paolo Tonanzi^(***)

Alessandra Troglia^(***)

Marina Zerbato^(****)

^(*) Centro Regionale Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti – SS21.01 Radiazioni Ionizzanti, Reti di monitoraggio, sviluppo e ricerca

^(**) Centro Regionale Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti – SC 21 Staff

^(***) Area delle attività regionali per l'indirizzo e il coordinamento in materia di prevenzione dei rischi naturali – SC04

^(****) Prevenzione Rischio Geologico Cuneo – SC15

PRESENTAZIONE

Con questa pubblicazione, ARPA Piemonte presenta una prima caratterizzazione del territorio piemontese dal punto di vista della rilevanza del “rischio radon” nella nostra Regione.

Questo studio trae la sua origine da un preciso adempimento istituzionale che ARPA Piemonte ha svolto per la Regione, sulla base del DGR n°48 del 30 marzo 2005, con cui essa aveva finanziato appunto il progetto della “mappatura del radon in Piemonte”, ma è anche un importante punto d’arrivo per la notevole attività di studio e ricerca che ARPA, da ormai più di un decennio, ha svolto nel territorio piemontese autonomamente o in collaborazione con altri soggetti (ISPRA - Istituto Superiore per le Ricerche e la Protezione Ambientale, ISS - Istituto Superiore di Sanità).

Con questo lavoro si fornisce, anzitutto alla Regione Piemonte e agli Enti Locali un importante strumento conoscitivo ambientale. Alle singole Regioni, in particolare, il legislatore nazionale aveva infatti assegnato il compito di individuare le “aree ad alta probabilità di elevate concentrazioni di radon” (art. 10-sexies del Decreto Legislativo n°241/2000) tenendo conto, per quanto attiene agli aspetti più propriamente tecnici, di criteri definiti a livello nazionale.

Tuttavia, anche prescindendo dagli aspetti legislativi e dalle eventuali ricadute normative che potranno derivare, questo lavoro è, crediamo, di per sé stesso un importante contributo alla conoscenza ambientale della nostra Regione su un particolare aspetto, quello del rischio radiologico, che sovente è causa di notevoli preoccupazioni da parte della popolazione. Quello del radon, un gas radioattivo naturale presente in modo ubiquitario nella biosfera, è d’altra parte un tema che, per unanime giudizio delle principali organizzazioni scientifiche internazionali (OMS, UNSCEAR), non può più essere trascurato nelle nostre moderne società. I tempi e i metodi per affrontare questo e analoghi problemi sono senza dubbio un compito delle istituzioni e della politica, le quali tuttavia, per raggiungere i propri obiettivi in questi settori, non possono prescindere dalla conoscenza, il più possibile aggiornata e precisa dei dati scientifici.

Dal punto di vista tecnico, va infine detto che questo lavoro, pur essendo il frutto di molti anni di studi e di migliaia di misure, non può essere considerato l’atto conclusivo per quanto riguarda la mappatura territoriale del radon in Piemonte: la complessità geomorfologia e litologica del territorio regionale rendono infatti necessaria la prosecuzione dell’opera di monitoraggio in varie aree della Regione. Pertanto, con la progressiva disponibilità di nuovi dati vi saranno certamente in futuro degli aggiornamenti e degli affinamenti che potranno condurre a modifiche, anche non marginali dell’attuale quadro.

INDICE

1	INTRODUZIONE	7
1.1	Il radon come problema per la salute	7
1.2	Indagini sulla concentrazione di radon indoor in Italia e nel mondo	9
1.3	Il quadro legislativo nazionale ed europeo	11
1.4	La mappatura del radon in Piemonte: le ragioni di un progetto	12
2	STRUTTURA DEL PROGETTO	15
2.1	Strategia di campionamento	15
2.2	La costruzione del database radon di ARPA Piemonte	16
2.3	Il problema della selezione delle misure idonee	17
2.4	La scelta dell'unità territoriale di mappatura e il problema della rappresentatività	18
2.5	La rappresentazione cartografica	19
2.6	Aggiornamento continuo del database	19
3	COSTRUZIONE DELLA BASE DATI RADON PER IL PIEMONTE	21
3.1	Metodi di misura del radon impiegati	21
3.1.1	Il conteggio delle tracce e la determinazione della concentrazione di attività del gas radon	23
3.2	Campagne di misura che alimentano la base dati	24
3.3	Criteri e metodi di normalizzazione	36
3.4	Trasformazione della distribuzione di concentrazione radon ai piani terra alla distribuzione radon in Piemonte	42
4	DALLA DISTRIBUZIONE TERRITORIALE DELLE MISURE ALLA MAPPATURA	44
4.1	Rappresentazione cartografica dei dati normalizzati nelle unità territoriali di mappatura (Comuni)	44
4.2	Definizione indicatori per le unità territoriali di mappatura: criteri e metodi di calcolo	45
4.2.1	Aspetti generali	45
4.2.2	Scelta degli indicatori	47
4.3	Il problema della stima degli indicatori in unità territoriali prive di dati sperimentali: approccio geostatistico e modello di correlazione geolitologica	48
4.4	Litologia e presenza di radon: studi di correlazione e indagini sperimentali	53
4.5	Calcolo dei parametri delle distribuzioni stimate per via litologica	60
4.6	La mappatura del radon in Piemonte: una prima rappresentazione cartografica	62
4.7	Stima dell'esposizione media al radon della popolazione	67
5	MAPPATURA E RISCHIO RADON	69
5.1	Significato della mappatura e il problema della definizione delle "aree a rischio radon" ex Decreto Legislativo 241/2000	69
5.2	Le "aree a rischio radon": aspetti critici e criteri plausibili per la loro definizione	70
5.3	Considerazioni conclusive: mappatura, esposizione della popolazione e prevenzione del rischio radon	73
	ALLEGATI	74
	ALLEGATO A – Valori sperimentali normalizzati al piano terra (Bq/m^3)	75
	ALLEGATO B – Valori medi comunali al piano terra (Bq/m^3)	76
	ALLEGATO C – Rappresentazione cartografica di $P\%_{400}$, probabilità di superamento al piano terra di $400 Bq/m^3$	77
	ALLEGATO D – Rappresentazione cartografica delle medie comunali complessive	78
	ALLEGATO E – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Alessandria	79
	ALLEGATO F – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Asti	84
	ALLEGATO G – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Biella	88
	ALLEGATO H – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Cuneo	91
	ALLEGATO I – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Novara	98
	ALLEGATO L – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Torino	101
	ALLEGATO M – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Verbania	109
	ALLEGATO N – Rappresentazione cartografica delle medie comunali al piano terra e tabella dei dati medi comunali per la provincia di Vercelli	112

RINGRAZIAMENTI	116
BIBLIOGRAFIA	117

Indice delle figure

Figura 1.1-1: catena di decadimento della famiglia radioattiva dell' ^{238}U , con evidenziata la posizione del ^{222}Rn .	8
Figura 1.4-1: istogramma della distribuzione delle concentrazioni di radon in Piemonte (Campagna Nazionale 1990-1991)	12
Figura 2.6-1: schema generico dei processi seguiti per giungere all'elaborazione della mappatura del radon in Piemonte e al suo progressivo aggiornamento	20
Figura 3.1-1: tracce del radon e dei figli a vita breve nei rivelatori LR115 e CR39	22
Figura 3.1-2: dosimetro ANPA/ARPA con il rivelatore LR115	22
Figura 3.1-3: dosimetro ANPA/ARPA con il rivelatore CR39	22
Figura 3.1-4: dosimetri con rivelatori LR115 e CR39 in configurazione di misura.....	23
Figura 3.3-1: composizione percentuale del campione di misure Rn suddivisa per piano abitativo.....	36
Figura 3.3-2: composizione del campione di misure Rn suddivisa per tipologia edificio.....	36
Figura 3.3-3: diagramma di flusso dei dati.....	37
Figura 3.3-4: distribuzioni radon al variare del piano	38
Figura 3.3-5: normalizzazione al piano terra dei dati della Campagna Nazionale	40
Figura 3.3-6: normalizzazione al piano terra delle misure nelle scuole piemontesi.....	40
Figura 3.3-7: normalizzazione per tipologia abitativa.....	41
Figura 3.3-1: istogramma della distribuzione dei piani abitati in piemonte	43
Figura 4.1-1: istogramma della distribuzione della numerosità del campione nei 353 Comuni del Piemonte per i quali si hanno a disposizione dati radon validati	45
Figura 4.3-1: carta geologica della Regione Piemonte, scala 1:100000.....	50
Figura 4.3-2: classificazioni litologiche della carta geologica 1:100000 della Regione Piemonte	51
Figura 4.3-3: porzione generica di una mappa nella quale sono evidenziate diverse litologie e la localizzazione dei punti di misura sperimentali (CRn)	52
Figura 4.3-4: porzione generica di mappa nella quale è evidenziata l'area di un Comune AC_j (delimitata da un cerchio) nel quale sono presenti diverse tipologie litologiche.....	52
Figura 4.4-1: correlazione tra i valori sperimentali M_j (Bq/m^3) di un generico Comune j e le corrispondenti stime litologiche (vedi equazione 4.10).....	53
Figura 4.4-2: correlazione tra i valori sperimentali M_j (Bq/m^3) di un generico Comune j e le corrispondenti stime litologiche basate sulla nuova classificazione radon-specifica di Tabella 4.4-2	60
Figura 4.5-1: rappresentazione grafica della DSG calcolata a partire da tutti i dati sperimentali disponibili, in funzione della numerosità del campione comunale: all'aumentare della popolosità del campione il valore tende a stabilizzarsi	61
Figura 4.5-2: rappresentazione grafica della DSG calcolata a partire da dati comunali aventi numerosità > 10 : l'effetto di stabilizzazione è ancora più evidente e scompare quasi completamente la debole dipendenza lineare.....	62
Figura 4.6-1: rappresentazione grafica della funzione $P_{\%400}(\mu, \sigma)$ per valori di μ e σ variabili entro gli intervalli di variabilità ricavati sperimentalmente o tramite gli studi di correlazione litologica	64
Figura 4.6-2: distribuzione percentuale dei valori medi di concentrazione radon al piano terra secondo le diverse classi di concentrazione (vedi legenda).....	65
Figura 4.6-3: distribuzione percentuale dei valori di $P_{\%400}$ secondo le diverse classi di probabilità, specificate nella legenda	66
Figura 4.7-1: distribuzione lognormale del Piemonte ottenuta dall'intera base dati confrontata con la distribuzione lognormale ottenuta durante la Campagna Nazionale	67
Figura 4.7-2: grafico della percentuale di popolazione piemontese in funzione della concentrazione media di radon residenziale	68

Indice delle tabelle

Tabella 3.2-1: numero di misure radon in Piemonte: monitoraggi, indagini e campagne di misure nelle abitazioni	24
Tabella 3.2-2: numero di misure del radon in Piemonte: monitoraggi, indagini e campagne di misura nelle scuole	25
Tabella 3.2-3: campagna Nazionale radon in Piemonte.....	26
Tabella 3.2-4: campagna radon in alcuni comuni del cuneese	27
Tabella 3.2-5: misure di radon in Valle Pellice (TO).....	27
Tabella 3.2-6: campagna radon in Canavese (TO).....	28
Tabella 3.2-7: campagna radon nel Verbano Cusio Ossola	29
Tabella 3.2-8: indagine radon nelle abitazioni del Novarese	30
Tabella 3.2-9: campagna di misura negli Istituti Scolastici nel Biellese.....	31
Tabella 3.2-10: campagna di misura nelle scuole dell' Astigiano.....	32
Tabella 3.2-11: campagna di misura nelle scuole del Novarese.....	33
Tabella 3.2-12: campagna di misura nelle scuole di Torino e Provincia	34
Tabella 3.2-13: monitoraggio scuole e classificazione radiologica delle litologie.....	35
Tabella 3.3-1: parametri della distribuzione ricavati dai dati della campagna nazionale.....	39
Tabella 4.4-1: contenuto di radioattività (serie dell' ²³⁸ U) in campioni di rocce rappresentative della geologia piemontese ricavato tramite misure di spettrometria γ con rivelatori HPGe: sono riportati i valori per il ²¹⁴ Pb e il ²¹⁴ Bi	54
Tabella 4.4-2: classificazione litologica originaria (litocave) nella prima colonna e classificazione radon-specifica; le classi raggruppate sono state evidenziate con diversi colori	57
Tabella 4.7-1: frazione delle abitazioni con concentrazione maggiore di 100 Bq/m ³ , 200 e 400 Bq/m ³	68

1 INTRODUZIONE

1.1 Il radon come problema per la salute

Il radon, è un gas nobile radioattivo di origine naturale, presente ubiquitariamente sulla Terra in concentrazioni variabili. Esso è originato dall'uranio, il ben noto elemento radioattivo, a sua volta assai diffuso in tutta la crosta terrestre. Benché l'emivita del radon (^{222}Rn) sia poco meno di 4 giorni, la sua continua produzione da parte dell'uranio, unitamente a particolari condizioni di scarsa ventilazione possono far sì che esso raggiunga, in alcuni luoghi chiusi (miniere, gallerie, seminterrati, ma anche semplici abitazioni), concentrazioni potenzialmente dannose per la salute umana.

Il radon, infatti, decadendo, genera a sua volta altri elementi radioattivi, detti "prodotti di decadimento del radon" (Figura 1.1-1) che, una volta inalati si attaccano alle pareti interne dell'apparato bronchiale e qui decadono emettendo radiazioni ionizzanti le quali producono un danno alle cellule bronco-polmonari che può evolversi in tumore. Sono dunque i prodotti di decadimento del radon i principali responsabili del rischio radiologico: tuttavia per brevità si parla, genericamente, di rischio radon^[1].

L'evidenza del rischio di tumore polmonare è ormai un fatto scientificamente assodato: l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro dell'OMS ha, infatti, da qualche tempo classificato il radon e i suoi prodotti di decadimento tra le sostanze cancerogene di gruppo 1^[2] e l'esposizione al radon è ormai riconosciuta, a livello scientifico, come una delle principali cause di tumore del polmone dopo il fumo di sigaretta^[3].

I principali studi inizialmente disponibili hanno riguardato esposizioni di tipo occupazionale (specie tra minatori), ma esistono ormai anche evidenze, derivate da studi sia internazionali che italiani^[4,5], sugli effetti sulla salute del radon determinati solo da esposizioni di tipo residenziale.

Permangono comunque a tutt'oggi grosse incertezze sulle stime quantitative del rischio. Allo stato attuale non esiste una soglia di sicurezza sotto alla quale è dimostrato che l'esposizione non produca effetti. Inoltre è dimostrato che l'interazione tra radon e fumo di sigaretta produce un aumento, con effetto di tipo moltiplicativo, del rischio di tumore al polmone. L'EPA (Agenzia Protezione Ambientale Americana) stima che la quota di tumori al polmone attribuibili all'esposizione al radon si aggiri intorno al 9 % del totale.

Per questi motivi, in molti Paesi industrializzati (Svezia, Gran Bretagna, Stati Uniti, ecc.), già da qualche tempo si è posto il problema di come affrontare questa fonte di rischio, varando da un lato norme e regolamenti, dall'altro favorendo il diffondersi di una cultura della prevenzione del rischio radon, attraverso una corretta informazione alla popolazione.

In Italia si stima che nell'1% delle case vi sia una concentrazione^[6] di radon superiore ai 400 Bq/m³^(*) e nel 4 % maggiore di 200 Bq/m³ e quindi, secondo analisi preliminari, si valuta un rischio sull'intera vita, per il tumore al polmone da attribuirsi al radon, dell'ordine dello 0,5 % e che il 5-15 % dei tumori polmonari che si verificano in Italia, ogni anno, siano da attribuirsi al radon.

* L'unità di misura della concentrazione del Radon in aria è il Becquerel al metro cubo (simbolo Bq/m³): il Becquerel è l'unità di misura della quantità di radioattività (attività) e corrisponde ad una disintegrazione al secondo

Studi epidemiologici più recenti^[7], di tipo cosiddetto *pooled*, cioè studi che rianalizzano, mettendoli insieme, dati provenienti da ricerche effettuate in tempi diversi e in diversi Paesi, aumentando in tal modo la potenza statistica, hanno confermato sostanzialmente queste stime e sembrano aver ulteriormente abbassato il livello dell'ipotetica soglia al di sotto della quale l'effetto nocivo del radon non si manifesterebbe: secondo questi studi, infatti, l'aumento dell'incidenza dei tumori polmonari è statisticamente significativo anche per concentrazioni di radon attorno ai 200 Bq/m³.

Un'altra importante conferma venuta da questi ultimi studi^[8] è stata la fortissima sinergia con il fumo: l'effetto dell'esposizione al radon per i fumatori è notevolmente amplificato rispetto ai non fumatori.

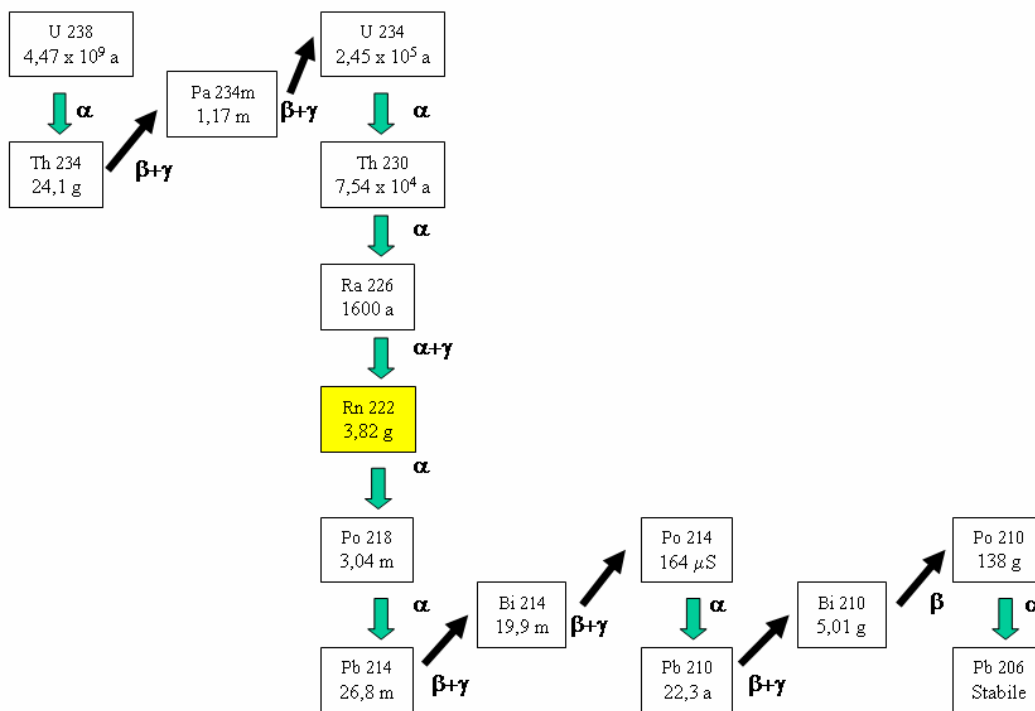


Figura 1.1-1: catena di decadimento della famiglia radioattiva dell'²³⁸U, con evidenziata la posizione del ²²²Rn

1.2 Indagini sulla concentrazione di radon indoor in Italia e nel mondo

Anche il nostro Paese ha partecipato attivamente alla fase di studio e ricerca, sin dalla fine degli anni settanta, con i primi studi pubblicati su misure di radon in ambienti residenziali e all'aperto.

Un impulso notevole alle attività di monitoraggio è però venuto agli inizi degli anni novanta quando è stata realizzata la Campagna Nazionale Radon, promossa da ANPA e Istituto Superiore di Sanità ed effettuata, sul territorio delle Regioni, dai laboratori di riferimento regionali (CRR), ora transitati alle Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale^[9,10].

La Campagna Nazionale (1989 – 1998), che è stato il primo esempio di studio sistematico del radon in Italia, ha fornito un quadro generale dell'esposizione media al radon e alla radioattività naturale della popolazione italiana^[11].

Per come venne strutturato il campionamento infatti, tale studio non è stato in grado di descrivere in dettaglio la situazione all'interno delle singole Regioni. Per questo motivo, i lavori di studio e di approfondimento non si sono arrestati, ma sono anzi proseguiti in forma più autonoma e meno coordinata, con l'intento di individuare e caratterizzare le aree con un'anomala presenza di radon^[12,13,14].

Molte delle indagini intraprese su scala locale si sono originate da iniziative autonome dei CRR e di altri laboratori pubblici (ex ASL, ora ARPA). Parecchi di questi lavori hanno fornito dati assai interessanti, anche se l'insieme di questi studi ha sofferto di scarsa sistematicità e organicità; in alcuni casi si sono privilegiate le scuole, in altri le abitazioni, in altri ancora sono stati compiuti estesi monitoraggi del radon disciolto nelle acque potabili e minerali. È però mancato, a tutti questi sforzi, un quadro unificante che consentisse di mettere insieme e sistematizzare tutte le informazioni raccolte.

Più recentemente, agli inizi del nuovo millennio, anche a seguito dell'emanazione di una specifica normativa che per la prima volta si occupava della radioattività naturale (il Decreto Legislativo n°241/2000), alcune Regioni hanno promosso delle attività di studio territoriale del radon, al fine di individuare eventuali zone maggiormente esposte a questo inquinante. Molti di questi lavori sono tuttora in corso.

In campo internazionale diversi paesi hanno già completato in modo approfondito l'opera di mappatura del radon. Sono stati infatti realizzati, dagli enti preposti alla tutela e al monitoraggio ambientale, sovvenzionati dai rispettivi governi, vasti progetti di mappatura radon con risultati eccellenti anche sotto l'aspetto della risoluzione spaziale: si pensi che in Gran Bretagna sono state collezionate fino ad ora 400.000 misure in abitazioni ed è stato realizzato un atlante del radon^[15,16].

Negli Stati Uniti l'EPA - ORIA (Environmental Protection Agency - Office of Radiation and Indoor Air)^[17] ha invece fornito delle direttive generali per tutti gli Stati, indicando una metodologia comune per la definizione delle aree a rischio radon. Ogni stato ha poi provveduto autonomamente alla realizzazione delle campagne di misura che hanno portato ad una mappatura dell'intero territorio americano. Negli Stati Uniti l'approccio al problema radon è stato caratterizzato da un massiccio intervento di soggetti privati, importante soprattutto sul versante del numero di misure raccolte.

Diverse sono le metodologie e gli approcci che possono essere seguiti per la mappatura del radon ma alla base di tutto, accanto alla raccolta di misure sperimentali di radon indoor, è importante una conoscenza approfondita del territorio dal punto di vista geologico e litologico, combinata con un'attenta analisi della fisica e chimica del radon, fondamentale per la comprensione dei meccanismi di trasporto, diffusione ed emanazione dal suolo.

Di notevole importanza è poi la trattazione matematica e statistica dei dati (normalizzazioni, correlazioni, interpolazioni, correzione dei dati sulla base della tipologia abitativa, ecc.).

1.3 Il quadro legislativo nazionale ed europeo

Fino a pochi anni fa il radon era pressoché assente nella normativa nazionale. Nel 2000, con l'emanazione del Decreto L.vo n.241 del 26 maggio 2000, è stata per la prima volta in Italia disciplinato da una norma di legge^[18], emanata in attuazione alla Direttiva Europea 96/29/Euratom^[19], l'ambito della radioattività naturale(*). In tale norma, dedicata all'esposizione derivante da attività lavorative, il radon viene trattato a pieno titolo come la principale e più diffusa causa di esposizione alla radioattività naturale.

In particolare, in tale Decreto è fissato un Livello di Azione per i luoghi di lavoro pari a 500 Bq/m³. Il Livello di Azione è definito come quel valore di concentrazione di attività di radon in aria, il cui superamento richiede l'adozione di azioni di rimedio tali da ridurre la concentrazione a livelli inferiori. L'attenzione del legislatore si è rivolta anzitutto sui luoghi di lavoro interrati, dove è imposto l'obbligo di legge della misura della concentrazione media (annua) di radon.

Gli ambienti confinati interrati sono infatti, di solito, quelli maggiormente soggetti al problema, perché direttamente a contatto con la principale fonte di radon che è il suolo. Non esiste, infatti, un suolo privo di radon: anche in aree in cui la concentrazione di minerali d'uranio è minima, resta elevata la presenza del radon nei gas del suolo (tipicamente, 10.000 - 20.000 Bq/m³)^[20]. Vi sono d'altra parte particolari zone nelle quali la presenza di rocce contenenti uranio in quantitativi superiori alla media e/o altri fattori geologici, quali ad esempio la presenza di fratture o di faglie, può causare un aumento della concentrazione di radon nel suolo, anche in maniera considerevole. In tali zone, di conseguenza, si potrà osservare un aumento della probabilità di trovare elevate concentrazioni di radon negli edifici.

Per questo motivo, il Decreto Legislativo 241/2000 ha istituito l'obbligo da parte delle Regioni di individuare tali aree, caratterizzate appunto da più elevata probabilità di avere alte concentrazioni di radon (aree che, nella letteratura scientifica internazionale, sono note come *radon prone areas*).

In attesa che tutti gli adempimenti previsti dal D. Lgs 241 vadano a compimento, il lavoro di diffusione delle conoscenze sul radon, finalizzato all'avvio di efficaci azioni di prevenzione è proseguito in diversi ambiti.

Ricordiamo tra questi la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale dell'Accordo del 21 settembre 2001^[21] tra Ministro della salute, Regioni e Province autonome concernente alcune *Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati*. In tale atto di indirizzo il radon assume un ruolo centrale tra gli agenti fisici per quanto riguarda la qualità dell'aria *indoor*. In esso, in particolare riguardo al radon, si auspica un maggiore intervento normativo atto a ridurre il rischio di esposizione della popolazione, con grande attenzione agli edifici scolastici.

Non si può infine dimenticare il già citato *Piano Nazionale Radon* (ISS – Ministero della Salute): si tratta dello schema di un progetto in grado di affrontare sistematicamente e nello specifico tutte le principali problematiche inerenti il radon. Il *Piano Nazionale Radon* è un documento ormai ufficiale ma, al momento, è ancora nelle sue fasi iniziali di attuazione, anche per le difficoltà di trovare finanziamenti adeguati.

(*) Il Decreto Legislativo n.241 del 26 maggio 2000, emanato in attuazione alla Direttiva Europea 96/29/Euratom ha integrato e modificato il Decreto Legislativo n.230/95, cioè la norma quadro di radioprotezione, inserendo in esso il Capo III bis, che tratta appunto dell'esposizione alla radioattività naturale

1.4 La mappatura del radon in Piemonte: le ragioni di un progetto

La Regione Piemonte ha una superficie di circa 25400 km² e una popolazione di poco meno di 4,5 milioni di persone. Il valore medio della concentrazione di radon nelle abitazioni del Piemonte è stato valutato in 69 Bq/m³ nel corso della già citata Campagna Nazionale (1990 -1991), un valore di poco inferiore al dato nazionale (77 Bq/m³). È però interessante notare a questo proposito che, come spesso capita, la semplice indicazione di un valore medio non sia sufficiente a caratterizzare in modo soddisfacente il problema: il celebre aforisma del pollo di Trilussa che può essere suddiviso in modo diseguale, vale infatti in modo particolare per il radon. Un valore medio piuttosto basso può portare a ritenere, erroneamente, che non vi possano essere situazioni in cui l'esposizione al radon sia anche molto elevata^[22]. La ragione per cui ciò non accade sta nel fatto che la distribuzione delle concentrazioni sperimentali di radon nelle abitazioni (radon indoor) non segue la semplice, ben nota e simmetrica distribuzione gaussiana (o normale), bensì l'asimmetrica log-normale. In Figura 1.4-1 è riportato l'istogramma della distribuzione delle concentrazioni radon relativo alla Campagna Nazionale.

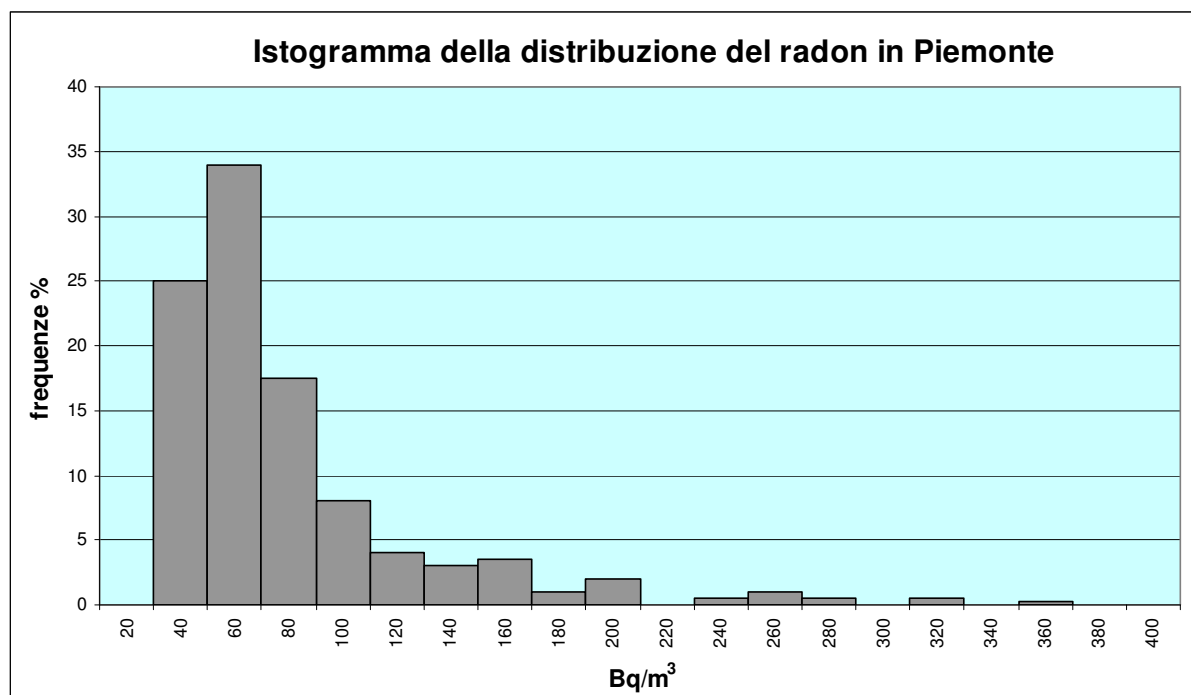


Figura 1.4-1: istogramma della distribuzione delle concentrazioni di radon in Piemonte (Campagna Nazionale 1990-1991)

Osservando il grafico si vede subito che la probabilità di avere concentrazioni anche molto più elevate del valore medio (69 Bq/m³) non è per nulla trascurabile.

La ragione di un comportamento di questo tipo va ricercata nel fatto che la concentrazione di radon negli ambienti interni è un fenomeno che dipende da diversi fattori non correlati tra loro.

Partendo da un dato di questo genere, rappresentativo del Piemonte nel suo complesso, ci si può quindi chiedere, ad esempio, se in ogni porzione del territorio regionale la distribuzione delle concentrazioni rimanga identica a quella regionale oppure se vi siano peculiarità tali da determinare un raggruppamento dei casi con elevate concentrazioni.

Il fatto che il Piemonte sia una Regione molto varia dal punto di vista sia geologico che geomorfologico può *a priori* suggerire che l'ipotesi di una non uniforme distribuzione territoriale dei livelli di radon sia molto credibile. Le diverse formazioni rocciose presenti, con litologie assai differenziate, e le notevoli varietà che si incontrano tra strutture abitative poste in diverse zone del territorio regionale, sono tutti fattori che rendono assai probabile una distribuzione non uniforme delle concentrazioni di radon: restringendosi a porzioni del territorio regionale ci si dovranno dunque attendere, localmente, anche distribuzioni sperimentali molto diverse da quella regionale, mostrata in Figura 1.4-1.

Sono peraltro già note, da molto tempo, alcune aree del territorio piemontese con concentrazioni anomale di radon e radioattività naturale. Ricordiamo in particolare la Valle del Cervo, nel biellese^[23], dove l'anomalia è dovuta alla presenza di un plutone granodioritico da cui, tra l'altro, viene estratta una pietra ornamentale utilizzata in edilizia e nota come "sienite della Balma" e la zona della Bisalta, nel cuneese^[24], nelle cui adiacenze si trova la ben nota, fin dai tempi di Marie Curie, fonte di Lurisia, le cui acque sono famose per il loro elevatissimo contenuto di radioattività naturale e di radon^[25,26,27]. Nonostante ciò, manca ancora una descrizione sistematica della distribuzione territoriale dei livelli di radon su tutto il Piemonte che consenta di individuare, con un certo dettaglio, aree più o meno soggette a questa particolare fonte di rischio radiologico, che è lo scopo per l'appunto del presente progetto. D'altra parte, lo stato delle attuali conoscenze scientifiche non consente di derivare "mappe del rischio" a partire dalla semplice conoscenza delle caratteristiche geologiche e litologiche del territorio a prescindere da una base dati sperimentale di misure di concentrazione radon negli edifici.

In un qualunque suolo, infatti, la presenza del radon è in quantità tali da poter rappresentare un potenziale rischio per un'ipotetica costruzione. Da qui ne discende che, mettere in relazione le caratteristiche litologiche del sottosuolo con le concentrazioni di radon che si potranno trovare in una determinata abitazione, è un'operazione che ha scarse probabilità di dare risultati positivi in termini di strumento predittivo. La presenza di elevate concentrazioni in una determinata abitazione è, infatti, quasi sempre dovuta a una serie di fattori, tra i quali, l'elevata concentrazione di radioattività naturale del suolo è solo uno tra i tanti. La necessità di possedere una mappa radon del territorio resta comunque uno strumento necessario per attuare le corrette politiche di prevenzione e rendere più mirati e efficaci gli interventi.

Con l'emanazione, del già menzionato, Decreto Legislativo n.241/2000, l'esigenza di disporre di una mappa del radon è poi divenuta lo strumento di conoscenza e prevenzione necessario per assolvere ad uno specifico obbligo di legge: le Regioni sono infatti tenute a definire le "...zone o luoghi di lavoro ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon...". Il lavoro scientifico di mappatura del radon svolto da ARPA Piemonte diventa, dunque, anche la necessaria premessa tecnica per un importante adempimento legislativo.

In conclusione, nonostante il fatto che recenti studi epidemiologici, avendo ormai dimostrato la pericolosità del radon, anche a basse concentrazioni, spingano verso strategie di mitigazioni dei livelli di radon su larga scala, resta tuttavia di estremo interesse conoscere l'esposizione al radon nella sua articolazione territoriale. Questa ricerca, in particolare, pur avendo evidenti risvolti sanitari, si presenta tuttavia per ora come uno studio eminentemente ambientale, che mira a definire quali aree del Piemonte sono più soggette al rischio radon indoor. A partire da questo studio sarà poi possibile, con maggior cognizione di causa, avviare politiche e interventi, che potranno porsi come obiettivo la riduzione del rischio radon per tutta la popolazione. Proprio per questo, a corollario dell'aspetto meramente descrittivo e ambientale,

verranno svolte anche alcune valutazioni di carattere più “sanitario”, volte a stimare l’esposizione della popolazione al radon. Tali valutazioni, necessariamente approssimate, potranno tuttavia essere prese come uno spunto per ulteriori approfondimenti e indagini che sicuramente sarà opportuno prevedere (paragrafi 4.6 e 4.7).

2 STRUTTURA DEL PROGETTO

2.1 Strategia di campionamento

Il primo problema che si è dovuto affrontare, in fase progettuale, è stato quello della scelta della strategia con cui effettuare la mappatura del radon. Le esperienze già maturate in ambito sia internazionale che nazionale potevano infatti suggerire vari approcci. Mancavano d'altra parte, e mancano tuttora, delle linee guida nazionali che possano fungere da standard di riferimento. Tuttavia, partendo dall'assunto fondamentale che la mappatura radon in un dato territorio vada eseguita a partire da un insieme strutturato di dati sperimentali, escludendo cioè in via preliminare la possibilità di costruire una mappa del radon semplicemente a partire da dati geologici, litologici e pedologici, gli approcci possibili al campionamento dei dati radon (cioè all'esecuzione delle misure) si possono grossolanamente suddividere in due grandi categorie:

- a) campionamento basato su unità territoriali definite in modo geometrico (ad esempio, maglie quadrate o rettangolari aventi una dimensione fissata);
- b) campionamento basato su unità territoriali non geometriche, individuate con diversi criteri (amministrativi, geologici, ecc.).

Nel nostro caso, la scelta è caduta sul secondo tipo di approccio. Questa decisione è stata motivata da varie considerazioni, alcune di ordine pratico, altre più propriamente tecniche.

La principale considerazione di ordine pratico che ci ha condotto ad adottare l'approccio b) è basata essenzialmente sul fatto che, al momento dell'approvazione da parte della Regione del progetto e del suo avvio da parte di ARPA Piemonte si era ormai giunti al 2005. A quella data, la conoscenza della distribuzione territoriale del radon in Piemonte aveva già fatto molti passi in avanti rispetto all'epoca della prima Campagna Nazionale Radon (1990-1991) e numerose indagini erano già state effettuate in diverse aree della Regione, identificate in base a criteri territoriali amministrativi (provinciali o comunali). Ciascuna di queste campagne di misura, avendo ovviamente avuto una sua propria particolare genesi, legata alla particolarità del luogo e delle condizioni, possedeva peculiarità di tipo organizzativo e metodologico tali da rendere l'insieme dei dati piuttosto eterogeneo. D'altra parte era però possibile, all'interno di tale eterogeneità, ricavare alcuni tratti comuni, che potevano essere sfruttati per la costruzione di un insieme di dati sufficientemente coerente.

Per questo motivo si è ritenuto conveniente andare a creare una base dati finalizzata alla mappatura a partire dai dati disponibili, opportunamente validati e selezionati, piuttosto che ripartire da zero con una campagna di misura regionale, organizzata *ad hoc*, con criteri di campionamento predefiniti individuando, ad esempio, una base di campionamento a "maglie geometriche". Il vantaggio dell'approccio scelto è anzitutto di ordine pratico ed economico: la rinuncia all'utilizzo dell'imponente *database* già disponibile nel 2005 (oltre 2500 punti di misura) avrebbe comportato necessariamente l'esecuzione, in tempi relativamente brevi, di un elevato numero di misure su tutto il territorio regionale, con evidenti costi e difficoltà organizzative.

La seconda ragione, che ha suggerito di abbandonare l'approccio della campagna regionale con "maglie geometriche", è legata al fatto che, dal punto di vista pratico, una mappatura del territorio avrebbe comunque dovuto essere rappresentata anche in termini di confini amministrativi. Non si può dimenticare infatti che, in base al

Decreto Legislativo n.241/2000, l'eventuale definizione di un'area “..ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon...” comporterebbe conseguenze per quel territorio che dovranno poi essere gestite dalle autorità locali che, siano esse il Sindaco o le Aziende Sanitarie Locali, non possono che agire sulla base di confini e competenze amministrative. Da questo punto di vista, quindi, la scelta di una campagna di misura a “maglie geometriche” avrebbe senz'altro fornito una rappresentazione territoriale corretta in termini puramente scientifici, ma avrebbe poi richiesto ulteriori valutazioni e assunzioni per giungere a quel dettaglio amministrativo che resta comunque indispensabile.

2.2 La costruzione del database radon di ARPA Piemonte

Avendo preso la decisione di ordinare la base dati, con riferimento ai confini amministrativi si è dovuto affrontare il problema di come organizzare e omogeneizzare i dati già presenti e, cosa altrettanto importante, di come raccogliere i nuovi dati che, aggiungendosi a quelli già disponibili, fossero utili al completamento del quadro regionale. Tenendo conto dei dati disponibili e tenendo presente che il principale obiettivo della ricerca, anche per esplicito mandato della Regione, era quello di definire una mappa del “rischio radon indoor” del Piemonte, si è ritenuto di prendere come riferimento le misure al piano terra. Una giustificazione di questo approccio può essere ricercata nel fatto che la concentrazione di radon che si trova in un generico edificio è dovuta, per oltre il 90%, al radon proveniente dal suolo. Si può trascurare infatti, in prima approssimazione, il contributo dei materiali da costruzione che, al di fuori di alcuni casi specifici non particolarmente diffusi in Piemonte, può essere assunto come grossolanamente costante e, nella maggioranza dei casi, trascurabile. Se questo è vero, allora la sistematica misura del radon nei piani terra distribuiti su tutto il territorio regionale fornisce, sperimentalmente, una descrizione della distribuzione territoriale dei livelli di radon. Una tale “fotografia” dei livelli di radon, fatta al piano terra, può essere considerata come una sintesi che ingloba i tre principali fattori che determinano la concentrazione di radon in ambiente chiuso:

- i) la concentrazione di radon nei gas del suolo;
- ii) la permeabilità dello strato pedologico;
- iii) le caratteristiche dell'interfaccia suolo-abitazione.

La misura della concentrazione di radon al piano terra può dunque essere considerata come un'ottima scelta, se l'obiettivo è quello di caratterizzare il territorio dal punto di vista del rischio radon. Si dovrà tenere conto di altre considerazioni se si vorrà, invece, fare una stima dell'esposizione al radon della popolazione.

Una prima, grossolana, selezione delle misure idonee per la mappatura è stata quindi compiuta estraendo dal database ARPA tutte le misure effettuate al piano terra.

Parallelamente, tutte le campagne di misura pianificate a partire dal 2005, in funzione del progetto radon hanno previsto sempre almeno una misura del radon al piano terra: si è ritenuto in tal modo di ottimizzare gli sforzi in relazione a quello che è il principale obiettivo di questa ricerca.

2.3 Il problema della selezione delle misure idonee

La semplice selezione delle misure di radon effettuate al piano terra non è però sufficiente a creare un database completamente omogeneo ed affidabile. Devono infatti anche essere tenuti in conto importanti parametri che definiscono la qualità del dato, tra i quali si possono ricordare:

- a) la durata della misura;
- b) la georeferenziazione;
- c) la tipologia degli edifici;
- d) i metodi di misura impiegati.

Di questi aspetti, alcuni dei quali saranno maggiormente approfonditi nel prosieguo della trattazione, discuteremo ora brevemente.

a) Per quanto riguarda la durata della misura, si è ritenuto di considerare, ai fini del presente lavoro, solo le misure che sono in grado di fornire un valore medio annuale. La ragione di una tale scelta risiede nella ben nota caratteristica del radon di essere soggetto a intense fluttuazioni, sia giornaliere che stagionali. In questa scelta ha ovviamente pesato anche l'impostazione della normativa (D.Lvo 241/2000) la quale ha stabilito che i Livelli di Azione fossero dei parametri calcolati su base annuale.

b) Per quanto riguarda la georeferenziazione delle misure, si tratta di una richiesta che ora appare come ovvia, ma che, per misure effettuate anni fa', non è per nulla scontata. Mancando infatti all'epoca rilievi con strumentazione GPS, le coordinate geografiche dei punti di misura sono state, laddove possibile, dedotte e calcolate a partire dagli indirizzi.

c) Sulla tipologia degli edifici l'approccio seguito nel progetto è stato quello di considerare sia le abitazioni residenziali che l'edilizia scolastica. L'interesse intrinseco per l'esecuzione di monitoraggi nelle scuole pare evidente, vista la giovane età della popolazione scolastica, anche se introduce un elemento di eterogeneità nel campione. D'altra parte bisogna considerare che l'effettuazione di campagne di misura nelle scuole presenta minori difficoltà di tipo logistico-organizzativo. Il confronto tra i risultati ottenuti in campagne di misure su scuole e abitazioni introduce comunque alcuni elementi di difficoltà, che vanno affrontati e di cui è necessario tenere conto. Questi problemi verranno trattati in seguito, laddove saranno presentati e discussi i risultati ottenuti nelle varie campagne di misura che vanno a costituire il database (paragrafi 3.2 e 3.3).

d) Per quanto concerne i metodi di misura impiegati, ci si è decisamente orientati verso tecniche passive basate su dosimetri a tracce nucleari. A seconda dei casi, come elemento sensibile, sono stati utilizzati rivelatori LR115 (nitrato di cellulosa) o CR39 (policarbonato). Per una descrizione esauriente dei sistemi utilizzati si rimanda al paragrafo 3.1, nel quale sono presentati e discussi in dettaglio i dispositivi e i metodi impiegati.

2.4 La scelta dell'unità territoriale di mappatura e il problema della rappresentatività

È già stato detto che, nella scelta dell'unità territoriale di campionamento si è abbandonata l'opzione della maglia rettangolare geometrica, per privilegiare un approccio che avesse come riferimento l'unità amministrativa fondamentale, cioè il Comune. Gli aspetti essenzialmente pratici che hanno condotto a questa scelta sono già stati precedentemente ricordati. La definizione di unità territoriali di campionamento che coincidono con le municipalità hanno avuto il merito di agevolare l'organizzazione di molte campagne di misura, soprattutto laddove è stato coinvolto personale esterno ad ARPA che, per ovvi motivi, è stato più semplice reclutare e motivare in contesti comunali.

Accanto a questi aspetti, il fattore più rilevante che ha condotto a questa scelta è stata la consapevolezza che la mappatura del radon è un efficace strumento per le politiche di prevenzione e di tutela della salute, solo se il riferimento amministrativo è espresso chiaramente e senza ambiguità. L'applicazione di alcuni aspetti del Decreto Legislativo 241/2000, come la definizione degli obblighi per i datori di lavoro che si trovavano ad operare in zone ad elevata probabilità di alte concentrazioni di radon, è un esempio, ma non l'unico: la possibilità di intervenire nei regolamenti edilizi e in altre norme di settore è un altro ambito di potenziale grosso interesse che presuppone l'interazione con il livello amministrativo comunale.

Un approccio differente fondato su una suddivisione del territorio in unità definite da criteri geologici, comporterebbe delle grandi difficoltà nel momento di applicare interventi di prevenzione; in questi casi, una mappa che facesse riferimento a unità territoriali definite su base geologica dovrebbe quindi necessariamente essere riportata entro confini amministrativi, con tutte le difficoltà che questa operazione comporterebbe.

L'unità territoriale di mappatura che è stata scelta per questo lavoro è stata definita, in gran parte dei casi, a posteriori rispetto al momento dell'esecuzione delle indagini, ed è stata quindi applicata a una base dati già precedentemente acquisita. Questo fatto pone evidentemente dei problemi sulla rappresentatività del campione comunale che si è ottenuto.

Tuttavia, partendo dal presupposto (verificato caso per caso) che tutti i campionamenti effettuati siano stati eseguiti casualmente, si è ritenuto, in prima approssimazione, di ritenere come rappresentativa per un'area comunale una base dati che contenesse almeno 4 misure valide. Laddove possibile, sono stati poi fatti controlli a posteriori per verificare l'effettiva rappresentatività del campionamento.

A partire dai dati sperimentali sono stati quindi calcolati opportuni indicatori. Una più dettagliata discussione sulla scelta e sulle modalità di calcolo di tali indicatori è rimandata ai successivi capitoli.

2.5 La rappresentazione cartografica

La caratterizzazione geografica può rappresentare un valido strumento di supporto alle fasi decisionali e tecniche della mappatura del radon.

Abbiamo visto finora, infatti, emergere diverse volte l'importanza dell'elemento cartografico, per esempio nella fase di definizione delle unità territoriali di campionamento.

La conoscenza territoriale e la sua rappresentazione sono elementi fondanti del processo di governo dei fenomeni ambientali e territoriali. Le possibilità offerte in tal senso dai Sistemi Informativi Geografici (GIS) aprono scenari innovativi per il controllo e l'analisi dei diversi fattori che incidono sull'ambiente.

Un Sistema Informativo Geografico, è una tecnologia software che permette di posizionare ed analizzare oggetti ed eventi che esistono e si verificano sulla terra.

Le principali funzioni di un GIS possono essere divise in 4 principali categorie:

- **Funzioni per immagazzinamento, registrazione e immissione dei dati:** ossia tutte le operazioni che permettono l'inserimento (input) dei dati.
- **Funzioni per la correzione e l'adattamento dei dati:** in questa categoria possono essere inserite le manipolazioni geometriche (editing grafico); proiezioni cartografiche e trasformazione dei sistemi di coordinate.
- **Funzioni per il processing e l'analisi dei dati:** che comprende l'estrazione di interrogazioni (query) e report dagli attributi dei dati.
- **Funzioni per la presentazione dei dati:** ossia l'utilizzo di una certa simbologia che permetta una accurata rappresentazione dei dati.

Nel corso del progetto, le funzionalità appena elencate, sono state tutte impiegate. È stato necessario anzitutto provvedere alla creazione di uno strato informativo rappresentante i punti di campionamento. Il processo di definizione e organizzazione dei dati riferiti alla realtà in un coerente insieme di dati digitali prende il nome di *data modelling* o modellizzazione dei dati.

Nel caso dei dati di campionamento è stato necessario intervenire anche sulla trasformazione del sistema di coordinate originale in quanto i formati e le modalità di acquisizione delle coordinate geografiche dei punti erano differenti tra di loro.

Nei paragrafi successivi verranno descritte in dettaglio le procedure di processing dei dati di campionamento che hanno portato alla definizione della mappatura e le modalità di rappresentazione cartografica che ne consentono un'interpretazione integrata con le caratteristiche geologiche del territorio.

2.6 Aggiornamento continuo del database

Il progetto di mappatura del radon è stato pensato come un processo che prevede un continuo aggiornamento, a mano a mano che nuovi dati sperimentali andranno ad aggiungersi a quelli già disponibili. Per questo motivo, eventuali problemi di rappresentatività che possono al momento sussistere per determinate aree, potranno col tempo essere ridotti e superati. Allo stato attuale il database dei dati sperimentali presenta parecchie lacune in diverse unità amministrative: in questi casi si è proceduto a stime basate su criteri di correlazione costruiti su dati geolitologici,

opportunamente validati (vedi capitolo 4). In tal modo è stato possibile fin d'ora fornire una mappatura per così dire "completa", anche se in una certa misura provvisoria. L'attendibilità di questa prima mappatura così ottenuta è ovviamente legata alle dimensioni e alla robustezza del campionamento. Gli aggiornamenti del database che si riusciranno a produrre nei prossimi anni contribuiranno quindi a un miglioramento progressivo della qualità della mappatura.

Nel diagramma (Figura 2.6-1) che segue è schematizzato il processo, brevemente discusso in questo capitolo, che porta alla definizione di questa prima mappatura e che prevede per il futuro successivi aggiornamenti.

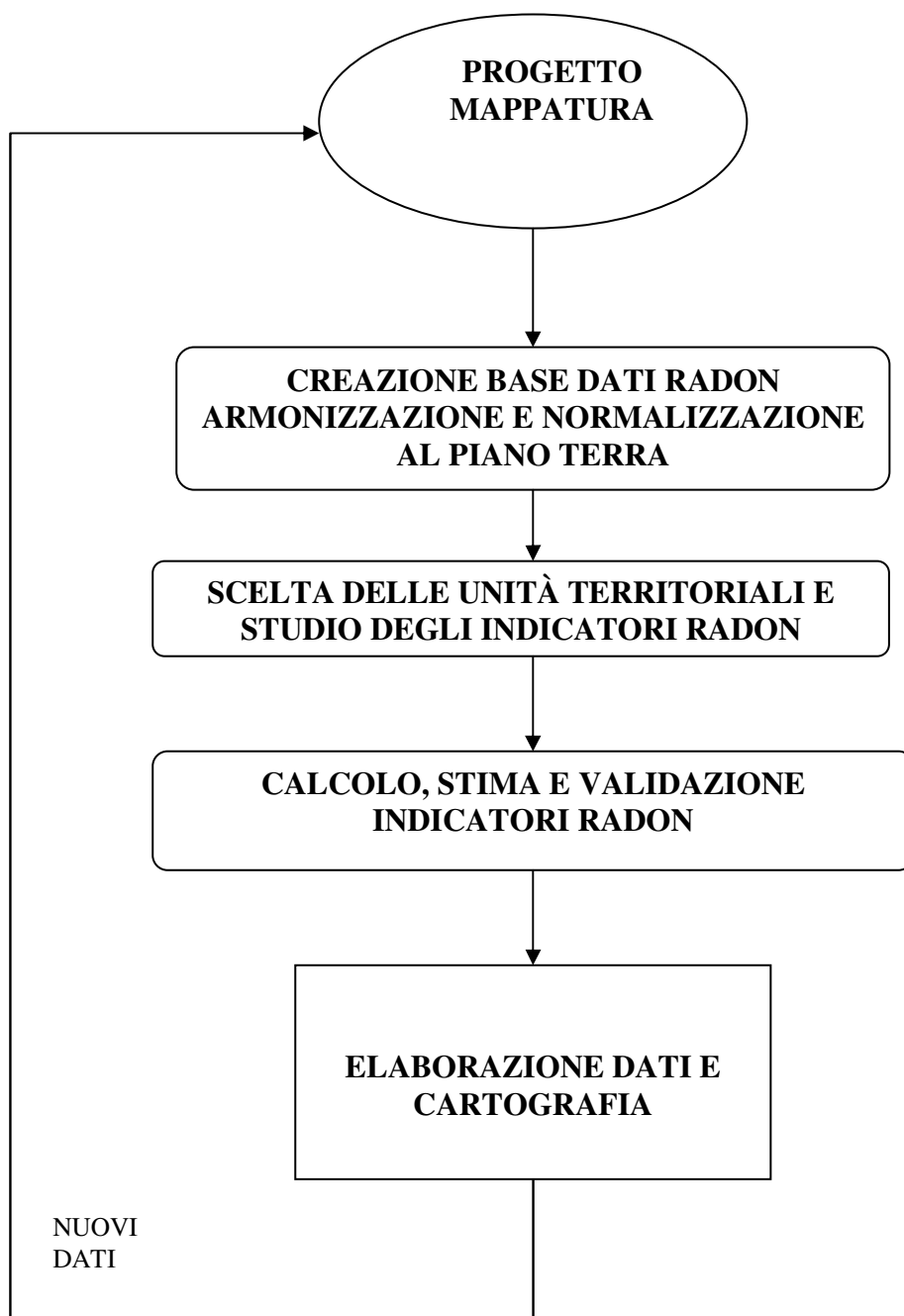


Figura 2.6-1: schema generico dei processi seguiti per giungere all'elaborazione della mappatura del radon in Piemonte e al suo progressivo aggiornamento

3 COSTRUZIONE DELLA BASE DATI RADON PER IL PIEMONTE

3.1 Metodi di misura del radon impiegati

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, in istantaneo o integrato e, rispetto alle caratteristiche strumentali, in 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 viene 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 Azione (Decreto Legislativo 241/2000) del radon e quindi questo ha senza dubbio rappresentato un vincolo nella scelta della tecnica di misura.

Per le nostre campagne d'indagine infatti, sono state impiegate tecniche passive utilizzando in particolare due diversi tipi di rivelatori a tracce nucleari: l'*LR115* e il *CR39*. Ogni sistema di misura passivo è composto da una parte sensibile, *il rivelatore* che viene inserito in un dispositivo di misura, detto anche *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^[28] 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 (Figura 3.1-1).

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.

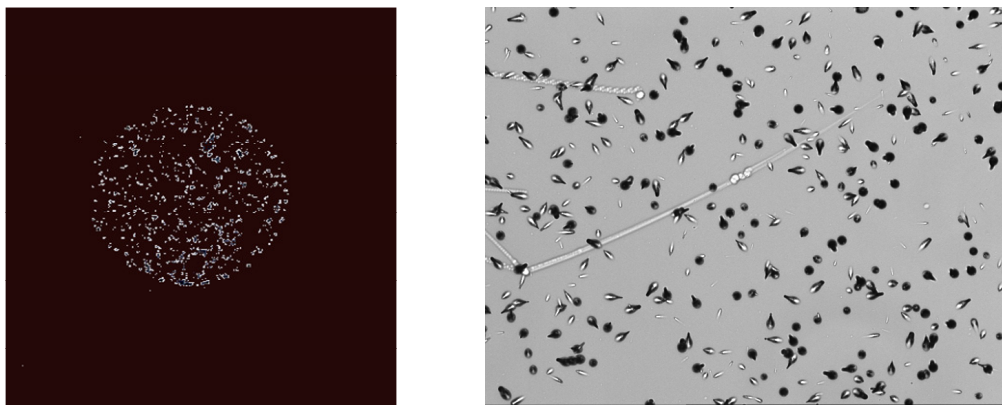


Figura 3.1-1: tracce del radon e dei figli a vita breve nei rivelatori LR115 e CR39

Il dosimetro ANPA/ARPA impiegato nelle nostre indagini, è un'evoluzione del dispositivo ENEA – ANPA^[29], già utilizzato nella Campagna Nazionale (svolta in Piemonte nel 1990-1991) per il monitoraggio del gas radon, realizzatasi in Italia a partire dal 1989. Esso è costituito da un telaio in plastica conduttiva e da due coperchi dello stesso materiale, capaci di ospitare due rivelatori di tipo LR115 o CR39 (Figura 3.1- 2 e 3.1-3). Una volta assemblato, il dosimetro viene inserito in una busta in polietilene a bassa densità (Figura 3.1-4), permeabile al radon.



Figura 3.1-2: dosimetro ANPA/ARPA con il rivelatore LR115

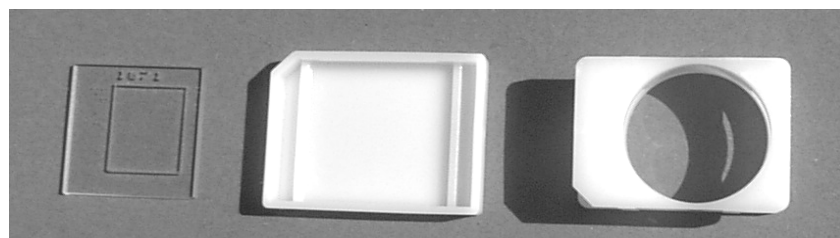


Figura 3.1-3: dosimetro ANPA/ARPA con il rivelatore CR39



Figura 3.1-4: dosimetri con rivelatori LR115 e CR39 in configurazione di misura

3.1.1 Il conteggio delle tracce e la determinazione della concentrazione di attività del gas radon

Nei laboratori del Centro Regionale per le Radiazioni Ionizzanti e non Ionizzanti dell'Arpa Piemonte, il conteggio delle tracce viene realizzato, previo attacco chimico, impiegando a seconda del tipo di rivelatore utilizzato uno dei seguenti sistemi di analisi:

- un sistema elettronico SparkCounter per rivelatori LR115 strippabili;
- un sistema ottico di conteggio e riconoscimento TASL (Track Analysis Limited) per il rivelatore CR39;
- Un sistema ottico Politrack per rivelatori LR115 non strippabili o CR39.

Le catene di misura sono sottoposte a procedimenti di taratura e di verifica periodica, finalizzate alla determinazione della sensibilità dei metodi e al mantenimento degli standard di qualità delle misure. La partecipazione ai circuiti nazionali e internazionali di intercalibrazione organizzati dall'HPA, Health Protection Agency (UK) e APAT, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente e del Territorio, rinnovano periodicamente l'affidabilità dei metodi.

Per ciascuna fase che conduce alla determinazione della grandezza di misura interessata (concentrazione di attività radon), da quella di campionamento all'analisi in laboratorio, sono state applicate rigorose procedure atte alla normalizzazione di tutte le operazioni e al contenimento delle incertezze sistematiche e sperimentali.

3.2 Campagne di misura che alimentano la base dati

Il radon è un problema, come già detto, affrontato in Piemonte ormai dal 1990 quando, a seguito della Campagna Nazionale, un esteso monitoraggio territoriale ha reso disponibili i primi dati radon ufficiali, per un totale di più di 400 abitazioni monitorate. Da quelle prime misure, si è potuto stimare la media e la distribuzione radon in Piemonte che non molto si discosta da quella stimata attualmente da una collezione maggiore di misure. Nelle seguenti tabelle, riportiamo suddivisi per province e per tipologia di edificio monitorato, il numero di dati che confluiscono nell'attuale base dati.

Dal 2001 in poi i monitoraggi radon hanno interessato maggiormente gli edifici scolastici in quanto, oltre che rappresentativi del territorio e omogeneamente distribuiti, permettono di stimare l'esposizione di una popolazione giovane e quindi più sensibile ai rischi connessi alle radiazioni.

Di seguito, le Tabella 3.2-1 e Tabella 3.2-2, riportano il numero delle misure di radon dei relativi monitoraggi o indagini, differenziati per tipologia di ambiente abitativo.

Tabella 3.2-1: numero di misure radon in Piemonte: monitoraggi, indagini e campagne di misure nelle abitazioni

Misura	Provincia	Numero punti di misura
Radon in aria	Alessandria	34
	Asti	45
	Biella	72
	Cuneo	381
	Novara	59
	Torino	643
	Verbano Cusio Ossola	209
	Vercelli	1
TOTALE MISURE IN ABITAZIONI		1444

Tabella 3.2-2: numero di misure del radon in Piemonte: monitoraggi, indagini e campagne di misura nelle scuole

Misura	Provincia	Numero Punti di misura
Radon in aria	Alessandria	161
	Asti	91
	Biella	97
	Cuneo	71
	Novara	148
	Torino	388
	Verbano Cusio Ossola	14
	Vercelli	56
TOTALE MISURE NELLE SCUOLE		1026

Nel seguito riportiamo una rassegna dettagliata delle campagne di misura del gas radon con le stime relative ai valori medi e alle distribuzioni locali del radon.

- Campagna Nazionale radon in Piemonte

Promotore	Istituto Superiore di Sanità – ENEA-DISP ora ISPRA	
Realizzazione	Sezione Fisica USSL 40 Ivrea ora ARPA – Centro Regionale radiazioni ionizzanti	
Durata campagna	Anni 1990-1991	
Obiettivi	Stima valor medio Radon in Piemonte – Stima dell'esposizione della popolazione (dose efficace - dose collettiva)	
Tipologia edifici	Abitazioni (434 famiglie ripartite su 25 comuni)	
Piani interessati	Tutti	
Criterio di campionamento	Casuale con criterio statistico che tiene conto del numero di abitanti e della rappresentatività territoriale	
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)	
Evidenza bibliografica	<ul style="list-style-type: none"> • Pubblicazione della Regione Piemonte – Assessorato all'Assistenza Sanitaria dal titolo "Indagine sull'esposizione alla radioattività naturale nelle abitazioni del Piemonte" • Valutazione della Concentrazione radon nelle abitazioni del Piemonte; Atti del Convegno Nazionale "Aria 92" – Pisa 	
Risultati		
Media aritmetica	69,43 Bq/m ³	
Media geometrica (mediana)	54,08 Bq/m ³	
Distribuzione della concentrazione di attività		

Tabella 3.2-3: campagna Nazionale radon in Piemonte

- Campagna radon nei Comuni siti in vicinanza del monte Bisalta (CN)

Realizzazione	Sezione Fisica USSL 40 Ivrea ora ARPA – Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	USSL di competenza
Durata campagna	Anni 1993-95
Obiettivi	Stima valor medio radon a Peveragno, Boves e Chiusa Pesio
Tipologia edifici	Abitazioni
Numero edifici	380
Piani interessati	Tutti
Criterio di campionamento	Casuale con criterio statistico che tiene conto del numero di abitanti e della rappresentatività territoriale
Periodo di misura	semestrale e annuali
Evidenza bibliografica	<ul style="list-style-type: none"> • Relazione Tecnica 161/IR
Risultati	
Media aritmetica	202 Bq/m ³
Conclusioni	
Le ricerche condotte hanno consentito di verificare che l'area pedemontana in vicinanza del monte Bisalta è soggetta ad anomale concentrazioni di radon.	

Tabella 3.2-4: campagna radon in alcuni comuni del cuneese

- Misure di radon in Valle Pellice (TO)

Realizzazione	Sezione Fisica USSL 40 Ivrea ora in ARPA – Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Durata campagna	Anni 1994
Obbiettivi	Approfondimenti Campagna Nazionale
Tipologia edifici	Abitazioni
Piani interessati	Generici
Criterio di campionamento	Ripetizione misura nelle abitazioni in cui sono stati riscontrate elevate concentrazioni nel corso della Campagna Nazionale
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)
Evidenza bibliografica	<ul style="list-style-type: none"> • Relazione Tecnica 118/IR/43
Conclusioni	
Vengono confermati i valori elevati riscontrati nel corso della Campagna Nazionale	

Tabella 3.2-5: misure di radon in Valle Pellice (TO)

- Campagna radon in Canavese (TO)

Realizzazione	ARPA – Centro Regionale Radiazioni Ionizzanti	
Collaboratori	SISP ASL9 –Ivrea	
Durata campagna	Anni 2001-2002	
Obbiettivi	Stima valor medio Radon in Canavese e della sua distribuzione	
Tipologia edifici	Abitazioni (200 famiglie ripartite su 29 comuni)	
Piani interessati	Piano terra	
Criterio di campionamento	Casuale con criterio statistico che tiene conto del numero di abitanti e della rappresentatività territoriale	
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri)	
Evidenza bibliografica	<ul style="list-style-type: none"> • Relazione Tecnica 251/IR 	
Risultati		
Media aritmetica	68,6 Bq/m ³	
Media geometrica (mediana)	52,2 Bq/m ³	
Distribuzione della concentrazione di attività		
Conclusioni		
<p>Dall'indagine radon effettuata non sono state evidenziate nel suolo canavesano peculiarità dal punto di vista del contenuto di radioattività naturale. Tuttavia in alcune abitazioni sono state misurate concentrazioni vicine o superiori al limite di 400 Bq/m³. Le medie più alte sono state riscontrate prevalentemente nei comuni montani, mentre nelle abitazioni della pianura, situate su un suolo di tipo detritico alluvionale, i valori sono generalmente inferiori.</p>		

Tabella 3.2-6: campagna radon in Canavese (TO)

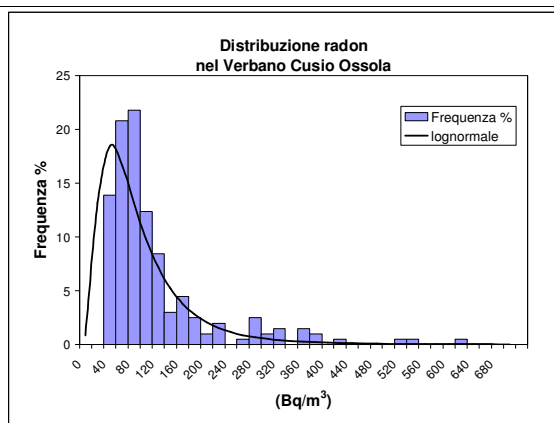
- Campagna radon nel Verbano Cusio Ossola

Realizzazione	ARPA – Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	ARPA – Dipartimento del VCO
Durata campagna	Anni 2002 -2003
Obbiettivi	Stima valor medio Radon
Tipologia edifici	Abitazioni (202 famiglie)
Piani interessati	Tutti
Criterio di campionamento	Casuale con criterio statistico che tiene conto del numero di abitanti e della rappresentatività territoriale
Periodo di misura	Annuale
Evidenza bibliografica	<ul style="list-style-type: none"> • Relazione Tecnica 257/IR

Risultati

Media aritmetica	105 Bq/m ³
Media geometrica (mediana)	81 Bq/m ³

Distribuzione della concentrazione di attività



Conclusioni

La media riscontrata è superiore a quella del territorio Piemontese. Si evidenziano infatti alcune aree del VCO in cui vi è maggiore presenza di radon. Tali aree sono diventate oggetto di approfondimenti nelle campagne successive finalizzate alla mappatura del radon in particolare dal punto di vista dello studio delle litologie presenti sul territorio.

Tabella 3.2-7: campagna radon nel Verbano Cusio Ossola

- Indagine radon in abitazioni della provincia di Novara (NO)

Realizzazione	Centro Regionale radiazioni ionizzanti	
Collaboratori	Asl 13 – Distretto di Arona	
Durata campagna	Anni 2003 -2004	
Obiettivi	Verifica concentrazioni di gas radon	
Tipologia edifici	Abitazioni	
Numero di edifici	50	
Piani interessati	Piani terra	
Criterio di campionamento	Casuale	
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)	
Evidenza bibliografica	IR276/04	
Risultati		
Media aritmetica		58 Bq/m ³
Media geometrica (mediana)		53 Bq/m ³
Distribuzione della concentrazione di attività		
Conclusioni		
Dai dati raccolti nella campagna di misura la concentrazione media annua di attività radon nelle abitazioni è risultata pari a 58 Bq/m ³ .		

Tabella 3.2-8: indagine radon nelle abitazioni del Novarese

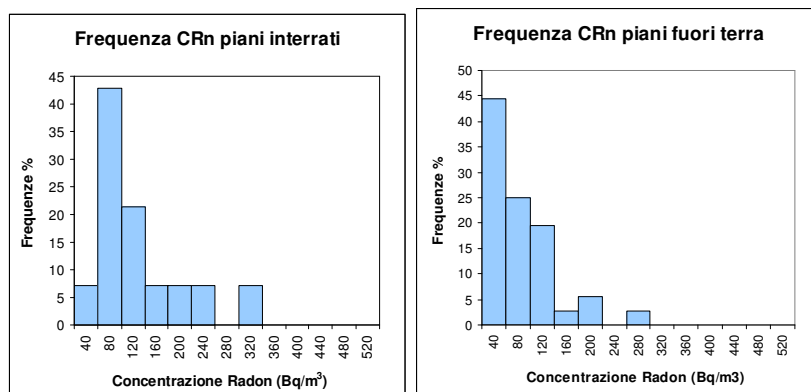
- Campagna di misura negli Istituti Scolastici Provincia di Biella

Realizzazione	ARPA -Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	Dipartimento ARPA Biella
Durata campagna	Anni 2004 – 2006
Obbiettivi	Stima dell'esposizione media al radon della popolazione scolastica più giovane (3–10 anni) – caratterizzazione dettagliata del territorio dal punto di vista del rischio radon
Tipologia edifici	edifici scolastici
Numero edifici	30 (per un totale di 50 dosimetri posizionati per semestre di misura)
Piani interessati	Interrati e piani terra
Criterio di campionamento	Distribuzione casuale – copertura del territorio
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)
Evidenza bibliografica	Relazione tecnica IR31 1/06

Risultati

Media aritmetica	77 Bq/m ³
Media geometrica (mediana)	60 Bq/m ³

Distribuzione della concentrazione di attività nei piani interrati e in quelli fuori terra



Conclusioni

I valori annuali di concentrazione radon rilevati variano da un valore minimo di 21 Bq/m³ ad un valore massimo di 302 Bq/m³.
 Non sono emerse situazioni critiche di rilievo tali da ipotizzare situazioni di rischio per la salute degli scolari e del personale che frequenta le scuole
 Inoltre i valori medi registrati per la concentrazione di gas radon risultano in buon accordo con i valori medi piemontese e nazionale, pari rispettivamente a 69 Bq/m³ e 74 Bq/m³.

Tabella 3.2-9: campagna di misura negli Istituti Scolastici nel Biellese

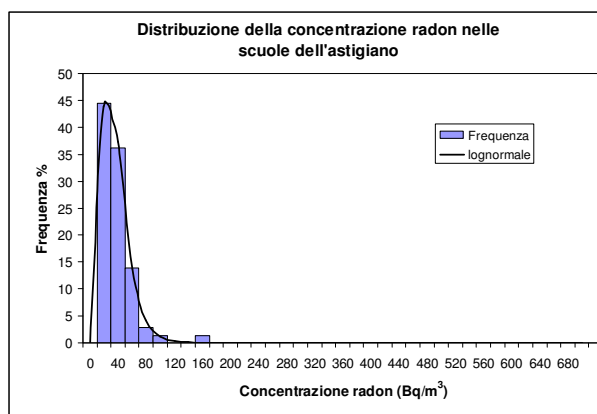
- Campagna di misura nella scuole dell’Astigiano

Realizzazione	Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	ASL 19
Durata campagna	Anni 2003 – 2004
Obiettivi	Stima dell’esposizione media al radon della popolazione scolastica più giovane – caratterizzazione dettagliata del territorio dal punto di vista del rischio radon finalizzato alla mappatura del Piemonte
Tipologia edifici	edifici scolastici
Numero edifici	75 (per un totale di 140 punti monitorati)
Piani interessati	Interrati e piani terra
Criterio di campionamento	Distribuzione casuale – copertura del territorio
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)
Evidenza bibliografica	Relazione tecnica IR280/05

Risultati

Media aritmetica	47 Bq/m ³
Media geometrica (mediana)	43 Bq/m ³

Distribuzione della concentrazione di attività



Conclusioni

La concentrazione media annua di attività radon nelle scuole è risultata pari a 47 Bq/m³ cioè inferiore rispetto al valore medio sia piemontese (69,4 Bq/m³) che nazionale. Inoltre, in nessuna scuola interessata dalle misure il valor medio di concentrazione radon è risultato superiore ai valori di riferimento prescritti dalla normativa vigente.

Tabella 3.2-10: campagna di misura nelle scuole dell’Astigiano

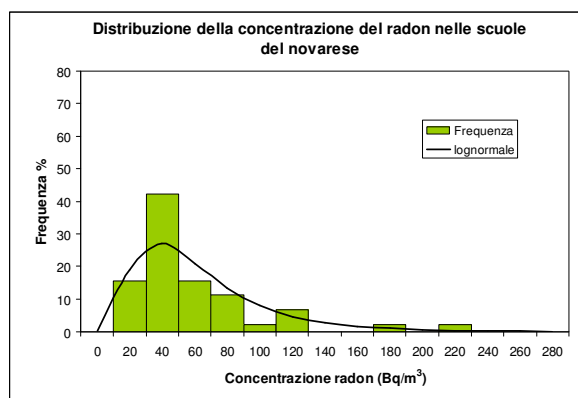
- Campagna di misura condotta nelle scuole del Novarese

Realizzazione	Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	SISP ASL 13
Durata campagna	Anni 2005 – 2006
Obiettivi	Stima dell'esposizione media al radon della popolazione scolastica più giovane – caratterizzazione dettagliata del territorio dal punto di vista del rischio radon
Tipologia edifici	edifici scolastici
Numero edifici	63 edifici di cui 45 monitorati da ottobre 2005 a ottobre 2006 mentre in 18 edifici è ancora in corso il monitoraggio.
Piani interessati	Interrati e piani terra
Criterio di campionamento	Distribuzione casuale – copertura del territorio
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)
Evidenza bibliografica	Relazione tecnica IR332/07

Risultati

Media aritmetica	74 Bq/m ³
Media geometrica (mediana)	63 Bq/m ³

Distribuzione della concentrazione di attività



Conclusioni

La concentrazione media annua di attività radon nelle scuole (media per edificio) è risultata pari a 74 Bq/m³. In un'unica scuola interessata dal monitoraggio radon è stata misurato in un locale seminterrato un valore superiore al livello di 400 Bq/m³, per cui ai sensi del D.Lvo 241/2000 si è ritenuto opportuno ripetere la misura.

Tabella 3.2-11: campagna di misura nelle scuole del Novarese

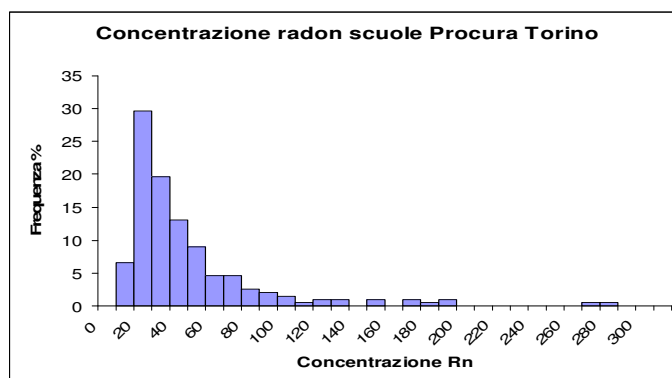
- Campagna di misura condotta nelle scuole di Torino e Provincia

Realizzazione	Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	Tecnici ARPA Piemonte
Durata campagna	Anni 2004 – 2007
Obiettivi	Stima dell'esposizione media al radon della popolazione scolastica con fascia di età compresa tra 0 e 13 anni – caratterizzazione dettagliata del territorio dal punto di vista del rischio radon.
Tipologia edifici	edifici scolastici, privilegiando le scuole elementari e materne
Numero edifici	272
Piani interessati	Interrati e piani terra
Criterio di campionamento	Distribuzione casuale – copertura del territorio
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri: estivo e invernale)
Evidenza bibliografica	Relazione tecnica IR322/06

Risultati

Media aritmetica	42 Bq/m ³
Media geometrica (mediana)	29.4 Bq/m ³

Distribuzione della concentrazione di attività



Conclusioni

I valori di concentrazione radon rilevati nelle scuole di Torino e Provincia sono risultati piuttosto bassi e in buon accordo con la media aritmetica e geometrica, pari rispettivamente a 38 Bq/m³ e 35,8 Bq/m³, calcolate con i dati di concentrazione raccolti nelle abitazioni di Torino e Provincia.

Nonostante si possa apprezzare una concentrazione radon media più elevata nei piani interrati, i dati rilevati sono assolutamente confortanti da un punto di vista radioprotezionistico; infatti, valori prossimi al limite, sono stati misurati solo in locali adibiti esclusivamente ad uso magazzino, ripostiglio o cantina, non accessibili quindi agli scolari e solo occasionalmente ai lavoratori.

Tabella 3.2-12: campagna di misura nelle scuole di Torino e Provincia

- Monitoraggio Edifici Scolastici e classificazione radiologica delle litologie

Realizzazione	ARPA - Centro Regionale radiazioni ionizzanti
Collaboratori	ARPA - Area delle attività in materia di coordinamento dei rischi geologici
Durata campagna	Anni 2005-2008
Obbiettivi	<ul style="list-style-type: none"> • Misure di radon in edifici scolastici distribuiti su tutto il territorio regionale • Prelievo di campioni di rocce per la classificazione delle litologie piemontesi sulla base della radioattività naturale.
Tipologia edifici	Edifici scolastici
Numero punti monitorati	271 misure di concentrazione e 136 campioni di rocce
Piani interessati	interrati, seminterrati, piano terra e primo piano
Criterio di campionamento	Casuale con criterio statistico che tiene conto della rappresentatività territoriale
Periodo di misura	Annuale (suddiviso in due semestri)
Conclusioni	
Le misure di concentrazione radon effettuate negli edifici scolastici concorrono ad aumentare la conoscenza territoriale della distribuzione del radon. Le misure di spettrometria gamma effettuate sui campioni di rocce permettono di ridisegnare le classi litologiche del Piemonte sulla base della radioattività naturale.	

Tabella 3.2-13: monitoraggio scuole e classificazione radiologica delle litologie

Arpa Piemonte dispone allo stato attuale di 2470 misure di radon. Si è, quindi, inevitabilmente creata una certa eterogeneità nel campione di misure, dovuta essenzialmente alla distribuzione temporale dei monitoraggi, alle diversità sulle tipologie dei siti misurati e soprattutto ai differenti obiettivi delle campagne (mappatura, valutazioni dosimetriche, verifiche di legge).

Nel seguente paragrafo si trattano le principali elaborazioni apportate alla base dati al fine di armonizzarla e renderla particolarmente adatta allo scopo del progetto di mappatura.

3.3 Criteri e metodi di normalizzazione

Analizziamo la composizione della base dati osservando i piani monitorati (Figura 3.3-1) e delle tipologie di edificio (Figura 3.3-2).

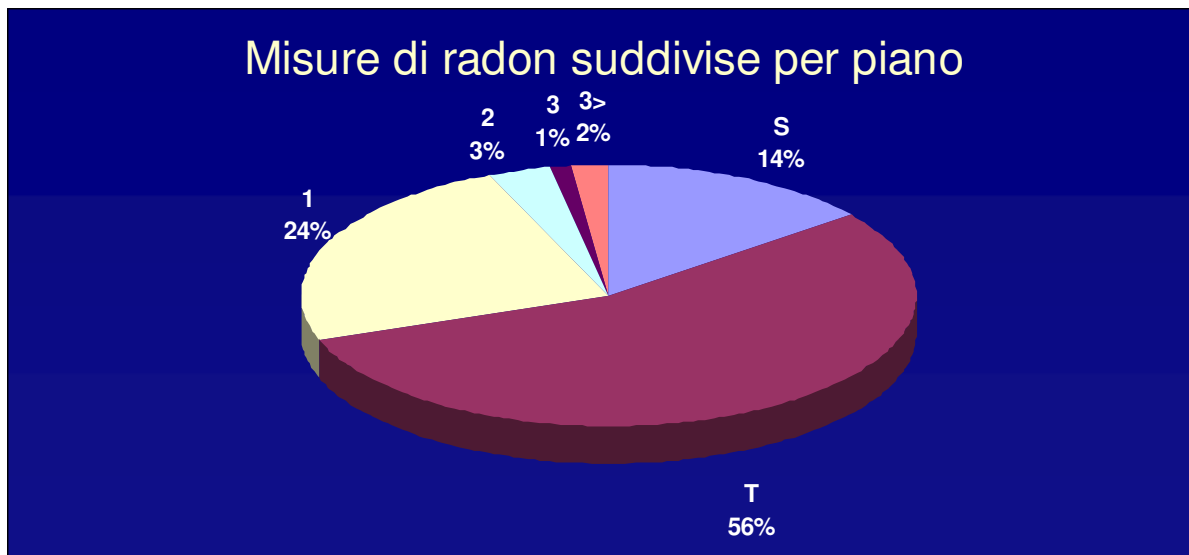


Figura 3.3-1: composizione percentuale del campione di misure Rn suddivisa per piano abitativo

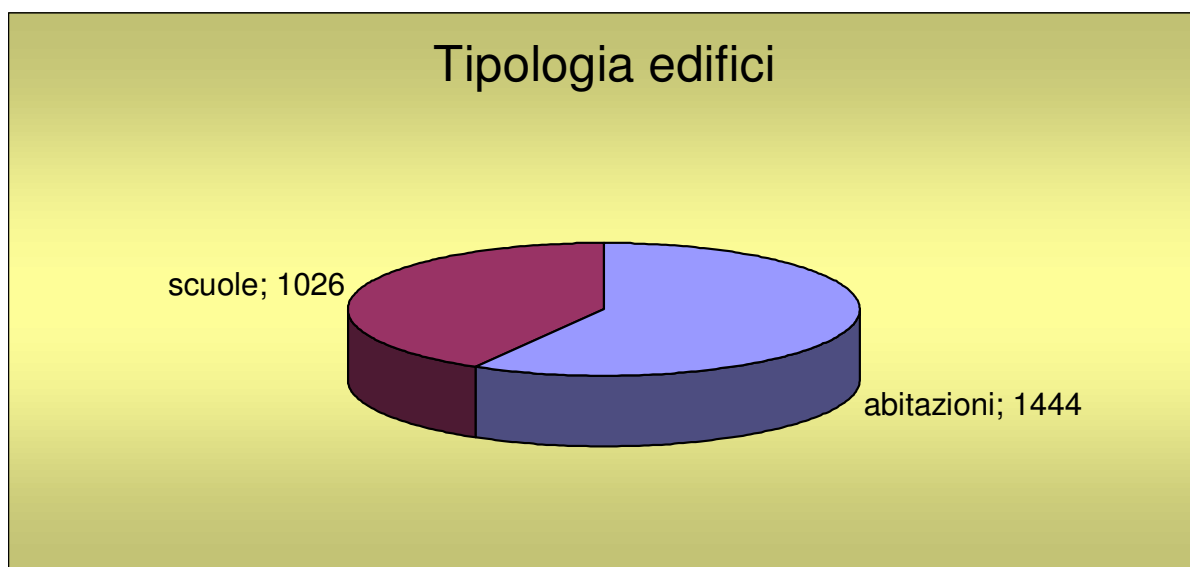


Figura 3.3-2: composizione del campione di misure Rn suddivisa per tipologia edificio

I criteri adottati per elaborare la base dati sono schematizzati nel seguente diagramma di flusso (Figura 3.3-3).

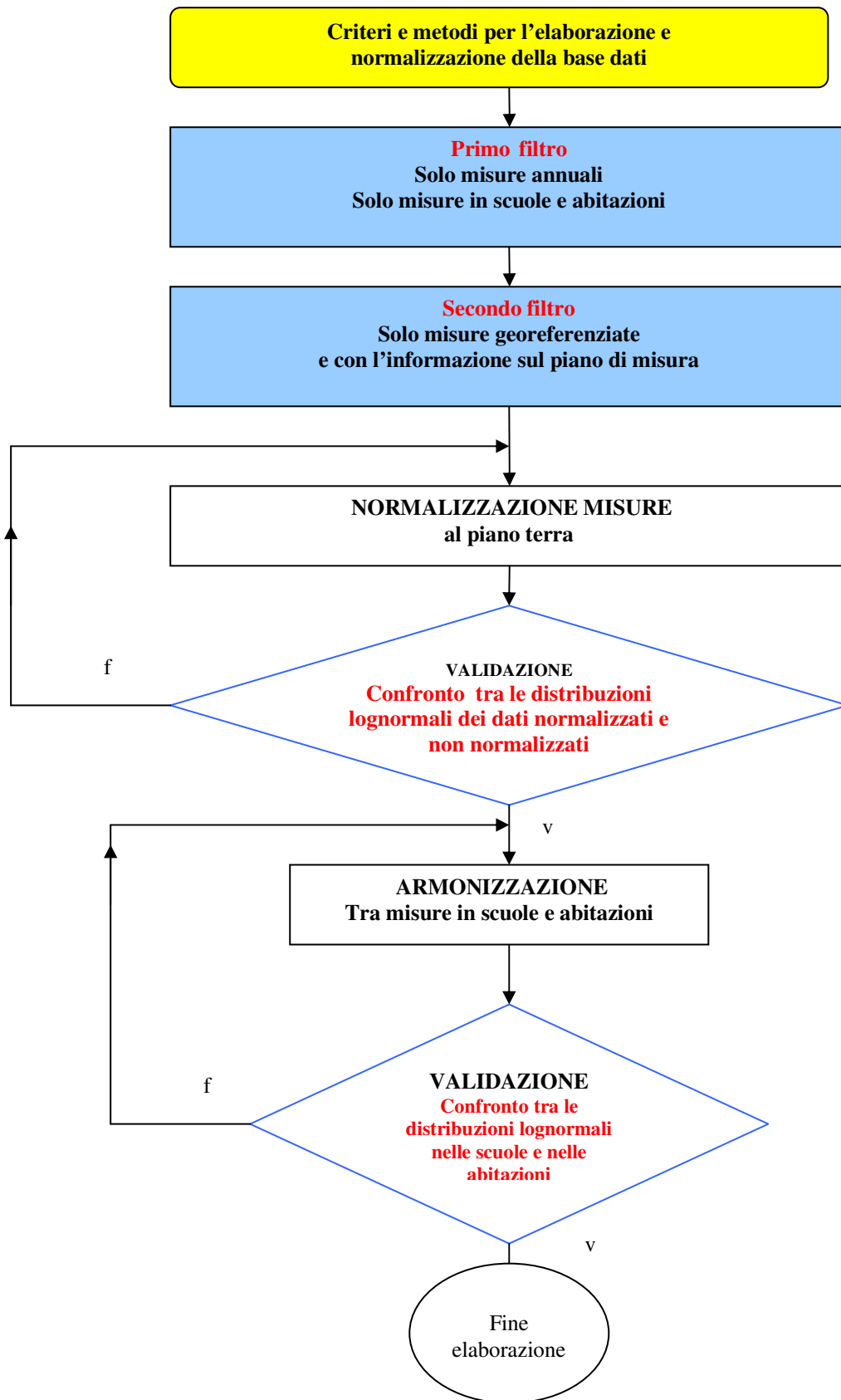


Figura 3.3-3: diagramma di flusso dei dati

Le prime fasi di elaborazione della base dati sono consistite nell'eliminare tutti quei dati per cui erano incomplete le informazioni basilari quali l'esatta georeferenziazione e il piano in cui si è svolta la misura.

Inoltre, sono state eliminate tutte le misure non riconducibili ad un periodo di monitoraggio annuale.

La maggiore disomogeneità tra i gruppi di dati che costituiscono il campione complessivo regionale resta quindi rappresentata dal piano abitato (Figura 3.3-1) e poi dalla tipologia abitativa (Figura 3.3-2).

Assumendo come ipotesi di lavoro il fatto che il dato al piano terra sia di per sé quello più strettamente correlato alle proprietà di emanazione del radon dal suolo, per armonizzare la base dati e giungere quindi ad un database il più possibile omogeneo e compatibile ai criteri di mappatura radon, è stato effettuato un trattamento dei dati al fine di normalizzare le misure al piano terra. Come è noto, infatti, la concentrazione radon tende a diminuire salendo nei piani alti degli edifici perché ci si allontana dal suolo che ne è la fonte principale, come si evince dallo studio della distribuzione lognormale delle concentrazioni di radon al variare del piano in cui è stata effettuata la misura (Figura 3.3-4).

Per l'effettuazione delle procedure di normalizzazione, si è preso come riferimento il campione di 436 punti di misura ottenuti a seguito della Campagna Nazionale radon in quanto rappresentativo dell'intero territorio piemontese.

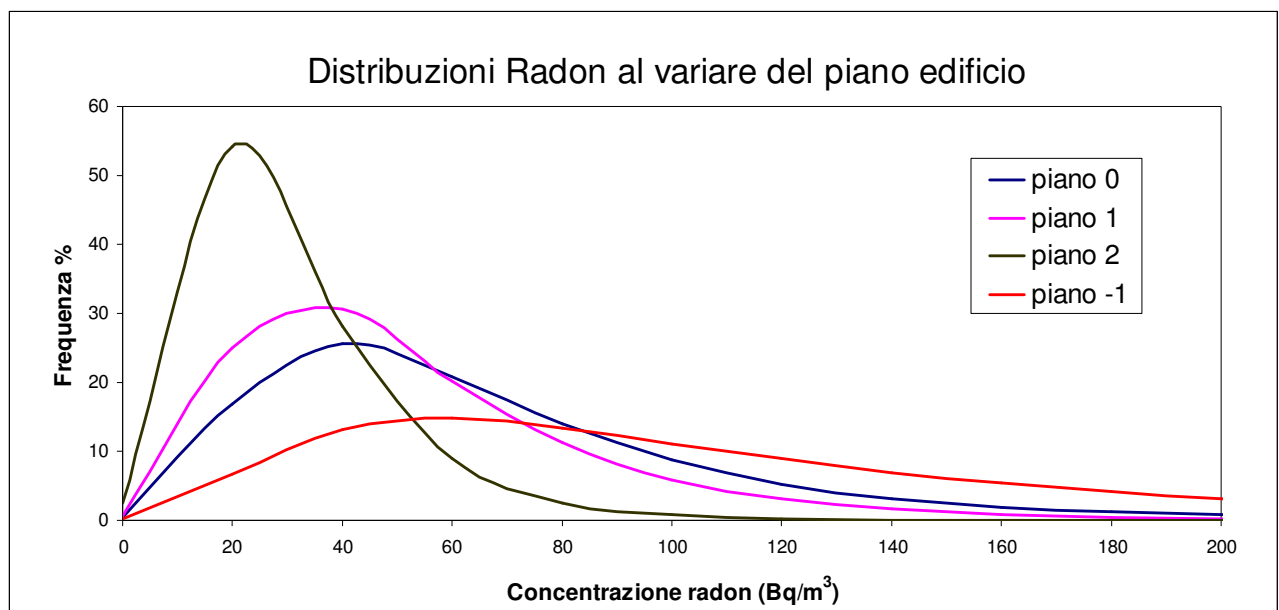


Figura 3.3-4: distribuzioni radon al variare del piano

Partendo quindi da un'ipotesi di distribuzione lognormale per le concentrazioni radon al piano terra:

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

dove μ è il logaritmo della media geometrica e σ è il logaritmo della deviazione standard geometrica e considerando lineare la relazione tra la concentrazione al piano terra (C_{PT}) e la concentrazione ad un generico piano (C_{PX}):

$$C_{PX} = kC_{PT}$$

si ottiene la seguente distribuzione al piano X:

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

dove $\mu_{PX} = \ln k + \mu_{PT}$ e $\sigma_{PX} = \sigma_{PT}$ da cui si ricava

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

dove con MG_{PX} e con MG_{PT} si indicano rispettivamente la media geometrica per i piani X e la media geometrica al piano terra.

Applicando tale criterio di normalizzazione sul campione di misure della Campagna Nazionale si ottiene un buon accordo tra la distribuzione lognormale del sottocampione riferibile ai soli piani terra e la distribuzione del campione intero normalizzato, come evidente dal grafico in Figura 3.3-4 e dai parametri (media, mediana e deviazione standard) riportati nella Tabella 3.3-1 .

Dati Campagna Nazionale	tutto il campione	campione piani terra	campione normalizzato al piano terra
media aritmetica (Bq/m³)	69,4	76,14	75,84
media geometrica	54,08	67,96	65,47
deviazione standard geometrica	1,67	1,59	1,60

Tabella 3.3-1: parametri della distribuzione ricavati dai dati della campagna nazionale.

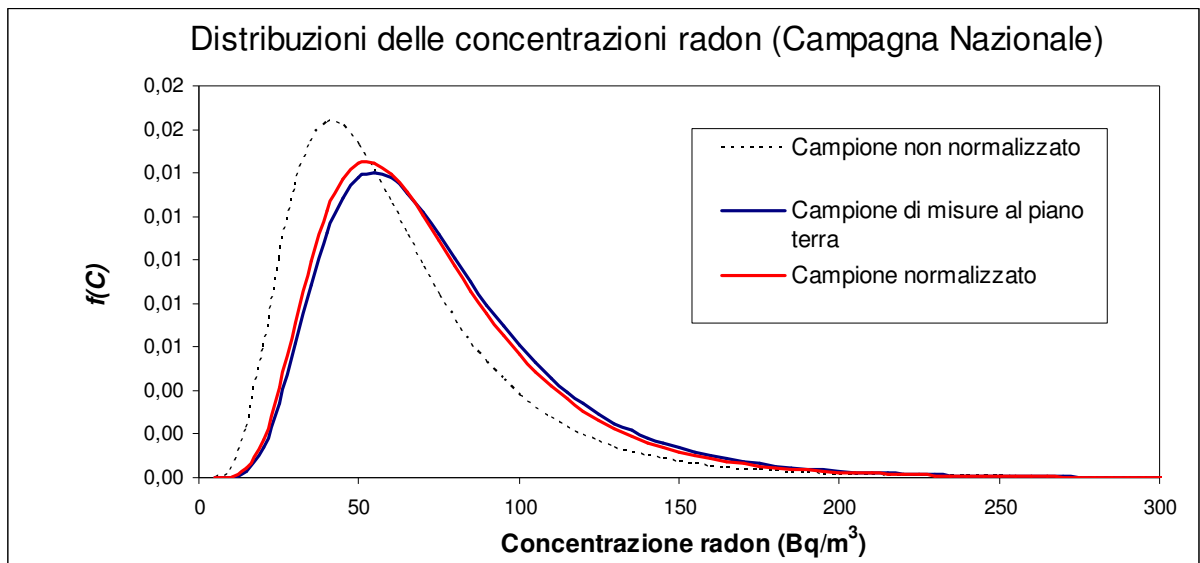


Figura 3.3-5: normalizzazione al piano terra dei dati della Campagna Nazionale

Tale criterio di normalizzazione è stato quindi successivamente esteso all'intera base dati di edifici residenziali.

Particolare attenzione merita ora la verifica delle eventuali differenze tra il campione di misure nelle scuole e quello nelle abitazioni.

Lo stesso criterio utilizzato per normalizzare al piano terra le misure in abitazioni può essere esteso agli edifici scolastici ricalcolando i fattori k sulla base delle misure nelle scuole suddivise per piani (Figura 3.3-6).

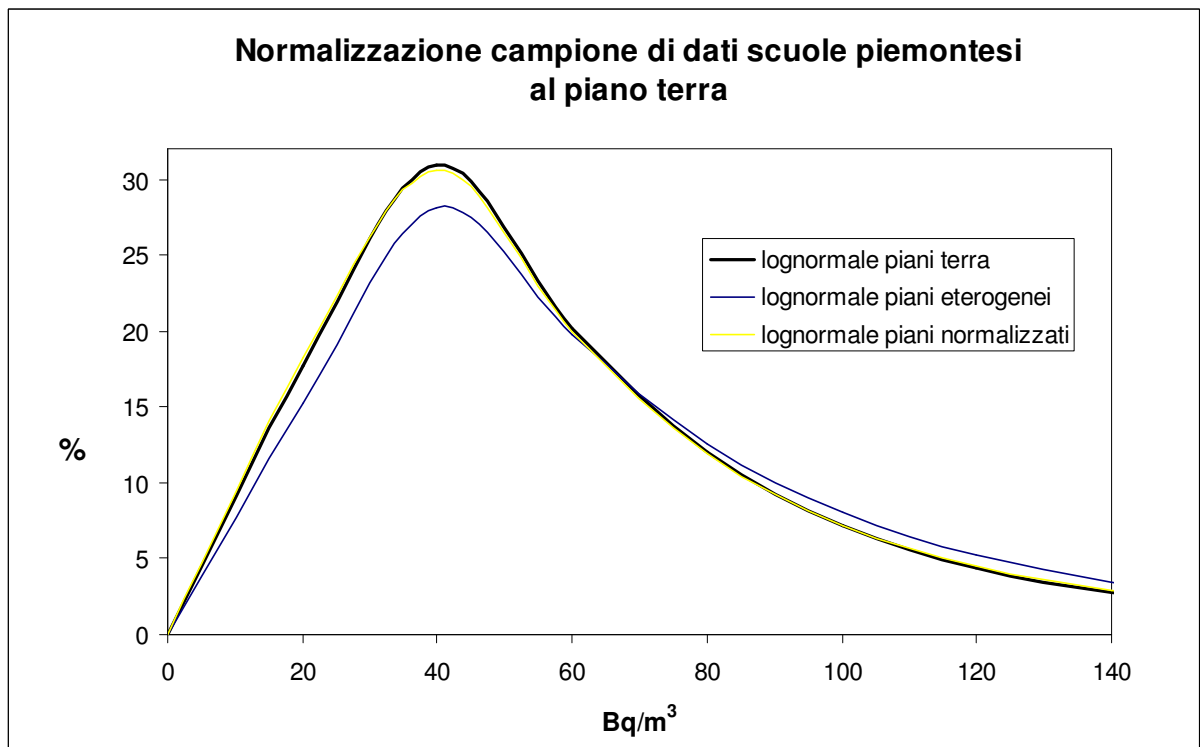


Figura 3.3-6: normalizzazione al piano terra delle misure nelle scuole piemontesi

Da questa prima importante comparazione tra abitazioni e scuole risulta che le correzioni per normalizzare le misure nelle scuole al piano terra sono inferiori a quelle apportate sulle misure delle abitazioni. Il fatto è probabilmente spiegabile con le caratteristiche costruttive (ampi corridoi e scale) presenti negli edifici scolastici, che rendono, nel complesso, più omogenea l'aria circolante in tali edifici rispetto agli ambienti residenziali.

Il passo successivo è stato quindi normalizzare le misure nelle scuole a quelle delle abitazioni. Verificando che il criterio di campionamento effettuato sulle scuole è comparabile a quello adottato durante la scelta delle abitazioni nella Campagna Nazionale si è adottata una normalizzazione basata sulla trasformazione:

$$C_{abitazioni} = C_{scuole} + \Delta C$$

dove

$$\Delta C = MG_{abitazioni} - MG_{scuole}$$

Il risultato dell'applicazione alla base dati di tale trasformazione è visualizzato nel seguente grafico che riporta le distribuzioni lognormali riferite al campione di misure non normalizzato e al campione invece normalizzato, da confrontare con la distribuzione dei dati nelle abitazioni.

Il risultato di tale normalizzazione appare quindi soddisfacente considerate le incertezze introdotte dalle differenti modalità di campionamento dei punti nelle diverse campagne in edifici scolastici e abitazioni residenziali (Figura 3.3-7).

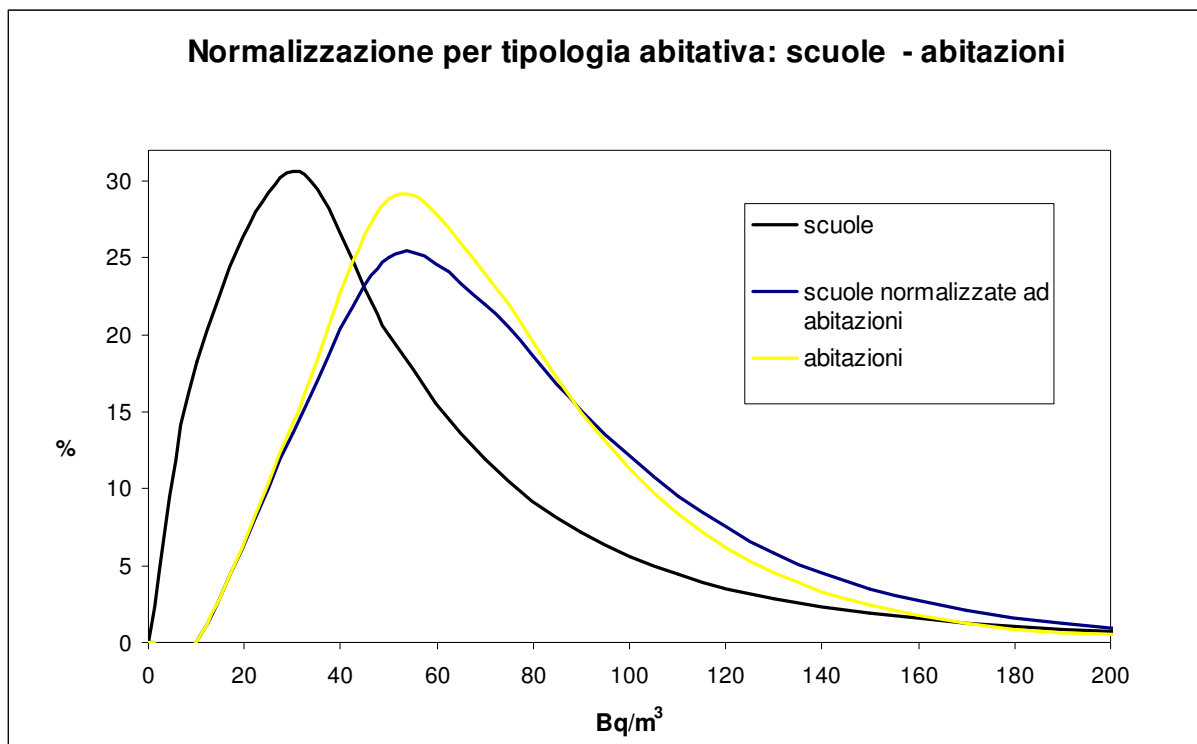


Figura 3.3-7: normalizzazione per tipologia abitativa

3.4 Trasformazione della distribuzione di concentrazione radon ai piani terra alla distribuzione radon in Piemonte

Si vuole a questo punto affrontare il problema inverso a quello specificato nel precedente paragrafo 3.3, cioè quello di operare sulle misure ottenute dai dati riferiti al solo piano terra, fino ad ottenere la media complessiva, cioè la media che tiene conto di tutte le abitazione e non solo di quelle che si trovano al piano terra; un parametro che tiene, cioè, intrinsecamente conto della suddivisione su piani della popolazione. Possedere la distribuzione di radon su piani generici in una determinata area permette di stimare l'esposizione della popolazione residente in quel luogo (paragrafo 4.7).

Supponendo di avere un campione 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.

Dalla distribuzione della concentrazione del radon al piano terra, in una data area (comunale), si ricava la distribuzione ad un generico piano X semplicemente utilizzando un nuovo coefficiente di normalizzazione così definito:

$$k^{-1} = \frac{MG_{PT}}{MG_{PX}}$$

Si ottengono quindi per ogni area considerata N distribuzioni, una per ogni piano abitativo.

Per ottenere infine un'unica distribuzione valida per una composizione di piani misti si definisce una nuova variabile aleatoria formata dalla media ponderata tra le medie delle concentrazioni radon per differenti piani e le probabilità di incidenza degli stessi piani, ottenute dalla distribuzione dei piani abitativi in Piemonte.

Quest'ultima distribuzione può essere ricavata dal campione di abitazioni estratto in occasione della campagna Nazionale che in prima approssimazione può essere adottato anche per aree più ristrette del territorio regionale come per esempio i Comuni.

La media complessiva è stata quindi ricavata per ogni Comune del Piemonte (Allegato D). Dalle medie comunali complessive (Mc) si può infine ottenere la distribuzione complessiva del Piemonte, ponderando le distribuzioni comunali con la popolosità di ogni area considerata (paragrafo 4.7).

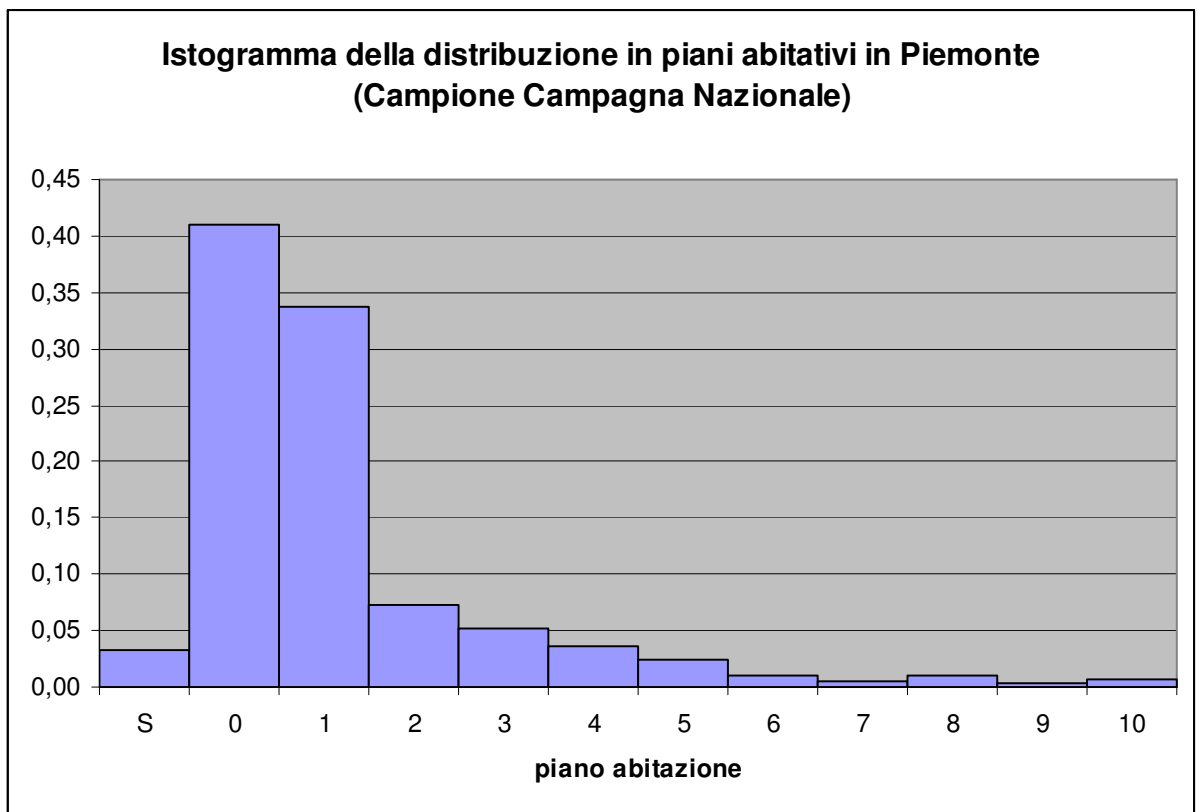


Figura 3.3-1: istogramma della distribuzione dei piani abitati in piemonte

4 DALLA DISTRIBUZIONE TERRITORIALE DELLE MISURE ALLA MAPPATURA

4.1 Rappresentazione cartografica dei dati normalizzati nelle unità territoriali di mappatura (Comuni)

Il campione di misure radon selezionato (misure annuali) e normalizzato (piano terra) secondo i criteri descritti nei precedenti capitoli è stato quindi rappresentato in forma cartografica mediante l'utilizzo di un Sistema Informativo Geografico (GIS) che, nel nostro caso, ha impiegato come coordinate geografiche il sistema WGS84. Il WGS84 (World Geodetic System 1984) è un sistema di riferimento cartesiano usato per descrivere la terra e costituisce un modello matematico della superficie terrestre da un punto di vista geometrico, geodetico e gravitazionale, costruito sulla base delle misure e delle conoscenze scientifiche e tecnologiche disponibili al 1984. È attualmente uno standard molto diffuso. La Regione Piemonte ha approvato con D.G.R. n. 16-8136 del 30/12/2002 l'adozione del sistema WGS84 per il riferimento dei dati cartografici di propria competenza.

Nella cartina (vedi allegato A) sono rappresentate le singole misure normalizzate, disponibili al giugno 2008. A titolo puramente esplicativo il colore dei punti che individuano sulla cartina le misure è stato differenziato in base ai livelli di concentrazione di radon misurati: blu 0 – 50 Bq/m³; verde 50 – 100 Bq/m³; giallo 100 – 200 Bq/m³; rosso > 200 Bq/m³.

Da questa prima rappresentazione emerge (Figura 4.1-1) che, l'insieme dei comuni al cui interno vi è almeno una misura sperimentale, sono in tutto 353. Tuttavia, quelli invece per i quali sono presenti un numero di misure sufficienti (cioè almeno 4) a calcolare con una certa affidabilità gli opportuni indicatori statistici sono invece assai meno, 128, mentre solo una relativamente esigua minoranza ha un numero di dati > 10. Complessivamente, tenendo quindi conto che il numero totale dei comuni piemontesi è 1206, restano senza misure sperimentali attendibili un numero assai cospicuo di municipalità, per le quali, in attesa di disporre di nuove misure, dovrà essere fatta una diversa valutazione, che verrà descritta e discussa in dettaglio a partire dal paragrafo 4.3. Tuttavia, prima di affrontare questo problema, occorre specificare gli indicatori che verranno usati, sia in un caso che nell'altro, per la classificazione territoriale del territorio piemontese dal punto di vista del radon: è quello che verrà fatto nel seguente paragrafo 4.2.

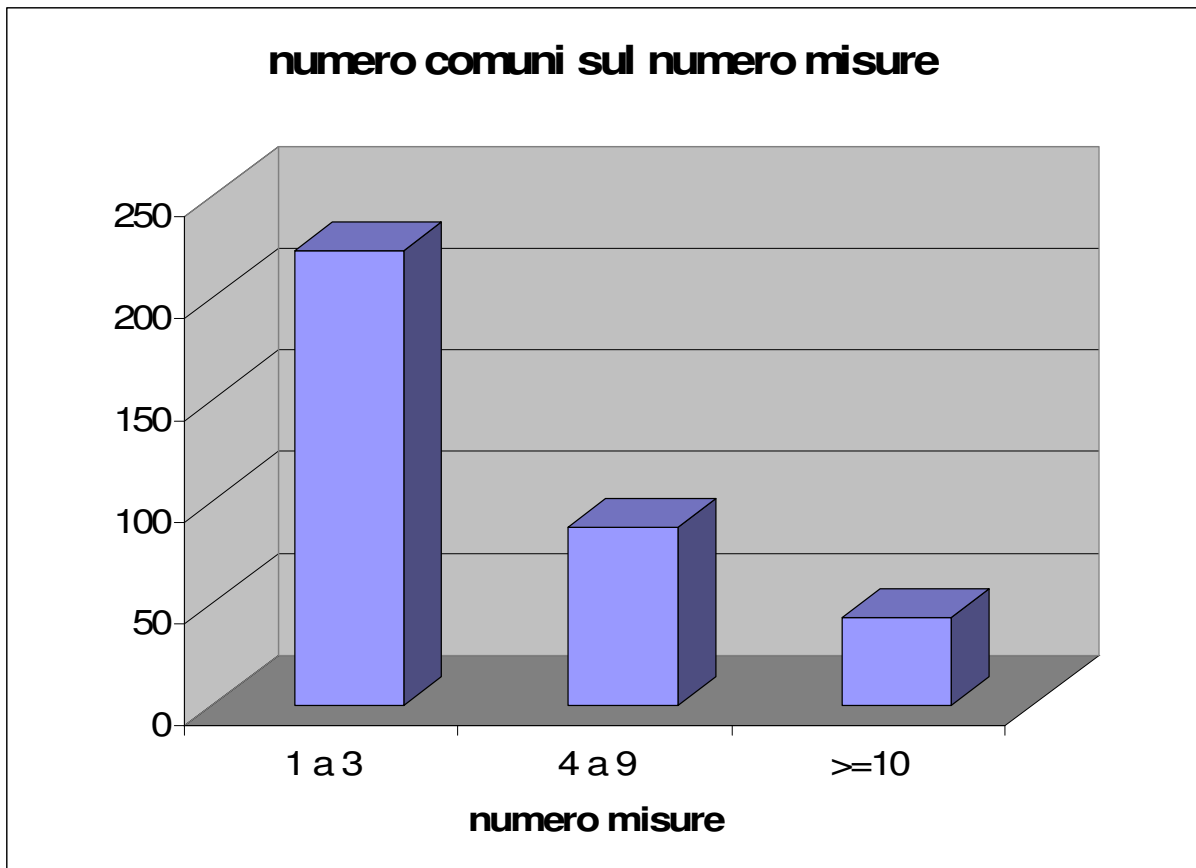


Figura 4.1-1: istogramma della distribuzione della numerosità del campione nei 353 Comuni del Piemonte per i quali si hanno a disposizione dati radon validati

4.2 Definizione indicatori per le unità territoriali di mappatura: criteri e metodi di calcolo

4.2.1 Aspetti generali

È noto che i dati sperimentali del radon indoor tendono a distribuirsi secondo una distribuzione che, approssimativamente, può dirsi log-normale. Per questo motivo, la prima elaborazione deve preoccuparsi di definire, per ciascuna unità di campionamento, le rispettive distribuzioni log-normali delle concentrazioni c , la cui forma matematica è la seguente:

$$f(c) = \frac{e^{-\frac{(\ln c - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot c} \quad (4.1)$$

La stima dei parametri che caratterizzano una log-normale può essere fatta, a partire dai dati sperimentali c_i , nei seguenti modi.

Si calcola anzitutto la media geometrica MG :

$$MG = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n c_i} \quad (4.2)$$

che può anche essere stimata, alternativamente, tramite la seguente espressione:

$$MG = e^{\mu} \quad (4.3)$$

dove,

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(c_i) \quad (4.4)$$

e c_i è la concentrazione relativa all' i -esimo dato sperimentale. È interessante osservare che la media geometrica, nel caso della distribuzione log-normale, coincide con la mediana.

La deviazione standard geometrica, DSG , altro parametro fondamentale, si calcola invece:

$$DSG = e^{\sigma} \quad (4.5)$$

con σ data da:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(c_i) - \mu]^2} \quad (4.6)$$

In taluni casi, laddove il numero di dati per unità di campionamento è esiguo, può essere problematico calcolare in modo sufficientemente accurato, in particolare la DSG .

Nonostante il fatto che vi siano indicazioni in base alle quali talvolta la DSG tende, sia pur lievemente, ad aumentare per valori particolarmente elevati delle concentrazioni, tale parametro non presenta normalmente notevoli variazioni e può quindi essere considerato costante e valutato sulla base di dati aggregati (vedi paragrafo 4.5).

A partire dalla distribuzione log-normale, si può calcolare, in ogni unità di campionamento, la percentuale di abitazioni $P_{\%LR}$ che superano un determinato livello di riferimento L_R .

Si tratta in buona sostanza di valutare numericamente la seguente espressione:

$$P_{\%LR} = 100 \cdot \int_{L_R}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(\ln c - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot c} dc \quad (4.7)$$

Per calcolare in modo semplice tale percentuale, si può introdurre la deviana normale standardizzata:

$$Z = \frac{\ln(L_R) - \ln(MG)}{\ln(DSG)}$$

e si confronta questo valore con le tabelle della probabilità della distribuzione normale.

Tale indicatore è di notevole importanza poiché quantifica l'entità del rischio in ogni unità di campionamento.

Un ulteriore indicatore in aggiunta ai precedenti è rappresentato dalla media aritmetica M la cui stima si ottiene sperimentalmente da:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (4.8)$$

Questo parametro, pur non essendo caratteristico del tipo di distribuzione dei dati di radon (log-normale), può tuttavia essere impiegato in ragione della sua semplicità e del suo significato immediato e facilmente comprensibile anche da parte dei non addetti ai lavori. D'altra parte, se si assume che la DSG sia nota, anche il parametro M può essere stimato, invece che dalla (4.8), a partire dalla MG . Infatti si può dimostrare che:

$$M = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} dx = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} = MG \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2}} \quad (4.9)$$

In generale, quale che sia l'indicatore utilizzato, è importante valutare il grado di confidenza con cui tale indicatore viene calcolato. Ciò è particolarmente rilevante quando si confronta il valore dell'indicatore fra due unità di campionamento diverse o con una soglia, ad esempio il Livello di Azione. Non bisogna infatti dimenticare che l'incertezza associata a un indicatore utilizzato per la classificazione di aree a rischio, induce una certa probabilità di classificare in modo scorretto tali aree. A questo proposito sono stati sviluppati appropriati metodi statistici per valutare le probabilità di tali "misclassificazioni".

4.2.2 Scelta degli indicatori

Gli indicatori che verranno impiegati per rappresentare la mappatura del radon in questo lavoro sono tutti correlabili a una funzione di distribuzione delle concentrazioni che viene associata a ciascuna unità territoriale. Si è assunto inoltre che la forma di queste distribuzioni sia log-normale: ciò consente infatti, a partire dai parametri che caratterizzano la distribuzione, un calcolo semplice degli indicatori stessi.

Gli indicatori che sono stati scelti per la rappresentazione cartografica del radon in Piemonte sono di 2 tipi:

- 1) il valor medio M delle concentrazioni;
- 2) la percentuale $P_{\%LR}$ di abitazioni eccedenti un dato livello di riferimento LR

Tali indicatori verranno calcolati o stimati per tutte le unità di campionamento, cioè per tutti i comuni del Piemonte.

Il calcolo pratico di tali indicatori si differenzia a seconda del fatto che per l'unità di campionamento (Comune) si disponga o meno di dati sperimentali.

Nel caso in cui i dati sperimentali disponibili siano almeno 4 per ogni unità, si sono adottati i seguenti approcci:

1) Per il calcolo del valor medio M , nei casi in cui il numero di misure disponibile per comune sia > 10 si è proceduto al semplice calcolo del valore medio sperimentale, secondo la (4.8).

2) Laddove invece il numero di dati disponibili era compreso tra 4 e 10 si è preferito stimare la media a partire dalla (4.9), che a sua volta è stata calcolata tramite i valori sperimentali di μ e di σ , ricavabili dalla (4.4) e dalla (4.6), rispettivamente.

Un approccio di questo tipo è giustificato dal fatto che, essendo i valori delle concentrazioni di radon distribuiti in modo log-normale, la stima di μ è da considerarsi più robusta di quella della media aritmetica.

Il calcolo della percentuale $P_{\%LR}$ è stato invece effettuato valutando numericamente l'integrale della funzione di distribuzione, dato dalla (4.7): tale calcolo, eseguito con il programma Mathcad, presuppone ovviamente la definizione per ogni unità territoriale della funzione di distribuzione data dalla (4.1), i cui parametri μ e di σ , sono ricavabili semplicemente dalle già citate relazioni (4.4) e (4.6).

In caso di assenza o insufficienza di dati sperimentali disponibili (< 4), gli indicatori M e $P_{\%LR}$ sono comunque stati stimati a partire dalla funzione di distribuzione, facendo uso sempre della (4.9) e della (4.7). In questo caso, però, la particolarità e la difficoltà è consistita nella stima dei parametri μ e di σ . L'approccio seguito, basato su considerazioni geolitologiche, è descritto nei seguenti paragrafi 4.3 e 4.4.

Il significato di questi indicatori sarà ovviamente strettamente correlato al significato delle distribuzioni delle concentrazioni a cui essi sono legati: se, come è il nostro caso, la distribuzione delle concentrazioni con cui si sta lavorando è relativa alle concentrazioni di radon indoor al piano terra, gli indicatori che ad essa sono correlati saranno riferiti ovviamente alle concentrazioni al piano terra. Per questo motivo, ad esempio, non si potranno quindi ricavare direttamente, a partire da questi dati, informazioni relative all'esposizione della popolazione al radon. La mappa che scaturirà da questa approccio non potrà dunque essere utilizzata *sic et simpliciter* per effettuare valutazioni di tipo dosimetrico e di quantificazione dell'esposizione, potrà invece fornire indicazioni sulla "vulnerabilità" di alcune aree del territorio regionale rispetto al radon.

4.3 Il problema della stima degli indicatori in unità territoriali prive di dati sperimentali: approccio geostatistico e modello di correlazione geolitologica

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 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.

Si è quindi partiti dalla considerazione della carta geologica del Piemonte 1:100000, nel quale sono rappresentati una quarantina di litotipi (Figure 4.3-1 e 4.3-2).

A questo punto sono stati sovrapposti alla litologia piemontese i dati radon georeferenziati. È stato così possibile, a partire dai dati sperimentali radon che ricadono in ciascuna classe, calcolare una “media litologica” ML_k per ogni generica classe litologica k (Figura 4.3-3). 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. Sovrapponendo infatti alla classi litologiche la carta del Piemonte con le suddivisioni amministrative municipali, si ottiene una suddivisione del territorio di ciascun Comune in termini di classi geologiche (Figura 4.3-4).

La formalizzazione matematica di un modello per il calcolo del valor medio della concentrazione di radon M_j per un generico Comune j nel cui territorio si trovano un numero p di classi litologiche, può essere espressa dalla seguente formula:

$$M_j = \sum_{k=1}^p \frac{AL_k \cap AC_j}{AC_j} \cdot ML_k \quad (4.10)$$

dove AL_k è l’area della k -esima area litologica che ricade nel territorio comunale j , avente un’estensione complessiva AC_j , mentre ML_k è la media litologica tipica della k -esima area litologica.

L’utilizzo pratico della (4.10) può evidentemente essere giustificato solo presupponendo l’esistenza di una correlazione tra classi litologiche e radon. D’altra parte, che una qualche correlazione effettivamente esista non è generalmente messo in dubbio da nessuno; quello che è più problematico è stabilire se:

- a) la correlazione classi litologiche – radon possa essere impiegata per costruire un modello predittivo
- b) la suddivisione in classi litologiche così come è fornita dalla carta geologica del Piemonte 1:100000 che abbiamo usato, sia idonea allo scopo

Per dare una risposta esauriente a questi quesiti occorre fare un ulteriore supplemento di indagine, andando a studiare in maggior dettaglio la suddivisione in classi litologiche, anche con studi e misure radiometriche su campioni di rocce: è questo l’argomento del successivo paragrafo 4.4.

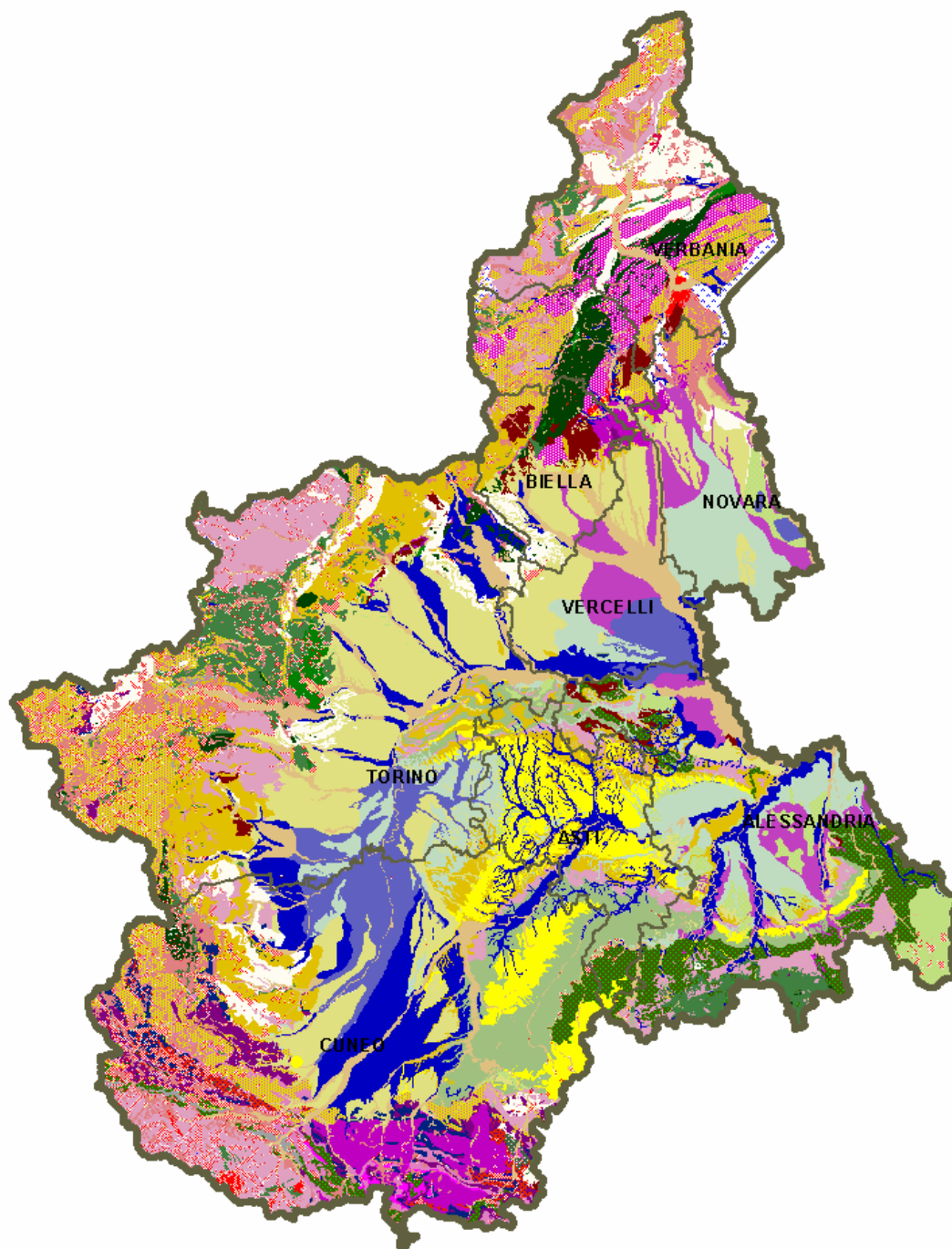


Figura 4.3-1: carta geologica della Regione Piemonte, scala 1:100000

- ▲▲▲▲ Laghi, nevi permanenti e ghiacciai
- Detrito di falda, coni detritici e conoidi
- Dep. torbosi e lacustri recenti
- Dep. fluviali ghiaiosi attuali
- Dep. fluviali ghiaioso-sabbioso-limosi, antichi e terrazzati
- Dep. fluviali a ciottoli prevalenti, con sabbie grosse e limi
- Dep. fluviali prevalentemente sabbiosi
- Dep. fluviali sabbioso-limosi debolmente alterati
- Dep. fluviali limoso-argillosi con lenti ghiaioso-sabbiose, loess argillificato, "ferretto"
- Alternanze di dep. fluviali ghiaiose rugginose e di sabbie giallastre con lenti argillose e argille caoliniche di alterazione
- Dep. fluvio-glaciali ghiaiosi con trovanti, con argille di alterazione ("ferretto")
- Dep. glaciali generalmente non alterati
- Dep. glaciali a ciottoli alterati allora intensamente ferrettizzati
- Marne ed argille con sabbie
- Sabbie con intercalazioni ghiaiose, marnose ed arenacee; calcareniti e calciruditi poco cementate
- Formazione "Gessoso-solfifera"; dolomie cariate e calcari cariati
- Gessi
- "Pietra da canton?" e calcari marnosi con interc. di calcari, marne siltose ed arenarie
- Conglomerati ed arenarie
- Alternanze di calcari, calcari marnosi, calcari arenacei, argille e marne
- Marne sabbioso-siltose ed argillose
- Calcari, calcari marnosi e con selce
- Calcari "massicci"
- Dolomie e calcari dolomitici
- "Flysch"
- Quarziti, quarzareniti e conglomerati quarzosi, quarzocisti
- Scisti sericitici
- Calcescisti, miascisti, gneiss minuti, argilloscisti
- Miascisti e filladi
- Miascisti grafitici
- Anfiboliti, serpentiniti, prasiniti
- Kinzigiti e gneiss occhiadini ed anfibolici associati
- Granuliti basiche ed anfiboliti associate, dioriti, diabasi e metagabbri
- Lherzoliti e peridotiti
- Gneiss occhiadini intensamente fratturati e gneiss minuti
- Gneiss occhiadini ed ortogneiss poco o nulla fratturati
- Porfidi e porfidi alterati
- Rioliti e tufi riolitici
- Andesiti e tufi andesitici; tufi
- Marmi saccaroidi, dolomitici e calcefiri
- Graniti alterati con potente copertura di sabbie arcose
- Graniti massicci privi di copertura ed alterazione
- Sieniti, monzoniti, dioriti quarzifere e granodioriti
- Apliti e pegmatiti
- Argille

Figura 4.3-2: classificazioni litologiche della carta geologica 1:100000 della Regione Piemonte

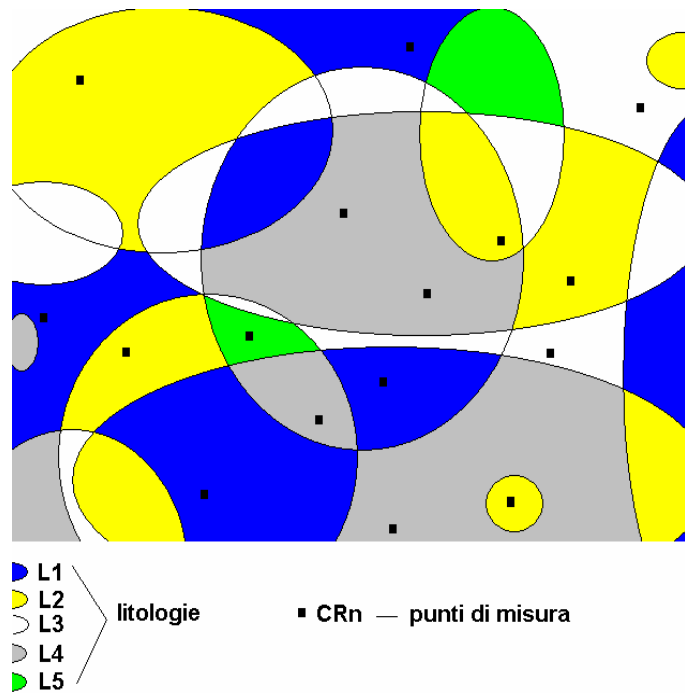


Figura 4.3-3: porzione generica di una mappa nella quale sono evidenziate diverse litologie e la localizzazione dei punti di misura sperimentali (CRn)

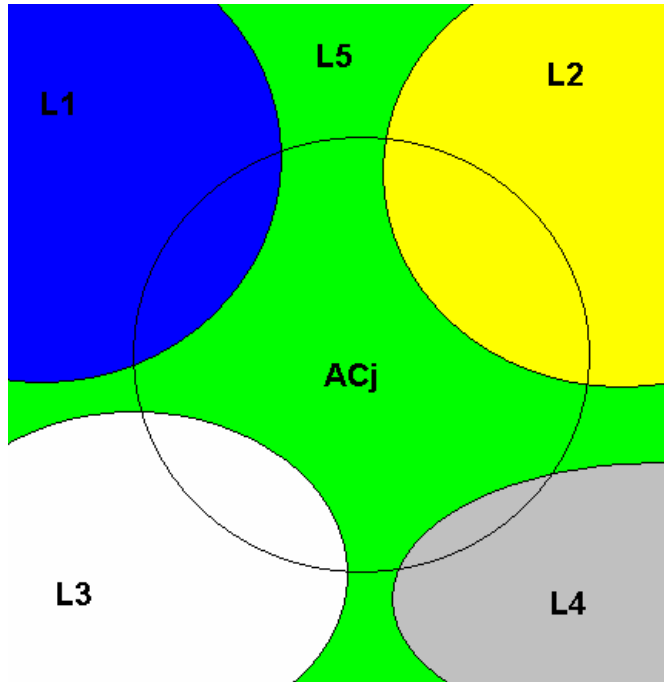


Figura 4.3-4: porzione generica di mappa nella quale è evidenziata l'area di un Comune AC_j (delimitata da un cerchio) nel quale sono presenti diverse tipologie litologiche

4.4 Litologia e presenza di radon: studi di correlazione e indagini sperimentali

Una prima verifica volta a mettere in evidenza l'esistenza di una correlazione tra classi litologiche e radon può essere fatta semplicemente confrontando, per tutti quei Comuni nei quali sono disponibili dati sperimentali, il valor medio comunale M_j ottenuto sperimentalmente (impiegando cioè, a seconda dei casi, la 4.8 o la 4.9) con quello calcolato a partire dalle singole medie litologiche ML_k (cioè tramite l'equazione 4.10).

Nel grafico (Figura 4.4-1) che segue è rappresentata graficamente la correlazione tra questi valori.

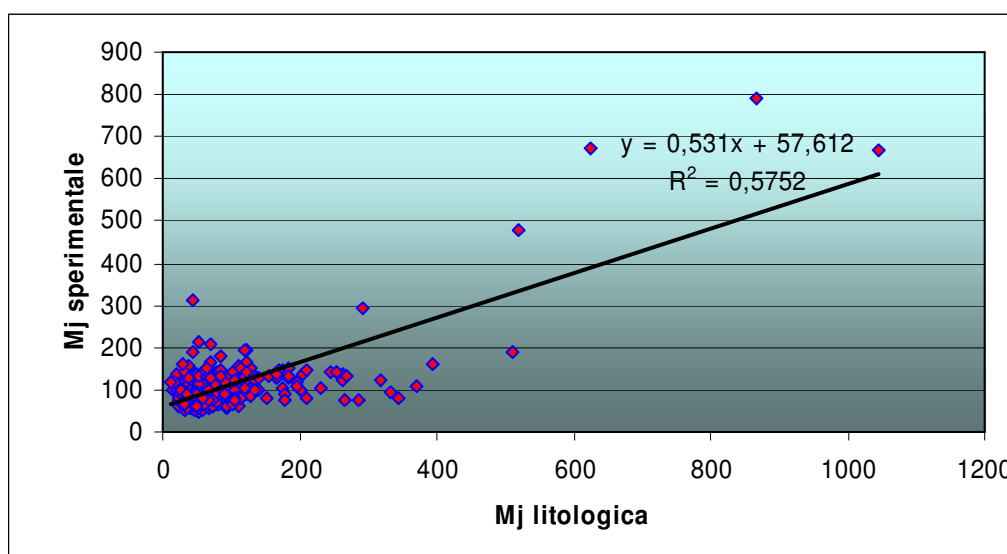


Figura 4.4-1: correlazione tra i valori sperimentali M_j (Bq/m^3) di un generico Comune j e le corrispondenti stime litologiche (vedi equazione 4.10)

Come si vede visivamente dal grafico e dal valore del coefficiente $R^2 = 0,5752$, la correlazione ottenuta può considerarsi già abbastanza soddisfacente e sembra quindi giustificato l'impiego della 4.10 per la stima delle medie radon laddove non vi siano, o non siano sufficienti, i dati sperimentali.

Per cercare di affinare la correlazione litologica e aumentare la sua affidabilità, ci si è posti il problema di operare una classificazione litologica ad hoc per il radon. A questo scopo è stato intrapreso uno studio sistematico sulle radioattività naturale presente nelle varie litologie maggiormente diffuse in Piemonte.

Sono state quindi prelevati ben 131 campioni di rocce, caratterizzanti appunto le principali litologie piemontesi, e analizzati mediante spettrometria γ , effettuata con rivelatori al Germanio iperpuro (HPGe).

Nella Tabella 4.4-1 che segue sono riportati i risultati di queste misure: sono evidenziati, in particolare, i dati relativi ai radioisotopi ^{214}Pb e al ^{214}Bi che, essendo i prodotti di decadimento del radon a vita breve, possono essere quindi considerati come gli indicatori del potenziale di emanazione del radon stesso di un ciascun litotipo.

Tabella 4.4-1: contenuto di radioattività (serie dell' ^{238}U) in campioni di rocce rappresentative della geologia piemontese ricavato tramite misure di spettrometria γ con rivelatori HPGe: sono riportati i valori per il ^{214}Pb e il ^{214}Bi

Tipo	Località	^{214}Pb (Bq/kg)	^{214}Bi (Bq/kg)	radioattività
Graniti Porfidi Alcalini	Campiglia Cervo	91,9	104,7	alta
Gneiss occhiadino	Nasca	73,4	66,6	alta
Gneiss occhiadino	Ceresole	68,0	61,8	alta
Porfiroide	Canosio, frazione Preit (CN)	396850 ^(*)	359350 ^(*)	alta
Porfiroide	Canosio	8986	8096	alta
Vulcaniti Roseo	Masserano	72,9	65,7	alta
Gneiss	Vinadio	165,5	149,7	alta
Gneiss	Barge	96,1	83,1	alta
Dioriti Biotitiche	Netro	37,9	34,2	media
Coni di Deiezione	Scodello	35,9	34,4	media
Detriti Ciottolosi	Sordevolo	32,5	30,5	media
Antropizzato	Bozzolo	42,7	38,0	media
Arenaria	Roccoverano	32,8	28,6	media
Detrito Alluvionale	Borgosesia	35,6	32,3	media
Detriti Alluvionali	Quarona	42,5	40,0	media
Detriti Alluvionali	Livorno Ferraris	37,1	38,4	media
Detriti Alluvionali	Saluggia	38,1	35,5	media
Porfidi	Serravalle Sesia	36,3	33,2	media
Calcescisto micaceo	Limone Piemonte	31,5	34,4	media
Ortogneiss	Pamparato	29,9	33,9	media
Scisto Micaceo	Pamparato	28,5	31,6	media
Quartoscisto Micaceo	Pamparato	52,0	48,3	media
Porfiroide quarzo	Frabosa Soprana	37,6	37,9	media
Gneiss Albitici	Locana	61,7	57,2	media
Granito rosa	Vidracco	38,7	39,0	media
Gneiss Occhiadano	Nasca	46,3	42,6	media
Marne Siltoso	Tornese	39,5	35,8	media
Conglomerati Poligeni	Bagnasco	33,4	31,0	media
Quarzoscisti	Garessio	38,6	33,9	media
Marna Argillosa	Cortemilia	34,4	30,2	media
Marna Argilloso	Diano d' Alba	31,5	29,3	media
Marne	Alba	44,1	40,6	media
Serpentite	Vidracco	60,4	55,0	media
Granito Rosa	Vidracco	57,3	50,5	media
Plutone Oligocenico - Diorite	Traversella	39,9	35,3	media
Gneiss Biotitico	Traversella	58,7	51,7	media
Marne Siltose	Carrosio	37,5	25,9	media
Vulcaniti	Masserano	52,9	47,3	media
Gneiss Scistoso	Cannobio	37,5	32,9	media
Marne Siltoso	Tornese	37,0	29,3	media
Gneiss	San Front	35,1	28,7	media
Marne di Sant Agata	Castagnole delle Lanze	26,4	24,4	bassa
Arenaria	Vesime	24,0	22,9	bassa
Marna Argillosa	Monastero Bormida	24,8	28,7	bassa
Granito	Valle San Nicolao	20,0	22,2	bassa
Smarino Galleria	Alagna	21,5	25,5	bassa
Micascisti e Biotite	Valduggia	24,1	26,1	bassa

Tipo	Località	²¹⁴ Pb (Bq/kg)	²¹⁴ Bi (Bq/kg)	radioattività
Marna argillosa	Bubbio	26,7	24,1	bassa
Graniti biotici	Pray	30,8	29,1	bassa
Terrosa Nera	Cavaglià	27,7	24,2	bassa
Argillosa	Cavaglià	21,7	22,0	bassa
Detrito alluvionale	Carisio	21,3	19,4	bassa
Detrito alluvionale	Bronzo	17,5	16,1	bassa
Detr. alluv. fluvioglaciale	Arboreo	30,6	27,4	bassa
Paleosuolo Rosso Aran.	Cigliano	15,9	16,7	bassa
Porfidi Quarziferi	Brusnengo	25,2	25,0	bassa
Scisto Quarzoso	Robilante	27,9	25,7	bassa
Scisto Quarzoso	Robilante	26,5	24,9	bassa
Granito a Clorite	Valdieri	17,8	19,7	bassa
Calcescisto Micaceo	Borgo San Dalmazzo	23,4	22,0	bassa
Scisti Ottrelitici	Frabosa Sottana	23,3	21,8	bassa
Marna - Arenaria	Vicoforte di Mondovì	21,8	24,8	bassa
Marna - Arenaria	Vicoforte di Mondovì	28,1	26,6	bassa
Marna sabbiosa gialla	Mondovì	19,7	17,6	bassa
Calcare Dolomitico	Villanova di Nondovì	25,0	27,2	bassa
Scisto micaceo	Frabosa Soprana	20,1	19,2	bassa
Anfibolite	Locana	20,2	18,3	bassa
Marne Siltosa	Arquata Scrivia	28,3	24,7	bassa
Marne Argillose	Grondona	30,8	29,0	bassa
Siltiti	Gavi	25,8	23,8	bassa
Marne Siltoso	Ponzone	27,1	25,0	bassa
Dolomie e Calcari	Voltaggio	25,3	22,2	bassa
Marne Siltose Siltiti	Cassinelle	27,6	24,5	bassa
Arenaria	Dogliani	19,8	18,2	bassa
Marne Grigio	Murazzano	27,9	25,6	bassa
Arenaria grigia	Murazzano	15,6	14,3	bassa
Sabbia Gialla	Murazzano	19,6	16,9	bassa
Arenarie Grigie	Bossolasco	17,2	15,6	bassa
Sabbie Grigio	Bossolasco	21,1	20,4	bassa
Arenaria	Cortemilia	21,3	19,0	bassa
Marne	Ceva	29,0	25,5	bassa
Arenaria	Monesiglio	18,7	17,5	bassa
Marna Grigia	Monesiglio	18,3	16,9	bassa
Sabbia Giallastra	Diano d' Alba	19,7	17,5	bassa
Gneiss Minuto	Cavaglio Spocchia	30,3	25,7	bassa
Marne Siltose	Arquata Scrivia	30,9	23,5	bassa
Marne Siltose	Cassinelle	20,0	17,3	bassa
Dolomiti e calcari	Voltaggio	23,8	22,3	bassa
Marne Siltose	Ponzone	17,8	15,4	bassa
Siltite	Gavi	19,3	13,1	bassa
Calcescisto	Pragelato	29,1	25,8	bassa
Micascisto	Novalesa	31,4	26,1	bassa
Calcescisto	Sestriere	27,1	19,8	bassa
Micascisto Gneissico	Venasca	22,3	20,6	bassa
Scisti Gneissici	Saluzzo	32,0	26,2	bassa
Marmo Calcareo	Argentera	23,6	21,2	bassa
Calcescisto	Pontechianale	18,7	16,3	bassa
Calcescisto	Capoluogo	30,1	24,9	bassa
Calcescisti Filladici	Prazzo	18,9	16,6	bassa

Tipo	Località	²¹⁴ Pb (Bq/kg)	²¹⁴ Bi (Bq/kg)	radioattività
Micascisti Gneissici	Paesana	22,2	11,9	bassa
Gneiss	Demonte	18,2	15,5	bassa
Diorite Melanocratica	Netro	2,0	2,4	molto bassa
Calcarea Dolomitico	Borgo S. Dalmazzo	6,0	6,6	molto bassa
Calcarea Micaceo	Limone Piemonte	10,9	10,3	molto bassa
Calcarea Micaceo	Roccavione	3,7	4,3	molto bassa
Gneiss Abiotite	Valdieri	13,8	13,3	molto bassa
Quarzite di ponte	Frabosa Sottana	12,6	13,9	molto bassa
Calcarea Dolomitico	Vernante	12,9	12,8	molto bassa
Calcarea Listato	Valdieri	5,4	5,3	molto bassa
Conglomerato Arenaria	Vicoforte	11,6	10,4	molto bassa
Quarziti Conglomerati	Frabosa Soprana	7,4	7,0	molto bassa
Quarziti Arenacee	Frabosa Soprana	6,5	5,6	molto bassa
Anfibolite	Locana	0,8	0,3	molto bassa
Serpentinite	Vidracco	4,1	4,0	molto bassa
Pirosseniti	Balme	1,4	1,2	molto bassa
Zona Piemontese	Ala di Stura	0,3	0,3	molto bassa
Arenarie Fini Siltiti	Carrossio	14,6	12,6	molto bassa
Conglomerato polig.	Bosio	14,2	13,0	molto bassa
Arenarie	Molare	10,3	9,4	molto bassa
Arenaria	Diano d'Alba	13,2	12,5	molto bassa
Arenaria	Molare	11,9	10,6	molto bassa
Conglomerato poligenico	Bosio	12,7	10,9	molto bassa
Micascisto	Caraglio	10,4	9,5	molto bassa
Micascisto Gneissico	Sampeyre	9,6	8,5	molto bassa
Serpentinite	Acceglio	1,5	1,6	molto bassa
Marmo Calcareao	Pradleves	12,9	12,6	molto bassa
Marmo Calcareao	Sambuco	3,2	2,8	molto bassa
Marmo	San Damiano Macra	10,2	9,4	molto bassa
Serpentiniti	Casteldelfino	0,9	1,0	molto bassa
Breccia Calcareao Dolomitica	Dronero	7,1	6,3	molto bassa
Marmo	Castelmagno	10,1	7,7	molto bassa

(*) Mineralizzazioni di Uranio

Analizzando criticamente i dati della Tabella 4.4-1 si è quindi cercato di riclassificare le rocce sulla base dell'indicatore "radioattività"; a tal fine, per semplicità, sono state individuate 4 diverse classi, così definite in base alle concentrazioni C_m (Bq/kg) di ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi nei campioni di roccia, misurate con la spettrometria γ :

- radioattività molto bassa ($C_m < 14$ Bq/kg)
- radioattività bassa ($14 \text{ Bq/kg} \leq C_m < 30$ Bq/kg)
- radioattività media ($30 \text{ Bq/kg} \leq C_m < 60$ Bq/kg)
- radioattività alta ($C_m \geq 60$ Bq/kg)

Alla luce di questo qualitativo raggruppamento, le litologie originarie della carta geologica piemontese 1:100000 sono state analizzate e quindi riclassificate; in generale sono stati operati alcuni accorpamenti tra diverse classi litologiche in quanto una loro differenziazione non pareva giustificata ai fini del loro potenziale di emanazione radon. Dalle analisi della concentrazione di attività dei prodotti di decadimento dell'uranio si evincono infatti alcune affinità tra le classificazioni litologiche (Figura 4.3-2, litocave).

Ad esempio le classi costituenti il Bacino Terziario Ligure Piemontese sono caratterizzate da valori medio bassi. Le formazioni carbonatiche mostrano bassi contenuti di radioattività come pure i calcescisti piemontesi. I porfidi e gli scisti sericitici o quarzoso seritici contengono in genere un tasso molto elevato di mineralizzazione a uranio. Tra i valori ad alto contenuto di mineralizzazioni uranifere spiccano l'area plutonica di sienite (sienite della Balma) in Valle Cervo ed alcune ben note località della provincia di Cuneo e del Pinerolese (Barge).

Nella seguente Tabella 4.4-2 è riportata la classificazione litologica originaria e quella radon-specifica derivante dall'analisi critica dei dati geologici e radiometrici: la classificazione litologica originaria è riportata nella prima colonna ed è indicata con numeri progressivi, mentre nell'ultima, indicata con le lettere, è riportata quella nuova. In questo modo si è passati da una classificazione litologica che distingueva 44 classi ad una più semplice che prevede solo 26 classi.

Tabella 4.4-2: classificazione litologica originaria (litocave) nella prima colonna e classificazione radon-specifica; le classi raggruppate sono state evidenziate con diversi colori

Classe litologia	Descrizione	Classi affini	Codice raggruppamento
1	detrito di falda, con detritici e conoidi di deiezione		A
2	depositi sartumosi o torbosi di fasi lacustri-palustri recenti		B
3	alluvioni ghiaiose recenti ed attuali degli alvei fluviali		C
4	alluvioni ghiaiose talora sabbiose e limose, antiche e terrazzate		D
5	alluvioni ciottolose con sabbia grossa e limi		E
6	alluvioni prevalentemente sabbiose		F
7	alluvioni sabbiose e limose con debole strato di alterazione		G
8	depositi alluvionali prevalentemente limoso-argillosi con lenti sabbioso-ghiaiose loess argillificato; ferretto		H
9	alternanze di alluvioni ciottolose-ghiaiose rugginose e di sabbie giallastre più o meno argillose talora con lenti di argilla, argille caoliniche da alterazione		I
10	alluvioni fluvio-glaciali ghiaiose e ciottolose, talora con grossi trovanti alterate in terreni argillosi (ferretto)		J
11	depositi morenici generalmente non alterati		K
12	depositi morenici a ciottoli alterati talora intensamente ferrettizzati		L
13	argille siltose con intercalazioni sabbiose; marne ed argille con sabbie	13-44	M

Classe litologia	Descrizione	Classi affini	Codice raggruppamento
14	sabbie, anche grossolane con livelli ghiaiosi ed intercalazioni di arenarie e marne, banchi calcarenitici e calciruditici poco cementati	14-17-18-19-20	N
15	argille e marne argillose gessifere con lenti di gesso (aree non cartografabili) e subordinate intercalazioni di calcari cariati, sabbie o arenarie (formazione gessoso-solfifera); dolomie cariate e calcari cariati		O
16	gessi	16-21-22-23-29-33-39	P
17	marne calcareo-arenacee (pietra da cantoni) e calcari marnosi con limitate intercalazioni di calcari, marne siltose e arenarie	14-17-18-19-20	N
18	conglomerati poligemici, conglomerati ed arenarie in grosse bancate intercalati a marne sabbiose, argille e calcari, conglomerati porfirici	14-17-18-19-20	N
19	alternanze di calcari, calcari marnosi, calcari arenacei, argille e marne	14-17-18-19-20	N
20	marne sabbioso-siltose ed argillose, marne con intercalazioni arenacee, calcaree, calcareo-marnose e argillose	14-17-18-19-20	N
21	calcari, calcari marnosi, calcari con selce a stratificazione media e/o sottile	16-21-22-23-29-33-39	P
22	calcari massicci o stratificati in banchi	16-21-22-23-29-33-39	P
23	dolomie, dolomie calcaree e calcari dolomitici	16-21-22-23-29-33-39	P
24	serie fljschoidi: argille, marne, arenarie, calcari, calcari marnosi	24-27	Q
25	quarziti, arenarie quarzose, quarziti arenacee e conglomeratiche, quarziti micacee, quarzoscisti		R
26	scisti sericitici e quarzoso sericitici	26-36-37-38	S
27	calcescisti, micascisti, gneiss minuti, argilloscisti	24-27	Q
28	micascisti, micascisti gneissici, micascisti quarziticci, micascisti filladici		T
29	micascisti grafitosi e carboniosi con intercalazioni di strati e lenti grafitiche	16-21-22-23-29-33-39	P
30	anfiboliti, serpentiniti, prasiniti		U
31	kinzigiti e gneiss anfibolici e occhiadini associati		V
32	granuliti basiche e anfiboliti associate, dioriti melanocratiche diabasi e metagabbri		W

Classe litologia	Descrizione	Classi affini	Codice raggruppamento
33	lherzoliti e peridotiti	16-21- 22-23- 29-33-39	P
34	gneiss occhiadini tabulari, con elevata densità di giunti di fratturazione, gneiss minuti	34-35- 41-43	X
35	gneiss occhiadini, gneiss granitoidi massicci e con giunti di fratturazione radi, porfiroidi	34-35- 41-43	X
36	porfidi e porfidi alterati	26-36- 37-38	S
37	rioliti, agglomerati e tufi riolitici	26-36- 37-38	S
38	andesiti, tufi andesitici e agglomerati tufacei	26-36- 37-38	S
39	marmi saccaroidi talvolta a silicati, marmi dolomitici calciferi	16-21- 22-23- 29-33-39	P
40	graniti alterati con potenti coperture di sabbioni arcocici		Y
41	graniti massicci, bianchi, verdi, rosa, privi di copertura ed alterazione	34-35- 41-43	X
42	sieniti, monzoniti, dioriti quarzifere e granodioriti		Z
43	apliti e pegmatiti	34-35- 41-43	X
44	Argille	13-44	M

A questo punto sono state ricalcolate, sulla base di questa nuova classificazione geologica, delle nuove medie litologiche ML_k e, tramite esse con l'impiego della relazione 4.10, si è giunti a una nuova stima della medie comunali che sono state così nuovamente confrontate con le medie sperimentali.

Per ogni comune in cui ricadono misure sperimentali, si è evitato di utilizzare nella stima delle medie litologiche i valori sperimentali che ricadono nel comune stesso per il quale si deve stimare la media a partire dalle litologie presenti nel suo territorio: questo per evitare il fenomeno dell'autocorrelazione. Per ciascun comune del Piemonte (1206) sono state quindi stimate le medie comunali litologiche tramite la (4.10) a partire da medie litologiche "depurate" dall'autocorrelazione, secondo i raggruppamenti litologici riportati nella tabella precedente.

Limitando il confronto delle nuove medie comunali litologiche con le medie sperimentali ottenute nei casi in cui il numero di dati disponibile era ≥ 4 , si ottiene una correlazione assai migliore rispetto a quella mostrata in Figura 4.4-1, come si può vedere dalla Figura 4.4-2: il coefficiente $R^2 = 0,71$ è infatti notevolmente migliore a quello ottenuto in precedenza ($R^2 = 0,58$).

La nuova classificazione litologica radon-specifica da noi individuata, può dunque essere legittimamente adottata per la stima dei livelli di radon nelle aree in cui i dati mancano o sono insufficienti.

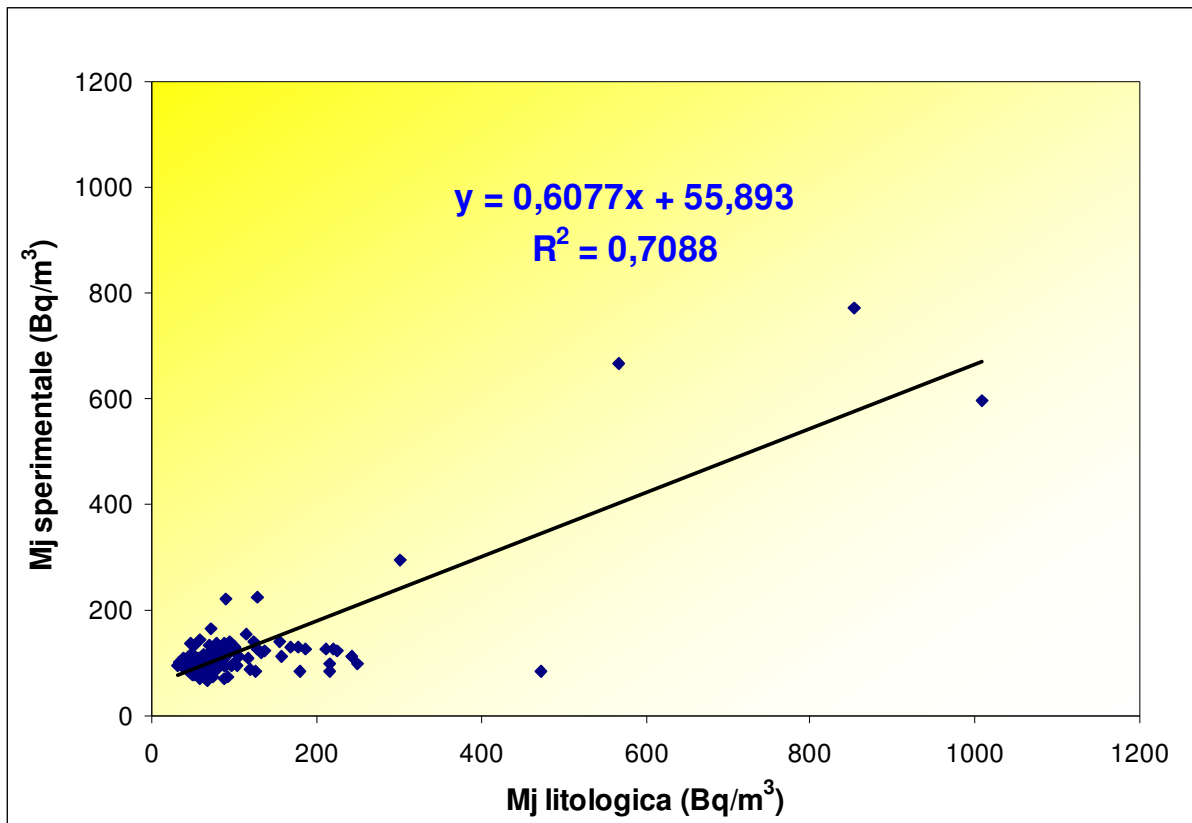


Figura 4.4-2: correlazione tra i valori sperimentali M_j (Bq/m^3) di un generico Comune j e le corrispondenti stime litologiche basate sulla nuova classificazione radon-specifica di Tabella 4.4-2

4.5 Calcolo dei parametri delle distribuzioni stimate per via litologica

Sulla base dei risultati sperimentali presentati nel precedente paragrafo 4.4, siamo ora in grado di definire completamente e rendere operativo il modello di correlazione geolitologica per la stima dei livelli di radon nei Comuni del Piemonte in cui non sono disponibili, o sono insufficienti, i dati sperimentali. Tale modello, così come è descritto dall'equazione 4.10 non è però in grado di fornire, di per sé stesso, tutte le informazioni necessarie alla stima dei livelli di radon. Come già sottolineato all'inizio di questo capitolo, per descrivere compiutamente dal punto di vista del problema radon un Comune, bisogna associare ad ogni unità territoriale una distribuzione log-normale. Ora, dal momento che, grazie alla 4.10, abbiamo una stima dei valori medi per ciascun Comune, per definire univocamente una distribuzione log-normale per ciascuna unità territoriale, tenendo presente che la relazione tra la media M e i parametri μ e σ di una log-normale è data dalla 4.9, è necessaria una stima delle σ per ogni Comune.

A questo proposito occorre rilevare che alcuni studi hanno mostrato come, nel caso di distribuzioni di concentrazione di radon in una certa area, si possa, in prima ma buona approssimazione, prendere per le σ uno stesso valore^[30], in quanto esse tenderebbero a convergere ad un ben preciso limite all'aumentare della popolosità del campione.

Analizzando i nostri dati sperimentali questa circostanza sembra confermata.

Le seguenti Figura 4.5-1, Figura 4.5-2, in cui sono rappresentate le DSG Comunali calcolate sperimentalmente, mostrano infatti valori molto sparpagliati quando esse vengono stimate a partire da campioni di bassa popolosità, ma tale sparpagliamento tende a ridursi drasticamente all'aumentare del numero di dati. Inoltre, confrontando la Figura 4.5-1 con la Figura 4.5-2 si nota che anche la debole pendenza della linea di tendenza che sembra sussistere tra DSG e numerosità del campione si riduce fin quasi a scomparire.

A partire da questi dati si può dunque stimare un valore asintotico per la DSG litologica pari a 1,83.

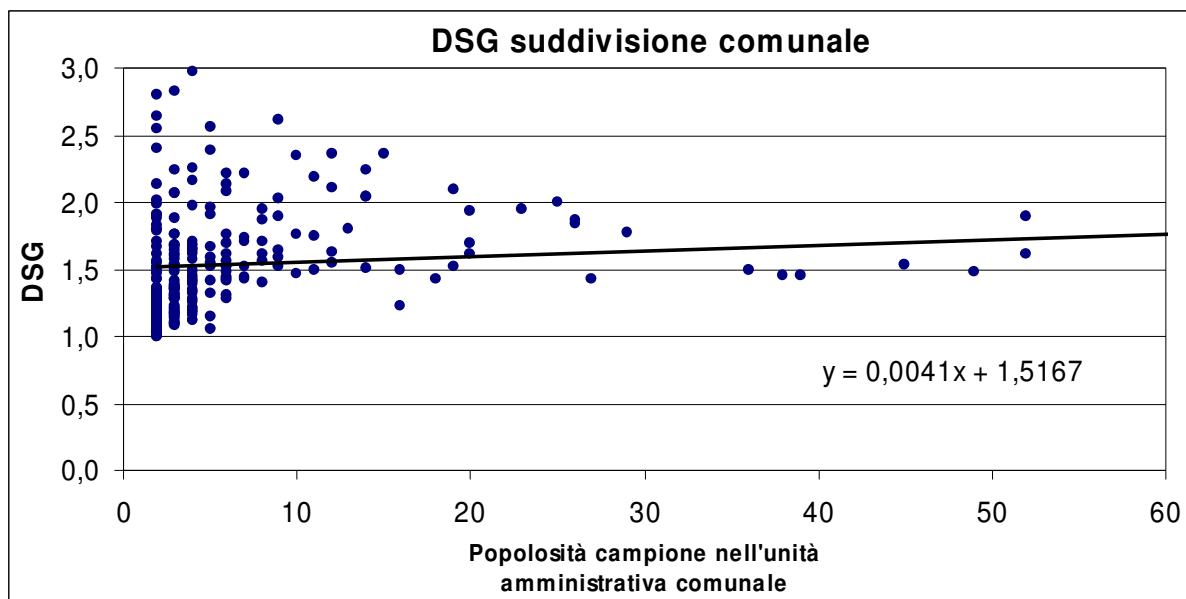


Figura 4.5-1: rappresentazione grafica della DSG calcolata a partire da tutti i dati sperimentali disponibili, in funzione della numerosità del campione comunale: all'aumentare della popolosità del campione il valore tende a stabilizzarsi

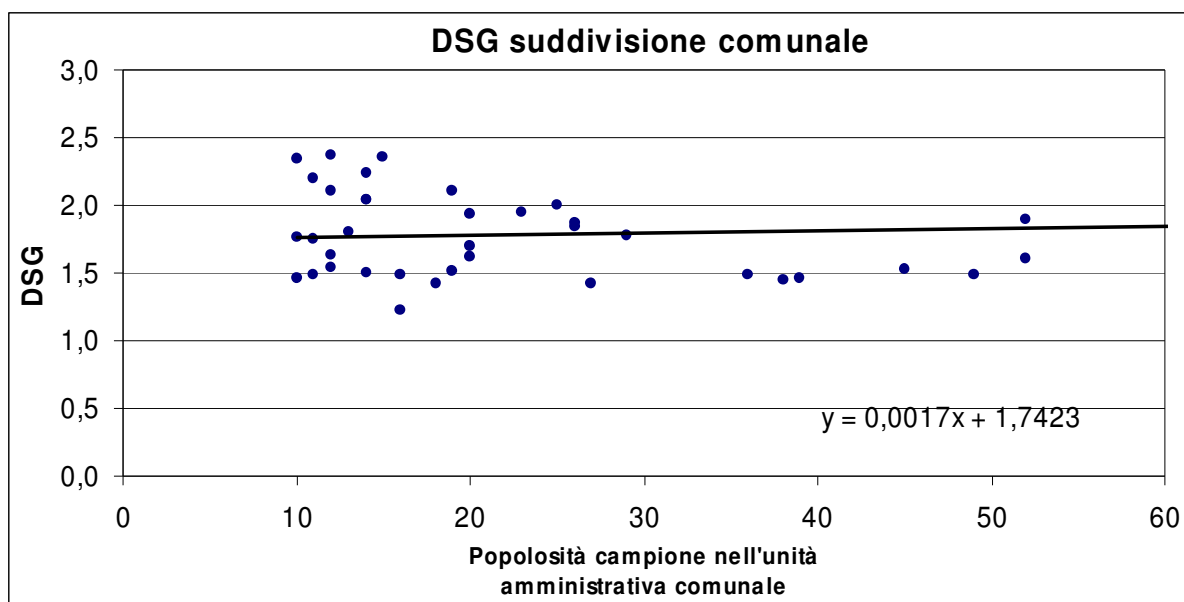


Figura 4.5-2: rappresentazione grafica della DSG calcolata a partire da dati comunali aventi numerosità > 10: l'effetto di stabilizzazione è ancora più evidente e scompare quasi completamente la debole dipendenza lineare

A partire da questo valore viene quindi calcolata la corrispondente σ e, in tal modo, si è ora in grado di associare a ciascuna area comunale una specifica distribuzione log-normale del tipo dato dall'equazione 4.1: la caratterizzazione di ciascuna unità territoriale può ora dirsi completa.

4.6 La mappatura del radon in Piemonte: una prima rappresentazione cartografica

Si può a questo punto passare alla realizzazione concreta di una mappa del radon, in grado di descrivere, con dettaglio comunale, la situazione del radon in Piemonte. È stato già detto, ma conviene ribadirlo ancora in questa sede che, essendo lo studio intrapreso basato sulla misura della concentrazione di radon al piano terra, la rappresentazione cartografica che viene qui presentata ha come significato quello di fornire indicazioni sulla probabilità che, in un dato territorio, la concentrazione di radon al piano terra assuma determinati valori. Tali valori non potranno essere dunque impiegati, così come sono, per la valutazione dell'esposizione al radon della popolazione e quindi, a maggior ragione per eventuali calcoli dosimetrici.

Il significato di questa mappatura è dunque prettamente ambientale: si è voluto cioè fornire uno strumento in grado di dare indicazioni sulla "vulnerabilità" di un dato territorio rispetto al problema radon. In questo senso va quindi compresa la scelta di usare come parametro indicatore le misure al piano terra, in quanto esse operano in un certo senso una sintesi tra il potere di emanazione del suolo (flusso radon, esprimibile in $Bq/[m^2 \cdot s]$), legato alla litologia e alla geologia in generale, e il ruolo più complesso e difficile da modellizzare dell'interazione suolo-abitazione.

Alcune considerazioni sugli aspetti dosimetrici e sulle possibili ricadute normative di questo lavoro verranno comunque abbozzate nel successivo e ultimo capitolo.

Passiamo ora alla descrizione delle rappresentazioni cartografiche che proponiamo. Come già anticipato nel paragrafo 4.2.2, le rappresentazioni sono basate su 2 indicatori:

- 1) il valor medio annuale comunale M (Bq/m^3) delle concentrazioni
- 2) la percentuale $P_{\%LR}$ di abitazioni eccedenti un dato livello di riferimento LR

Mentre per quanto riguarda il calcolo di M nelle varie circostanze tutto è già stato esposto con un certo dettaglio nei precedenti paragrafi, per la stima effettiva del $P_{\%LR}$ del generico j -esimo comune, cioè per il calcolo dell'integrale (equazione 4.7):

$$P_{j\%LR} = 100 \cdot \int_{LR}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(\ln c - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_j \cdot c} dc$$

in cui μ_j e σ_j sono i parametri caratteristici della log-normale del j -esimo comune stesso, resta il problema dell'assegnazione di un valore numerico all'estremo inferiore di integrazione LR .

Prescindendo da considerazioni tecnico-scientifiche, potrebbe venire spontaneo assegnare a questo parametro un valore significativo dal punto di vista normativo.

In quest'ottica, mancando un chiaro riferimento legislativo nazionale sui livelli di riferimento radon per le abitazioni, l'unico documento a cui ci si può appellare resta la Raccomandazione Europea del 1990, che fissava in $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$ e $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ i limiti, rispettivamente per le abitazioni attuali e quelle "di nuova costruzione".

Per i luoghi di lavoro, invece, il Decreto Legislativo 241/2000 ha fissato un Livello di Azione di $500 \text{ Bq}/\text{m}^3$, superato il quale è necessario intervenire con azioni di rimedio; sempre il medesimo Decreto, nel caso in cui i livelli restino al di sotto dei $500 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ma superino i $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$ pone l'obbligo di ripetere con cadenza annuale le misurazioni.

Tenendo presente questo quadro ci è quindi sembrato sensato considerare, per la rappresentazione cartografica di $P_{\%LR}$ un valore di $LR = 400 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Va comunque tenuto presente che, avendo definito per ogni area comunale una funzione di distribuzione delle concentrazioni (log-normale), sarà sempre possibile calcolare l'equazione 4.7 per qualunque valore di LR che si vorrà eventualmente adottare e produrre così la corrispondente mappa.

In Figura 4.6-1 è riportato l'andamento della funzione $P_{\%400}(\mu, \sigma)$ (cioè la 4.7 calcolata per $LR = 400 \text{ Bq}/\text{m}^3$), in funzione dei parametri μ e σ .

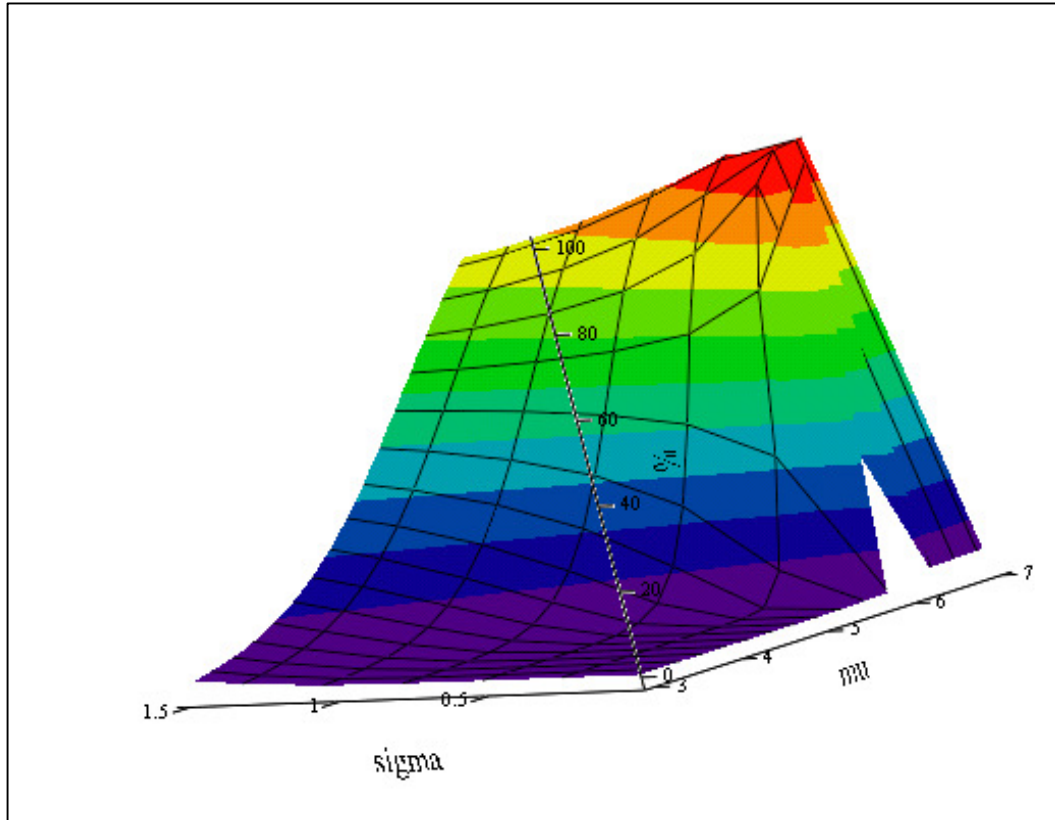


Figura 4.6-1: rappresentazione grafica della funzione $P_{%400}(\mu, \sigma)$ per valori di μ e σ variabili entro gli intervalli di variabilità ricavati sperimentalmente o tramite gli studi di correlazione litologica

Per la realizzazione concreta delle mappe si è fatto uso del software Arcview.
 Per quanto riguarda la rappresentazione dei valori medi M , a fini pratici di rappresentazione visiva, sono stati definiti 5 intervalli di concentrazioni a cui corrispondono diverse soglie cromatiche:

- $M < 40 \text{ Bq/m}^3$: blu
- $40 \text{ Bq/m}^3 \leq M < 80 \text{ Bq/m}^3$: verde
- $80 \text{ Bq/m}^3 \leq M < 120 \text{ Bq/m}^3$: giallo
- $120 \text{ Bq/m}^3 \leq M < 200 \text{ Bq/m}^3$: rosso
- $M \geq 200 \text{ Bq/m}^3$: violetto

La suddivisione percentuale dei Comuni rispetto a queste classi è riportata nel diagramma a torta della seguente Figura 4.6-2.

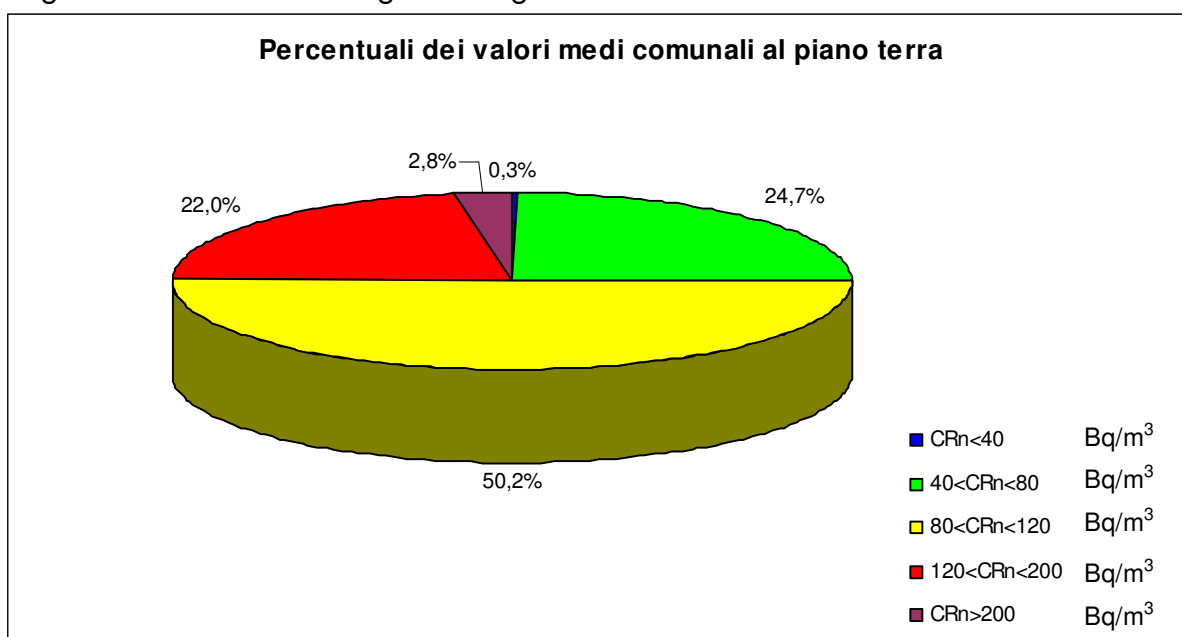


Figura 4.6-2: distribuzione percentuale dei valori medi di concentrazione radon al piano terra secondo le diverse classi di concentrazione (vedi legenda)

La corrispondente cartina del Piemonte dei valori medi comunali è riportata nell'allegato B.

Per quanto concerne invece la percentuale $P_{\%400}$, sono state impiegate le medesime soglie cromatiche (blu, verde, giallo, rosso, violetto) che, in questo caso, assumono il seguente significato:

- $P_{\%LR} < 0,1 \%$: blu
- $0,1 \leq P_{\%LR} < 0,5 \%$: verde
- $0,5 \leq P_{\%LR} < 1 \%$: giallo
- $1 \leq P_{\%LR} < 5 \%$: rosso
- $P_{\%LR} \geq 5 \%$: violetto

La suddivisione percentuale dei Comuni che ricadono nelle suddette categorie è riportata in un diagramma a torta analogo al precedente (Figura 4.6-3). La corrispondente cartografia è invece riportata nell'allegato C.

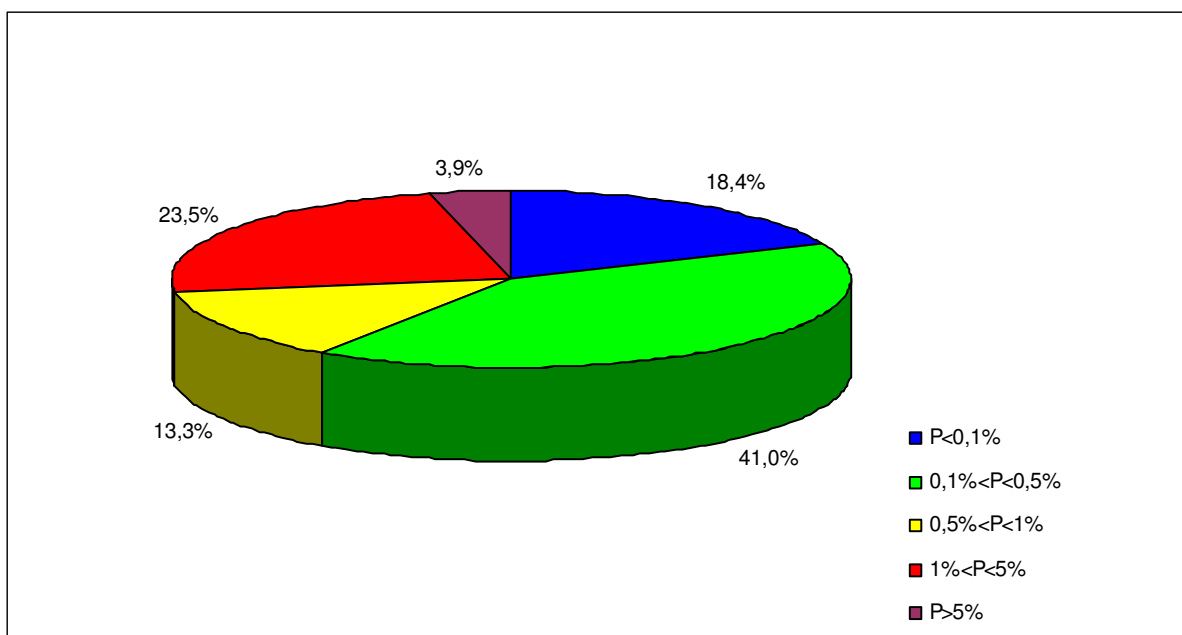


Figura 4.6-3: distribuzione percentuale dei valori di $P_{\%400}$ secondo le diverse classi di probabilità, specificate nella legenda

Dall'analisi comparativa delle mappe si nota una notevole somiglianza cromatica tra le due rappresentazioni, segno che anche impiegando indicatori diversi, le linee generali di tendenza rimangono le stesse: le aree alpine e pedemontane presentano solitamente livelli più elevati, mentre a quelle di pianura competono valori in generale assai più contenuti. Sono questi risultati che erano in gran parte attesi: la principale novità di questa realizzazione è però quella di fornire, per tutti i Comuni del Piemonte una prima caratterizzazione quantitativa dei livelli di radon presenti nei rispettivi territori.

In conclusione, diamo alcune avvertenze utili per una corretta interpretazione degli allegati cartografici, in particolare il B e il C, che sono stati prodotti combinando criteri sperimentali e statistici (correlazioni con le litologie). Infatti nonostante l'ottimo livello di correlazione ottenuto dal modello di correlazione litologica (vedi paragrafo 4.4) non tutte le stime comunali godono della medesima affidabilità. Dal momento che l'attività di ricerca di ARPA Piemonte sul radon non si arresta con la pubblicazione di questo studio, ma anzi è in continuo svolgimento ed evoluzione, è quindi lecito aspettarsi un aggiustamento e una modifica del quadro attuale. In particolare le linee di ricerca che si stanno percorrendo sono sostanzialmente tre:

- i) nuove campagne di misura volte ad aumentare la base dati sperimentale
- ii) affinamento del modello di correlazione litologica con nuovi accorpamenti e/o differenziazioni tra diverse litologie
- iii) studi per la valutazione dell'esposizione al radon della popolazione

Mentre le prime due linee di ricerca potranno condurre a modifiche di alcuni aspetti delle attuali cartografie, rendendole più complete e attendibili, la terza, dedicata alla stima dell'esposizione e quindi alla quantificazione dei rischi sanitari e alla loro distribuzione sul territorio necessita di una quarta mappa che rappresenta la media radon complessiva in ogni comune del Piemonte (Allegato D).

Nei successivi allegati, da E a N, sono riportate le cartine provinciali con le medie al piano terra. Associate alle cartine per ciascuna provincia è presentata una tabella che contiene sia il valore numerico della media al piano terra che il valore medio complessivo.

4.7 Stima dell'esposizione media al radon della popolazione

Per una corretta stima dell'esposizione media della popolazione al radon occorre conoscere per ogni comune la media complessiva (vedi paragrafo 3.4 e mappa del Piemonte in allegato D e tabelle allegati E÷N). Dalla media complessiva e dalla relativa distribuzione per ogni comune si può valutare, in base al numero di abitanti, la percentuale della popolazione esposta a concentrazioni medie di radon che eccedono un certo valore. Mediante opportuni parametri convenzionali di conversione, frutto di imponenti studi epidemiologici internazionali, si può trasporre l'informazione ambientale fornita dagli indicatori fisici legati alla distribuzione delle concentrazioni, in grandezze dosimetriche e valutazioni sanitarie, il cui dettaglio esula dagli obiettivi del presente rapporto, ma sarà oggetto di futuri approfondimenti. In conclusione si può tuttavia ricavare, dalle medie complessive comunali, una nuova distribuzione del radon su base regionale ottenendo come media regionale il valore $70,44 \text{ Bq/m}^3$ ($\mu=4,07$ e $\sigma= 0,61$).

La distribuzione ottenuta è riportata in Figura 4.7-1 e appare in buon accordo con il grafico della log-normale ottenuta per la Campagna Nazionale (media aritmetica $69,43 \text{ Bq/m}^3$, $\mu=3,99$ e $\sigma= 0,51$).

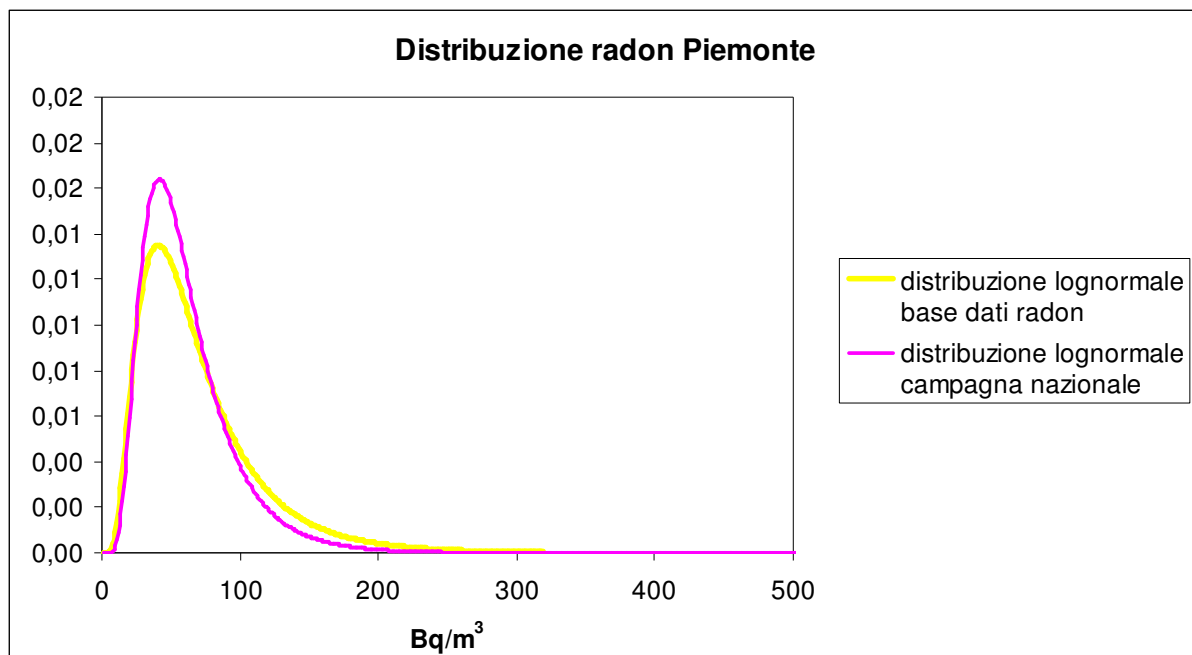


Figura 4.7-1: distribuzione lognormale del Piemonte ottenuta dall'intera base dati confrontata con la distribuzione lognormale ottenuta durante la Campagna Nazionale

In figura 4.7-2 è mostrato un grafico, calcolato a partire dalla nuova distribuzione ricavata considerando l'intera base dati (curva gialla del grafico 4.7-1), che rappresenta la percentuale di popolazione esposta nella propria abitazione oltre un determinato valore di concentrazione. Da questa sono ricavati anche alcuni valori indicativi, riportati in tabella 4.7-1, relativi ad alcune concentrazioni di riferimento.

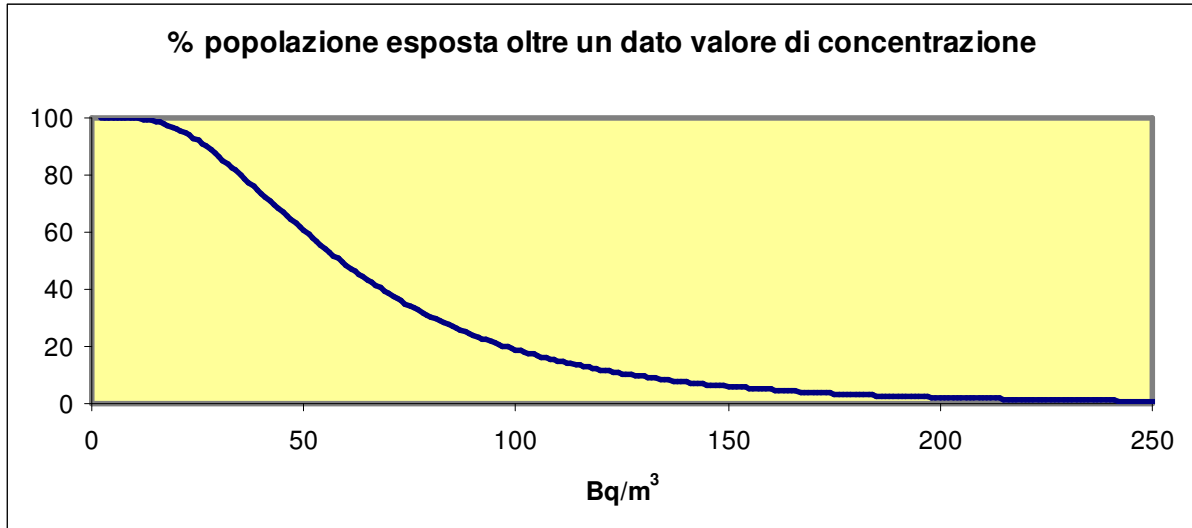


Figura 4.7-2: grafico della percentuale di popolazione piemontese in funzione della concentrazione media di radon residenziale

Tabella 4.7-1: frazione delle abitazioni con concentrazione maggiore di 100 Bq/m³, 200 e 400 Bq/m³

Concentrazione radon Bq/m ³	100	200	400
percentuale popolazione esposta	18,901	2,134	0,076

In conclusione, dalla distribuzione media regionale ottenuta a partire dalle medie comunali, sono state riconfermate le stime ottenute dalla Campagna Nazionale. Tale risultato può essere considerato una conferma a posteriori della validità sia del modello sperimentale - teorico che delle scelte adottate, volte a utilizzare l'intera mole di misure sperimentali accumulate nel corso degli anni.

5 MAPPATURA E RISCHIO RADON

5.1 Significato della mappatura e il problema della definizione delle “aree a rischio radon” ex Decreto Legislativo 241/2000

È già stato detto in varie occasioni che la mappatura del radon scaturita da questo lavoro ha un significato prettamente ambientale e conoscitivo: non si può infatti dedurre da essa, *sic et simpliciter*, una definizione delle aree che sono da considerare “a rischio radon”, né tantomeno fare immediate considerazioni di tipo dosimetrico e sanitario. È però vero che, a partire dai risultati ottenuti con questo studio sarà poi possibile affrontare tali questioni.

Per le valutazioni di tipo dosimetrico e sanitario sarà evidentemente necessario fare riferimento agli aspetti demografici, tramite i quali sarà poi possibile stimare più correttamente l'esposizione della popolazione. Un compito di questo genere va oltre gli scopi di questo studio ma, essendo evidentemente di grande importanza, non può essere completamente taciuto: la cartografia riportata in allegato D, che fornisce i valori medi comunali complessivi è un primo passo in questo senso. Su questi temi si sta anche muovendo il Piano Nazionale Radon e ARPA Piemonte, per parte sua, darà il suo contributo in questa direzione.

C'è poi un altro problema, quello degli adempimenti che il Decreto Legislativo 241/2000 attribuisce alle Regioni: cioè, in particolare, l'individuazione delle “aree a elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon”, così come sono testualmente definite dall'articolo 10-sexies del Decreto Legislativo 230/1995 e che spesso per semplicità, con un evidente abuso di linguaggio, vengono chiamate “aree a rischio radon”.

Su questo aspetto si sconta attualmente la mancanza di linee guida nazionali che, in base alla norma vigente, avrebbero dovuto essere emanate dalla competente Sezione speciale della Commissione tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni (art. 10-septies del Decreto Legislativo 230/1995). Se dunque la concreta individuazione e definizione di tali aree “a norma di legge”, sancita dalla pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale, resta per ora un problema giuridicamente di difficile soluzione, è pur vero che, dal punto di vista sostanziale, da parte delle autorità regionali possono comunque essere fatti tutti i passi necessari per raggiungere l'obiettivo finale.

Da questo punto di vista, infatti, il lavoro svolto da ARPA Piemonte nell'ambito di questo progetto fornisce alla Regione tutti gli strumenti tecnici per affrontare gli adempimenti che essa ha in capo in base al già citato 10-sexies del Decreto Legislativo 230/1995. Le cartografie prodotte in questo studio, pur essendo progressivamente aggiornabili e modificabili con il miglioramento delle conoscenze ambientali, costituiscono tuttavia uno strumento già ora utilizzabile per gli scopi previsti dalla norma. Infatti, la definizione per ciascun territorio comunale di una funzione di distribuzione delle concentrazioni, consente il calcolo di ogni possibile indicatore che verrà eventualmente scelto dalla sopracitata Sezione speciale della Commissione tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni.

In attesa di un pronunciamento su questi temi della suddetta Commissione, possono nel frattempo essere avanzate alcune idee in merito: è questo l'argomento del prossimo paragrafo.

5.2 Le “aree a rischio radon”: aspetti critici e criteri plausibili per la loro definizione

Il concetto delle “aree a rischio radon” è stato introdotto nella legislazione italiana dal Decreto L.vo n°241 del 2000, in attuazione alla Direttiva europea Euratom 29/1996. Tale concetto è stato mutuato dalla letteratura scientifica in materia che, già una ventina di anni fa parlava di *radon prone areas*. Tale concetto, oltre ad avere una valenza meramente descrittiva, negli intenti dei loro fautori, doveva anche essere uno strumento utile per la prevenzione dal rischio legato all’esposizione della popolazione al radon: “l’utilità” delle *radon prone areas* dal punto di vista della prevenzione consisterebbe quindi nella possibilità di indirizzare, in aree ben delimitate, gli interventi (di individuazione e risanamento) sulle abitazioni che presentano le più elevate concentrazioni. L’efficacia di un tale approccio sarà evidentemente tanto maggiore quanto più gli elevati livelli di radon risulteranno effettivamente concentrati in aree ben delimitate. Non è detto tuttavia che questa condizione si verifichi nella realtà. Nel caso del Piemonte, ad esempio, pur essendo state individuate dalla cartografia prodotta delle aree dove ci si aspettano livelli di radon ben superiori alla media, la rilevanza pratica del concetto di “aree a rischio radon” non è al momento ben chiara: infatti, il fatto che le zone più soggette al radon si trovino di preferenza nelle aree montane e pedemontane, assai meno abitate, riduce di parecchio la rilevanza pratica di tale concetto per scopi di prevenzione dall’esposizione al radon della popolazione.

Un’ulteriore critica alla rilevanza pratica del concetto delle “aree a rischio radon” viene anche dai più recenti risultati dell’indagine epidemiologica, già richiamati nell’introduzione: i nuovi studi sembrano indicare che l’effetto carcinogeno del radon sia statisticamente significativo anche per concentrazioni relativamente basse (inferiori ai 200 Bq/m³ o anche meno). Questo circostanza, tenendo conto del fatto che, a causa della log-normalità della distribuzione delle concentrazioni di radon, una larga fetta della popolazione (ben maggiore del 50%) è comunque esposta a livelli inferiori al valore medio, si avrebbe una più efficace opera di prevenzione diminuendo *ovunque* i livelli di radon, piuttosto che andando a risanare poche aree dove i livelli sono particolarmente elevati.

Tuttavia, nonostante questi aspetti critici e problematici, riteniamo che il concetto delle “aree a rischio radon” possa comunque essere utile e non debba essere abbandonato; ciò essenzialmente per tre motivi:

- i) la caratterizzazione territoriale del radon a livello regionale resta comunque un adempimento normativo richiesto alle Regioni dal Decreto Legislativo 241/2000, che peraltro è largamente ispirato alla Direttiva Europea 29/1996
- ii) l’individuazione di “aree a rischio radon” può essere comunque vista anche come uno strumento di prevenzione, inducendo in determinati territori a maggiori cautele, anche in vista di nuovi sviluppi edilizi
- iii) sembra comunque corretto dare alla popolazione informazioni sul fatto che in determinate aree il “rischio radon” è significativamente maggiore che in altre: in tal modo, anche in assenza di politiche di prevenzione promosse a livello generale, si fornisce anche ai singoli individui o comunità maggiormente esposte al “rischio radon”, la possibilità di attuare autonomamente azioni di prevenzione e bonifica

Torniamo dunque al problema della definizione delle “aree a rischio radon”, così come sono intese dal Decreto Legislativo 241/2000. In queste aree la norma impone obblighi aggiuntivi rispetto ad altre porzioni di territorio, non giudicate a rischio. In particolare è resa obbligatoria la misurazione del radon in tutti i luoghi di lavoro, indipendentemente dal fatto che essi siano interrati o meno. Un'altra importante caratteristica della legge è la fissazione di un livello d'azione (sempre per i luoghi di lavoro) pari a 500 Bq/m³. Il superamento del livello di Azione determina l'obbligatorietà, da parte del datore di lavoro, di azioni di bonifica. È importante notare il fatto che il Livello di Azione si applica indipendentemente dalla definizione o meno di una zona come “a rischio radon”. La definizione delle aree a rischio radon è quindi indirizzata a favorire l'individuazione di quei casi in cui vi sono livelli alti, nella presunzione che tali livelli alti tendano a concentrarsi in zone particolarmente sfavorite del territorio.

Ci si deve quindi porre il problema di quale criterio usare per l'individuazione di tali aree “sfavorite”, sia in senso assoluto oppure rispetto ai livelli medi regionali o nazionali.

In tal senso, una possibile scelta operativa e in linea con i principi che hanno ispirato la normativa potrebbe essere quella che si appella all'equità dell'esposizione al rischio, un concetto intrinseco ai generali principi della radioprotezione^[31].

Se si vuole infatti tutelare l'intera popolazione allo stesso modo si possono confrontare le medie ai piani terra delle unità di territorio, ad esempio aree comunali, con il valor medio regionale della concentrazione di radon nei locali interrati, nei quali per legge sussiste l'obbligo di misura; tale valor medio è dato da:

$$\int_0^{\infty} cf(c)_{REG_{PI}}(c)dc \quad (5.1)$$

dove $f_{REG_{PI}}(c)$ è appunto la distribuzione regionale delle concentrazioni per i piani interrati. Si potrà quindi considerare a “rischio radon” la generica area j la cui media ai piani terra è uguale o superiore alla media regionale ai piani interrati, cioè per cui è soddisfatta la seguente disequaglianza:

$$M_{jPT} = \int_0^{\infty} cf_{jPT}(c)dc \geq \int_0^{\infty} cf_{REG_{PI}}(c)dc \quad (5.2)$$

dove la $f_{jPT}(c)$ è la distribuzione delle concentrazioni radon al piano terra per una generica area j -esima area del territorio regionale.

Dai dati sperimentali, con riferimento al campione di misura della Campagna Nazionale Radon, si stima per il Piemonte una media nei locali interrati pari a 128 Bq/m³. Il superamento di tale valore da parte della media ai piani terra per la generica area j determinerebbe quindi la sua definizione come area a rischio radon.

A fronte del vantaggio dell'equità riguardo all'esposizione al rischio, una tale scelta potrebbe portare a grosse discrepanze da Regione a Regione: i valori di tale media potrebbero infatti essere molto diversi tra loro. Si potrebbe forse superare il problema facendo valere il medesimo principio a livello nazionale, introducendo quindi nella (5.2) una funzione di distribuzione nazionale anziché regionale.

In alternativa a questo approccio, si potrebbe dare una formulazione generica della condizione di “rischio radon” sulla base della maggiore probabilità, per una certa area j , di superare, ad esempio, il Livello d'Azione ($LA=500$ Bq/m³) fissato dalla normativa.

Supponendo quindi di poter conoscere le distribuzioni del radon nelle n partizioni in cui è stata suddivisa la Regione che indichiamo con $f_j(c)$ con $j = 1, \dots, n$, una certa area j può essere definita a rischio radon se:

$$\int_{LA}^{\infty} f_i(c)dc \geq \alpha \int_{LA}^{\infty} f_R(c)dc \quad (5.3)$$

dove $f_R(c)$ è la distribuzione a livello regionale.

Nella scelta del valore da assegnare al parametro α non è facile però individuare dei criteri oggettivi. Un'idea per cercare di legare la scelta di α a considerazioni non completamente arbitrarie è quella di fare uso del concetto di dose collettiva.

In particolare si potrebbe calcolare, in linea di principio, la dose equivalente collettiva evitabile per una data Regione: si tratta della dose collettiva che verrebbe risparmiata se venissero sottoposti a bonifica tutti i luoghi in cui si ha un superamento del Livello di Azione. Sulla base della legge attualmente vigente, i soli luoghi in cui è assicurata la verifica di tale superamento sono i luoghi di lavoro interrati. Con la definizione delle aree a rischio radon, a questo contributo andrebbe aggiunto un secondo termine, dato appunto dalla sommatoria dei termini dovuti all'individuazione delle ipotetiche M aree a rischio individuate.

La dose equivalente collettiva risparmiata a livello regionale, H_R può quindi essere espressa dalla seguente formula:

$$H_R = hP_{RPI} \frac{\int_{LA}^{\infty} cf_{RPI}(c)dc}{\int_{LA}^{\infty} f_{RPI}(c)dc} + h \sum_{i=1}^{M(\alpha)} P_i \frac{\int_{LA}^{\infty} cf_{i>PI}(c)dc}{\int_{LA}^{\infty} f_{i>PI}(c)dc} \quad (5.4)$$

dove h è un opportuno fattore di conversione (Sv/Bq/m^3), $f_{RPI}(c)$ è la distribuzione regionale nei piani interrati, P_{RPI} è la relativa popolazione, mentre $f_{i>PI}(c)$ è la distribuzione della j -esima area a rischio (per i piani superiori al piano interrato), mentre $P_{j>PI}$ è la popolazione della j -esima area a rischio radon individuata che occupa appunto il piano terra o quelli superiori.

L'espressione contenuta nella (5.4) va poi confrontata con la dose equivalente collettiva risparmiabile, H_{RT} data dalla seguente espressione:

$$H_{RT} = hP_R \frac{\int_{LA}^{\infty} cf_R(c)dc}{\int_{LA}^{\infty} f_R(c)dc} \quad (5.5)$$

dove $f_R(c)$ è la distribuzione regionale complessiva mentre P_R è la popolazione totale regionale: la (5.5) esprime la dose collettiva che si risparmierebbe se venissero individuati e bonificati tutti i luoghi eccedenti il LA . È quindi evidente che la definizione del parametro α introdotto nella (5.3), affinché abbia un impatto dosimetricamente significativo, dovrebbe andare ad incrementare il secondo membro della (5.4) in modo tale che il valore complessivo di H_R si avvicini il più possibile a H_{RT} . Ciò può senz'altro essere ottenuto adottando un approccio molto cautelativo (cioè con α di poco superiore a 1). In tal caso, però, è molto probabile che le M aree

a rischio tendano a coprire completamente il territorio regionale, togliendo qualunque significato alla definizione stessa di “area a rischio”.

Alcuni calcoli preliminari effettuati indicano comunque che, in ogni caso, le dosi collettive in gioco, ricavabili dalla (5.4) e dalla (5.5) sono comunque contenute, rispetto alla dose collettiva totale piemontese attribuibile al radon, che può essere valutata attorno ai 5360 Sv-persona. In particolare, facendo una stima della (5.5) si trova infatti $H_{RT} \approx 50-60$ Sv-persona: l’approccio dosimetrico sembra quindi mettere in discussione, almeno per il Piemonte, la rilevanza radioprotezionistica globale del concetto stesso di “area a rischio radon”. Restano tuttavia altre ragioni, già ricordate all’inizio di questo paragrafo, di ordine locale, di conoscenza territoriale e giuridiche che suggeriscono di giungere comunque a una definizione di tali aree: il presente lavoro e queste ultime considerazioni possono fornire uno spunto per arrivare finalmente a questa realizzazione.

5.3 Considerazioni conclusive: mappatura, esposizione della popolazione e prevenzione del rischio radon

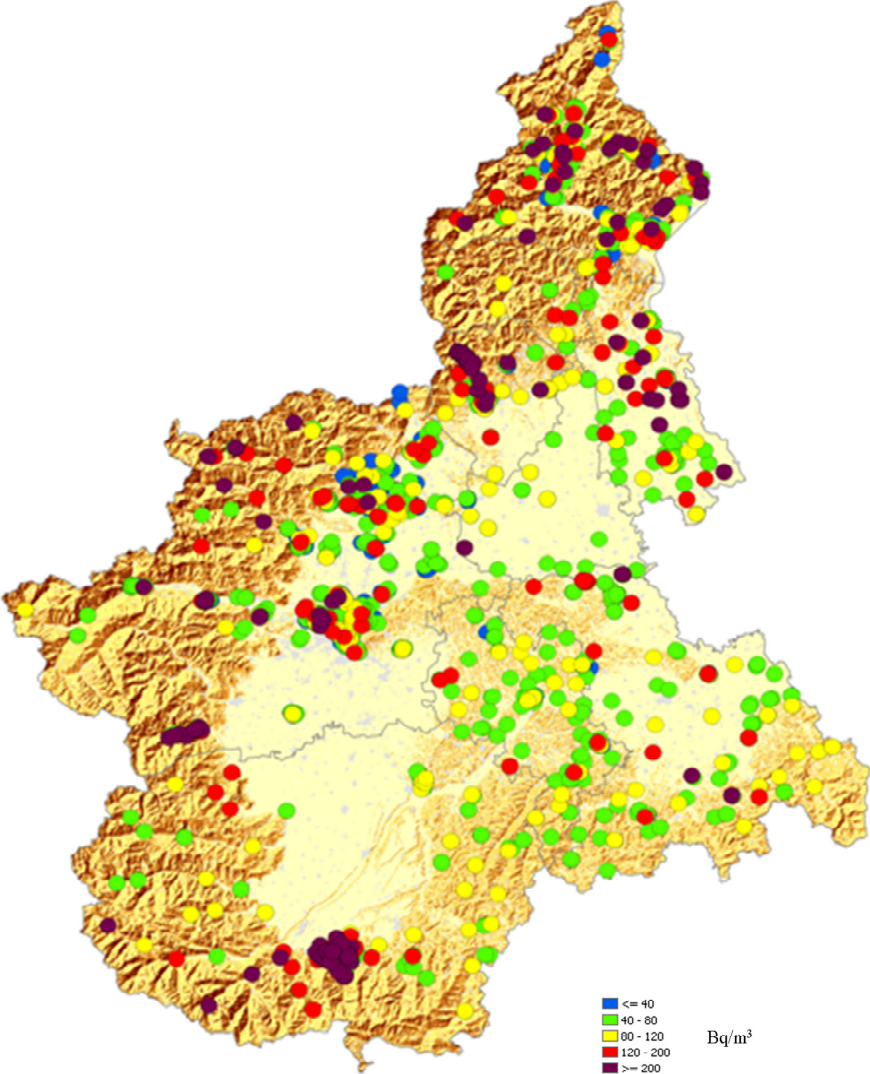
Il lavoro qui presentato, pur raccogliendo l’attività di approfondimento scientifico svolta in questo settore dall’ARPA Piemonte nell’arco di più di un decennio, costituisce però solo un primo, anche se solido, punto di partenza per affrontare in modo compiuto il problema radon in Piemonte. Come è già stato detto in sede introduttiva, le mappe del radon prodotte sono da considerarsi solo una prima versione a cui seguiranno, nei prossimi anni, aggiornamenti e affinamenti. Pertanto, nuove campagne di misura sono da prevedere a questo scopo. Il quadro fornito è cionondimeno completo: tutti i Comuni piemontesi sono stati caratterizzati, alcuni tramite dirette verifiche sperimentali, altre tramite studi di correlazione con la geologia. Le varie cartografie prodotte costituiscono mappe territoriali a valenza prevalentemente ambientale, che costituiscono però la premessa necessaria per una più compiuta valutazione dell’impatto del problema radon sulla popolazione piemontese.

Per giungere a una corretta valutazione di questo importante risvolto che connette l’aspetto ambientale con quello sanitario, sono necessari però ulteriori studi e approfondimenti, alcuni dei quali sono peraltro già in corso e in parte presentati. In particolare si tratterà di passare da una descrizione delle concentrazioni di radon rappresentativa per il piano terra a una descrizione che tenga conto delle caratteristiche dell’insieme del patrimonio edilizio del Piemonte e della distribuzione della popolazione sui vari livelli. Per far ciò saranno però necessari ulteriori studi sperimentali, da programmare *ad hoc*, in determinate aree della Regione: tali studi sono indispensabili per validare i modelli che consentono di passare da una distribuzione che descrive la concentrazione nei piani terra a una distribuzione che descrive invece l’esposizione della popolazione piemontese.

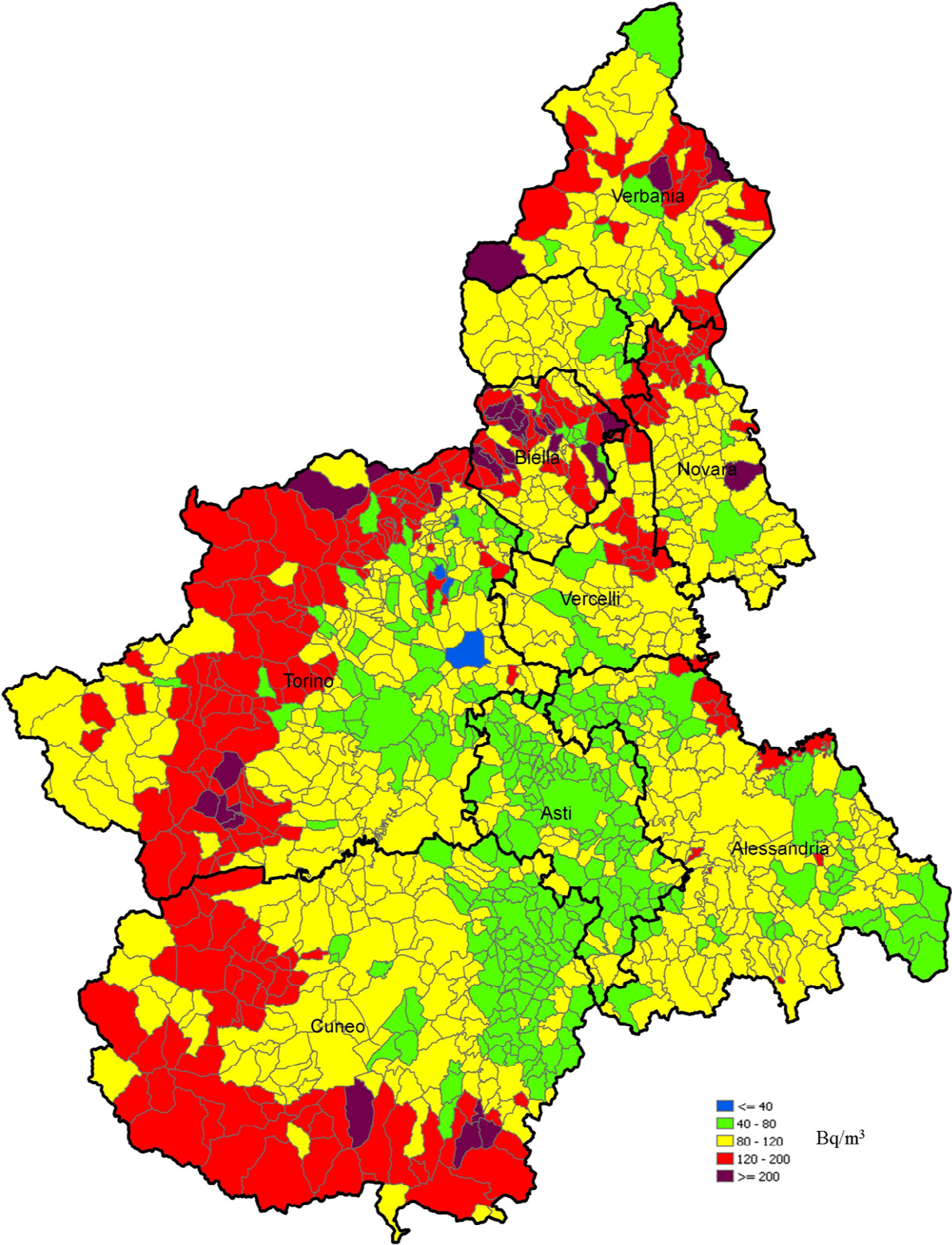
Contemporaneamente però, i risultati ottenuti con questo lavoro possono costituire l’occasione per gli amministratori locali, per gli organi competenti e per i cittadini, di prendere coscienza di un problema ambientale che merita una maggior attenzione di quella finora ricevuta. Il timore che una maggior consapevolezza generi un’ansia eccessiva nella popolazione è giustificato, ma non deve essere enfatizzato a scapito di una efficace politica di prevenzione.

ALLEGATI

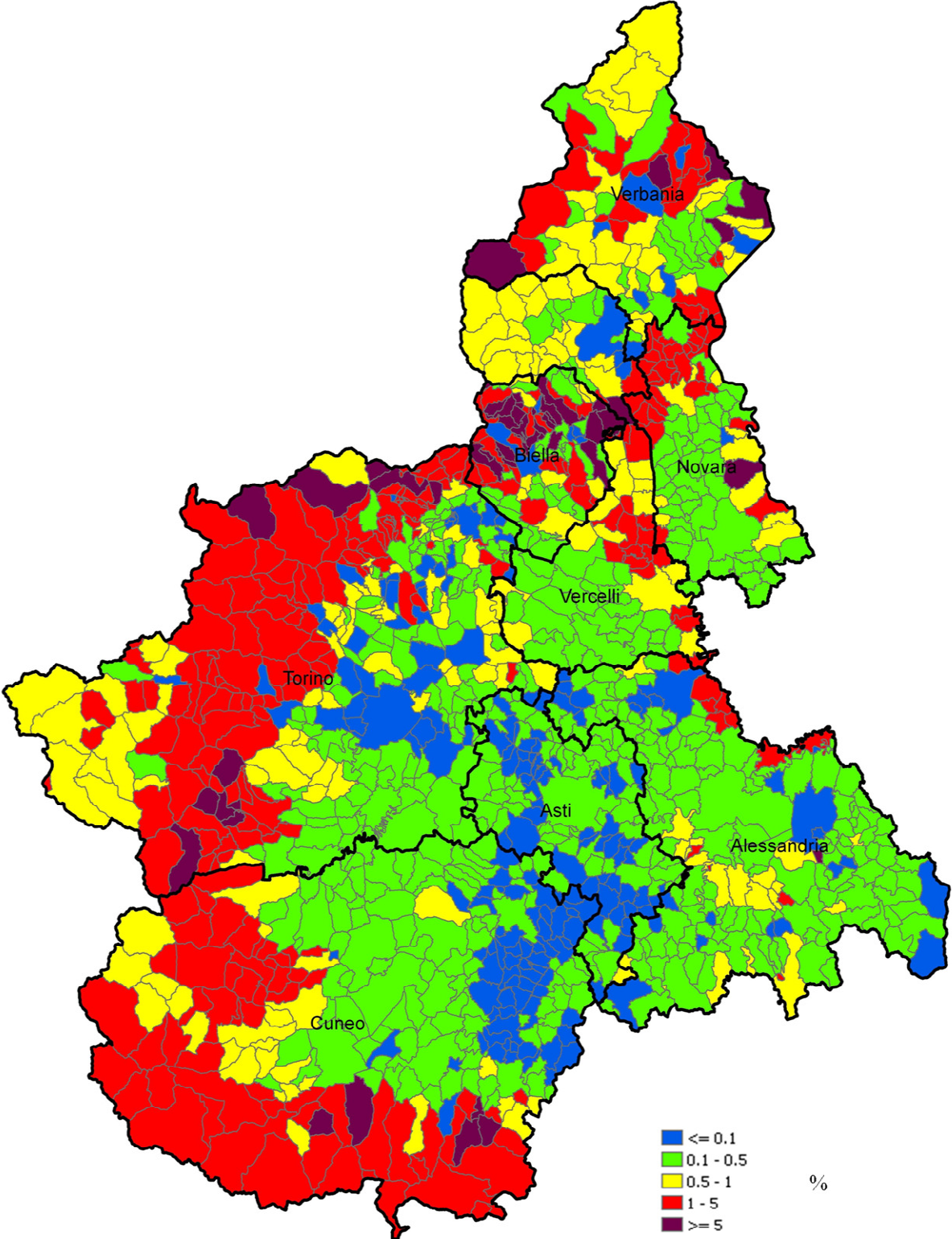
ALLEGATO A – Valori sperimentali normalizzati al piano terra (Bq/m³)



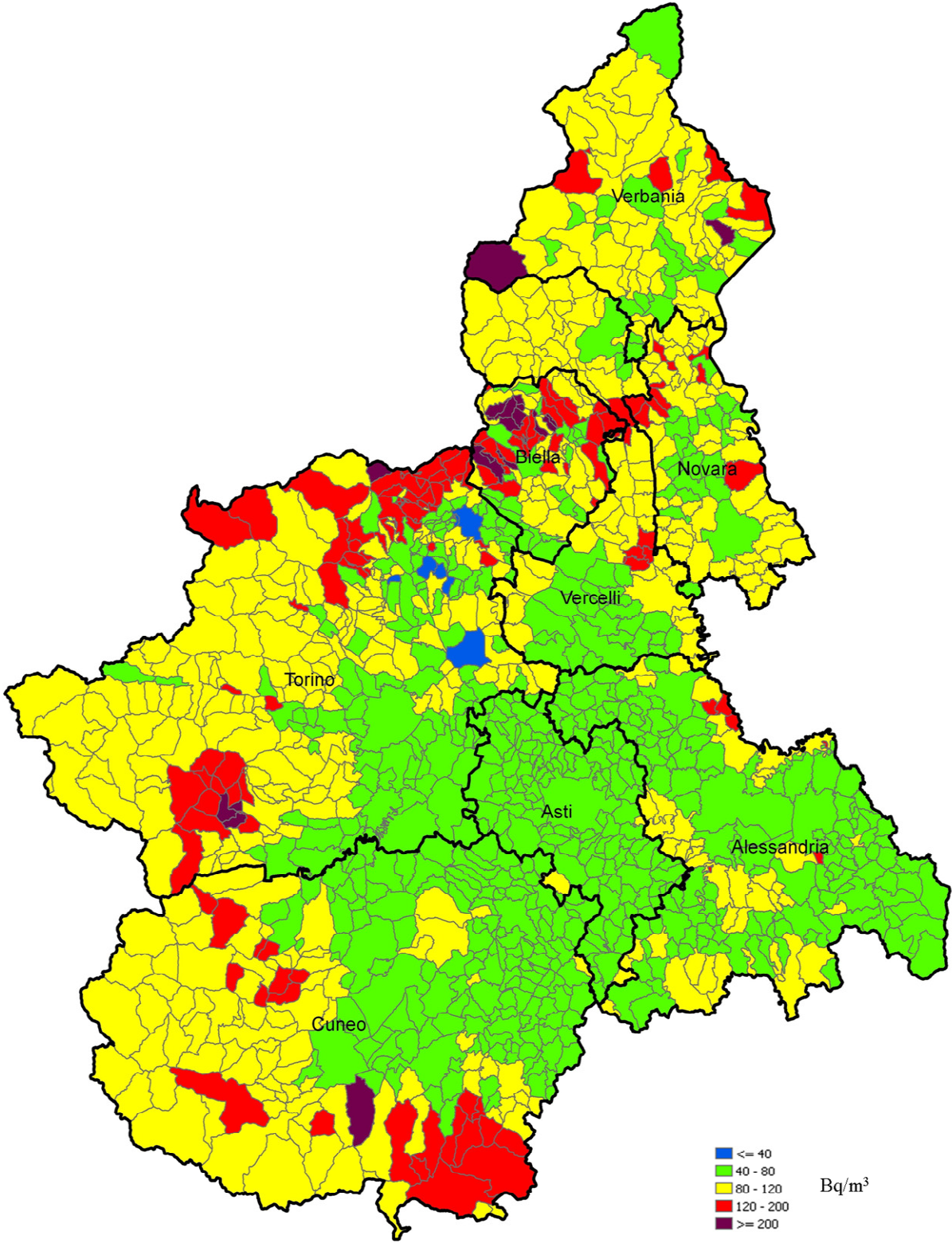
ALLEGATO B – Valori medi comunali al piano terra (Bq/m³)



ALLEGATO C – Rappresentazione cartografica di P%₄₀₀, probabilità di superamento al piano terra di 400 Bq/m³



ALLEGATO D – Rappresentazione cartografica delle medie comunali complessive



RINGRAZIAMENTI

I risultati presentati in questo lavoro sono il frutto di uno sforzo collettivo che ha impegnato per anni tutto il personale del Centro Regionale Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti. A tutti loro va dunque un sentito ringraziamento da parte del gruppo di ricerca. Vogliamo però rivolgere un pensiero particolare di ricordo e gratitudine per il nostro caro amico e collega Franco Righino, che ci ha lasciato prematuramente e tragicamente lo scorso anno, per la passione e dedizione con cui ha contribuito a questa realizzazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nero and Nazaroff, Radon and its decay products, John Wiley, 1988.
- [2] WHO-IARC (World Health Organisation – International Agency for Research on Cancer). IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Man-made mineral fibres and Radon. IARC Monograph Vol.43, Lyon, France; 1988.
- [3] IARC Il cancro cause frequenza controllo a cura di Renzo Tomatis L. Garzanti 1991
- [4] Barros- Dios J.M., Barreiro M.A. et al. Exposure to residential radon and lung cancer in Spain : a population –based case-control study. Am J Epidemiol 2002; 156:548-555
- [5] Pisa F.E., Barbone F., et al Residential radon risk of lung cancer in an Italian alpine area Arch Environ Health 2001 56; 208-215
- [6] Clementi ML ,Il punto sul radon Epid Prev 2002; 1; 9.
- [7] S.Darby et al, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, BMJ Volume 330, 29 January 2005.
- [8] F.Bochicchio, Radon epidemiolgy and nuclar track detectors:methods, results and perspectives, Radiation Measurements Vol. 40, pp. 177- 190 (2005).
- [9] ISS-ANPA, Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni, ISTISAN Congressi 34, (1994).
- [10] LSP-Sezione Fisica USSL n°40 Ivrea, Indagine sull'esposizione alla radioattività naturale nelle abitazioni del Piemonte, Regione Piemonte, (1994).
- [11] F. Bochicchio et al., Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions, Radiation Measurements, Vol. 40, pp 686-694, (2005).
- [12] M. Magnoni and S. Tofani, Indoor radon measurements in anomalous sites of Piedmont, Italy, Radiation Proection Dosimetry, Vol. 56, pp 327-329, (1994).
- [13] F. Bochicchio, S. Bucci, M. Bonomi, G. Cherubini, C. Giovani, M. Magnoni, L. Minach, P. Sabatini, Areas with high radon levels in Italy, Proceedings of the Conference Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece.
- [14] Regione Veneto – ARPAV, Indagine regionale per l'individuazione delle aree ad alto potenziale radon nel territorio Veneto, Rapporto tecnico ARPAV, (2000).
- [15] Environmental Radon Newsletter 35.
- [16] B M R Green, J C H Miles, E J Bradley and D M Rees, Radon Atlas of England and Wales, NRPB 2002.
- [17] EPA's Office of Radiation and Indoor Air , U.S. Geological survey EPA Map of Radon Zones.
- [18] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Supplemento ordinario n°203 del 31 agosto 2000, Decreto Legislativo 26 maggio 2000 n°241.
- [19] Commissione delle Comunità Europee, Direttiva 96/29/EURATOM del Consiglio del 13 maggio 1996, G.U. delle Comunità Europee L159 del 29 giugno 1996.
- [20] E. Chiaberto, M. Magnoni, F. Righino, Il radon nel suolo: misure di concentrazione e di flusso, Atti del XXXI Congresso Nazionale AIRP, Ancona 20-22 settembre 2000.
- [21] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Supplemento ordinario n°276 del 27/11/2001 S.G., Accordo 27 settembre 2001.

-
- [22] E. Chiaberto, M. Magnoni, F. Righino, R. Costa Laia, Reduction of radon concentration in a basement workplace: study of the problem and characterisation of the main parameters affecting the radon concentration Proceedings of AIRP - European IRPA Congress 2002, Firenze 8-11 ottobre 2002 (CDROM).
- [23] Ugo Facchini et al., Misure di Radon in interni in alcune localita' della Lombardia e del Piemonte, Rendiconti Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, Volume 125 (1991).
- [24] AA.VV., Proceeding of the Congress: Indoor Radon Remedial Action, Rimini, 27 June – July 2 1993, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 56, pp. 5 – 77, (1994)
- [25] BRE, Major alteration and conversions: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings
- [26] BRE, Radon in workplaces
- [27] BRE, Surveying dwellings with high indoor radon levels: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings.
- [28] ISS, I rivelatori a tracce nucleari per la misura della concentrazione di radon in aria: analisi critica ed esperienze italiane a confronto, Roma 28 novembre 2001;
- [29] L. Tommasino et al., A plastic-bag sampler for passive radon monitoring, Nuclear Tracks, Vol.12, (1986);
- [30] P.N. Price, Predictions and maps of country mean indoor radon concentrations in the mid-atlantic states, Health Physics June 1997, Volume, Number 6
- [31] E. Chiaberto, M. Magnoni, F. Righino, E. Serena, S. Procopio, Il Radon in Piemonte: dalla distribuzione delle concentrazioni alla definizione delle aree a rischio. Criteri a confronto, - XXXIII Congresso Nazionale AIRP, Torino 20-23 settembre 2006.