



REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA
AGENZIA REGIONALE PRO S'AMPARU DE S'AMBIENTE DE SARDIGNA
AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA
ARPAS

Direzione Tecnico Scientifica
Servizio Controlli, monitoraggio e valutazione ambientale
Servizio Agenti fisici
Dipartimento Geologico

Piano Regionale di Prevenzione 2014-2018

Programma P-8.2 “*Supporto alle Politiche Ambientali*”

Azione P-8.2.4

“Promozione di buone pratiche in materia di sostenibilità ed eco-compatibilità nella costruzione/ristrutturazione di edifici per il miglioramento della qualità dell’aria indoor”

Progetto

“CLASSIFICAZIONE DEL TERRITORIO REGIONALE DELLA SARDEGNA CON INDIVIDUAZIONE DELLE AREE A RISCHIO RADON”

RAPPORTO FINALE

REV. 02

GENNAIO 2019

Pagina vuota

Indice

1	Introduzione	5
2	Obiettivi e finalità del Progetto	7
3	Il radon.....	8
3.1	Cenni storici.....	8
3.2	Caratteristiche chimiche e fisiche.....	8
3.3	Sorgenti.....	9
3.4	Meccanismi di trasporto e diffusione all'interno di un edificio	11
3.5	Aspetti sanitari	12
3.6	La concentrazione del radon in Europa e in Italia.....	14
3.7	Quadro legislativo nazionale ed europeo.....	16
3.8	Quadro legislativo regionale	17
3.9	Individuazione delle aree a rischio radon nelle regioni italiane (D.Lgs 230/95 e s.m.i.).....	17
4	Impostazione del Progetto, livelli di concentrazione e contesti di riferimento delle informazioni.....	21
4.1	La maglia	21
4.2	I limiti amministrativi dei Comuni.....	22
4.3	Le unità litologiche.....	22
5	Il Progetto Radon: i risultati.....	23
5.1	Sviluppo temporale del Progetto e risultati della partecipazione dei Comuni.....	23
5.2	Attività integrative del Progetto Radon	25
5.3	Quadro riassuntivo del Progetto.....	25
5.4	Quadro di riferimento edifici monitorati.....	28
5.5	Distribuzione degli edifici nelle Unità Litologiche	30
5.6	La distribuzione della popolazione nel territorio regionale.....	34
5.6.1	La distribuzione della popolazione nelle Unità litologiche	35

5.7	Descrizione delle caratteristiche degli edifici del campione.....	37
6	Misura della concentrazione di radon indoor in Sardegna.....	40
6.1	Le attività di verifica e controllo delle misure.....	40
6.2	Elaborazioni dei risultati analitici.....	42
6.3	Quadro generale ed elaborazioni dei risultati delle misure radon indoor.....	47
6.3.1	Quadro di riferimento per Comune.....	51
6.3.2	Quadro di riferimento per "Maglia (Sezione CTR)".....	54
6.3.3	Quadro di riferimento per Provincia.....	56
6.3.4	Elaborazione dei dati Abitazioni e Scuole nelle ex-Province della Sardegna.....	59
6.4	La relazione della concentrazione radon indoor con il territorio e l'edificato.....	64
6.5	Quadro di riferimento per le Unità litologiche (UL).....	64
6.5.1	Le relazioni tra concentrazione radon indoor e caratteristiche degli edifici monitorati.....	76
7	Elaborazioni su base geostatistica e rappresentazione dei risultati a livello regionale.....	86
7.1	Elaborazioni su base geostatistica - il metodo del kriging.....	86
7.2	Elaborazioni su base geostatistica - il metodo LGS (LITO-GEO-STATISTICO).....	89
7.3	Elaborazioni per la valutazione delle aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon.....	94
8	Risultati su base regionale per i contesti di riferimento.....	96
8.1	Elaborazioni su base kriging per "Comune".....	96
8.2	Modalità di elaborazione geostatistica (metodo LGS) per Comune.....	99
8.3	Elaborazioni per "Unità litologiche".....	102
8.4	Confronto fra i metodi di stima di superamento dei valori di riferimento.....	105
9	Indicatori di rischio e individuazione delle aree a rischio radon.....	108
10	Considerazioni conclusive.....	111
11	ALLEGATI.....	114

1 Introduzione

Il radon, classificato dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) tra i cancerogeni accertati di gruppo 1, è un gas radioattivo naturale, presente nel suolo, nei materiali da costruzione, nell'aria e nell'acqua: accumulandosi negli edifici (case, scuole e ambienti di lavoro), il radon è ritenuto responsabile di un aumento di rischio di tumore polmonare.

Al fine di ridurre il rischio di effetti sanitari connessi all'esposizione della popolazione italiana al radon ed ai suoi prodotti di decadimento, il Ministero della Salute ha predisposto nel 2002 il "Piano Nazionale Radon", comprendente un programma pluriennale di azioni da realizzare in modo coordinato a livello nazionale e regionale.

Tra gli obiettivi centrali del Piano Nazionale della Prevenzione 2014-2018 (approvato con l'Intesa Stato-Regioni rep. n. 156/CSR del 13 novembre 2014) figura quello di "Promuovere le buone pratiche in materia di sostenibilità ed eco-compatibilità nella costruzione/ristrutturazione di edifici, anche in relazione al rischio radon", il cui Indicatore Centrale è "Approvazione di linee guida per orientare i regolamenti edilizi in chiave eco-compatibile". In ottemperanza al predetto Piano Nazionale della Prevenzione, nel Programma P-8.2 (recante "Supporto alle Politiche ambientali") del Piano Regionale di Prevenzione 2014-2018 (PRP), adottato con Deliberazione della Giunta Regionale n.30/21 del 16 giugno 2015, è stata inserita l'Azione P-8.2.4 "Promozione di buone pratiche in materia di sostenibilità ed eco-compatibilità nella costruzione/ ristrutturazione di edifici per il miglioramento della qualità dell'aria indoor", da attuare mediante un Gruppo di lavoro intersettoriale (comprendente rappresentanti degli Assessorati regionali della sanità, della difesa dell'ambiente, dell'urbanistica, dei Dipartimenti di prevenzione ASL ora ASSL dell'ATS Sardegna, dell'ARPAS, dell'ANCI Sardegna, degli Ordini professionali coinvolti) costituito con apposita Determinazione del Direttore generale della sanità dell'Assessorato dell'igiene e sanità e dell'assistenza sociale,

Tale Azione comprende l'Attività P-8.2.4.2 nella quale è stabilito, tra l'altro, che "qualora sia necessario disporre di informazioni più dettagliate riguardo al rischio radon in ambito regionale, si provvederà, mediante apposita convenzione con l'ARPAS, alla classificazione del territorio con individuazione delle aree a rischio".

Al riguardo l'ARPAS, nella riunione del 29 febbraio 2016 del succitato Gruppo di lavoro, ha evidenziato la necessità di approfondire, con apposita indagine, le conoscenze sulla distribuzione della concentrazione di radon negli edifici, per la classificazione del territorio regionale con individuazione delle aree a rischio, come sottolineato anche nella Relazione tecnica allegata alla nota dell'ARPAS del 23 febbraio 2016, e il Gruppo di lavoro ha concordato.

L'ARPAS, quale soggetto attuatore di tale indagine, ha stipulato apposita convenzione con la ASL di Cagliari (ora ASSL di Cagliari dell'ATS), alla quale, in qualità di ASL capofila in materia di Salute e ambiente, l'Assessorato dell'igiene e sanità e dell'assistenza sociale ha erogato il relativo finanziamento, finalizzato alla classificazione del territorio regionale con individuazione delle aree a rischio radon, come stabilito nell'Attività P-8.2.4.2 del PRP.

Con delibera n. 1696 del 23/12/2016 la ASL di Cagliari ha approvato la convenzione tra la ASL e l'ARPAS avente come oggetto la "Classificazione del territorio regionale della Sardegna con individuazione delle aree a rischio radon" come definito nel relativo Progetto.

Secondo il cronoprogramma delle attività previste nel Progetto, alla conclusione del primo semestre di indagine, in data 29.12.2017 l'ARPAS ha trasmesso all'Azienda per la Tutela della Salute - Area Socio Sanitaria di Cagliari - Dipartimento di Prevenzione e all'Assessorato dell'igiene e sanità e dell'assistenza sociale -Servizio promozione della salute e

osservatorio epidemiologico la seconda revisione del rapporto "Classificazione del territorio regionale della Sardegna con individuazione delle aree a rischio radon", rapporto attività 1° semestre di indagine".

Con il presente documento si riferisce sui risultati del Progetto "Classificazione del territorio regionale della Sardegna con individuazione delle aree a rischio radon" e le elaborazioni che individuano le aree di pericolosità e rischio radon della Sardegna.

I dati conoscitivi acquisiti dal Progetto Radon permetteranno di poter individuare elementi ed obiettivi per attuare una politica mirata alla prevenzione e protezione dagli impatti derivanti dall'esposizione al radon della popolazione della Sardegna.

2 Obiettivi e finalità del Progetto

La campagna di misura è finalizzata a consentire, a partire dalla conoscenza della concentrazione di radon all'interno degli edifici campione presenti nei molteplici contesti esaminati, una classificazione del territorio regionale in relazione ai valori di concentrazione di radon attesi nelle sue diverse aree, secondo i criteri descritti nel seguito, da cui, sulla base del confronto con i valori di riferimento indicati dalla normativa, sarà possibile l'individuazione delle aree a rischio radon.

Il percorso metodologico, utilizzato in analoghe indagini, sia nel contesto nazionale che internazionale, mediante il quale pervenire all'individuazione delle aree a rischio, ha come presupposto che siano definiti i livelli di riferimento per la concentrazione di radon negli ambienti indoor e i valori della probabilità che negli edifici costruiti in determinate aree le concentrazioni di radon possano superare i livelli di riferimento.

E' evidente quindi che per raggiungere l'obiettivo del presente Progetto, che consiste nella classificazione delle aree regionali in relazione al rischio radon, dovranno essere stabiliti i livelli di riferimento/valori soglia per la probabilità di superamento di tali livelli per gli edifici che esistono o saranno edificati in una determinata area.

Attualmente la normativa vigente non indica quali siano i criteri che debbano essere adottati a livello nazionale per l'individuazione delle aree a maggiore presenza di radon (D.Lgs. 230/95 e s.m.i. Art. 10-sexies). Tali criteri infatti dovevano essere fissati dalla Sezione speciale della Commissione tecnica prevista all'art. 10-septies del Capo III-bis del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. , ma non sono stati definiti in quanto la suddetta Commissione non si è ancora insediata.

Per quanto riguarda i valori di riferimento, attualmente la normativa vigente individua (D.Lgs. 230/95 e s.m.i. Art. 10-bis e Allegato I-bis) un livello di azione di 500 Bq/m^3 per i luoghi di lavoro, mentre la Direttiva 59/2013/Euratom, di prossimo recepimento nella normativa nazionale, individua (Art. 74 c. 1) il valore di 300 Bq/m^3 quale media annua della concentrazione di radon da non superare in tutti gli ambienti chiusi, intendendo pertanto uniformare il valore del livello di riferimento a tutti gli ambienti di lavoro ed alle abitazioni.

Nella Direttiva citata non è presente altra indicazione di criteri specifici per l'individuazione delle aree a rischio ma si vincolano gli Stati membri all'applicazione di strategie per garantire la gestione delle esposizioni esistenti e, in particolare (Art. 103), l'adozione di un piano d'azione nazionale che affronti i rischi a lungo termine derivanti dall'esposizione al radon negli edifici secondo i principi enunciati nell'Allegato XVIII.

Nel presente rapporto verranno illustrate le risultanze derivanti dall'applicazione dei criteri di classificazione basati sul livello di riferimento previsto nella suddetta Direttiva 59/2013/Euratom (300 Bq/m^3) e delle metodologie più frequentemente adottate in indagini analoghe svolte in altre aree sia a livello nazionale che internazionale.

3 Il radon

Il radon è un gas radioattivo naturale, presente in concentrazioni variabili ma ovunque nell'ambiente. Dal 1988 il radon e i suoi prodotti di decadimento sono classificati dall'International Agency for Research on Cancer (IARC), agenzia del World Health Organization (WHO) come cancerogeni per l'uomo (Gruppo I) per quanto riguarda il tumore polmonare (IARC *Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans* Vol. 43/1988; Vol. 78/2001; Vol.100D/2012)

3.1 Cenni storici

L'esistenza di un'alta mortalità tra i minatori delle miniere dell'Europa centrale era stata riscontrata già nel 1° secolo a.C.; ne dà testimonianza Tito Lucrezio Caro (90-50 a.C.), che nella sua opera "De Rerum Natura" (Libro VI) riporta i danni polmonari subiti da minatori a causa di gas provenienti dal sottosuolo. Nel 1500 Georg Bauer, detto Agricola, nel suo trattato di metallurgia "De Re Metallica" descrive i danni a livello dell'apparato respiratorio nei minatori, ipotizzando che nell'aria delle miniere ci fosse un tipo di polvere, "*fiato degli spiritelli*", che aggrede e corrode i polmoni. Sempre nel 1500, Paracelso notò l'alta mortalità dovuta a malattie polmonari tra i lavoratori delle miniere di argento nella regione di Schneeberg, in Sassonia. L'incidenza di questa malattia, in seguito conosciuta come "*malattia di Schneeberg*", aumentò nei due secoli successivi, quando l'attività nelle miniere di argento, rame e cobalto si intensificò. Questa malattia fu riconosciuta come cancro ai polmoni nel 1879. Nel 1896 Henri Becquerel osservò che i sali di uranio avevano la capacità di impressionare una lastra fotografica pur essendo ricoperta con uno strato di materiale opaco alla luce, scoprendo così il fenomeno della radioattività. Due anni dopo, nel 1898, i coniugi Pierre e Marie Sklodowska Curie scoprirono che anche altre sostanze godevano della stessa proprietà dell'uranio, e le chiamarono *radio* (radium=raggio) *attive*; stabilirono la natura dei raggi emessi scoprendo che si trattava di tre tipi di radiazione: la prima elettricamente carica positivamente (α), la seconda carica negativamente (β) e la terza neutra (γ). I due coniugi riuscirono a isolare e scoprire il polonio e il radio. Nel 1900 il fisico Dorn scoprì, inoltre, che i sali di radio esalavano un gas radioattivo: il radon, che definì "*emanazione di Radio*".

3.2 Caratteristiche chimiche e fisiche

Il radon è un gas monoatomico, inodore, incolore e inerte; le sue principali caratteristiche chimico-fisiche sono riportate nella tabella seguente.

Numero atomico	86
Massa atomica relativa	(222,0176) uma
Stato di aggregazione a 25 °C	gassoso
Configurazione elettronica	[Xe] 4f14 5d10 6s2 6p6
Volume atomico	50,5 cm ³ /mol
Calore di vaporizzazione	2.890 kJ/mol
Densità a 20 °C	0,00973 g/cm ³
Energia di prima ionizzazione	10,7485 eV
Raggio atomico	1,24 Å
Calore specifico	0,09 J/gK
Conducibilità termica	0,0000364 W/cmK

Temperatura di ebollizione	-61,7 °C
Temperatura di fusione a 760 mm Hg	-71 °C
Temperatura critica	104 °C
Solubilità in 100 g di acqua a 0°C - a 25°C - a 50°C (Weast, 1985)	51,0 g – 22,4 g – 13,0 g
Nucleo genitore	Ra 226
Energia del decadimento	5,5 MeV
Nucleo figlio	Po 218
Tempo di dimezzamento	3,82 g

Tab. 3-1 Costanti chimiche e fisiche del radon.

Fonti: Weast, 1985, Lide, Handbook of chemistry and Physics, ed.2008, Perry,Green, Perry's Chemical Engineers'handobook, 1984

In acqua il radon ha una moderata solubilità, come indicato in tabella, decrescente al crescere della temperatura, e una bassa velocità di diffusione, crescente con la temperatura. Nella tabella sottostante sono riportati i valori del coefficiente di diffusione in acqua a varie temperature per semplice trasporto unidimensionale (direzione perpendicolare all'interfaccia gas-liquido), e per confronto sono riportati anche i coefficienti di diffusione in acqua di altri gas.

Gas	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
CO ₂	1,26	1,45	1,67	1,91	2,17	2,47
H ₂	3,62	4,08	4,58	5,11	5,69	6,31
He	5,67	6,18	6,71	7,28	7,87	8,48
O ₂		1,67	2,01	2,42		
Rn	0,81	0,96	1,13	1,33	1,55	1,8
SO ₂			1,62	1,83	2,07	2,32

Tab. 3-2 Valori dei coefficienti di diffusione di alcuni gas in acqua ($D[10^{-5} \times \text{cm}^2\text{s}^{-1}]$). CRC Handbook of Chemistry and Physics, David R. Lide, editor, 88th edition. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, (2008) 6-209.

3.3 Sorgenti

In natura il radon si trova in diverse forme isotopiche, solo due delle quali in concentrazioni significative: il ²²²Rn, che appartiene alla catena di decadimento radioattivo dell'²³⁸U, e il ²²⁰Rn (thoron), che si trova nella catena di decadimento del ²³²Th.

La successiva figura mostra le catene di decadimento radioattivo sia del ^{220}Rn che del ^{222}Rn , con il tipo di decadimento (α , β , γ) e il tempo di dimezzamento radioattivo dei radionuclidi coinvolti.

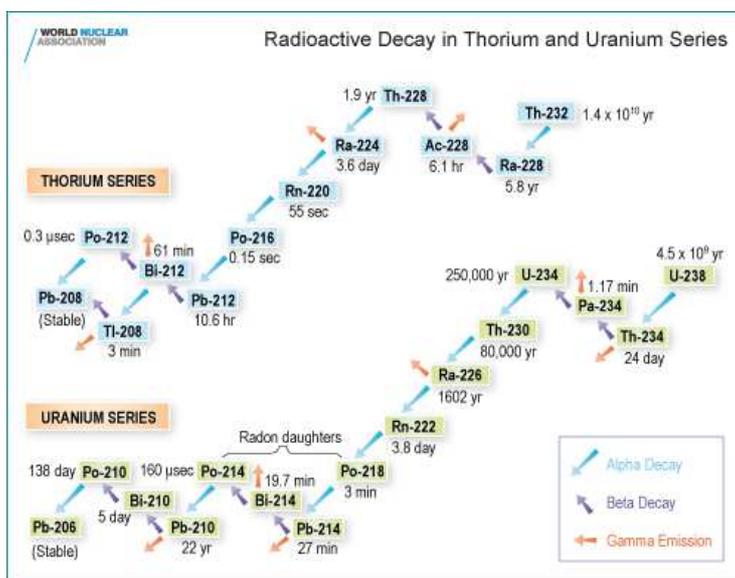


Fig. 3-1 Schema di decadimento della serie del ^{232}Th e dell' ^{238}U

Il contributo del ^{220}Rn e dei suoi prodotti di decadimento è assai ridotto (meno del 20%) rispetto a quello del ^{222}Rn e dei suoi prodotti di decadimento, pertanto, quando si parla di esposizione al gas radon ci si riferisce al suo radioisotopo 222

Il ^{222}Rn decade in una sequenza di radionuclidi di breve durata, come mostrato nella tabella seguente:

Radionuclide	$T_{1/2}$	α		β		γ	
		Energia (MeV)	Resa d'emissione (%)	Energia max (MeV)	Resa d'emissione (%)	Energia (MeV)	Resa d'emissione (%)
^{222}Rn	3,8235 d	5,48948	99,92	/	/	/	/
^{218}Po	3,10 min	6,00235	99,9789	/	/	/	/
^{214}Pb	26,8 min	/	/	1,02	6	0,35	37
				0,7	42	0,3	19
				0,65	8	0,24	8
^{214}Bi	19,9 min	/	/	3,27	18	0,61	46
				1,54	18	1,77	16
				1,51	18	1,12	15
^{214}Po	164,3 μs	7,68682	100	/	/	/	/

Tab. 3-23 Caratteristiche del radon e dei suoi prodotti di decadimento a vita breve.

I precursori del radon (dall'uranio al radio) sono presenti in tutti i tipi di rocce in quantità variabili. Tale variabilità dipende dalle caratteristiche geologiche del sito: le rocce che contengono le maggiori quantità di uranio, quindi di radon, sono le rocce magmatiche intrusive, formate dal raffreddamento del magma (come i "graniti"), le rocce magmatiche effusive, le rocce metamorfiche che derivano da rocce magmatiche e sedimentarie, le rocce sedimentarie formatesi dallo

smantellamento delle rocce magmatiche e metamorfiche contenenti uranio, le possibili cavità sotterranee naturali che possono rappresentare aree di accumulo del gas radon.

Prima di decadere il radon rimane in vita per un tempo sufficientemente lungo che gli consente di essere trasportato dai flussi di gas del sottosuolo (dove, prevalentemente, è generato) anche a distanze notevoli, fino a giungere in superficie.

Il radio, decadendo in radon, emette una particella α , che si muove in verso opposto a quello del radon formato. La posizione dell'atomo di radio e la direzione di rinculo dell'atomo di radon determinano la possibilità di migrazione del radon negli spazi interstiziali (o porosità) del suolo. Elevate concentrazioni di radon si riscontrano però solo dove esso riesce a fuoriuscire dal reticolo cristallino dei minerali che lo contengono.

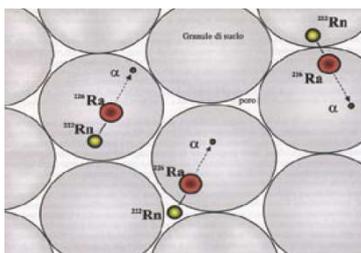


Fig. 3.2: Dispersione/migrazione degli atomi di radon negli spazi interstiziali delle rocce. La posizione dell'atomo di radio e la direzione di rinculo dell'atomo di radon determinano la possibilità di migrazione del radon negli spazi interstiziali (o porosità) del suolo.

Nella maggior parte dei casi solo una piccola percentuale del radon prodotto entra nei pori dove è libero di migrare, aiutato dai gas del suolo e dall'acqua, pertanto può trovarsi in soluzione nelle acque che scorrono tra le rocce ed i sedimenti sabbiosi ed essere trasportato da esse. Progenitori del radon sono presenti, in quantità molto variabile, in tutti i litotipi e quindi nei materiali da costruzione utilizzati tal quali o che derivano da questi (malte e cementi, laterizi, pozzolane, ecc.). A differenza dei suoi Progenitori, il radon, in quanto gas, possiede un'elevata mobilità che gli consente di fuoriuscire dal suolo, dai materiali da costruzione e anche dall'acqua in cui è disciolto. Mentre all'aria aperta il radon si disperde rapidamente e non raggiunge quasi mai concentrazioni elevate, nei luoghi chiusi (case, scuole, uffici pubblici, ambienti di lavoro, ecc.), dove si accumula, può, in taluni casi, arrivare a concentrazioni elevate pericolose per la salute.

3.4 Meccanismi di trasporto e diffusione all'interno di un edificio

Una volta raggiunto l'edificio, il radon può penetrare attraverso i materiali da costruzione, le fessure dei pavimenti, che sono sempre presenti anche se invisibili, le giunzioni pavimento – parete, i passaggi degli impianti termici, idraulici, gas etc.

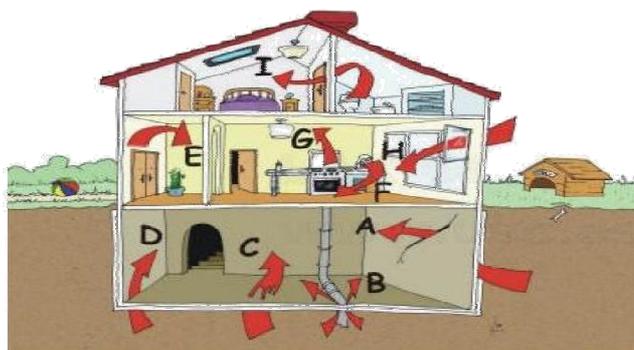


Fig. 3-33 Schema dei meccanismi di trasporto e diffusione del gas radon all'interno di un edificio.

Anche l'acqua è sorgente di radon, sebbene contribuisca in misura minore alla concentrazione di questo gas all'interno dell'abitazione. In particolare, il suo contributo aumenta all'aumentare della temperatura di utilizzo dell'acqua: quando questa viene riscaldata, il gas, che prima era trattenuto alle temperature più basse, si disperde direttamente nel locale interessato, che in genere è il bagno e la cucina.

In locali poco arieggiati è più facile avere una maggiore concentrazione di radon poiché vi si accumulano le polveri, il fumo, e le particelle varie che veicolano i prodotti di decadimento del radon nelle vie respiratorie. Inoltre, è interessante notare che la concentrazione di radon decresce rapidamente con l'incremento delle precipitazioni e dell'altitudine, pertanto, a parità di parametri che ne determinano l'ingresso negli edifici, la sua concentrazione in aria è inferiore ad alte quote.

3.5 **Aspetti sanitari**

Dopo la scoperta dei vari elementi radioattivi fu evidenziata quasi subito la pericolosità dell'esposizione a radiazioni; nel 1902, infatti, fu riconosciuto per la prima volta un caso di tumore radio-indotto. Misurazioni effettuate nel 1901 nelle miniere di Schneeberg rilevarono un'alta concentrazione di radon, e fu presto congetturata l'ipotesi di un rapporto causa-effetto tra alti livelli di radon e cancro ai polmoni. Questa ipotesi fu rafforzata da più accurate misurazioni del radon compiute nel 1902 nelle miniere di Schneeberg e in altre, in particolare quelle di Jachymov in Boemia, da dove provenivano i minerali usati da Marie Curie. L'attività nelle miniere di uranio fu intensificata dal 1940, ma solo dal 1950 si avviarono le misurazioni dei livelli di radon con cadenze regolari. Esperimenti su animali compiuti dal 1951 dimostrarono la potenziale cancerogenicità del radon per i polmoni delle specie testate. Rilevamenti epidemiologici tra i minatori di uranio, dalla metà degli anni '60, infine confermarono questo potenziale sull'essere umano. Nel 1967 il "Congress of Federal Research" degli Stati Uniti propose delle raccomandazioni per controllare i rischi correlati alle radiazioni nelle miniere. Nonostante non ci fossero più dubbi sulla oggettività del pericolo, fu ancora necessario quantificare il rischio in termini di intensità di esposizione, per definire appropriati livelli di protezione. A tal fine, numerosi rilevamenti epidemiologici furono effettuati negli anni '80 in varie Nazioni, non solo tra lavoratori di miniere di uranio, ma anche di stagno e di ferro. Tali rilevamenti portarono a conclusioni convergenti. Per quanto riguarda l'esposizione dei cittadini al radon in ambienti di vita, nonostante il premio Nobel per la fisica Ernest Rutherford avesse fatto notare sin dal 1907 che ogni individuo inala del radon quotidianamente, prima del 1956 (in Svezia) non furono effettuate misurazioni di radon nelle abitazioni private. L'elevato livello di radon rilevato riscosse poco interesse in campo internazionale, perché il problema venne considerato esclusivamente locale. Soltanto 20 anni dopo si avviarono studi sistematici su larga scala in numerose nazioni, che mostrarono che l'esposizione al radon in ambienti confinati era diffusa e si potevano raggiungere livelli molto alti di concentrazione, comparabili a quelli delle miniere. I risultati di tali studi sensibilizzarono la comunità scientifica internazionale e nel 1988 il radon e i suoi prodotti di decadimento furono classificati dalla IARC, agenzia del WHO, come cancerogeni per gli esseri umani (gruppo 1 IARC) per quanto riguarda il tumore polmonare. La Commissione internazionale per la protezione radiologica (ICRP) sottolineò la vastità del problema per la salute pubblica e, nella pubblicazione numero 65 del 1993, promulgò specifiche raccomandazioni sul rischio per la salute e sulla protezione da radon negli ambienti di vita e di lavoro.

Vari studi internazionali sul radon nelle abitazioni hanno dimostrato che il rischio di cancro ai polmoni aumenta approssimativamente in modo lineare con l'aumento dell'esposizione a lungo termine.

[(Darby S et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. British Medical Journal, 2005, 330:223–227.; Darby S et al. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 subjects with lung cancer and 14,208 subjects without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 2006,32(Suppl. 1):1–83;Krewski D et al. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. Epidemiology, 2005,16:137–145. Krewski D et al. A combined analysis of North

American case-control studies of residential radon and lung cancer. Journal of Toxicology and Environmental Health A, 2006, 69:533–597. Lubin JH et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. International Journal of Cancer, 2004, 109:132–137, BEIR VI, 1999: Health effects of exposure to radon)]

Quando il radon è inalato, le particelle alfa densamente ionizzanti, prodotte durante il decadimento suo e dei suoi discendenti a vita breve, possono interagire con i tessuti biologici dei polmoni, arrecando danno al DNA. Gli studi molecolari e cellulari hanno dimostrato che tale danno può verificarsi a qualunque livello di esposizione al radon, poiché anche una singola particella alfa può generare danno alle cellule [(*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly. New York, United Nations, 2000; WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva, World Health Organization, 2009.; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. Report to the General Assembly. New York, United Nations, 2008.*)]

In uno studio del 2006, Darby et al. (*Darby S et al. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 subjects with lung cancer and 14,208 subjects without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 2006,32(Suppl. 1):1–83.*) hanno riportato in dettaglio gli effetti combinati dell'esposizione al radon con il fumo di sigaretta; come riepilogati nella seguente tabella:

Radon concentration (Bq/m ³)	Risk of death per 1000 current smokers of 15–24 cigarettes per day	Risk of death per 1000 lifelong non-smokers
0	101	4.1
100	116	4.7
200	131	5.4
400	160	6.7
800	216	9.3

^a After correction for uncertainties in the assessment of radon concentrations.
Source: Darby et al. (72).

Tab. 3-34. Rischio cumulativo di morte da cancro ai polmoni su una popolazione di età di 75 anni, suddivisa tra fumatori (15-24 sigarette al giorno) e non fumatori, esposta a concentrazione di radon variabile.

Oltre che all'accertata correlazione tra esposizione al radon e tumore ai polmoni, vi sono anche indicazioni di possibili correlazioni tra tale esposizione e altre forme tumorali, come leucemia e cancro alle vie aeree extratoraciche [(*Radiological protection against radon exposure_ICRP Publication 126-Annals of the ICRP-2014*)].

3.6 **La concentrazione del radon in Europa e in Italia**

Negli scorsi decenni in Europa sono state condotte svariate campagne di misurazione del radon all'interno degli edifici. Ogni nazione ha costruito la mappa di rischio sul proprio territorio, utilizzando criteri, tipologie di dati di partenza e metodi grafici generalmente non omogenei fra loro.

Nello studio "JRC_Overview_radon_Surveys_in_Europe_EUR_21892" del 2005, ne è stato riportato un quadro complessivo (da cui si evidenzia come le diverse nazioni hanno operato in maniera non omogenea):

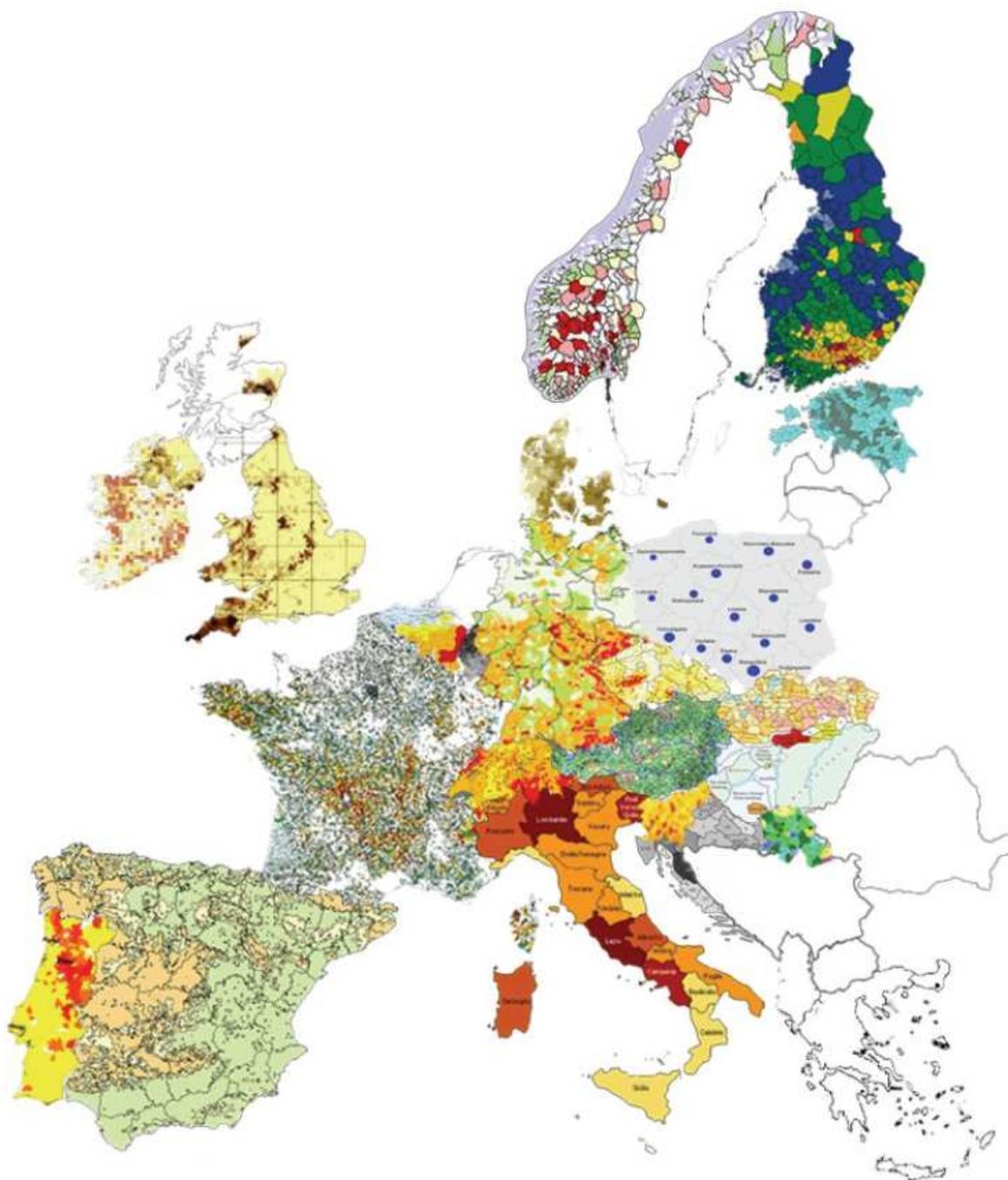


Fig. 3-44 Mappa dei livelli di concentrazione di radon stimati in Europa.

Con lo scopo di effettuare il primo monitoraggio dell'esposizione domestica a radon-derivati in Italia, nel 1990/91 è stata condotta una indagine su scala nazionale, promossa dall'ENEA/DISP e dall'Istituto Superiore di Sanità, al fine di documentare i livelli medi di concentrazione di radon all'interno di 5.000 abitazioni site in 200 Comuni in varie regioni Italiane (Fig. 3.5).

I risultati di questa indagine hanno determinato un livello medio nazionale di concentrazione di radon pari a 70 Bq/m³.

Livelli superiori a 200 Bq/m³ sono stati misurati nel 5% delle abitazioni, mentre nell'1% delle abitazioni il livello era superiore a 400 Bq/m³.

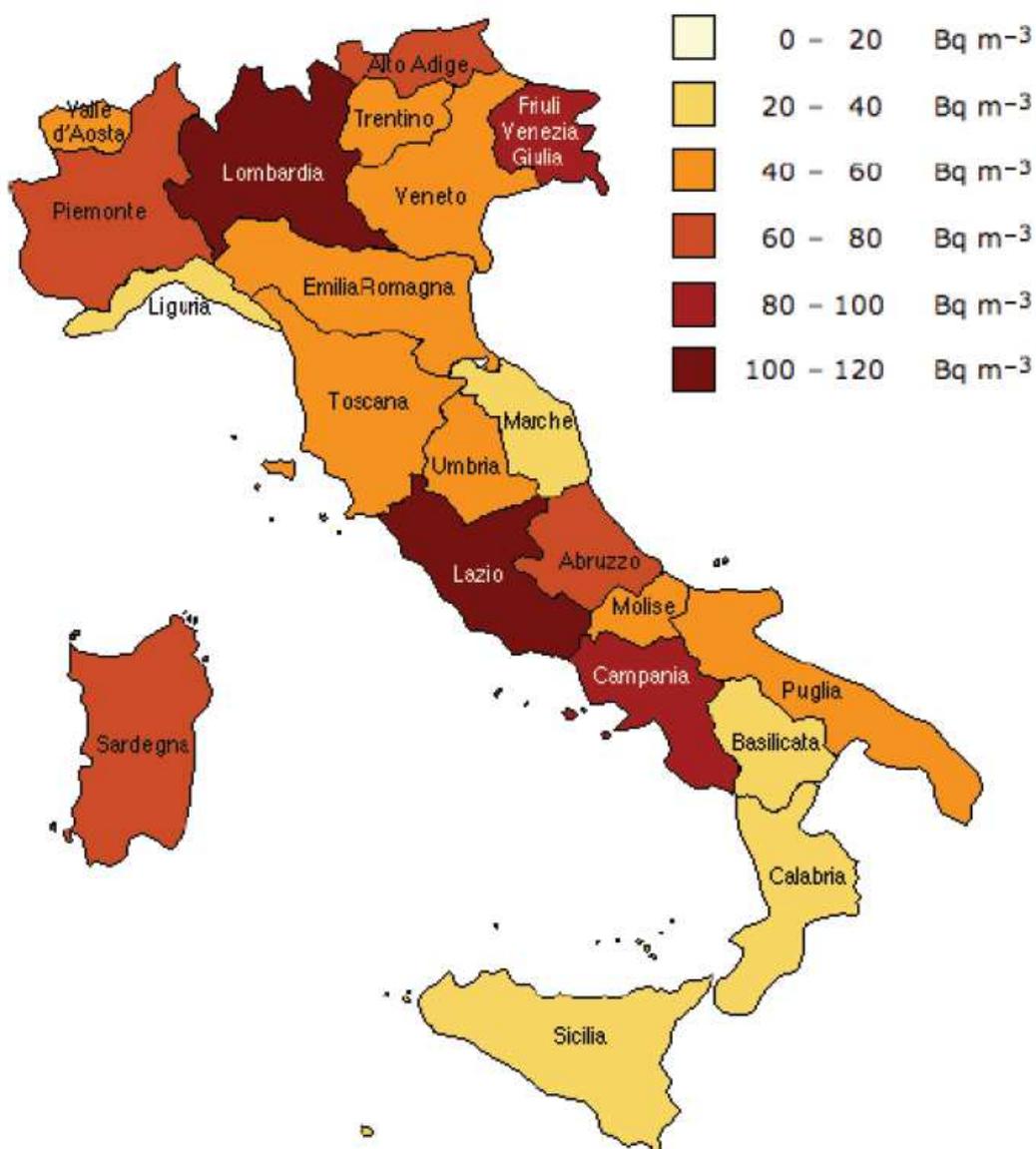


Fig. 3-55 Mappa dei livelli di concentrazione media annua stimati dall'Indagine Nazionale ENEA/DISP e ISS nelle 21 regioni italiane (Bochicchio et al., 2005)

3.7 Quadro legislativo nazionale ed europeo

A livello internazionale le raccomandazioni di radioprotezione e standards sono indicati da ICRP (International Commission on Radiological Protection), IAEA (International Atomic Energy Agency), ILO (International Atomic Energy Agency), CE (Commissione Europea). In particolare IAEA nelle sue pubblicazioni ha delineato "Safety fundamentals" basati sui principi ICRP, ILO nelle sue "Conventions and Recommendations", adottate da tempo in molti paesi del mondo, indica esplicitamente di tenere in considerazione le raccomandazioni ICRP.

Nella maggior parte dei paesi europei in cui vengono recepite le direttive emanate dalla CE si riscontra un distinguo tra la normativa relativa ai luoghi di lavoro e quella relativa alle abitazioni.

	Comunitaria	Italiana
Ambienti di lavoro	Direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3	D. Lgs. 230/1995 "Attuazione delle direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti"
	Direttiva 96/29/EURATOM del 13.5.96	D. Lgs. n.241 del 26.5.2000 "Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM del 13.5.96 in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti"
	Direttiva 2013/59/EURATOM del Consiglio UE, del 5.12.2013 che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom	D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro"
Ambienti residenziali	Direttiva 2013/59/EURATOM	

Tab. 3-45 Normativa in materia di radon

In Italia gli adempimenti di legge per l'esposizione al radon negli ambienti di lavoro sanciscono l'obbligo per il datore di lavoro di effettuare la valutazione del rischio specifico e di adottare le misure necessarie a garantire la sicurezza e la salute dei lavoratori. I valori di riferimento, individuati in termini di concentrazione di attività di radon media in un anno,

sono riportati nella tabella seguente. Si segnala che attualmente non è stato stabilito dalla normativa nazionale un valore di riferimento per gli ambienti residenziali.

	Valore (Bq/m³)	Normativa
Ambienti di lavoro (includere le scuole)	500	D.Lgs. 230/1995 e s.m.i.
	≤ 300	Direttiva 2013/59/EURATOM
Ambienti residenziali	≤ 300	Direttiva 2013/59/EURATOM

Tab. 3-56: Valori di riferimento della concentrazione di attività di radon media in un anno

L'Italia dovrà recepire la direttiva europea 2013/59/Euratom, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, estendendole per la prima volta anche agli ambienti residenziali. La direttiva stabilisce, inoltre, che gli Stati membri definiscano un piano d'azione nazionale che affronti i rischi di lungo termine dovuti alle esposizioni al radon. Il principale obiettivo della direttiva è quello di ridurre l'impatto sulla popolazione e sui lavoratori, ad esempio attraverso l'adozione di azioni appropriate per prevenire l'ingresso del radon in nuovi edifici, e individuando le zone in cui si prevede che la concentrazione media annuale di radon superi il livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici. Infatti tale direttiva promuove interventi volti a individuare le abitazioni in cui la concentrazione media annua supera il livello di riferimento, incoraggiando eventuali azioni di rimedio.

3.8 Quadro legislativo regionale

La Regione Sardegna non dispone di norme specifiche.

3.9 Individuazione delle aree a rischio radon nelle regioni italiane (D.Lgs 230/95 e s.m.i.)

Ad oggi varie Regioni italiane hanno definito la mappatura del territorio regionale finalizzata all'individuazione delle aree a rischio radon previste dal D.Lgs 230/95, in aggiunta alle misure svolte per la definizione dell'esposizione della popolazione italiana al radon indoor promossa dall'Istituto Superiore di Sanità e dall'ENEA-DISP e già illustrata in precedenza.

La figura seguente riporta una raccolta dei risultati delle attività svolte al 2018 da tali regioni¹.

La figura raccoglie le attività svolte dalle diverse Regioni a partire dagli anni 2000 e successivamente avviate ed aggiornate fino alla data del presente rapporto.

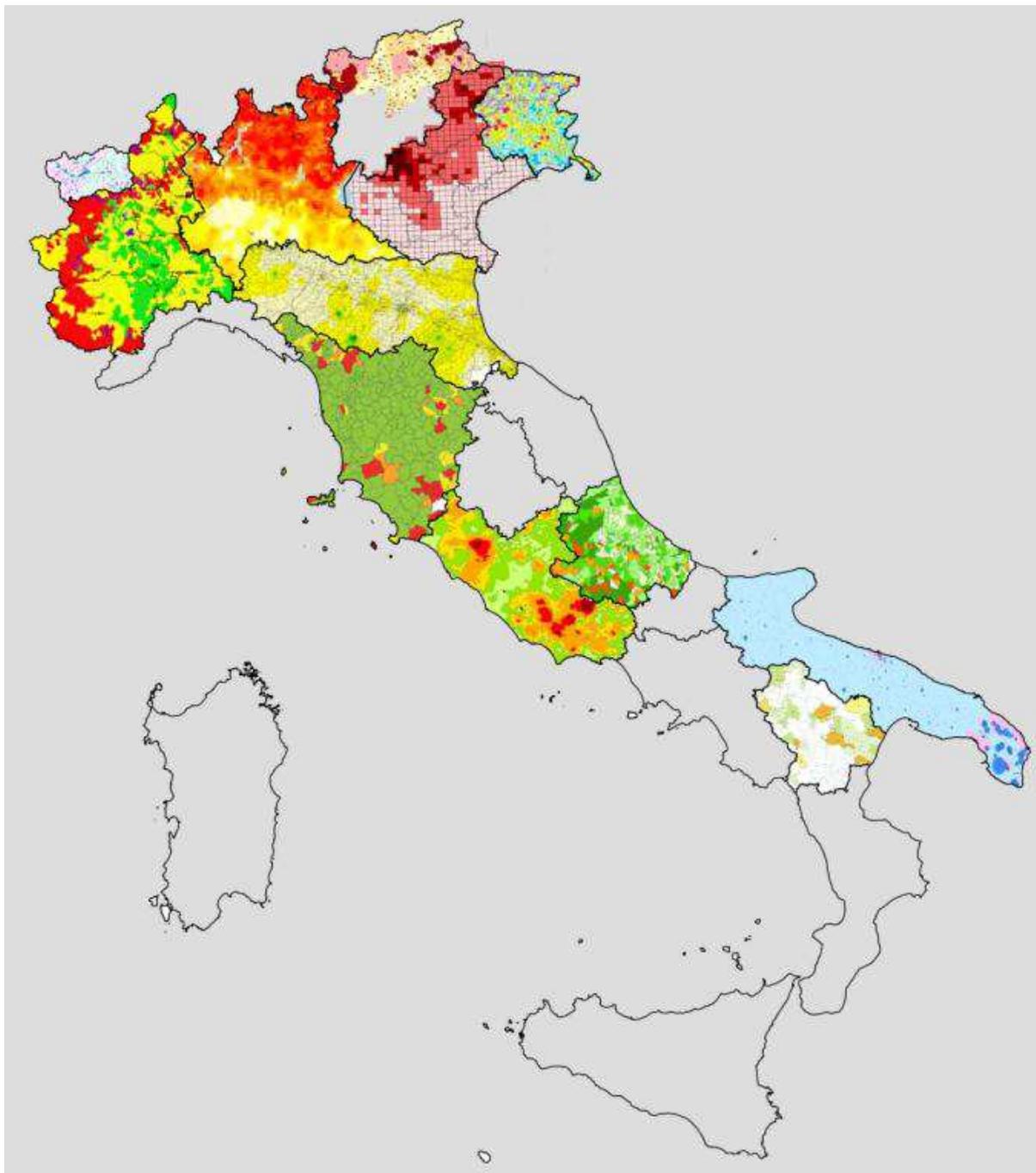


Fig. 3-6: Quadro nazionale della classificazione, su base regionale, delle aree a rischio radon (aggiornamento 2018)

¹ Torri G. : Mappatura radon: esempi in Europa e situazione in Italia. Palmanova 11 ottobre 2018 (http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/radiazioni/radioattivita/radon/approfondimenti/radon_1000_risultati.html).

La figura evidenzia la disomogeneità dei criteri adottati dalle varie regioni derivante dall'assenza dei criteri previsti dal D.Lgs 230/95.

Tale disomogeneità prende avvio dai presupposti sui quali sono state avviate le relative indagini, le quali differiscono per

- Unità territoriali (campionamento e reporting)
- Punti di misura (tipologia e selezione)
- Trattamento dei dati
 - indicatore
 - metodologia di analisi
- Rappresentazione (colori, intervalli)

Le unità territoriali sono individuate in

- Maglie regolari
 - Geometriche (6x6km, 5x5km, 5.5x6.5 km, ecc.)
 - carte regionali, es.: a 1:5.000 (3.2x2.8 km)
- Unità variabili (geologia, morfologia del territorio)
- Comuni
- Aree litologiche

Le metodologie di analisi dei dati sono suddivise in statistiche e geostatistiche, secondo il seguente schema di riepilogo

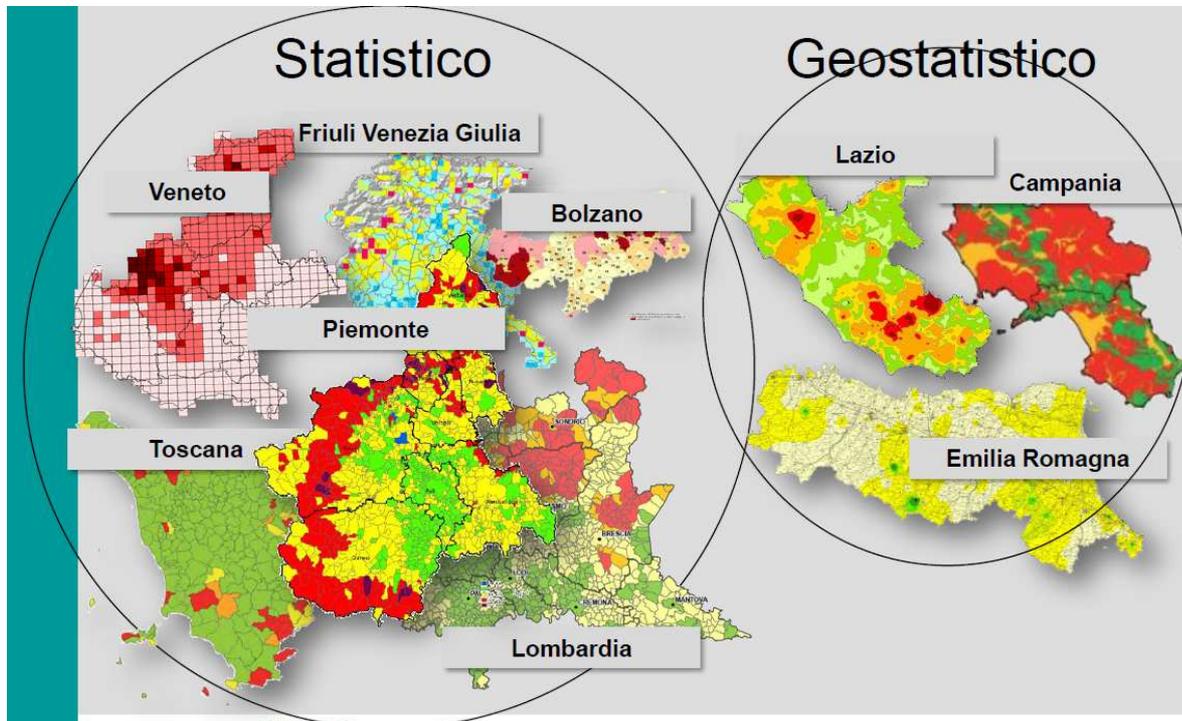


Fig. 3-7 : Metodologie di elaborazione dei dati utilizzate nella definizione delle aree a rischio radon (su base regionale o provinciale)

Per quanto riguarda gli indicatori, sono stati utilizzati:

- Concentrazione media (aritmetica / geometrica) nelle unità territoriali (comuni, celle)
- % di edifici che superano una soglia
- Concentrazione corrispondente al 75° percentile della distribuzione dei valori misurati
- Concentrazioni singoli risultati della misura

Un esempio della differente scelta dei criteri per individuare le aree a rischio è rappresentato nella figura seguente, dove le tre regioni rappresentate hanno adottato tre differenti metodi di rappresentazione (amministrativo, a maglia, geostatistico) nonché valori di riferimento pari a 200 Bq/m^3 e 300 Bq/m^3 e con percentuali di abitazioni che superano i livelli di riferimento $>10\%$ (Veneto), $>20\%$ (Lombardia), $>30\%$ (Lazio)

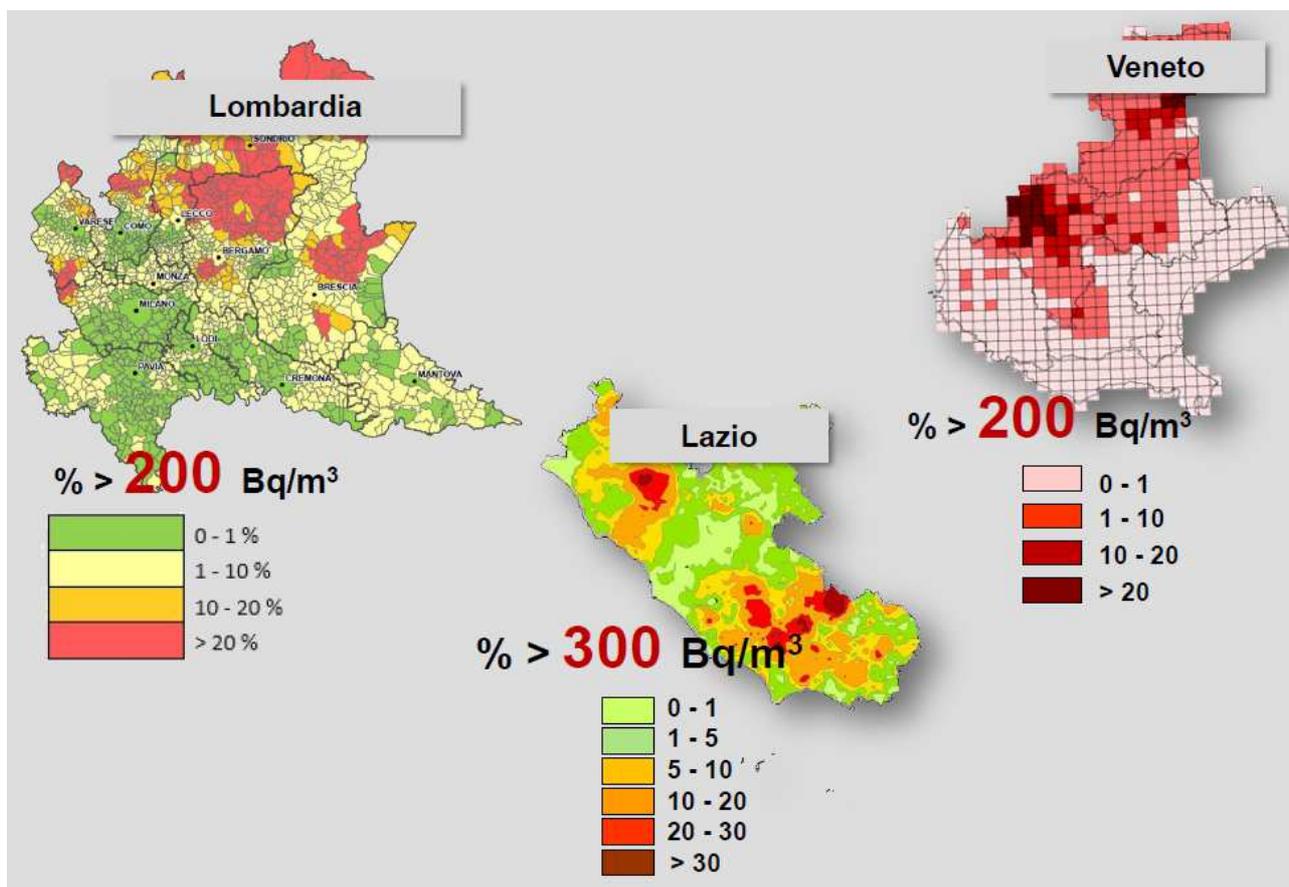


Fig. 3-8 Criteri e valori di riferimento utilizzati da alcune Regioni italiane per la definizione delle aree a rischio radon.

4 Impostazione del Progetto, livelli di concentrazione e contesti di riferimento delle informazioni

I dati acquisiti durante l'esecuzione delle attività previste dal Progetto (1° semestre: periodo marzo-agosto; 2° semestre: periodo settembre-marzo 2018) e successivamente elaborati su basi statistiche e su base geografica, sono stati riferiti a tre contesti territoriali distinti, come indicato nella fase progettuale²: una maglia regolare che suddivide l'intero territorio della Sardegna in uguali porzioni, un contesto amministrativo corrispondente ai confini comunali ed il contesto geologico rappresentato dalla Carta litologica della Sardegna.

I livelli di riferimento per la concentrazione del radon a cui si farà riferimento nella elaborazione dei dati sono:

- i valori di 100 Bq/m³ e 300 Bq/m³ proposti dall'OMS per le abitazioni nel rapporto WHO Handbook on Indoor Radon: "A Public Health Perspective", nel quale si raccomanda che i Paesi adottino possibilmente un livello di riferimento di 100 Bq/m³ o comunque non superiore a 300 Bq/m³;
- il valore di 300 Bq/m³ indicato dalla Direttiva 59/2013/Euratom (che sarebbe dovuta essere recepita entro il 6.02.2018), quale valore massimo per la media annua della concentrazione di radon sia per gli edifici residenziali e sia per gli ambienti di lavoro;
- il valore di 500 Bq/m³, che risulta indicato dal D.Lgs 230/95 e s.m.i. quale livello d'azione per gli ambienti di lavoro, al di sopra del quale il datore di lavoro deve mettere in atto azioni di rimedio per ridurre la concentrazione di radon, a meno che dimostri che nessun lavoratore è esposto ad una dose superiore a 3 mSv/anno. Ciò ad eccezione di asili-nido, scuole materne e dell'obbligo per le quali, se la concentrazione supera 500 Bq/m³, è necessario procedere alla riduzione della concentrazione senza effettuare la valutazione della dose.

4.1 La maglia

Per la suddivisione del territorio della Sardegna in maglie regolari è stata presa in considerazione la maglia delle Sezioni in scala 1:10.000 della Carta Tecnica Regionale (CTR) di dimensioni pari a 5,5 x 7,0 km che definisce una superficie pari a 38,5 Km².

Tale griglia consente un adeguato dettaglio per gli obiettivi e le finalità del Progetto nella definizione delle aree a rischio.

Di lato le maglie facenti parte del Progetto Radon.

I dati riferiti a tale livello consentono di ottenere valori statistici medi omogenei in quanto riferiti a maglie regolari unidimensionali e con ugual numero di punti di rilevamento/misurazione (n. 10).

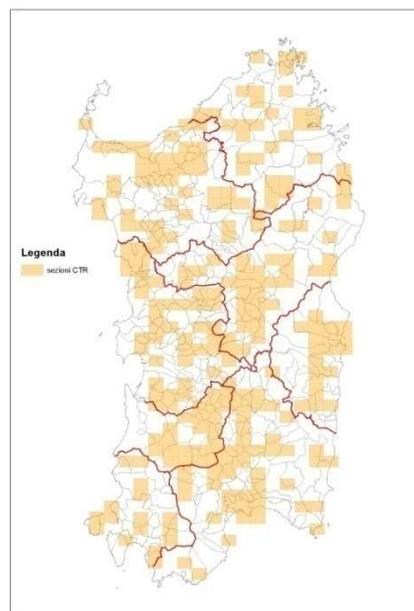
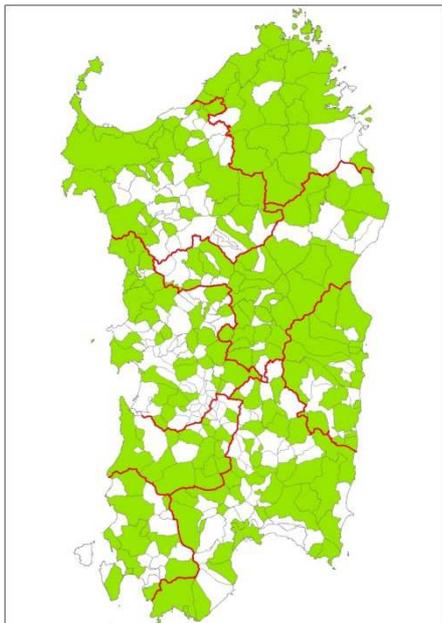


Fig. 4-1: Maglie individuate dal Progetto Radon

²I tre livelli individuati nel progetto venivano così definiti:

Base territoriale;
Base amministrativa;
Base geologica;

4.2 I limiti amministrativi dei Comuni



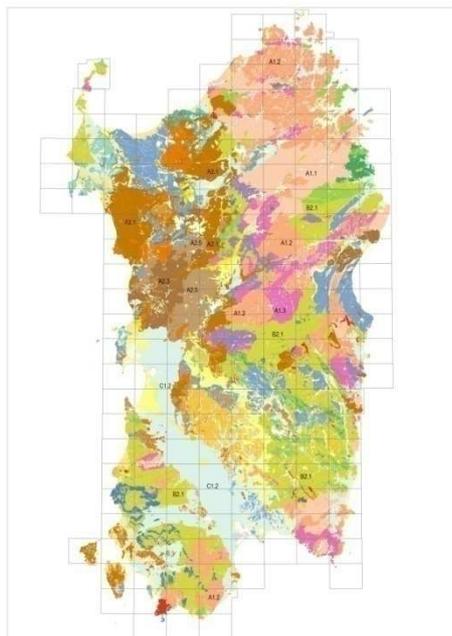
I dati riferiti ai limiti amministrativi comunali consentono una diretta correlazione tra le aree urbanizzate e un territorio ben definito e facilmente identificabile.

Presenta il limite di attribuire un numero di campioni definito (n.10) a superfici fortemente disomogenee tra loro.

Di lato, evidenziati in verde, i Comuni individuati dal Progetto Radon.

Fig. 4-2: Comuni individuati dal Progetto Radon

4.3 Le unità litologiche



I dati riferiti alle Unità litologiche consentono di valutare ed attribuire dei valori a litotipi che pur essendo ubicati in ambiti geografici diversi presentano, in generale; caratteristiche simili dal punto di vista della loro origine, formazione e contenuto (minerale petrografico, elementi e aggregati rocciosi, fossili, ecc).

Sulla base di tali considerazioni possono essere predisposte delle carte geo-tematiche di sintesi che consentono la evidenziazione di aspetti e problematiche particolari.

Fig. 4-3: Carta litologica della Sardegna

5 Il Progetto Radon: i risultati

5.1 Sviluppo temporale del Progetto e risultati della partecipazione dei Comuni

La parte operativa del Progetto Radon è basata sulla misura della concentrazione del radon indoor in un campione regionale di edifici organizzata in due semestri di misura (1° semestre: marzo-agosto 2017 e 2° semestre: settembre 2017-marzo 2018). Tale fase operativa è stata realizzata attraverso la collaborazione con i Comuni, che allo scopo hanno individuato una figura (denominata "Referente") che ha supportato il Progetto in tutte le sue diverse fasi.

Le diverse fasi di predisposizione ed attuazione del programma previsto dal Progetto sono riassunte nell'Allegato 1.

Non tutti i Referenti sono riusciti a rientrare pienamente nei tempi indicati dal Progetto. Per tutta la durata del 1° e del 2° semestre il gruppo di lavoro del Progetto ha in continuazione interagito con i Referenti comunali tramite la trasmissione di una serie di e-mail informative (con cadenza mensile) che tenessero viva l'attenzione sul Progetto e contattando, spesso ripetutamente, per via telefonica i Referenti e rispondendo alle numerose richieste di chiarimenti e supporto nelle varie fasi del Progetto. Talora le informazioni sono pervenute in tempi molto lunghi, tali da comportare notevoli ritardi nella raccolta e trattamento dei dosimetri e nelle relative elaborazioni dei risultati.

Le ultime consegne dei dosimetri relativi al 2° semestre sono pervenute infatti nel mese di giugno 2018, determinando pertanto un forte rallentamento nello sviluppo del Progetto. Nella tabella seguente sono riportati i dati sintetici riguardanti la partecipazione dei Comuni al Progetto Radon.

1° SEMESTRE D'INDAGINE: COMUNI CHE HANNO TRASMESSO SCHEDE Q e/o D	144	78%	78%
COMUNI A PARTECIPAZIONE INCERTA (NON HANNO TRASMESSO LE SCHEDE E NON COMUNICANO)	38	21%	22%
COMUNI FUORI PROGETTO (COMUNICAZIONE FORMALE)	2	1%	
TOTALE COMUNI PROGETTO	184	100%	100%
COMUNI DI CUI SI DISPONE DEL QUADRO INFORMATIVO COMPLETO: SCHEDE QUESTIONARIO+SCHEDE DOSIMETRO+VALUTAZIONE CONCENTRAZIONE	137	74%	
2° SEMESTRE D'INDAGINE: COMUNI CHE HANNO TRASMESSO SCHEDE Q e/o D	138	75%	75%
COMUNI A PARTECIPAZIONE INCERTA (NON HANNO TRASMESSO LE SCHEDE E NON COMUNICANO)	44	24%	25%
COMUNI FUORI PROGETTO (COMUNICAZIONE FORMALE)	2	1%	
TOTALE COMUNI PROGETTO	184	100%	100%
COMUNI DI CUI SI DISPONE DEL QUADRO INFORMATIVO COMPLETO: SCHEDE QUESTIONARIO+SCHEDE DOSIMETRO+VALUTAZIONE CONCENTRAZIONE	132	72%	
QUADRO DI SINTESI PER L'ANNO DI INDAGINE			
COMUNI DI CUI SI DISPONE DEL QUADRO INFORMATIVO COMPLETO: SCHEDE QUESTIONARIO+SCHEDE DOSIMETRO+VALUTAZIONE CONCENTRAZIONE	142	77%	77%
COMUNI A PARTECIPAZIONE INCERTA (NON HANNO TRASMESSO LE SCHEDE E NON COMUNICANO)	40	22%	23%
COMUNI FUORI PROGETTO (COMUNICAZIONE FORMALE)	2	1%	
TOTALE COMUNI PROGETTO	184	100%	100%

Tab. 5-1: Schema riassuntivo partecipazione Comuni al Progetto Radon

Complessivamente ai fini del Progetto sono stati considerati 142 Comuni, che rappresentano il 77% dei Comuni inizialmente coinvolti. Solo 2 Comuni hanno formalmente comunicato l'impossibilità della loro partecipazione mentre i restanti 40 Comuni non hanno trasmesso nessuna informazione o hanno trasmesso solo parzialmente le informazioni richieste, non consentendo di effettuare la valutazione delle concentrazioni di radon negli edifici monitorati.

5.2 Attività integrative del Progetto Radon

Alla conclusione del 1° semestre di attività, in considerazione del fatto che circa il 22% dei Comuni coinvolti non aveva di fatto partecipato al Progetto ARPAS ha messo in campo delle attività finalizzate ad acquisire nuove informazioni da integrare nel Progetto Radon.

Le principali attività messe in campo sono state le seguenti:

1. Nuova campagna di misura "Radon dipendenti ARPAS"

Nello sviluppo del Progetto si è valutato di interesse estendere il campione d'indagine attraverso il coinvolgimento volontario dei dipendenti dell'Agenzia. All'iniziativa ha potuto aderire chi attualmente abita in una struttura immobiliare/appartamento a diretto contatto con il substrato e amici-conoscenti, se interessati e con abitazioni che possiedono i requisiti necessari.

La Campagna di monitoraggio integrativa ha avuto inizio nel mese di settembre 2017 ed è terminata il 31 marzo 2018, alla conclusione del secondo semestre di attività, una rilevazione della durata compresa fra 90 e 210 giorni.

Complessivamente sono stati monitorati 190 edifici ricadenti in 58 Comuni, di cui 32 non interessati dal Progetto Radon.

2. Recupero e riallineamento dei dati "Indagini radon precedenti 1991-1997"

Rientrano in tale categoria le attività avviate nella fase di predisposizione del Progetto Radon:

- "Campagna Nazionale Radon 1991-92" eseguita su 124 Abitazioni in 9 Comuni;
- "Campagna Radon nelle scuole elementari- USL 1995" che ha interessato 115 scuole in 97 Comuni;
- "Campagna Radon acque minerali- USL 1996/97"

I dati e le informazioni relative agli edifici (abitazioni e scuole) sono stati integrati nel Progetto.

Complessivamente sono stati monitorati 248 edifici ricadenti in 108 Comuni, di cui 34 non interessati da altri Progetti.

5.3 Quadro riassuntivo del Progetto

PROGETTO RADON	
Comuni di cui si dispone del quadro informativo completo: schede questionario+schede dosimetro+valutazione concentrazione	142
Numero edifici monitorati (con misure di concentrazione)	1399
ATTIVITA' INTEGRATIVA ARPAS	
Comuni di cui si dispone del quadro informativo completo: schede questionario+schede dosimetro+valutazione concentrazione (di cui 32 non interessati dal Progetto Radon)	58
Numero edifici monitorati (con misure di concentrazione)	190
INDAGINI RADON PRECEDENTI (1991/97)	
Comuni di cui si dispone del quadro informativo completo: schede questionario+schede dosimetro+valutazione concentrazione (di cui 34 non interessati dal Progetto Radon e Attività ARPAS)	108
Numero edifici monitorati (con misure di concentrazione)	248
QUADRO GENERALE	
Comuni di cui si dispone del quadro informativo completo: schede questionario+schede dosimetro+valutazione concentrazione	208
Numero edifici monitorati (con misure di concentrazione)	1837
NOTA: i numeri indicati per gli edifici e i dosimetri sono solamente quelli validati.	

Tab. 5-2 Quadro riassuntivo delle informazioni

Nelle tavole seguenti è mostrato il quadro generale dei Comuni e sezioni CTR su cui si dispongono informazioni.

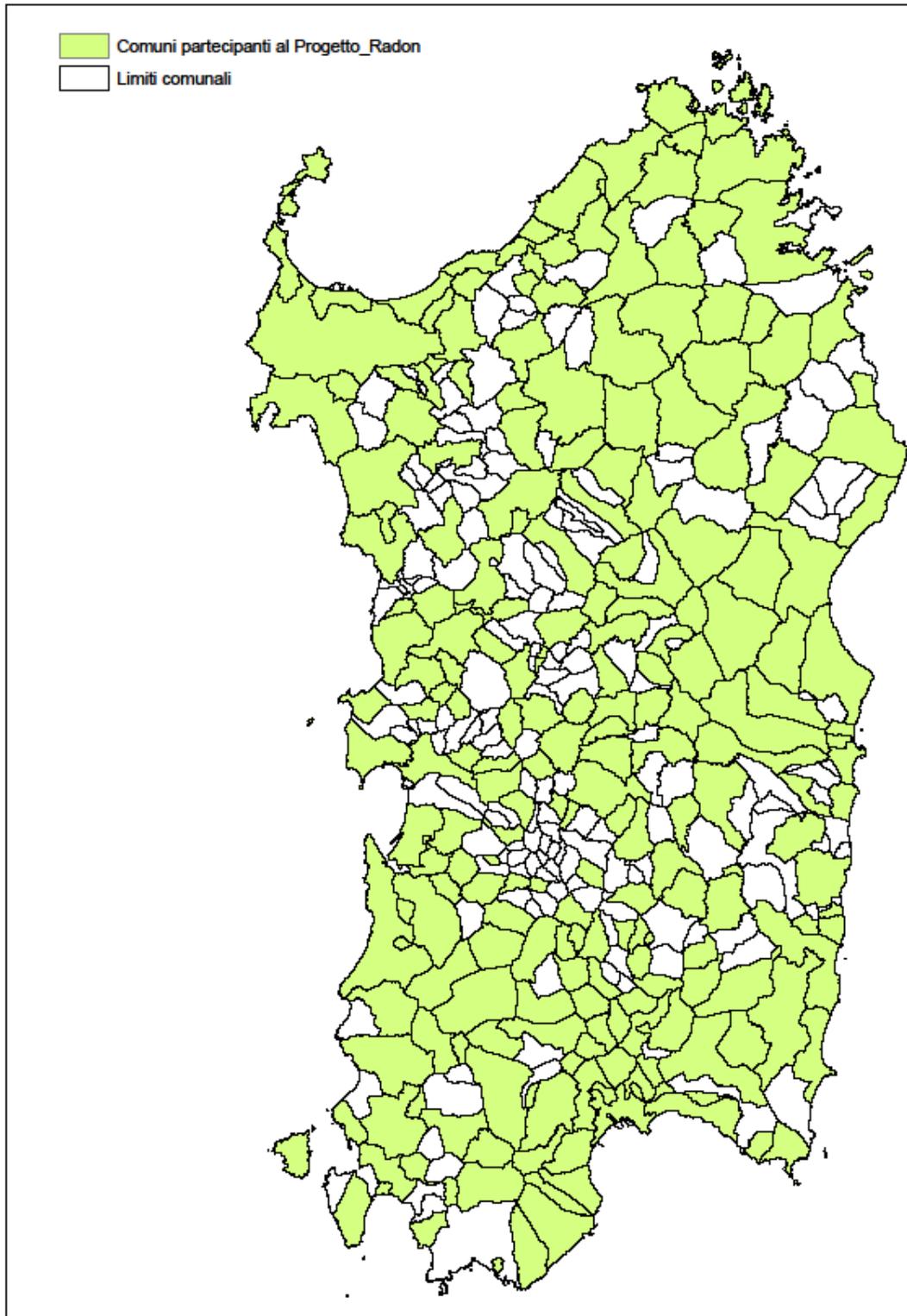


Fig. 5-1Quadro riassuntivo partecipazione Comuni al Progetto Radon

Legenda

-  Maglie_con_edifici_monitorati
-  Limiti provinciali (vecchio ordinamento)
-  Limiti amministrativi comunali

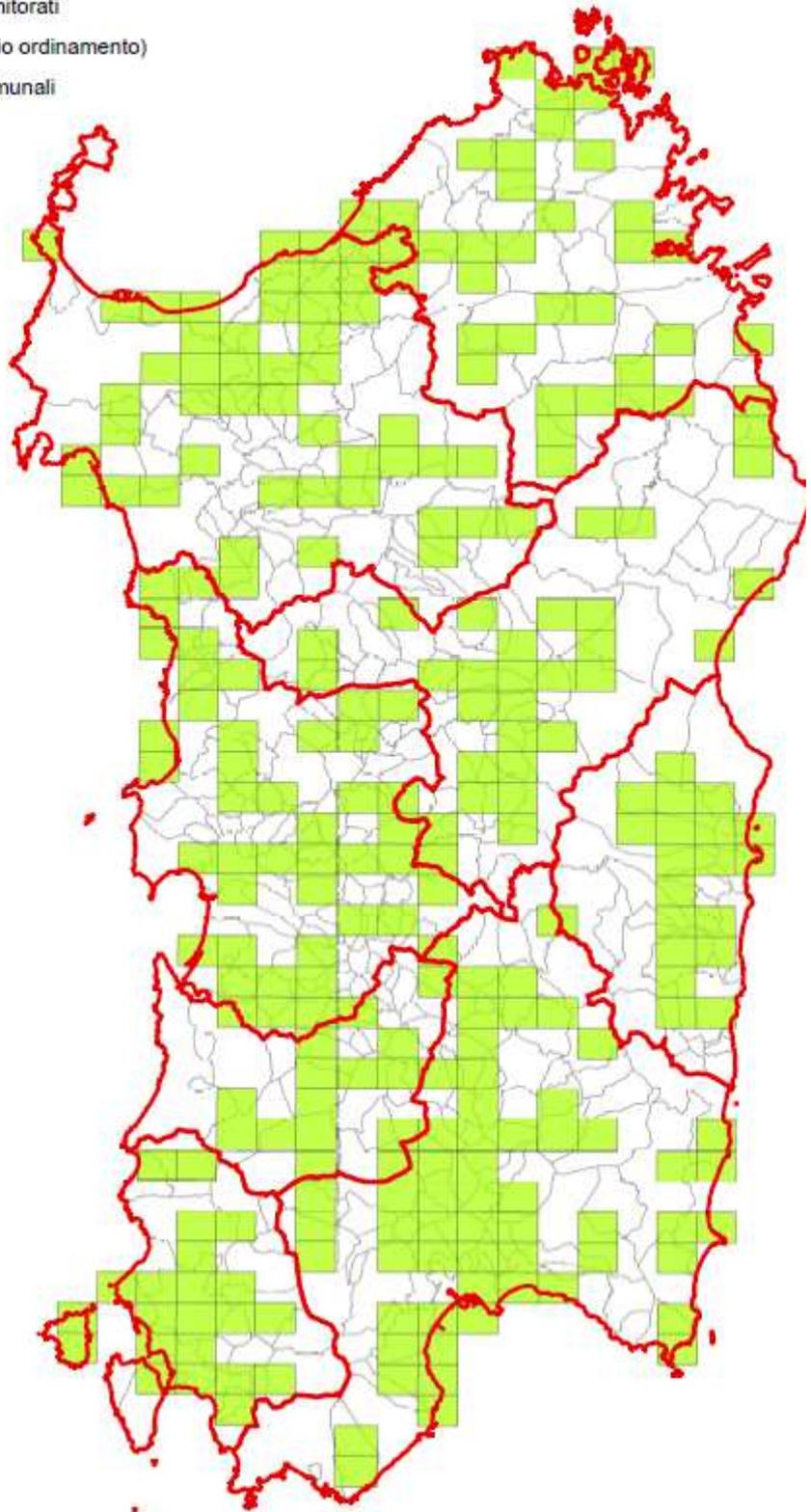


Fig. 5-2 Quadro riassuntivo per il livello "Maglia" Progetto Radon

5.4 Quadro di riferimento edifici monitorati

Le tavole che seguono mostrano la distribuzione degli edifici monitorati nel territorio regionale, sia sulla base cartografica dei confini comunali, come evidenziato nella Fig. 5.3, sia con lo sfondo della carta geolitologica, di cui alla successiva Fig. 5.4.

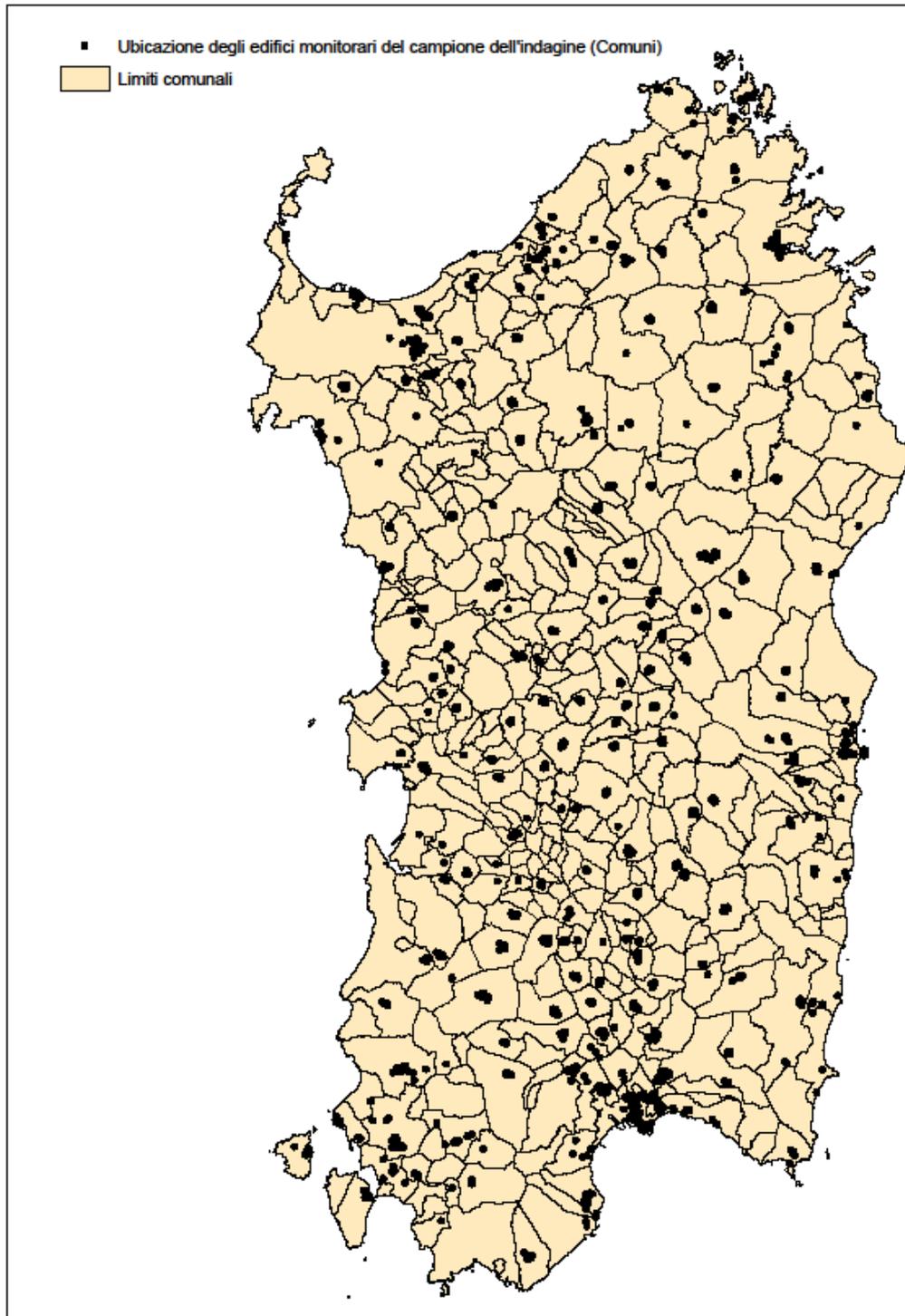


Fig. 5-3 Ubicazione degli edifici monitorati nell'indagine (su base amministrativa comunale)

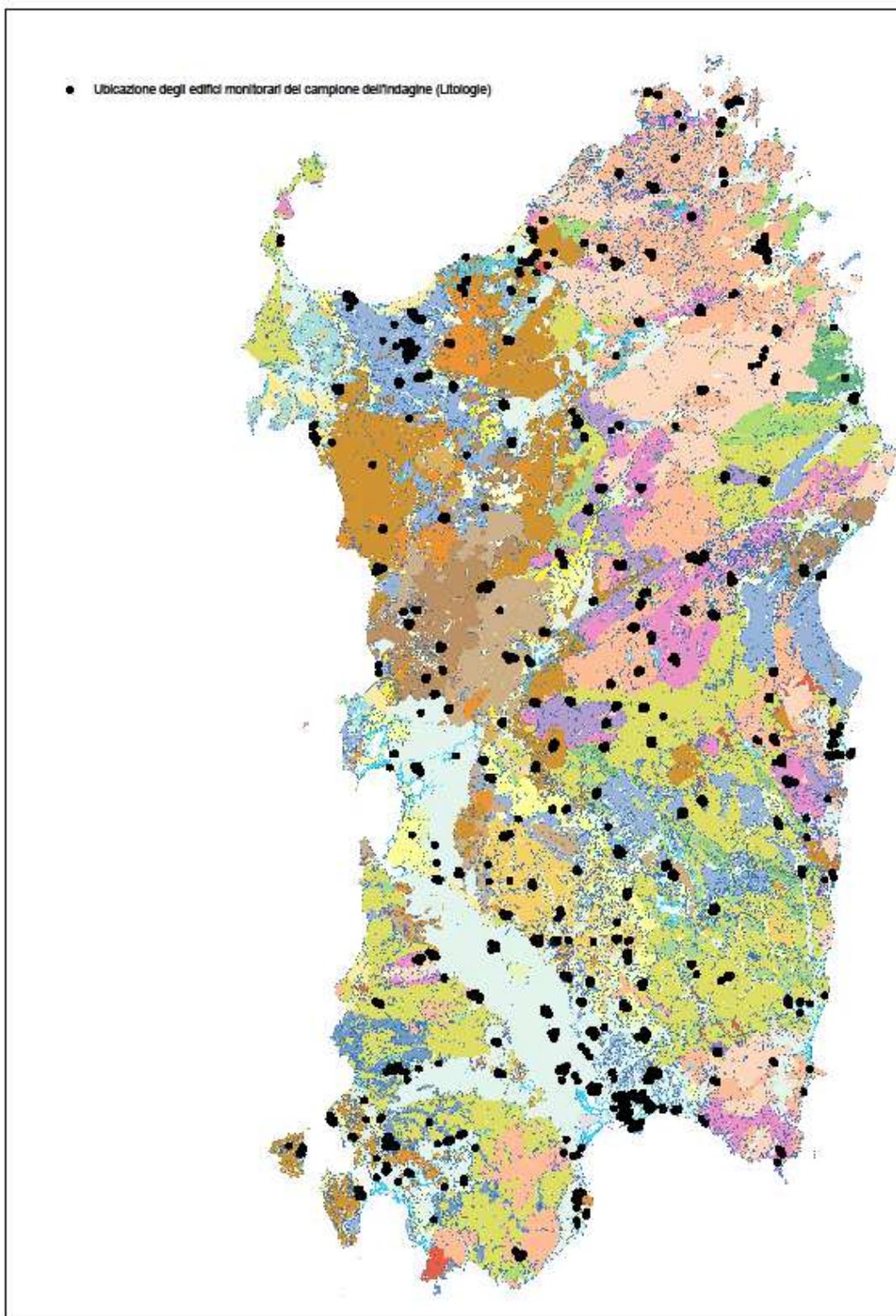


Fig. 5-4 Ubicazione degli edifici monitorati nell'indagine (su base litologica)

Nell' Allegato n. 5 viene riportato l'elenco dei Comuni interessati dalle misure di concentrazione e il numero di edifici per Comune nelle diverse attività.

5.5 Distribuzione degli edifici nelle Unità Litologiche

Le rocce della Sardegna, come descritto nell'Allegato 3 ("La Carta litologica della Sardegna) sono suddivise nelle tre grandi classi:

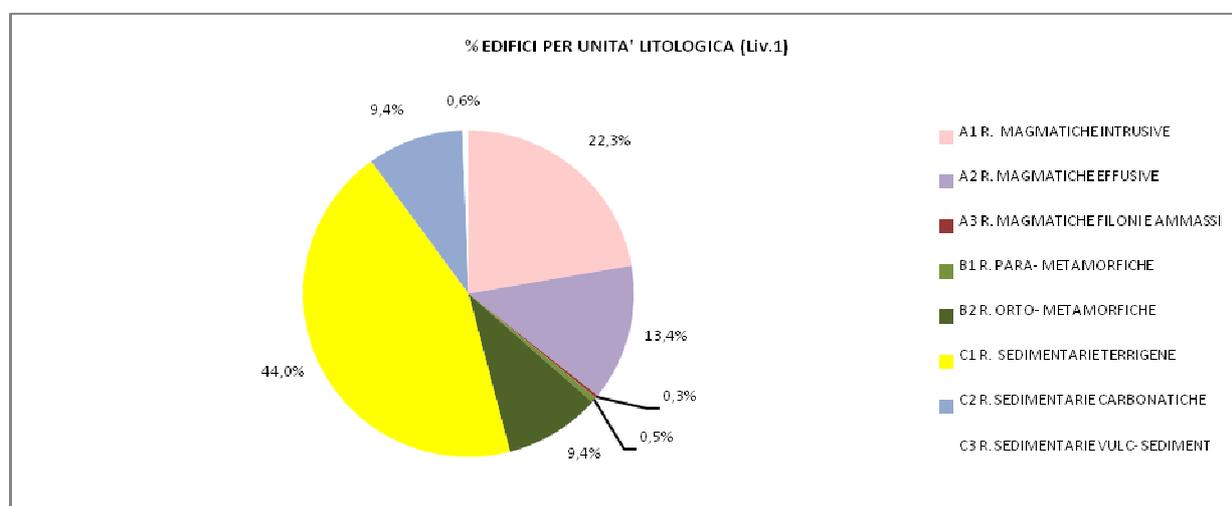
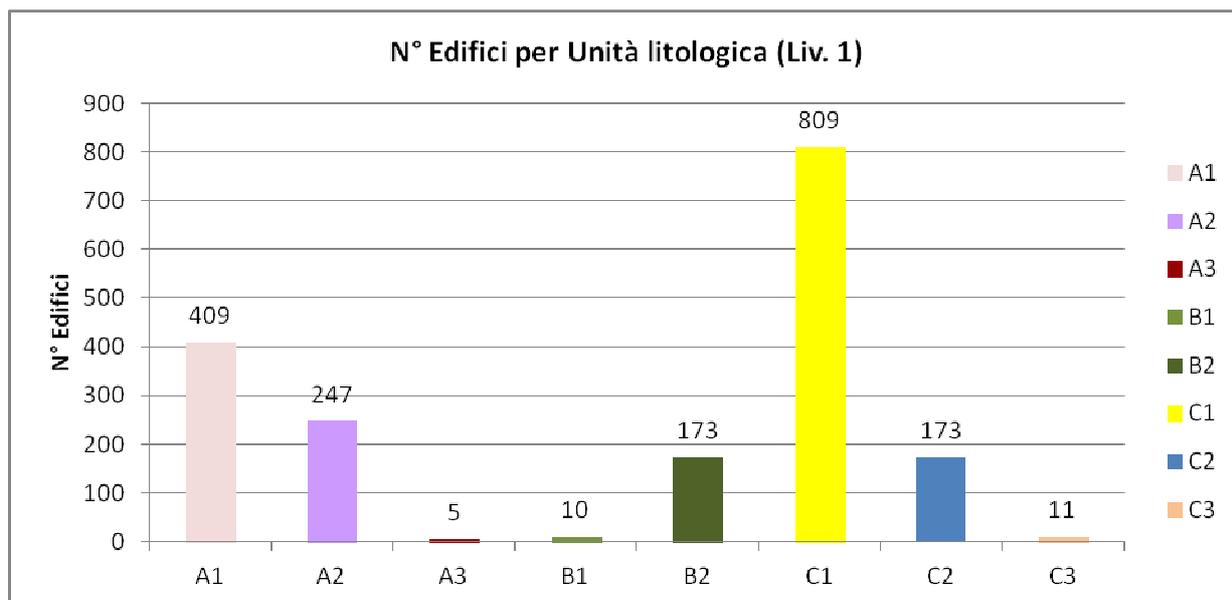
- A - rocce magmatiche
- B - rocce metamorfiche
- C - rocce sedimentarie

All'interno delle grandi classi sono state distinte otto sottoclassi (livello 1):

- A1 - rocce magmatiche intrusive
- A2 - rocce magmatiche effusive
- A3 - corpi filoniani e ammassi sub vulcanici
- B1 - rocce ortometamorfiche
- B2 - rocce parametamorfiche
- C1 - rocce sedimentarie terrigene
- C2 - rocce sedimentarie carbonatiche
- C3 - rocce vulcano-sedimentarie

Una prima analisi dell'interazione tra edifici/punti di misura e substrati geologici su cui questi insistono, come riportato nella Fig. 5.4 precedente e nelle tabelle e nei grafici seguenti, evidenzia che 661 edifici ricadono su substrati rocciosi appartenenti alle rocce magmatiche (36%), 183 edifici su rocce metamorfiche (10%) ed infine 993 su rocce sedimentarie (54%).

Le tipologie litologiche più interessate dalla presenza degli edifici, in relazione al liv. 1 delle Unità litologiche, risultano essere la classe delle rocce terrigene sedimentarie, seguita dalle rocce magmatiche intrusive, dalle rocce magmatiche effusive, dalle rocce ortometamorfiche e dalle rocce sedimentarie carbonatiche, in linea con quanto già riscontrato nella fase di analisi preliminare per la definizione del Progetto Radon.



	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	C3	
Unità litologica	R. MAGMATICHE INTRUSIVE	R. MAGMATICHE EFFUSIVE	R. MAGMATICHE FILONIE AMMASSI	R. PARA-METAMORFICHE	R. ORTO-METAMORFICHE	R. SEDIMENTARIE TERRIGENE	R. SEDIMENTARIE CARBONATICHE	R. SEDIMENTARIE VULC-SEDIMENT	Totale
N° Edifici su Unità litologica	409	247	5	10	173	809	173	11	1837
% Edifici su Unità litologica	22,3%	13,4%	0,3%	0,5%	9,4%	44,0%	9,4%	0,6%	100%

Fig. 5-5: Istogramma, grafico e tabella della distribuzione degli edifici all'interno delle diverse unità litologiche (Livello 1)

La distribuzione degli edifici monitorati della Sardegna nel dettaglio è riportata nella tabella e nel grafico seguente, riferito al livello 2 delle Unità Litologiche.

CLASSI GEOLITOLOGICHE				EDIFICI		EDIFICI	
Liv. 0	Liv. 1	Liv. 2	Descrizione	N°	%	N° Subtotale	% Subtotale
A	A1 R.M. INTRUSIVE	A1.1	Leucograniti, Leucomicrograniti, Graniti s.l., Leucosienograniti, Microsienograniti, Sienograniti	36	2,0	661	36%
		A1.2	Monzograniti, Leucomonzograniti, "Granodioriti monzogranitiche" Auct.	224	12,2		
		A1.3	Granodioriti, Granodioriti tonalitiche, Microgranodioriti, Granodioriti monzogranitiche	100	5,4		
		A1.4	Tonaliti, Tonaliti granodioritiche, Tonaliti quarzodioritiche	49	2,7		
	A2 R.M. EFFUSIVE	A2.1	Rioliti e Riodaciti	64	3,5		
		A2.3	Basalti alcalini, Trachibasalti, Hawaiiiti, Mugeariti, Fonoliti, Fonoliti tefritiche	97	5,3		
		A2.4	Andesiti e Andesiti basaltiche	60	3,3		
	A3 R.M. FILONI E AMMASSI	A2.5	Basalti, Basalti andesitici	26	1,4		
		A3.1	Filoni e ammassi acidi (quarzo, riolitici, riodacitici, pegmatitici, aplitici, aplopegmatitici, dacitici)	3	0,2		
A3.2	A3.2	Filoni e ammassi basici (basaltici) e intermedio-basici (andesitici, andesitico-basaltici, dioritici, sienitici, quarzoandesitici)	2	0,1			
	B1 R.M. PARA-METAMORFICHE	B1.1	Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide	3	0,2	183	10%
B1.2		Migmatiti acide, Diatessiti, Ortogneiss granodioritici, Ortogneiss leucogranitici, Aplopegmatiti e Pegmatiti foliate	3	0,2			
B1.3		Migmatiti basiche, Elogiti, Anfiboliti, Metatessiti	4	0,2			
B2 R.ORTO-METAMORFICHE	B2.1	B2.1	Rocce parametamorfiche terrigene: Filladi, Micascisti, Gneiss, Miloniti, Filoniti, Fels, Quarziti, Metaconglomerati, Metarenarie, Metargilliti, Liditi, Diaspri	151	8,2		
		B2.2	Rocce parametamorfiche carbonatiche: Marmi, Marmi dolomitici, Marmi azoici, Contattiti, Metacalari, Metadolomie, "Calcarì grigi" Auct., "Dolomia rigata" Auct., "Dolomia gialla" Auct., Calcarì silicizzati	22	1,2		
C	C1 R.S. TERRIGENE	C1.1	Depositi terrigeni antropici (saline, vasche di salificazione, aree di rispetto lagunare, discariche: minerarie, industriali, per inerti, per rifiuti solidi urbani; materiali di riporto e aree bonificate)	40	2,2	993	54%
		C1.2	Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie, sabbie, limi, argille), (conglomerati, arenarie, siltiti, peliti)	359	19,5		
		C1.3	Depositi terrigeni continentali legati a gravità (detriti di versante, frane, coltri eluvio-colluviali, "debris avalanches", brecce)	148	8,1		
		C1.4	Depositi terrigeni palustri, lacustri, lagunari (limi, argille limose, fanghi torbosi con materia organica anche con intercalazioni di sabbie, selci)	2	0,1		
		C1.5	Depositi terrigeni litorali (ghiaie, sabbie, arenarie, conglomerati)	142	7,7		
		C1.6	Depositi terrigeni marini (siltiti, argilliti, peliti)	62	3,4		
		C1.7	Depositi terrigeni eolici (sabbie, arenarie)	48	2,6		
		C1.8	Depositi terrigeni fluvio-deltizi (sabbie, microconglomerati, arenarie carbonatiche, siltiti argillose)	8	0,4		
	C2 R.S. CARBONATICHE	C2.1	Depositi carbonatici lacustri e lagunari (Calcarì, Dolomie, Calcarì silicizzati, Travertini)	9	0,5		
		C2.2	Depositi carbonatici marini (Marne, Calcarì, Calcarì dolomitici, Calcarì oolitici, Calcarì bioclastici, Calcarenitì)	164	8,9		
	C3 R.S. VULC-SEDIMENT	C3.1	Depositi vulcano-sedimentari di ambienti fluvio-lacustri e lagunari (Epiclastiti, Tufiti, Tufi, Cineriti, Vulcaniti, sedimenti clastici(sabbioso-siltoso-arenacei) e indistinti)	11	0,6		
TOTALE				1837	100	1837	100

Tab. 5-3 Distribuzione degli edifici all'interno delle Unità Litologiche

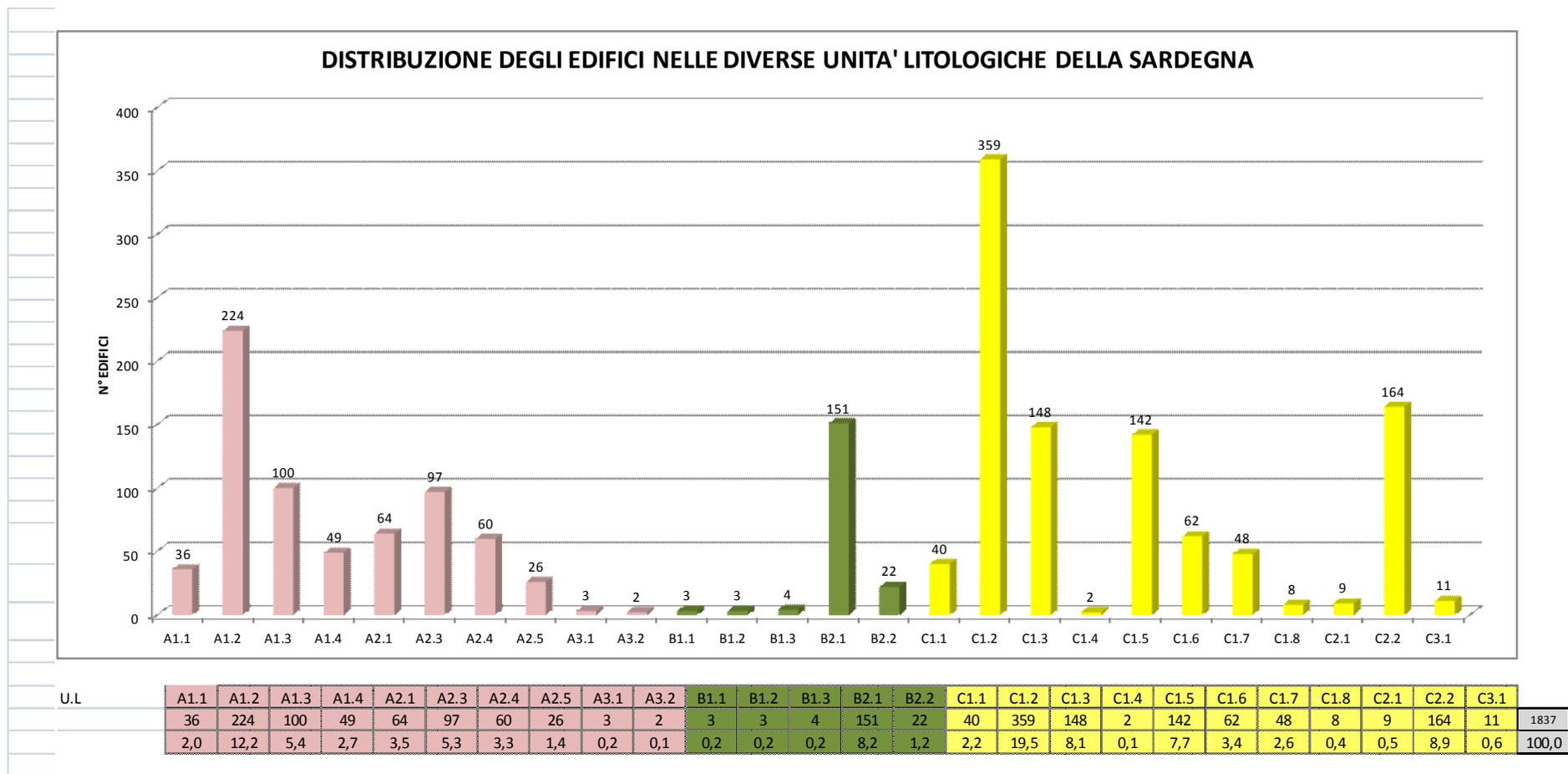


Fig. 5-6 Istogramma della distribuzione del numero degli edifici nelle Unità litologiche della Sardegna.

Le unità litologiche maggiormente interessate dagli edifici monitorati sono risultate essere l'UL C1.2 (Depositi terrigeni) con 359 edifici (pari al 20%) seguita dall'UL A1.2 (Monzograniti) con 224 edifici (pari al 12%) e dall'UL C2.2 (Marne, Calcari, Calcari dolomitici) con 164 edifici (pari al 9% del totale).

5.6 La distribuzione della popolazione nel territorio regionale

Come già riportato nel Progetto, è noto che la popolazione sia distribuita nel territorio in modo fortemente disomogeneo, lasciando spopolate ampie aree del territorio regionale.

La figura seguente mostra la distribuzione della popolazione della Sardegna sulla base del censimento dati ISTAT 2011 così come suddivisa dall'ISTAT/ARPA in una griglia regolare con elementi di superficie pari a 1 km².

Nella figura, è riportata la popolazione suddivisa in classi, come mostrato nella relativa legenda, mentre le celle bianche rappresentano le aree dove la popolazione risulta pari a zero.

Come è evidente, la maggior parte della popolazione risulta residente negli inviluppi urbani dei diversi comuni.

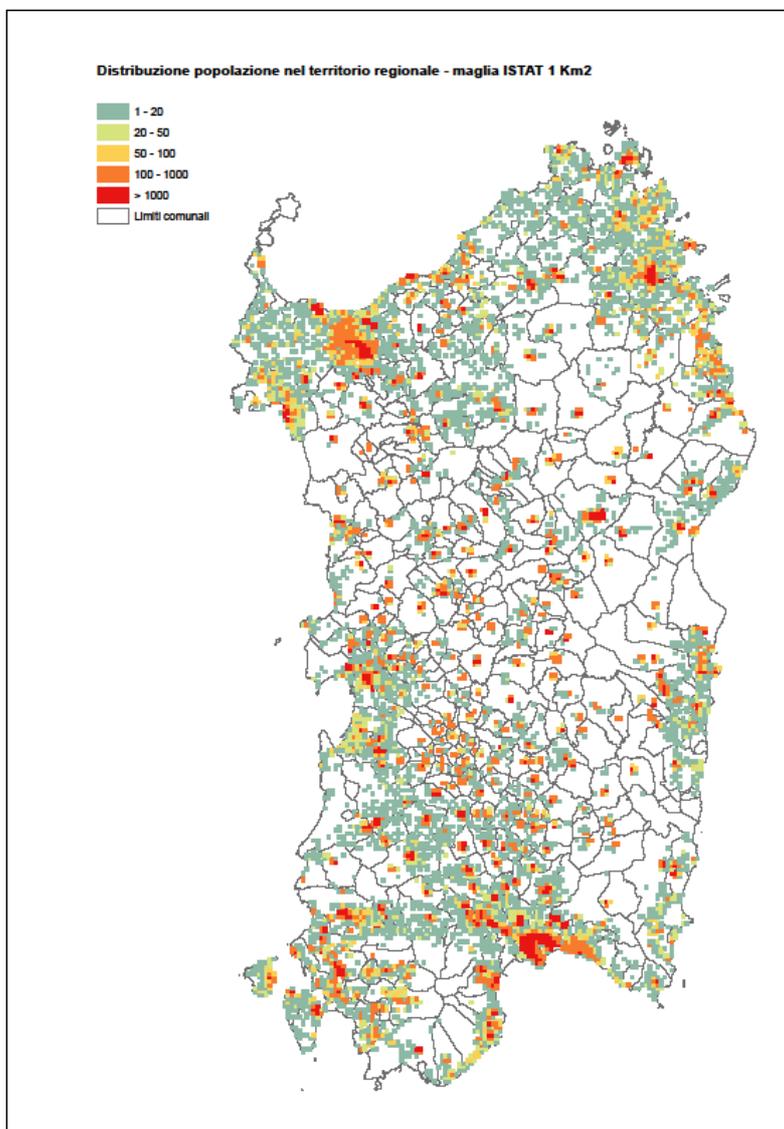


Fig. 5-7 Distribuzione della popolazione nel territorio regionale - maglia ISTAT 1 km²

5.6.1 La distribuzione della popolazione nelle Unità litologiche

Dall'incrocio tra i dati precedenti e la carta delle unità litologiche si riscontra che la popolazione della Sardegna è distribuita prevalentemente in territori caratterizzati dalla presenza di rocce sedimentarie (circa 1.179.000 persone pari al 72% della popolazione), mentre la restante parte della popolazione risulta distribuita in aree in cui sono presenti rocce magmatiche (circa 307.000 persone pari al 19% della popolazione) ed infine nelle rocce metamorfiche (circa 115.000 persone pari al 7% della popolazione).

Un'analisi di maggior dettaglio, riferita al livello 2 della carta delle unità litologiche, evidenzia che le aree maggiormente popolate sono quelle sottese all'unità litologica delle rocce sedimentarie terrigene (circa 920.000 persone pari al 57% della popolazione) seguite dalle aree delle rocce sedimentarie carbonatiche (circa 259.000 persone pari al 16%) e dalle rocce magmatiche intrusive (circa 196.000 persone pari al 12% della popolazione).

Nota: La popolazione indicata in tabella è quella ottenuta attraverso operazioni di GIS con l'incrocio tra popolazione Istat e Carta delle Unità litologiche.

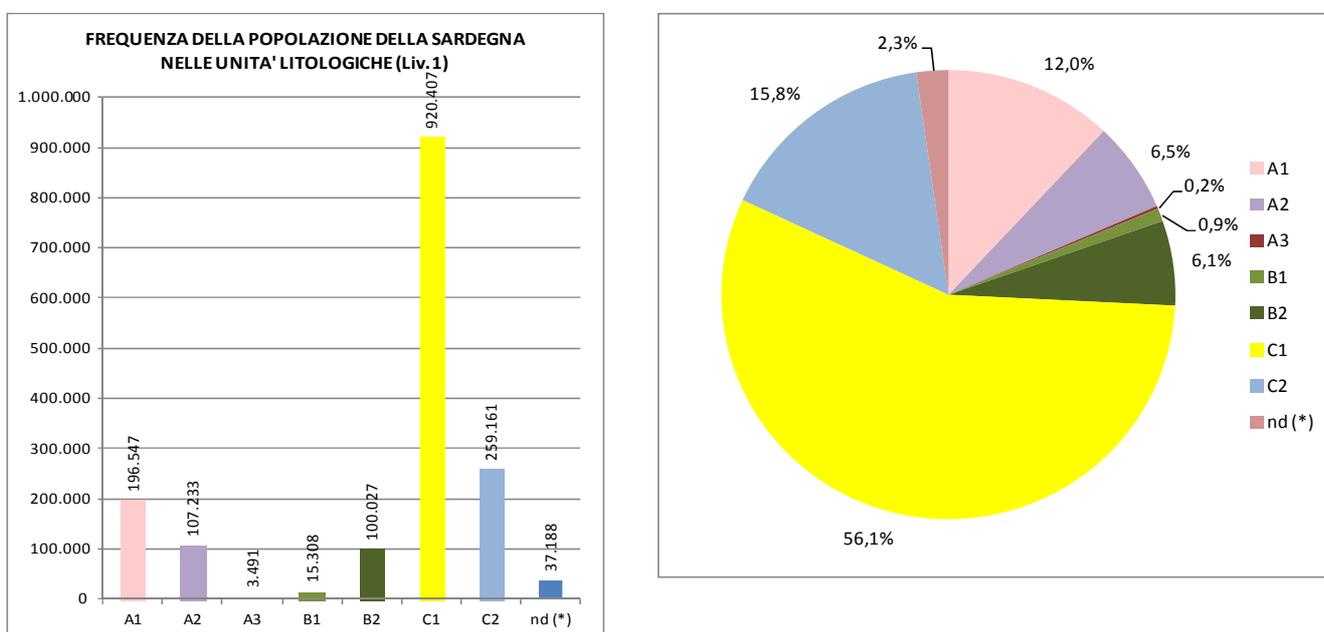


Fig. 5-8 Frequenza della popolazione nelle Unità litologiche (Liv. 1)

UNITA' LITOLOGICHE	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	nd (*)	TOTALE
	R. MAGMATICHE INTRUSIVE	R. MAGMATICHE EFFUSIVE	R. MAGMATICHE FILONI E AMM ASSI	R. METAMORFICHE PARA-METAMORFICHE	R. METAMORFICHE ORTO-METAMORFICHE	R. SEDIMENTARIE TERRIGENE	R. SEDIMENTARIE TERRIGENE		
N° Popolazione su Unità litologica	196.547	107.233	3.491	15.308	100.027	920.407	259.161	37.188	1.639.362
% Popolazione su Unità litologica	12,0%	6,5%	0,2%	0,9%	6,1%	56,1%	15,8%	2,3%	100%

nota (*): la popolazione nelle unità litologiche viene valutata con operazioni GIS che determinano uno scostamento rispetto a quanto indicato nel censimento ISTAT 2011.

Tab. 5-4 Distribuzione della popolazione nelle Unità litologiche (Liv.1)

Se si mettono in relazione gli edifici campione dell'indagine e la distribuzione della popolazione per la classe litologica di dettaglio (livello 2) si evidenzia un andamento abbastanza omogeneo rispetto alle aspettative del Progetto.

In linea generale risulta che la percentuale di edifici (in relazione alla totalità degli edifici monitorati) ricadenti all'interno delle unità litologiche, è, per le unità principali, generalmente superiore rispetto alla percentuale di popolazione che ricade all'interno della stessa unità litologica, ed evidenzia una buona distribuzione degli edifici su tutto il territorio regionale.

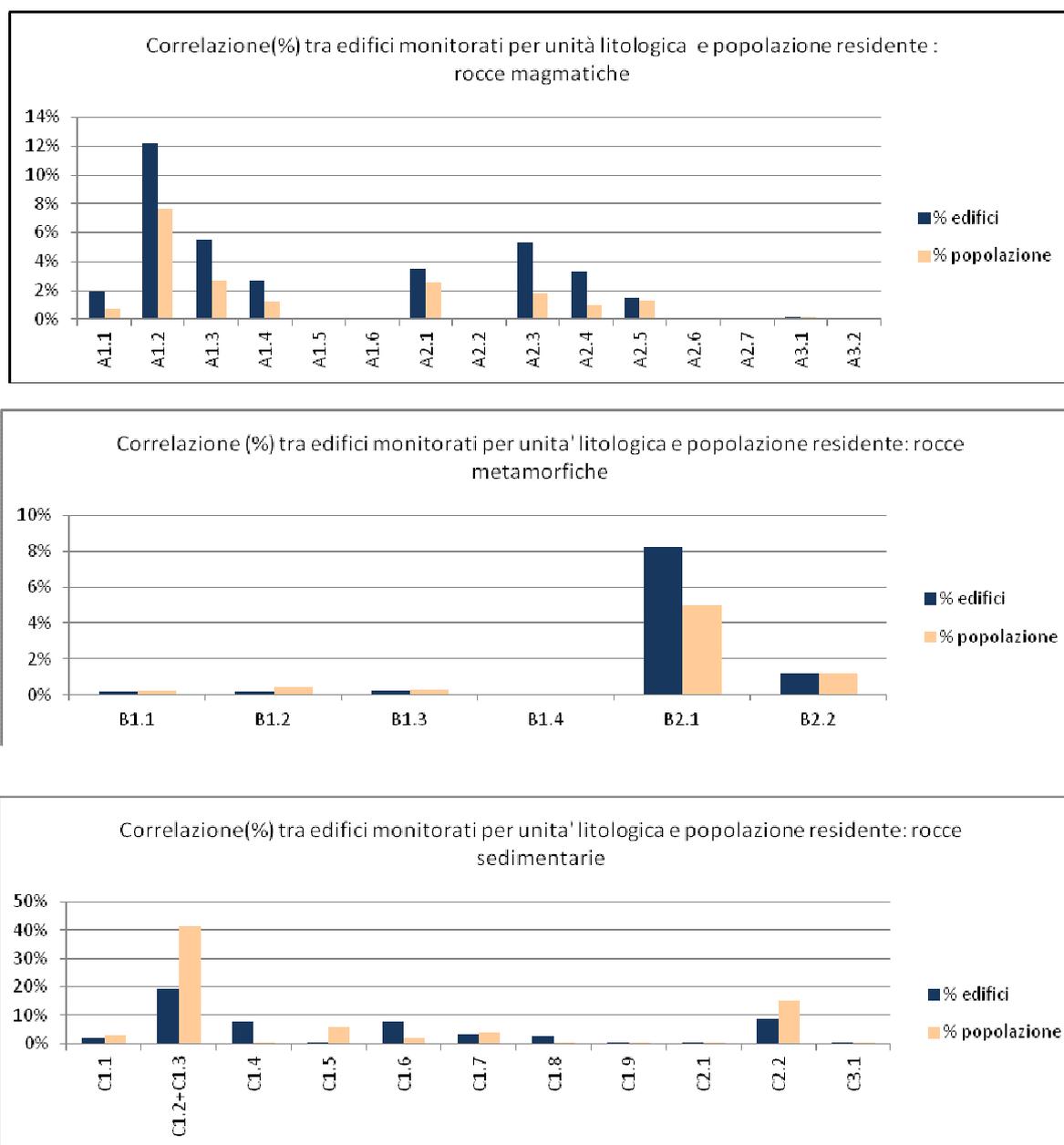


Fig. 5-9 : Correlazione tra edifici monitorati e popolazione residente per le Unità litologiche

Da questa tendenza si discostano le classi C1.2 e C1.3 (unità litologiche delle rocce sedimentarie) che rappresentano le unità litologiche più popolate della Sardegna (al loro interno sono presenti circa 670.000 abitanti pari al 41% della popolazione) e, come evidenziato nella fase di impostazione del Progetto, a tali classi litologiche è stata destinata una percentuale inferiore di dosimetri in rapporto alla popolazione.

5.7 Descrizione delle caratteristiche degli edifici del campione.

Per analizzare gli edifici monitorati, si è ritenuto conveniente utilizzare la suddivisione nelle ex 8 Province (istituite dalla L.R. 9/2001 e successivamente abolite con la L.R. 2/2016) nelle quali essi ricadono.

Sulla base dei dati ISTAT del 2011 è stata costruita la seguente tabella, che riporta la distribuzione degli abitanti e degli edifici residenziali in ognuna delle ex Province.

Provincia	Abitanti		Edifici residenziali	
Cagliari	550.580	34%	131.587	26%
Carbonia-Iglesias	128.540	8%	41.479	8%
Medio Campidano	101.256	6%	40.045	8%
Nuoro	159.197	10%	54.138	11%
Ogliastra	57.329	3%	24.090	5%
Olbia-Tempio	150.501	9%	62.119	12%
Oristano	163.916	10%	69.551	14%
Sassari	328.043	20%	89.301	17%
Totale	1.639.362	100%	512.310	100%

Tab. 5-5 Suddivisione degli abitanti e degli edifici residenziali nelle 8 ex Province della Sardegna secondo i dati ISTAT 2011

Per la campagna di monitoraggio si è scelto un campione rappresentativo di edifici, per ognuno dei quali è stata compilata una scheda "Questionario", recante vari parametri utili per la loro caratterizzazione.

Nelle seguenti tabelle sono riportate, in funzione della suddivisione territoriale, alcune delle caratteristiche degli edifici monitorati, quali: i materiali da costruzione, l'anno di costruzione, il numero di livelli su cui si sviluppa l'edificio, l'accoppiamento pareti-suolo, e la geomorfologia del terreno sul quale è costruito.

Gli edifici per i quali non sono state fornite indicazioni sui parametri considerati, sono stati esclusi dalle tabelle sottostanti.

Tali tabelle riportano, separatamente, i dati in funzione della diversa destinazione d'uso: edifici residenziali o scolastici.

Materiali da costruzione	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
Cemento	20	1	6	17	8	5	13	22	92
Laterizi	189	53	53	73	55	60	36	66	585
Legno	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Pietra	52	32	34	81	30	28	106	78	441
Totale complessivo	262	86	93	171	93	93	155	166	1.119

Tab. 5-6 Numero di edifici residenziali costruiti con i diversi materiali (semplificati), nelle 8 ex Province della Sardegna

Materiali da costruzione	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
Cemento	1	3	2	4	1		2	5	18
Laterizi	22	4	11	10	13	12	9	18	99
Pietra	9	6	5	20	7	9	18	18	92
Totale complessivo	32	13	18	34	21	21	29	41	209

Tab. 5-7 Numero di edifici scolastici costruiti con i diversi materiali (semplificati), nelle 8 ex Province della Sardegna

Anno di costruzione	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
< 1919	8	3	6	15	2	5	20	11	70
1919 - 1945	8	5	8	9	4	7	19	6	66
1946 - 1961	38	10	8	23	22	9	25	25	160
1962 - 1971	37	11	10	21	10	6	23	34	152
1972 - 1981	44	20	12	39	11	19	28	26	199
1982 - 1991	49	15	14	33	16	22	18	25	192
>1991	96	24	34	40	33	36	33	39	335
Totale complessivo	280	88	92	180	98	104	166	166	1174

Tab. 5-8 Numero di edifici residenziali suddivisi per anno di costruzione, nelle 8 ex Province della Sardegna

Anno di costruzione	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
< 1919				1	1			2	4
1919 - 1945		2		5	2	2	4		15
1946 - 1961	12	2	4	9	7	6	10	6	56
1962 - 1971	6	4	1	10	4	6	1	13	45
1972 - 1981	11	3	4	10	2	5	11	13	59
1982 - 1991	8		5	3	3	1	2	7	29
>1991	1	2	3	2	2	5	1	1	17
Totale complessivo	38	13	17	40	21	25	29	42	225

Tab. 5-9 Numero di edifici scolastici suddivisi per anno di costruzione, nelle 8 ex Province della Sardegna

Livelli nell'edificio	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
1	30	12	8	6	6	7	15	20	104
2	136	45	50	59	36	54	96	86	562
3	100	29	33	94	41	39	51	47	434
4	10	2	3	22	13	5	5	8	68
>4	4	1			4	1		7	17
Totale complessivo	280	89	94	181	100	106	167	168	1185

Tab. 5-10 Numero di edifici residenziali suddivisi secondo il numero di piani, nelle 8 ex Province della Sardegna

Livelli nell'edificio	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
1	13	5	7	6	5	10	8	16	70
2	16	6	11	21	9	9	12	15	99
3	9	2	1	12	7	6	8	6	51
4				2	2	1	3	3	11
Totale complessivo	38	13	19	41	23	26	31	40	231

Tab. 5-11 Numero di edifici scolastici suddivisi secondo il numero di piani, nelle 8 ex Province della Sardegna

Accoppiamento tra pavimento e suolo	NO	SI	Totale complessivo
Diretto sul suolo	119	48	167
Soletta	136	127	263
Vespaio chiuso	370	375	745
Vespaio ventilato	69	46	115
Totale complessivo	694	596	1290

Tab. 5-12 Numero totale di edifici suddivisi secondo la tipologia di accoppiamento tra pavimento e suolo, nelle 8 ex Province della Sardegna

Geomorfologia	Cagliari	Carbonia Iglesias	Medio Campidano	Nuoro	Ogliastra	Olbia Tempio	Oristano	Sassari	Totale complessivo
Forte pendio	8	3	6	22	18	11	7	15	90
Medio pendio	99	31	36	99	62	61	76	78	542
Pianeggiante	206	67	71	97	43	60	113	117	774
Totale complessivo	313	101	113	218	123	132	196	210	1406

Tab. 5-13 Numero totale di edifici suddivisi secondo la differente geomorfologia del suolo, nelle 8 ex Province della Sardegna

6 Misura della concentrazione di radon indoor in Sardegna

6.1 Le attività di verifica e controllo delle misure

Sulla base dei risultati ottenuti dalle misure negli edifici nel primo semestre, si è ritenuto opportuno procedere con una verifica sull'attendibilità delle misure stesse, in particolare delle misure relative agli edifici in cui il valore di concentrazione del primo semestre superava il valore di 300 Bq/m³, valore di riferimento comunitario.

Il programma di verifica ha riguardato sia edifici scolastici che abitazioni ed è stato condotto tra gennaio e febbraio 2018, con misure della durata media di circa due mesi, in prossimità della conclusione del secondo semestre di misura.

Il protocollo di verifica prevede l'installazione di almeno 2 dosimetri in ogni edificio scelto per le verifiche, uno dei quali è stato posizionato in corrispondenza del dosimetro del secondo semestre (a suo tempo posizionato dal referente comunale) e l'altro in un ambiente di interesse, sia ubicato nello stesso piano ma in locale di tipologia differente, sia in piani differenti. Contestualmente al posizionamento dei dosimetri di controllo sono state eseguite sia misure di rateo di dose gamma in vari ambienti dell'edificio monitorato, in aria e a contatto con le pareti interne, sia campionamenti dell'acqua ad uso domestico (rete pubblica e/o pozzi privati).

L'analisi dei risultati della verifica consiste nel confrontare la concentrazione del dosimetro "semestrale" (del secondo semestre) con quella rilevata dal dosimetro di controllo.

Lo scarto tra il valore di controllo e il valore semestrale costituisce il cosiddetto "scarto temporale", di cui sono stati calcolati i valori medi sull'intero set di verifica.

Lo scarto fra il valore rilevato da ogni dosimetro collocato in altro ambiente rispetto a quello del dosimetro semestrale è stato denominato "scarto spaziale" perché costituisce una misura di quanto il valore rilevato in un altro ambiente dell'edificio controllato differisce da quello "semestrale".

Alcuni dei risultati emersi sono riepilogati nella seguente tabella:

EDIFICI MONITORATI	SCUOLE	ABITAZIONI
N. COMUNI INTERESSATI	14	21
N. EDIFICI VERIFICATI	17	30
N. DOSIMETRI DI CONTROLLO POSIZIONATI	32	53
N. DOSIMETRI DI CONTROLLO NELLA STESSA POSIZIONE DEI SEMESTRALI	17	29
N. DOSIMETRI SEMESTRALI NON PERVENUTI	0	2
N. DOSIMETRI DI CONTROLLO IN ALTRE POSIZIONI NOTE	15	24
MEDIA SCARTO TEMPORALE CALCOLATO	+11% (SU 17 DATI)	-8% (SU 27 DATI)
MEDIA SCARTO SPAZIALE CALCOLATO	3% (SU 15 DATI)	1% (SU 22 DATI)

Ta

b. 6-1 Tabella riassuntiva attività di verifica e controllo

Nel caso degli edifici scolastici emerge che, nel breve periodo della verifica, il valore della concentrazione è mediamente superiore a quella del secondo semestre, mentre nelle abitazioni la tendenza è opposta.

In ogni caso lo scarto temporale è compatibile con le incertezze di misura, generalmente pari al 10%, e pertanto si può affermare che i dati di concentrazione semestrale sono congruenti e replicabili nel tempo.

In entrambi i casi le variazioni spaziali sono compatibili con le incertezze di misura, generalmente pari al 10%, conformemente a quanto atteso, trattandosi dello stesso edificio monitorato nello stesso arco di tempo.

I risultati del test effettuato mostrano che nello stesso edificio il valore della concentrazione è sostanzialmente stabile in quanto non si osservano variazioni significative tra ambienti differenti.

Il test della campagna di controllo consente di poter validare i risultati ottenuti durante i due semestri di monitoraggio e soprattutto di poter procedere alla definizione di un valore medio di concentrazione annuale per edificio.

6.2 Elaborazioni dei risultati analitici

Come già riportato in precedenza si dispone di misure annuali eseguite nel corso del Progetto Radon complessivamente in 142 Comuni, di misure più brevi (circa semestrali) in 58 Comuni eseguite con l'indagine integrativa ARPAS e misure annuali in edifici eseguite in 108 comuni negli anni 1991-1997, di cui una parte validate a suo tempo dall'Istituto Superiore di Sanità/ENEA DISP.

Al fine di poter costruire un campione regionale complessivo di dati di concentrazione radon indoor riferiti a un anno di misurazioni, è stato necessario eseguire un'operazione di "normalizzazione" dei dati dell'indagine integrativa all'anno.

A tale scopo dai risultati analitici del primo e secondo semestre è stato determinato il rapporto fra le concentrazioni del 1° e del 2° semestre di indagine, il cui valore medio è pari a 0,785.

Si conferma la differenza fra abitazioni e scuole, per le quali i valori medi del rapporto 1°/2° semestre sono rispettivamente pari a 0,762 e 0,879.

La figura seguente mostra la distribuzione dei valori di tale rapporto per tutti gli edifici del Progetto

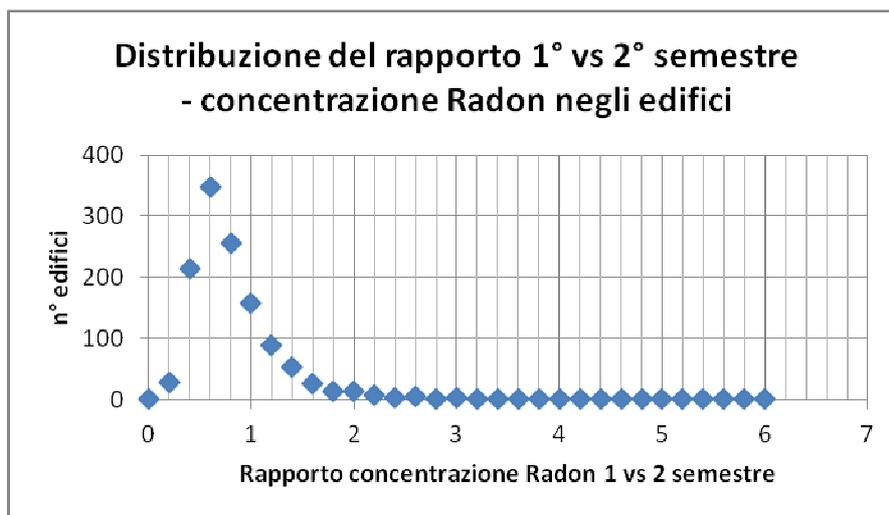


Fig. 6-1 Grafico distribuzione del rapporto 1° vs 2° semestre dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici del campione regionale

Nella tabella seguente sono riportati i valori di tale rapporto per le diverse province, suddivisi fra abitazioni (A) e scuole (S), per gli edifici di cui si dispone delle informazioni per i due semestri (1.172 edifici).

Tipologia_Edificio	Cagliari		Carbonia Iglesias		Medio Campidano		Nuoro		Ogliastra		Olbia Tempio		Oristano		Sassari		N. edifici totale	Media R1/2 totale
	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto	N. edifici	rapporto		
A	187	0.73	48	0.58	62	0.72	158	0.98	75	0.99	104	0.56	142	0.69	170	0.67	946	0.75
S	47	0.79	10	0.96	14	1.04	39	1.03	19	0.79	28	0.84	27	0.84	42	0.82	226	0.87
Totale	234		58		76		197		94		132		169		212		1172	

Tab. 6-2 Tabella numero edifici e rapporto valori concentrazioni di radon indoor (Bq/m³) del 1° e del 2° semestre di indagine fra Abitazioni (A) e Scuole (S), del campione regionale relativo al Progetto Radon per le ex Province.

Come appare dalla tabella, il valore del rapporto fra le concentrazioni del primo e del secondo semestre mostra una variabilità territoriale che in qualche modo sembra determinata da fattori locali che caratterizzano in modo differente l'edificato sia di tipo residenziale che scolastico, che rendono quindi peculiare a livello territoriale tale fattore.

Al fine di costituire un unico campione regionale per le elaborazioni relative agli scopi del Progetto sono stati pertanto ricalcolati i valori delle concentrazioni annuali di radon negli edifici dell'indagine integrativa ARPAS utilizzando per ciascuno degli ambiti provinciali nei quali risultano ubicate le relative abitazioni, i valori del rapporto semestrale desunti dalla tabella precedente, ed adottando esclusivamente i coefficienti relativi alle abitazioni.

Ai fini dell'indagine è necessario trattare con i valori di concentrazione radon indoor al netto del valore di concentrazione all'esterno degli edifici stessi (Miles et. al nel 1994 – indagine nel Lazio ISPRA 2013, per l'intero set di dati disponibili). Il valore di concentrazione di radon all'esterno è stato stimato, come già evidenziato nel rapporto del primo semestre, dalla distribuzione dei dati sperimentali ed è stato assunto pari a 8 Bq/m³, risultando coerente con quanto riportato nella letteratura [<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/> - UNSCEAR 2000 "SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION-annex B].

La figura seguente riporta la distribuzione dei valori di concentrazione di radon indoor nell'intero campione.

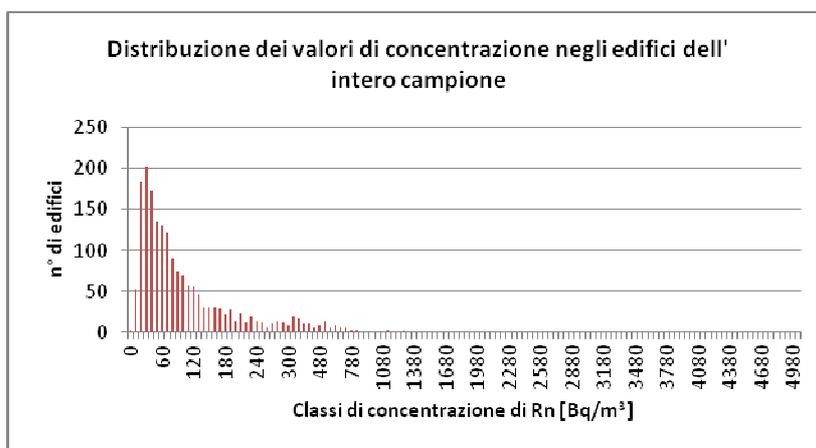


Fig. 6-2 Istogramma della distribuzione dei valori di concentrazione del radon indoor (Bq/m³) per tutti gli edifici del campione regionale

Per le ulteriori elaborazioni statistiche, soprattutto relative alla determinazione della probabilità che la concentrazione per i diversi ambiti territoriali trattati possa superare i valori di riferimento scelti, è stato necessario verificare la lognormalità della distribuzione dei valori della concentrazione indoor al netto del contributo della concentrazione outdoor, come già detto in precedenza.

E' stata quindi utilizzata come funzione di distribuzione la distribuzione log-normale troncata, data dalla formula:

$$f(x, \tau, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{e^{-\frac{(\log(x-\tau) - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{(x - \tau)}$$

dove il parametro τ rappresenta la concentrazione di radon all'aperto. Il relativo valore è stato stimato dalla distribuzione dei dati sperimentali ed è stato assunto pari a 8 Bq/m³. Tale valore risulta coerente con quanto riportato nella letteratura [<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/> - UNSCEAR 2000 "Sources and effects of ionizing radiation-annex B].

Shapiro Wilk Test Statistic	0,99	Shapiro Wilk Lognormal Goodness of fit Test
5% Shapiro Wilk P Value	0,907	Data appear Lognormal at 5% Significance Level
Lilliefors Test Statistic	0,016	Lilliefors Lognormal Goodness of fit Test
5% Lilliefors Critical Value	0,0209	Data appear Lognormal at 5% Significance Level

Tab. 6-3 Verifica della lognormalità della distribuzione dei dati

La variabile W (Shapiro Wilk Test Statistic) fornisce una misura della verifica statistica dell'ipotesi nulla ovvero che, in questo caso, i valori campionari siano distribuiti come una variabile casuale normale. Il parametro W può assumere valori da 0 a 1 e quando il valore risulta troppo piccolo, il test rifiuta l'ipotesi nulla. La variabile statistica W può essere interpretata come il quadrato del coefficiente di correlazione in un diagramma quantile-quantile (Q-Q- Plot). In questo caso pertanto il valore W=0,99 garantisce la buona correlazione con l'ipotesi di lognormalità della distribuzione, ben superiore al valore critico pari a 0,907.

Il test Lilliefors fornisce un'ulteriore verifica della lognormalità della distribuzione, basato sulla verifica che il parametro della statistica (Lilliefors Test Statistic) 0,016 sia inferiore al valore critico (5% Lilliefors Critical Value) pari a 0,0209.

Il risultato del test di log-normalità della distribuzione è riportato nella figura seguente.

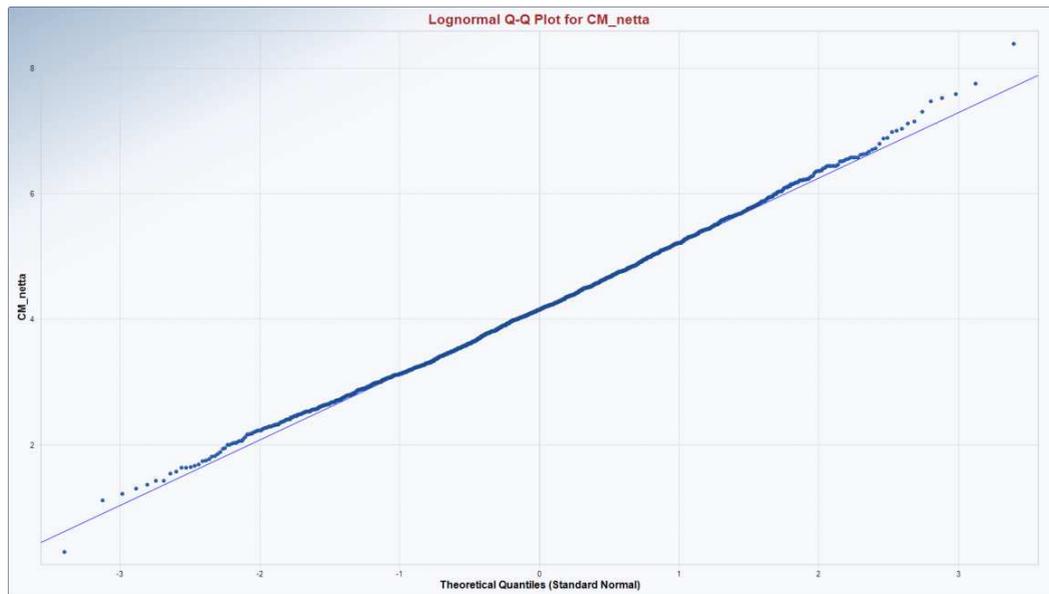


Fig. 6-3 Q-Q plot del test di lognormalità della distribuzione dei valori di concentrazione media di radon indoor (Bq/m^3) del campione regionale

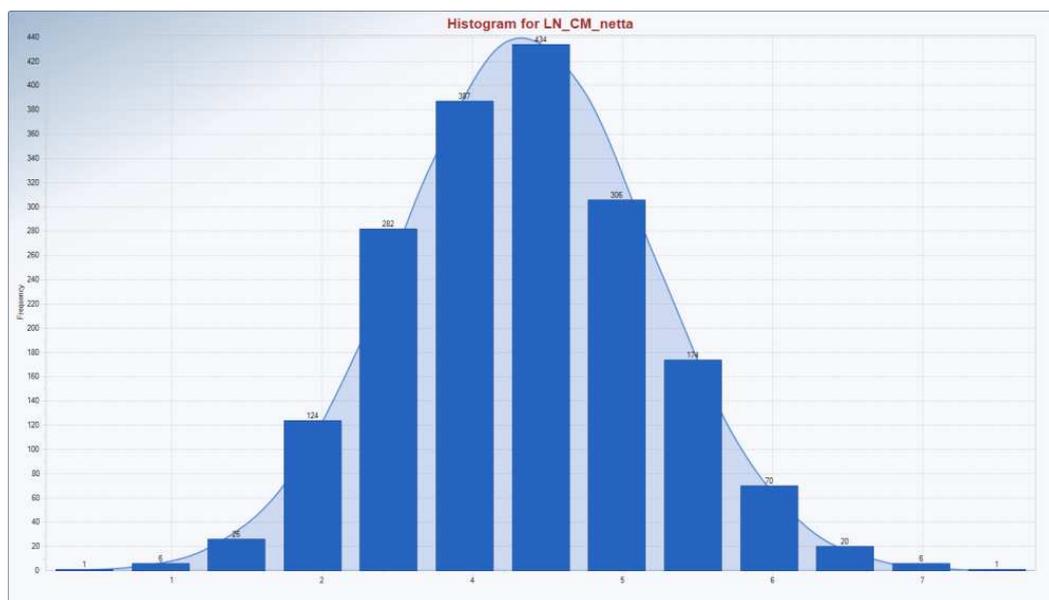


Fig. 6-4 Istogramma della distribuzione della variabile normalizzata che rappresenta il logaritmo naturale del valore della concentrazione media di radon indoor (Bq/m^3) del campione regionale

Alla distribuzione della nuova variabile corrispondono il valore della media geometrica (GM) pari a $65 Bq/m^3$ e una deviazione standard geometrica (DSG) pari a 1,055.

Media Geometrica- GM (Bq/m^3)	65
Deviazione Standard Geometrica -DSG	1,055

Tali parametri verranno quindi utilizzati come caratteristici della distribuzione dei dati per i diversi contesti di riferimento territoriale, assumendo che i dati al loro interno abbiano la stessa distribuzione log-normale con la stessa DSG del campione regionale complessivo (Miles et al nel 1994).

Il campione regionale complessivo di 1.883 edifici, da cui sono stati esclusi i dosimetri i cui valori di concentrazione al netto del fondo risultano minori di zero, integrato con gli edifici dell'indagine integrativa ARPAS e gli edifici delle indagini 1991-1997, risulta pertanto composto da 1837 edifici, dei quali 1399 misure annuali validate, eseguite nel corso del Progetto complessivamente in 142 Comuni, 190 misure più brevi (circa semestrali) e ricondotte al valore di concentrazione annuale, anch'esse validate, eseguite con l'indagine integrativa ARPAS e 248 misure annuali in edifici eseguite negli anni 1991-1997, validate a suo tempo dall'Istituto Superiore di Sanità/ENEA.

Nel seguito della relazione, per qualsiasi riferimento al valore della concentrazione di radon indoor si dovrà intendere che la grandezza in questione rappresenta la concentrazione di radon indoor al netto del valore di concentrazione di radon outdoor.

6.3 Quadro generale ed elaborazioni dei risultati delle misure radon indoor

I risultati delle misure effettuate nel corso dell'indagine 2017/2018, a cui sono stati aggiunti i risultati delle indagini regionali, svolte negli anni precedenti al fine di costituire un unico campione regionale complessivo finalizzato all'individuazione delle aree a rischio radon, possono essere riassunti come segue.

La concentrazione media delle misure di radon indoor sui 208 Comuni esaminati, considerando sia le misure nelle abitazioni private che nelle scuole, è pari a 116 Bq/m³, mentre la media geometrica risulta pari a 65 Bq/m³. Il valore minimo risulta essere di 1 Bq/m³ ed il massimo è di 4.384 Bq/m³.

La presenza di valori di concentrazione di radon superiori ai riferimenti normativi, in alcuni casi in maniera molto rilevante, dovranno necessariamente essere gestiti, ipotizzando la proposta e la progettazione di specifiche azioni di rimedio, sia per le abitazioni che per i luoghi di lavoro.

Il quadro generale risultante è riportato nella tabella seguente

MISURE RADON INDOOR IN SARDEGNA-QUADRO GENERALE	
PARAMETRI	CONCENTRAZIONE (Bq/m ³)
NUMERO EDIFICI	1.837
VALORE MINIMO	1
VALORE MASSIMO	4.384
MEDIA ARITMETICA (AM)	116
MEDIANA	63
MEDIA GEOMETRICA (GM)	65
DEVIATIONE STANDARD (SD)	193

Tab. 6-4 Quadro generale dei risultati delle misure di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici del campione regionale³

Il valore della media aritmetica dei valori di concentrazione (116 Bq/m³) risulta più elevato del valore medio di esposizione della popolazione della Sardegna (pari a 64 Bq/m³) determinato nel corso dell'Indagine nazionale del 1991-92. Si deve però evidenziare che il valore medio regionale era stato determinato utilizzando una strategia di campionamento finalizzata alla determinazione di un valore medio di esposizione della popolazione e pertanto il campione era costituito da abitazioni private scelte completamente a caso sul campione generale della popolazione regionale.

La presente indagine ha l'obiettivo di ricercare le aree a rischio e, come definito nel Progetto, il relativo campione è stato costruito scegliendo unicamente edifici che, essendo ubicati esclusivamente al piano terra, costituiscono un campione non rappresentativo della popolazione regionale e il relativo valore medio è, come atteso, più elevato.

³ Media, mediana e media geometrica sono tre caratteristiche di un qualsiasi insieme di dati statistico. La media è il rapporto tra la somma dei dati numerici ed il numero dei dati; la mediana è il valore centrale tra i dati numerici; la media geometrica di due o più valori numerici è la radice n-esima del prodotto dei valori considerati, con n il numero di valori. Vengono chiamati anche **indici di posizione** perché permettono di esprimere in modo sintetico le caratteristiche di un'indagine statistica. La deviazione standard (o scarto quadratico medio o scarto tipo) è un **indice di dispersione** statistico, vale a dire un modo di esprimere la dispersione dei dati rispetto ad un indice di posizione.

La distribuzione dei valori di concentrazione del radon degli edifici mostra che quest'ultima risulta inferiore ai 300 Bq/m³ (livello di riferimento massimo indicato dalla Direttiva 59/2013/Euratom), per il 93% degli edifici campione (pari a 1704 edifici), mentre il 7% del campione (pari a 133 edifici) presenta valori superiori ai 300 Bq/m³.

In particolare il 4,2% del campione (pari a 78 edifici) presenta valori compresi tra 300 e 500 Bq/m³, e solo il 3% del campione (pari a 55 edifici) presenta valori superiori ai 500 Bq/m³ (livello d'azione per i luoghi di lavoro previsto dal D.Lgs 230/95 e s.m.i).

Frequenza edifici (n°) per classe valori concentrazione radon (Bq/m³)		
Classe valori	N°	%
0 - ≤ 300	1704	92,8%
>300-≤ 500	78	4,2%
>500	55	3,0%
Totale	1.837	100%

Tab. 6-5 Frequenza n. degli edifici e confronto con i livelli di riferimento del campione regionale

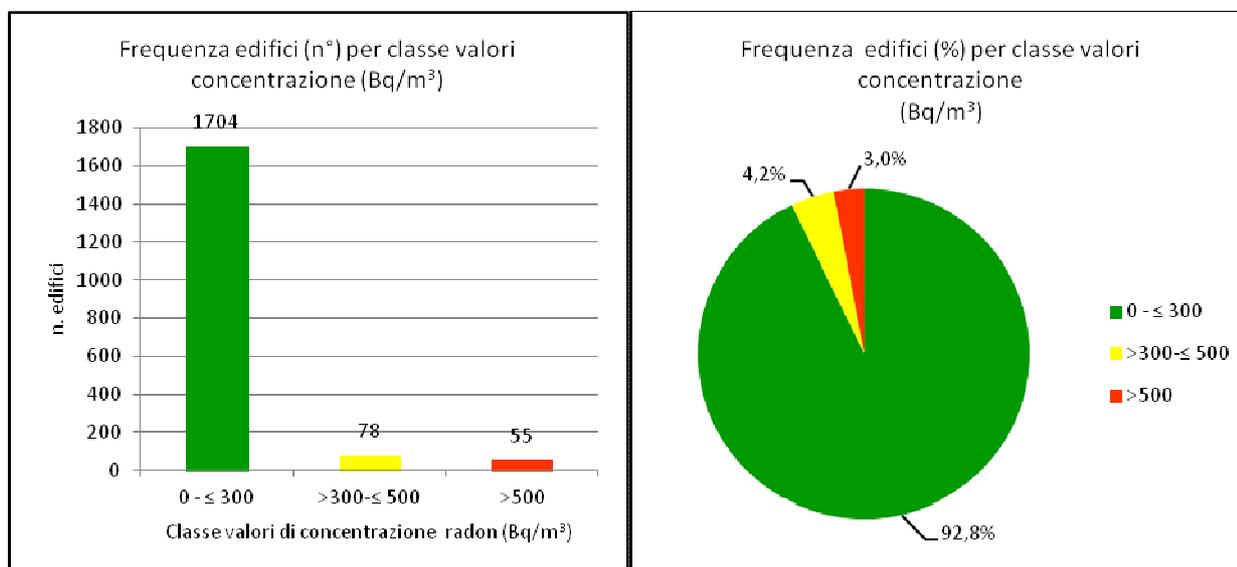


Fig. 6-5 Istogramma e grafico della frequenza degli edifici del campione regionale e confronto con i livelli di riferimento

La distribuzione dei valori di concentrazione per classi più dettagliate (0-≤ 50; >50-≤100; >100-≤200; >200-≤300; >300-≤500;>500 Bq/m³) è riportato nella seguente tab. 6.6.

Circa il 41% degli edifici (pari a 746 edifici) presenta valori di concentrazione radon inferiori ai 50 Bq/m³ ed un altro 26% (pari a 485 edifici) è compreso nella classe tra >50-≤100Bq/m³. Complessivamente 1.231 edifici su 1.837 presentano valori inferiori ai 100 Bq/m³ (pari al 67% del campione). Nella classe tra >100-≤200Bq/m³ ricadono 343 edifici (pari al 19% del campione) e altri 130 edifici (pari al 7% del campione) ricadono nella classe tra >200-≤300 Bq/m³.

Risulta quindi che, sulla base dei dati della Tab. 6.6, la quasi totalità degli edifici (93%) presenta valori di concentrazione di radon di gran lunga inferiori al valore limite di concentrazione definito dalla Direttiva Euratom.

Frequenza Edifici (n°) per classe valori concentrazione (Bq/m ³)		
Classe valori	N°	%
0 - ≤ 50	746	40,60%
>50 - ≤ 100	485	26,40%
>100 - ≤ 200	343	18,70%
>200 - ≤ 300	130	7,10%
>300 - ≤ 500	78	4,20%
>500	55	2,99%
Totale	1.837	100%

Tab. 6-6 Frequenza edifici per classe valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) del campione regionale

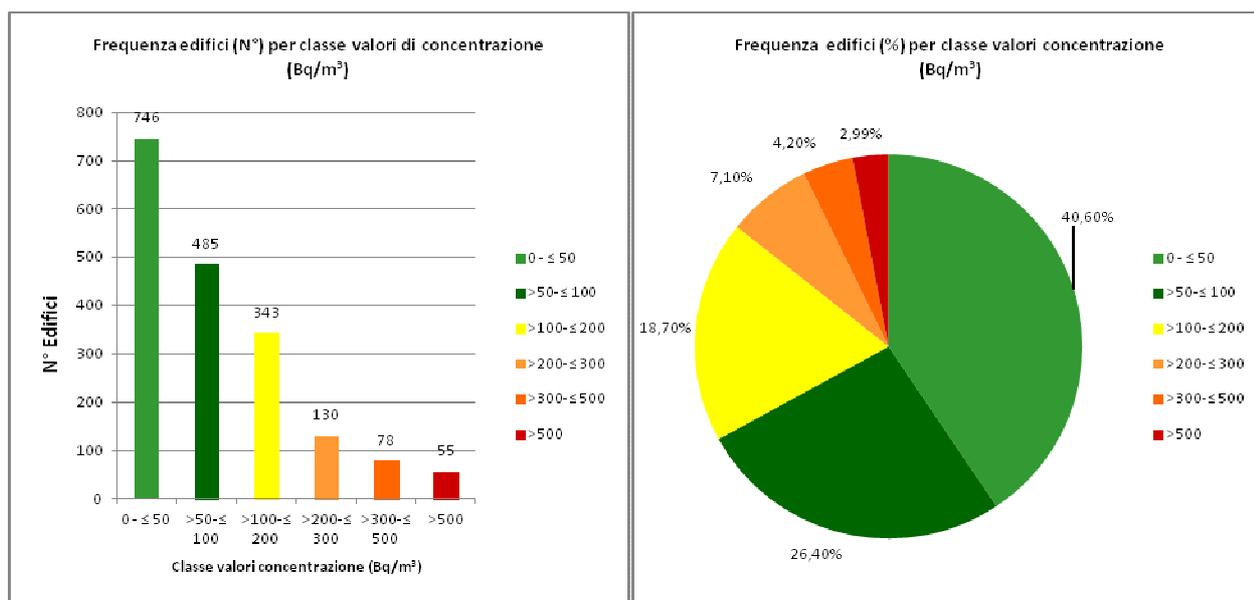


Fig. 6-6 Istogramma e grafico frequenza edifici per classe valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) del campione regionale

Confrontando in maniera disgiunta i valori di concentrazione misurati nel corso delle attività del Progetto Radon con le attività integrative, si osserva che all'aumentare del numero di edifici/misure di concentrazione, tendono ad aumentare percentualmente gli edifici ricadenti nelle classi più basse (0-100 Bq/m³) ed a diminuire quelli presenti nelle altre classi di concentrazione, con una prevalenza in quelle con valori intermedi (tra 100-500 Bq/m³).

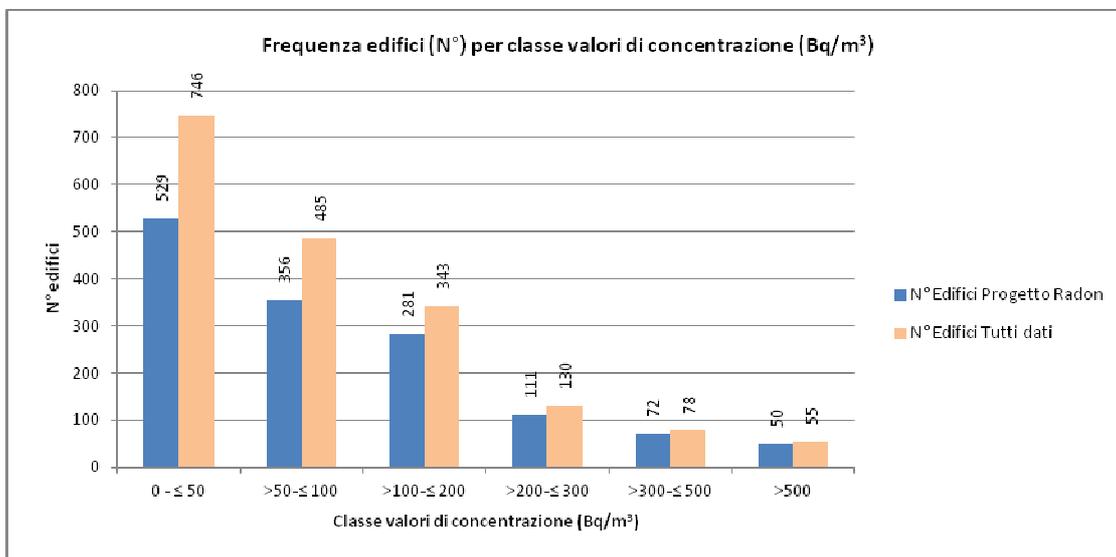


Fig. 6-7 Istogramma confronto frequenza edifici per classe valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) tra "N° edifici Tutti dati" e " N° edifici Progetto Radon" del campione regionale.

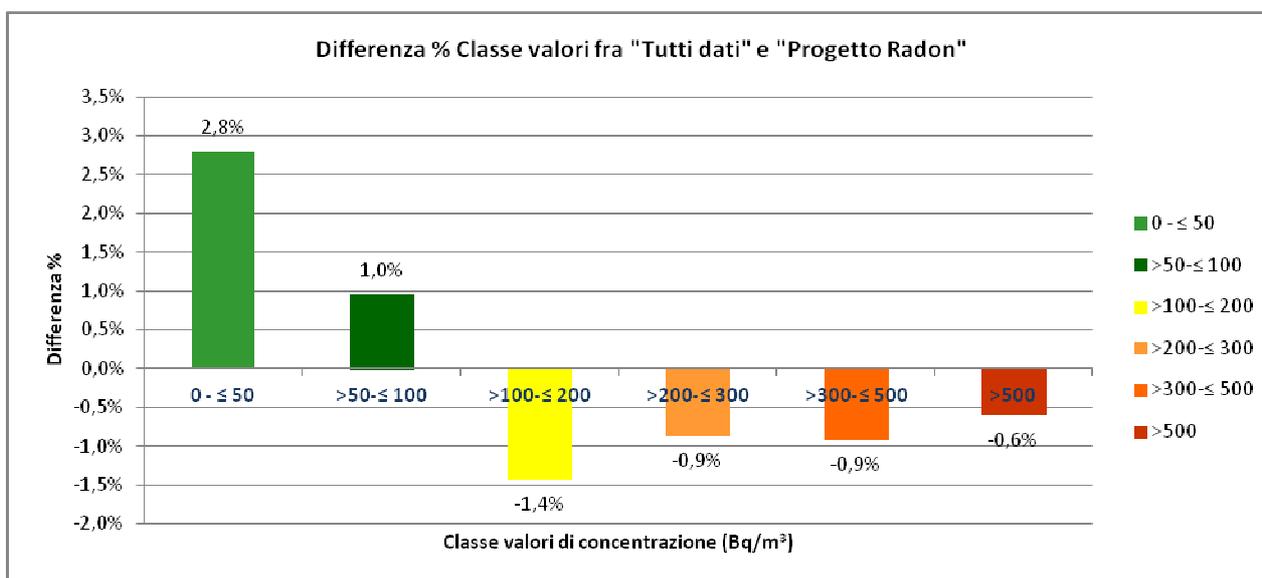


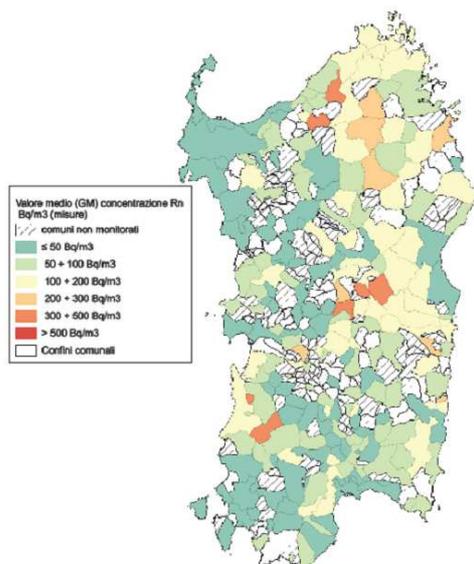
Fig. 6-8 Istogramma differenza della frequenza edifici per classe valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) tra "Tutti i dati" e "Progetto Radon" del campione regionale.

Di seguito vengono riportati i risultati della elaborazione dei dati delle misure radon indoor rispetto ai tre contesti territoriali di riferimento delle informazioni: limiti amministrativi comunali, maglia regolare della Carta Tecnica regionale (CTR) e Carta delle Unità Litologiche della Sardegna.

6.3.1 Quadro di riferimento per Comune

I 208 Comuni dell'indagine presentano valori medi distribuiti prevalentemente (119 Comuni) nelle classi con valori inferiori ai 100 Bq/m³ (58%); nella classe con valori compresi tra >100-≤ 200 Bq/m³ ricadono 60 Comuni (29%); nella classe con valori compresi tra >200-≤ 300 Bq/m³ ricadono 17 Comuni (8%).

Tra >300-≤ 500 Bq/m³ ricadono 9 Comuni (4%) mentre solo tre comuni ricadono nella classe maggiore di 500 Bq/m³. In sintesi, solo il 5,7% dei Comuni monitorati presenta valori medi superiori ai 300 Bq/m³.



Frequenza Comuni per classe valori di concentrazione media (AM) di radon		
Classi (Bq/m ³)	Comuni (n° e %)	
0 - ≤ 50	49	23,60%
>50-≤ 100	70	33,70%
>100-≤ 200	60	28,80%
>200-≤ 300	17	8,20%
>300-≤ 500	9	4,30%
>500	3	1,40%
Totale	208	100%

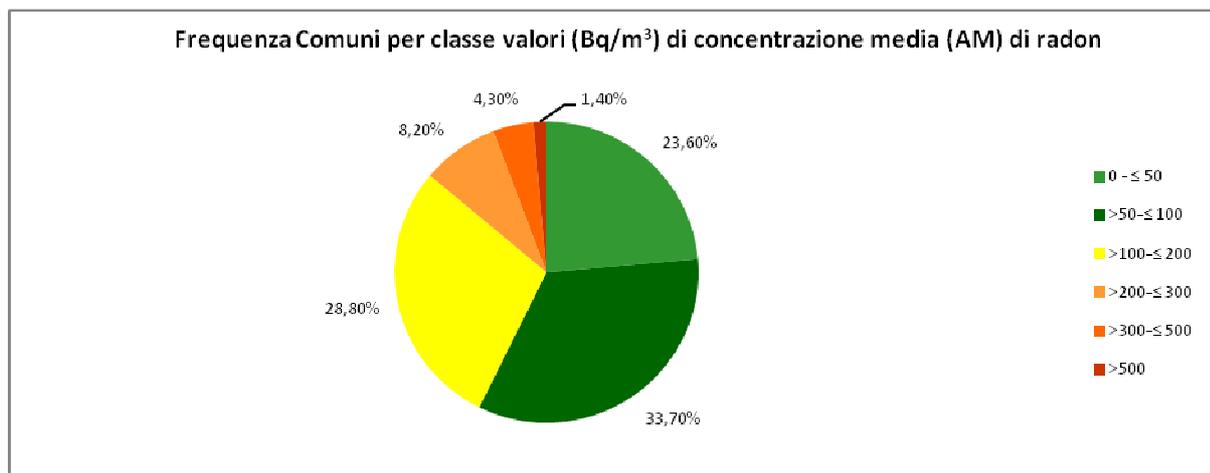


Fig. 6-9 Tabella e grafico frequenza dei Comuni per classe valori di concentrazione media di radon indoor (Bq/m³) del campione regionale

Comuni con valori massimi superiori ai 300 Bq/m³ sono distribuiti, seppur in modo non omogeneo, prevalentemente nel settore Orientale della Sardegna, ed in misura minore nel settore Occidentale.

I valori più elevati si riscontrano sempre nella Sardegna Centrale e Centro-Orientale, nella Gallura, nell'Arburese-Guspinese e nell'Ogliastra. Più sporadicamente si osservano nell'Campidano meridionale-Sulcis, nel Sarrabus-Gerrei, nel Montiferru e nel Logudoro.

Nella tabella allegata (Allegato n. 6) vengono riportati i principali valori statistici di concentrazione per ogni Comune: concentrazione media (AM), mediana, media geometrica (GM) e deviazione standard (SD).

Nella tavola seguente è mostrata la ripartizione di tutti i Comuni del campione regionale in classi sulla base dei valori medi della concentrazione annuale (GM) di radon. Il valore rappresentato è la media geometrica della concentrazione misurata per ciascun Comune, tranne nei casi in cui è presente una sola misura. Come già detto in precedenza, la media geometrica rappresenta il valore più probabile della distribuzione dei valori di concentrazione di radon indoor, in quanto la distribuzione complessiva dei valori è una distribuzione di tipo lognormale. Tale effetto è noto in letteratura e si riscontra in tutte le indagini svolte a livello nazionale e internazionale.

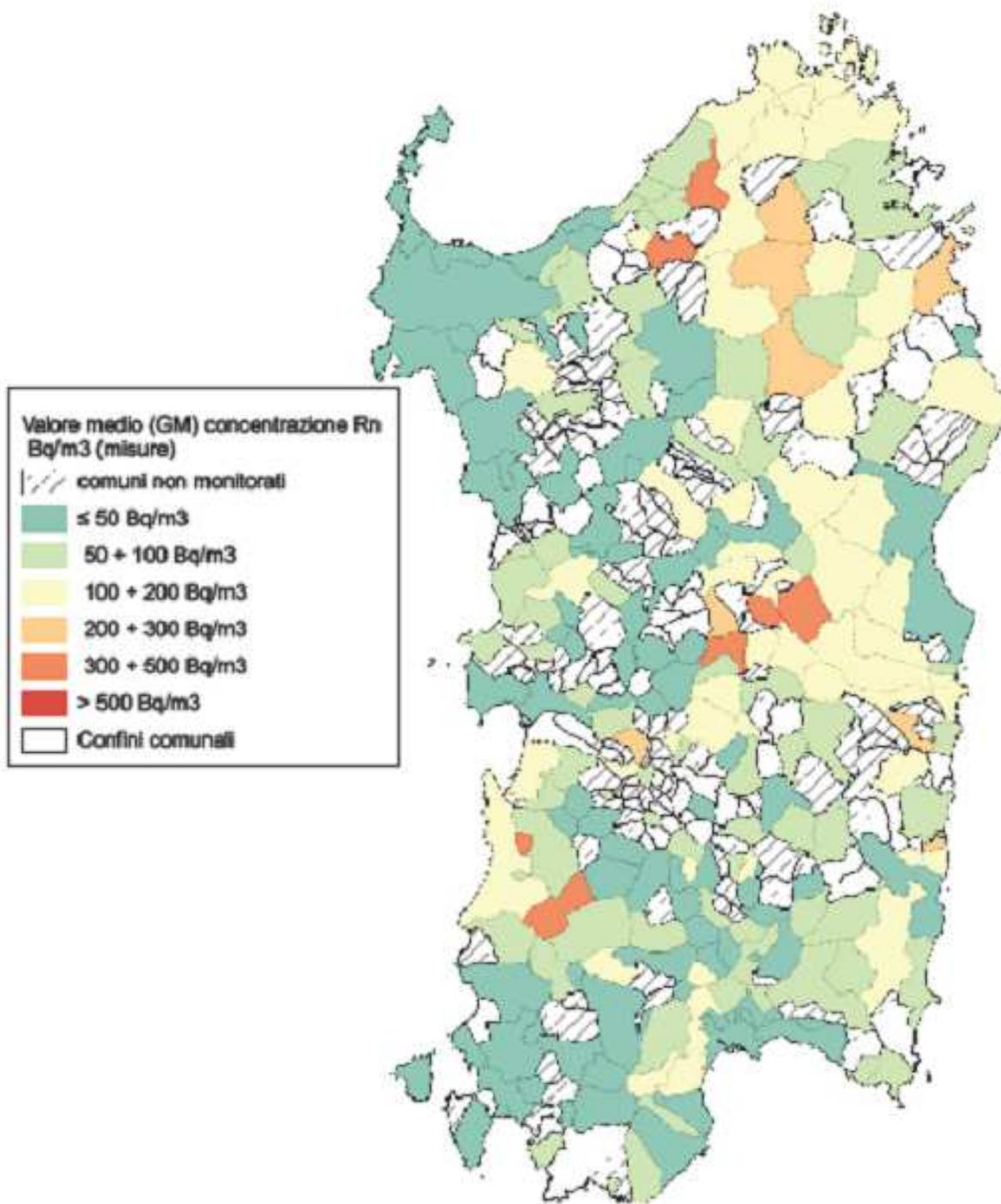
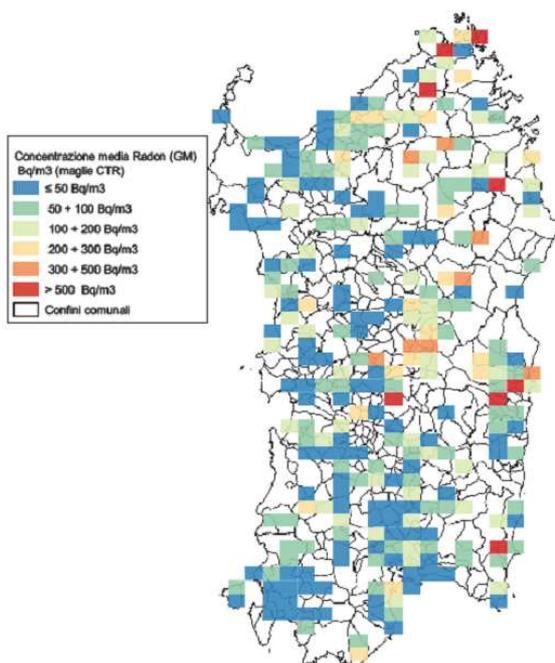


Fig. 6-10 Valori concentrazione media geometrica (GM) di radon indoor (Bq/m³) nei Comuni del campione regionale

6.3.2 Quadro di riferimento per “Maglia (Sezione CTR)”

I dati relativi ai 208 Comuni dell'indagine ricadono in 270 maglie della CTR. Le maglie presentano valori medi (AM) distribuiti prevalentemente nella 1^a e 2^a classe (163 maglie pari 60%). Nella 3^a classe ricadono 69 maglie pari al 26%. Nella 4^a classe ricadono 24 maglie pari 9%. Nelle classi con valori di concentrazione superiori ai 300 Bq/m³ (cioè valori superiori ai limiti di riferimento della Direttiva 2013/59/Euratom) ricadono 14 maglie pari al 5%.



Frequenza CTR per classe valori (Bq/m ³) di concentrazione media (AM) di radon		
Classi (Bq/m ³)	CTR (N° e %)	
0 - ≤ 50	68	25,19%
>50-≤ 100	95	35,19%
>100-≤ 200	69	25,56%
>200-≤ 300	24	8,89%
>300-≤ 500	11	4,07%
>500	3	1,11%
Totale	270	100%

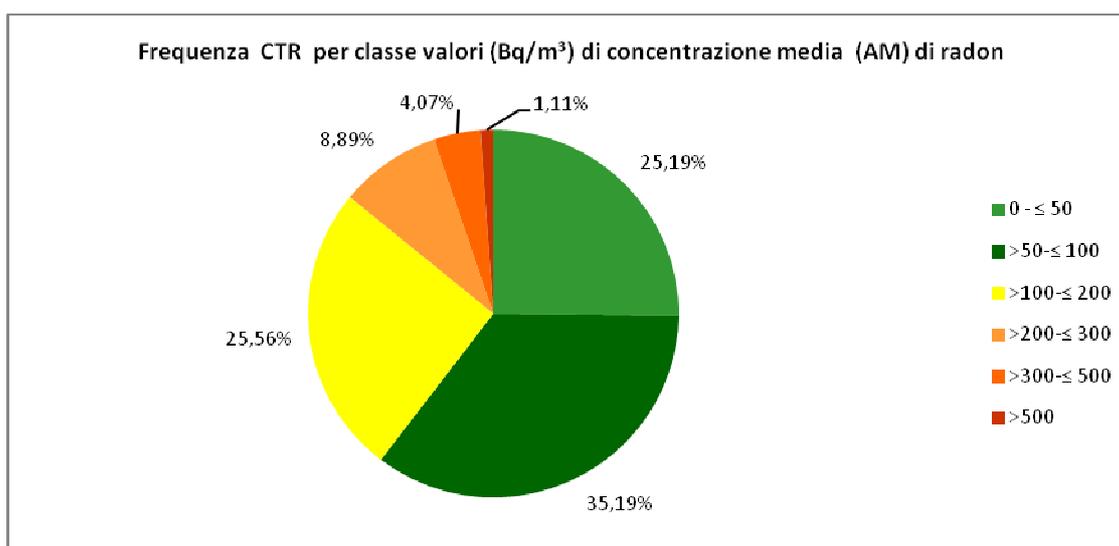


Fig. 6-11 Tabella e grafico frequenza delle maglie CTR per classe valori di concentrazione media di radon indoor (Bq/m³) del campione regionale

La distribuzione geografica delle maglie con valori medi più elevati ricalca, naturalmente, gli areali dei Comuni precedentemente già visti; si riscontra però il fatto che questi sono molto più ridotti rispetto alle superfici dei limiti

amministrativi: emergono le aree del Centro Sardegna, della Gallura e dell'Arburese, molto meno evidenti tutti gli altri areali. Nella tabella allegata (Allegato n.7 – Concentrazione media netta secondo le CTR) vengono riportati i valori medi di concentrazione riscontrati per tutte le maglie.

A seguire la Tavola con la rappresentazione geografica dei valori della media geometrica (GM) delle concentrazioni di radon indoor nelle maglie relative al Progetto.

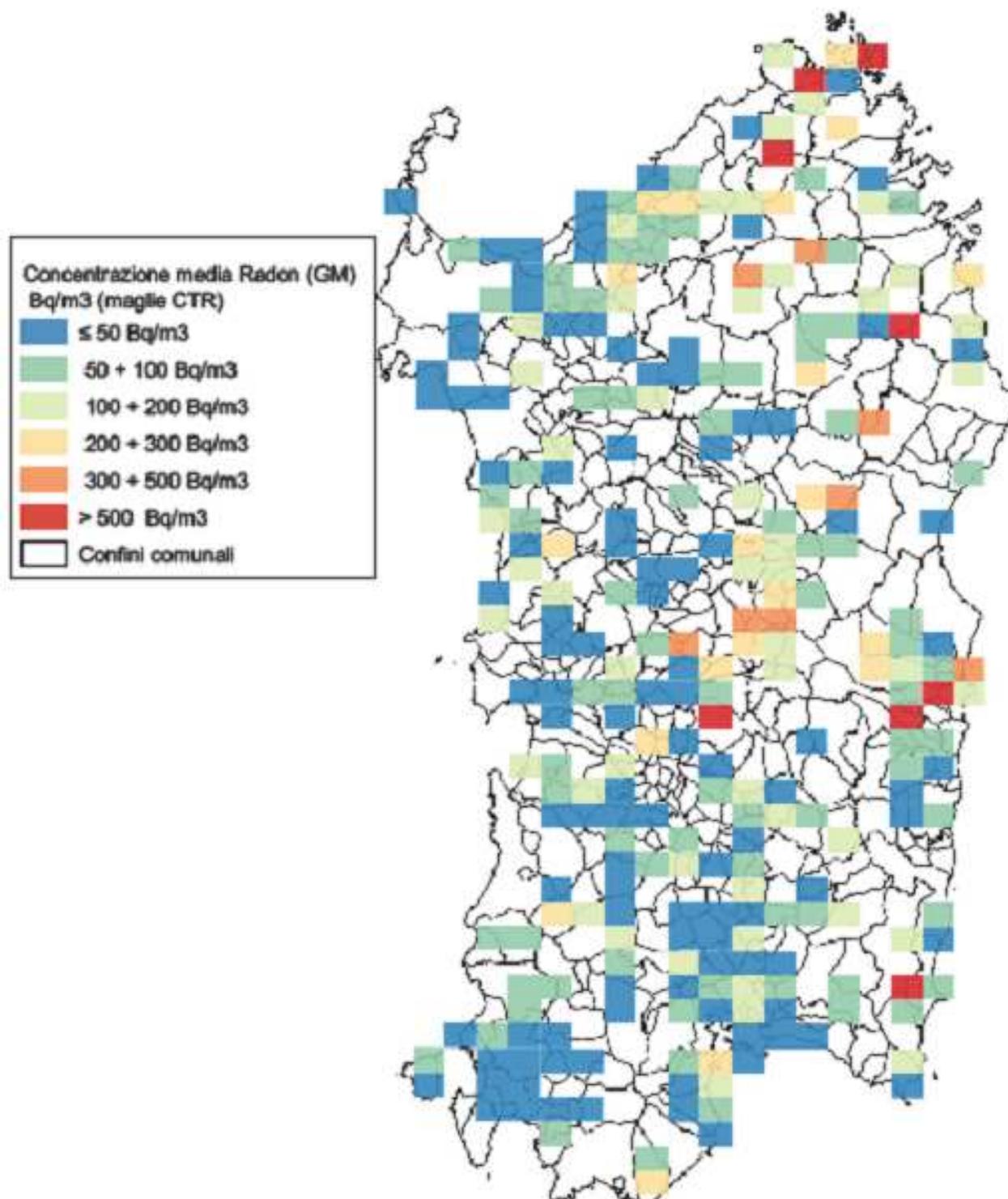


Fig. 6-12 Valori concentrazione media geometrica (GM) di radon indoor (Bq/m³) nelle maglie CTR del campione regionale

6.3.3 Quadro di riferimento per Provincia

Nel presente paragrafo si introducono le elaborazioni dei risultati suddivisi per le ex Province della Sardegna, in quanto considerate a grandi linee rappresentative di contesti territoriali più ampi di quelli comunali e per i quali esiste una certa peculiarità territoriale.

I parametri statistici relativi sono riepilogati nella tabella seguente.

PROVINCIA	N° Edifici	AM	Mediana	GM	SD ^(*)
Cagliari	432	73	52	50	72
Carbonia Iglesias	126	47	35	33	40
Medio Campidano	126	92	53	59	112
Nuoro	310	164	90	96	215
Ogliastra	131	209	117	124	250
Olbia Tempio	169	225	141	142	283
Oristano	256	74	45	49	80
Sassari	287	98	55	53	272
Totale	1837	116	63	65	193

Nota (*): AM: media aritmetica; GM: media geometrica; SD: deviazione standard.

Tab. 6-7 Principali valori statistici della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici, per le ex Province della Sardegna, del campione regionale

Tali valori sono rappresentati nel grafico seguente.

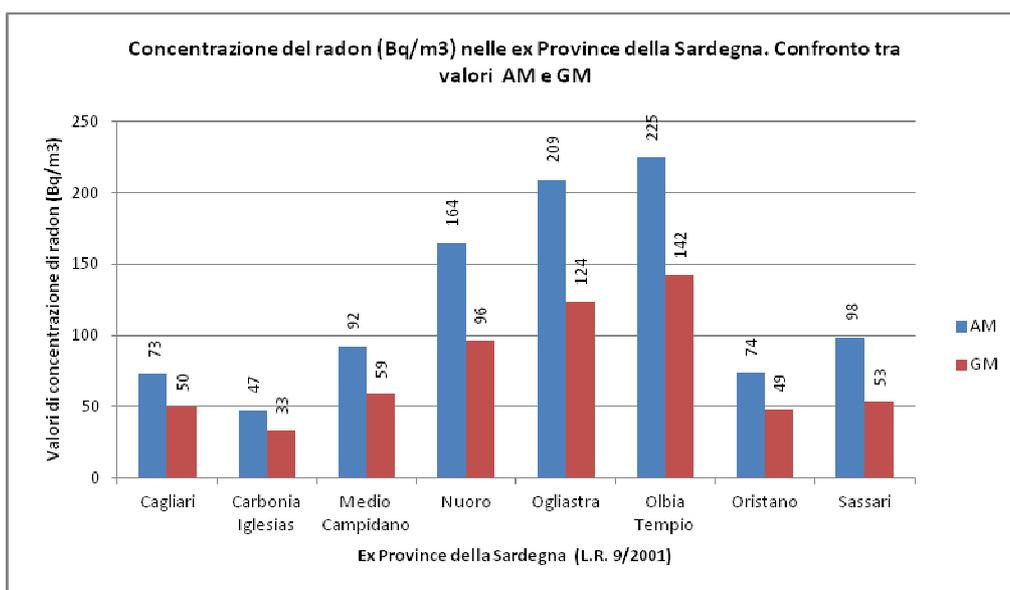


Fig. 6-13 Istogramma confronto tra i valori di concentrazione AM-GM di radon indoor (Bq/m³) negli edifici, per le ex Province della Sardegna, del campione regionale

Prendendo in considerazione la media geometrica (GM) dei valori di concentrazione si osserva che i valori più elevati si riscontrano nella ex Provincia Olbia-Tempio (142 Bq/m^3), seguita dalla Provincia dell'Ogliastra (124 Bq/m^3) e dalla Provincia di Nuoro (96 Bq/m^3). Altre quattro Province (Sassari, Medio Campidano, Oristano e Cagliari) hanno valori di concentrazione che oscillano intorno ai $59\text{-}49 \text{ Bq/m}^3$. La Provincia dove si osservano i valori di concentrazione più bassi risulta quella di Carbonia-Iglesias con 33 Bq/m^3 .

Il rapporto tra i valori medi più elevati (Provincia di Olbia-Tempio) e quelli più bassi (Provincia di Carbonia-Iglesias) è pari a 4. Tale rapporto diventa ancor più accentuato se si prendono in considerazione i valori della media aritmetica della concentrazione.

In generale, il riferimento alle ex Province, evidenzia la rilevante variazione a carattere geografico dei valori della concentrazione media di radon indoor con territori con valori particolarmente marcati e altri, invece, che presentano valori notevolmente più bassi.

Di particolare significato i valori riscontrati nelle Province di Olbia-Tempio, Nuoro e Ogliastra che rappresentano le porzioni di territorio al cui interno si rinvengono i Comuni con i valori di concentrazione più elevati (già visti precedentemente). Tali valori possono essere, in una prima considerazione, messi in relazione con le caratteristiche litologiche di questi territori, al cui interno si osserva prevalentemente la presenza di rocce magmatiche intrusive (famiglia dei "granitoidi") che rappresentano le Unità litologiche che contengono le maggiori concentrazioni di minerali radioattivi (uranio e torio), e che, come si vedrà in seguito, rappresentano le UL in cui si osservano i valori di concentrazione di radon indoor più elevati.

6.3.3.1 Quadro di riferimento “Abitazioni” e “Scuole” per Provincia

Nella tabella seguente e nella relativa figura sono riassunti gli edifici, suddivisi fra abitazioni e scuole, compresi nel campione dell'indagine regionale, suddivisi per territorio provinciale.

Ex Province L.R. 9/2001	ABITAZIONI	SCUOLE	Totale Edifici	% Totale
Cagliari	350	82	432	24%
Carbonia Iglesias	102	24	126	7%
Medio Campidano	101	25	126	7%
Nuoro	249	61	310	17%
Ogliastra	101	30	131	7%
Olbia Tempio	126	43	169	9%
Oristano	201	55	256	14%
Sassari	217	70	287	16%
Totale	1447	390	1837	100%
%	79%	21%	100%	

Tab. 6-8 Frequenza tipologia n. edifici (Abitazioni e Scuole), nelle ex Province della Sardegna, del campione regionale

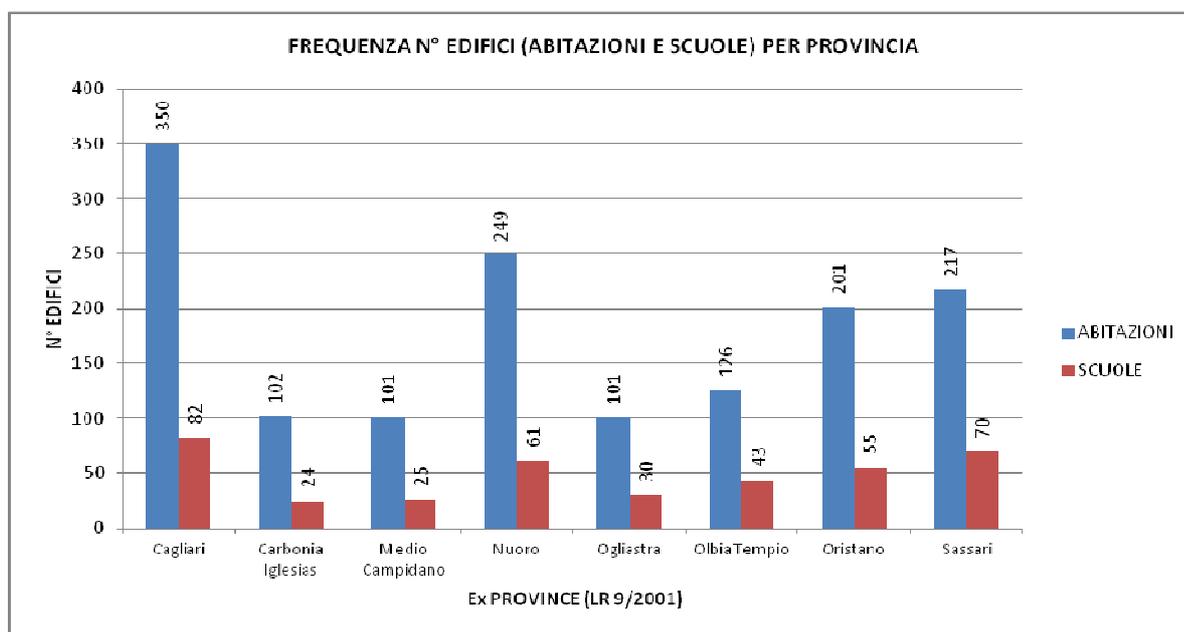


Fig. 6-14 Istogramma frequenza tipologia n. edifici (Abitazioni e Scuole), nelle ex Province della Sardegna, del campione regionale

Dall'analisi dei valori di concentrazione relativi ai gruppi di edifici (abitazioni e scuole) risulta che le due popolazioni sono sostanzialmente differenti dal punto di vista dei valori di concentrazione di radon indoor, come mostrato nella tabella e nel grafico seguenti, nei quali sono riepilogati i dati statistici generali dei valori di concentrazione media di radon indoor per le scuole e le abitazioni del campione regionale completo.

6.3.4 Elaborazione dei dati Abitazioni e Scuole nelle ex-Province della Sardegna

Valori di concentrazione del radon (Bq/m ³) per le Abitazioni e le Scuole					
Tipologia	N. Edifici	AM	Mediana	GM	SD(*)
Abitazioni	1447	110	60	61	200
Scuole	390	135	86	83	165
Totale edifici	1837				

Tab. 6-9 Principali valori statistici di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) per Abitazioni e Scuole del campione regionale

Si osserva che, in generale vedi tab. 6.9, i valori di concentrazione GM delle Abitazioni risulta pari a 61 Bq/m³ mentre quello delle Scuole è di 83 Bq/m³ con valori di concentrazione A-S che si discostano tra loro del 36%.

L'analisi della distribuzione dei dati (software ProUCL 5.1 (USEPA)) conferma che le due popolazioni sono sostanzialmente differenti, come evidenziato dalla figura seguente.

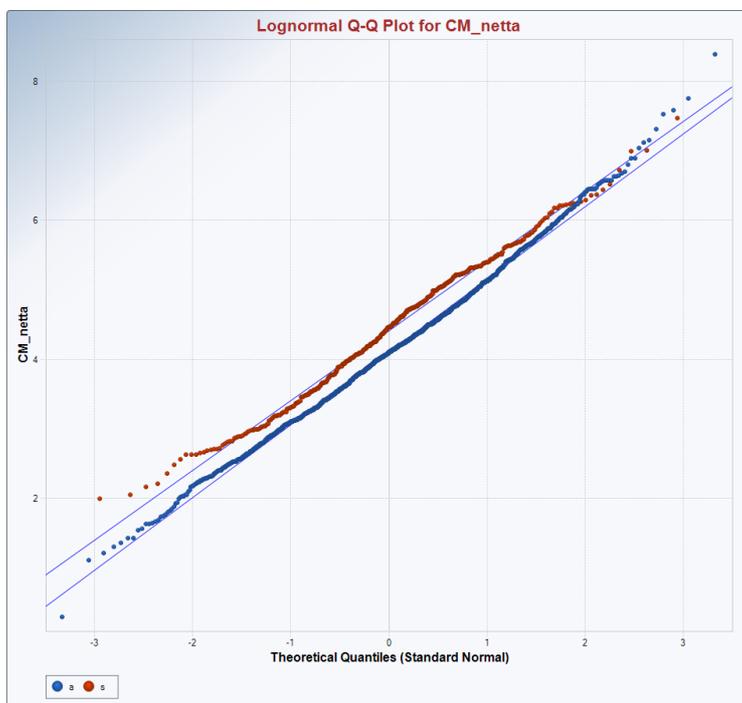


Fig. 6-15 Qqplot test lognormalità valori medi di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) - Confronto valori Abitazioni e Scuole del campione regionale

Tale differenza conferma sostanzialmente quanto rilevato dall'analisi dei dati del campione del primo semestre. Ulteriori analisi relative al confronto tra i valori di concentrazione di radon indoor nelle abitazioni e nelle scuole per l'intero campione regionale sono illustrati nel seguito.

Nella tabella seguente sono riportati i valori dei principali parametri statistici delle concentrazioni di radon indoor per le abitazioni e per le scuole dell'intero campione regionale suddivisi per territorio provinciale.

Ex Province (L.R. 9/2001)	N° Abitazioni	AM	Mediana	GM	SD (*)
Cagliari	350	69	50	47	72
Carbonia Iglesias	102	44	29	29	41
Medio Campidano	101	89	47	55	108
Nuoro	249	160	81	91	221
Ogliastra	101	203	105	119	258
Olbia Tempio	126	213	126	129	288
Oristano	201	68	42	45	73
Sassari	217	98	54	51	305
Totale	1447	110	60	61	200

Tab. 6-10 Principali valori statistici di concentrazione netta di radon indoor (Bq/m³) per le Abitazioni del campione regionale ripartiti per territorio provinciale

Ex Province (L.R. 9/2001)	N° Scuole	AM	Mediana	GM	SD (*)
Cagliari	82	89	58	61	74
Carbonia Iglesias	24	63	60	55	31
Medio Campidano	25	105	65	75	129
Nuoro	61	182	134	119	190
Ogliastra	30	227	156	143	224
Olbia Tempio	43	258	209	191	269
Oristano	55	96	66	62	99
Sassari	70	100	57	60	120
Totale	390				

Tab. 6-11 Principali valori statistici di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) per le Scuole del campione regionale ripartiti per territorio provinciale

L'analisi dei valori di concentrazione di radon indoor per Provincia per le due tipologie di edifici (Abitazioni e Scuole) conferma il trend generale già visto per quanto riguarda il campione complessivo degli edifici.

Le concentrazioni più elevate nelle abitazioni si osservano nelle ex Province di Olbia-Tempio, Ogliastra e Nuoro ed i valori più bassi si osservano nella Provincia di Carbonia-Iglesias. In particolare il valore di concentrazione media GM più elevato risulta pari a 129 Bq/m³ e quello più basso è pari a 29 Bq/m³, con uno scostamento del 445% (i valori medi di concentrazione di radon indoor nelle abitazioni della Provincia di Olbia-Tempio sono superiori di 4,5 volte rispetto alle abitazioni della Provincia di Carbonia-Iglesias). Tali scostamenti si accentuano se si considerano i valori AM.

Lo stesso trend e lo stesso ranking viene mantenuto anche per i valori di concentrazione delle Scuole, con un valore GM di concentrazione radon indoor massimo di 191 Bq/m³ nella Provincia di Olbia Tempio e un valore GM minimo di 55 Bq/m³ nella Provincia di Carbonia-Iglesias.

Gli scostamenti osservati tra valori GM massimi/minimi per le Scuole sono più contenuti rispetto a quanto osservato per le Abitazioni.

In generale le due popolazioni A-S hanno un comportamento omogeneo dal punto di vista territoriale ed il ranking A-S per Provincia è lo stesso.

Un'analisi della tabella precedente, evidenzia che in diverse scuole il valore della concentrazione annuale di radon indoor è superiore al valore di 500 Bq/ corrispondente al livello d'azione indicato nell' Allegato I-bis del DLgs/230/95 e s.m.i.

In alcune scuole sono stati misurati inoltre valori di concentrazione annuale di radon indoor superiori all'80% del valore del livello d'azione, ovvero 400 Bq/m³.

In tali casi, come previsto dall'Art. 10-quinques del DLgs 230/95 sarà necessario che "l'esercente", probabilmente identificato nel dirigente scolastico se non nella rispettiva amministrazione comunale, dovrà porre in essere quanto previsto al predetto Art. 10-quinques commi 2 e 3 in termini di ripetizione delle misure e dell'adozione di azioni di rimedio da sottoporre a verifica dell'efficacia, sotto la supervisione di un esperto qualificato.

Nelle figure seguenti si riporta l'ubicazione delle 34 scuole che superano i 300 Bq/m³ e fra queste le 14 scuole che superano i 500 Bq/m³; ed inoltre si riporta l'ubicazione delle 99 abitazioni che superano i valori di concentrazione di 300 Bq/m³ e fra queste le 41 abitazioni che superano i 500 Bq/m³ per tutto il territorio regionale.

Per quanto riguarda le scuole, le figure evidenziano un'ampia distribuzione all'interno comunque delle aree già indicate precedentemente come le più caratterizzate da valori di concentrazione medio alta di radon.

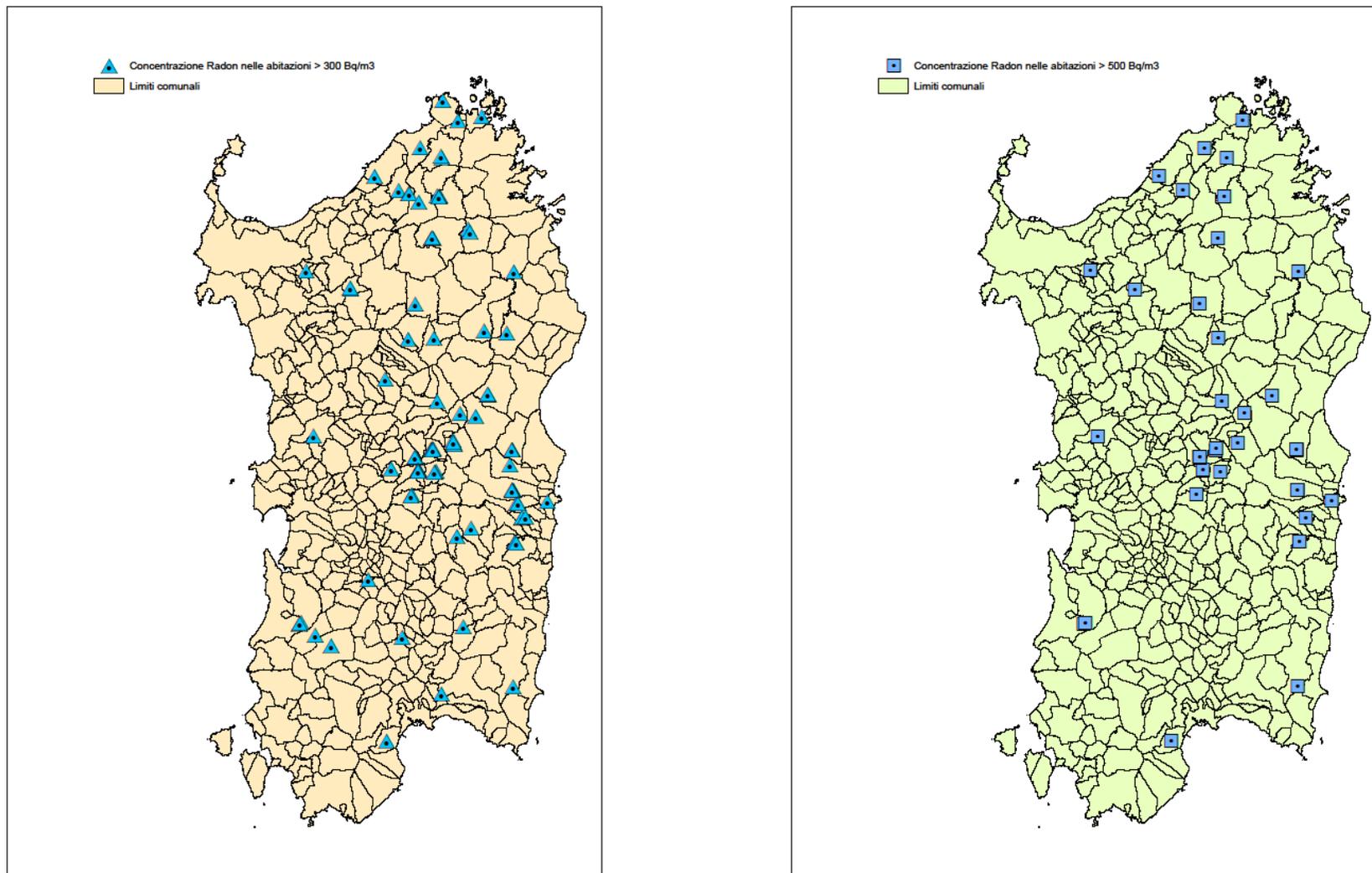


Fig. 6-16 Ubicazione delle 99 abitazioni che superano i valori di concentrazione di radon indoor di 300 Bq/m^3 e fra queste le 41 abitazioni che superano i 500 Bq/m^3 del campione regionale (figura a dx)

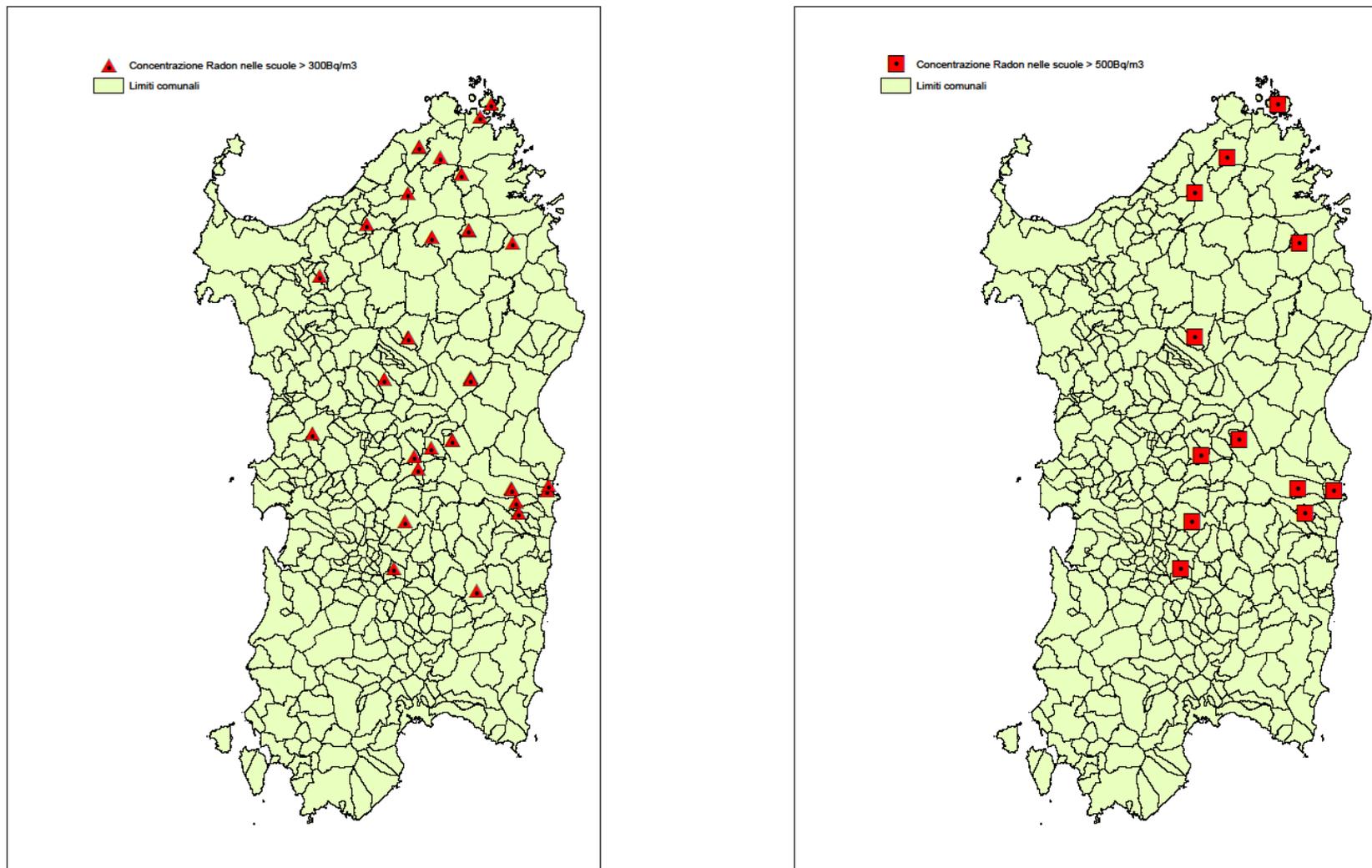


Fig. 6-17 Ubicazione delle 34 scuole che superano i valori di concentrazione di radon indoor di 300 Bq/m³ e fra queste le 14 scuole che superano i 500 Bq/m³ del campione regionale (figura a dx)

6.4 *La relazione della concentrazione radon indoor con il territorio e l'edificato*

Nel seguito vengono esaminate le elaborazioni finalizzate alla ricerca delle relazioni fra le concentrazioni di radon indoor misurate nel campione e gli elementi principali che possono determinarne la presenza e l'accumulo nelle abitazioni. In qualsiasi analisi relativa alla presenza del radon indoor, assodato che il radon indoor proviene essenzialmente dal suolo sottostante gli edifici, si esaminano inizialmente le relazioni fra le concentrazioni di radon indoor e le caratteristiche litologiche del substrato su cui sussistono gli edifici del campione.

Successivamente verranno illustrate le possibili relazioni tra le concentrazioni di radon indoor e le caratteristiche dell'edificato così come sono state ricavate dalle schede edificio compilate e trasmesse dai referenti comunali o dai partecipanti all'indagine integrativa ARPAS. Al momento non è stato possibile integrare le informazioni generali con i dati dell'edificato, raccolti nel corso delle indagini condotte negli anni '90, in quanto la struttura delle schede è differente e non sono ancora disponibili i dati in formato digitale.

A tale proposito inoltre si evidenzia che non sempre le schede edificio sono state compilate correttamente e talvolta quindi alcuni campi non vengono compilati o lo sono in modo contraddittorio e pertanto i dati disponibili non comprendono l'intero campione.

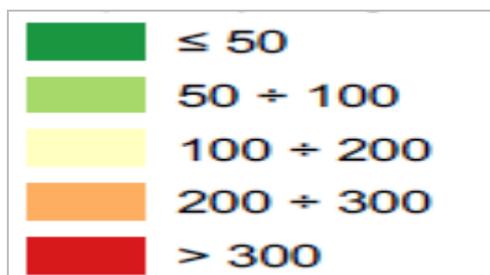
6.5 *Quadro di riferimento per le Unità litologiche (UL)*

Nella tabella seguente si mostrano le analisi statistiche di base per le 26 unità litologiche interessate da misurazioni indoor.

Alcune UL presentano un numero di campioni limitato e in alcuni casi valori di concentrazione media molto elevati, in particolare l'UL A3.1-Rocce vulcano-sedimentarie (3 edifici) e la A3.2 -Filoni e ammassi basici (2 edifici). Nella stessa condizione si trovano anche la B1.1-Metavulcaniti acide (3 edifici), B1.2-Migmatiti acide (3 edifici) e B1.3 Migmatiti basiche (4 edifici), come evidenziato nell'istogramma di cui alla Fig. 6.18 e contrassegnate dal primo box rosso.

Altre UL con un numero di edifici molto ridotto sono le classi C1.4-Depositi terrigeni palustri (2 edifici), C1.8-Depositi terrigeni fluvio-deltizi (8 edifici) e C2.1-Depositi carbonatici lacustri (9 edifici), contrassegnate dagli altri due box rossi.

Nella tabella seguente (Tab. 6-12) i valori statistici relativi a AM-Mediana-GM vengono attribuiti alle seguenti classe valori (nel box la relativa scala cromatica),



e come dalle successive figure 6.21 e 6.22:

Principali valori rappresentativi della concentrazione del radon (Bq/m ³) nelle Unità litologiche (Liv. 2)					
Unità litologica	N° Edifici	AM	Mediana	GM	SD(*)
A1.1	36	215	114	120	341
A1.2	224	254	154	159	290
A1.3	100	190	135	134	160
A1.4 /A1.5/A1.6 (**)	49	145	108	92	127
A2.1/A2.2	64	49	33	31	47
A2.3/A2.7	97	65	42	46	85
A2.4	60	50	43	42	34
A2.5/A2.6	26	36	29	27	28
A3.1	3	258	209	153	253
A3.2	2	943	943	266	1280
B1.1	3	177	170	149	114
B1.2	3	49	49	49	4
B1.3/B1.4	4	93	101	70	59
B2.1	151	132	85	81	147
B2.2	22	57	40	37	55
C1.1	40	170	123	110	142
C1.2	359	80	54	53	112
C1.3	148	102	56	52	360
C1.4	2	46	46	41	28
C1.5	142	68	47	47	62
C1.6	62	85	59	60	98
C1.7	48	49	33	32	49
C1.8	8	165	147	137	100
C2.1	9	128	92	71	132
C2.2	164	76	52	51	84
C3.1	11	58	33	35	68
Totale	1837				
Nota (*): AM: media aritmetica; GM: media geometrica; SD: deviazione standard.					
Nota (**): le UL in cui non sono stati eseguite misure di radon indoor sono state ricondotte, per le elaborazioni, statistiche, alle litologie più similari.					

Tab. 6-12 Principali valori statistici rappresentativi della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) nelle Unità litologiche (Liv. 2) del campione regionale

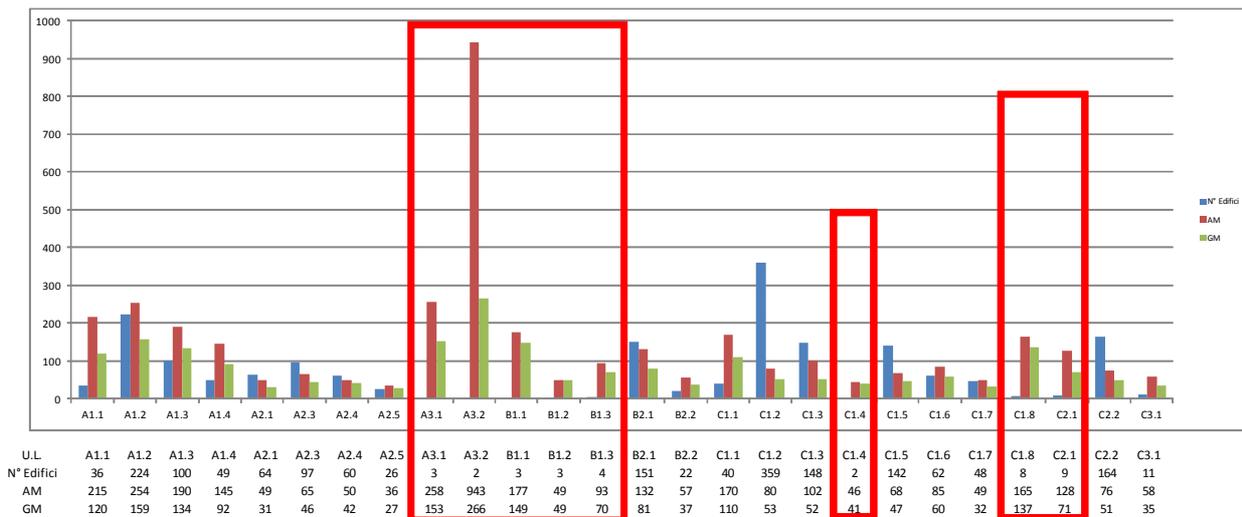


Fig. 6-18 Istogramma del n° edifici e della frequenza dei valori (AM-GM) di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) nelle Unità litologiche della Sardegna (liv.2) del campione regionale

L'elaborazione dei dati di concentrazione media netta con il software ProUCL consente di osservare la notevole variabilità di valori all'interno di ogni singola UL.

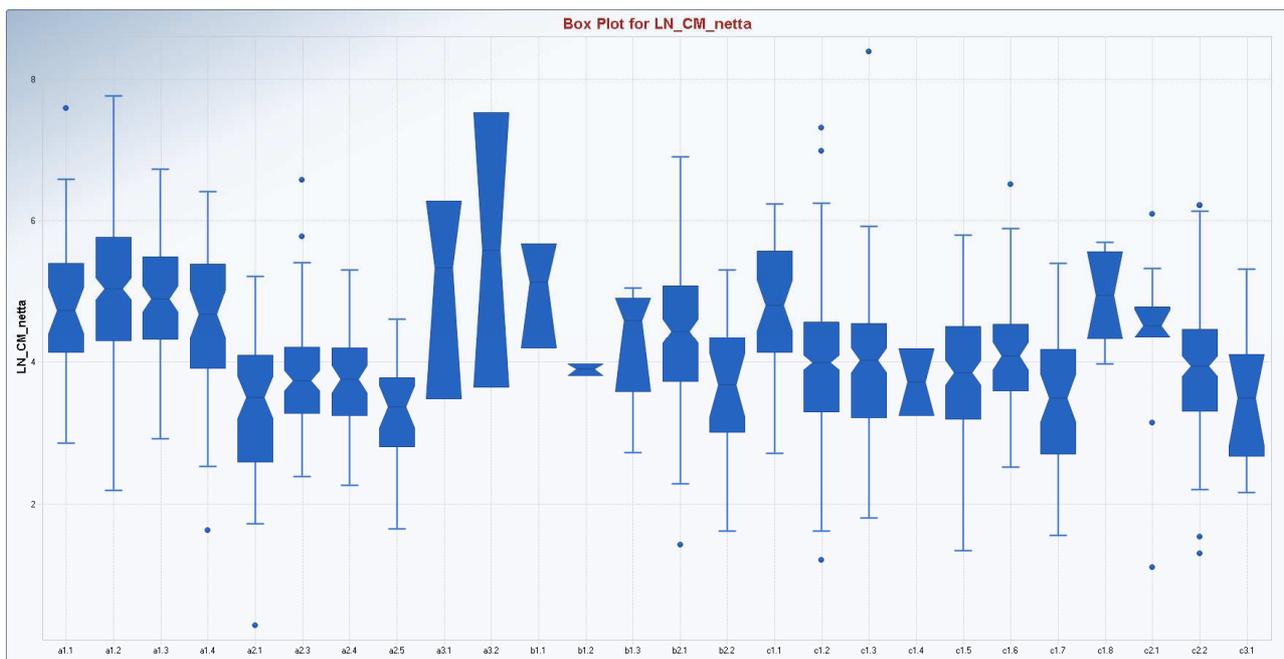


Fig. 6-19 Box plot dei valori del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) nelle Unità litologiche della Sardegna (liv.2) del campione regionale

Per una elaborazione più leggibile, sono state eliminate le UL con pochi campioni ed è stato predisposto un nuovo grafico, con il confronto diretto tra valori AM-GM. Incrociando i dati del Box Plot e del grafico si evidenziano i seguenti aspetti:

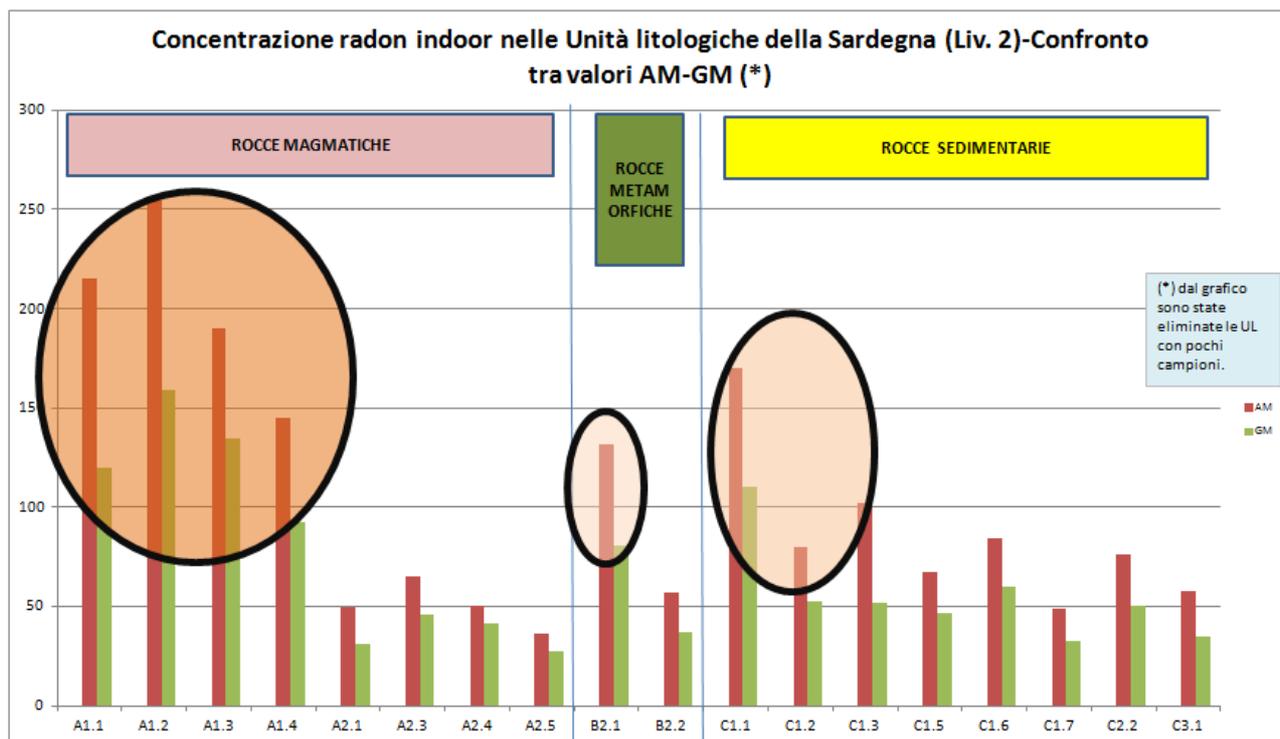


Fig. 6-20 Istogramma della frequenza dei valori di concentrazione (AM-GM) di radon indoor (Bq/m^3) nelle Unità litologiche della Sardegna (liv.2), semplificato, del campione regionale

- I valori di concentrazione della media geometrica (GM) del radon indoor degli edifici ubicati sulle rocce magmatiche intrusive A1 (per le sue diverse tipologie e composizione A1.1-A1.4) presentano, in generale, i valori più elevati riscontrati. Gli edifici sulle rocce di tipo monzogranitico da leucocratici a granodioritici (A1.2) presentano i valori più elevati all'interno di questa famiglia.
- I valori di concentrazione GM del radon indoor degli edifici sulle rocce magmatiche effusive A2 (per le sue diverse tipologie e composizione A2.1-A2.5) hanno un comportamento molto differente rispetto alla famiglia precedente; al suo interno si osservano infatti valori di concentrazione molto più bassi con un massimo per le rocce effusive di tipo basaltico-trachibasaltico-fonolitico.
- I valori di concentrazione GM del radon indoor degli edifici sulle rocce di natura metamorfica sono anch'essi tendenzialmente bassi; le rocce metamorfiche di natura terrigena (B2.1) presentano valori più elevati rispetto alle rocce metamorfiche di natura carbonatica (B2.2)
- I valori di concentrazione GM del radon indoor degli edifici sulle rocce sedimentarie terrigene (C1), ampia famiglia che comprende svariate tipologie litologiche (C1.1-C1.8) talora molto differenti tra loro per età, per ambiente di deposizione e per composizione, presentano valori che si posizionano con un andamento oscillante nella fascia della classe 32-60 Bq/m^3 , eccetto l'U.L. C1.1 che presenta un valore di concentrazione GM di 110 Bq/m^3 .
- Il valore di concentrazione GM del radon indoor degli edifici sulle rocce sedimentarie carbonatiche (C2.2) presenta un valore di 50 Bq/m^3 .

Nelle figure seguenti, alle Unità litologiche della Sardegna vengono attribuiti i valori di concentrazione media aritmetica (Fig. 6.21) e media geometrica (Fig. 6.22), come da Tab. 6.12.

In tale modo è possibile osservare la distribuzione delle classi di valori di concentrazione del radon indoor, per le Unità litologiche, sul territorio regionale.

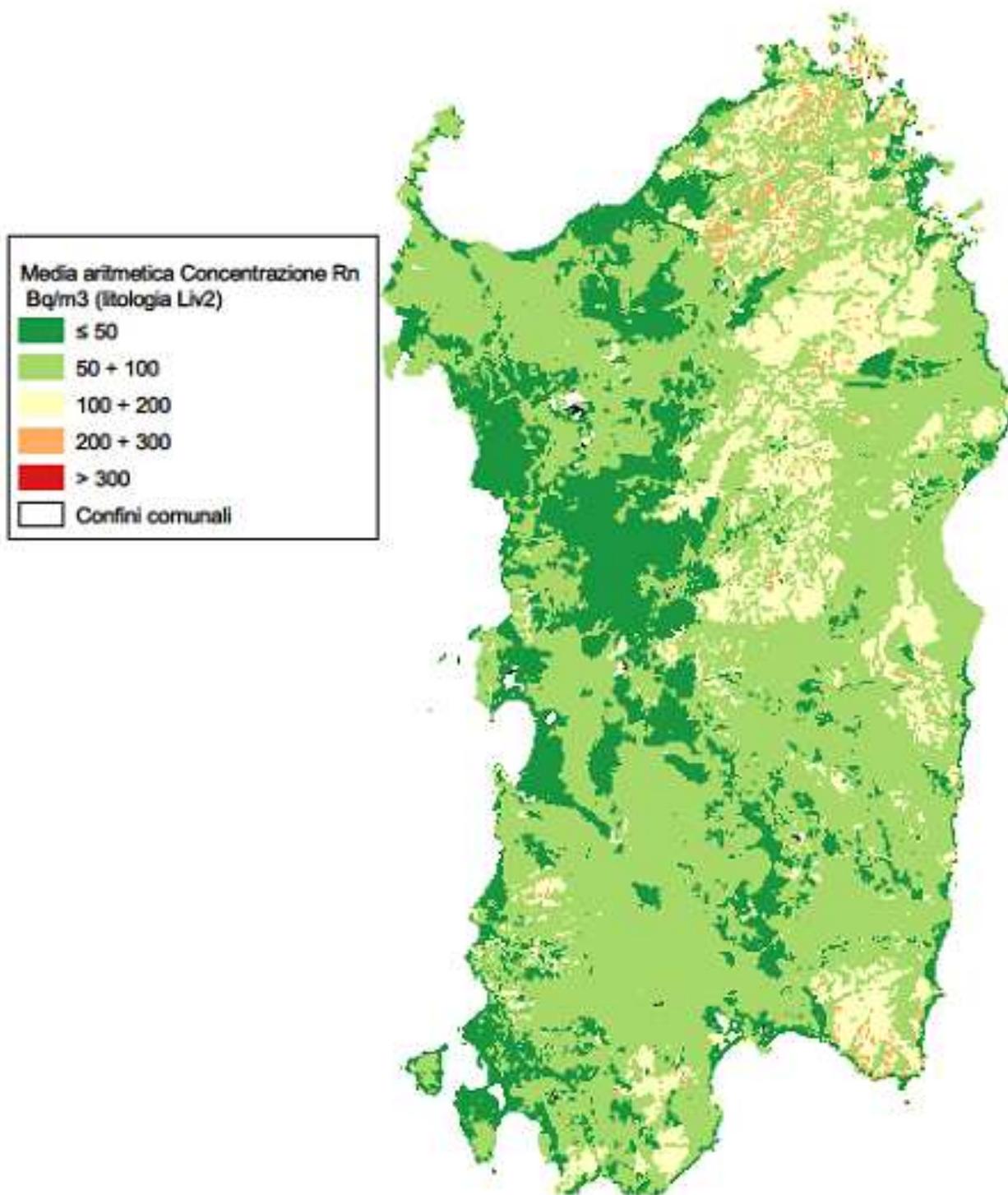
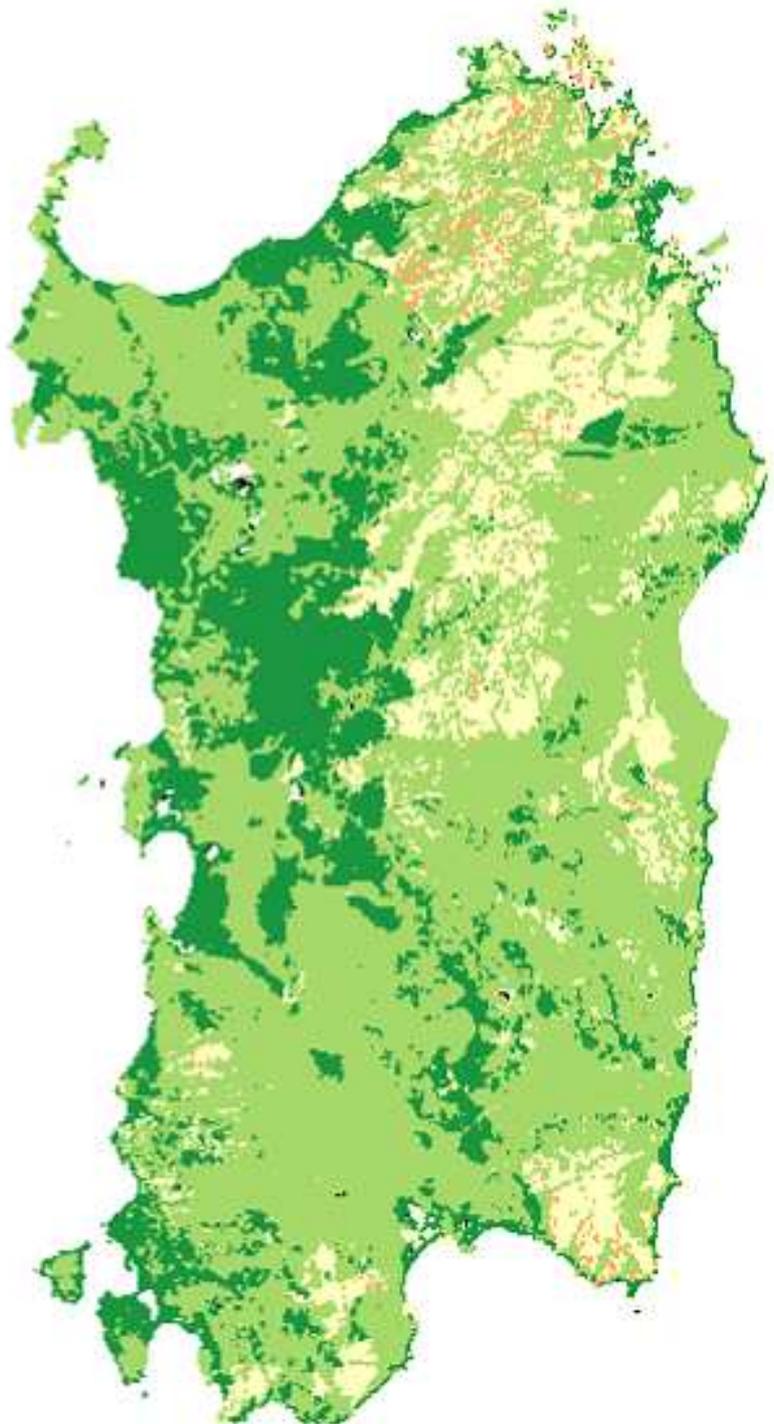
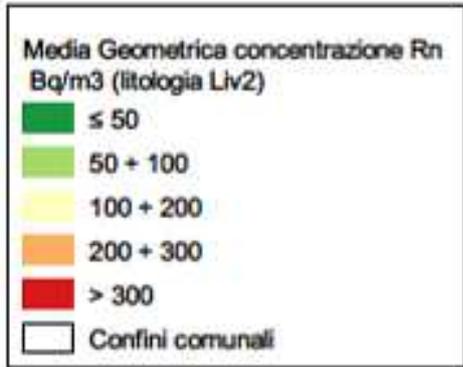


Fig. 6-21 Valori di concentrazione media aritmetica nelle Unità litologiche (Liv.2) sulla base del campione regionale



6-22 Valori di concentrazione media geometrica nelle Unità litologiche (Liv.2) sulla base del campione regionale

Per l'importanza che rivestono, in relazione alla loro elevata concentrazione media, nel seguito si approfondiscono i risultati delle elaborazioni sul radon indoor per gli edifici che ricadono sulle rocce magmatiche intrusive (A1), suddivisi analizzando i risultati analitici per le scuole e per le abitazioni.

Unità Litologica	N° Scuole	AM	Mediana	GM	SD (*)
A1.1 Leucograniti, leucomicrograniti, graniti s,l, leucosienograniti, microsienograniti, sienograniti	9	279	222	211	184
A1.2 Monzograniti, leucomonzograniti, "granodioriti monzogranitiche" auct,	47	253	187	170	294
A1.3 Granodioriti, granodioriti tonalitiche, microgranodioriti, granodioriti monzogranitiche	21	266	184	208	200
A1.4 Tonaliti, tonaliti granodioritiche, tonaliti quarzodioritiche	11	141	121	101	95
Totale	88				

Tab. 6-13 Principali valori statistici rappresentativi dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) delle Scuole ricadenti nelle rocce magmatiche intrusive (Unità litologica A1- liv. 2), del campione regionale

Unità Litologica	N° Abitazioni	AM	Mediana	GM	SD (*)
A1.1 Leucograniti, leucomicrograniti, graniti s,l,, leucosienograniti, microsienograniti, sienograniti	27	194	90	99	379
A1.2 Monzograniti, leucomonzograniti, "granodioriti monzogranitiche" auct,	177	254	150	156	290
A1.3 Granodioriti, granodioriti tonalitiche, microgranodioriti, granodioriti monzogranitiche	79	170	126	120	142
A1.4 Tonaliti, tonaliti granodioritiche, tonaliti quarzodioritiche	38	147	87	91	136
Totale	321				

Tab. 6-14 Principali valori statistici rappresentativi dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) delle Abitazioni ricadenti nelle rocce magmatiche intrusive (Unità litologica A1- liv. 2), del campione regionale

Unità Litologica		N° Scuole	N° Abitazioni	AM Scuole	AM Abitazioni	Rapporto AM S/A	GM Scuole	GM Abitazioni	Rapporto GM S/A
A1.1	Leucograniti, leucomicrograniti, graniti s,l, leucosienograniti, microsienograniti, sienograniti	9	27	279	194	1,4	170	156	1,1
A1.2	Monzograniti, leucomonzograniti, "granodioriti monzogranitiche" auct,	47	177	253	254	1,0	208	120	1,7
A1.3	Granodioriti, granodioriti tonalitiche, microgranodioriti, granodioriti monzogranitiche	21	79	266	170	1,6	211	99	2,1
A1.4	Tonaliti, tonaliti granodioritiche, tonaliti quarzodioritiche	11	38	141	147	1,0	101	91	1,1
Totale		88	321						

Tab. 6-15 Confronto tra valori di concentrazione media aritmetica (AM)-media geometrica (GM) per Scuole e Abitazioni ricadenti nelle rocce magmatiche intrusive (Unità litologiche A1- liv. 2), del campione regionale.

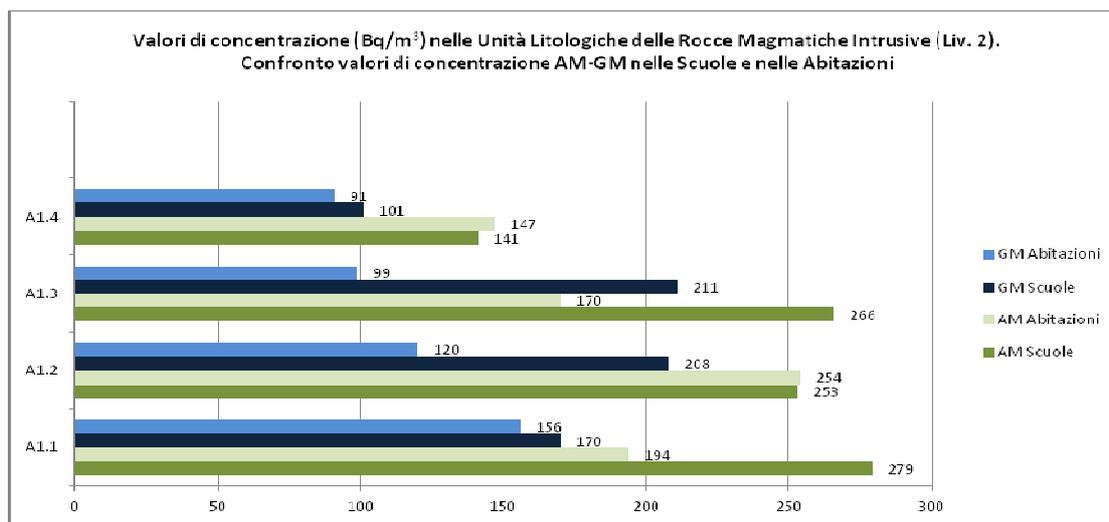


Fig. 6-23 Confronto tra valori di concentrazione media aritmetica (AM)-media geometrica (GM) per Scuole e Abitazioni ricadenti nelle rocce magmatiche intrusive (Unità litologiche A1- liv. 2), del campione regionale

La consultazione delle tabelle e dei grafici precedenti evidenzia che, a parità di litologie i valori più elevati (sia per AM che per GM) si riscontrano maggiormente nelle scuole rispetto alle abitazioni.

Il rapporto media geometrica Scuole/Abitazioni (GM S/A), per le diverse U.L., si presenta pari a 2,1 per le granodioriti (con 211 e 99 Bq/m³ rispettivamente - la media geometrica delle scuole presenta un valore di concentrazione GM maggiore del doppio rispetto a quello misurato nelle abitazioni); per i monzograniti si osserva un rapporto di 1,7 (con valori di concentrazione GM che variano tra 208 e 120 Bq/m³); valori di concentrazioni abbastanza simili si osservano, invece, per i leucograniti (con 170 e 156 Bq/m³ rispettivamente) e per le tonaliti (con 101 e 91 Bq/m³ rispettivamente).

Il rapporto media aritmetica Scuole/Abitazioni (AM S/A), per le diverse U.L., si presenta pari ad 1,6 sempre per le granodioriti (con 266 e 170 Bq/m³ rispettivamente - la media aritmetica delle scuole presenta un valore di concentrazione medio superiore del 60% rispetto a quello misurato nelle abitazioni). Valori di concentrazione abbastanza differenti della

AM si osservano anche per i leucograniti che presentano un rapporto S/A pari a 1,4 (con 279 e 194 Bq/m³ rispettivamente), da mettere in correlazione anche con il limitato numero di edifici presenti.

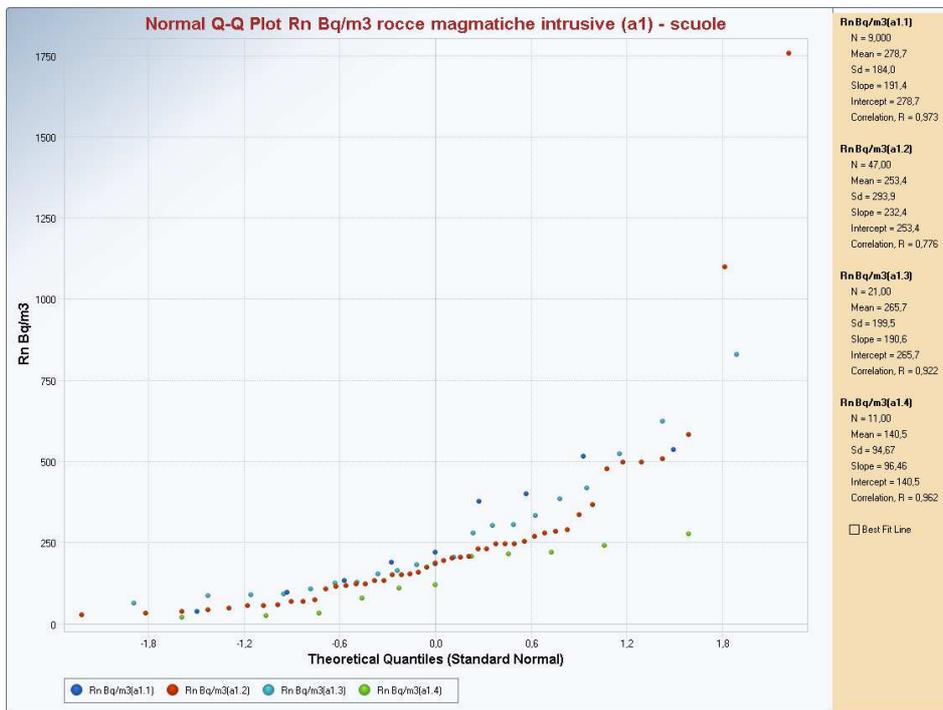


Fig. 6-24 QQ plot dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) delle Scuole ricadenti nelle rocce magmatiche intrusive (Unità litologica A1- liv. 2), del campione regionale

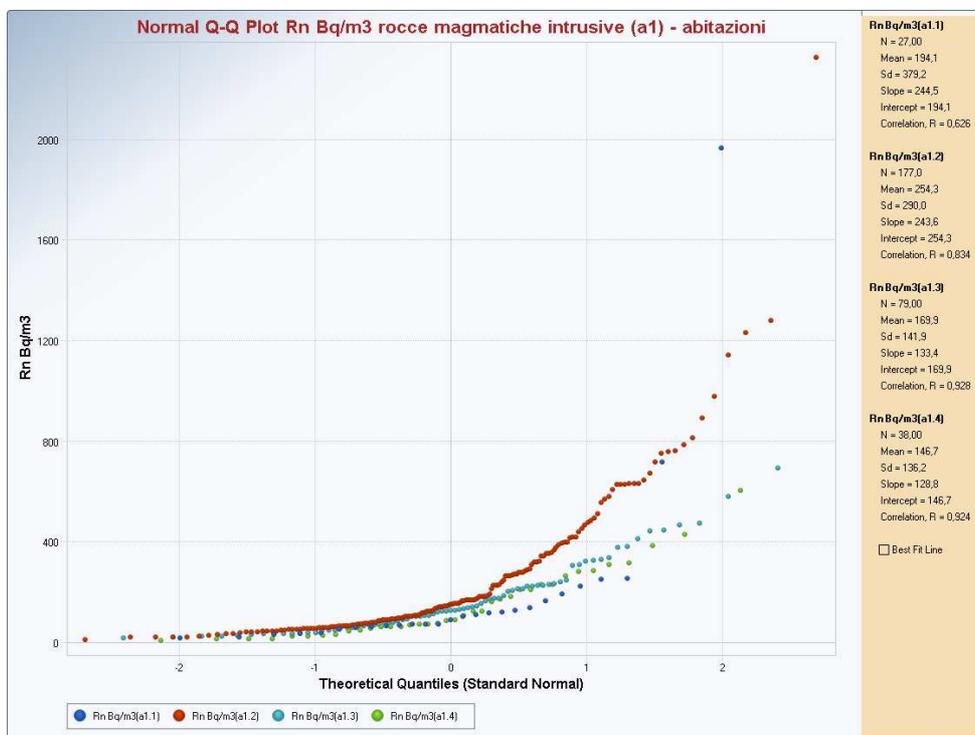


Fig. 6-25 QQ plot dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) delle Abitazioni ricadenti nelle rocce magmatiche intrusive (Unità litologica A1- liv. 2), del campione regionale

Lo stesso approfondimento viene eseguito per gli edifici che ricadono sulle rocce sedimentarie terrigene (C1) che comprendono anch'esse molti sottogruppi, e sulle rocce sedimentarie carbonatiche C2.

I dati di radon indoor relativi agli edifici che insistono sulle rocce sedimentarie terrigene hanno media geometrica di 70 Bq/m³ e 49 Bq/m³ rispettivamente nelle scuole e nelle abitazioni, con numerosi valori puntuali al di sopra dei 300 Bq/m³ fino ad arrivare al valore fortemente anomalo di 4.384 Bq/m³ tra le abitazioni; le sedimentarie carbonatiche hanno valori di media geometrica più bassi, intorno a 50 Bq/m³.

Per quanto riguarda le scuole, si scartano dal trattamento quelle litologie rappresentate da un esiguo numero di dati, come i depositi carbonatici lacustri e lagunari (C2.2, 1 dato), i depositi terrigeni fluvio-deltizi (C1.8, 1 dato) ed i depositi terrigeni palustri (classe C1.4, 2 dati). In tabella 6.15, i parametri statistici al livello di dettaglio 2, rivelano che i risultati più elevati si hanno per gli edifici che insistono sui depositi terrigeni antropici con media geometrica di 134,8 Bq/m³ (C1.1), rappresentati tuttavia da soli 13 dati, e sui depositi terrigeni litorali (C1.5).

Unità Litologica	N° Scuole	AM	Mediana	GM	SD (*)
C1.1 Depositi terrigeni antropici (saline, vasche di salificazione, aree di rispetto lagunare, discariche: minerarie, industriali, per inerti, per rifiuti solidi urbani; materiali di riporto e aree bonificate)	13	195	154	135	149
C1.2 Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie, sabbie, limi, argille), (conglomerati, arenarie, siltiti, peliti)	83	101	66	64	135
C1.3 Depositi terrigeni continentali legati a gravità (detriti di versante, frane, coltri eluvio-colluviali, "debris avalanches", breccie)	27	82	51	60	69
C1.5 Depositi terrigeni litorali (ghiaie, sabbie, arenarie, conglomerati)	23	122	114	91	89
C1.6 Depositi terrigeni marini (siltiti, argilliti, peliti)	15	128	76	83	162
C1.7 depositi terrigeni eolici (sabbie, arenarie)	11	73	33	43	79
C2.2 Depositi carbonatici marini (marne, calcari, calcari dolomitici, calcari oolitici, calcari bioclastici, calcareniti)	45	77	59	54	83
TOTALE	217				

Tab. 6-16 Principali valori statistici rappresentativi dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) delle Scuole ricadenti nelle rocce sedimentarie terrigene e carbonatiche (Unita litologica C1 e C2 - liv. 2), del campione regionale

Anche per quanto riguarda le abitazioni (tabella 6.16) un esiguo numero di dati rappresentano i depositi terrigeni palustri, lacustri, lagunari (C1.4, 2 dati) e i depositi terrigeni fluvio-deltizi (C1.8, 7 dati). Tra le restanti litologie, i depositi terrigeni antropici (C1.1) con media geometrica di 100 Bq/m³, confermano ancora i più alti valori tra le rocce sedimentarie. Tutte le classi litologiche mostrano alti valori massimi spesso superiori ai livelli di attenzione di 300 Bq/m³.

Unità Litologica	N° Abitazioni	AM	Mediana	GM	SD (*)
C1.1 Depositi terrigeni antropici (saline, vasche di salificazione, aree di rispetto lagunare, discariche: minerarie, industriali, per inerti, per rifiuti solidi urbani; materiali di riporto e aree bonificate)	27	158	111	100	140
C1.2 Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie, sabbie, limi, argille), (conglomerati, arenarie, siltiti, peliti)	276	74	48	50	103
C1.3 Depositi terrigeni continentali legati a gravità (detriti di versante, frane, coltri eluvio-colluviali, "debris avalanches", brecce)	121	107	56	50	397
C1.5 Depositi terrigeni litorali (ghiaie, sabbie, arenarie, conglomerati)	119	57	42	41	49
C1.6 Depositi terrigeni marini (siltiti, argilliti, peliti)	47	71	54	54	63
C1.7 depositi terrigeni eolici (sabbie, arenarie)	37	42	33	30	34
C1.8 Depositi terrigeni fluvio-deltizi (sabbie, microconglomerati, arenarie carbonatiche, siltiti argillose)	7	148	104	123	93
C2.1 Depositi carbonatici lacustri e lagunari (calcari, dolomie, calcari silicizzati, travertini)	8	89	86	63	61
C2.2 Depositi carbonatici marini (marne, calcari, calcari dolomitici, calcari oolitici, calcari bioclastici, calcareniti)	119	75	46	50	85
TOTALE	761				

Tab. 6-17 Principali valori statistici rappresentativi dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) delle Abitazioni ricadenti nelle rocce sedimentarie terrigene e carbonatiche (Unita litologica C1 e C2 - liv. 2), del campione regionale

I risultati conseguiti consentono alcune brevi considerazioni:

- a parità di gruppo litologico, i valori medi annuali di radon indoor nelle scuole sono generalmente più elevati di quelli delle abitazioni. Questo dato potrebbe essere messo in relazione con la chiusura delle scuole nel periodo estivo e il conseguente scarso ricambio d'aria degli ambienti. Per quanto riguarda i valori massimi tuttavia, e quindi i valori maggiormente anomali, valori molto elevati per alcune litologie sono stati registrati anche nelle abitazioni;
- su tutte le litologie, anche caratterizzate da bassi valori di media geometrica, sono presenti valori puntuali al di sopra dei livelli di attenzione di 200, 300 e 500 Bq/m³;
- i dati di radon indoor relativi agli edifici che insistono sulle rocce magmatiche intrusive sono quelli che fanno rilevare i più alti valori di media geometrica (superiore a 100 Bq/m³) e anche al livello grafico è evidente che sia per le scuole che per le abitazioni i valori sono in generale più elevati di quelli riscontrati nelle altre litologie e sono presenti molti outlier con valori superiori a 500 Bq/m³;
- un approfondimento sulle litologie magmatiche intrusive mostra che statisticamente i risultati più elevati con valori di media geometrica di 120-208 Bq/m³, si hanno per gli edifici che insistono su monzograniti e granodioriti;

- i dati di radon indoor relativi agli edifici che insistono sulle rocce magmatiche effusive hanno valori tendenzialmente al di sotto dei 100 Bq/m³, con media geometrica di 47 Bq/m³ e 37 Bq/m³ rispettivamente nelle scuole e nelle abitazioni; un solo valore supera i 300 Bq/m³ per le scuole e uno supera i 500 Bq/m³ per le abitazioni;
- i dati relativi agli edifici che insistono sulle rocce parametamorfiche mostrano che il 50 % dei dati è al di sopra dei 100 Bq/m³ con media geometrica di 88 Bq/m³ e 70 Bq/m³ rispettivamente nelle scuole e nelle abitazioni; diversi valori superano i 300 Bq/m³ per le scuole e molti lo superano nelle abitazioni;
- i dati di radon indoor relativi agli edifici che insistono sulle rocce sedimentarie terrigene hanno bassi valori di media geometrica (70 Bq/m³ e 49 Bq/m³ rispettivamente nelle scuole e nelle abitazioni) ma mostrano numerosi valori puntuali al di sopra dei 300 Bq/m³ fino a arrivare al valore fortemente anomalo di 4.384 Bq/m³ tra le abitazioni;
- un approfondimento sulle litologie sedimentarie terrigene mostra che gli edifici costruiti su tali litologie non portano mediamente alti valori di radon indoor; sono gli edifici costruiti sui depositi di tipo antropico a portare i maggiori valori medi di radon indoor (media geometrica intorno a 135 Bq/m³ nelle scuole e 100 Bq/m³ nelle abitazioni). Su tali litologie insistono spesso le aree urbane/residenziali.

6.5.1 Le relazioni tra concentrazione radon indoor e caratteristiche degli edifici monitorati

Nella scheda "Questionario" edificio e/o abitazione sono presenti 36 campi di informazione; al fine di valutare se le caratteristiche dell'edificio possano influenzare la concentrazione del radon indoor, ne sono stati presi in considerazione alcuni, che contengono i principali fattori caratterizzanti un edificio:

1. anno di costruzione
2. principali materiali da costruzione
3. morfologia del suolo
4. presenza di un piano seminterrato
5. presenza di un piano interrato
6. presenza di un piano terra con strutture aperte
7. n. di piani
8. accoppiamento pavimenti/suolo
9. accoppiamento pareti/suolo (solo per piani interrati o seminterrati)
10. utilizzo dei piani interrati e seminterrati
11. utilizzo del piano terra
12. tipo di struttura portante
13. esposizione al vento

Al fine di correlare la concentrazione di radon indoor con i fattori sopra elencati, sono state eseguite delle elaborazioni, i cui risultati sono riportati di seguito tramite tabelle, diagrammi e box plot.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. anno di costruzione dell'edificio

Analizzando la correlazione tra concentrazione radon indoor e anno di costruzione di ogni edificio emerge che è presente un generale decremento della concentrazione radon indoor al diminuire dell'età degli edifici, come ben evidente dalla colonna relativa alla media geometrica e al box plot.

Tale trend è invece meno netto osservando i dati relativi alla media aritmetica a riprova del fatto che talora i valori di concentrazione osservati sono molto elevati, come ben evidenziato dall'istogramma relativo al confronto tra AM vs GM.

Tali risultati possono avere una loro giustificazione col fatto che fino al periodo del dopo Guerra e avvio del grande sviluppo economico nazionale le case in Sardegna erano quasi sempre costruite in pietra locale, caratterizzate spesso da una notevole variabilità. Solo a partire dagli anni '60 le modalità e le tipologie costruttive e l'utilizzo dei materiali cominciano ad avere una più marcata omogeneità con gli edifici realizzati con strutture portanti in calcestruzzo e in laterizi realizzati da pochi centri di produzione per l'intero territorio regionale. L'istogramma evidenzia comunque che anche per quanto riguarda la media aritmetica i valori più elevati si riscontrano negli edifici più vecchi (1919-1961).

ANNO DI COSTRUZIONE	N° Edifici	AM	Mediana	GM	SD(*)
< 1919	74	146	105	94	144
1919 - 1945	81	141	96	88	189
1946 - 1961	216	154	95	90	224
1962 - 1971	197	124	74	73	163
1972 - 1981	258	95	50	51	138
1982 - 1991	221	101	57	56	174
1991 +	352	90	56	56	105
altro / non so	14	152	106	86	156
n/d	424	122	58	64	273
Totale	1.837				

Nota (*): AM: media aritmetica; GM: media geometrica; SD: deviazione standard.

Tab. 6-18 Principali valori statistici rappresentativi dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per classe anno di costruzione, del campione regionale

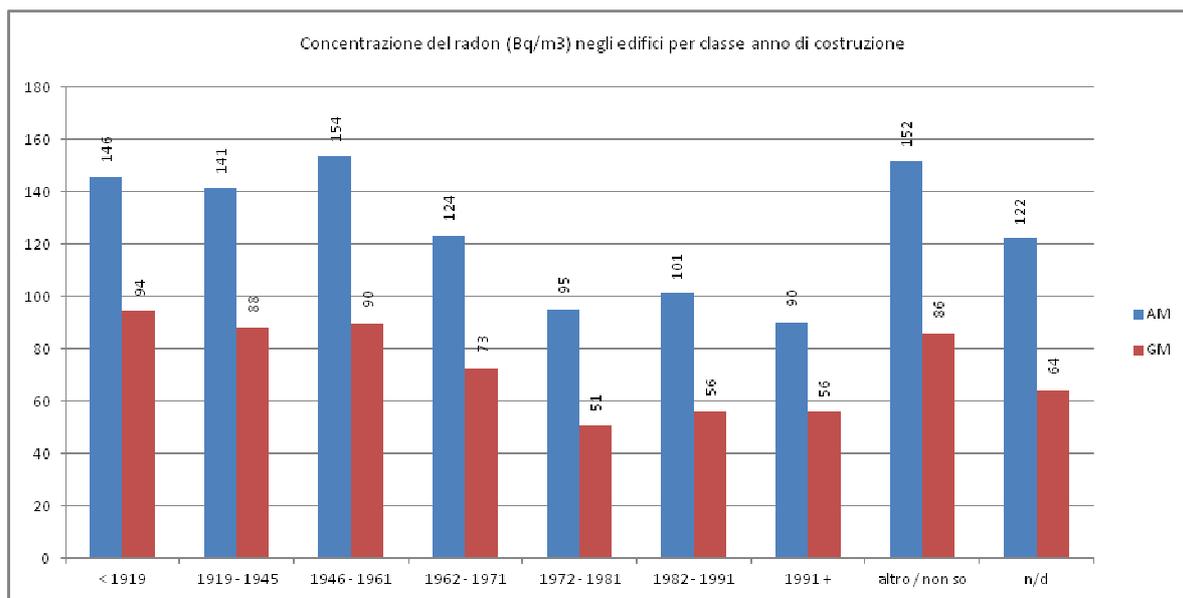


Fig. 6-26 Istogramma dei valori di concentrazione (AM-GM) di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per classe anno di costruzione, del campione regionale

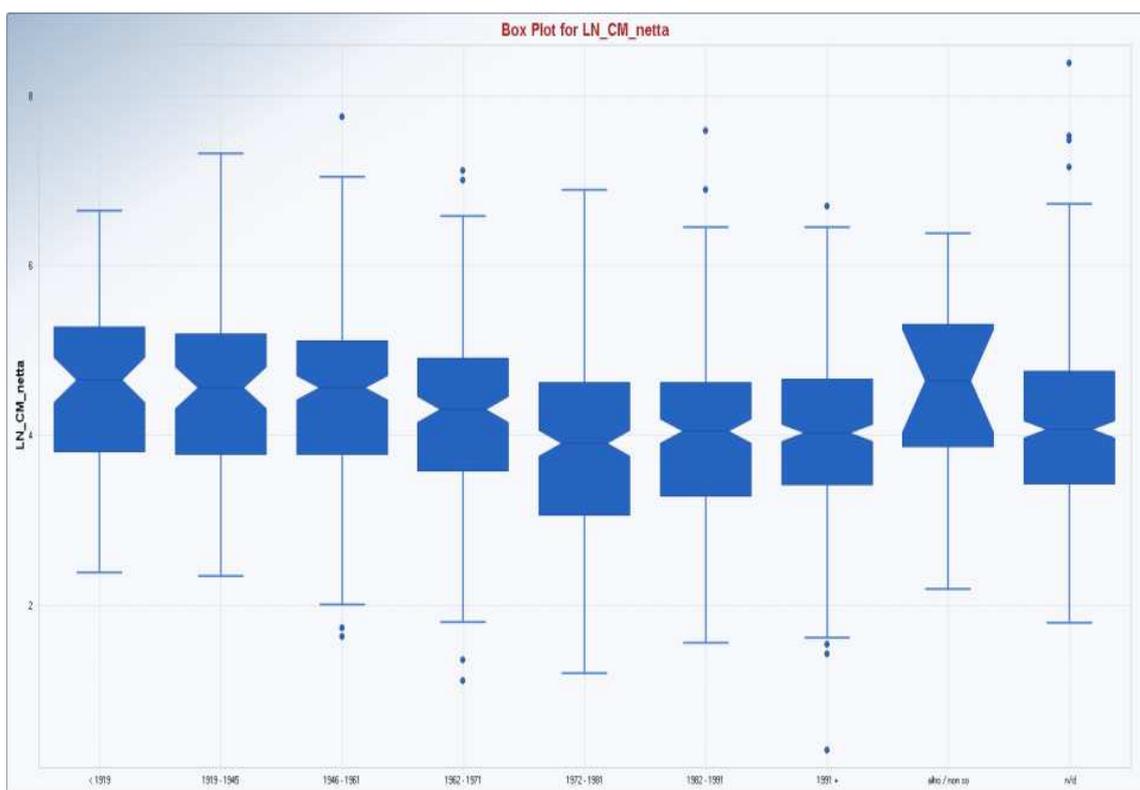


Fig. 6-27 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per classe anno di costruzione, del campione regionale⁴

⁴ Nota: In tutti Box plot il valore di riferimento in ordinata è LN_CM_netta. Per questioni grafiche in alcune figure il titolo dell'ordinata non è sempre perfettamente leggibile.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. principali materiali da costruzione dell'edificio

Per tale parametro si osserva la presenza di valori di concentrazione molto elevati, come ben evidenziato dall'analisi dell'istogramma relativo al confronto tra AM vs GM che evidenzia tra i due valori forti scostamenti.

Analizzando la correlazione tra concentrazione radon indoor e i principali materiali da costruzione, emerge che la concentrazione di radon indoor è mediamente più elevata laddove nel materiale da costruzione sia presente la pietra.

Principali valori rappresentativi della concentrazione del radon (Bq/m ³) negli edifici per classe materiali di costruzione					
Unità litologica	N° Edifici	AM	Mediana	GM	SD(*)
Cemento	109	93	58	101	10
Cemento;Laterizi	408	95	52	148	7
Cemento;Laterizi;Pietra	122	177	92	227	21
Cemento;Legno	1	105	105	N/A	N/A
Cemento;Pietra	47	168	73	357	52
Laterizi	276	91	56	115	7
Legno	1	116	116	N/A	N/A
Pietra	273	116	77	136	8
Pietra;Laterizi	91	158	88	191	20
N/D	486	125	66	261	12
Altro/Non so	23	98	68	87	18
Totale	1328				

Nota (*): AM: media aritmetica; GM: media geometrica; SD: deviazione standard.

Tab. 6-19 Principali valori statistici rappresentativi dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per classe materiali di costruzione, del campione regionale

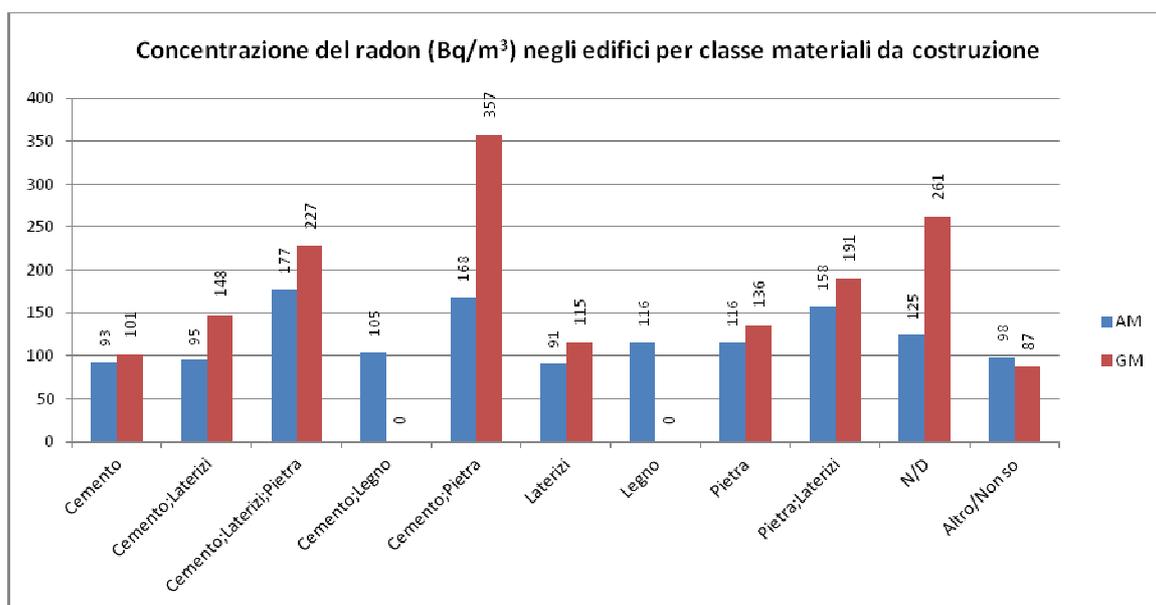


Fig. 6-28 Iistogramma dei valori di concentrazione (AM-GM) di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per classe materiali di costruzione, del campione regionale

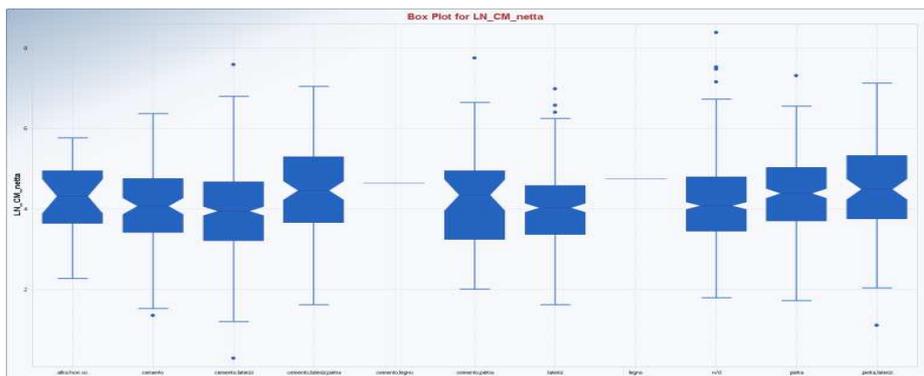


Fig. 6-29 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per materiali da costruzione, del campione regionale

Un'analisi del logaritmo dei valori medi AM di concentrazione negli edifici per tipologia dei materiali da costruzione, semplificati per caratteristiche dei materiali prevalenti, nelle ex Province della Sardegna evidenzia i valori più elevati in genere per gli edifici aventi come materiale prevalente la pietra, seguiti dal cemento e dai laterizi. Tali valori risultano più elevati nella provincia dell'Ogliastra, Olbia –Tempio e Nuoro, in linea con quanto già riscontrato. Fa eccezione la ex Provincia CI dove la concentrazione maggiore si osserva per la classe "Cemento".

Risulta fortemente anomalo, anche per il suo basso utilizzo, il valore degli edifici con legno nella provincia di Cagliari

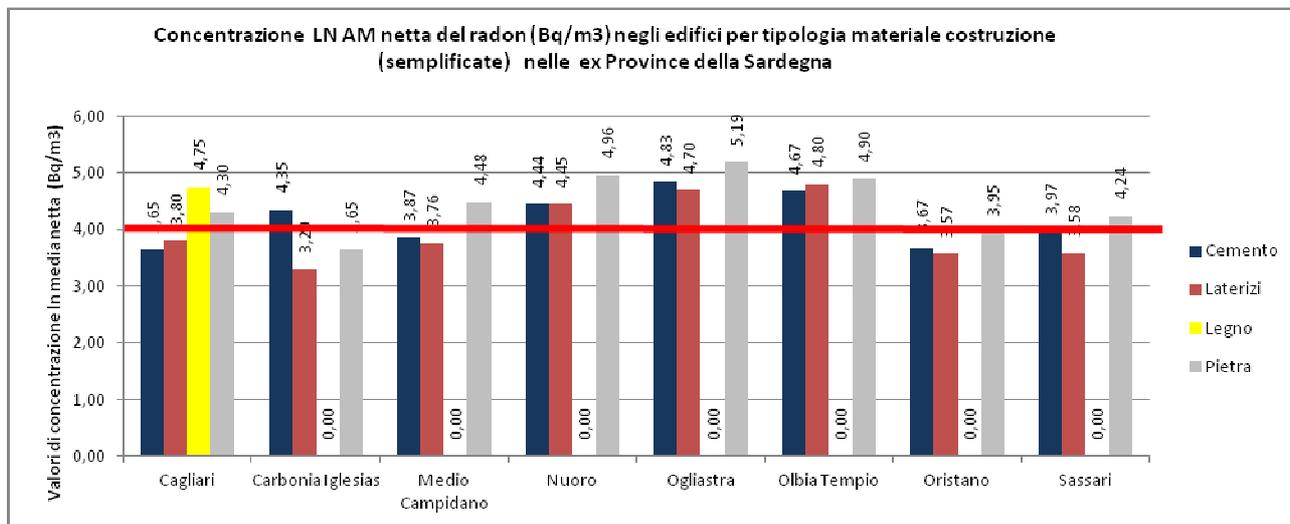


Fig. 6-30 Istogramma dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per classe materiale da costruzione (semplificato) nelle ex Province della Sardegna, del campione regionale

Concentrazione radon indoor (Bq/m^3) vs. morfologia del suolo

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione relativi alla morfologia del suolo su cui poggia l'edificio definite dalle seguenti classi: forte pendio, medio pendio, dati non disponibili, geomorfologia pianeggiante.



Fig. 6-31 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m^3) negli edifici per morfologia del suolo, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione radon indoor e la morfologia del suolo, sebbene tale dato non sia disponibile per un certo numero di edifici, non emerge una correlazione significativa.

Concentrazione radon indoor (Bq/m^3) vs. presenza di un piano seminterrato

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione, per: dato non disponibile, assenza di piano seminterrato, presenza di piano seminterrato.

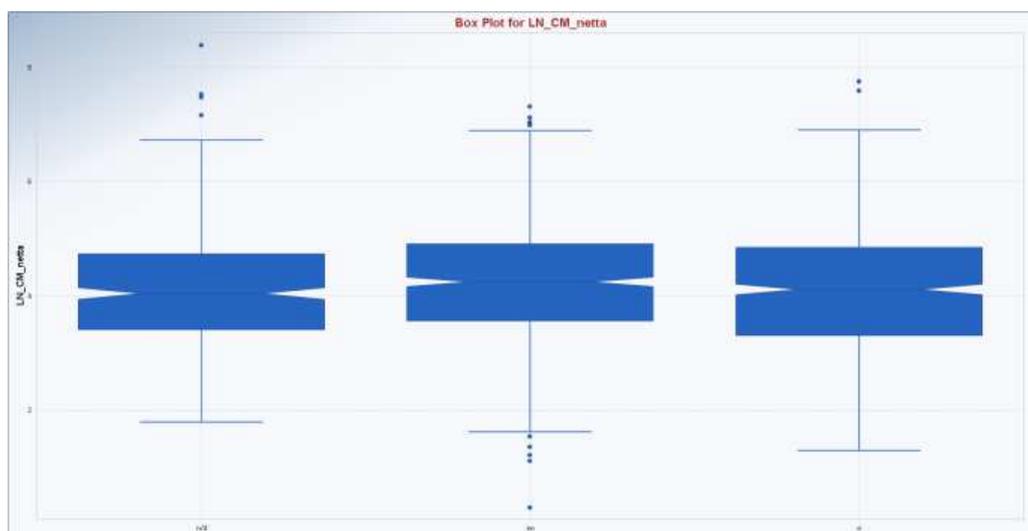


Fig. 6-32 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m^3) negli edifici per presenza o meno di un piano seminterrato, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione radon indoor e la presenza o meno di un piano seminterrato, sebbene tale dato non sia disponibile per un certo numero di edifici, non emerge una correlazione significativa.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. presenza di un piano interrato

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di: dato non disponibile, assenza di piano interrato, presenza di piano interrato.

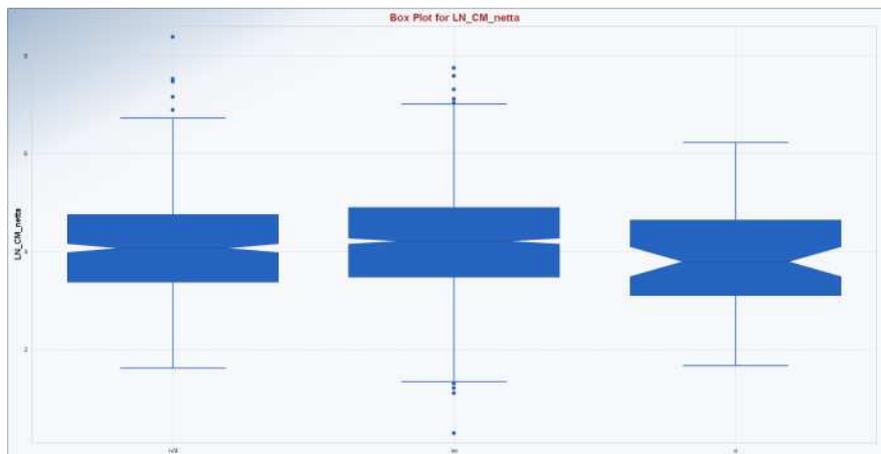


Fig. 6-33 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per presenza o meno di un piano interrato, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione radon indoor e la presenza o meno di un piano interrato, emerge che in presenza di un piano interrato si rileva una diminuzione della concentrazione radon indoor nel locale di misura situato al piano terra.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. presenza di un piano terra con strutture aperte

Nel seguente box plot, sono riportati nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di: dato non disponibile, assenza di strutture aperte, presenza di strutture aperte.

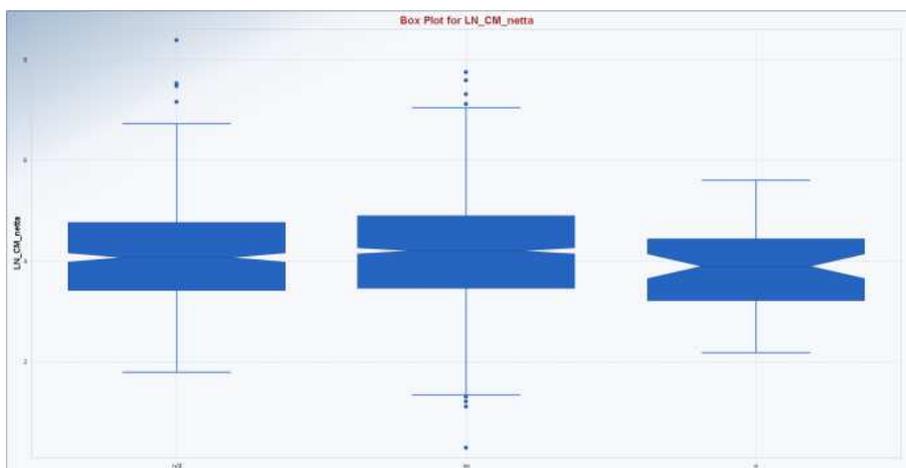


Fig. 6-34 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per presenza di un piano terra con strutture aperte, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione indoor e la presenza di un piano terra con strutture aperte, emerge che laddove sono presenti strutture aperte si rileva una diminuzione della concentrazione radon indoor.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. numero di piani dell'edificio

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di: edifici con numero di piani maggiore di 4, pari a 1, pari a 2, pari a 3, pari a 4, dato non disponibile.

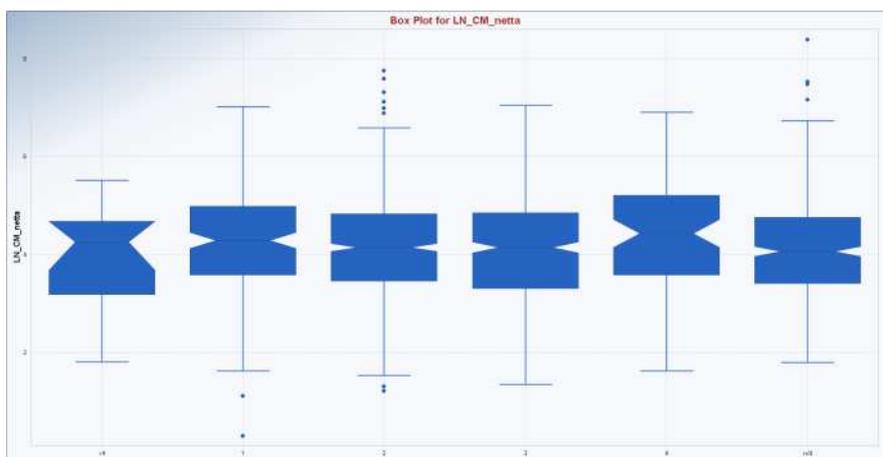


Fig. 6-35 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per numero di piani dell'edificio, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione indoor e il numero di piani dell'edificio, sebbene tale dato non sia disponibile per un certo numero di edifici, non emerge una correlazione significativa.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. accoppiamento pavimenti/suolo Nel seguente box plot, sono riportati nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di accoppiamento: "altro/non so", diretto, dato non disponibile, tramite soletta, tramite vespaio chiuso, tramite vespaio ventilato.

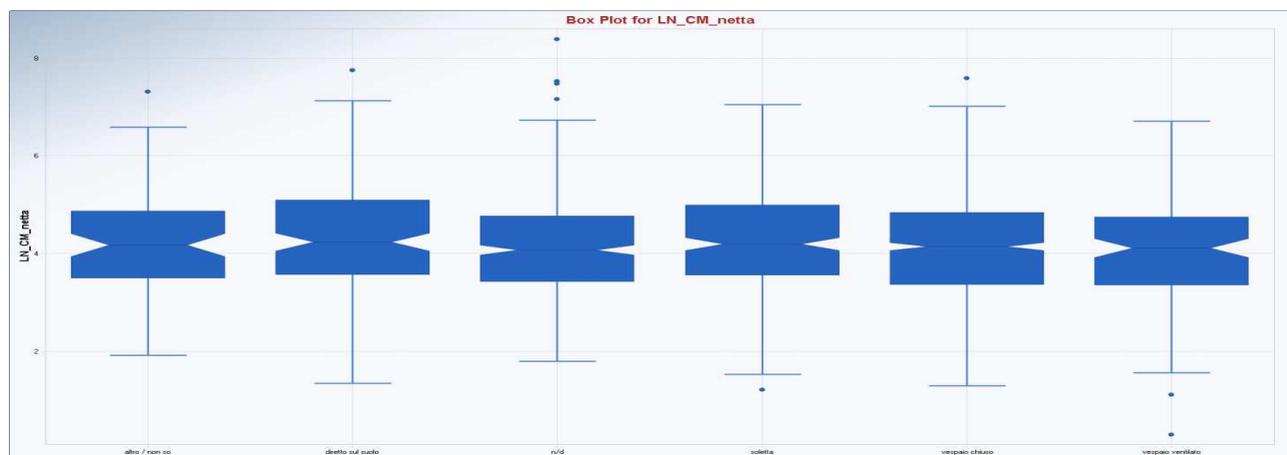


Fig. 6-36 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per tipo di accoppiamento tra il pavimento e il suolo, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione indoor e il tipo di accoppiamento tra il pavimento e il suolo, si osserva che gli edifici con accoppiamento diretto col suolo presentano valori di concentrazione più elevati, seguiti dagli edifici con soletta e infine dagli edifici con vespaio (chiuso o aperto), che presentano i valori di concentrazione più bassi.

Tali relazioni sono in linea con le aspettative del modello concettuale.

Concentrazione radon indoor (Bq/m^3) vs. accoppiamento pareti/soffitto (solo per piani interrati o seminterrati)

Nel seguente box plot, sono riportati nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di accoppiamento: "altro/non so", misto, dato non disponibile, pareti a diretto contatto col suolo, presenza di intercapedine.

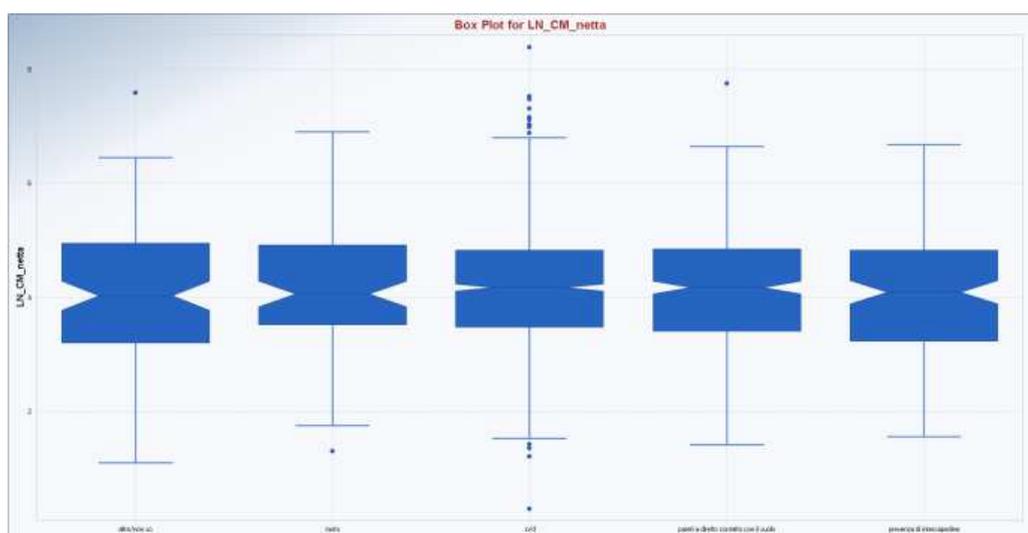


Fig. 6-37 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m^3) negli edifici per tipo di accoppiamento tra pareti del piano (interrato o seminterrato) e il suolo, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione indoor e il tipo di accoppiamento tra le pareti del piano interrato o seminterrato e il suolo, sebbene tale dato non sia disponibile per un certo numero di edifici, non emerge una correlazione significativa.

Concentrazione radon indoor (Bq/m^3) vs. utilizzo dei piani interrati o seminterrati

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di utilizzo del seminterrato come: abitazione, "altro/non so", cantina/magazzino, garage, dato non disponibile, negozio/ufficio, seminterrato non presente nell'edificio.

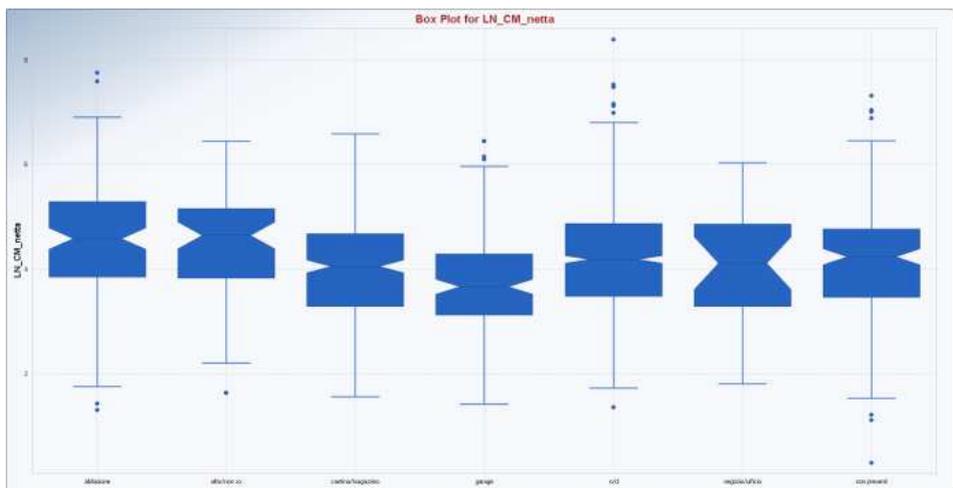


Fig. 6-38 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per modalità di utilizzo del piano interrato o seminterrato, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione indoor e le modalità di utilizzo del piano interrato o seminterrato, emerge che negli edifici in cui i piani interrati sono utilizzati come abitazione si riscontrano concentrazioni di radon nel punto di misura leggermente più elevati. Invece negli edifici in cui i piani interrati sono utilizzati come garage si riscontrano concentrazioni di radon nel punto di misura più bassi.

Concentrazione radon indoor (Bq/m³) vs. utilizzo del piano terra

Le modalità d'uso proposte nelle schede Questionario sono: abitazione, cantina/magazzino, garage, negozio/ufficio, altro/non so, dato non disponibile. Poiché era consentita la selezione multipla nelle risposte, è emersa la seguente combinazione di utilizzo del piano terra, come riportato in ordine nel seguente box plot: abitazione; abitazione, garage; abitazione, garage, cantina/magazzino; abitazione, negozio/ufficio; cantina/magazzino; cantina/magazzino, negozio/ufficio; garage, cantina/magazzino; dato non disponibile; negozio/ufficio; negozio/ufficio, abitazione; negozio/ufficio, cantina/magazzino.

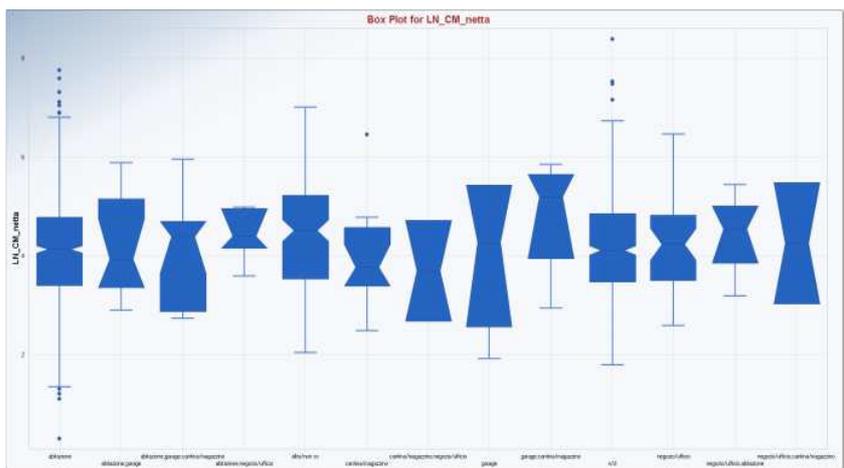


Fig. 6-39 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m³) negli edifici per modalità di utilizzo del piano terra, del campione regionale

Dall'analisi dei dati non si evince una definita correlazione tra la concentrazione e l'utilizzo del piano terra.

Concentrazione radon indoor (Bq/m^3) vs. tipo di struttura portante

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di: "altro/non so", cemento armato, muratura portante, dato non disponibile.

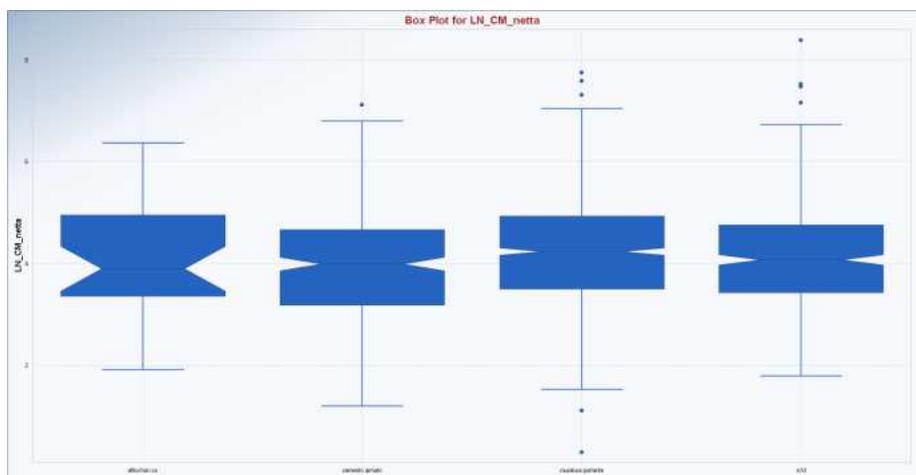


Fig. 6-40 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m^3) negli edifici per tipo di struttura portante dell'edificio, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione indoor e il tipo di struttura portante dell'edificio, sebbene tale dato non sia disponibile per un certo numero di edifici, non emerge una correlazione significativa.

Concentrazione radon indoor (Bq/m^3) vs. intensità dell'esposizione al vento

Nel seguente box plot sono riportati, nell'ordine, i dati statistici della correlazione, nel caso di esposizione: alta, bassa, media, dato non disponibile.

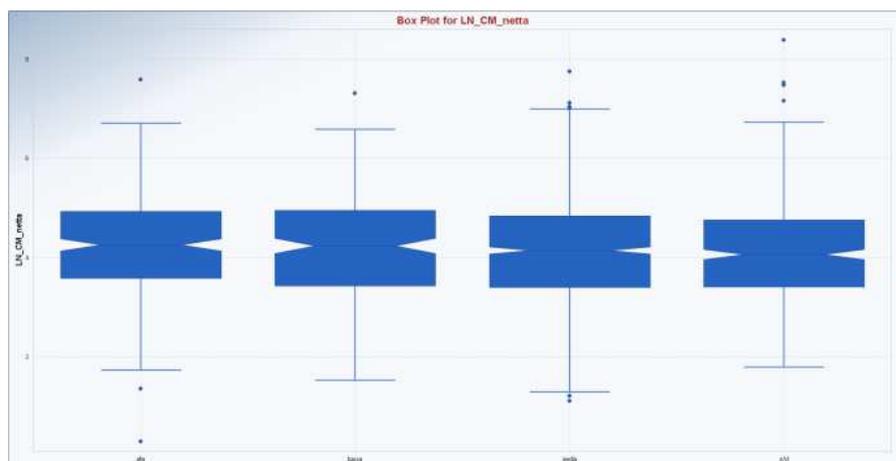


Fig. 6-41 Box plot del logaritmo della concentrazione di radon indoor (Bq/m^3) negli edifici per l'esposizione al vento dell'edificio, del campione regionale

Analizzando la correlazione tra concentrazione radon indoor e l'intensità dell'esposizione al vento, sebbene tale dato non sia disponibile per un certo numero di edifici, non emerge una correlazione significativa.

7 Elaborazioni su base geostatistica e rappresentazione dei risultati a livello regionale

Poiché lo scopo del Progetto Radon consiste nell'individuazione delle aree a rischio per l'intero territorio regionale, sono state sviluppate opportune metodologie al fine di poter ottenere, a partire dai valori di concentrazione di radon indoor nel campione regionale, illustrati in precedenza e relativi a 208 Comuni, valori di concentrazione di radon indoor per l'intero territorio regionale e relativi a tutti i 377 Comuni.

Per ottenere tali elaborazioni si è adottata una "risoluzione" spaziale di 1 km², tale da consentire il calcolo della concentrazione per qualsiasi raggruppamento definito a livello territoriale, siano essi i confini amministrativi comunali, siano gli elementi della griglia regionale.

Poiché inoltre è disponibile dall'ISTAT/ARPA la suddivisione della popolazione nel territorio regionale per la medesima griglia territoriale utilizzata per le interpolazioni, è possibile valutare non solo la concentrazione di radon indoor ma anche l'esposizione della popolazione ai rispettivi livelli di concentrazione.

Per raggiungere il predetto obiettivo, una volta che questi sono stati opportunamente georeferenziati, fra le diverse tecniche di interpolazione dei dati sperimentate, sono state scelte due tecniche di tipo geostatistico, considerate le più adeguate per il raggiungimento degli obiettivi del Progetto.

Tali tecniche sono un metodo "kriging" e un metodo di "elaborazione litogeostatistica - LGS" mutuata ed adattata al contesto regionale a partire dal metodo proposto da Miles et Al. 2005 e da noi messa a punto e sviluppata.

Si evidenzia che il metodo kriging costruisce le interpolazioni dei dati analitici georeferenziati utilizzando unicamente la reciproca correlazione spaziale, come illustrato successivamente, e trascurando pertanto l'eventuale contributo della litologia, mentre il metodo LGS costruisce le interpolazioni sulla base di un criterio che si fonda sul contributo territoriale specifico delle litologie.

7.1 Elaborazioni su base geostatistica - il metodo del kriging

I valori di concentrazione di radon indoor sull'intero territorio regionale sono stati definiti, applicando ad una griglia 1.000 m x 1.000 m (1 km²) che copre l'intero territorio regionale, utilizzando un metodo di interpolazione di tipo geostatistico denominato kriging ordinario [Matheron G (1976) *A simple substitute for conditional expectation: the disjunctive kriging. Advanced geostatistics in the mining industry*. Reidel, Dordrecht, pp 221–236]. Tale metodo di interpolazione usa metodi matematici e statistici per interpolare dati analitici georeferenziati tenendo conto della reciproca correlazione spaziale.

La stima del valore di concentrazione di radon indoor sulla griglia di calcolo è stata effettuata mediante un kriging ordinario, sottintendendo l'ipotesi di lognormalità dei dati e applicando successivamente un kriging trans-gaussiano, attraverso il software (open source) "R", ed utilizzando la funzione "krigeTg" (Pebesma, 2004) presente nel pacchetto "gstat".

Il variogramma, mostrato nella figura seguente, è stato ottenuto utilizzando l'intero dataset con una distanza massima per coppia di punti di 30 km.

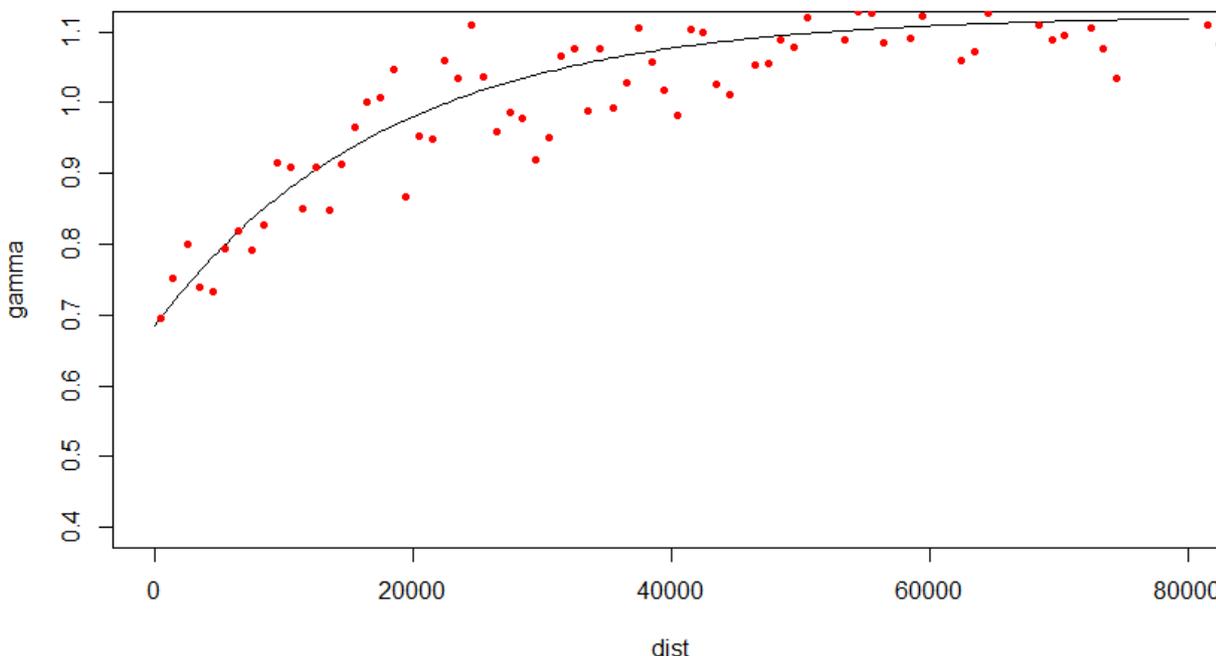


Fig. 7-1 Variogramma dei valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m^3) negli edifici, con una distanza massima per coppia di punti di 30 km, del campione regionale

L'analisi geostatistica dei dati indica l'esistenza di una correlazione spaziale che è stata approssimata con una funzione esponenziale con un sill di 0,431, un range di 17.245 m, e un nugget di 0,665⁵.

L'alto valore dell'effetto nugget conferma che la concentrazione del radon indoor possiede un'alta variabilità a piccole scale spaziali, come mostrato anche dalle misure.

Il risultato dell'elaborazione della concentrazione del radon indoor secondo il metodo del kriging è mostrato nella tavola seguente.

L'interpolazione eseguita mette in evidenza due aree caratterizzate da valori di concentrazione più elevati (classi $>200 - \leq 300$ e $>300 Bq/m^3$) ubicate, la prima, più grande, nel Centro Sardegna e la seconda, al centro della Gallura. Tali zone sono contornate da aree irregolari con valori di $>100 - \leq 200 Bq/m^3$, che determinano per tutto il settore Nord-Orientale/Centro-Orientale/Ogliastra un'area molto vasta con valori di concentrazione che evolvono da >100 fino $>300 Bq/m^3$.

In tutto il resto della Sardegna prevale nettamente la classe $>50 - \leq 100 Bq/m^3$, con localizzate plaghe caratterizzate dai valori di concentrazione più bassi ($0 - \leq 50 Bq/m^3$) riscontrati sul territorio regionale e che dal settore nord-occidentale al settore sud-orientale sono: Nurra, Montiferru, Sulcis-Iglesiente, Cagliari.

⁵ Sill: variabilità correlata alla distanza

Range: distanza oltre la quale non si osserva più correlazione spaziale

Nugget: variabilità casuale non correlata alla distanza (es. errori di misura)

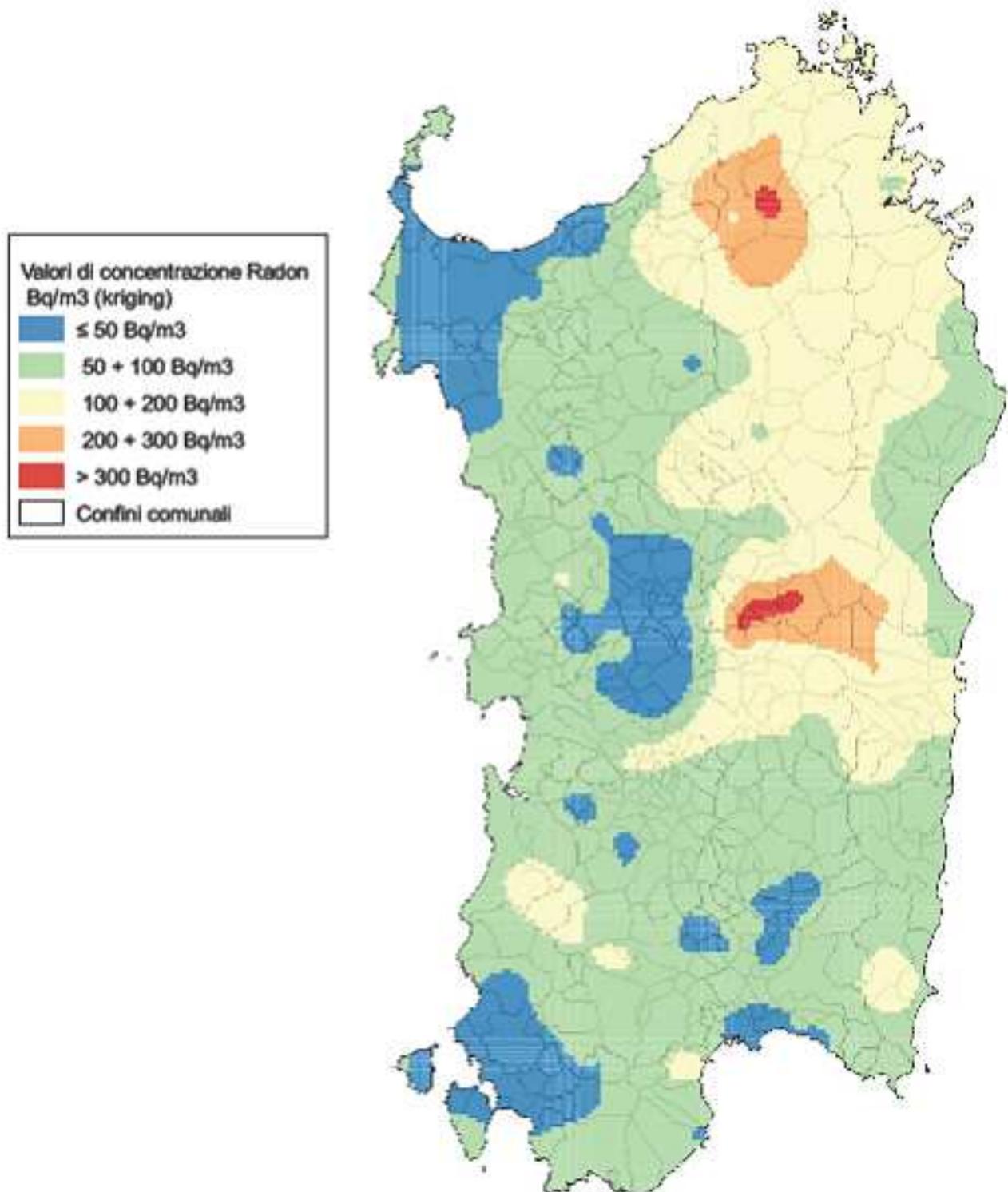


Fig. 7-2 Valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³), ottenuti attraverso l'elaborazione con il metodo kriging, del territorio regionale (griglia 1 km²)

7.2 Elaborazioni su base geostatistica - il metodo LGS (LITO-GEO-STATISTICO)

Il metodo Lito-Geo-Statistico (LGS), da noi sviluppato, consiste nello stimare il valore della concentrazione di radon indoor sulle aree non coperte da misure sfruttando le caratteristiche litologiche del territorio, con il presupposto che il contributo della litologia alla concentrazione del radon indoor può essere variabile in aree geografiche diverse, pur a parità del substrato litologico su cui sono costruiti gli edifici, come già evidenziato nel paragrafo 6.4.1 e nelle figure 6.21 e 6.22.

Il metodo LGS fonda i suoi presupposti teorici sul metodo della mappatura integrata (*integrated mapping method* sviluppato da Miles-Appleton nel 2005) e della procedura della mappatura a griglia quadrata (sviluppata sempre da Miles-Appleton). Tale metodo, partendo dall'associare ciascuna misura di concentrazione di radon indoor al substrato litologico su cui ricade l'abitazione, permette di collegare il valore di concentrazione del radon ad ogni unità litologica (UL), tenendo conto della variabilità della sua concentrazione su base territoriale/locale.

L'algorithm si compone dei seguenti passi:

- 1) suddivisione del territorio regionale in maglie di 1 km²;
- 2) calcolo del valore medio e della deviazione standard della concentrazione radon associati alle singole UL per ogni cella;
- 3) se in una cella non sono presenti misure delle concentrazioni, si procede alla stima del valore da attribuire alle UL sulla base della ricerca di misure all'interno di intorno ("buffer") individuati a distanze crescenti (raggio 10 km, 28 km, 56 km, 84 km o medie regionali).

Il Metodo LGS consente di poter stimare ed apprezzare le variazioni della concentrazione radon indoor, correlati alle unità litologiche, in ambito locale, per gli elementi di riferimento presi in considerazione ("Comuni", "Maglie CTR")

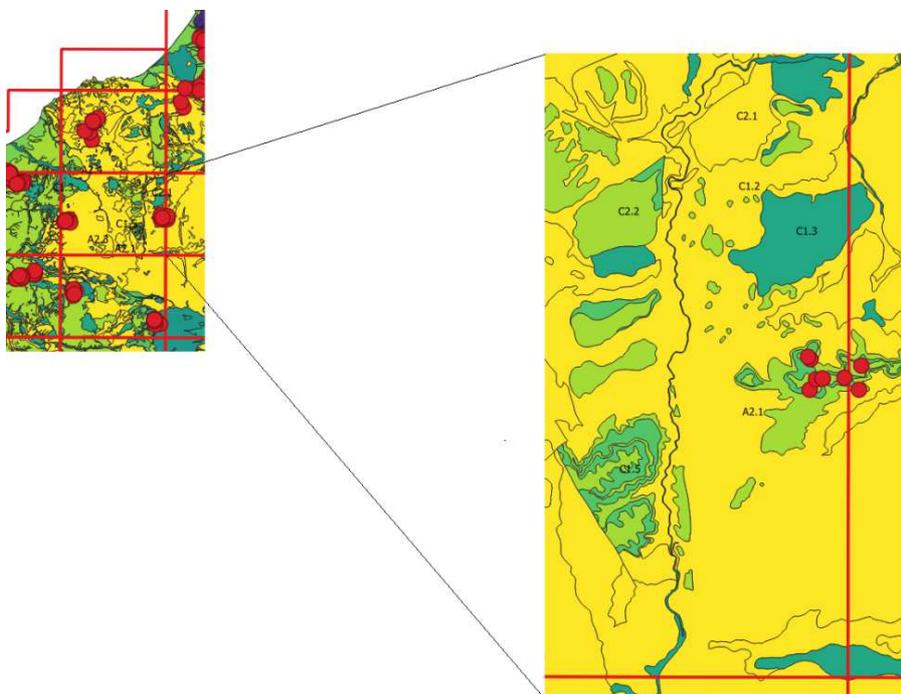


Fig. 7-3 Elaborazione geostatistica per la valutazione dei valori di concentrazione del radon nel territorio regionale: esempio di applicazione del metodo LGS

Partendo dalla suddivisione del territorio in griglie regolari (di 15 Km x10 km pari ad una superficie di 150 km²), per ciascuna sezione si calcola la media geometrica della concentrazione di radon indoor e la relativa deviazione standard a ciascun substrato litologico, per ogni UL appartenente a quella sezione, utilizzando i punti di misura/valori di concentrazione all'interno della stessa. Quando nella sezione non sono presenti punti di misura per una determinata litologia, si vanno a cercare le misure nei quadranti circostanti, sulla base dei buffer definiti, fino ad ottenere un valore medio rappresentativo per ogni UL.

La procedura è stata automatizzata con uno script "R", attraverso il quale si calcola la media geometrica e la deviazione standard geometrica delle misure all'interno di diversi buffer dal centroide della sezione esaminata (10 km, 28 km, 56 km, 84 km). Se, per una determinata litologia, nel quadrante non sono presenti punti all'interno di un raggio massimo di 84 km, si utilizza il valore della media geometrica regionale di concentrazione di radon indoor per quella unità litologica.

Di seguito lo schema a blocchi dell'algorithm utilizzato per l'elaborazione del metodo LGS.

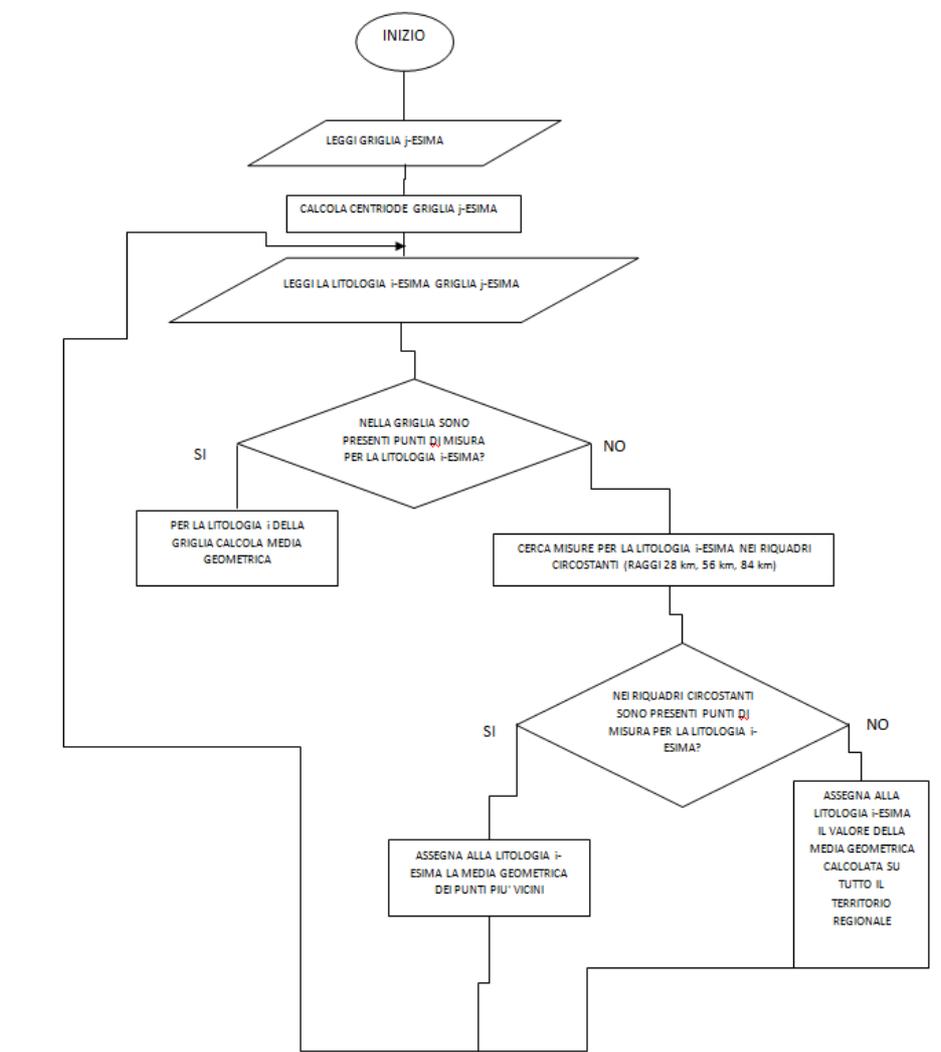


Fig. 7-4 Elaborazione geostatistica per la valutazione della concentrazione del radon nel territorio regionale: flow sheet dell'algorithm del metodo LGS

Il risultato dell'elaborazione della concentrazione del radon indoor secondo il metodo LGS è mostrato nella Fig. 7.5.

Nella figura eseguita con il metodo LGS si notano variazioni dei valori di concentrazione, talora molto alti, tra maglie confinanti, al contrario delle elaborazioni eseguite con il metodo kriging che definivano un'evoluzione spaziale molto più graduale e comunque generalmente per fasce di classi di valori contigue.

Le aree caratterizzate dai valori di concentrazione più elevati $>300 \text{ Bq/m}^3$ si osservano in diverse zone della Gallura, del Centro Sardegna e del Sarrabus.

Altre aree con valori di concentrazione $>300 \text{ Bq/m}^3$ si riscontrano (con microcelle di qualche km^2) nel settore della Sardegna nord-occidentale (Nurra, Anglona, Monte Acuto e Meilogu) riferite a unità litologiche tipo A3.1 e A3.2 di scarsa rilevanza a livello regionale e non significative, in relazione al fatto che tali aree al contorno presentano generalmente valori di concentrazione ridotti. Un'altra area con valori elevati si riscontra nella zona della bassa Gallura e di Capo Comino.

Valori di concentrazione tra $>200 - \leq 300 \text{ Bq/m}^3$ sono presenti in vaste aree della Gallura, del Centro Sardegna e dell'Ogliastra.

In generale si osserva che, anche con il metodo di interpolazione LGS, tutto il settore orientale della Sardegna, a partire dai territori dell'Ogliastra sino a Capo Testa è caratterizzato da valori più elevati (superiori ai 100 Bq/m^3 , salvo le zone del Monte Albo-Posada).

Invece il settore occidentale dell'Isola ed il Campidano, salvo alcune localizzate aree dell'Arburese, presentano i valori più bassi, confermando il trend generale già riscontrato con il metodo kriging.

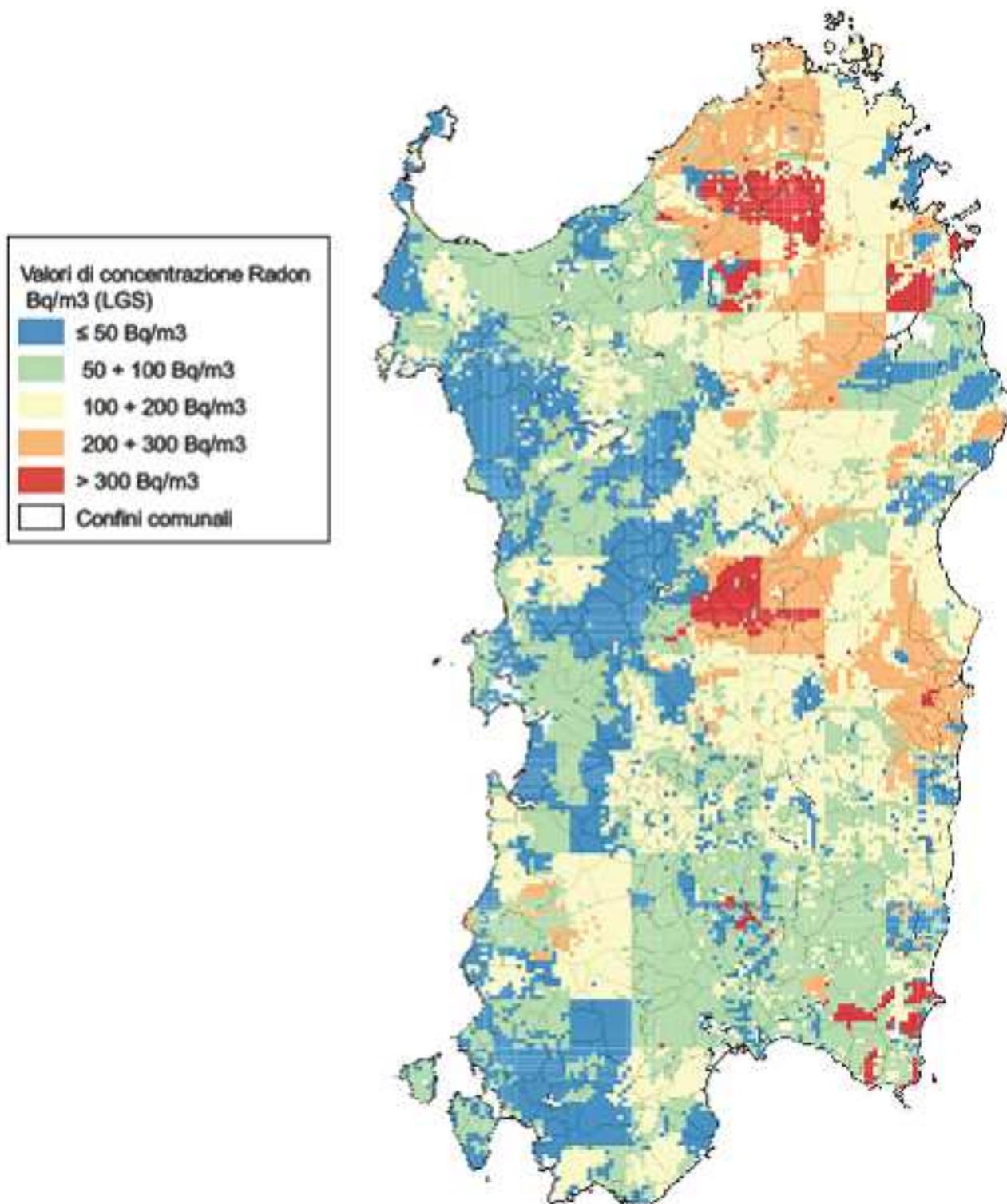


Fig. 7-5 Valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³), ottenuti attraverso l'elaborazione con il metodo LGS, del territorio regionale (griglia 1 km²)

Le tavole seguenti mostrano il confronto tra i risultati dell'interpolazione sul territorio regionale ottenuti utilizzando i due metodi citati (kriging e LGS)

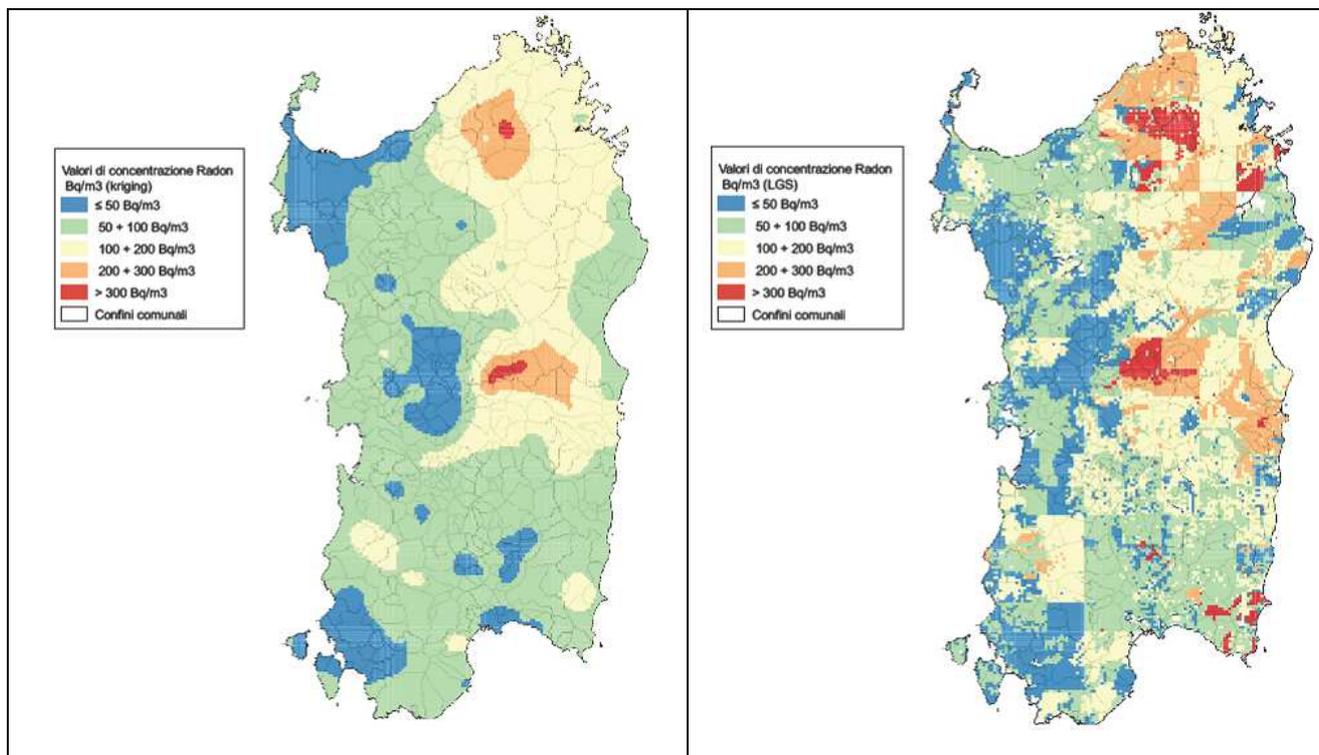


Fig. 7-6 Valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³), nel territorio regionale (griglia 1 km²): confronto risultati elaborazioni con metodo kriging e metodo LGS

Come già detto in precedenza, il confronto fra le due tavole mette in evidenza la tendenza del metodo LGS a far risaltare i valori più elevati nelle aree della Gallura e del Centro Sardegna in modo più marcato rispetto al kriging, mentre sostanzialmente i due metodi individuano il settore occidentale dell'Isola ed il Campidano, salvo alcune localizzate aree dell'Arburese, quali aree con i valori di concentrazione più bassi.

7.3 Elaborazioni per la valutazione delle aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon

La normativa nazionale vigente, D.Lgs 230/95 e s.m.i., introduce (Art. 10 sexies) le "aree ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon", intese come "le zone o luoghi di lavoro con caratteristiche determinate ad elevata probabilità di alte concentrazioni di attività di radon, di cui all'articolo 10 ter, comma 2", pur lasciando attualmente indeterminati i criteri per la loro identificazione, demandati alle risultanze dei lavori di una commissione non ancora insediata.

Attualmente il metodo utilizzato in tutte le indagini svolte in Italia dopo il 2000 (anno nel quale sono state introdotte le precedenti definizioni nella normativa nazionale) per la definizione delle aree a rischio è sostanzialmente il metodo "*Grid Square Method*", proposto da Miles et. Al nel 1994, ed utilizzato oltre che in Italia anche in buona parte degli studi analoghi nel resto del mondo. Secondo tale tecnica, si utilizza come indicatore la frazione (espressa in %) di abitazioni che in una determinata area supera un determinato livello di riferimento di concentrazione di radon, ovvero, espressa in altri termini, la probabilità che le abitazioni che insistono in un determinato territorio possano superare il livello di riferimento dato.

Tale concetto è stato ribadito anche dalla Direttiva CE 2013/59/Euratom, Art. 103, comma 3 "*Gli Stati membri individuano le zone in cui si prevede che la concentrazione di radon (come media annua) superi il pertinente livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici*".

A tale scopo devono essere definiti il valore del livello di riferimento, i valori delle classi di distribuzione del parametro ed il valore delle "soglie di probabilità", al di sopra delle quali tali porzioni di territorio sono considerate "a rischio".

Secondo tale metodo, assumendo che la distribuzione delle concentrazioni di radon nelle abitazioni sia approssimativamente log-normale (UNSCEAR, 1982), in ogni cella si considera il logaritmo del livello di radon della generica abitazione come una variabile casuale normale, con media e varianza rispettivamente pari alla media e alla varianza dei valori di concentrazione di radon all'interno della cella, trasformati secondo la funzione logaritmo.

Come già illustrato in precedenza (Cap. 6, par. 2 "Elaborazioni dei risultati analitici") la distribuzione dei valori di concentrazione del campione complessivo è una distribuzione lognormale, con valore della media geometrica (GM) pari a 65 Bq/m³ e una deviazione standard geometrica (DSG) pari a 1,055.

Tali parametri sono stati utilizzati come caratteristici della distribuzione dei dati a livello degli elementi territoriali, per i quali il criterio è stato applicato, ovvero i limiti amministrativi comunali, le celle della griglia spaziale, le classi litologiche, assumendo che i dati al loro interno abbiano la stessa distribuzione log-normale e la stessa DSG.

Sulla base di tale presupposto, il calcolo della percentuale di abitazioni che superano un determinato livello di riferimento si deve costruire in ogni elemento territoriale scelto, mediante la cosiddetta funzione deviata normale standardizzata Z, definita come:

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

dove LR è il livello di riferimento scelto, MG la media geometrica e DSG la deviazione standard geometrica.

Tale variabile misura lo "scarto" della media geometrica del valore di concentrazione di radon di ciascuna cella rispetto al valore di riferimento, espresso in rapporto alla deviazione standard geometrica della relativa distribuzione (ad es. $Z=1$ significa che tale scarto fornisce una probabilità cumulativa $p(z)$ di verificarsi di tutti gli eventi per valori inferiori a $Z=1$ pari a circa 86% e quindi la probabilità di ritrovare valori superiori al valore esaminato è pari a $1-p(z)=14\%$).

Dalle tabelle dei valori di probabilità della distribuzione di frequenza normale, per ogni valore di Z si determina, con il procedimento descritto in precedenza, la probabilità che una misura di radon nella relativa cella possa superare il valore del livello di riferimento, ovvero la percentuale attesa di abitazioni eccedenti il livello di riferimento stesso.

Nelle figure seguenti sono mostrate le mappe della percentuale attesa di abitazioni eccedenti i livelli di riferimento scelti pari a 300 e 500 Bq/m³.

La scelta di tali valori si basa, come già evidenziato precedentemente, su normative e indicazioni nazionali ed internazionali.

Il valore di 300 Bq/m³ è il livello di riferimento, quale media annua della concentrazione di radon in ambienti chiusi da non superare, indicato dalla Direttiva 59/2013/Euratom.

Il valore di 500 Bq/m³ è indicato dal D.Lgs 230/95 e s.m.i. quale livello d'azione per gli ambienti di lavoro.

Le classi utilizzate per la scala dei valori della percentuale di edifici che superano i livelli di riferimento sono;

- >00 - ≤ 05%,
- >05 - ≤ 10%,
- >10 - ≤ 20%,
- >20 - ≤ 30%,
- >30%.

Non sono state considerate altre classi sopra il 30% in quanto, soprattutto per le classi probabilità di superamento dei valori di riferimento di 300 e 500 Bq/m³, non fornivano più informazioni significative.

8 Risultati su base regionale per i contesti di riferimento

8.1 Elaborazioni su base kriging per "Comune"

L'applicazione del metodo del kriging su base comunale ha consentito di attribuire un valore di concentrazione media geometrica di radon indoor ad ognuno dei 377 Comuni della Sardegna. Nella seguente figura ne viene mostrata la distribuzione territoriale.

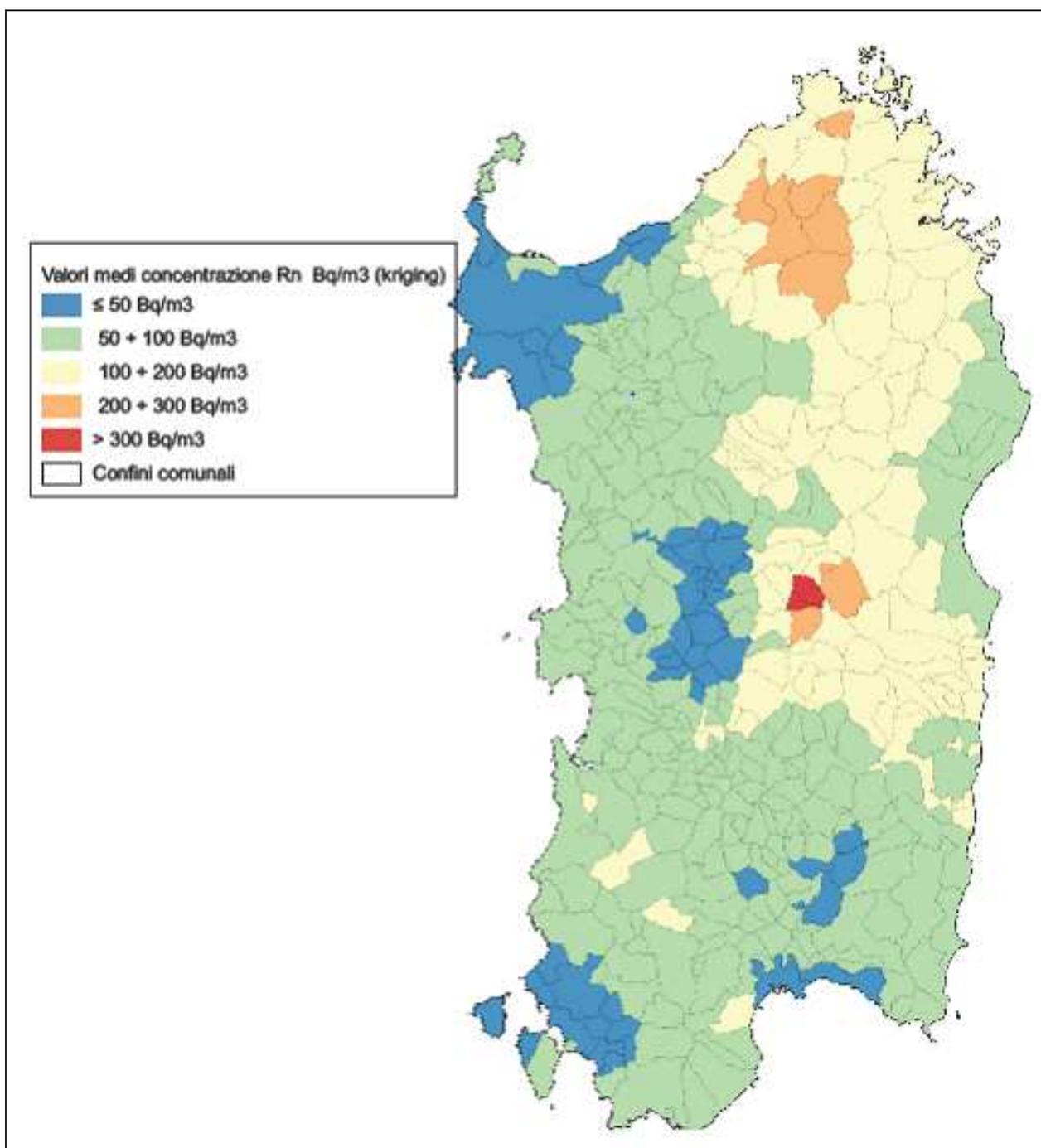


Fig. 8-1 Valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³), per classe valori, nei Comuni della Sardegna - metodo kriging

Gli stessi risultati mostrati in figura sono riportati nella seguente tabella:

Classe valori di concentrazione (Bq/m ³)	Numero Comuni	Percentuale Comuni
00 - ≤ 50	53	14%
>50 - ≤ 100	228	60%
>100 - ≤ 200	86	23%
>200 - ≤ 300	8	2%
>300	2	1%
Totale	377	100%

Tab. 8-1 Frequenza dei Comuni della Sardegna, per classe valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) – metodo kriging

I Comuni di Ovodda e Tiana (Centro Sardegna) presentano valori della stima della concentrazione media di radon indoor superiori a 300 Bq/m³.

I Comuni di Aggius, Berchidda, Calangianus, Luras, Tempio Pausania (Gallura), Fonni, Lodine, e Tonara (sempre Centro Sardegna) invece presentano valori della stima della concentrazione media di radon indoor compresi tra 200 e 300 Bq/m³.

Sulla base del metodo del kriging nella seguente tabella e nei successivi grafici è riportata la stima della probabilità di superamento dei valori di riferimento (300 Bq/m³, 500 Bq/m³) per tutti i Comuni della Sardegna.

Dalla seguente tabella emerge che solo in 2 Comuni (Ovodda e Tiana), la probabilità di superare la concentrazione di 500 Bq/m³ è maggiore del 30%.

Stima della probabilità di superamento dei valori di riferimento				
Quadro di riferimento regionale della frequenza Comuni (Metodo Kriging)				
Classe valori	300 Bq/m ³		500 Bq/m ³	
	N°	%	N°	%
P ≤ 5%	73	19%	253	67%
5 > P ≤ 10%	145	38%	76	20%
10 > P ≤ 20%	105	28%	38	10%
20 > P ≤ 30%	36	10%	8	2%
P>30%	18	5%	2	1%
Totale	377		377	

Tab. 8-2 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 300 e 500 Bq/m³, per classe valori, dei Comuni della Sardegna - metodo kriging

Nelle tavole seguenti sono riportate le elaborazioni relative alla stima della probabilità di superare i livelli di riferimento di 300 e 500 Bq/m³ con il metodo kriging.

Le seguenti tavole, graficamente semplici e di facile lettura, consentono di poter seguire l'evolversi delle variazioni delle soglie di probabilità di superamento dei valori di riferimento precedentemente definite. La probabilità che più del 30% degli edifici superi il valore di 300 Bq/m³ interessa ampie porzioni della Gallura e del Centro Sardegna, mentre la probabilità che più del 30% degli edifici superi il valore di 500 Bq/m³, individua i Comuni di Ovodda e Tiana nel Centro Sardegna, già precedentemente visti.

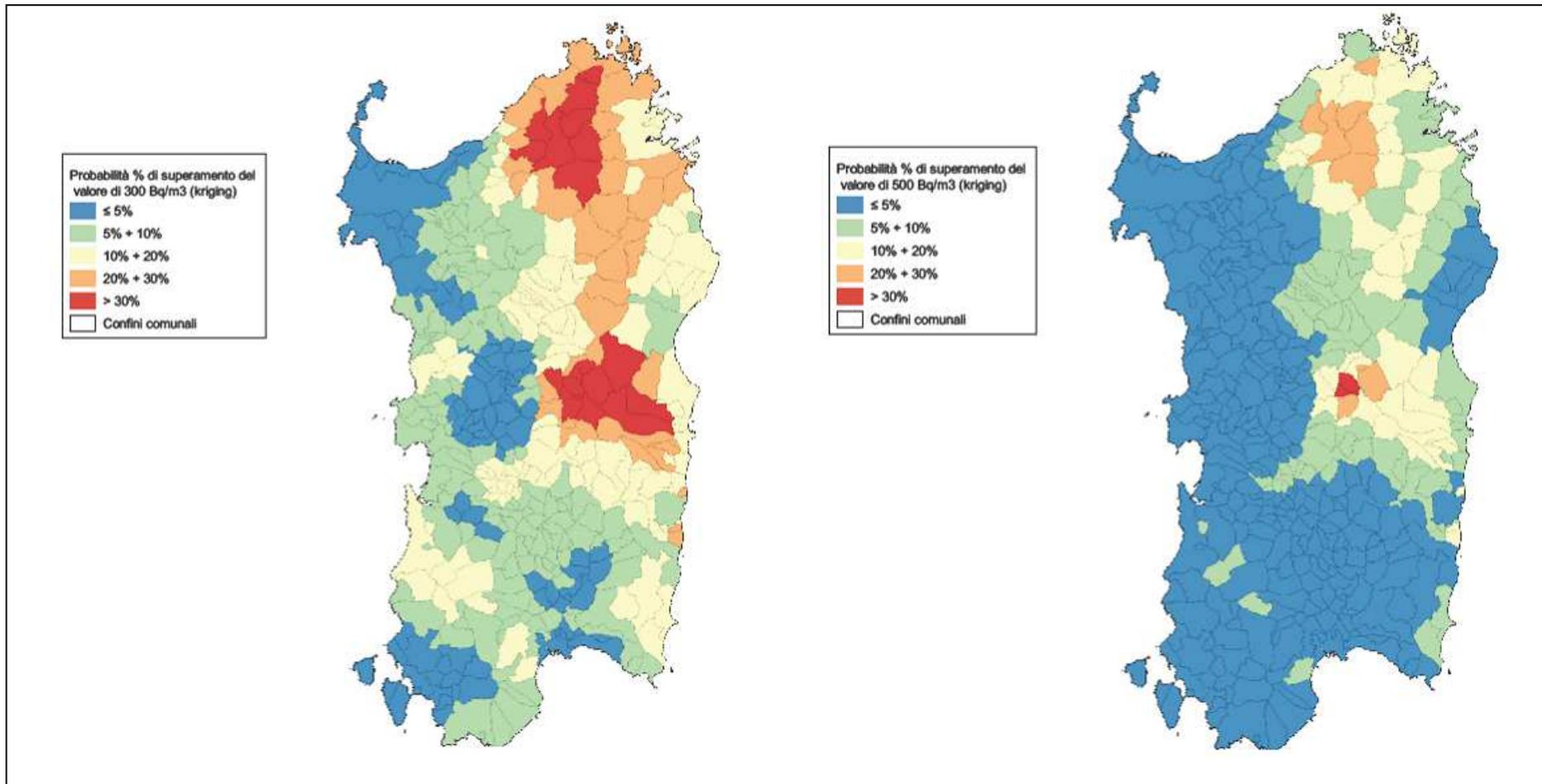


Fig. 8-2 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 300 e 500 Bq/m³, per classe valori, dei Comuni della Sardegna - metodo kriging

Le tavole precedenti mostrano la percentuale degli edifici, per ciascun Comune, che superano i valori di 300 e 500 Bq/m³.

8.2 Modalità di elaborazione geostatistica (metodo LGS) per Comune

Il metodo di interpolazione LGS è stato utilizzato per determinare il valore stimato di concentrazione di radon indoor per tutti i Comuni della Sardegna, come mostrato nella tavola seguente.

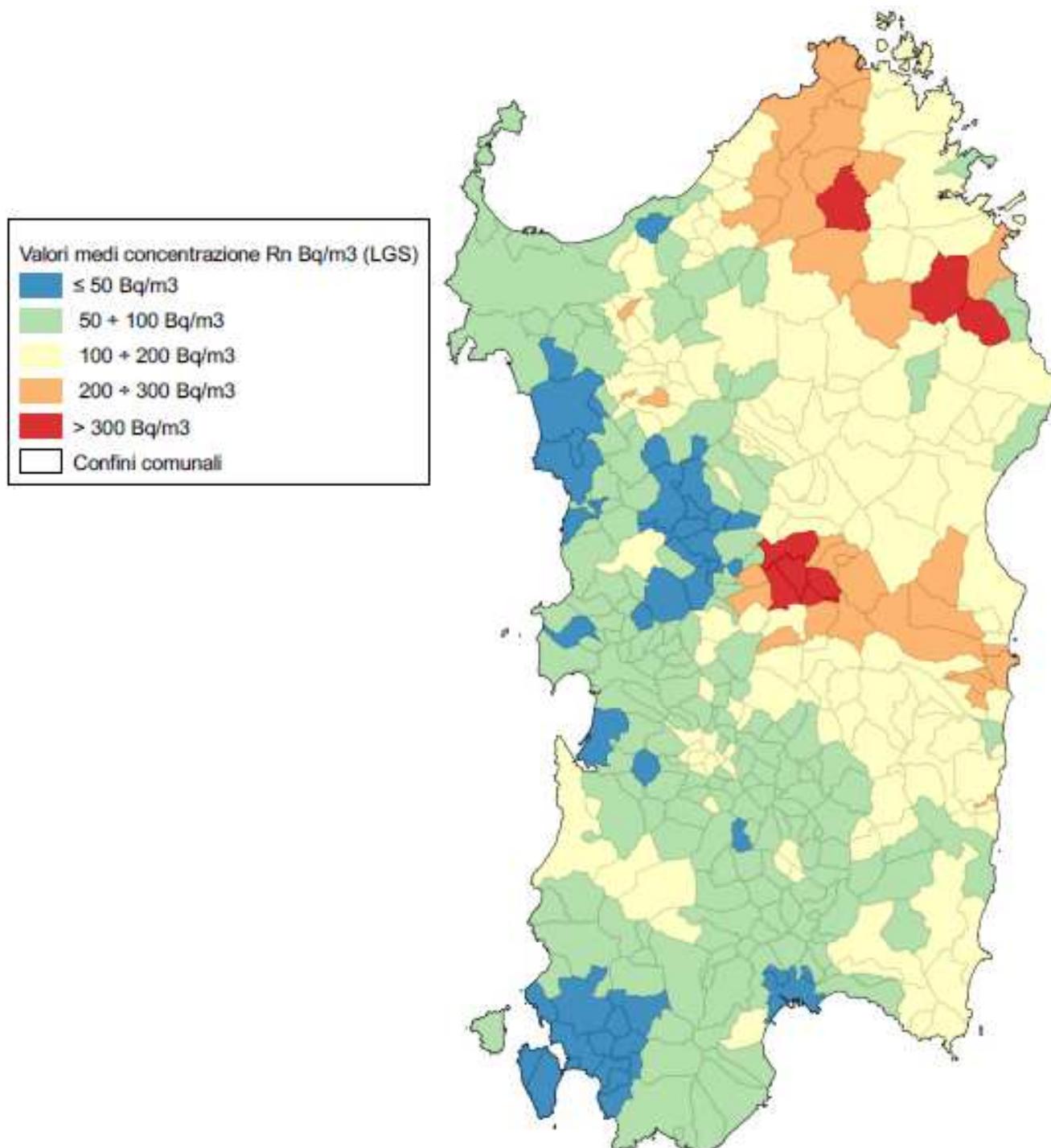


Fig. 8-3 Valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³), per classe valori, nei Comuni della Sardegna - metodo LGS

Gli stessi risultati mostrati in figura sono riportati nella seguente tabella:

Classe valori di concentrazione Bq/m ³	Numero Comuni	Percentuale Comuni
00 - ≤ 50	44	12%
>50 - ≤ 100	170	45%
>100 - ≤ 200	125	33%
>200 - ≤ 300	30	8%
>300	8	2%
Totale	377	100%

Tab. 8-3 Frequenza dei Comuni della Sardegna, per classe valori di concentrazione di radon indoor (Bq/m³) – metodo LGS

I Comuni di Austis, Calangianus, Olzai, Ovodda, Padru, Teti, Tiana e Torpè presentano valori di concentrazione media di radon indoor (stimata con il metodo LGS) superiori a 300 Bq/m³.

Nell'allegato n. 8 sono riportati i valori di concentrazione media del radon indoor stimati col metodo kriging e col metodo LGS, per tutti i Comuni della Sardegna.

Nella seguente tabella e nei successivi grafici, è riportata la stima della probabilità di superamento dei valori di riferimento (300 Bq/m³ e 500 Bq/m³) per tutti i Comuni della Sardegna.

I risultati sono riepilogati nella tabella seguente

Stima della probabilità di superamento dei valori di riferimento				
Quadro di riferimento regionale della frequenza Comuni (Metodo LGS)				
Classe valori	P300		P500	
	N°	%	N°	%
P ≤ 5%	53	14%	163	43%
5 < P ≤ 10%	88	23%	115	31%
10 < P ≤ 20%	137	36%	67	18%
20 < P ≤ 30%	51	14%	25	7%
P > 30%	48	13%	7	2%
Totale	377		377	

Tab. 8-4 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 300-500 Bq/m³, per classe valori, dei Comuni della Sardegna - metodo LGS

Nelle tavole seguenti sono riportate le elaborazioni relative alla stima della probabilità di superare i livelli di riferimento di 300 e 500 Bq/m³ con il metodo LGS.

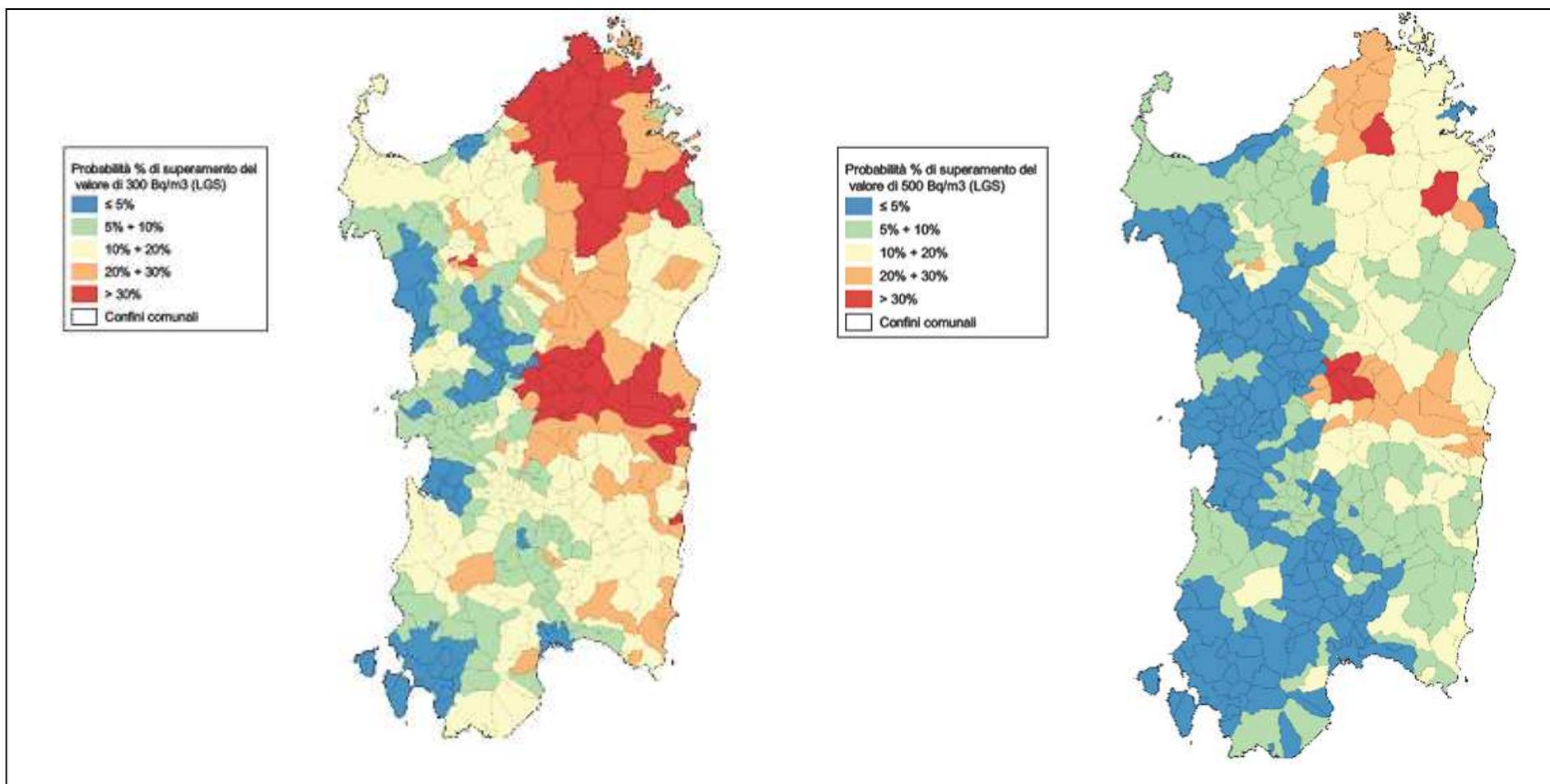


Fig. 8-4 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 300-500 Bq/m³, per classe valori, dei Comuni della Sardegna - LGS

Le tavole precedenti mostrano la percentuale degli edifici, per ciascun Comune, che superano i valori di 300 e 500 Bq/m³.

8.3 Elaborazioni per "Unità litologiche"

Nel seguito sono riportati i calcoli della probabilità di superamento dei valori di riferimento di 300 e 500 Bq/m³ relative alle classi litologiche più di dettaglio (livello 2). Il risultato del calcolo è mostrato nella tabella e nei relativi grafici che seguono.

Stima della probabilità di superamento dei valori di riferimento per le le Unità litologiche (Liv 2)				
Unità litologica	N° Edifici	GM	P300	P500
A1.1	36	120	19%	9%
A1.2	224	159	27%	14%
A1.3	100	134	22%	11%
A1.4	49	92	13%	5%
A2.1	64	31	2%	0%
A2.3	97	46	4%	1%
A2.4	60	42	3%	1%
A2.5	26	27	1%	0%
A3.1	3	153	26%	13%
A3.2	2	266	45%	27%
B1.1	3	149	25%	13%
B1.2	3	49	4%	1%
B1.3	4	70	8%	3%
B2.1	151	81	11%	4%
B2.2	22	37	2%	1%
C1.1	40	110	17%	8%
C1.2	359	53	5%	2%
C1.3	148	52	5%	2%
C1.4	2	41	3%	1%
C1.5	142	47	4%	1%
C1.6	62	60	6%	2%
C1.7	48	32	2%	0%
C1.8	8	137	23%	11%
C2.1	9	71	9%	3%
C2.2	164	51	5%	1%
C3.1	11	35	2%	1%
Totale	1837			

Tab. 8-5 Stima della probabilità (%) frazione edifici che superano il livello valori di concentrazione di radon indoor di 300-500 Bq/m³, nelle Unità Litologiche della Sardegna (Liv.2)

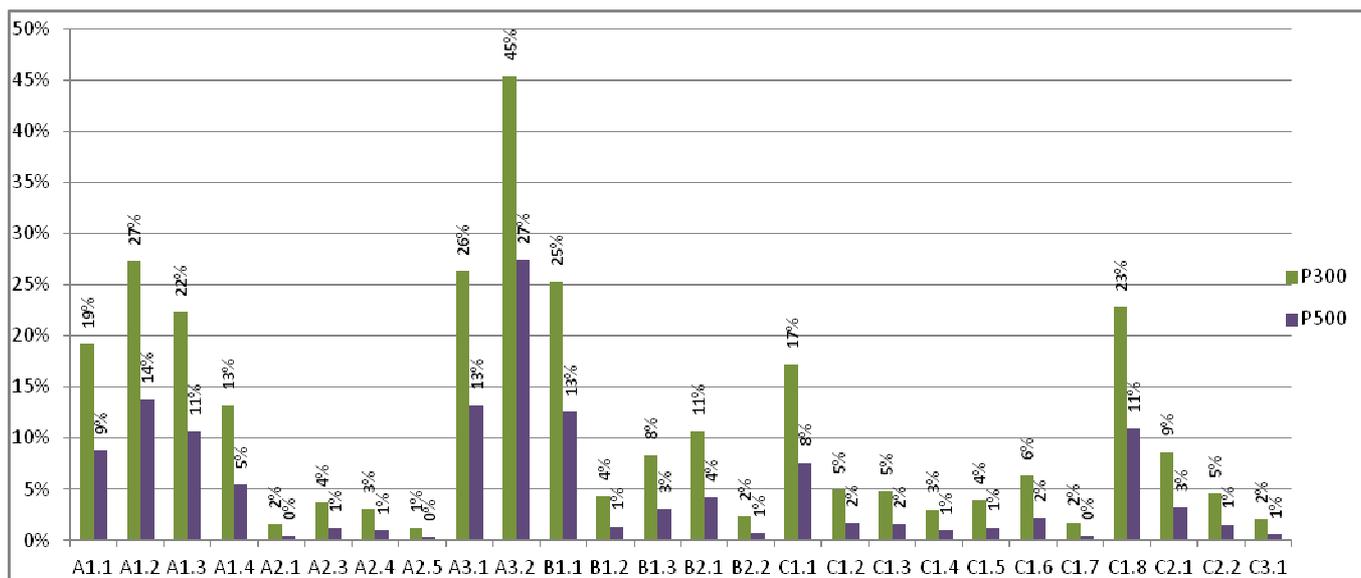


Fig. 8-5 Istogramma della stima della probabilità (%) frazione edifici che superano il livello valori di concentrazione di radon indoor di 300-500 Bq/m³, nelle Unità Litologiche della Sardegna (Liv.2), con riportate le rispettive percentuali (dettaglio della figura precedente).

Nelle tavole seguenti, sono evidenziate le probabilità di superamento dei valori di riferimento di 300 e 500 Bq/m³ per le stesse classi litologiche (livello 2).

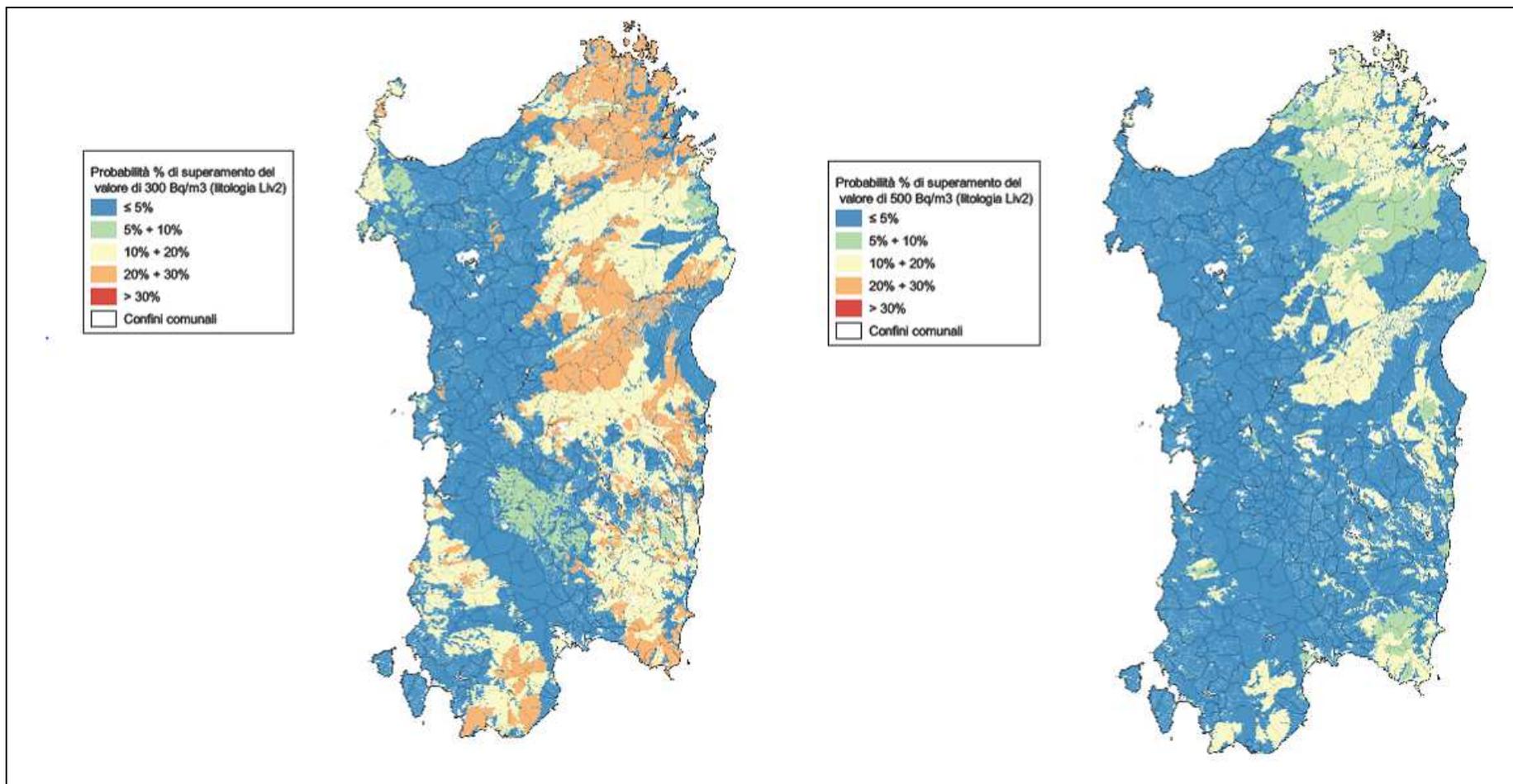


Fig. 8-6 Stima della probabilità (%) frazione edifici che superano livello valori di concentrazione di radon indoor di 300 e 500 Bq/m³, nelle Unità Litologiche della Sardegna (Liv.2)

8.4 Confronto fra i metodi di stima di superamento dei valori di riferimento

Nel seguito sono confrontate tra loro le tavole con le stime di superamento dei valori di riferimento finora elaborate attraverso le diverse metodologie.

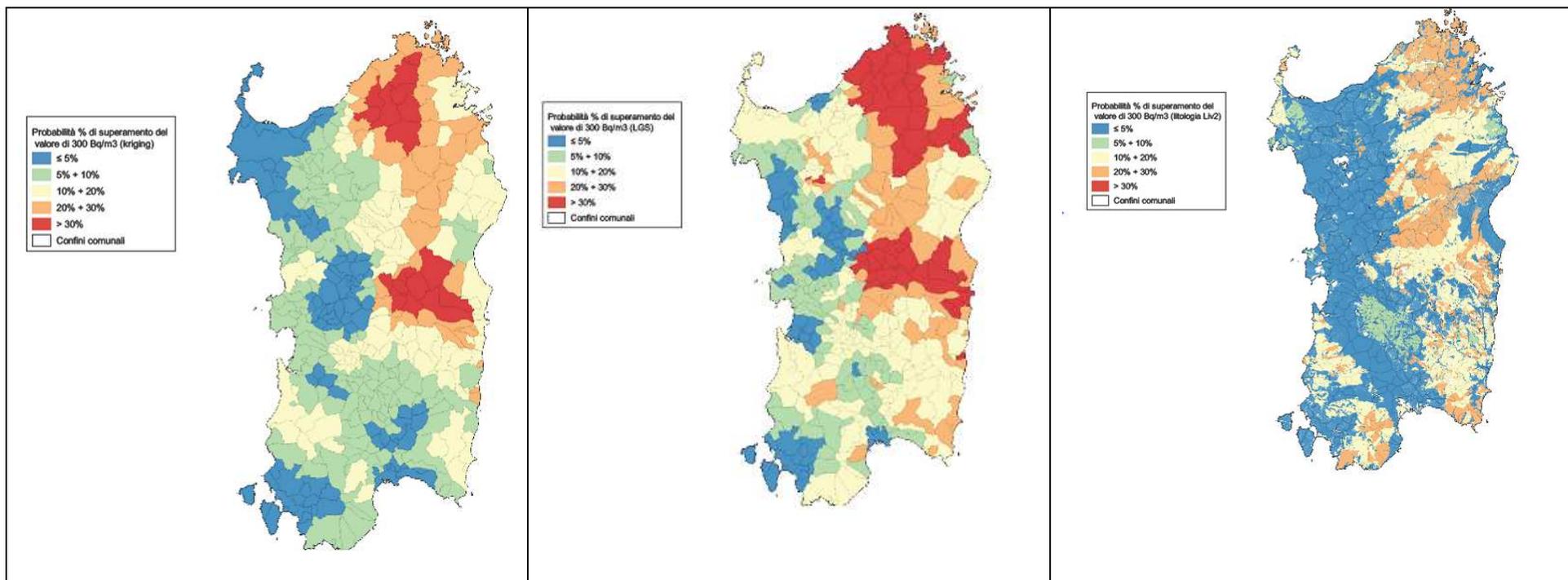


Fig. 8-7 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 300 Bq/m³: confronto dei risultati ottenuti con metodo kriging - metodo LGS - metodo Unità Litologiche della Sardegna (Liv.2)

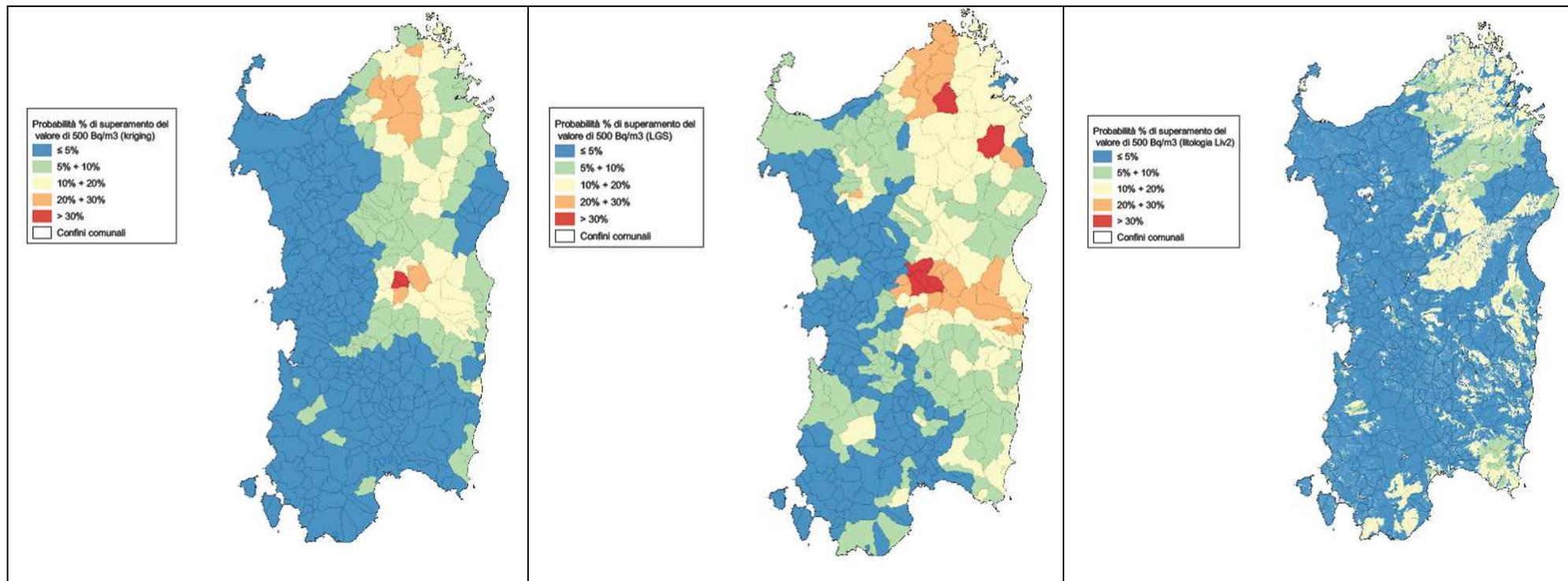


Fig. 8-8 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 500 Bq/m³: confronto dei risultati ottenuti con metodo kriging - metodo LGS - metodo Unità Litologiche della Sardegna (Liv.2)

Dall'esame comparato delle tavole precedenti risulta che gli elaborati prodotti mediante interpolazione kriging o LGS sono in linea di massima confrontabili, per quanto il modello LGS produca stime che tendono a mettere in risalto valori maggiori del kriging. L'utilizzo dei valori medi di concentrazione di radon indoor derivanti dalle misure relative alle diverse litologie del substrato produce invece stime che, per le probabilità di superare i valori di riferimento di 300 e 500 Bq/m³, appaiono molto inferiori sia ai risultati puntuali delle misure stesse che alle altre interpolazioni.

Questo potrebbe suggerire che il criterio di individuazione delle aree "a rischio" radon che si basi esclusivamente sul substrato litologico sul quale sono costruiti gli edifici, non pare sufficiente per far emergere tali aree e che quindi il fattore geolitologico (fattore sorgente) non sia sufficiente a spiegare la variabilità delle concentrazioni di radon rilevate negli edifici del campione.

9 Indicatori di rischio e individuazione delle aree a rischio radon

Con l'obiettivo di identificare le aree a rischio radon nel territorio regionale, le elaborazioni dei dati analitici svolte finora forniscono indicazioni diverse tra loro, sia a causa delle differenze intrinseche ai metodi utilizzati per l'interpolazione dei dati e quindi delle relative stime a livello regionale, sia a causa di indicazioni apparentemente in reciproco contrasto.

Considerato che il criterio identificato dalla Comunità Europea con la Direttiva 59/2013/Euratom Art. 103 comma 3 enuncia che gli Stati membri individuano le zone in cui si prevede che la concentrazione di radon (come media annua) superi il pertinente livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici, **al fine di classificare le aree del territorio regionale in relazione alle concentrazioni di radon indoor si è individuato pertanto nel valore della probabilità di superamento del valore di riferimento di 300 Bq/m³ la grandezza significativa per classificare il territorio regionale.**

Per tenere in conto delle elaborazioni svolte con i due metodi di stima delle concentrazioni di radon indoor precedentemente illustrati è stata costruita, a partire dai valori della probabilità del superamento del livello di riferimento di 300 Bq/m³ determinata con il metodo kriging e con il metodo LGS, un'unica tabella che prevede, in via del tutto cautelativa, che il valore della probabilità di superamento del livello di riferimento per ciascun comune della Sardegna sia rappresentato dal valore maggiore fra quelli calcolati con i due metodi di stima.

A tal fine con l'obiettivo di identificare le c.d. aree a rischio come stabilito dal D.Lgs. 230/95 e ss.mm.ii., ed in attesa delle indicazioni derivanti dal recepimento della Direttiva 59/2013/Euratom e dal previsto Piano d'azione per il Radon sono state individuate quali aree a rischio tutti i territori comunali nei quali la probabilità di superare il livello di riferimento di 300 Bq/m³ interessa più del 30% degli edifici.

L'elenco dei comuni e il rispettivo valore di probabilità di superare il livello di riferimento è riportato nell'Allegato 9.

La distribuzione dei comuni in classi di probabilità di superare il valore di riferimento è riportata nella tabella seguente.

Probabilità di superare il valore di riferimento 300 Bq/m ³	Numero di comuni
≤5%	34
5% ÷ 10%	98
10% ÷ 20%	142
20% ÷ 30%	54
> 30%	49

Tab. 9-1 Stima della probabilità di superamento dei valori di concentrazione di radon indoor di 300 Bq/m³ per classe valori, nei Comuni della Sardegna

La figura 9.1 rappresenta la classificazione del territorio regionale in relazione alla probabilità di superare il livello di riferimento di 300 Bq/m³ negli ambienti confinati (indoor), siano essi edifici residenziali che edifici utilizzati per attività lavorative.

Nella tabella seguente 9.2 sono riportati i Comuni i cui territori sono individuati quali aree a rischio radon in quanto la probabilità di superare il livello di riferimento di 300 Bq/m³ negli edifici supera il 30%.

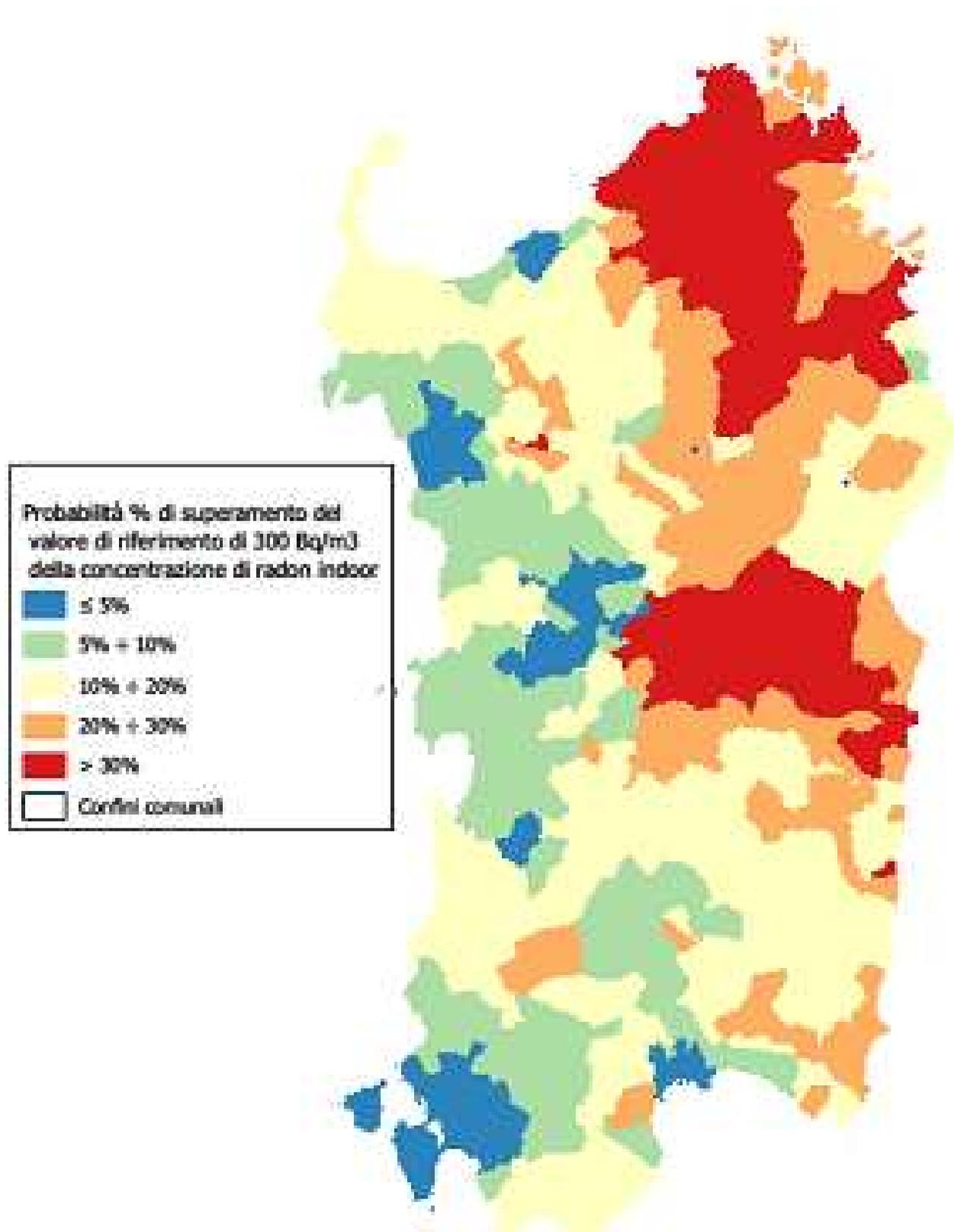


Fig. 9-1 : Probabilità di superamento del livello di riferimento di 300 Bq/m³ negli edifici. In rosso le aree a rischio radon (probabilità > del 30%).

Comune
Aggius
Aglientu
Alà dei Sardi
Arzachena
Atzara
Austis
Belvì
Berchidda
Bortigiadas
Buddusò
Calangianus
Cheremule
Desulo
Elini
Fonni
Gavoi
Girasole
Ilbono
Lanusei
Loceri
Lodine
Luogosanto
Luras
Mamoiada
Monti
Neoneli
Nughedu Santa Vittoria
Ollolai
Olzai
Orgosolo
Osidda
Ovodda
Padru
San Teodoro
Santa Teresa Gallura
Sant'Antonio di Gallura
Sorgono
Talana
Telti
Tempio Pausania
Teti
Tiana
Tonara
Torpè
Tortolì
Triei
Trinità d'Agultu e Vignola
Urzulei
Villagrande Strisaili

Tab. 9-2 Elenco Comuni i cui territori sono individuati quali aree a rischio radon in quanto la probabilità di superare il livello di riferimento di 300 Bq/m³ negli edifici supera il 30%.

10 Considerazioni conclusive

Il rapporto illustra le attività svolte dall'ARPAS al fine di pervenire alla classificazione del territorio regionale della Sardegna con individuazione delle aree a rischio radon.

Le indagini svolte hanno compreso la misurazione della concentrazione annuale del radon indoor in un campione regionale di 1.837 edifici.

Il Progetto ha visto la partecipazione di 142 Comuni (pari al 77% dei Comuni inizialmente coinvolti nel Progetto) nei quali è stata misurata la concentrazione annuale di radon indoor in 1.399 edifici, comprensivi di abitazioni e scuole.

Il campione regionale è stato integrato con ulteriori 58 Comuni e 190 edifici, nei quali è stata misurata la concentrazione di radon per circa un semestre, e di cui successivamente è stata determinata la concentrazione media annuale.

Inoltre, nel campione sono stati integrati i risultati delle indagini svolte negli anni '90 sia nelle abitazioni che nelle scuole, con misure di ulteriori 248 edifici per complessivi 108 Comuni.

I risultati del Progetto sono riferiti quindi a un campione complessivo di 208 Comuni, che costituiscono il 55% dei Comuni della Sardegna.

Il valore medio annuale complessivo della concentrazione di radon indoor sul campione regionale di 1.837 edifici risulta pari a 116 Bq/m^3 , ed è pertanto superiore al valore medio regionale precedentemente determinato nell'indagine nazionale del 1992, pari a 64 Bq/m^3 .

Dei 1.837 edifici monitorati 1.447 risultano Abitazioni e 390 scuole. I valori di concentrazione medi (AM) riscontrati per le due tipologie di edifici sono risultati essere rispettivamente di 110 Bq/m^3 e 135 Bq/m^3 , con valori di concentrazione media nelle scuole superiori circa del 23%.

Si deve peraltro evidenziare che il valore medio regionale del 1992 era stato determinato utilizzando una strategia di campionamento, finalizzata alla determinazione di un valore medio di esposizione della popolazione, e pertanto il campione era costituito da abitazioni private scelte completamente a caso sul campione generale della popolazione regionale.

La presente indagine ha l'obiettivo di ricercare le aree a rischio radon e pertanto, come definito nel Progetto, il relativo campione è stato costruito scegliendo unicamente abitazioni in cui il punto di misura fosse ubicato esclusivamente al piano terra. Tale campione è parzialmente rappresentativo della popolazione regionale e il relativo valore medio è, come atteso, più elevato.

La media geometrica del campione complessivo è 65 Bq/m^3 e, data la caratteristica distribuzione di tipo lognormale dei dati del campione, rappresenta il valore più probabile per la concentrazione radon indoor in Sardegna nel campione individuato.

Circa il 7% del campione (133 edifici) presenta valori superiori al livello di riferimento indicato dalla Direttiva 59/2013/Euratom, pari a 300 Bq/m^3 , ed in particolare circa il 4% del campione (78 edifici), presenta valori compresi tra

300 e 500 Bq/m³, mentre il 3% del campione (pari a 55 edifici) presenta valori superiori ai 500 Bq/m³, corrispondente al livello d'azione per i luoghi di lavoro previsto dal D.Lgs 230/95 e s.m.i.

Circa il 41% degli edifici (n. 746) presenta valori di concentrazione di radon inferiori ai 50 Bq/m³ mentre il 26% degli edifici (n. 485) è compreso nella classe 51-100 Bq/m³.

Complessivamente 1.231 edifici su 1.837 presentano valori inferiori ai 100 Bq/m³, pari al 67% del campione totale.

Nella classe 100-200 Bq/m³ ricadono 343 edifici (pari al 19%) mentre altri 130 edifici (pari al 7%) ricadono nella classe 200-300 Bq/m³.

In 14 scuole il valore della concentrazione annuale di radon indoor è superiore al valore di 500 Bq/m³, corrispondente al livello d'azione indicato nell' Allegato I-bis del DLgs/230/95 e s.m.i.

In 9 scuole sono stati misurati valori di concentrazione annuale di radon indoor superiori all'80% del valore del livello d'azione, fissato in 400 Bq/m³.

In tali casi, come previsto dall'Art. 10-quinques del DLgs 230/95, sarà necessario che "l'esercente", probabilmente identificato nel dirigente scolastico o nella rispettiva amministrazione comunale, dovrà porre in essere quanto previsto al predetto Art. 10-quinques commi 2 e 3 in termini di ripetizione delle misure e dell'adozione di azioni di rimedio da sottoporre a verifica dell'efficacia, sotto la supervisione di un esperto qualificato.

Sulla base dei dati attualmente analizzati, la maggioranza degli edifici (93% del totale) presenta valori di concentrazione di radon inferiori al valore limite di concentrazione definito dalla Direttiva 59/2013/Euratom e al livello d'azione per i luoghi di lavoro previsto dal D.Lgs 230/95 e s.m.i.

Dalle elaborazioni emerge il contributo della geolitologia, e sono inoltre presenti ulteriori fattori che influiscono sull'accumulo di radon all'interno degli edifici, che parrebbero correlati alle caratteristiche costruttive, soprattutto in relazione al materiale da costruzione, al periodo di costruzione degli stessi e all'eventuale presenza di piani seminterrati/interrati, per quanto dalle elaborazioni effettuate non sono state riscontrate associazioni che presentino fattori di correlazione rilevanti fra le concentrazioni radon indoor e le caratteristiche costruttive degli edifici finora indagati.

I dati delle misure sul campione sono stati estesi a tutto il territorio regionale, con tecniche di interpolazione di tipo geostatistico; esse hanno condotto a due stime leggermente differenti dei valori di concentrazione del radon indoor.

Per rappresentare i risultati del presente lavoro è stato scelto, in conformità a quanto prodotto nelle indagini regionali sulle aree a rischio radon condotte finora in Italia, di riferire le aree "a rischio" alle unità amministrative comunali.

In assenza di un metodo stabilito dalla normativa o da indicazioni condivise a livello nazionale o internazionale, l'individuazione delle aree a rischio radon è stata effettuata determinando per ciascun territorio comunale il valore della probabilità che nello stesso territorio la concentrazione di radon indoor possa superare il valore di riferimento di 300 Bq/m³, definito dalla Direttiva 59/2013/Euratom e sono state identificate quali aree a rischio radon tutti i territori comunali nei quali la probabilità di superare il valore di riferimento risulta superiore al 30%.

Sulla base di tale classificazione risultano inclusi nelle aree a rischio radon 49 Comuni, pari al 13% dei Comuni della Sardegna.

Si evidenzia che tutte le valutazioni finora condotte per le interpolazioni dei risultati delle misure condotte nel campione degli edifici regionali costituiscono delle stime della concentrazione del radon indoor nel territorio regionale e che, per

stimare i valori della concentrazione di radon indoor per gli edifici che ricadono nei Comuni dove non sono state eseguite misure, è stato necessario utilizzare dei metodi statistici.

In quanto stime attribuite ai territori comunali, dai risultati del presente rapporto non è possibile identificare gli edifici nei quali la reale concentrazione di radon sia effettivamente superiore al valore di riferimento scelto, così come non è possibile, se non effettuando le misure, stabilire i reali valori di concentrazione di radon in qualsiasi edificio.

11 ALLEGATI

- ALLEGATO 1 Organizzazione e sviluppo del Progetto Radon
- ALLEGATO 2 Il Laboratorio di Radioattività Ambientale ARPAS
- ALLEGATO 3 La Carta litologica della Sardegna
- ALLEGATO 4 Organizzazione e gestione delle informazioni
- ALLEGATO 5 Elenco dei Comuni interessati dalle misure di concentrazione
- ALLEGATO 6 Principali parametri statistici della concentrazione di radon [Bq/m³] nei Comuni campione
- ALLEGATO 7 Concentrazione media netta [Bq/m³] secondo le CTR 1:10000
- ALLEGATO 8 Concentrazione media radon indoor stimata nei Comuni della Sardegna
- ALLEGATO 9 Probabilità di superamento del valore di concentrazione di radon indoor di 300 Bq/m³ nei Comuni della Sardegna

Pagina vuota/Fine