

arpa FVG

PROGETTO
RADON
MISURE PER 1000
FAMIGLIE



Palmanova, 11 ottobre 2018

Mappatura del radon indoor in Abruzzo

Sergio Palermi, Giancarlo Buccella,
Damiano Rancitelli, Gabriele Sulli

*Arta Abruzzo – Distretto Prov.le di Pescara
Centro di Riferimento Regionale per la Radioattività Ambientale*

s.palermi@artaabruzzo.it



Mappatura del radon indoor in Abruzzo

Indice

- Caratteristiche del territorio abruzzese
- Campagne di misura del radon in Abruzzo
 - *Indagine Nazionale Radon 1991-92*
 - *Indagine Regionale in asili nido e scuole materne 1993-95*
 - *Indagine negli istituti scolastici del comune di Pescara 2000*
- Individuazione di *radon prone-areas* e stima del valore medio:
 - *1^ campagna regionale 2005-2008*
 - *2^ campagna regionale 2009-2014*
- Elaborazioni statistiche sull'intero dataset
 - *Bayesian spatial cluster detection*
 - *Quantile regression*
 - *Definizione del potenziale radon geogenico*
- Radon-prone areas vs priority areas

Caratteristiche del territorio Abruzzese

Abruzzo: 4 province (L'Aquila, Teramo, Pescara, Chieti)

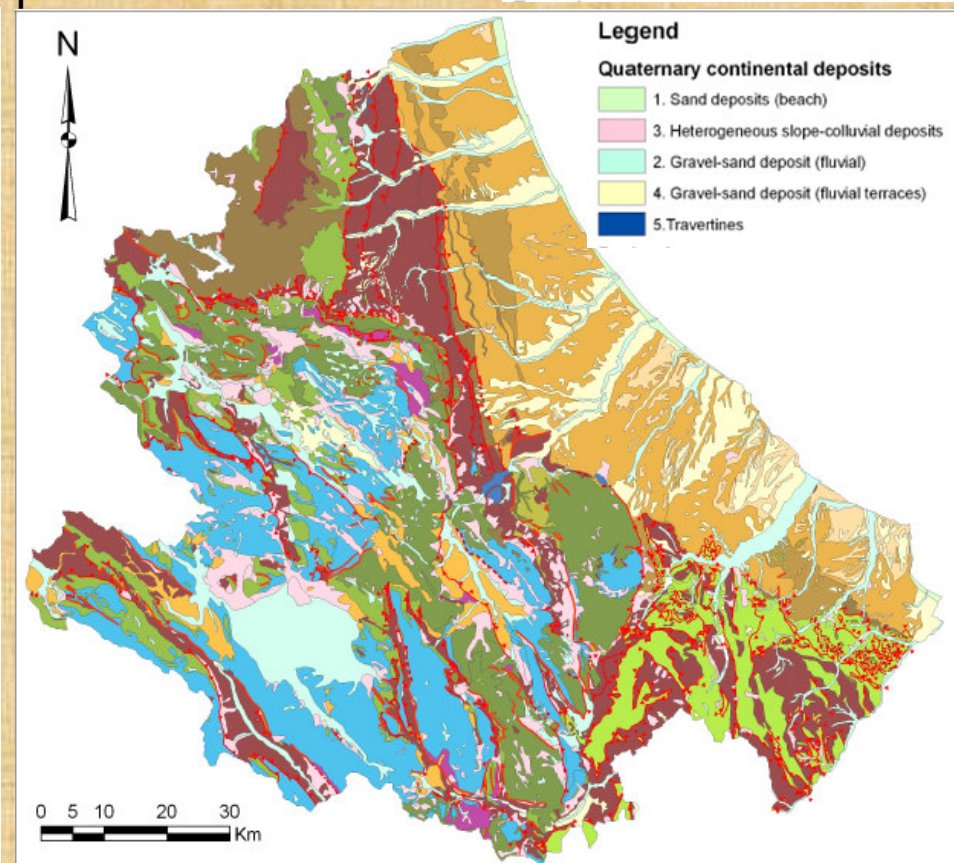
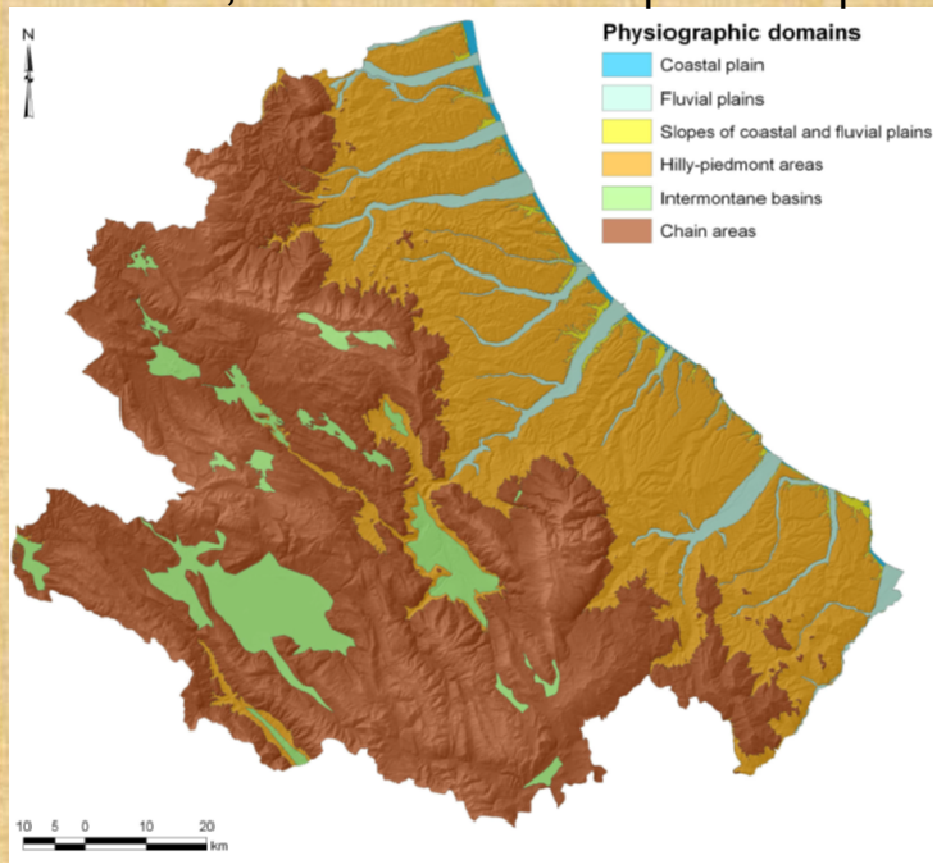
1.317.239 abitanti, 10.832 km²

Prevalenza di litotipi carbonatici nell'area appenninica (fratturazione a tratti elevata, con diffuso carsismo) e di argille-sabbie-conglomerati nell'area collinare-litoranea (permeabilità bassa)

Contenuto di radionuclidi naturali nel suolo generalmente modesto, tranne alcuni hot spot nella parte più occidentale

Bedrock

- 6. Sandstones and conglomerates
- 7. Clays and sands
- 8. Clays
- 9. Clays with conglomerates and sandstones
- 10. Sandstones and shales
- 11. Shales and sandstones, with conglomerate levels
- 12. Gypsum and conglomerates
- 13. Chaotic clays and marls
- 14. Limestones, marls (carbonate ramp succession)
- 15. Limestones, cherts, marls (slope-basin succession)
- 16. Limestones (carbonate platform succession)
- 17. Dolomites (carbonate platform succession)



Radon - campagne di misura in Abruzzo

Indagine Nazionale Radon (ISS, ENEA-DISP, PMP-ASL Pescara; 1991-92)

Concentrazioni medie annuali rilevate in un campione casuale di **103 abitazioni** in **7 comuni** abruzzesi (Pescara + 6 estratti casualmente)

Provincia	Comuni interessati	n. siti (abitazioni)	media geometrica (GM) Bq/m ³	dev.standard geometrica (GSD) Bq/m ³	media aritmetica (AM) Bq/m ³	dev.std. (σ) Bq/m ³
PE	Pescara	11	23,0	1,4	24,3	9,8
CH	Crecchio	11	63,6	2,0	83,8	89,3
TE	---	0
AQ	Barisciano	36	37,4	1,70	43,3	34,0
	Lecce nei Marsi	13	69,7	2,20	91,8	70,9
	Pratola Peligna	10	40,8	1,50	46,1	28,9
	Raiano	14	48,9	2,00	64,8	115,8
	S. Vincenzo Valle Roveto	8	63,9	2,50	100,1	78,5
ABRUZZO		103	45,2	1,9	60,8	67,6

Tabella 5: Indagine nazionale radon, 1991-92: comuni abruzzesi interessati e statistiche relative.

Radon - campagne di misura in Abruzzo

Indagine Regionale in asili nido e scuole materne (PMP-ASL Pescara; 1993-95). Concentrazioni medie annuali rilevate in quasi tutti gli asili nido/scuole materne della Regione.

Provincia	n. siti (asili)	media geometrica (GM) - Bq/m ³	dev.standard geometrica (GSD) - Bq/m ³	media aritmetica (AM) - Bq/m ³	dev.std. (σ) Bq/m ³
AQ	104	69,9	2,1	95,1	87,7
TE	124	45,8	2,2	62,2	58,1
PE	108	52,0	1,8	61,3	38,2
CH	163	41,5	2,1	55,0	51,0
ABRUZZO	499	49,8	2,1	66,5	61,8

Tabella 6: Campagna di misure negli asili, 1993-1995, quadro riassuntivo per provincia.

I casi in cui la concentrazione media risultò maggiore di 200 e 400 Bq/m³ costituirono rispettivamente il 3.8 e lo 0.6%.

Il 70% dei casi in cui i livelli superavano i 200 Bq/m³ erano in zona appenninica; inoltre, il 53% si trovavano in provincia dell'Aquila, il 26% in provincia di Teramo, il 16% in provincia di Chieti ed il restante 5% a Pescara.

I 400 Bq/m³ furono superati solo in 3 casi, due asili nel comune di Lecce nei Marsi (AQ) ed uno nel comune di Liscia (CH).

Radon - campagne di misura in Abruzzo

Campagna di misura nelle scuole di Pescara (PMP-ASL Pescara; 2000).
Concentrazioni medie annuali rilevate in molti istituti, di ogni ordine e grado.

Provincia	n. siti (scuole)	media geometrica (GM) - Bq/m ³	dev.standard geometrica (GSD) - Bq/m ³	media aritmetica (AM) - Bq/m ³	dev.std. (σ) Bq/m ³
PE	45	29,5	1,54	32,8	18,9

Tabella 7: Campagna di misure nelle scuole di Pescara, 2000, quadro riassuntivo.

Si noti che la concentrazione media nelle scuole di Pescara è superiore al valore medio riscontrato nelle abitazioni (32.8 contro 24.3 Bq/m³).

Individuazione radon prone-areas & buildings

D.Lgs. 230/1995, Art. 10-sexies comma 1: “Sulla base delle linee guida e dei criteri emanati dalla Commissione di cui all'articolo 10-septies, le regioni e le province autonome individuano 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”

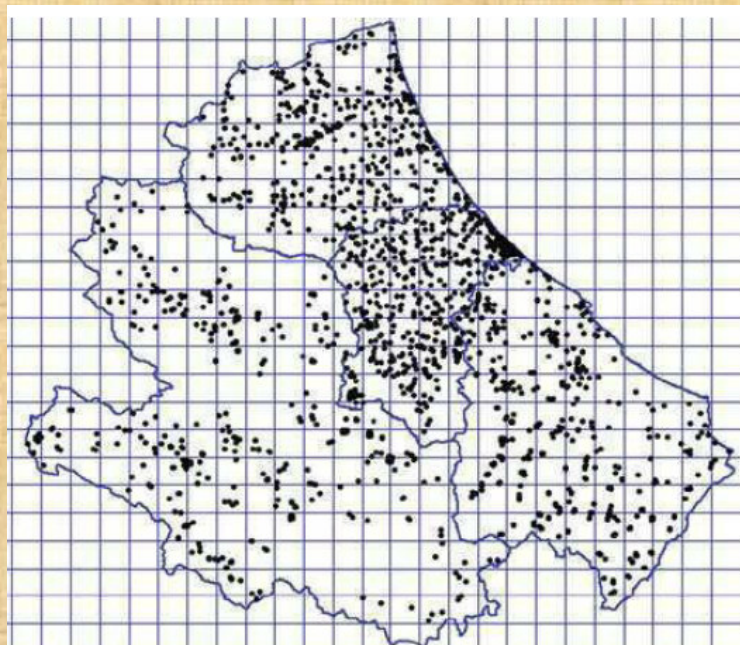
Tale individuazione (da completare entro il 31 agosto 2005) doveva basarsi sulla base di **criteri che avrebbe dovuto emanare una Commissione** (la “Sezione speciale della Commissione tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni di cui all'articolo 10-septies”) **di fatto mai nominata....**

In questo quadro di sostanziale incertezza metodologica, nel 2005 Arta, in convenzione con la Regione Abruzzo, avviò la **prima campagna di misure estesa sull'intero territorio regionale, mirata all'individuazione delle radon-prone areas**

Prima indagine regionale (Arta, 2005-2008)

Id.	Period	n. of build.	n. of munic.	sampling strategy	Building type	Measurement duration	Detectors type
ARPI	2005-2008	1227	246	Pseudorandom, in 2km square grid	Homes (77.2%) Schools (4.5%) Public (5.3%) Workplaces (13%)	1 year	CR-39

Legend: *n.build*: number of measured buildings; *n. munic.*: number of municipalities involved in survey (total number of municipalities: 305); *cons. 6-m. p.*: consecutive six-month periods.



Il piano di campionamento privilegiò la **diffusione uniforme delle abitazioni da misurare sul territorio** (almeno un punto di misura nelle maglie di una griglia regolare di passo 2 km).

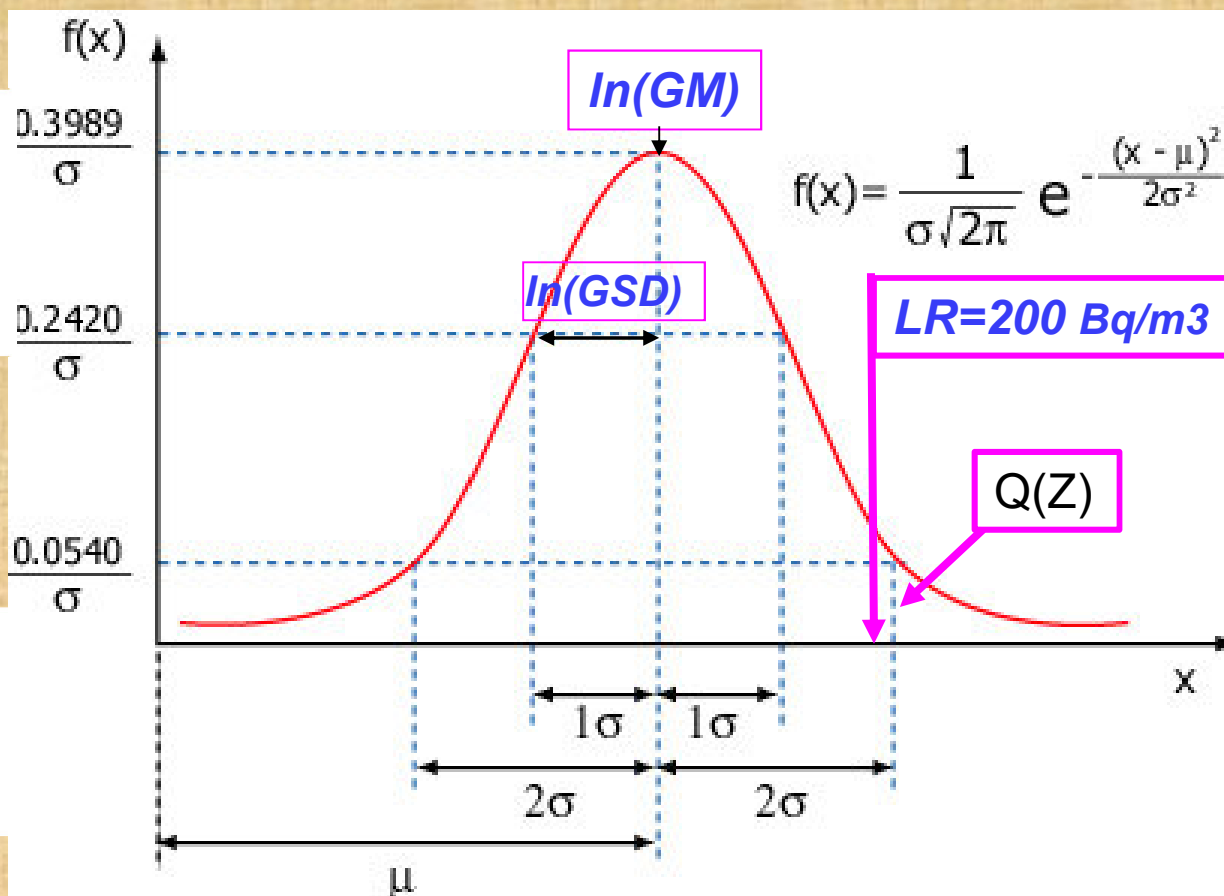
Laddove possibile, la misura di radon fu effettuata **al piano terra**.

Prima indagine regionale (Arta, 2005-2008)

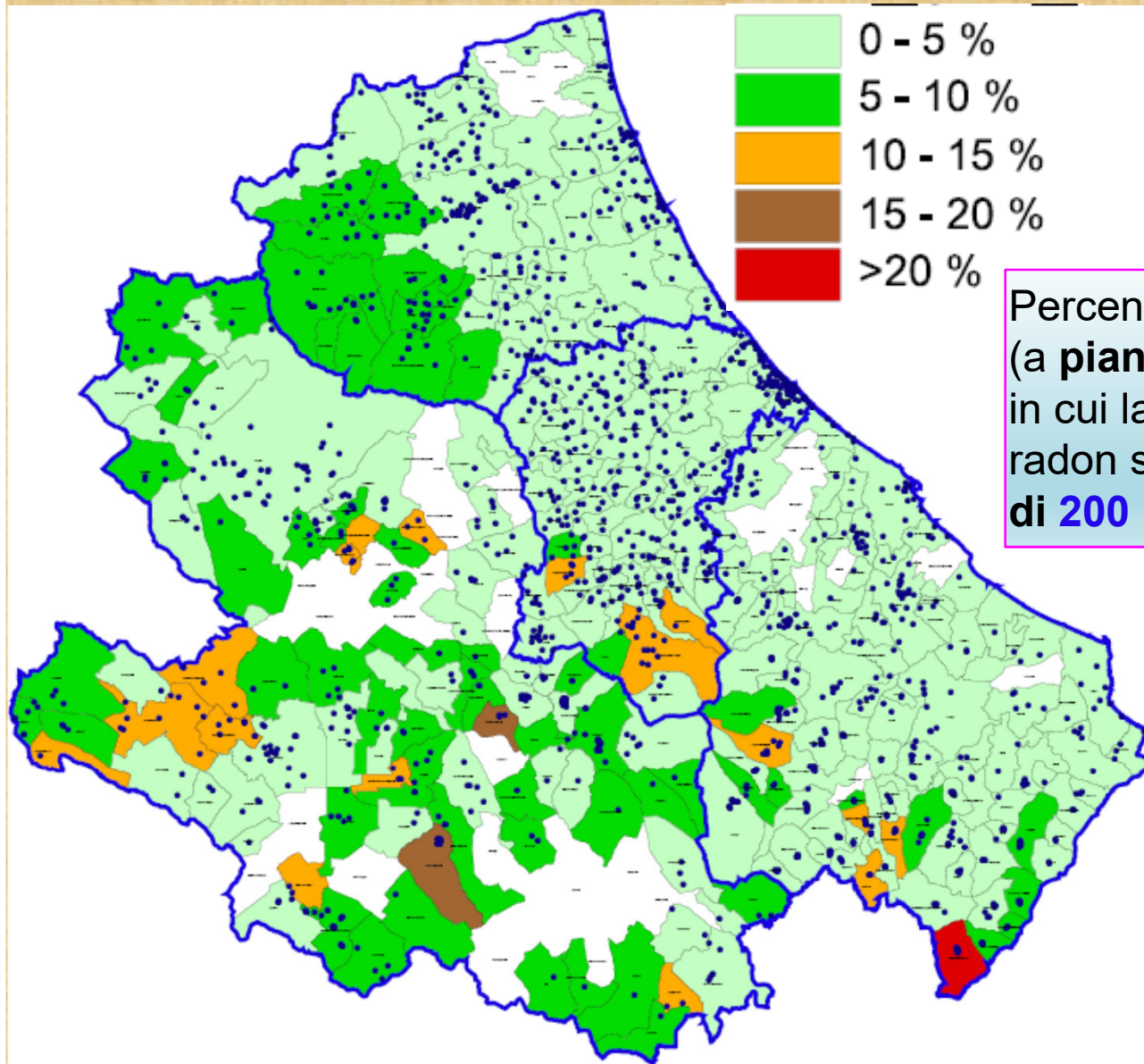
I dati raccolti furono utilizzati per stimare, in ogni unità geografica (territori comunali o celle 6x6 km), i parametri della distribuzione (**GM e GSD**, nell'ipotesi di lognormalità). Per rendere robuste tali stime anche in unità con pochi dati, venne applicata una correzione bayesiana (*empirical bayes point estimate*). Fu quindi stimata la percentuale attesa **Q(Z)** di abitazioni in cui la concentrazione di attività di Radon supera un **livello di riferimento LR** (posto a **200 Bq/m³**)

$$\ln(GM_i^{\text{point estimate}}) = \frac{\frac{\mu}{\sigma^2} + \frac{n_i}{k^2} \ln(GM_i^{\text{obs}})}{\frac{1}{\sigma^2} + \frac{n_i}{k^2}}$$

$$Z = \frac{[\ln(LR) - \ln(GM)]}{\ln(GSD)}$$



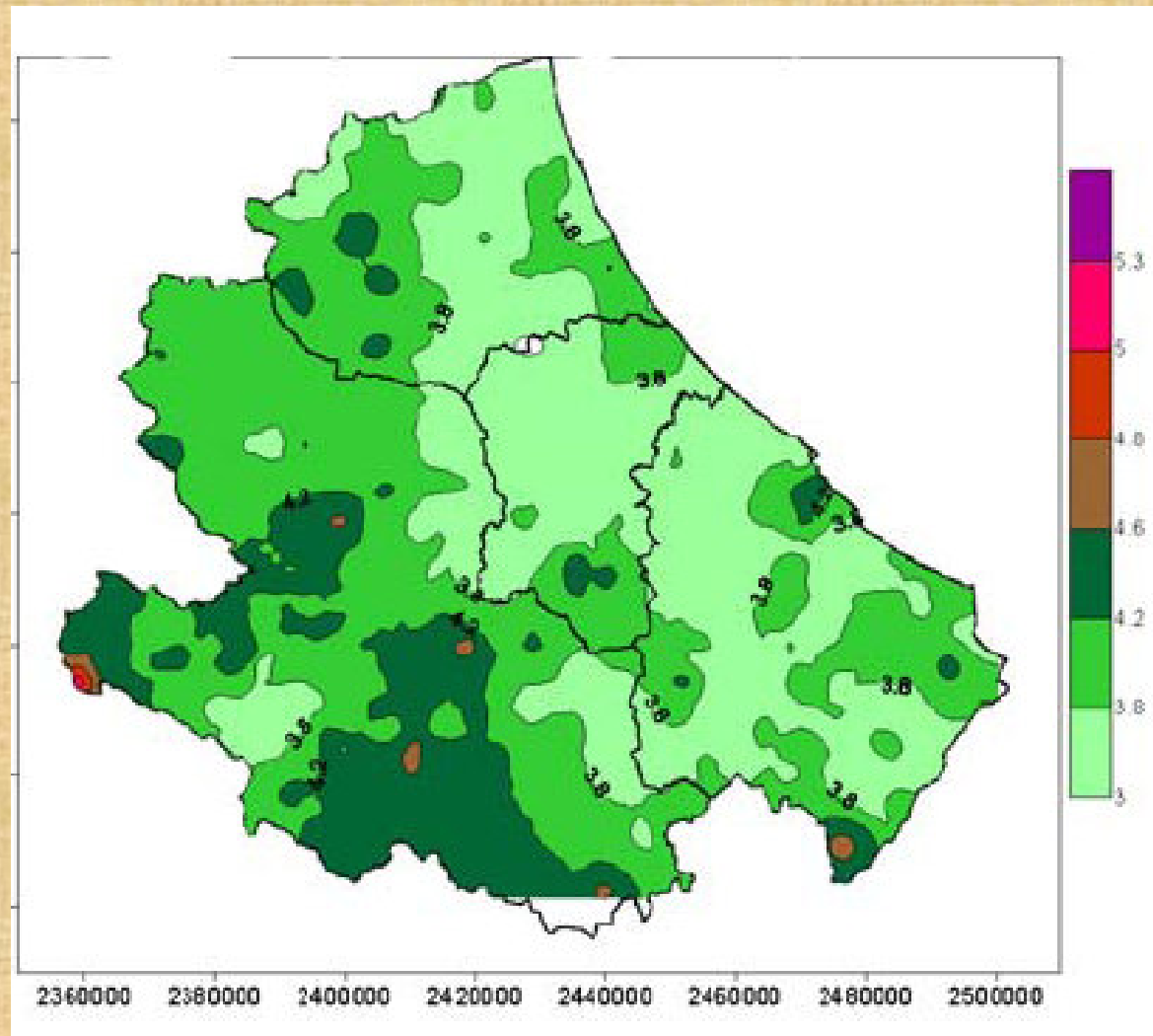
Prima indagine regionale (Arta, 2005-2008)



Percentuale attesa di abitazioni $Q(Z)$ (a piano terra), su base comunale, in cui la concentrazione di attività di radon supera il livello di riferimento di 200 Bq/m^3

Prima indagine regionale (Arta, 2005-2008)

«mappa» del radon indoor (piani terra) realizzata con tecniche geostatistiche



2^ Campagna 2009-2014 - Obiettivi

Lo schema di campionamento della 1^ campagna non garantiva rappresentatività dei risultati in riferimento alla reale esposizione della popolazione

Per ovviare a questi problemi, la **seconda indagine** si basò su un piano di campionamento mirato a garantire il carattere casuale della scelta del campione di abitazioni da misurare.

Obiettivi: caratterizzare la *distribuzione territoriale* del radon indoor in Abruzzo, allo scopo di:

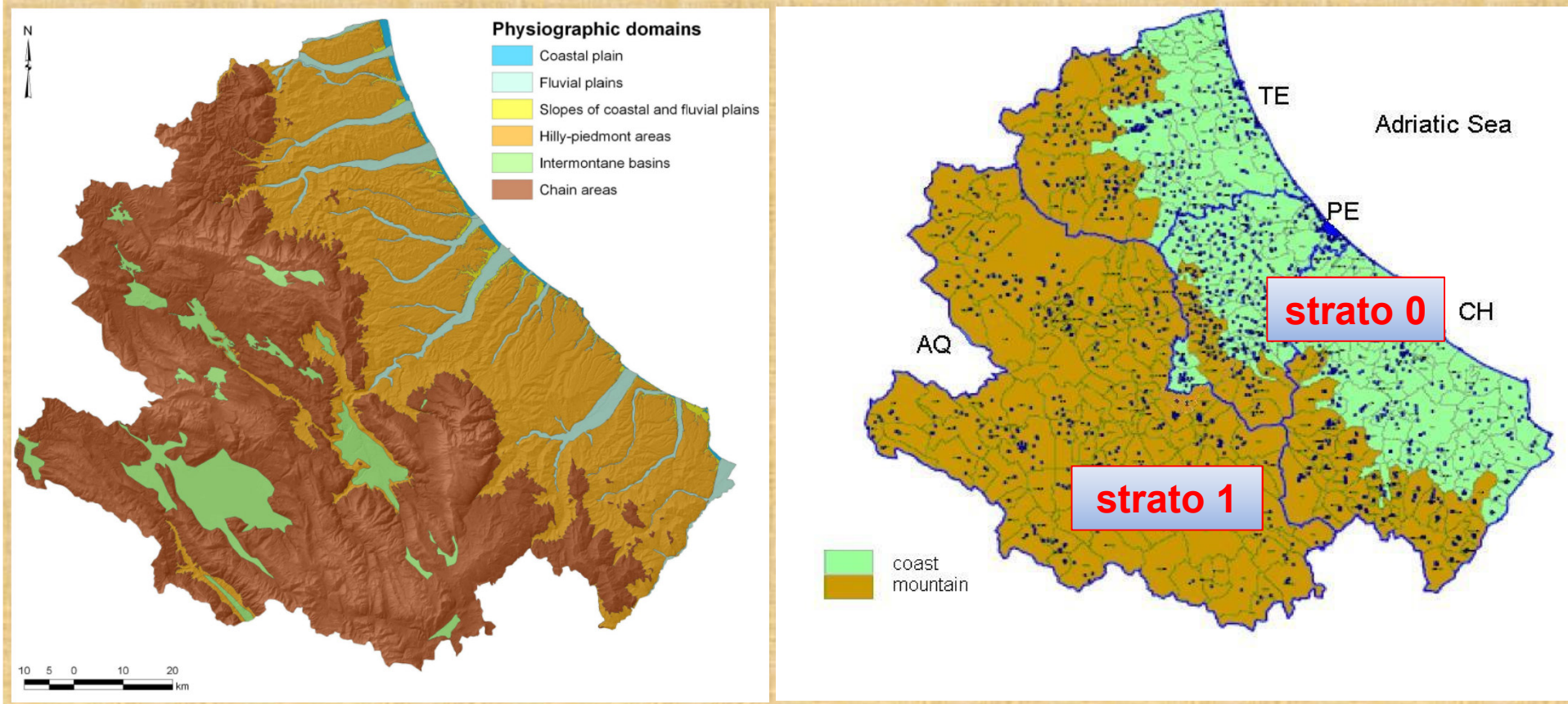
- I. *ottenere una **previsione quantitativa** della distribuzione sull'intero territorio abruzzese dei **superamenti dei livelli di riferimento**, evidenziando eventuali "radon-prone areas"*
- II. *ottenere una **stima dettagliata e rappresentativa dell'esposizione al radon** della popolazione abruzzese al fine di poter valutare correttamente i rischi sanitari connessi.*

2[^] Campagna 2009-2014 – il piano di campionamento multistadio, stratificato

PARTIZIONE DELLA REGIONE IN DUE STRATI TERRITORIALI SULLA BASE DI CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE E CLIMATICHE

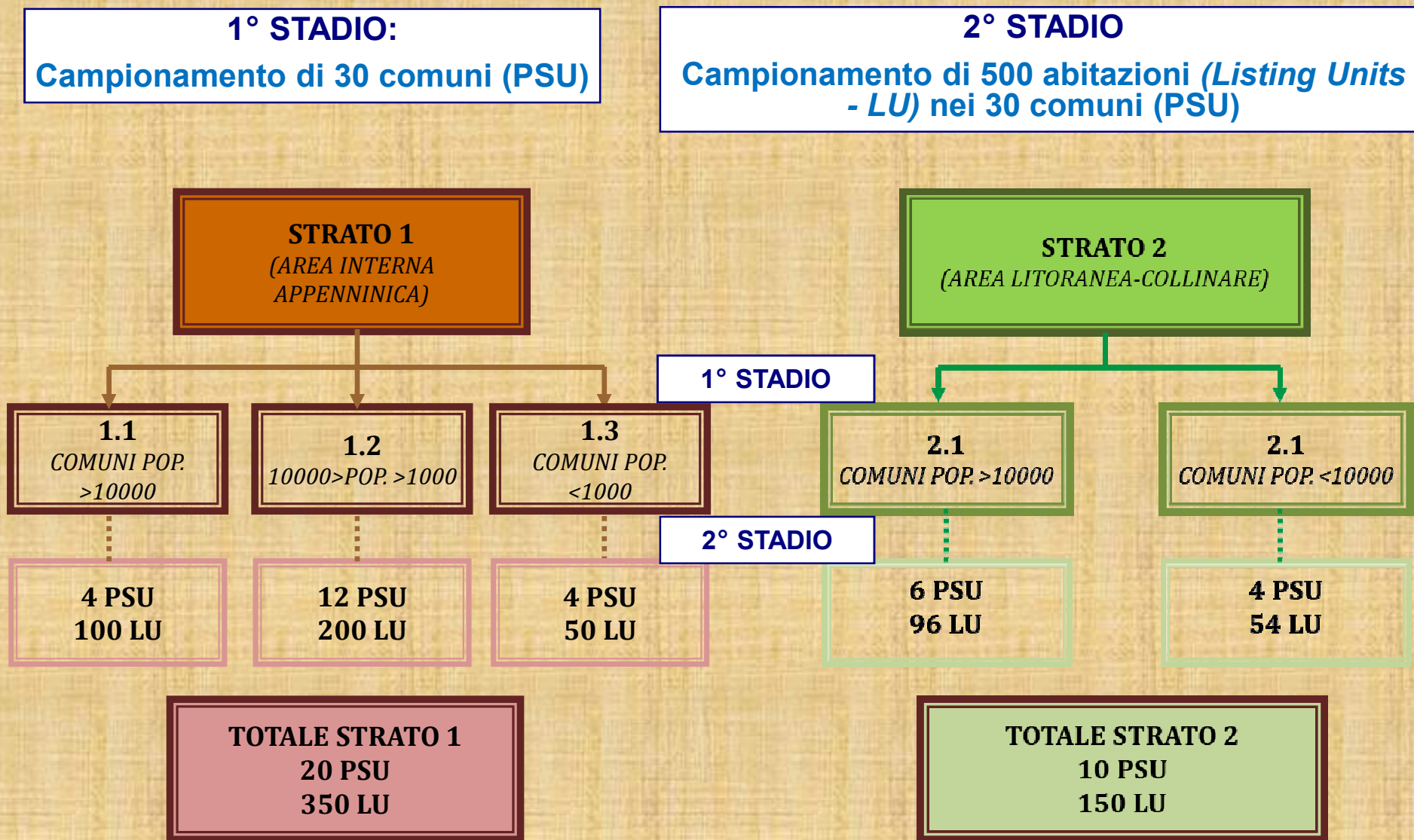
strato 0: area costiera/collinare (concentrazioni di radon più basse, minore variabilità)

strato 1: area interna appenninica (concentrazioni di radon più alte, maggiore variabilità)



2^ Campagna 2009-2014 – il piano di campionamento

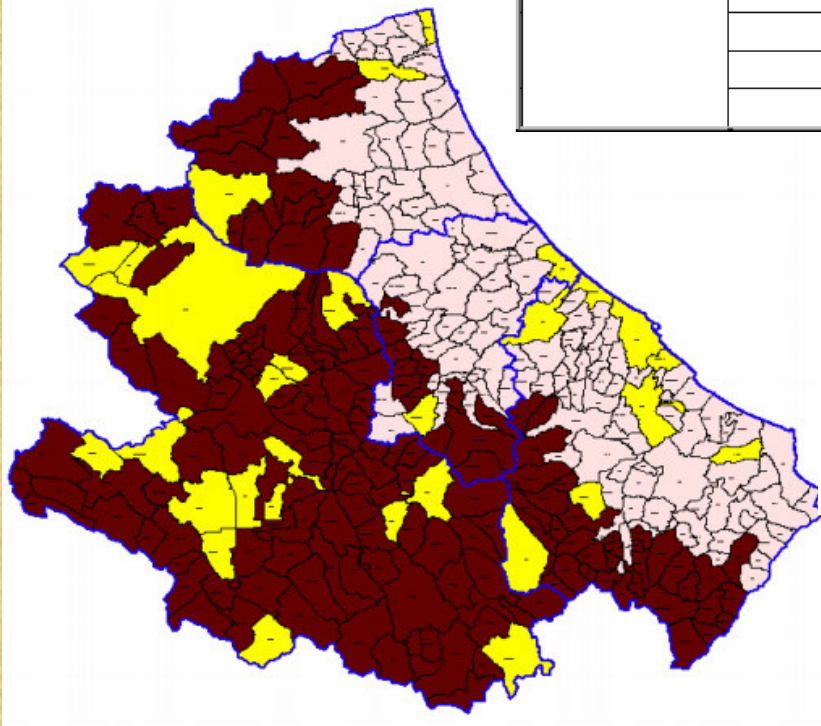
In ogni strato territoriale, si attua una **seconda stratificazione**: i Comuni (*Primary Sampling Unit - PSU*), sono suddivisi sulla base della **popolazione residente**



2^ Campagna 2009-2014 – il piano di campionamento

I 30 comuni selezionati per l'indagine nei due strati territoriali

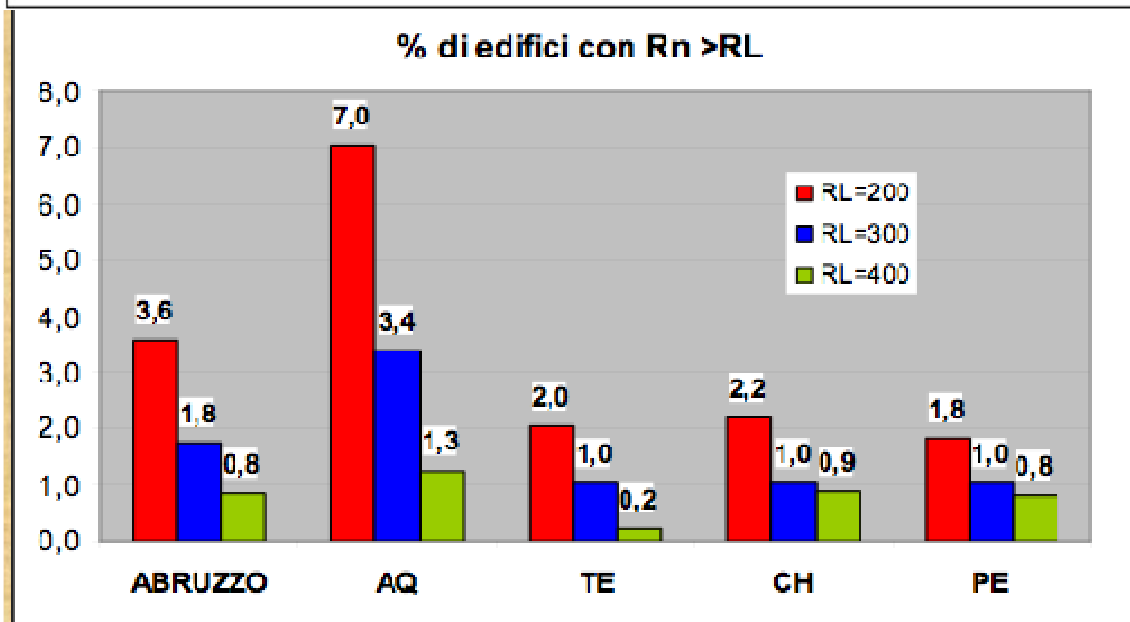
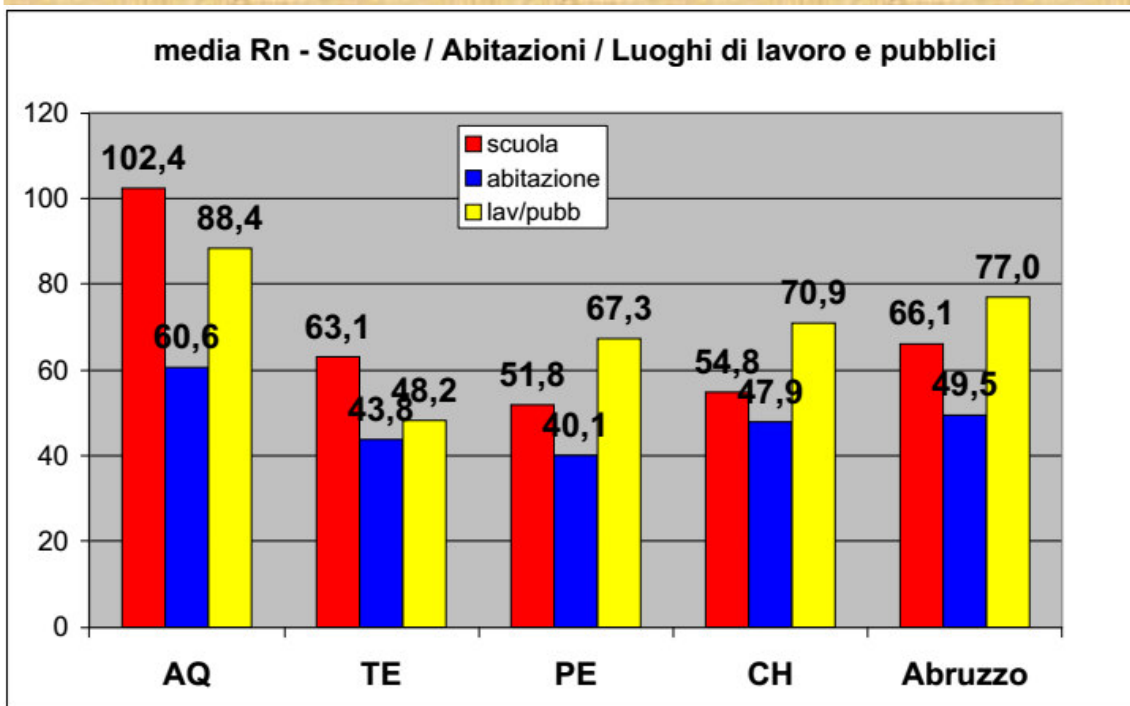
Zona	Comune (pop. >10000 ab.)	n.	Comune (1000<pop.<10000 ab.)	n.	Comune (pop. <1000 ab.)	n.
Appenninica (strato 1)	L'Aquila	47	Castel di Sangro	17	Prata d'Ansidonia	12
	Avezzano	27	Luco dei Marsi	17	Castel del Monte	12
	Sulmona	18	Magliano de' Marsi	17	Fagnano Alto	12
	Celano	15	Balsorano	17	Barete	12
			Tocco da Casauria	16		
			Gessopalena	16		
			Crognaleto	16		
			Cerchio	16		
			Cagnano Amiterno	16		
			Bugnara	16		
			Palena	16		
			Sante Marie	16		



Zona	Comune (pop. >10000 ab.)	n.	Comune (pop.<10000 ab.)	n.
Litoranea (strato 0)	Pescara	10	Sant'Omero	14
	Chieti	15	San Vito Chietino	14
	Ortona	15	Pollutri	13
	Lanciano	15	Santa Maria Imbaro	13
	Francavilla al Mare	15		
	Martinsicuro	15		

(*) Indagine per la mappatura del radon in Abruzzo, Atti del V Convegno Nazionale sugli Agenti Fisici, Novara, 6-8 giugno 2012.

Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset



Le statistiche presentate a lato riguardano l'intero dataset disposizione, senza distinzione tra le varie campagne di misura;

Sono disponibili concentrazioni medie annuali di radon in **2505 edifici**:

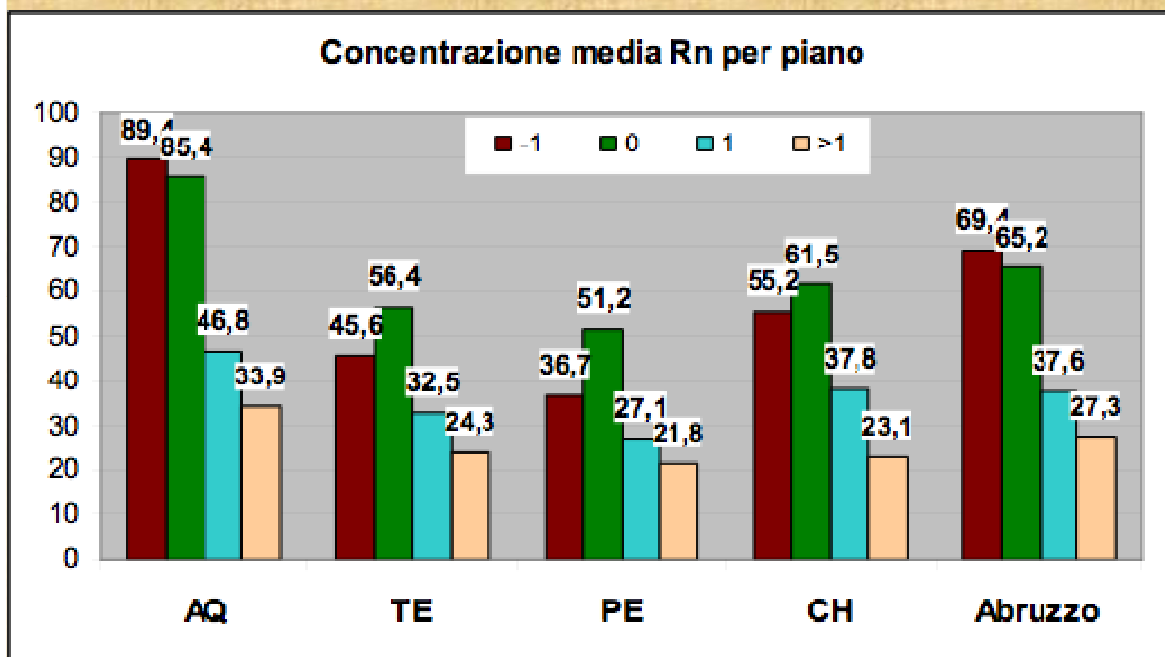
1642 abitazioni

261 luoghi di lavoro/pubblici

602 scuole

dati su www.artaabruzzo.it
(sezione Radon)

Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset



Le statistiche presentate a lato riguardano l'intero dataset disposizione, senza distinzione tra le varie campagne di misura;

Sono disponibili concentrazioni medie annuali di radon in **2505 edifici:**

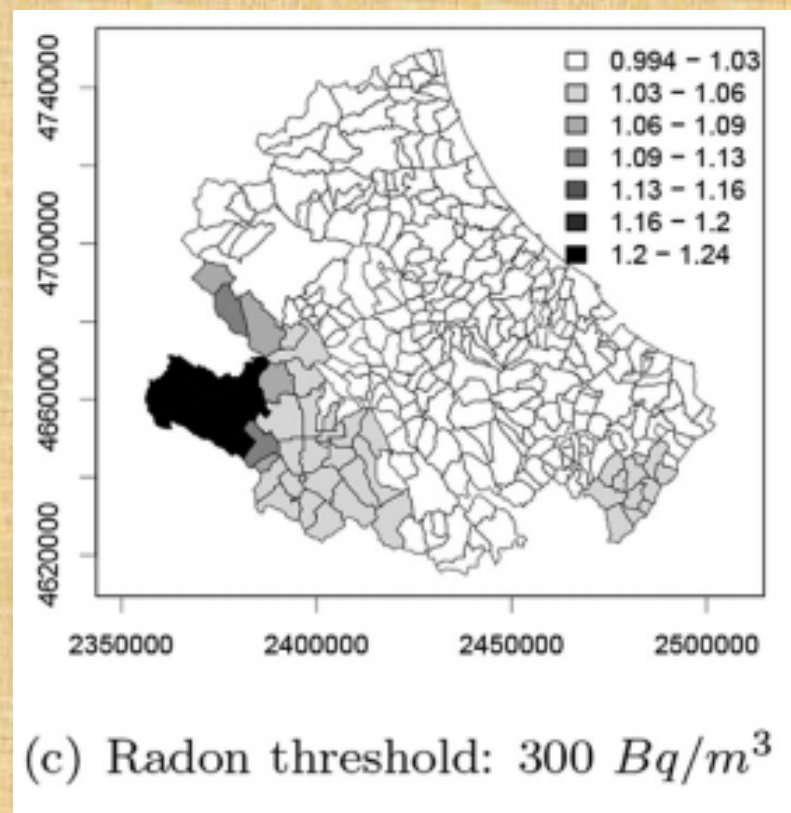
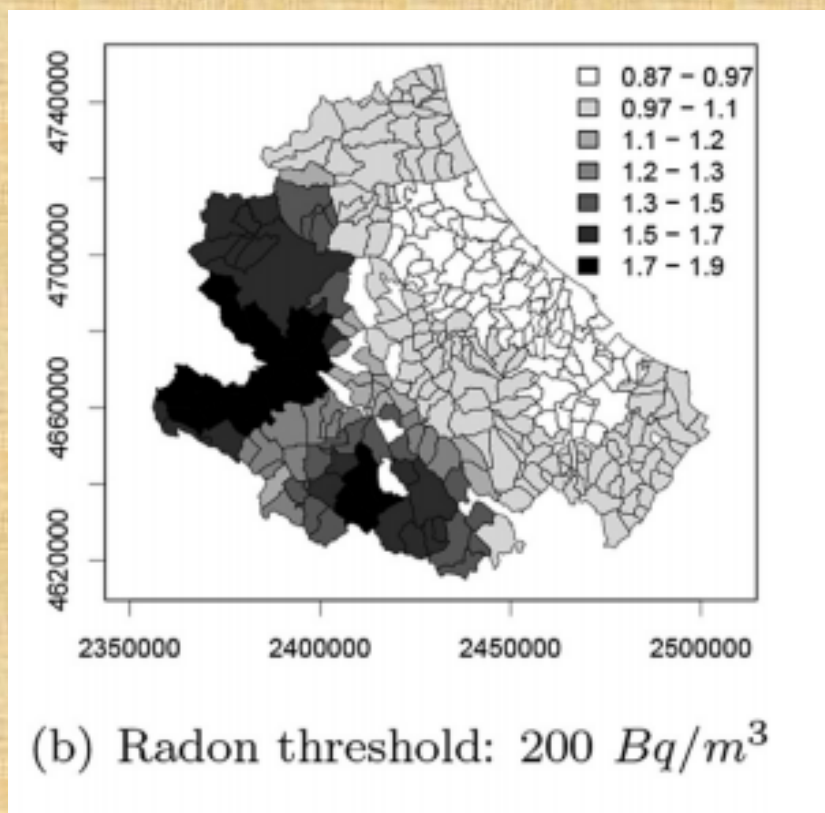
1642 abitazioni

261 luoghi di lavoro/pubblici

602 scuole

Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset

Ricerca di radon prone-areas mediante tecniche di Bayesian spatial cluster detection



Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset

Modello di regressione a effetti misti con le seguenti **variabili edilizie**:

Capitolo 3. Analisi multilevel per le concentrazioni di radon indoor nella provincia aquilana

- Piano
- Tipologia edificio
- Materiale da costr.
- Periodo di costr.

	mean	sd	2.50%	25%	50%	75%	97.50%	\hat{R}	n.eff
β_1	-0.70	0.09	-0.89	-0.76	-0.70	-0.64	-0.52	1.001	3000
β_2	-0.80	0.13	-1.06	-0.89	-0.80	-0.72	-0.55	1.002	3000
β_S	0.34	0.16	0.03	0.24	0.35	0.44	0.64	1.001	3000
β_{NCT}	-0.40	0.10	-0.61	-0.47	-0.40	-0.33	-0.20	1.001	3000
β_{scuola}	0.33	0.11	0.13	0.26	0.33	0.40	0.54	1.001	3000
β_{pubb}	-0.07	0.16	-0.39	-0.18	-0.07	0.04	0.26	1.003	950
β_{lavoro}	-0.08	0.12	-0.31	-0.16	-0.07	0.01	0.16	1.001	3000
β_{pietra}	-0.03	0.11	-0.24	-0.10	-0.03	0.04	0.18	1.001	3000
β_{altro}	-0.79	0.19	-1.17	-0.92	-0.79	-0.66	-0.44	1.001	3000
β_{1919}	0.07	0.13	-0.19	-0.01	0.07	0.16	0.32	1.001	2600
$\beta_{1919/1960}$	0.33	0.10	0.14	0.27	0.33	0.40	0.52	1.001	3000

Fonte: De Novellis, 2013
(Tesi di laurea magistrale
in Fisica)

$$Rn_{std_i} = \exp(y_i - \beta X_i) + Rn_{out}$$

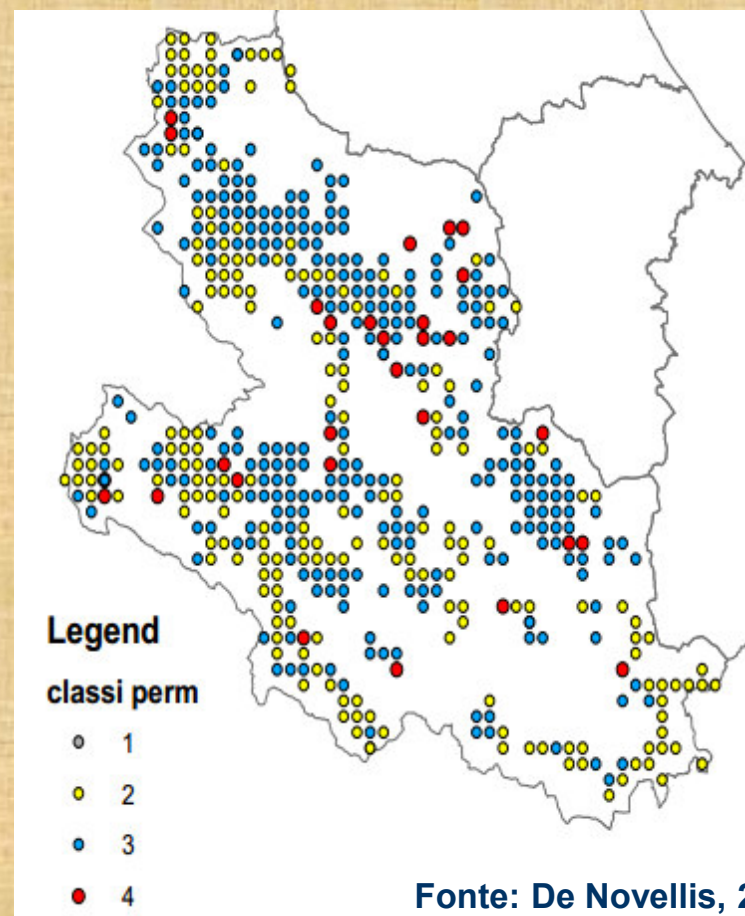
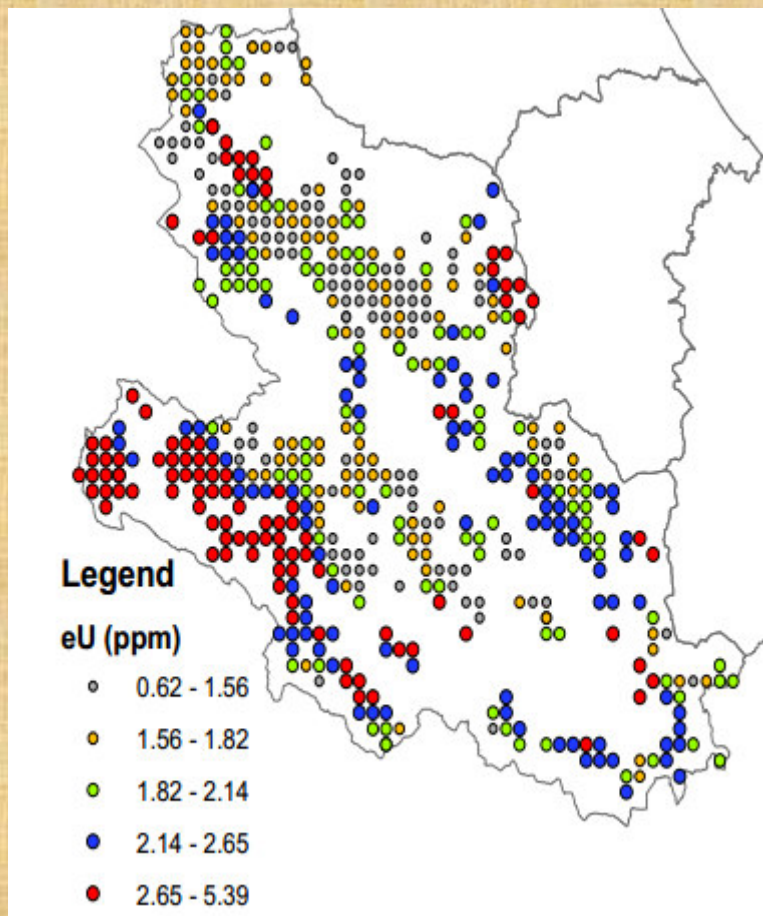
noti i valori dei coefficienti β è possibile definire una variabile nuova: concentrazione di radon indoor al piano terra di un edificio con caratteristiche standardizzate

Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset

L'utilizzo di questa variabile standardizzata in un modello di regressione geografica (GWR) con variabili quali ambientali (1) temperatura media annua ...

(2) Concentrazione di uranio nel suolo

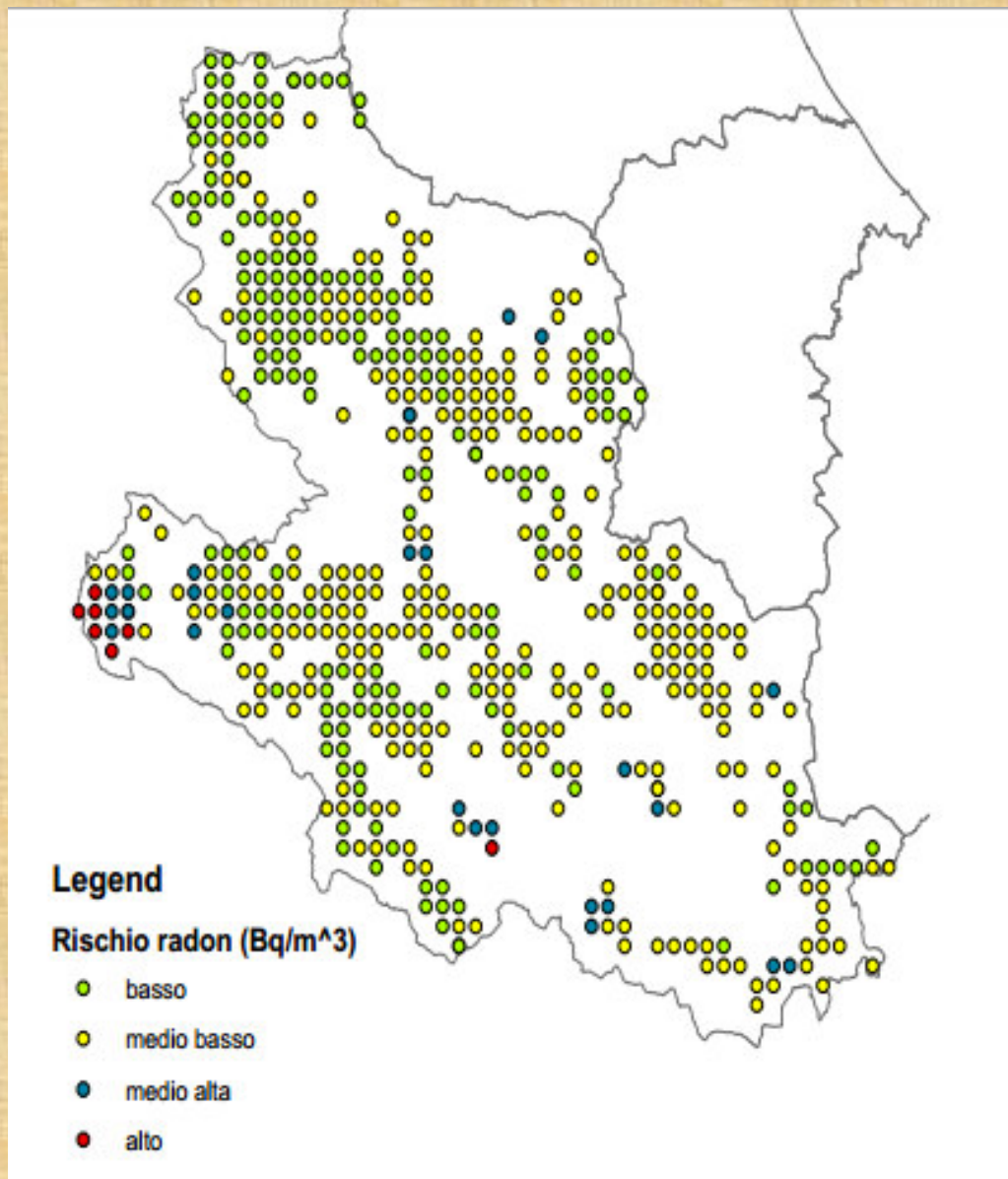
(3) Classi di permeabilità del suolo



Fonte: De Novellis, 2013
(Tesi di laurea magistrale
in Fisica)

Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset

Ha consentito una definizione operativa e quantitativa del «rischio radon» in termini di **potenziale radon geogenico nella provincia dell'Aquila**

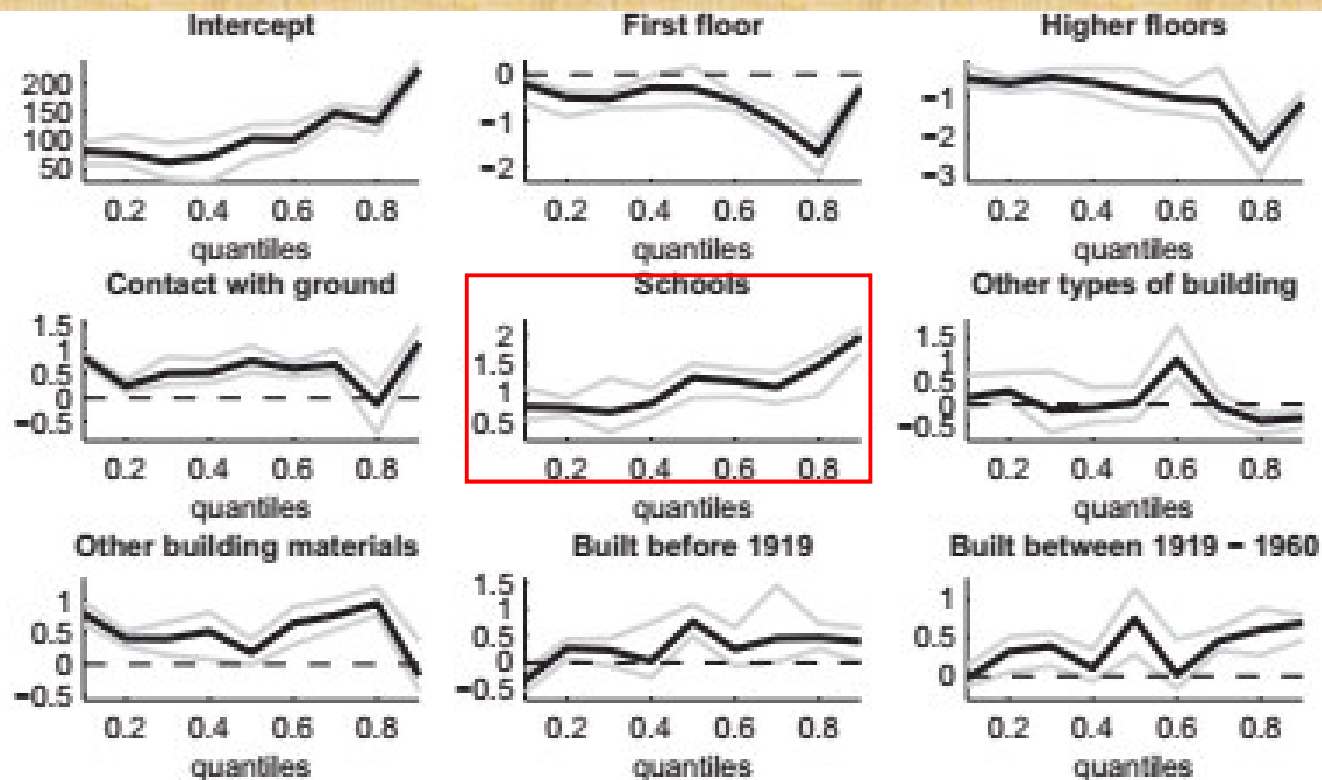


Fonte: De Novellis, 2013
(Tesi di laurea magistrale
in Fisica)

Radon in Abruzzo: elaborazioni statistiche dell'intero dataset

Un modello di regressione quantile con le medesime variabili edilizie (applicato all'intero dataset in possesso di Arta, non solo alla provincia di AQ), mostra, tra l'altro, che l'effetto “**scuola**” sul radon indoor cresce all'aumentare della concentrazione.

La regressione quantile è utile a comprendere come cambia l'influenza delle covariate sulla variabile dipendente, nei vari punti della distribuzione



Radon-prone areas vs priority areas

D.Lgs. 230/95 riprende la definizione di “radon-prone areas” data dalla ICRP 65 (1994): aree geografiche nelle quali si stima che un’elevata **percentuale** di abitazioni abbia concentrazioni di radon (Rn) superiori ad un certo livello di riferimento (LR).

Rischio sanitario individuale

Privilegia aree anche a bassa densità abitativa, ma con elevata percentuale di superamenti del RL -> p.es. **aree rurali o montane con piccoli comuni**

La Direttiva 2013/59/Euratom (art. 103) prevede l’individuazione di **zone in cui si prevede che la concentrazione di radon (Rn) superi il pertinente livello di riferimento (LR) nazionale in un numero significativo di edifici.**

Rischio sanitario collettivo

Privilegia aree ad elevata densità abitativa, quindi con numeri assoluti elevati abitazioni con $Rn > RL$ anche in presenza di percentuali di superamenti molto basse -> p.es. **agglomerati urbani**

Radon-prone areas vs priority areas

- Il Piano Nazionale Radon (PNR) previsto dalla Direttiva (art. 103) dovrà avere come obiettivo finale il risanamento di tutte le situazioni (abitazioni) in cui si supera il LR
- Quelle che in precedenza erano chiamate «**radon-prone areas**» e che ora si preferisce definire «**priority areas**» (che dovranno coincidere con entità amministrative, quindi i Comuni) sono tali solo in senso temporale, cioè sono quelle aree a cui dedicare, prima di altre, attenzione e risorse per cercare, identificare e quindi risanare tali situazioni;
- Nella definizione operativa di «**priority areas**» che il PNR dovrà fornire dovranno essere contemplate due esigenze contrastanti: quella di individuare aree con elevato rischio sanitario individuale e quella di definire aree con elevato rischio sanitario collettivo

Radon-prone areas vs priority areas

Si può pensare a criteri di individuazione a doppia soglia: p.es. potrebbero essere identificati come aree prioritarie quei comuni per i quali, in alternativa:

1. la **percentuale attesa di superamenti** (edifici con $R_n > R_L$) sia superiore ad una determinata soglia (p.es. il 5%) rispetto al totale degli edifici comunali
2. Il **numero atteso di superamenti** nel comune (edifici con $R_n > R_L$) sia superiore ad una determinata soglia (p.es. il 5%) rispetto al totale dei superamenti attesi su base regionale

È chiaro che le percentuali attese di superamento vengono stimate statisticamente sulla base dei dati sperimentali disponibili (misure di concentrazione di radon effettuate nei vari comuni della Regione).

Esercizio preliminare effettuato con il dataset disponibile per l'Abruzzo:

- Se $LR = 200 \text{ Bq/m}^3$ -> **0,8%** delle abitazioni presenti in abruzzo supera LR
- Se entrambe le soglie di cui ai criteri 1. e 2. sono poste al 5%, vengono individuati **30 «comuni prioritari»** (circa il **10% del totale** dei comuni abruzzesi) nei quali si concentra circa il **56 %** del totale regionale dei casi di superamento stimati (2350 su 4173)

Grazie per l'attenzione