



**Respire Webinar – 14<sup>th</sup> May 2019**

# **Le mappe del Radon in Europa e in Italia**

Ciotoli G.

Consiglio Nazionale delle Ricerche,  
Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR-IGAG

Video registrazione del webinar: <https://www.youtube.com/watch?v=P6B8RbNkA9o&t=2465s>



# Indoor Radon – fondamenti

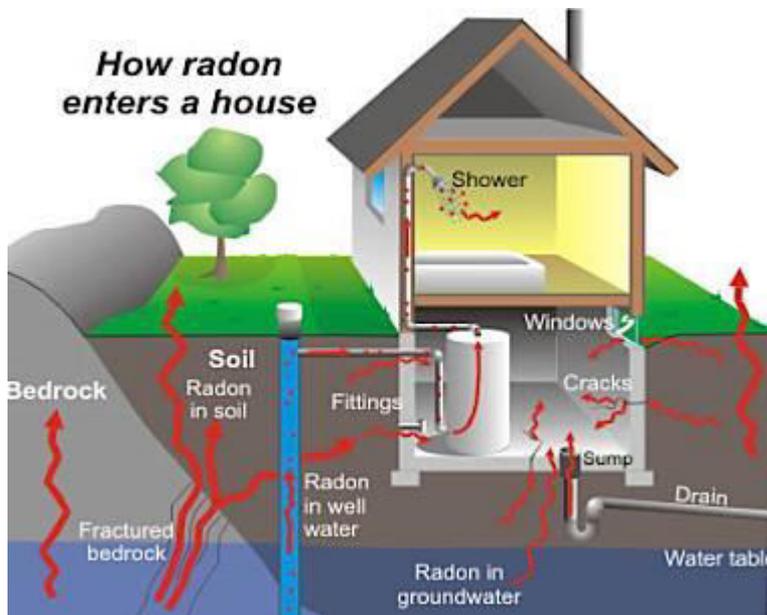
---

- **Indoor radon costituisce il più importante contributo alla dose di radiazione assorbita!**
- La seconda causa più importante del carcinoma polmonare dopo il fumo di sigaretta!
- In Europa si stimano circa 62,000 casi di morte per tumore polmonare per anno causati dal radon.

(Gaskin et al., 2018, *Envir. Health Perspectives* 125, 5)

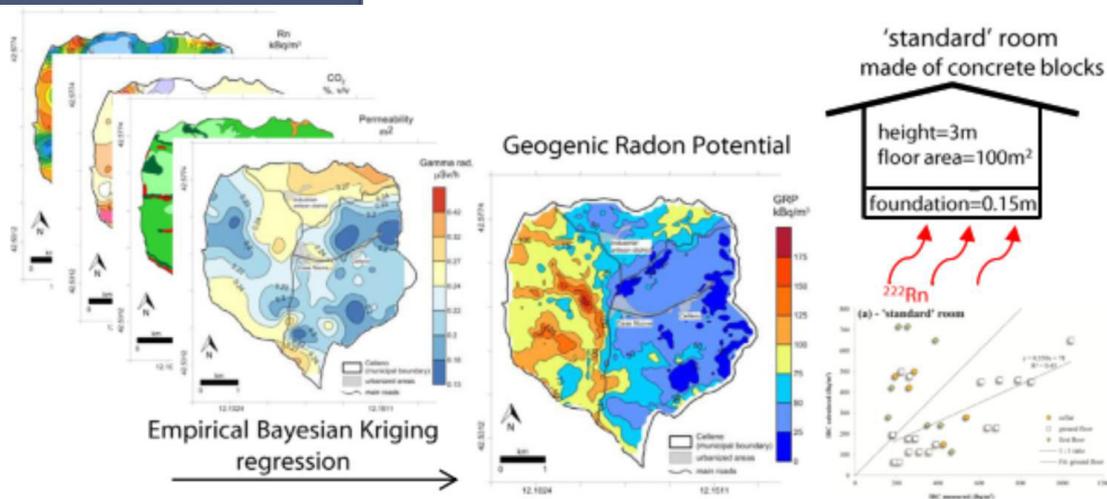
# Dall'ambiente geologico al rischio da radon indoor

How radon enters a house



## Sorgenti del radon indoor:

1. Rn geogenico (la più importante)
2. Materiali da costruzione
3. L'acqua della rete pubblica



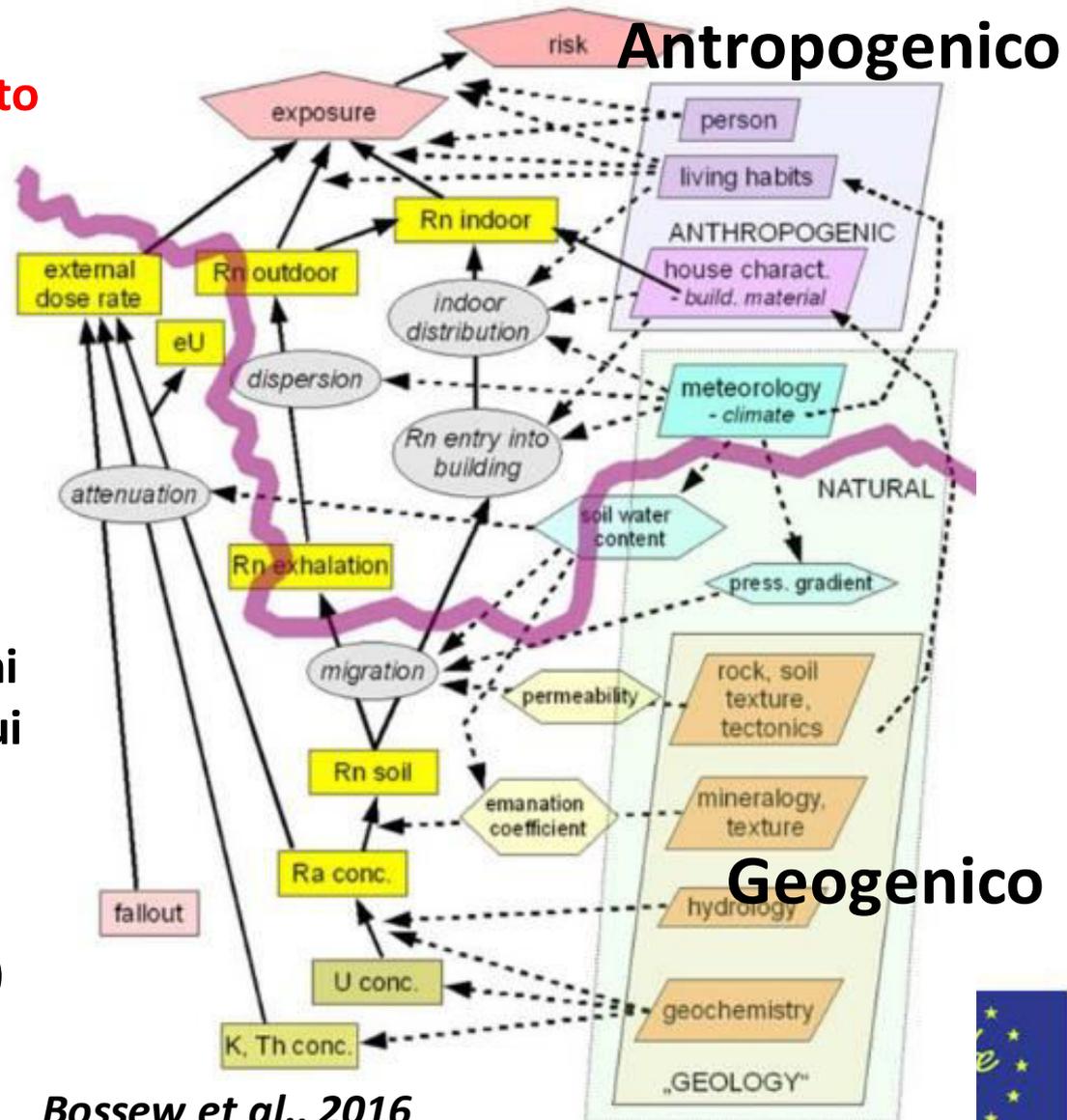
# Dall'ambiente geologico al rischio da radon indoor

**Il comportamento del Radon nell'ambiente naturale è molto complesso!!**

È definito da una serie di variabili eterogenee, il cui comportamento a volte non è ben noto, e che possono interagire in modo complesso

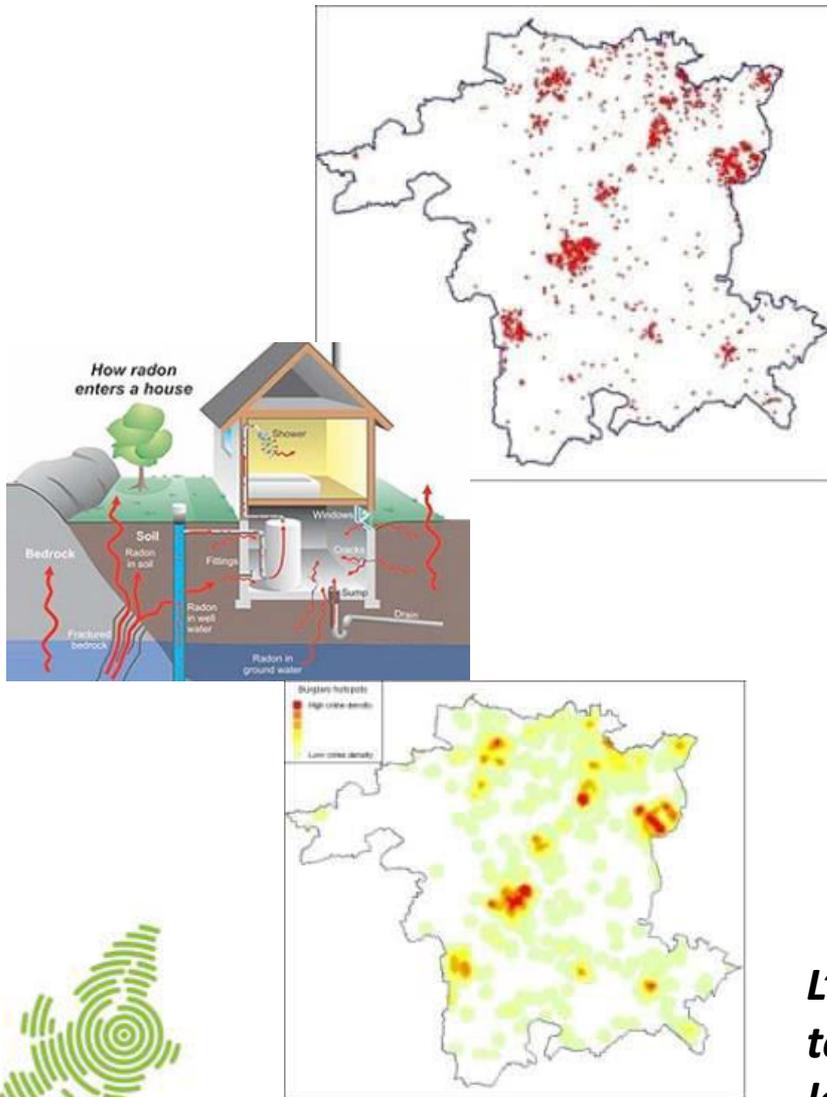
**Risultato:**

- Difficile definire le relazioni tra il Rn e le variabili con cui esso interagisce;
- Il Rn mostra una elevata variabilità spaziale (specialmente il Rn indoor)



Bossew et al., 2016

# Il problema della costruzione delle mappe del Rn indoor



- La distribuzione spaziale di campioni Rn indoor è spesso clusterizzata
- Il Rn indoor solitamente mostra una forte variabilità almeno a scala locale (cioè, il Rn indoor non è stazionario e non è autocorrelato) a causa della sua dipendenza multifattoriale (cioè, parametri fisici, meteorologici e antropici).
- L'interpolazione diretta dei valori Rn al di fuori del confine di un'area urbana potrebbe essere una procedura difficile e non robusta da realizzare

***L'estrema variabilità locale e temporale del Rn Indoor rende difficile la sua stima.***

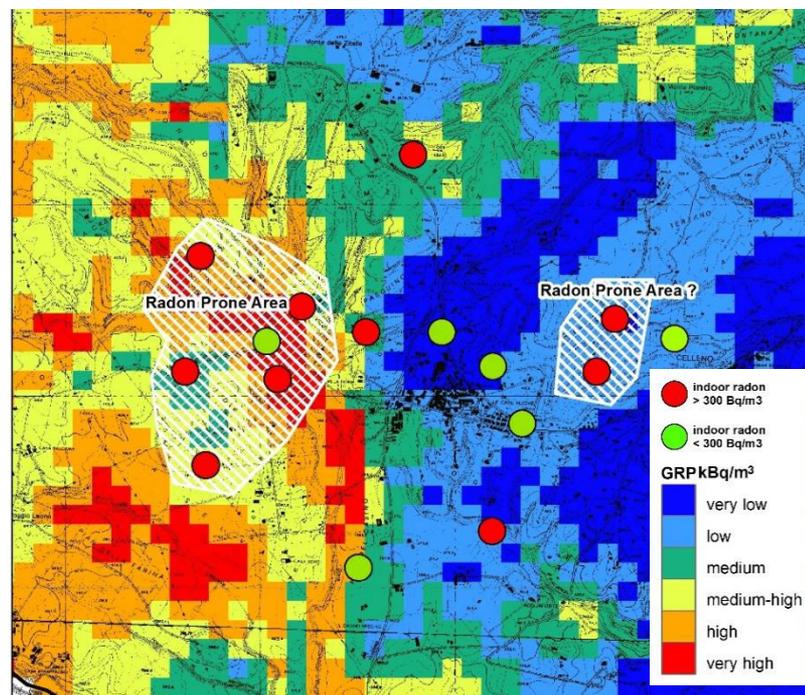
# Il Potenziale Geogenico di Radon e le Radon Prone Areas

## Potenziale Geogenico del Radon (PGR)

E' una misura «del radon rilasciato dalla Terra», cioè misura la disponibilità di Rn esalato dal terreno che può entrare negli edifici. In letteratura è definito da:

(Neznal, 2003)  $GRP = C_{Rn}(\text{soil}) / [-\log_{10}(k) - 10]$

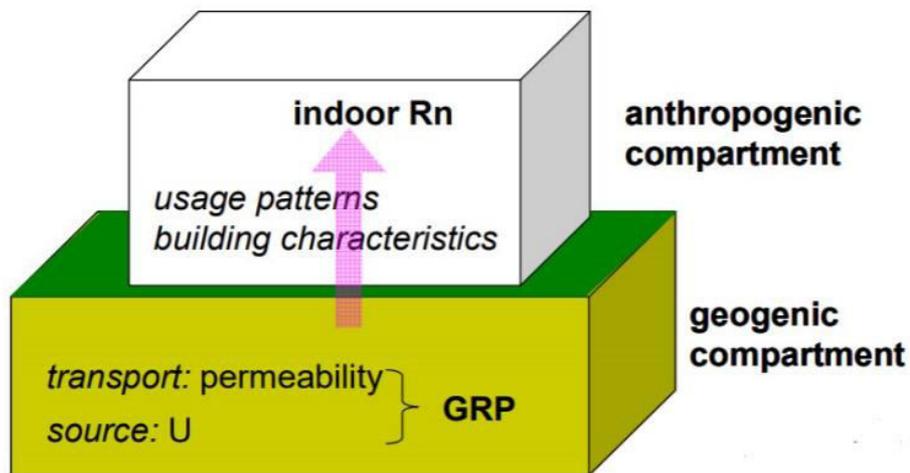
Dove  $C_{Rn}$  (suolo), la concentrazione di radon nel suolo/roccia ( $\text{kBq/m}^3$ );  $k$ , permeabilità del suolo ( $\text{m}^2$ )



## Radon Prone Area (RPA)

definisce un'area le cui caratteristiche geologiche e quelle degli edifici incrementano la probabilità di avere elevate concentrazioni di Rn indoor (maggiori della media nazionale, ICRP, 2007). Tuttavia, nella maggior parte dei casi la concentrazione di Rn indoor è disconnessa dal GRP poiché negli edifici è principalmente influenzata da fattori antropici, cioè presenza di seminterrati, ventilazione, elevazione al di sopra del suolo, struttura dell'edificio, ecc.

# I compartimenti Geogenico e Antropogenico



Bossew et al., 2017 (IWEAR 2017)

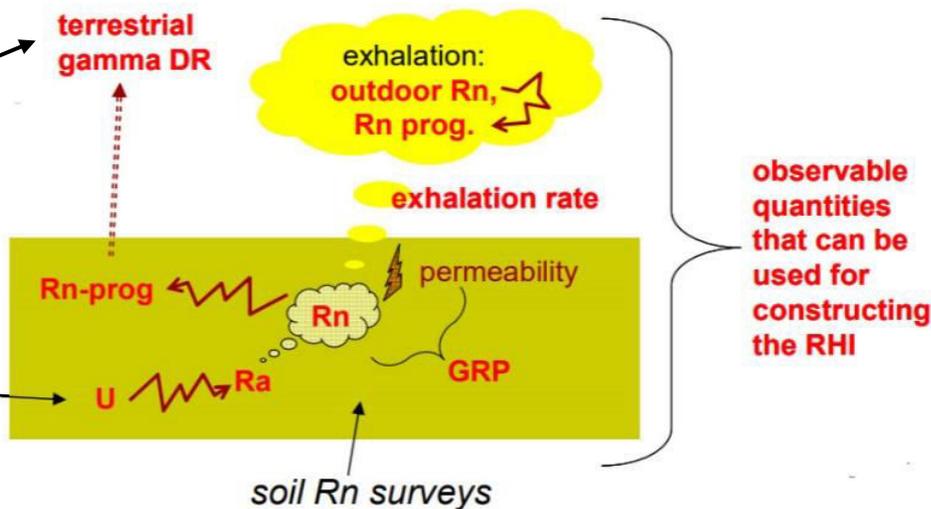
- Il PGR quantifica il Rn disponibile ad entrare nelle abitazioni
- I fattori antropogenici determinano fino a che punto il Rn si può accumulare all'interno degli edifici «infiltrazione e accumulo potenziale»

Bossew et al., 2017 (IWEAR 2017)

## geogenic quantities

European Radiological Data Exchange Platform (EUDEP database)

Dati Geochimici, GEMAS, FOREGS  
Radiazione gamma in situ o da aeromobile



observable quantities that can be used for constructing the RHI



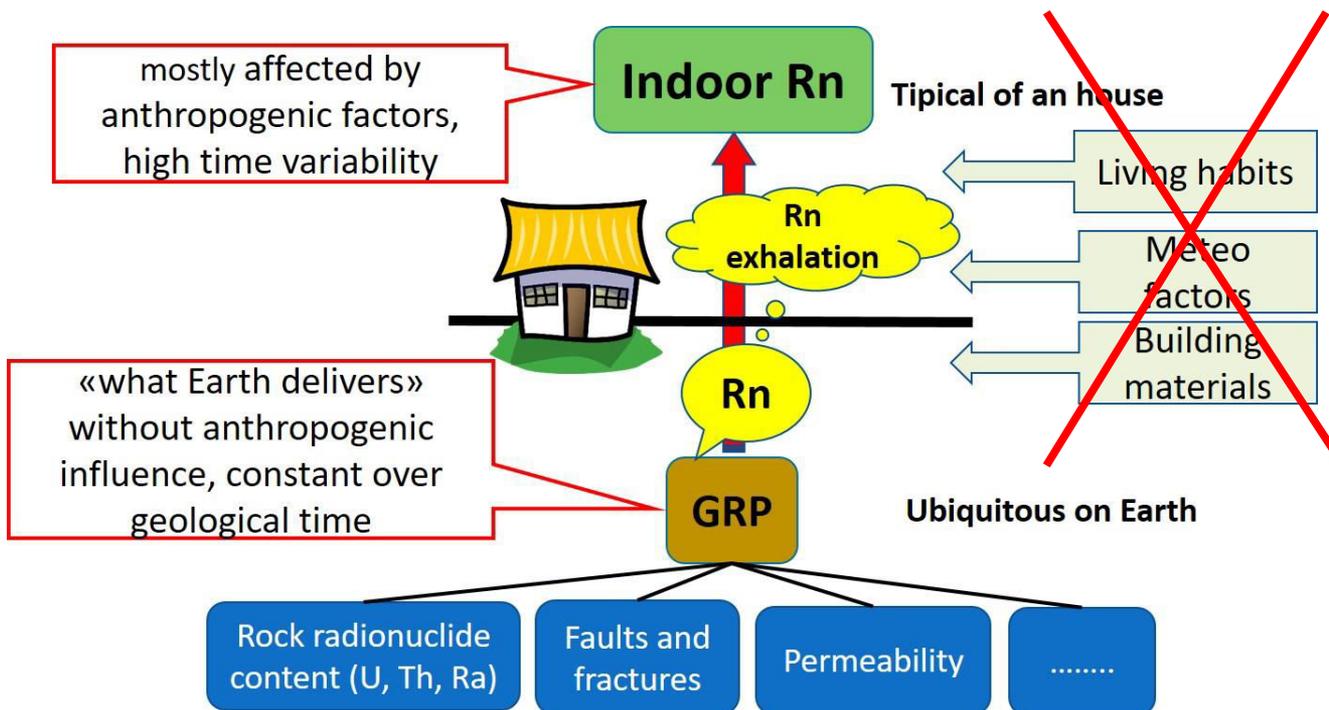
**RESPIRE**

Radon real time monitoring system

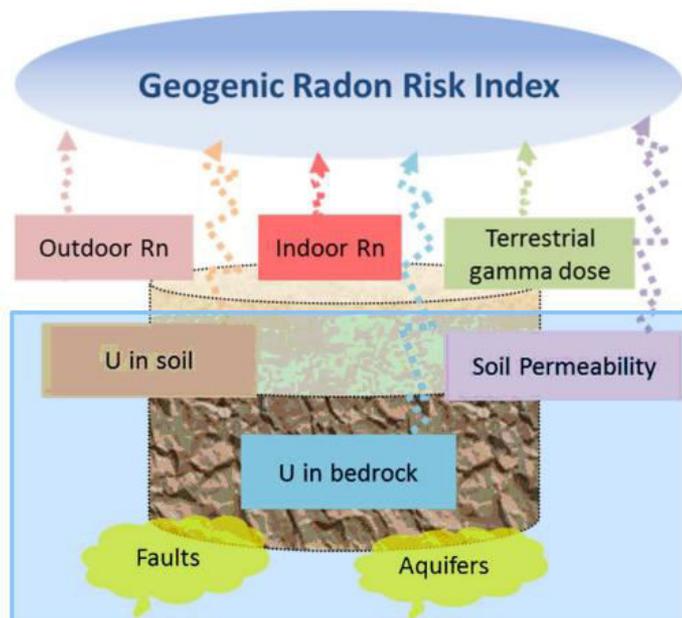
# Il Potenziale Geogenico di Radon : dalle rocce al rischio

Un considerevole lavoro è stato investito nello sviluppo di metodi per stimare il PGR ( a piccola e grande scala) utilizzando variabili proxy osservate e/o facilmente disponibili (dati geologici) in mancanza di misure dirette di Rn nei gas del suolo.

**PGR= indipendente dai fattori antropogenici**



# Variabili Proxy



G. Cinelli et al., 2016  
Regional workshop on Radon in  
Workplaces as an Element of a National  
Radon Action Plan Tallin 23-27 May  
2016

**GRP:** il Rn disponibile ad entrare negli edifici

**Soil gas radon:** la concentrazione di Rn nel suolo

**Contenuto in radionuclidi:** U, Ra, Th, K nelle rocce/suolo

**Permeabilità del suolo:** influenza il movimento del radon nel sottosuolo

**Dose Gamma Terrestre:** radiazione totale emessa dall'ambiente naturale (le rocce)

**Unità geologiche**

**Fattori aggiuntivi:** presenza di caratteristiche geologiche che influenzano la quantità di radon e il suo movimento verso la superficie: faults, caves, mines, geothermal gradient, ...

**Concentrazione di Rn Indoor**

È necessaria l'armonizzazione di queste variabili poiché spesso provengono da diversi set di dati e tecniche di misura

Il concetto di **radon-prone areas**, dovrebbe permettere il riconoscimento di:

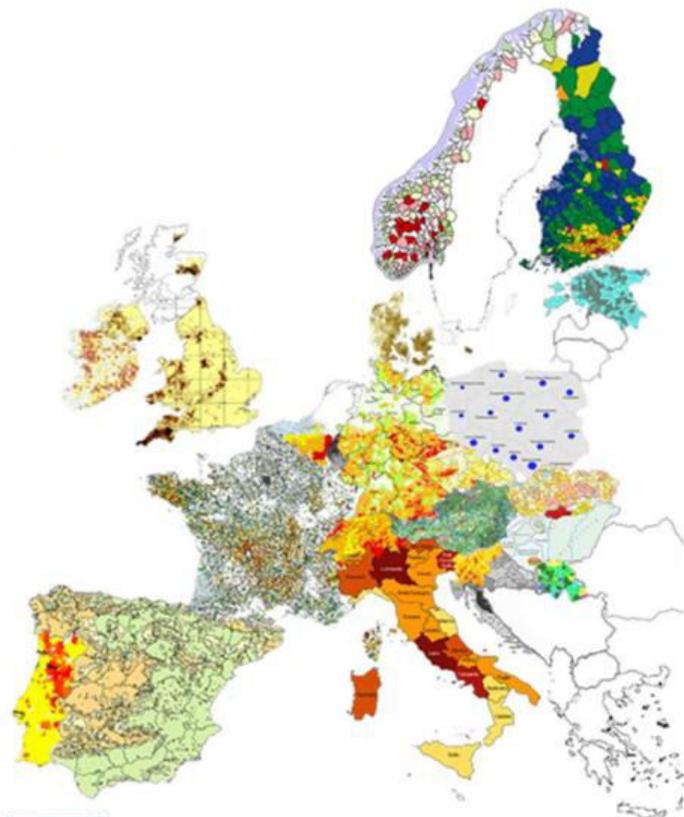
- zone con una concentrazione di radon indoor significativamente più alta rispetto alla media nazionale (ICRP, 2014)
- zone in cui si stima che la concentrazione di radon (come media annua) superi il livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici (Dir. 2013/59/Euratom)
- La variabilità geografica del Rn indoor e la selezione del livello di azione influenzeranno la definizione delle RPAs, che pertanto risulta un argomento cruciale per il monitoraggio delle abitazioni e la definizione delle aree a rischio.

---

# Dati di radon indoor a scala europea

# Dati esistenti di radon indoor a scala europea

## European Atlas of Natural Radiation



Dal 2010, il gruppo per il Monitoraggio della Radioattività Ambientale (REM) del Joint Research Centre (JRC) della Comunità Europea ha istituito l'Atlante Europeo della Radioattività Naturale (**European Atlas of Natural Radiation, EANR**), una serie di mappe che mostrano i livelli di radioattività causati da differenti sorgenti naturali.

<https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation>

Dal 2013 il JRC è impegnato a mappare il radon rilasciato dalla Terra in termini di potenziale geologico. Il lavoro è tuttora in corso e necessita di sviluppare modelli per stimare e armonizzare il potenziale geologico del radon di una regione.

<https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Geogenic-radon/Geogenic-radon>

Molti paesi hanno «mappe di radon»

- Differenti tecniche di visualizzazione
- Differenti dati di input
- Differenti metodi di mappatura
- Differenti obiettivi

Dubois, G. (2005). An Overview of Radon Surveys in Europe  
EUR Report 21892, Office for Official Publications of the EC, Luxembourg



**RESPIRE**

Radon real time  
monitoring system



# Dati esistenti di radon indoor a scala europea

## European Atlas of Natural Radiation

---

### Obiettivi principali:

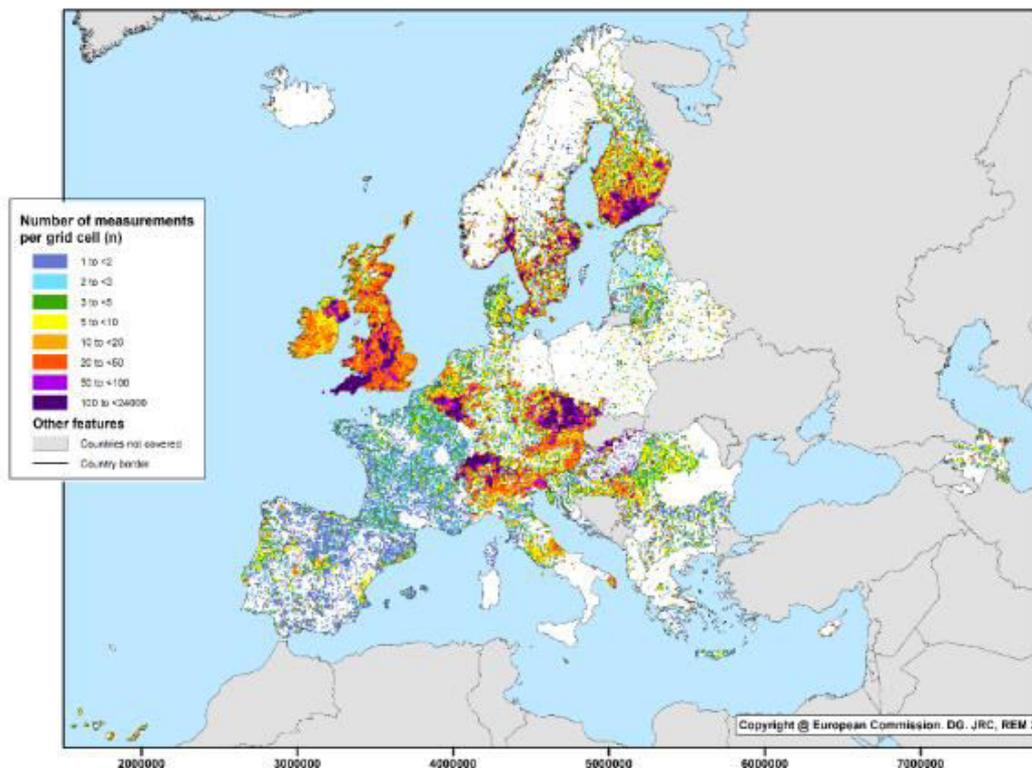
- Migliorare le conoscenze e la consapevolezza pubblica (e politica) sulla radioattività ambientale
- Visualizzare la situazione a scala europea
- Contribuire ad aspetti scientifici e metodologici

### Obiettivi indiretti e risultati:

- Supporto agli Stati Membri per la formulazione del Radon Action Plan (European Basic Safety Standards Directive, Art. 103): “Member States shall identify areas where the radon concentration (as annual average) in a significant number of buildings is expected to exceed the relevant national reference level” (cf. “radon priority area, RPA”, “high radon area”, “radon affected area”)
- Stimolare la ricerca sulle tecniche di mapping del radon indoor, sulla definizione e sulla stima del rischio, etc.
- Generare e produrre dataset armonizzati

# Dati esistenti di radon indoor a scala europea European Atlas of Natural Radiation

European Indoor Radon Map, September 2018



Griglia 10 km x 10 km

- Soggiorno, piano terra
- Statistica:
  - numero di misure
  - media aritmetica (AM)
  - standard deviation (SD)
  - AM (In data)
  - SD (In data)
  - Mediana
  - minimo
  - massimo

35 paesi

~28,000 celle con valore

~1,150,000 misure grezze

Min/Max numero di misure

per cell: 1/23,993

**Non sono riportati dati individuali! Solo dati aggregati!**



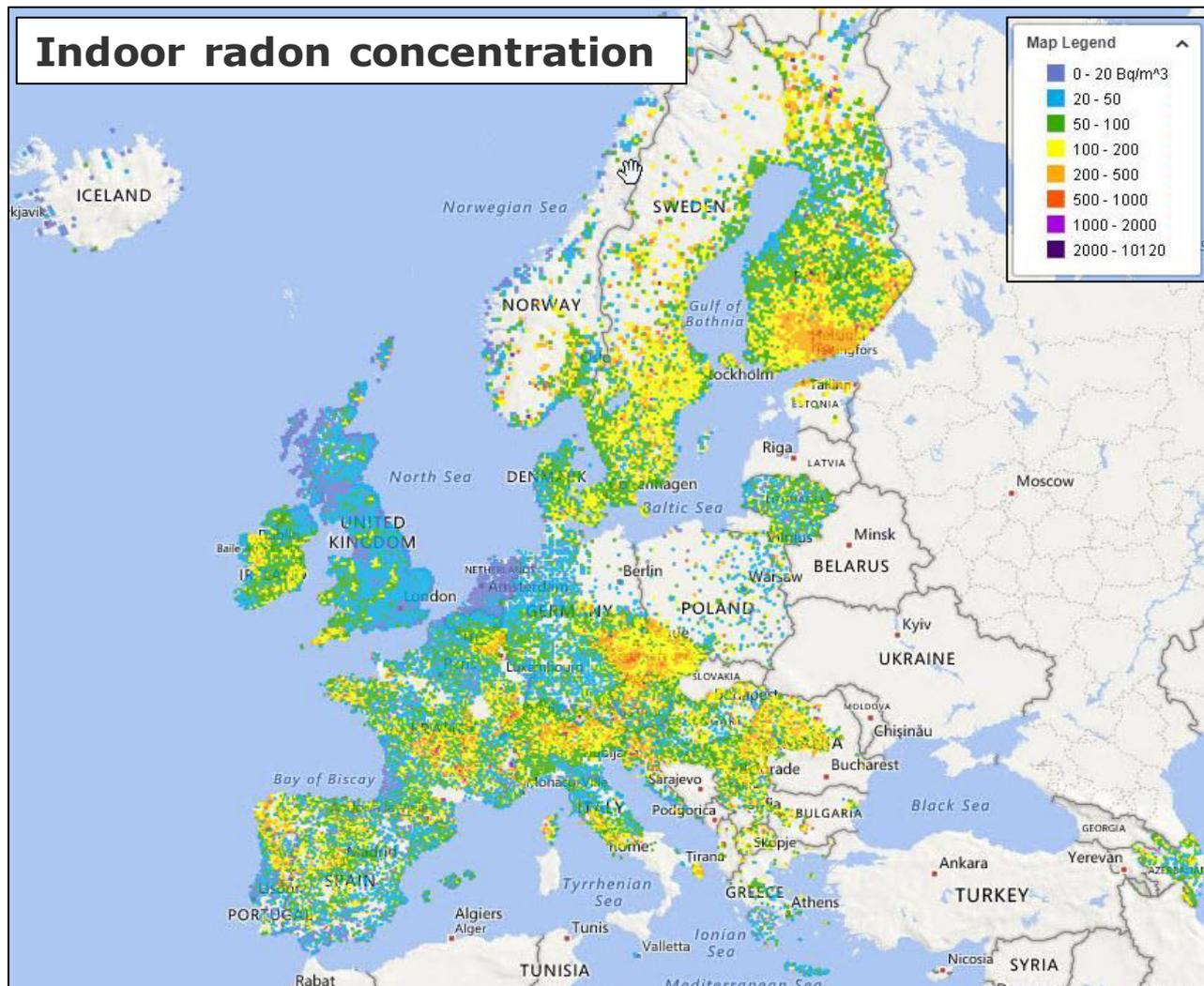
**RESPIRE**

Radon real time monitoring system



# Dati esistenti di radon indoor a scala europea

## European Atlas of Natural Radiation



**RESPIRE**

Radon real time monitoring system

<https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation>



# Carenze dell'attuale mappa europea del radon indoor

- **La mappa è incompleta**
  - Ragione: una lenta disponibilità dei dati
  
- **Solo concentrazioni nei piani terra, sebbene le persone vivono anche in piani sopraelevati.**
  - Ragione: Nel 2006 nella fase iniziale del progetto, e durante il meeting di Praga fu deciso di prendere come rappresentativi solo i dati relativi ai piani terra delle abitazioni. Questo presupposto sembra ancora valido.
  - Infatti, i primi studi hanno rilevato che la maggior parte delle persone in Europa vivono al piano terra – anche in alcune città ....
  
- **La valutazione dell'esposizione richiede la conoscenza e l'input di dati demografici e sociologici :**
  - Il tempo passato all'interno degli edifici
  - casa // luoghi di lavoro ?



# Obiettivi futuri dello European Atlas of Natural Radiation

- **Mappa del radon geogenico**
  - Rn concentrazione del radon nei gas del suolo
  - Permeabilità del suolo
  - Potenziale Geologico di Radon
- **Radon legato all'assetto geodinamico e tettonico di un'area**
  - Faglie, aree vulcaniche
  - Studi regionali sul potenziale del Radon tettonogenico (under work)

Crowley et al.: Tectonically enhanced geogenic Rn (TEGR); EGU 2018
- **Riconoscimento dei valori estremi locali, anomalie, hotspots**

Bossew: Radon priority areas and radon extremes – in progress;  
ICHLERA 2018
- **Geogenic Radon Hazard Index (GRHI)**
- **Radon Prone Areas**
- **Thoron**



**RESPIRE**

Radon real time  
monitoring system

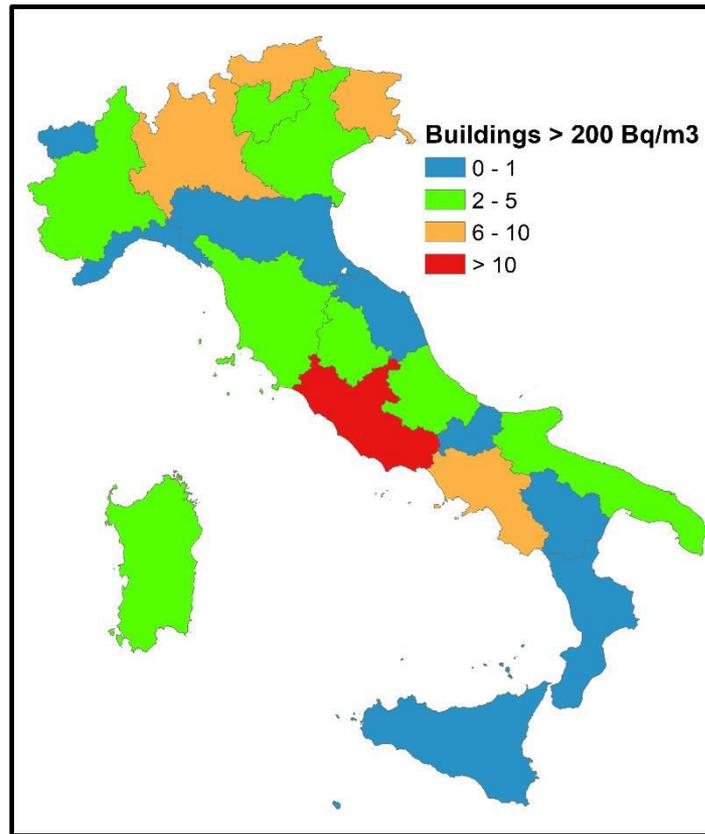
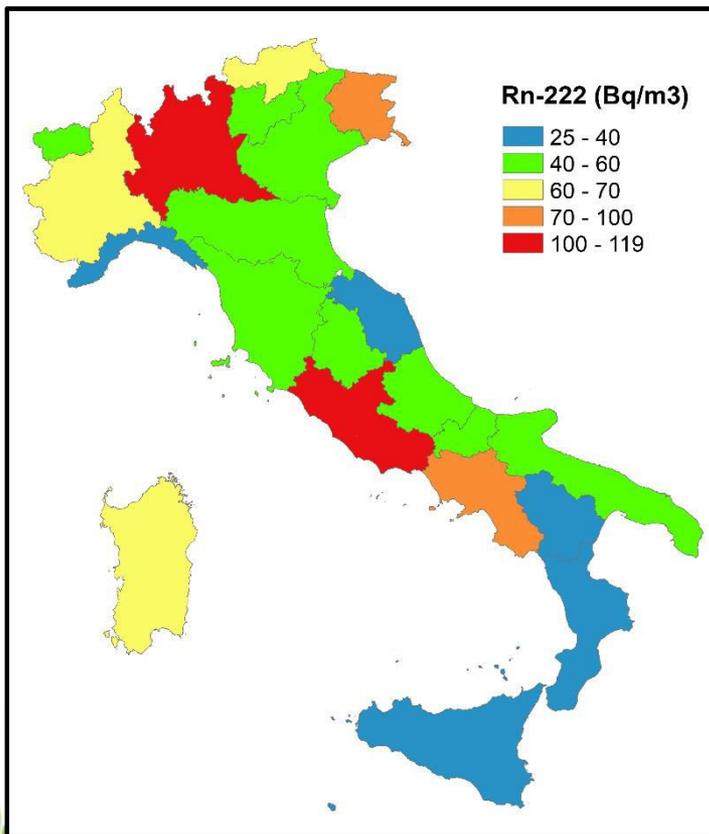


# Dati di radon indoor a scala nazionale

# La mappa del Rn indoor in Italia

Mappa del Rn indoor in Italia. Periodo 1989-1997 (Annuario APAT, 2005-2006). Concentrazione media

Mappa della % di edifici > 200 Bq/m<sup>3</sup>. Periodo 1989-1997 (Annuario APAT, 2005-2006).



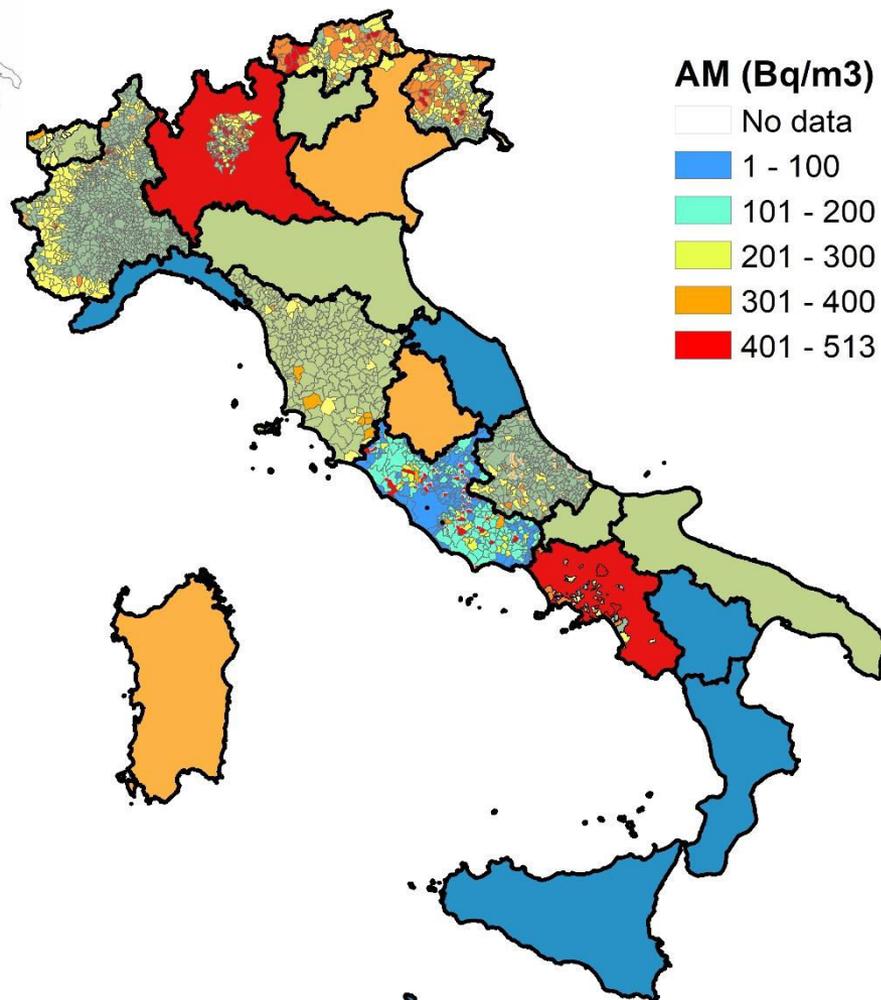
# La mappa del Rn indoor in Italia

## Regions with actions aimed at the identification of RPAs

Statistica ricalcolata sui dati disponibili dai siti ARPA

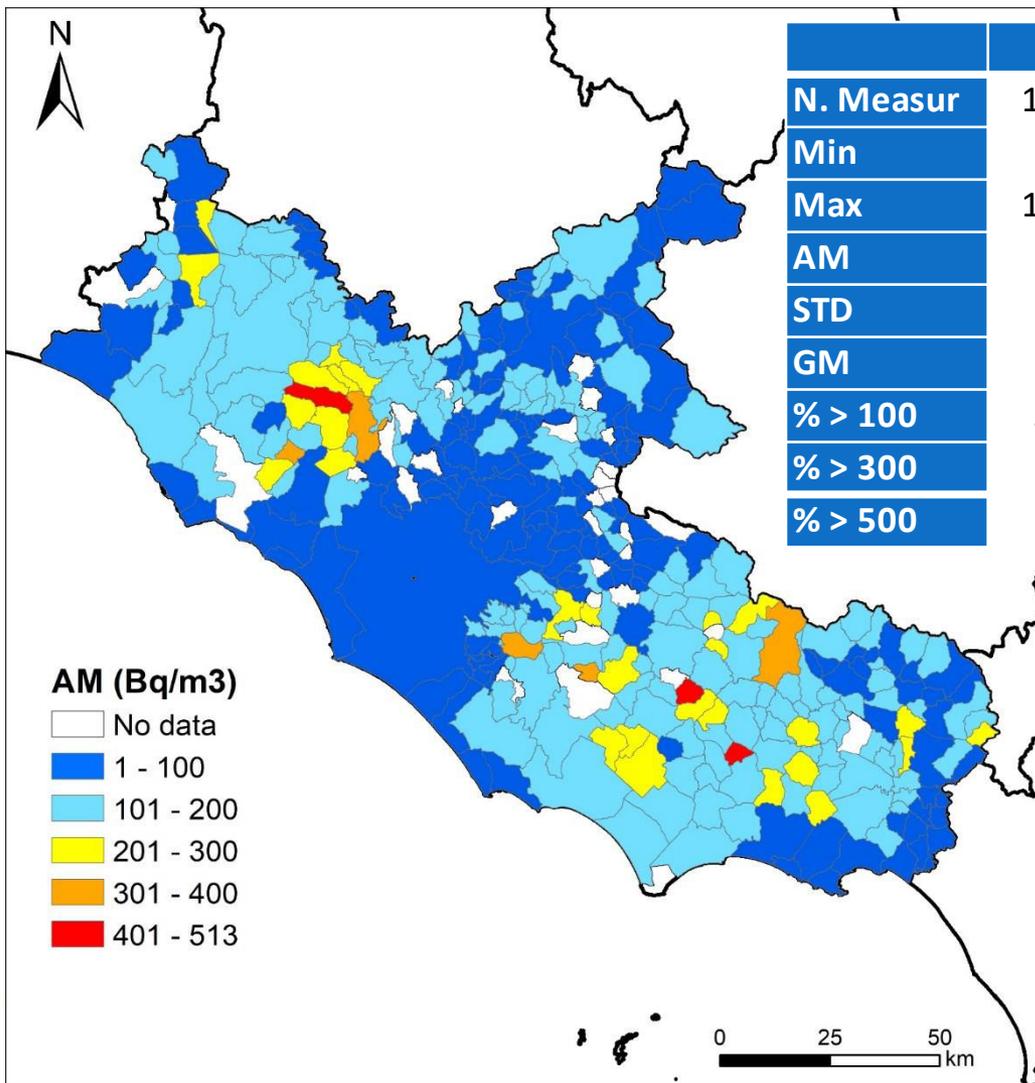


Region	Mun	Meas	AM	GM	Min	Max	STD
VDA	38	609	83	75	22	221	45
PIE	1206		88	82	28	847	47
LIG							
LOM	172	834	219	124	8	6514	361
TRE							
BOL	116	3265	227	135		2362	
VEN							
FVG	679	2462	161	122	18	1812	145
ERO							
TOS	287	1981	51	40	9	344	45
MAR							
UMB							
LAZ	378	5281	121	86	4	2154	135
ABR	283	2205	65	53	1	1181	
MOL							
CAM	382		309	126	8	7784	816
PUG							
BAS							
CAL							
SIC	411		80		11	1197	
SAR							



# La mappa del Rn indoor nel Lazio

## Indoor radon nei comuni del Lazio (ARPA Lazio, 2013)



	FR	LT	RI	RM	VT	TOT
<b>N. Measur</b>	1.288	675	1.036	1.418	864	<b>5281</b>
<b>Min</b>	4	5	6	5	6	<b>4</b>
<b>Max</b>	1.953	1.692	626	2.154	2.075	<b>2154</b>
<b>AM</b>	142	127	104	96	144	<b>121</b>
<b>STD</b>	148	142	78	122	170	<b>135</b>
<b>GM</b>	101	90	82	67	104	<b>86</b>
<b>% &gt; 100</b>	51%	43%	38%	29%	51%	<b>41%</b>
<b>% &gt; 300</b>	9%	7%	3%	4%	9%	<b>6%</b>
<b>% &gt; 500</b>	3%	2%	0%	1%	3%	<b>2%</b>

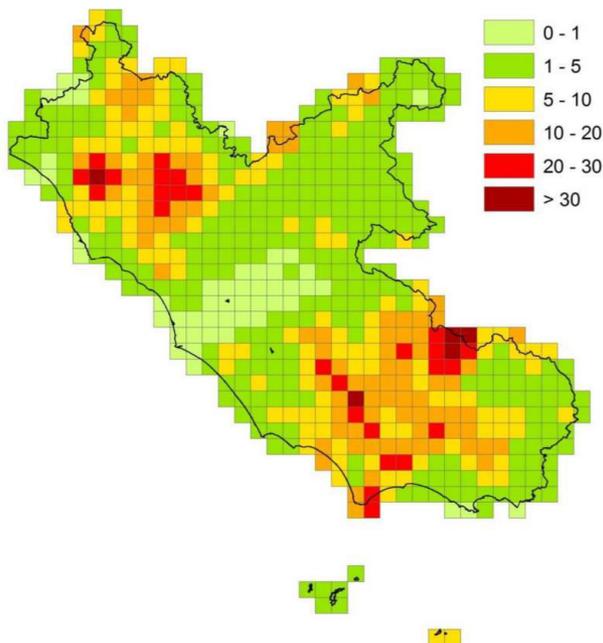


# The estimation and mapping of RPAs

Le tecniche statistiche applicate per rappresentare le misurazioni di Rn al chiuso possono fornire una stima della percentuale di abitazioni al di sopra di un livello di azione (dati grezzi e / o standardizzati)

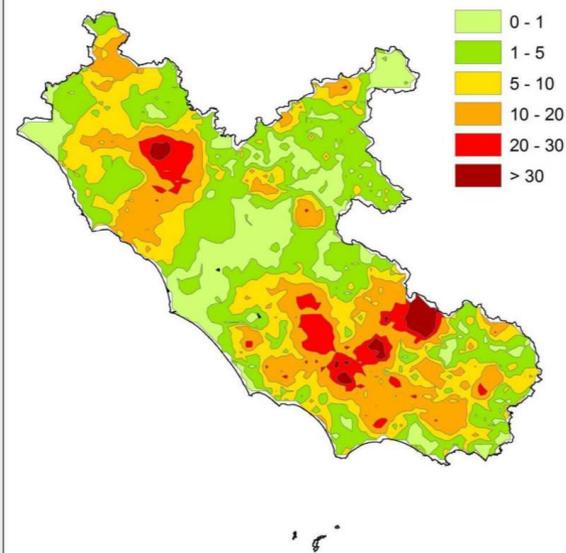
## Grid square method

Stima della frazione (%) di abitazioni che eccedono il livello di riferimento  $300 \text{ Bq m}^{-3}$



## Kriging disgiuntivo

Stima della probabilità di eccedere il livello di riferimento  $300 \text{ Bq m}^{-3}$



Le tecniche geostatistiche (cioè il kriging di probabilità) possono fornire una mappa della probabilità di superare il limite di azione.

# The GRP of the Lazio region

Journal of Environmental Radioactivity 166 (2017) 355–375



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Radioactivity

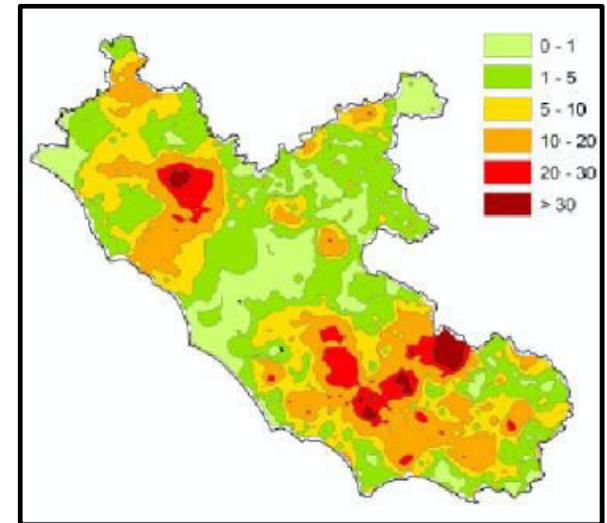
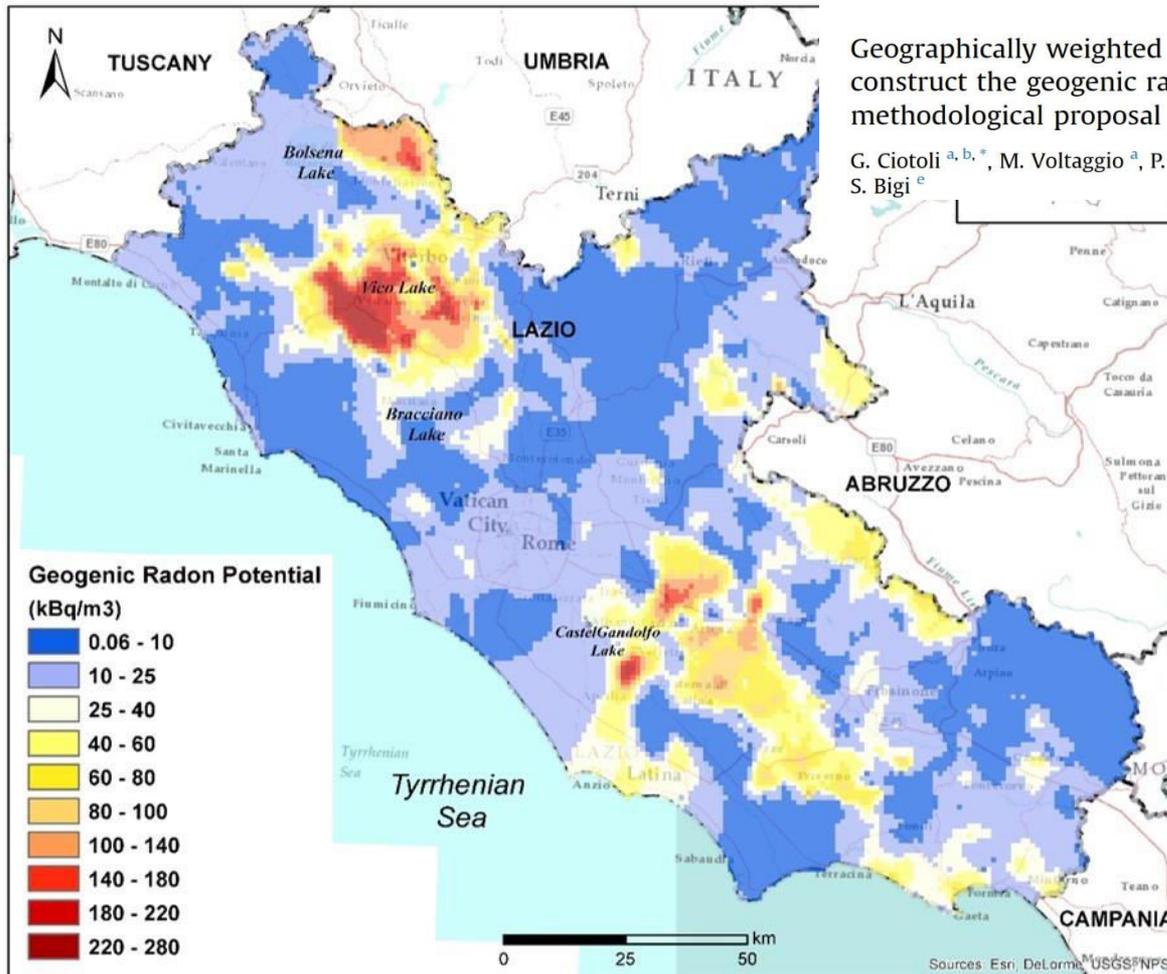
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jenvrad](http://www.elsevier.com/locate/jenvrad)



Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation

G. Ciotoli <sup>a, b, \*</sup>, M. Voltaggio <sup>a</sup>, P. Tuccimei <sup>c</sup>, M. Soligo <sup>c</sup>, A. Pasculli <sup>d</sup>, S.E. Beaubien <sup>e</sup>, S. Bigi <sup>e</sup>

Maybe are we going in the right way??



# The GRP of the Lazio region



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)

## Mapping the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Bayesian Kriging regression: A case study from a volcanic area of central Italy

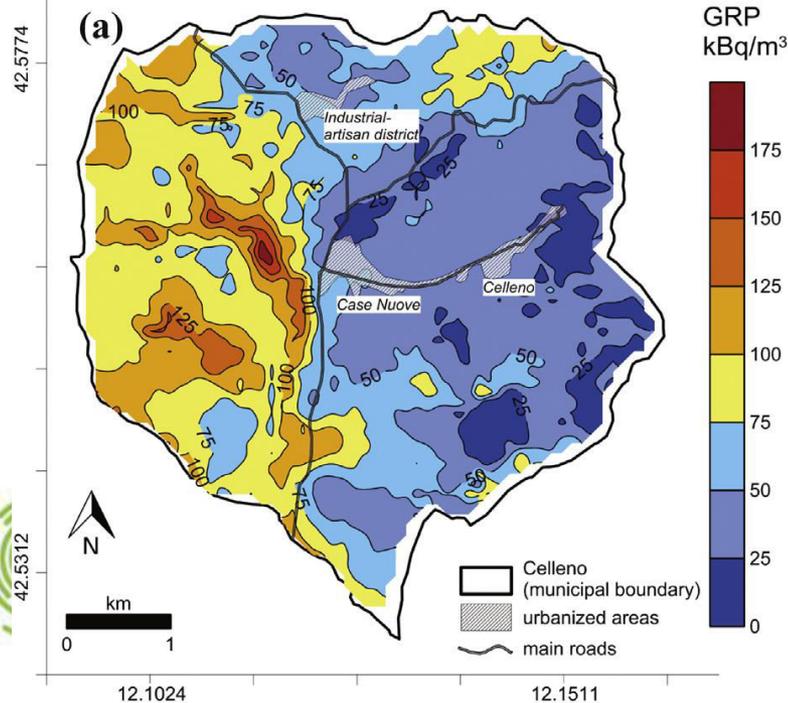
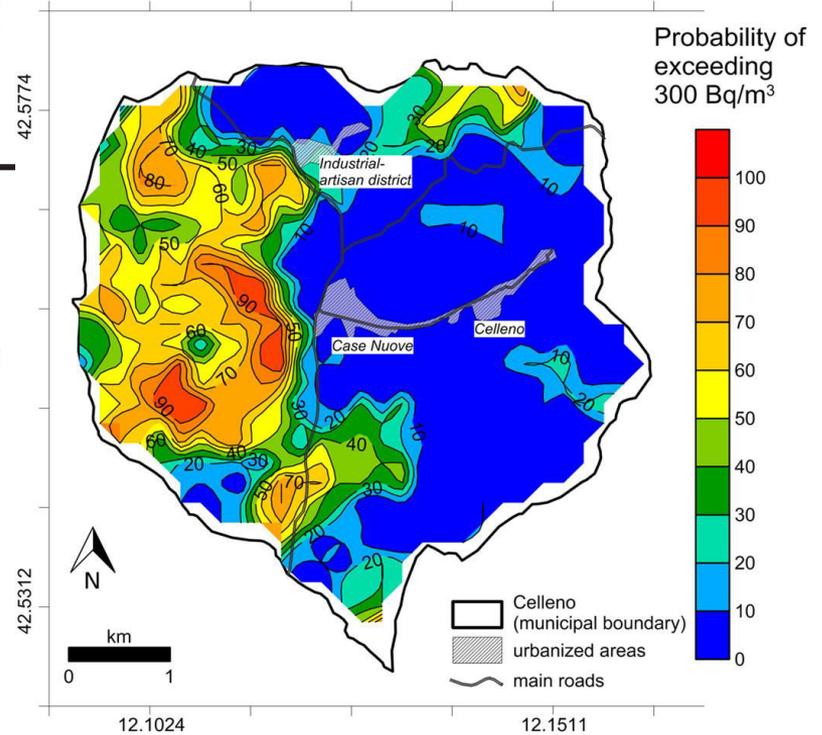
Francesca Giustini <sup>a,\*</sup>, Giancarlo Ciotoli <sup>a,b</sup>, Alessio Rinaldini <sup>c</sup>, Livio Ruggiero <sup>d</sup>, Mario Voltaggio <sup>a</sup>

<sup>a</sup> CNR-IGAG, National Research Council, Institute of Environmental Geology and Geoengineering, Italy

<sup>b</sup> INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy

<sup>c</sup> INAIL-DIT, National Institute for the Insurance on Work Accidents, Department of Technological Innovations, Italy

<sup>d</sup> Sapienza - University of Rome. Earth Science Department. Italy



# Osservazioni conclusive

## 1. L'interpolazione diretta dei soli valori di radon indoor per identificare le RPA

- Approccio meno robusto
- Forte variabilità (anche su scala ridotta)
- Significato solo all'interno delle aree abitate
- Mostrano una clusterizzazione spaziale dovuta alla distribuzione degli edifici all'interno delle zone abitate.
- **Molto utile per l'individuazione dei siti di bonifica**



## 2. Il PGR ottenuto dalla costruzione di modelli multivariati, comprendenti dati geologici vincolati dalle misure di concentrazione del Rn nel suolo (quando disponibili) si dimostra:

- Più stabile, perché spazialmente autocorrelato (i valori dipendono dai valori nei siti vicini)
- Più facile da stimare

Utile a:

- definire le aree prioritarie per ulteriori studi e decisioni sull'uso del suolo
- allocare risorse per pianificare campionamenti più dettagliati
- pianificare il risanamento e il monitoraggio delle abitazioni più a rischio
- focalizzare le politiche e la regolamentazione del radon in aree prioritarie



**RESPIRE**

Radon real time  
monitoring system

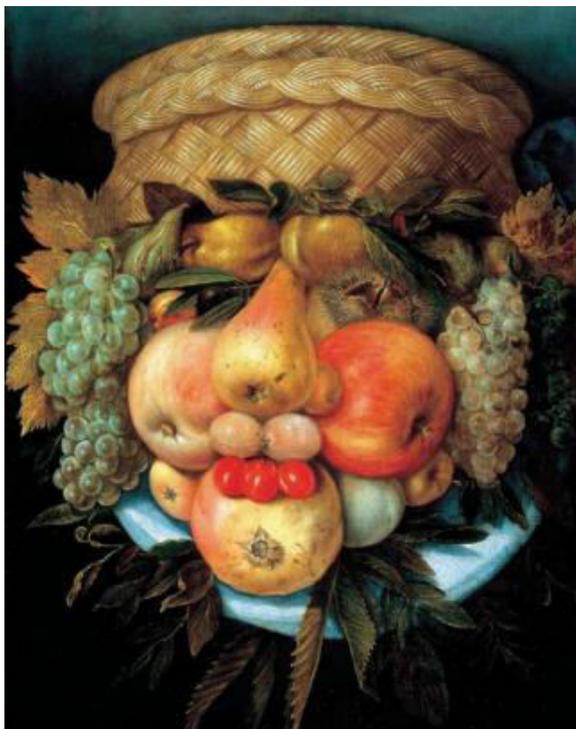


# Osservazioni conclusive

- Il radon nell'ambiente è un fenomeno molto complesso costituito da una serie di variabili proxy eterogenee, il cui comportamento è a volte poco noto, e che possono interagire in modo complicato
- La stima del PGR e delle RPA costituisce un importante strumento per l'analisi del rischio radon e l'organizzazione dei piani d'azione (come richiesto dalla Direttiva UE 2013/59), ovvero indagini dettagliate, prevenzione, pianificazione dell'uso del suolo e azioni di bonifica
- Non esiste una «naturale» definizione delle RPAs!! Pertanto, neanche una «vera» RPA!
- Le RPAs spesso dipendono dal metodo di stima utilizzato. Quest'ultimo dipende spesso da decisioni politiche, e parzialmente dai dati disponibili.



The modelling of the radon potential map!!



Fruit Basket by Giuseppe Arcimboldo  
(ca. 1527–1593)

**THANK YOU FOR  
THE ATTENTION!!**

Giancarlo Ciotoli, PhD  
Institute of Environmental Geology and Geoeengineering  
National Research Council of Italy

[giancarlo.ciotoli@igag.cnr.it](mailto:giancarlo.ciotoli@igag.cnr.it)

# Dose rate at national scale

At Italian national scale a GRP map does not exist. A picture of the Italian natural radioactivity can be obtained by the Monitoring Network of the C.N. VV.F. (National Corp of Firefighters) (Riggio and Giuliani, 2008) (Law 469/1961 - Art. 10 Law 421/1996).

The Network includes 1237 real-time monitoring stations which measure the dose rate (cGy/h).

