

### SEZIONE 1. L'aria che respiriamo: perché la CO<sub>2</sub> è una «sentinella»?

Il radon-222 è un gas radioattivo naturale, incolore e inodore, e rappresenta la principale causa di tumore al polmone dopo il fumo. Radon e CO<sub>2</sub> hanno però un elemento in comune: **entrambi vengono diluiti dal ricambio d'aria [1]**. Quando la ventilazione diminuisce, le loro concentrazioni tendono ad aumentare; quando si arieggia, diminuiscono. Per questo la CO<sub>2</sub>, facilmente misurabile con sensori economici e rapidi, può diventare un proxy, cioè una **“sentinella” delle condizioni favorevoli all’accumulo di radon**. Inoltre, essendo prodotta dagli occupanti, la CO<sub>2</sub> indica quando i locali sono realmente utilizzati. Il suo monitoraggio può quindi suggerire **quando ventilare**, manualmente o automaticamente, riducendo allo stesso tempo CO<sub>2</sub> e radon **[2][3]**. Lo studio esplora così un approccio **preliminare ma promettente** alla ventilazione “on demand”: intervenire efficacemente solo quando serve, con possibili vantaggi anche in termini di **risparmio energetico [4]**.

### SEZIONE 2. I dati di concentrazione di CO<sub>2</sub> e radon acquisiti

Per questo studio sono stati acquisiti 3 set di dati, ognuno costituito da una coppia di concentrazione di CO<sub>2</sub> (Senseair 030-8-0010) e radon (RadonEye 2+). I tre set corrispondono a: 1) abitazione unifamiliare, 08/2023–03/2024, Formello (RM); 2) abitazione unifamiliare, 08/2026–09/2026, Manziana (RM); 3) luogo lavorativo edificio storico, 02/2026–06/2026, Rocca di Papa (RM). I risultati relativi all’ultimo caso sono quelli illustrati di seguito.

### SEZIONE 3. Il modello fisico adottato vs lo stato dell’arte

L'edificio considerato è rappresentato come una **camera ben miscelata** (single-zone box model): CO<sub>2</sub> e radon sono considerati omogenei nel volume e soggetti allo stesso **tasso di ricambio d'aria**  $\lambda_v$ .

#### 3.1 Bilancio della CO<sub>2</sub>

Dalla pendenza del segnale CO<sub>2</sub> vengono identificati **tre regimi**:

| Regime     | Condizione                | Significato                |
|------------|---------------------------|----------------------------|
| Flat       | $ dC/dt  < \text{soglia}$ | chiuso, sola infiltrazione |
| Increasing | $dC/dt > \text{soglia}$   | occupato, finestre chiuse  |
| Decreasing | $dC/dt < -\text{soglia}$  | ventilato, finestre aperte |

Se  $C$  è la concentrazione di CO<sub>2</sub> indoor e  $C_{\text{ext}}$  la sua concentrazione di fondo esterna, in **assenza di occupanti** si ha  $dC/dt = \lambda_v (C_{\text{ext}} - C)$ , mentre in **presenza di occupanti** si ha  $dC/dt = \frac{G}{V} + \lambda_v (C_{\text{ext}} - C)$ . Per ciascun regime, tramite il fit dei dati è possibile ricavare  $\lambda_v$ . Nel regime **increasing** viene anche stimata anche la sorgente respiratoria  $G/V$ . Il fit è ai **minimi quadrati pesati**, utilizzando l'incertezza delle medie orarie; le incertezze dei parametri derivano dalla matrice di covarianza. Nel caso in esame, il fit del regime flat restituisce  $\lambda_v^{(\text{flat})} = 0,0089 \pm 0,0015 \text{ h}^{-1}$ , mentre, dal regime increasing, si ottiene  $G/V = 12 \pm 1 \text{ ppm h}^{-1}$ .

#### 3.2 Il $\lambda_v$ adottato per il radon

Per il bilancio del radon si utilizza il valore  $\lambda_v^{(\text{flat})}$ , rappresentativo di una delle condizioni di **minimo ricambio d'aria** e quindi più favorevole all'accumulo. Durante la ventilazione attiva il radon viene rapidamente diluito verso il fondo esterno e la stima della sorgente  $E/V$  diventa poco sensibile. Nel regime flat, invece, la minore ventilazione rende l'andamento della concentrazione maggiormente sensibile all'esalazione dal suolo, consentendo una stima più robusta del termine sorgente di radon  $E/V$ .

#### 3.3 Stato dell'arte e novità del lavoro

Negli approcci **tradizionali**, i periodi di accumulo vengono normalmente analizzati imponendo  $\lambda_v$  da una misura o stima esterna, o valori tabulati, e adattando quindi la sola sorgente di esalazione  $E/V$ . Questo è necessario perché  $\lambda_v$  ed  $E/V$  sono fortemente correlati nel bilancio del radon: **dal solo andamento del radon,  $\lambda_v$  non è identificabile in modo univoco**. La novità proposta consiste nell'utilizzare la **CO<sub>2</sub> per stimare direttamente  $\lambda_v$  dai dati dell'edificio**. Il parametro non è quindi assunto a priori, ma misurato durante il monitoraggio radon-CO<sub>2</sub> combinato; nel successivo bilancio del radon rimane come principale incognita la sorgente  $E/V$ . La CO<sub>2</sub> permette inoltre di riconoscere automaticamente i diversi stati di ventilazione e di verificare sperimentalmente la sua capacità di agire come **proxy della dinamica del radon in aria [5]**.

### 3.4 Bilancio del radon

Il radon entra nell'ambiente indoor attraverso una **sorgente  $E/V$** , viene **rimosso** dalla **ventilazione** e **decade** radioattivamente **[6]**:

$$\frac{dC_{\text{Rn}}}{dt} = \frac{E}{V} + \lambda_{v,\text{Rn}} C_{\text{Rn,ext}} - (\lambda_{v,\text{Rn}} + \lambda_{\text{dec}}) C_{\text{Rn}}$$

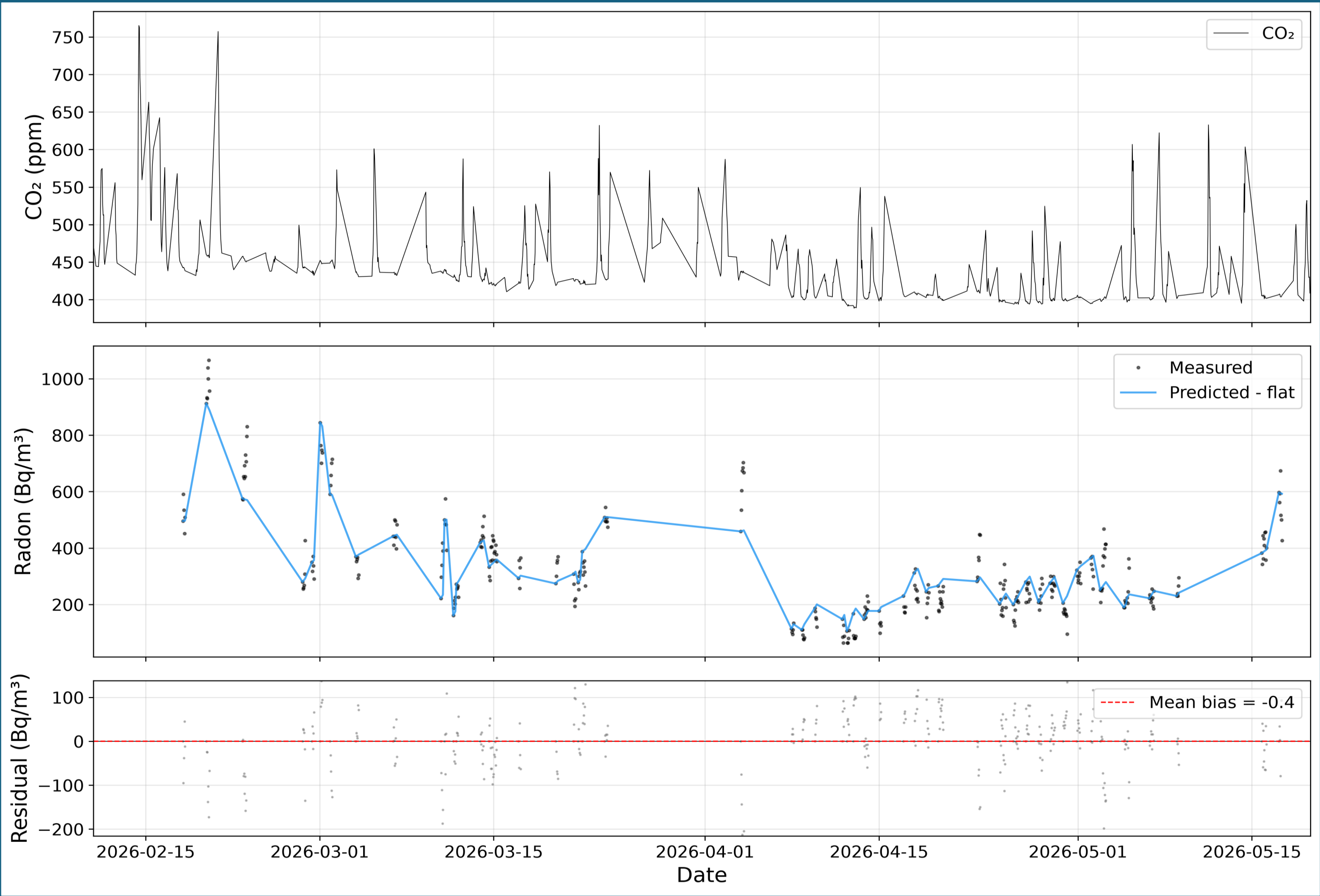
Con  $\lambda_{\text{dec}} = 0,00756 \text{ h}^{-1}$  e  $\lambda_{v,\text{Rn}} = \kappa \cdot \lambda_v^{(\text{flat})}$  dove  $\kappa$  rappresenta un eventuale fattore correttivo delle differenze di trasporto e miscelazione tra CO<sub>2</sub> e radon. Con  $E/V$  costante, la soluzione è:

$$C_{\text{Rn}}(t) = C_{\text{Rn,eq}} + (C_{0,\text{Rn}} - C_{\text{Rn,eq}}) e^{-\lambda_{\text{loss}} t} \text{ dove } C_{\text{Rn,eq}} = \frac{E/V + \lambda_{v,\text{Rn}} C_{\text{Rn,ext}}}{\lambda_{v,\text{Rn}} + \lambda_{\text{dec}}}$$

La sorgente del radon può essere assunta **costante** oppure **variabile nel tempo**,  $E/V(t)$ , includendo l'influenza delle condizioni meteorologiche adottando la pressione atmosferica del database open source ERA5. L'incertezza su  $E/V$  è ricavata dalla covarianza del fit e propagata a  $C_{\text{Rn}}$ .

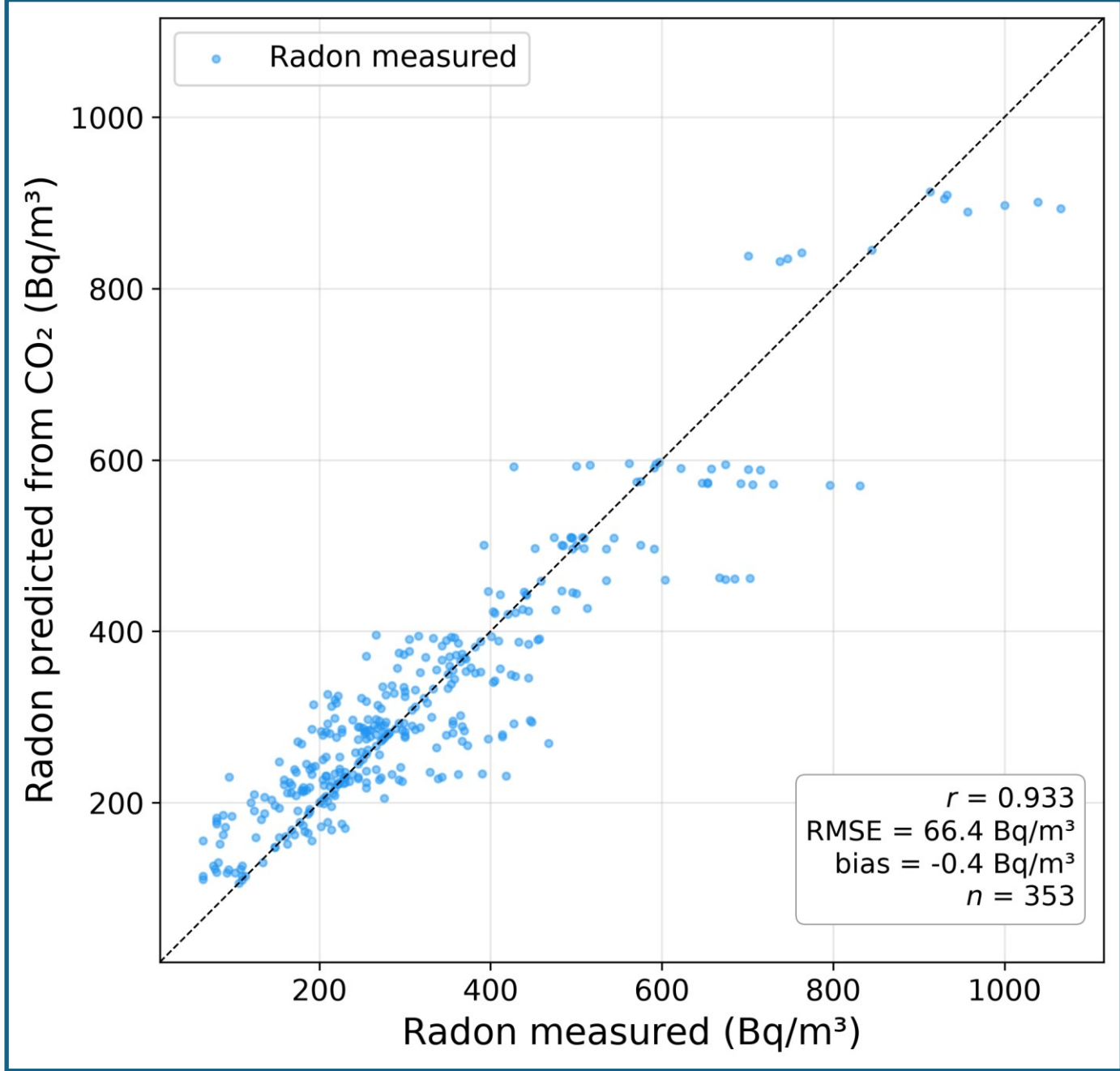
### SEZIONE 4. Risultati: la CO<sub>2</sub> predice il radon

Il proxy è validato **stimando la concentrazione di radon**  $C_{\text{Rn,eq}}$  a partire dalla **CO<sub>2</sub> misurata  $C$** , utilizzando  $\lambda_v^{(\text{flat})}$ , e confrontandolo con gli andamenti realmente monitorati del radon nel regime *flat*.



La correlazione indica che il modello riproduce in modo promettente la variabilità osservata, mentre il bias prossimo a zero evidenzia l'assenza di una significativa sovra- o sottostima sistematica. I potenziali vantaggi:

- **Mitigazione:** l’andamento della CO<sub>2</sub> può segnalare condizioni favorevoli anche all'accumulo di radon, indicando quando agire.
- **Efficienza energetica:** la ventilazione può essere attivata solo quando necessaria.
- **Accessibilità:** sensori CO<sub>2</sub> relativamente economici permettono reti di monitoraggio più capillari.



### SEZIONE 5. Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati, ancora preliminari, indicano quindi che la CO<sub>2</sub> può rappresentare un **proxy promettente della dinamica del radon**. Dopo calibrazione mediante misure dirette di radon, il sistema potrebbe essere utilizzato per individuare condizioni di progressivo accumulo e **pilotare la ventilazione in modo adattivo**.

Tra gli sviluppi futuri:

- validare il metodo su **altri dataset** ed **estensione ad altri parametri**;
- definire **soglie CO<sub>2</sub> operative**, quali il **livello di riferimento a 300 Bq/m³**;
- quantificare le differenze di trasporto e miscelazione tra CO<sub>2</sub> e radon;
- realizzare un prototipo **CO<sub>2</sub>-only** per controllo automatico della ventilazione, **riducendo esposizione e consumi energetici**.

#### Bibliografia

- [1] Dovjak, M. et al. **Analysis of Ventilation Efficiency as Simultaneous Control of Radon and Carbon Dioxide Levels in Indoor Air Applying Transient Modelling**. *Int. Journal of Environmental Research and Public Health* **2022**, 19(4), 2125. DOI: [10.3390/ijerph19042125](https://doi.org/10.3390/ijerph19042125).  
[2] Stabile, L.; Dell'Isola, M.; Frattolillo, A.; Massimo, A.; Russi, A. **Effect of natural ventilation and manual airing on indoor air quality in naturally ventilated Italian classrooms**. *Building and Environment* **2016**, 98, 180–189. DOI: [10.1016/j.buildenv.2016.01.009](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.009).  
[3] Szczepanik-Scislo, N.; Grządziel, D.; Mazur, J.; Kozak, K.; Schnotale, J. **Influence of Human Activity on Radon Concentration, Indoor Air Quality, and Thermal Comfort in Small Office Spaces**. *Sensors* **2024**, 24(15), 4949. DOI: [10.3390/s24154949](https://doi.org/10.3390/s24154949).  
[4] Jeong, J.; Cho, K. **Experimental Study on CO<sub>2</sub> and Radon Mitigations in an Apartment Using a Mechanical Ventilation System**. *Buildings* **2023**, 13(6), 1439. DOI: [10.3390/buildings13061439](https://doi.org/10.3390/buildings13061439).  
[5] Dvjak, M.; Fujiyoshi, S.; Maruyama, F.; Vaupotić, J. **A CO<sub>2</sub>–Radon–Microbiome Triad for Operational IAQ Diagnostics in a Retrofitted Kindergarten**. *Indoor Air* **2026**. DOI: [10.1155/ina/6302015](https://doi.org/10.1155/ina/6302015).  
[6] Andersen, C.E.; Bergsøe, N.C.; Majborn, B.; Ulbak, K. **Radon and Natural Ventilation in Newer Danish Single-Family Houses**. *Indoor Air* **1997**, 7(4), 278–286. DOI: [10.1111/j.1600-0668.1997.00007.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.00007.x).