



# QAES - Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici

Strumentazione a basso costo per le misure di qualità dell'aria interna:  
limiti e possibilità



Programma di Cooperazione Interreg V A "Italia – Svizzera 2014-2020"  
Progetto "Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici - QAES" (ID n. 613474)

Ingrid Demanega

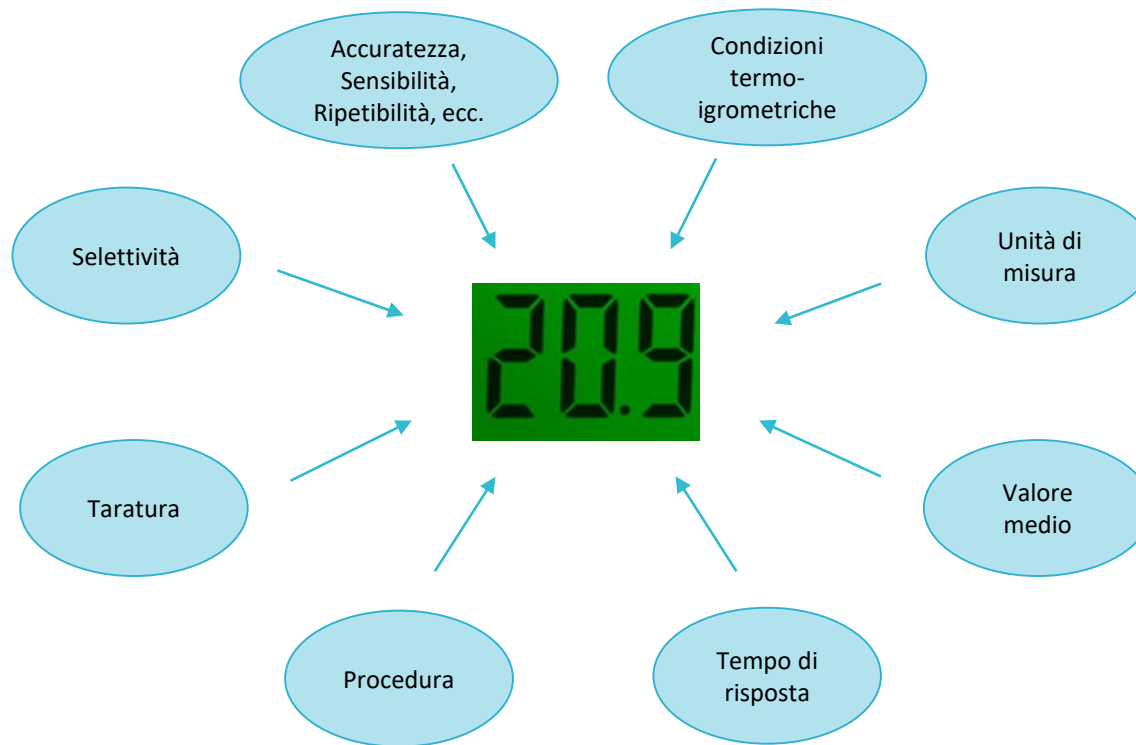


# Contenuti

- Il contesto della misura
- Vantaggi e svantaggi della misura con strumentazione a basso costo
- Accuratezza e precisione
- Standard di qualità dei dati per il monitoraggio di IAQ – RESET Air
- Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale



# Misura della qualità dell'aria





# Misura della qualità dell'aria



Anche per le misure di IAQ con strumentazione a basso costo è **FONDAMENTALE** conoscere il contesto della misura



## Strumentazione a basso costo per la misura di IAQ

- + Prezzo e accessibilità
- + Possibilità di integrazione nella domotica di un edificio
- + Installazione facile e veloce
- + Occupa poco spazio
- + Lettura dati in tempo reale via App / piattaforma web
- + Monitoraggio in continuo della qualità dell'aria interna
- + Risposta in tempo reale a seguito di generazione di inquinanti
- Mancanza di sufficiente conoscenza del “contesto” della misura
- Mancanza di un esperto capace di interpretare i dati
- Spesso non sono previste tarature dello strumento
- Assenza di procedure di misura standardizzate

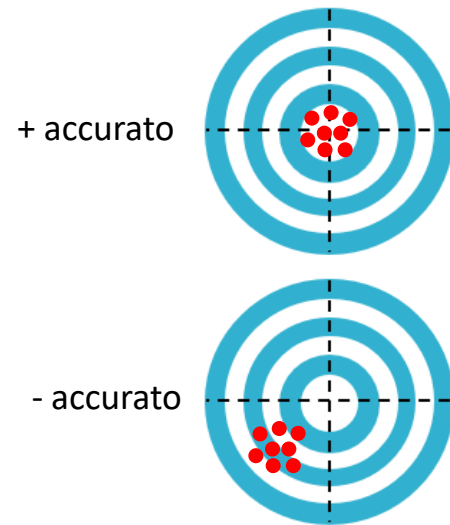


## Accuratezza

- L'**accuratezza** di uno strumento di misura indica quanto il **valore misurato** si avvicina al **valore vero**.
- L'accuratezza è legata alla presenza di **errori sistematici**.

$$\frac{V_{misurato} - V_{vero}}{V_{vero}} \cdot 100$$

- La valutazione dell'accuratezza strumentale viene fatta tarando lo strumento tramite opportuni campioni.

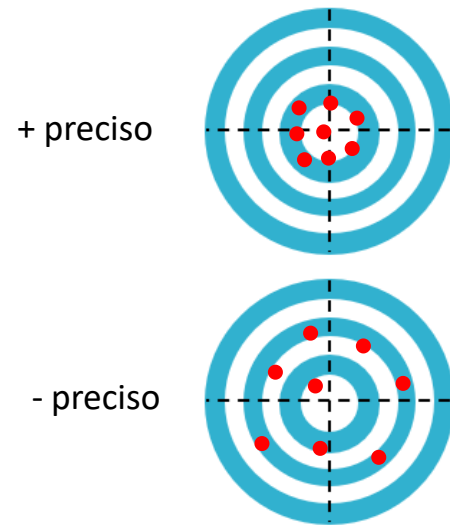




# Precisione

- La **precisione** di uno strumento di misura indica la capacità di misurare lo stesso valore, a parità di condizioni.
- La precisione è legata alla presenza **di errori casuali**.

$$\frac{V_{misurato} - V_{medio}}{V_{medio}} \cdot 100$$





		PRECISIONE	
		elevata	scarsa
ACCURATEZZA	elevata		
	scarsa		





# Accuratezza di uno strumento di misura

- Può essere espressa nei seguenti modi:
  - % del fondo scala
  - % della lettura
  - valore assoluto
- Può essere specificato di utilizzare il valore più sfavorevole o la somma di due valori



# Accuratezza di uno strumento di misura

- Esempio

CO<sub>2</sub>

400-5,000ppm ±75ppm / or 10%

CO <sub>2</sub>				
Valore misurato	Errore di accuratezza ±75ppm	Errore di accuratezza ±10%	<b>Errore massimo di accuratezza</b>	Valore misurato ± errore di accuratezza
[ppm]	[ppm]	[ppm]	<b>[ppm]</b>	[ppm]
400	75	40	<b>75</b>	400±75
800	75	80	<b>80</b>	800±80
1200	75	120	<b>120</b>	1200±120
1600	75	160	<b>160</b>	1600±160
2000	75	200	<b>200</b>	2000±200
2400	75	240	<b>240</b>	2400±240
2800	75	280	<b>280</b>	2800±280
3200	75	320	<b>320</b>	3200±320
3600	75	360	<b>360</b>	3600±360
4000	75	400	<b>400</b>	4000±400
4400	75	440	<b>440</b>	4400±440
4800	75	480	<b>480</b>	4800±480
5000	75	500	<b>500</b>	5000±500



# Monitor

per la misura della qualità dell'aria



- **RESET Air** – standard di qualità dei dati per il monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti interni
  - Requisiti minimi delle specifiche dei sensori di
    - Temperature
    - Umidità relativa
    - CO<sub>2</sub>
    - PM<sub>2.5</sub>
    - VOC

Prestazioni	Classificazione
Classe A	Scientifico
Classe B	Professionale
Classe C	Domestico

+ accuratezza  
↑  
- accuratezza



# Monitor

per la misura della qualità dell'aria



- **RESET Air** – standard di qualità dei dati per il monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti interni

		Grade A	Grade B	Grade C
a	Sampling Type	Active Airflow	Active Airflow	N/A
b	Sensor Output Resolution	1	1	5
c	Measuring Range	0 - 1000	0 - 500	0 - 300
d	Accuracy	0 - 150 : ±2 && 10% 150 - 300 : ±5 && 15% 300 - 500 : 15% 500 - 1000 : 20%	0 - 150 : ±5 && 15% 150 - 500 : ±5 && 20%	0 - 300 : ±5 && 30%
e	Performance Check and Re-calibration	Required	Required	N/A

Requisiti per le specifiche del sensore PM2.5



# Monitor

per la misura della qualità dell'aria



- **RESET Air** – standard di qualità dei dati per il monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti interni

			Grade A	Grade B	Grade C
a	Sensor Output Resolution	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1	10	100
b	Measuring Range	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 - 5000	150 - 2000	150 - 1000
c	Accuracy	$\pm\%$	10 - 1000 : $\pm 10$ && 10% 1000 - 5000 : $\pm 10$ && 15%	150 - 600 : $\pm 20$ && 15% 600 - 2000 : $\pm 20$ && 20%	150 - 1000 : $\pm 100$ && 25%
f	Performance Check and Re-calibration		Required	Required	N/A

Requisiti per le specifiche del sensore TVOC

# Monitor

## per la misura della qualità dell'aria



- **RESET Air** – standard di qualità dei dati per il monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti interni

			Grade A	Grade B	Grade C
a	Sensor Output Resolution	ppm	1	5	10
b	Measuring Range	ppm	200 - 5000	400 - 5000	400 - 2000
c	Accuracy	± ppm	0 - 2000 : ±40 && 3% 2000 - 5000 : ±50 && 3%	400 - 2000 : ±50 && 3% 2000 - 5000 : ±50 && 5%	400 - 2000 : ±50 && 3% 2000 - 5000 : ±50 && 5%
d	Performance Check and Re-calibration		Required	Required	N/A

Requisiti per le specifiche del sensore CO<sub>2</sub>

<https://reset.build/standard/air>



Building and Environment 187 (2021) 107415



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Building and Environment

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/buildenv>

## Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions

Ingrid Demanega<sup>a,1</sup>, Igor Mujan<sup>b,1</sup>, Brett C. Singer<sup>c</sup>, Aleksandar S. Anđelković<sup>b</sup>,  
Francesco Babich<sup>a</sup>, Dusan Licina<sup>d,\*</sup><sup>a</sup> Institute for Renewable Energy, Eurac Research, Bolzano, Italy<sup>b</sup> University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia<sup>c</sup> Indoor Environment Group and Residential Building Systems Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA<sup>d</sup> Human-Oriented Built Environment Lab, School of Architecture, Civil and Environmental Engineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland



## Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

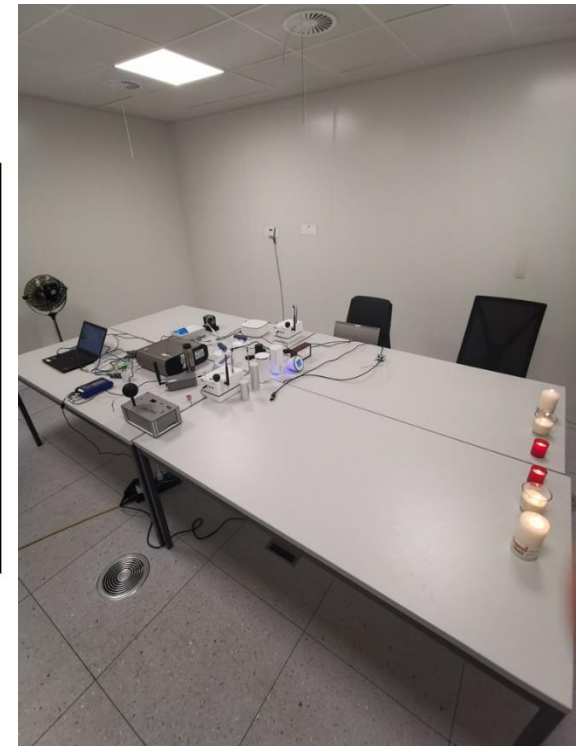
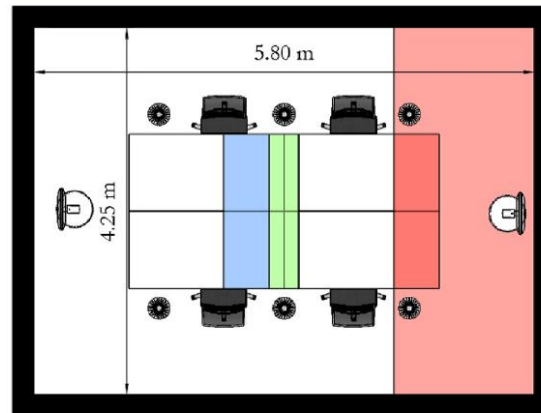
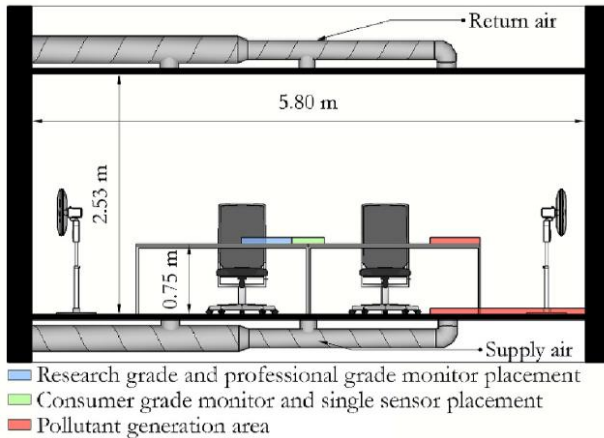
- AirVisual Pro € 220
- Awair 2nd ed. € 170
- Clarity € 1000
- Foobot € 219
- Kaiterra + CO2 € 191
- uHuu € 333
- NETATMO est -
- NETATMO int € 170



Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale



Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Parametri monitorati e strumentazione di riferimento

- Temperatura aria → Anemometro a filo caldo - Testo 435
- Umidità relativa → Analizzatore di gas LI-COR LI-850
- CO<sub>2</sub> → Analizzatore di gas LI-COR LI-850
- PM<sub>2.5</sub> / PM<sub>10</sub> → Spettrometro ottico ed elettrometro GRIMM - Model 1371



Analizzatore di gas LI-COR LI-850



GRIMM - Model 1371

Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Parametri monitorati e strumentazione di riferimento

- Temperatura aria → Anemometro a filo caldo - Testo 435
- Umidità relativa → Analizzatore di gas LI-COR LI-850
- CO<sub>2</sub> → Analizzatore di gas LI-COR LI-850
- PM<sub>2.5</sub> / PM<sub>10</sub> → Spettrometro ottico ed elettrometro GRIMM - Model 1371
- TVOC → 2 strumenti professionali basati sulla tecnologia PID  
(Rilevatore di fotoionizzazione)
  - GreyWolf AdvancedSense Pro - IQ-610
  - Aeroqual Photoionization Detector



GreyWolf AdvancedSense Pro - IQ-610



Aeroqual Photoionization Detector

Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Fonti di inquinanti e condizioni termo-igrometriche

Condizioni termo-igrometriche		
	Temperatura [°C]	Umidità relativa [%]
1 Condizioni invernali	20 ±1	30 ±5
2 Condizioni estive	26 ±1	70 ±5

Fonti di inquinanti				
	PM2.5	PM10	TVOC	CO <sub>2</sub>
1 Candele	x			
2 Deodorante per ambienti			x	
3 Zampirone	x			
4 Friggere popcorn	x	x		
5 Olio essenziale			x	
6 Vernice per legno			x	
7 Aspirapolvere		x		
8 CO <sub>2</sub> da bombola				x

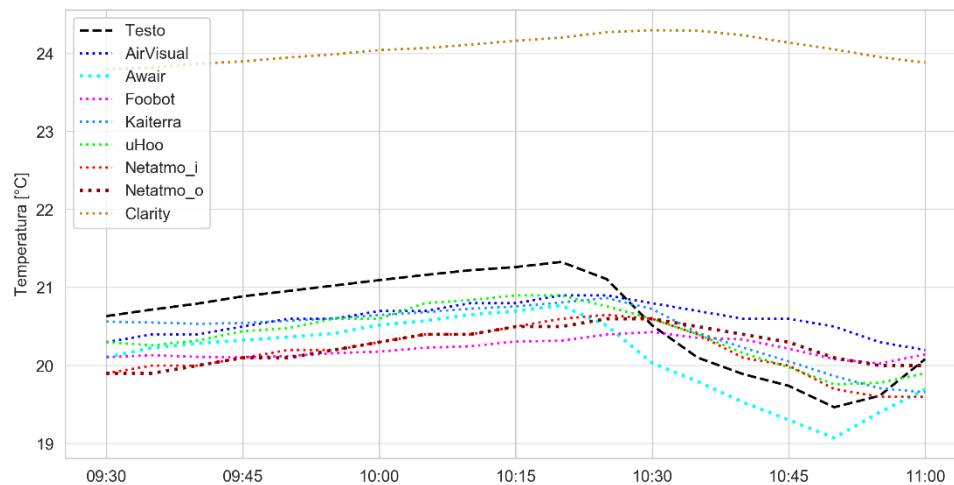
Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



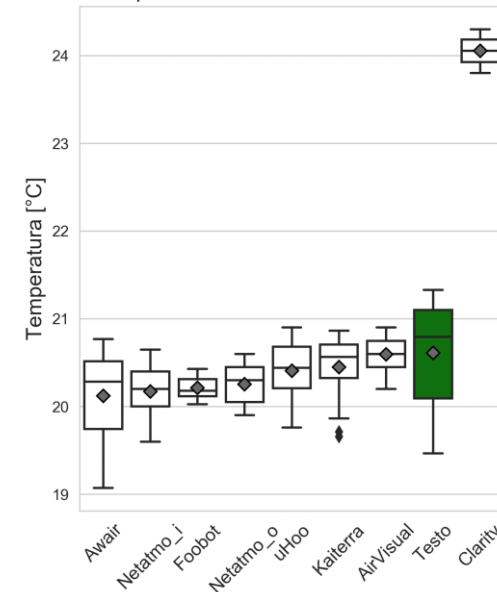
# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio della temperatura

Temperatura aria - condizione invernale



Temperatura aria - condizione invernale

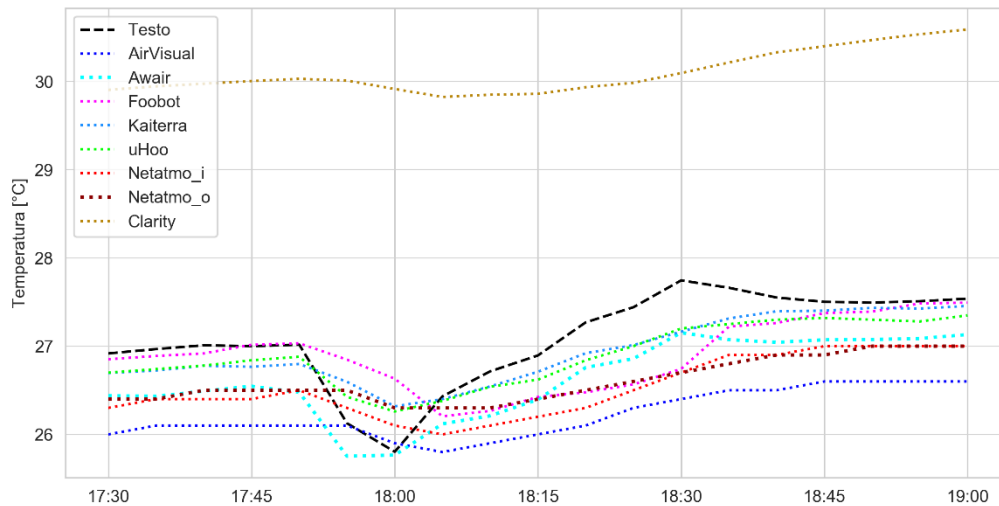


Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>

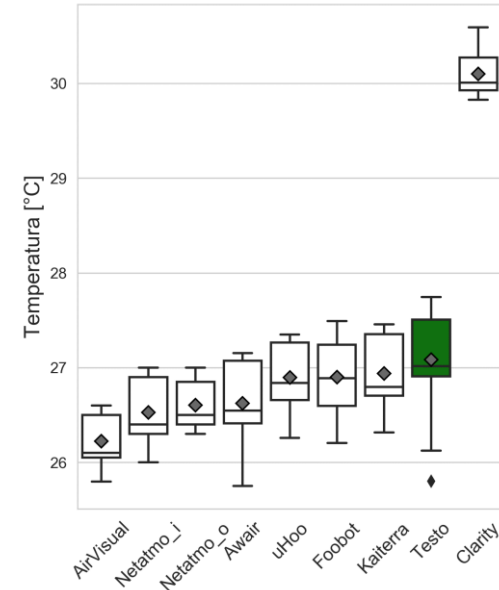
# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio della temperatura

Temperatura aria - condizione estiva



Temperatura aria - condizione estiva



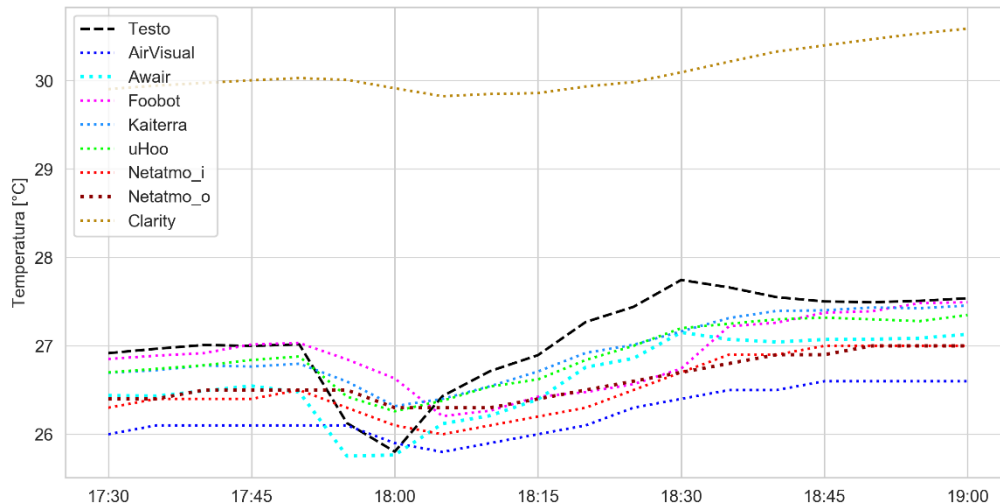
Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio della temperatura

Temperatura aria - condizione estiva



- Per la maggior parte dei monitor commerciali, **forte correlazione (PCC>0.7)\*** e **corrispondenza quantitativa accettabile (MAE < 0.6°C)\*** con strumento di riferimento
- Prestazione in termini di temperatura particolarmente scarsa per monitor **Clarity** (PCC=0.36 e MAE=3.33°C)

\*Valore mediato su entrambe le condizioni termo-igrometriche  
 PCC: Coefficiente di correlazione di Pearson  
 MAE: Mean absolute error / Errore assoluto medio

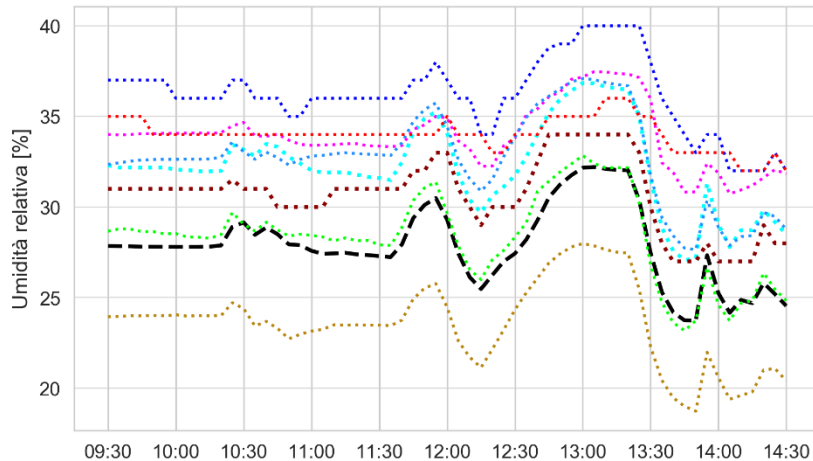
Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. Building and Environment, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>

# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

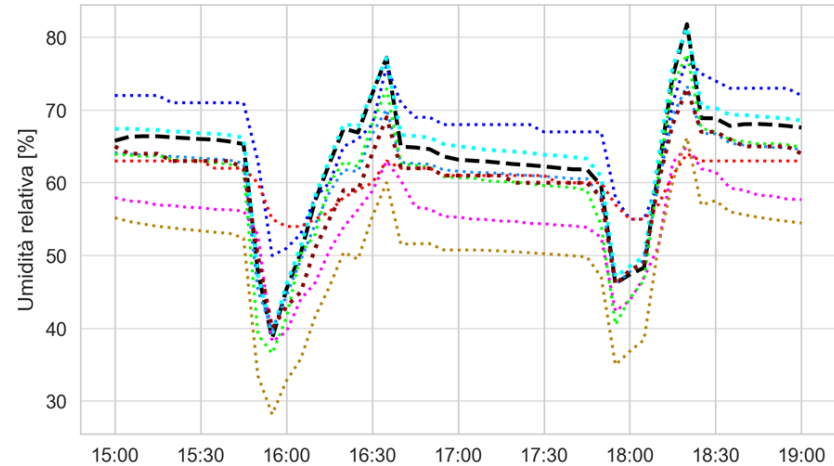
- Monitoraggio dell'umidità relativa



Umidità relativa - condizioni invernali



Umidità relativa - condizioni estive



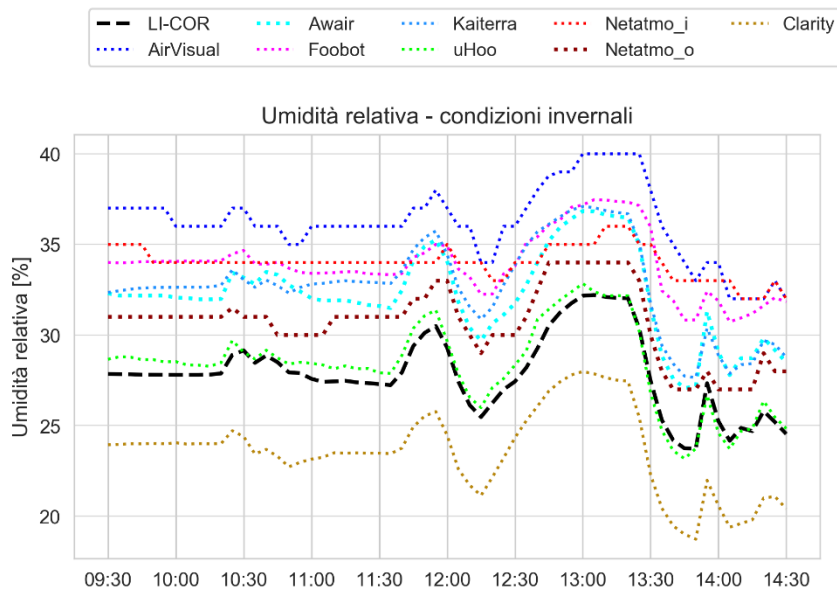
Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>





# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio dell'umidità relativa

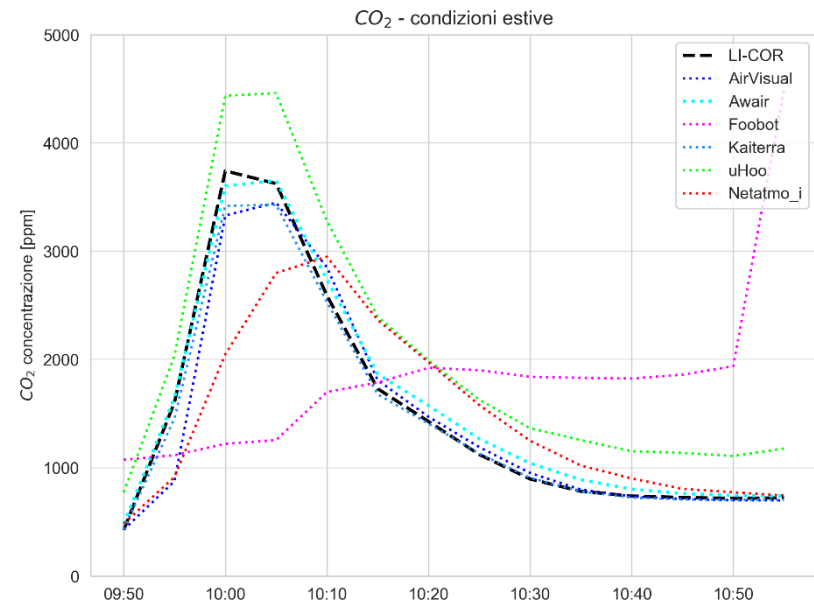
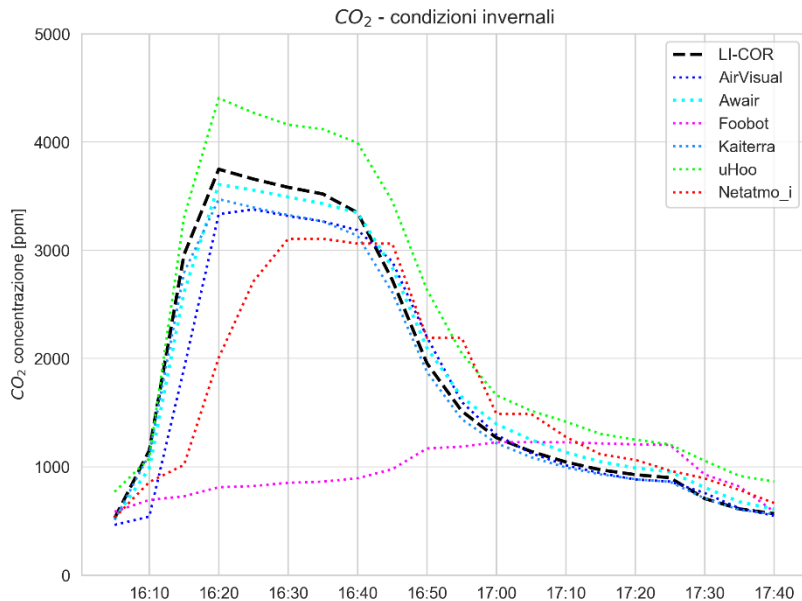


- Per tutti i monitor domestici con eccezione di Clarity, **correlazione molto forte (PCC>0.8)\*** con strumento di riferimento
- **Buona corrispondenza quantitativa (MAE < 5%UR)\*** per Awair, Kaiterra, Netatmo\_o e uHoo
- Errore medio assoluto (MAE) per AirVisual, Foobot e Netatmo\_i compreso tra 5.5-8.3%UR
- Clarity in condizioni invernali MAE = 4.3%UR, condizioni estive MAE =12.5%UR

\* Valore mediato su entrambe le condizioni termo-igrometriche

# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

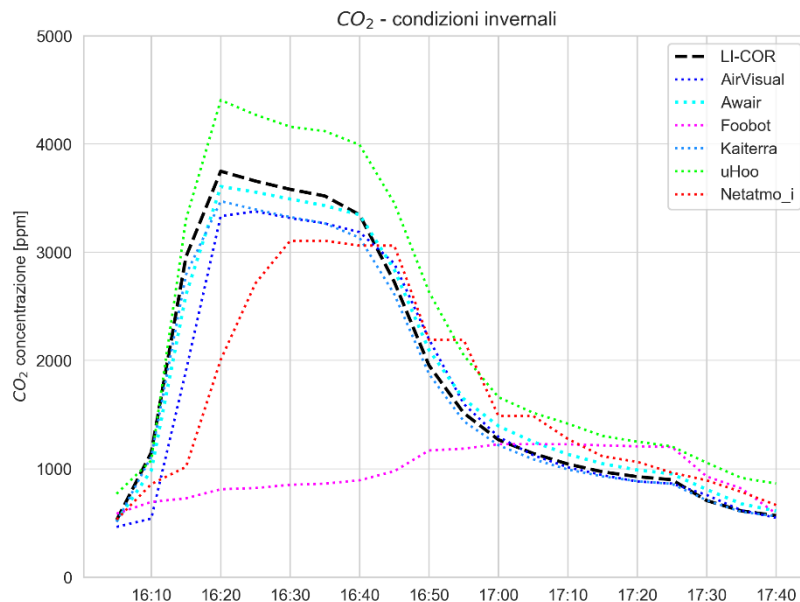
- Monitoraggio dalla CO<sub>2</sub>



Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>

# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio dalla CO<sub>2</sub>



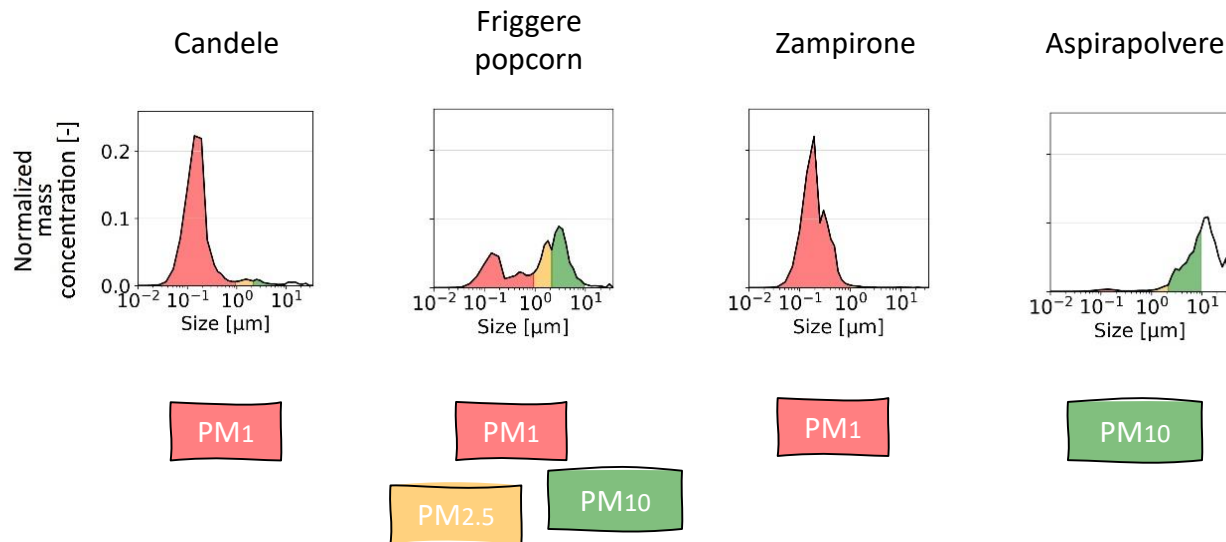
- Per tutti i monitor domestici con eccezione di Foobot e Netatmo\_i, **correlazione molto forte (PCC>0.9)\*** con strumento di riferimento, Netatmo\_i PCC=0.81
- **Buona corrispondenza quantitativa (MRE = 4-10%)\*** per AirVisual, Awair, Kaiterra
- Prestazione **non accettabile** per monitor **Foobot** (MRE = 80% e PCC=-0.29) -> concentrazione di CO<sub>2</sub> derivata da misura di TVOC

\*Valore mediato su entrambe le condizioni termo-igrometriche  
 MRE: Mean relative error / Errore medio relativo



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

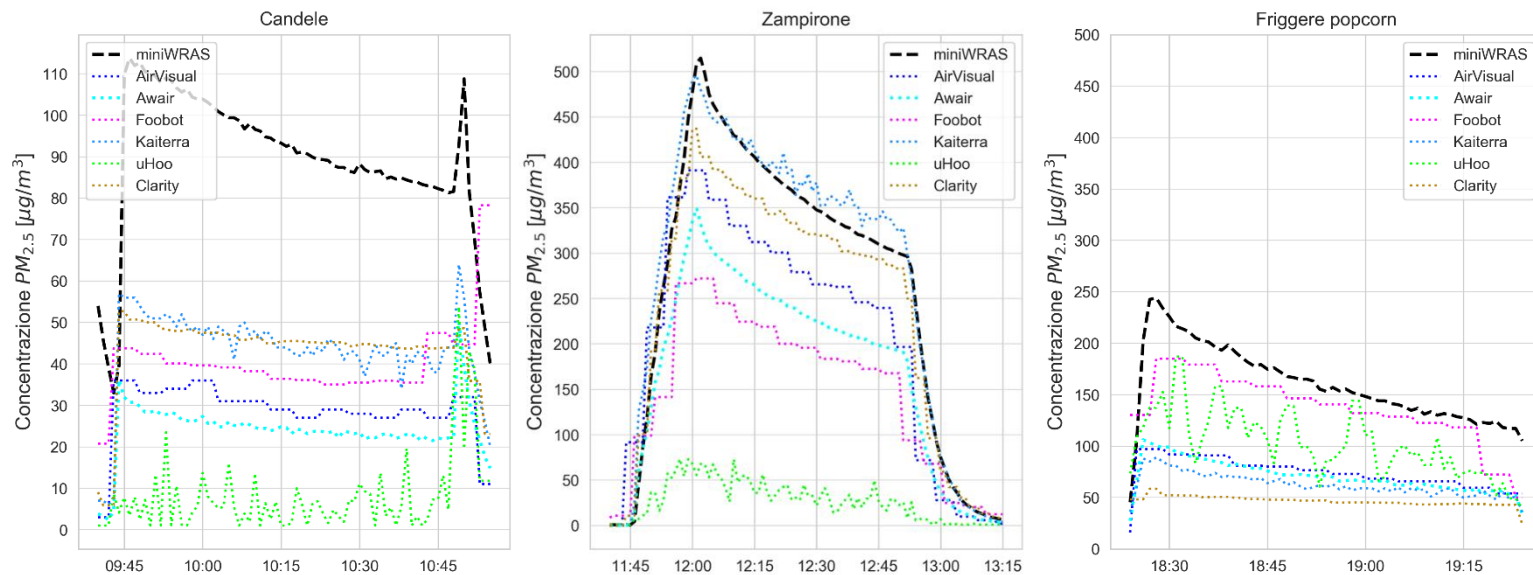
- Monitoraggio di particolato - Distribuzione di massa per dimensione



Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>

# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio di particolato PM<sub>2.5</sub>

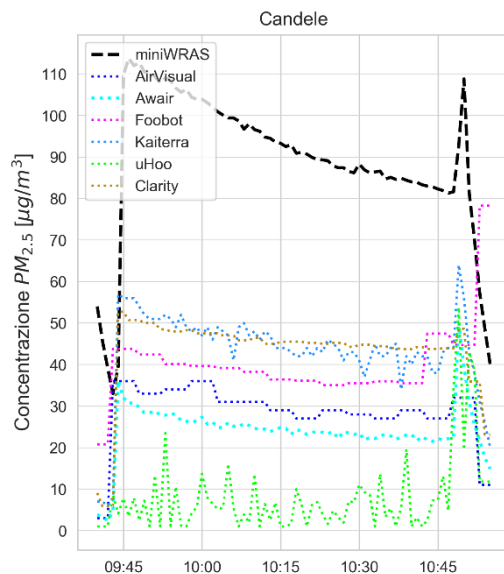


Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio di particolato PM<sub>2.5</sub>



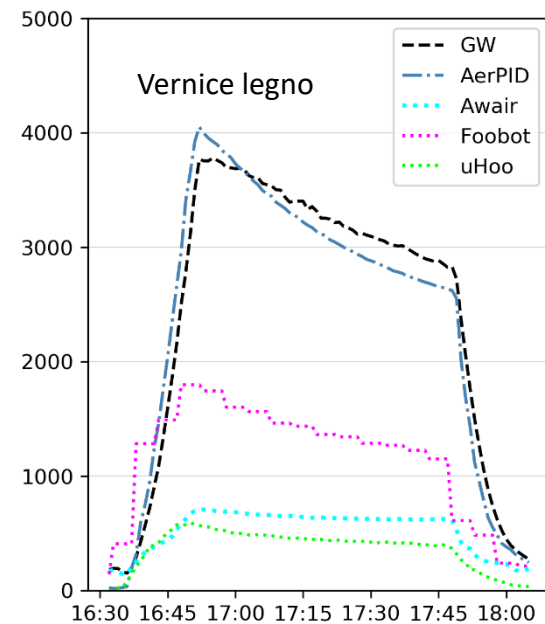
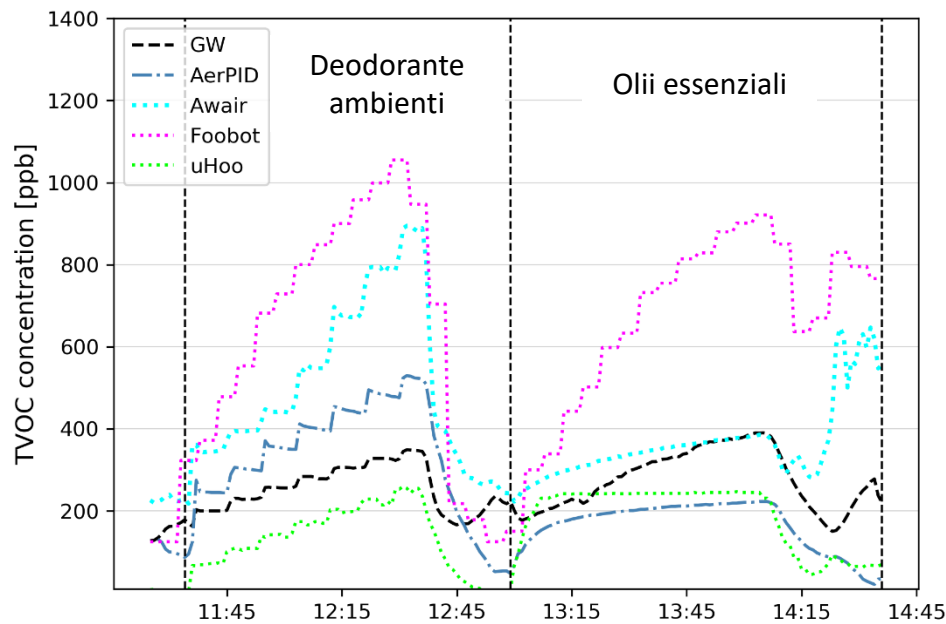
- Prestazioni dei monitor commerciali dipendono fortemente dalla sorgente, quindi dal diametro aerodinamico delle particelle
- I **monitor commerciali** testati **non** riescono a **rilevare** particelle di diametro **< 0.3 µm**
- **Scarsa corrispondenza quantitativa** nel caso di sorgenti con prevalentemente **particolato ultrafine (<1 µm)**
- In media, i monitor commerciali con le **migliori prestazioni (Awair, Clarity, Kaiterra)** si sono discostati dal riferimento di un **fattore 2**.
- **Forte correlazione (PCC > 0.6)** \* con strumento di riferimento per la maggior parte di sorgenti di particolato e monitor commerciali
- I dati di PM<sub>2.5</sub> degli attuali sensori a basso costo devono essere intesi come un'indicazione di un **cambiamento di stato** o una **stima approssimativa** piuttosto che una concentrazione effettiva in ambienti interni

\* Valore mediato su entrambe le condizioni termo-igrometriche

Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. Building and Environment, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>

# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

- Monitoraggio di composti organici volatili totali TVOC

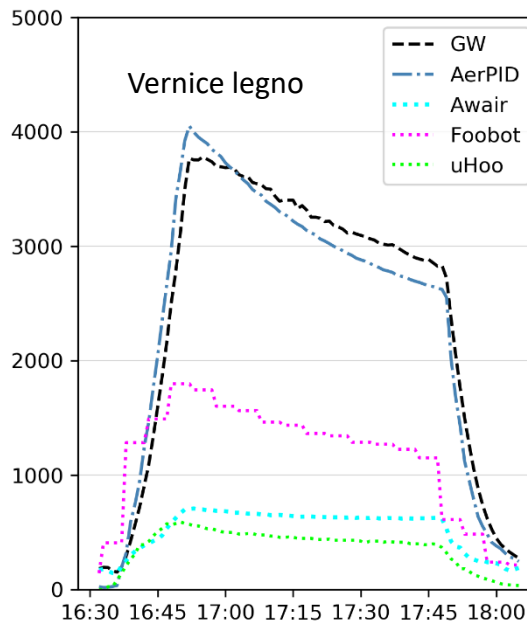


Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



# Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

## Monitoraggio di composti organici volatili totali TVOC



- Misura intrinsecamente difficile → sensori di TVOC hanno sensibilità diversa rispetto ai vari COV (dipende anche dal principio di funzionamento)
- Soprattutto i sensori PID producono risultati accettabili solo quando si misurano gruppi specifici di COV per cui sono calibrati
- Valori diversi anche tra i due sensori professionali (GreyWolf e Aeroqual) calibrati rispetto allo stesso gas (isobutene) prima degli esperimenti
- **Scarsa corrispondenza quantitativa** tra monitor commerciali e sensori professionali
- **Correlazione molto forte** con strumenti professionali (**PCC > 0.85**) \* (buone risposte dinamiche alle diverse attività)
- I dati di TVOC degli attuali sensori a basso costo devono essere intesi come un'indicazione di un **cambiamento di stato** o una **stima approssimativa** piuttosto che una concentrazione effettiva in ambienti interni

\* Valore mediato su entrambe le condizioni termo-igrometriche

Demaneaga, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>





## Valutazione della prestazione di strumentazione a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria – esperienza sperimentale

Monitor	Classificazione in base a MRE or MAE						
	Prezzo	PM <sub>2.5</sub>	CO <sub>2</sub>	TVOC	UR	T	Media
AirVisual	220	4	5	-	2	4	<b>3.8</b>
Awair	170	5	5	5	4	5	<b>4.8</b>
Clarity	1000	5	-	-	1	1	<b>3.0</b>
Foobot	219	1	1	1	1	5	<b>1.8</b>
Kaiterra	191	5	5	-	4	5	<b>4.8</b>
Netatmo_o	170	-	-	-	4	5	<b>4.5</b>
Netatmo_i		-	4	-	2	4	<b>3.3</b>
uHoo	333	3	3	5	5	5	<b>4.2</b>

Demanege, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>



## Conclusioni

- Strumentazione a basso costo ha un grande potenziale
- È fondamentale la conoscenza del contesto della misura
- Adatta per la misura quantitativa di temperatura, umidità relativa e CO<sub>2</sub>
- Per TVOC e particolato: indicazione affidabile sulla variazione di concentrazione + indicazione approssimativa del valore assoluto di concentrazione
- È sempre necessario un approccio critico nella lettura di una misura



Grazie per l'attenzione

Ingrid Demanega  
Eurac Research  
Ingrid.Demanega@eurac.edu