

# Qualità dell'aria indoor e i beni culturali

<sup>1</sup>E.G. Bolzacchini, <sup>1</sup>L. Ferrero, <sup>1</sup>M. Cefali, <sup>1</sup>N. Losi, <sup>2</sup>C. Rostagno, <sup>3</sup>S. Puteo

*<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca  
Piazza della Scienza 1, 20126, Milan, Italy.*

*<sup>2</sup>Ministero della cultura  
Segretariato Ministero della Cultura per la Lombardia,  
Palazzo Arese Littacorso Magenta, 24 - 20123 Milano*

*<sup>3</sup>Ministero della Cultura, Galleria Borghese, Piazzale Scipione Borghese, 500197 Roma*

*[ezio.bolzacchini@unimib.it](mailto:ezio.bolzacchini@unimib.it)*

# Indoor - Principali meccanismi di decadimento

Aerosol, composti gassosi,  
umidità e temperatura

Annerimento  
Black Carbon

Microbiologia  
Batteri, funghi

La risoluzione di questi problemi permette la conservazione programmata, preventiva e sostenibile, dei beni culturali e un aumento progressivo del numero dei visitatori.

## Conservazione programmata, preventiva e sostenibile

- Agisce sulle cause del deterioramento
- Ambiente conservativo ottimale
- Riduce i costi di assicurazione e restauro
- **Sostenibile** a livello energetico, economico, materiali, ecc.

## NORMATIVE AMBIENTALI IN AMBITI MUSEALI

Istituto Centrale del Restauro di Roma  $PM_{10} < 30 \mu g/m^3$   
ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.)  $PM_{2.5} < 10 \mu g/m^3$

Con sistema di filtrazione dell'aria

Cenacolo Vinciano, Milano

Assenza sistema filtrazione dell'aria

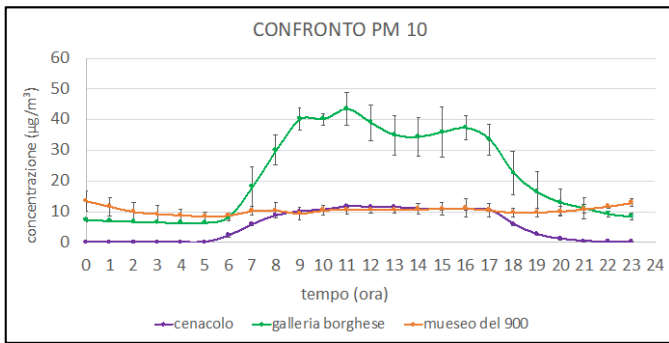
Palazzo Litta

Museo del 900, Milano

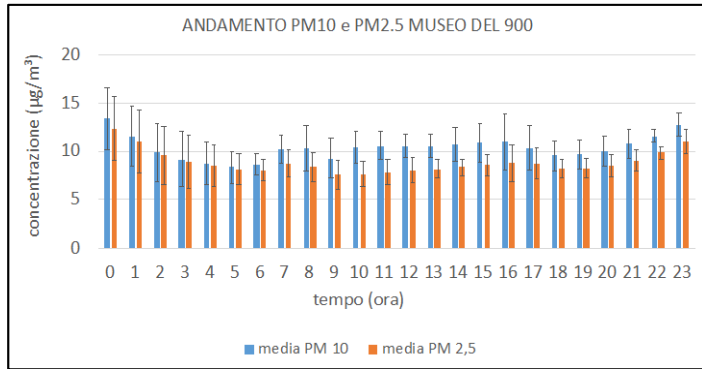
Galleria Borghese, Roma

Ambienti museali

Il ruolo dei visitatori



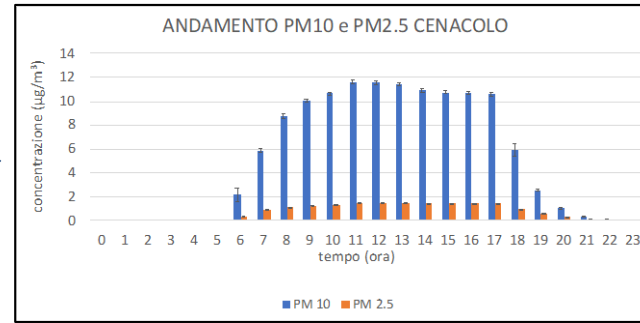
- Maggiori concentrazioni alla 'Galleria Borghese'
- Presenza di impianto di filtrazione al 'Cenacolo Vinciano.'



Nella teca:  $PM_{10} : 9.2 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$      $PM_{2.5} : 8.2 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$   
 $PM_1 : 8 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Basse concentrazioni di  $PM_{10}$  al 'Museo del 900' per la presenza di una teca di vetro

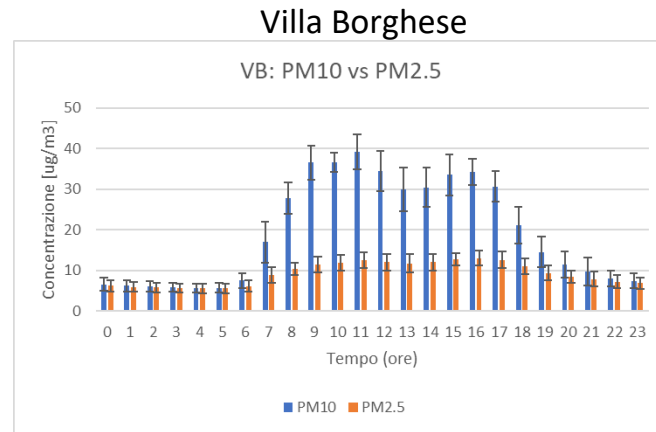
## GIORNO TIPO DI $PM_x$



Basse concentrazioni di  $PM_{2.5}$  al 'Cenacolo Vinciano' per la presenza dell'impianto di filtrazione  
 $PM_{10} = 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2.5} = 0.2-1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_1 < 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

$$\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}} = 0,14$$

ruolo dei visitatori



$PM_{10} = 19.4 \pm 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2.5} = 9.2 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $PM_1 : 7.5 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

$$\frac{PM_{2.5}(VB)}{PM_{10}(VB)} = 0,48$$

Valori intermedi

$$\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}} = 0,85$$

# Quarto Stato – Ruolo teca, protettiva

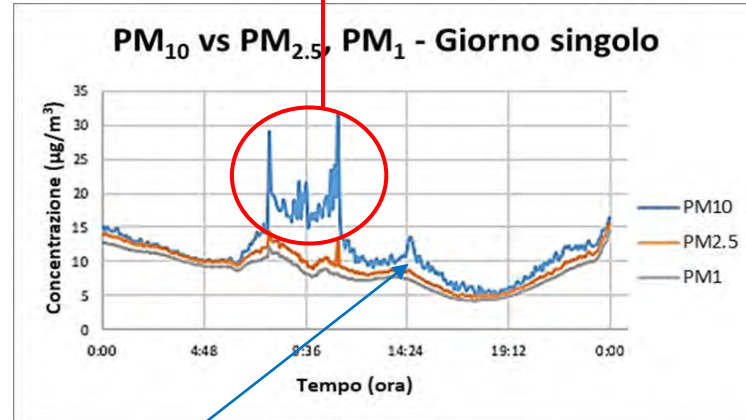


fenditura

passaggio SOLO della frazione inferiore a  $PM_{2.5}$

OPC fuori da teca

$PM_{10}$   $18.9 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Nella teca:  $PM_{10}$  :  $9.2 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $PM_{2.5}$  :  $8.2 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$

# BLACK CARBON Annerimento



Parte della frazione carboniosa che compone il particolato atmosferico.

Componente atmosferica con assorbimento della luce

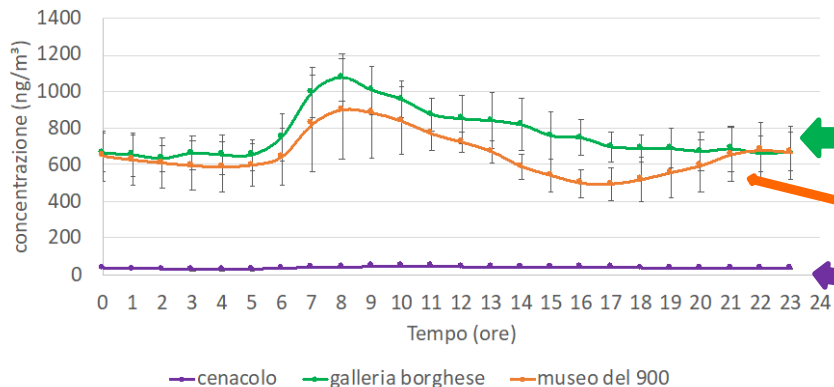
Indice di infiltrazione (*Quarto Stato*)

$$F_{INF} = \frac{[BC]_{indoor}}{[BC]_{outdoor}} = \begin{matrix} 0.8 \text{ giorno} \\ 0.6 \text{ notte} \end{matrix}$$



visitatori carrier di particolato!

CONFRONTO BC NEI TRE AMBIENTI MUSEALI



Il 'Museo del 900' e la 'Galleria Borghese' mostrano concentrazioni molto simili

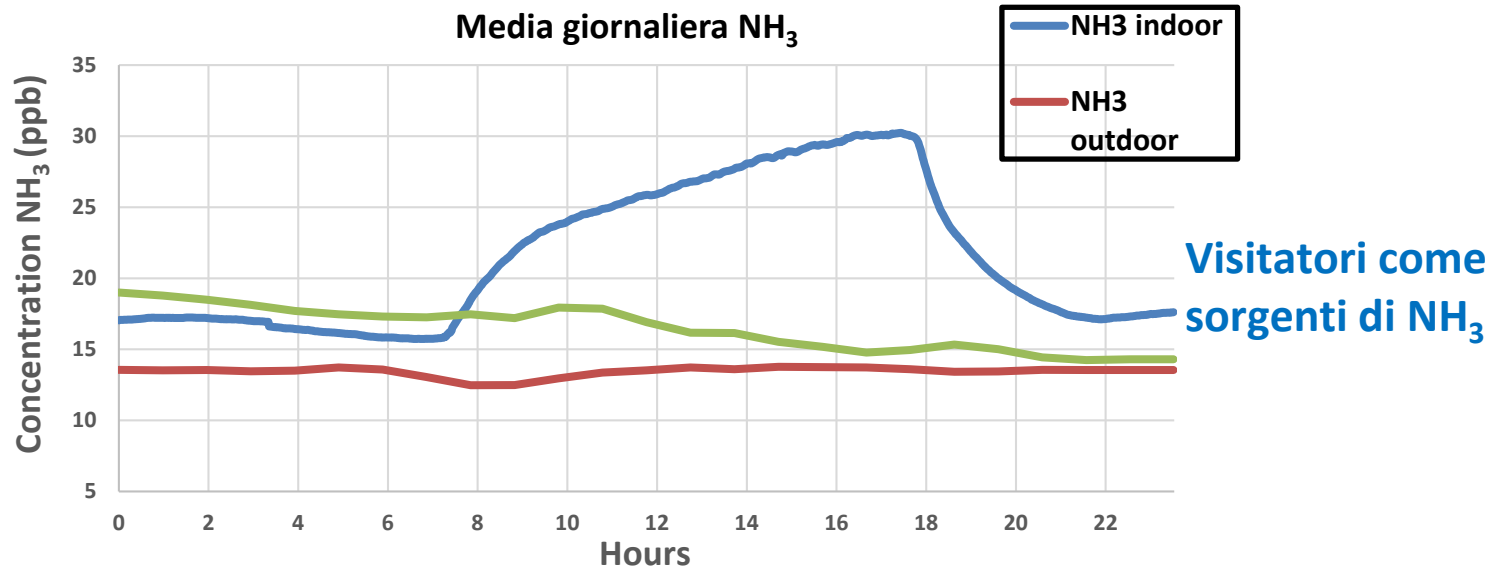
L'impianto di filtrazione dell'aria presente nel Refettorio Vinciano abbatte le concentrazioni di Black Carbon

CENACOLO  $36 \pm 2 \text{ ng/m}^3$   
MUSEO DEL 900  $670 \pm 65 \text{ ng/m}^3$   
GALLERIA BORGHESE  $766 \pm 82 \text{ ng/m}^3$

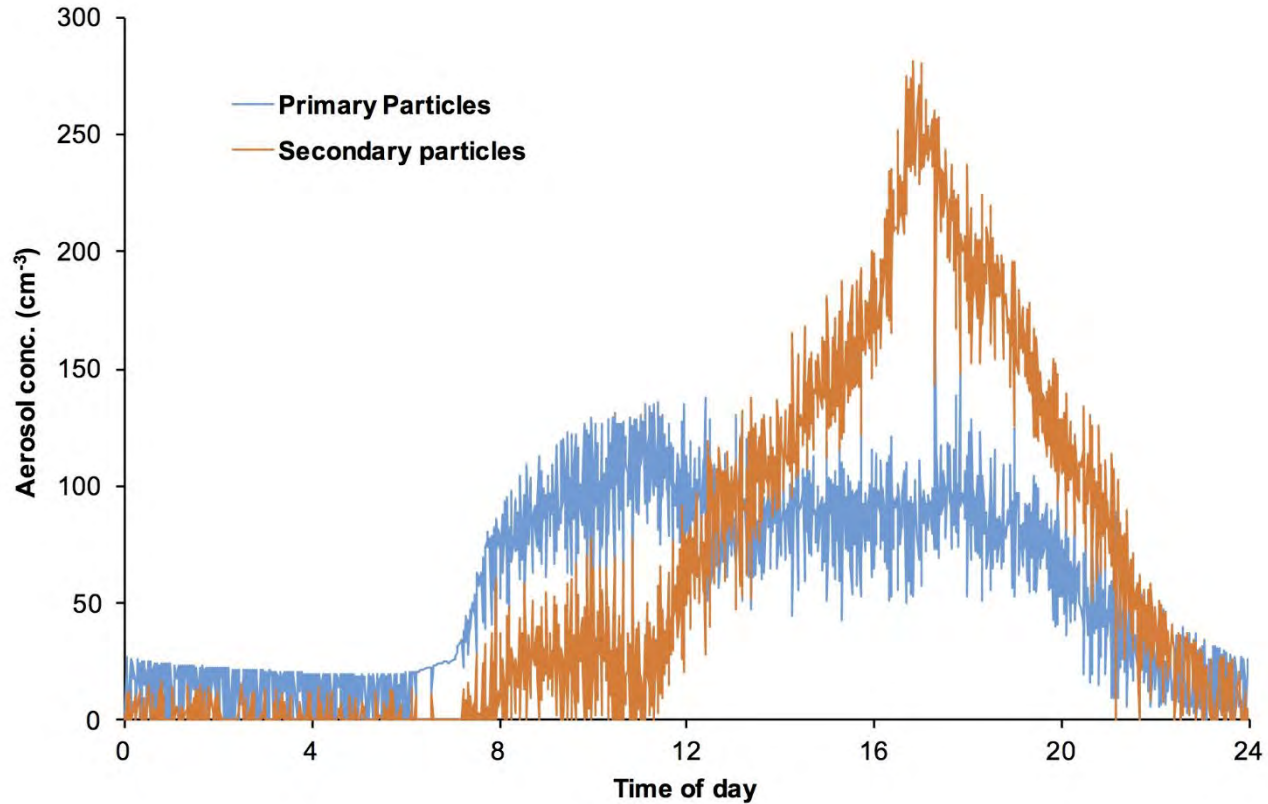
OUTDOOR MILANESE  $1110 \text{ ng/m}^3$

# Daily concentrations of **NH<sub>3</sub> Cenacolo Vinciano** and outdoor

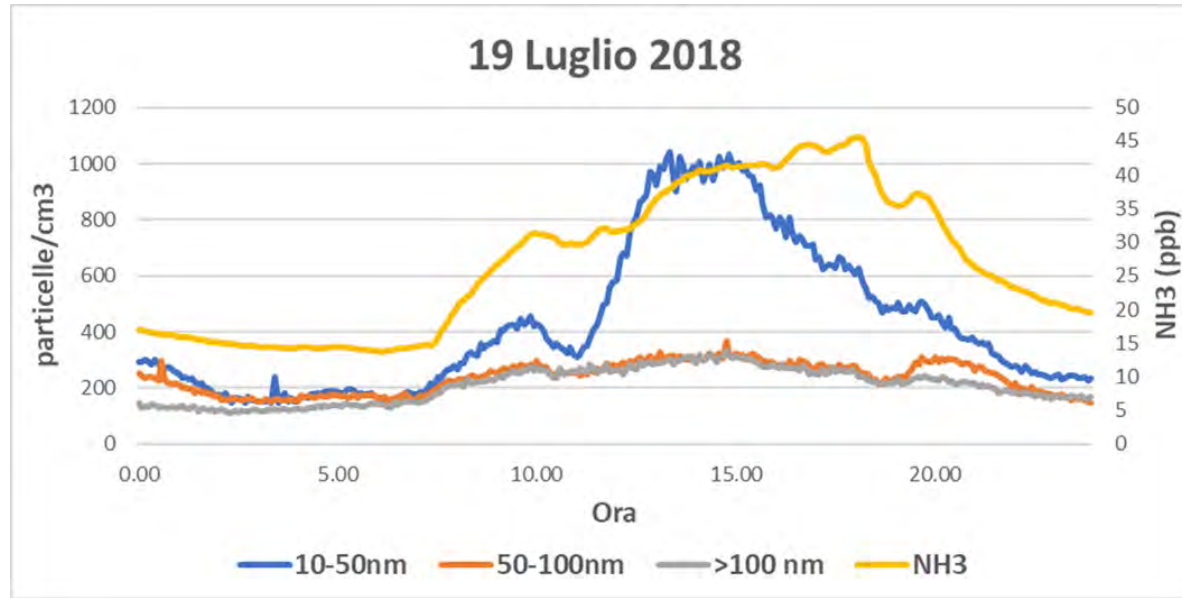
- **NH<sub>3</sub>** is present with **diurnal concentrations of 20-30 ppb** and constant night-time concentrations of 17 ppb.
- **Visitors are the source of NH<sub>3</sub>**
- On Monday (closing day) ammonia concentrations are found between 14-19ppb.
- **Outside** (Arpa) the concentration of **NH<sub>3</sub> is lower 13-14 ppb**.



## Cenacolo Vinciano. Model results for secondary PM<sub>x</sub>



## PM measurements of secondary origin. July 2018

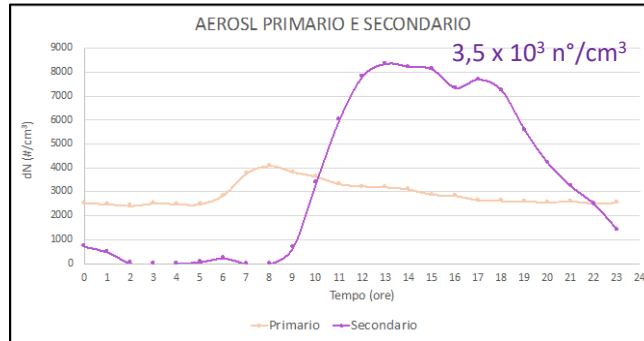


- The concentrations of the dimensional distributions were measured by scanning mobility particle sizer spectrometer (**SMPS**) to evaluate the formation of secondary particulate.
- The **10-50 nm class follows the trend of ammonia**, the **main source of secondary PM**.
- Nano particles promote growth processes by increasing the concentration of 50-100 nm particles and particles > 100 nm.



# MODELLO PARTICOLATO DI ORIGINE SECONDARIA ALLA GALLERIA BORGHESE

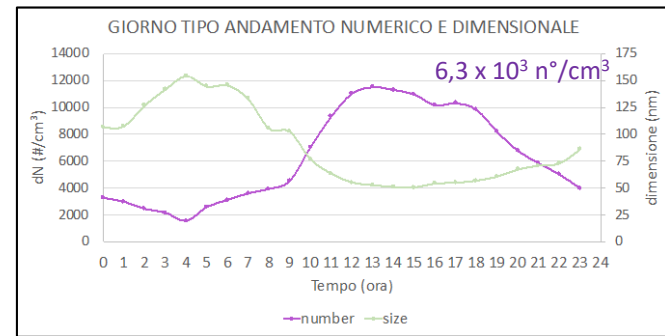
Dati calcolati da modello



La quasi totalità delle nanoparticelle risulta essere particolato di origine secondaria



Dati sperimentali



$$S_1 = \frac{N_{ps}}{BC_{indoor}}$$

Dato calcolato nelle ore di chiusura del museo

$$N_1 = S_1 * BC_{indoor}$$

$$N_{ps} = N_1 + N_2$$

Rodriguez and Cuevas, 2007  
Reche et al., 2011  
Ferrero et al., 2016

$N_{ps}$  → n° totale nanoparticelle  
 $BC_{indoor}$  → concentrazione BC riscontrata in indoor  
 $N_1$  → n° particelle di origine primaria  
 $N_2$  → n° di particelle di origine secondaria

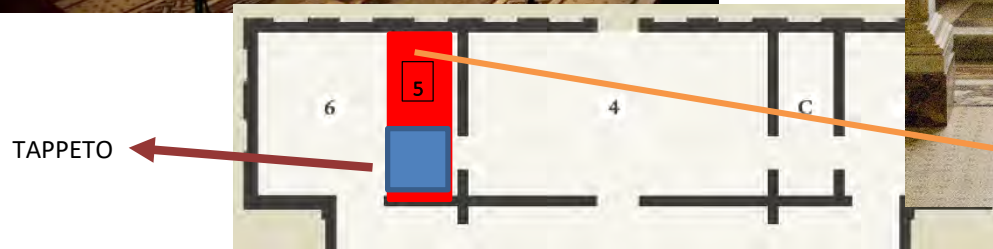
# ANNOSO PROBLEMA DELL'UTILIZZO DI TAPPETI IN AMBITI MUSEALI

MONITORAGGIO DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI AL'INTERNO DELLA SALA V DELLA GALLERIA BORGHESE

Presenza di mosaici romani risalenti dal I secolo a.C. al IV d.C.

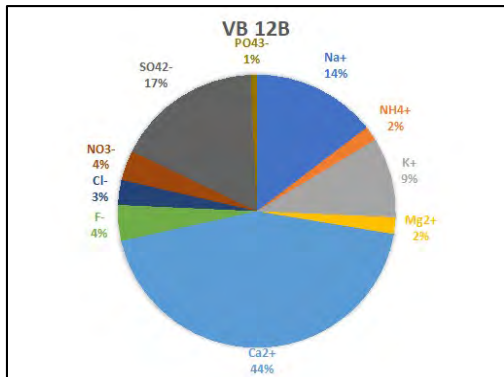


'Testa di Kore' IV secolo d.C.



# CASO DI STUDIO: ANNOSSO PROBLEMA DELL'UTILIZZO DI TAPPETI IN AMBITI MUSEALI

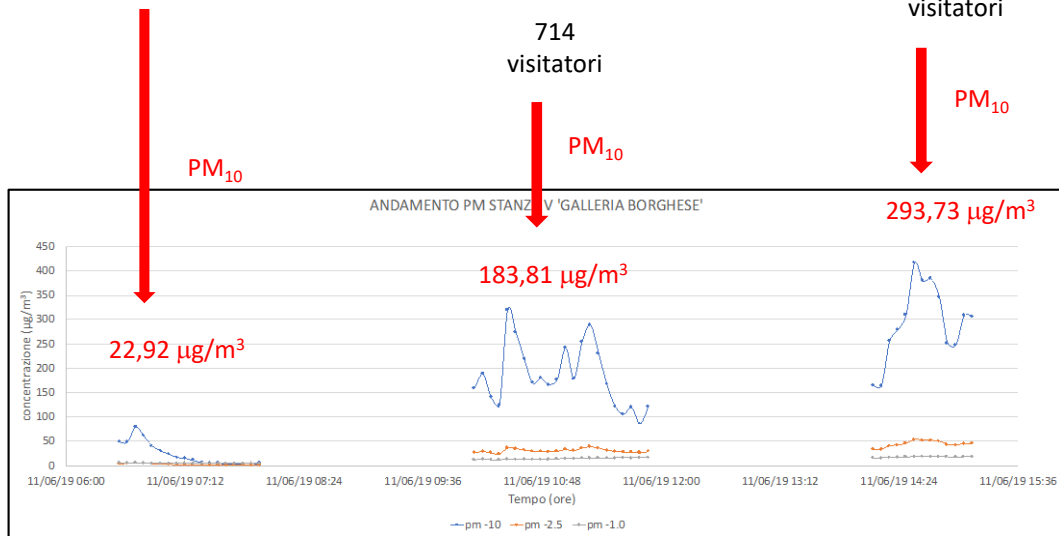
MONITORAGGIO DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI AL'INTERNO DELLA SALA V DELLA GALLERIA BORGHESE



PM10 (αg/m <sup>3</sup> )	PM 2.5 (αg/m <sup>3</sup> )	PM1 (αg/m <sup>3</sup> )	n° visitatori totali
22,92	2,55	4,62	/
183,81	30,39	14,10	714
293,73	44,60	17,64	1410

Passaggio di addetti ai lavori

1410 visitatori



# TEST CON METODO PASSIVO

Ricerca di una possibile soluzione

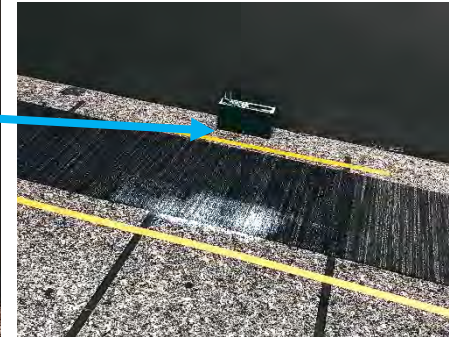
MODULYSS

In-groove

Pure Air100



Università degli Studi Milano  
Bicocca, edificio U1

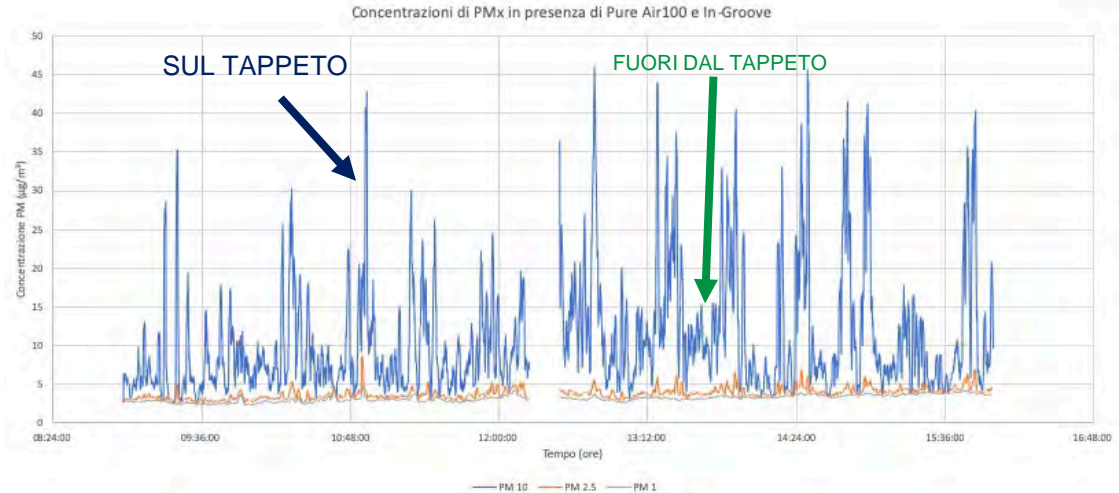


**Alternando il passaggio fuori dal tappeto e sul tappeto ogni 15 minuti**, è stata monitorata la concentrazione di  $PM_x$

# ANDAMENTO PM<sub>x</sub>

MEDIA	PM 10 (µg/m <sup>3</sup> )	PM 2.5 (µg/m <sup>3</sup> )	PM 1 (µg/m <sup>3</sup> )
Fuori dal tappeto	7,92	3,58	3,10
Sul tappeto	14,14	3,97	3,19

ORE	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>1</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	n PERSONE	
09:00	5,891	3,188	2,803	23	NO TAPPETO
09:15	8,825	3,069	2,599	23	TAPPETO
09:30	6,246	2,829	2,425	32	NO TAPPETO
09:45	8,576	3,154	2,625	20	TAPPETO
10:00	7,235	3,145	2,609	34	NO TAPPETO
10:15	12,855	3,517	2,740	24	TAPPETO
10:30	6,422	3,409	3,033	17	NO TAPPETO
10:45	13,827	4,027	3,139	23	TAPPETO
11:00	6,559	3,350	2,980	30	NO TAPPETO
11:15	13,105	3,793	3,059	28	TAPPETO
11:30	6,285	3,253	2,819	16	NO TAPPETO
11:45	11,402	3,898	3,063	21	TAPPETO
12:00	9,483	4,168	3,479	26	NO TAPPETO
12:30	14,745	3,824	3,097	61	NO TAPPETO
12:45	14,296	3,757	2,998	22	TAPPETO
13:00	9,010	3,505	3,043	37	NO TAPPETO
13:15	19,613	4,211	3,128	37	TAPPETO
13:30	10,417	3,753	3,107	48	NO TAPPETO
13:45	17,549	4,315	3,321	28	TAPPETO
14:00	6,031	3,551	3,204	25	NO TAPPETO
14:15	16,804	4,503	3,564	36	TAPPETO
14:30	7,396	3,862	3,479	42	NO TAPPETO
14:45	21,009	4,411	3,578	41	TAPPETO
15:00	7,940	4,095	3,531	33	NO TAPPETO
15:15	9,572	4,293	3,779	15	TAPPETO
15:30	7,169	4,219	3,855	27	NO TAPPETO
15:45	16,410	4,674	3,815	31	TAPPETO



**Il tappeto crea risollevarimento di particolato atmosferico**

## CONCETTO DI RESILIENZA

In letteratura si trovano molteplici articoli che trattano la resilienza termica degli edifici, mentre per quanto riguarda la resilienza degli edifici ai microinquinanti atmosferici ambientali attualmente non si evidenziano articoli rilevanti.

L'unica cosa certa è che **la resilienza degli edifici** non è un concetto generico, è un **concetto specifico** che va applicato caso per caso e inquinante per inquinante.

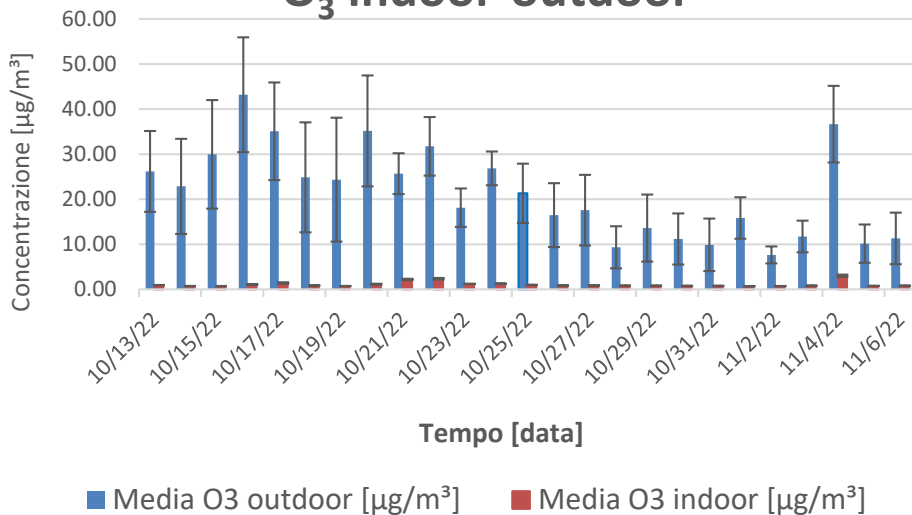
**Il rapporto tra concentrazioni indoor e outdoor (I/O)** è una valida misura per valutare la resilienza del Palazzo.

# RISULTATI FASE GASSOSA: OZONO

O<sub>3</sub> medio outdoor (V) **21,5 µg/m<sup>3</sup>** (± 1,71 int conf 95%)

O<sub>3</sub> medio indoor **1,1 µg/m<sup>3</sup>** (± 0,02 int conf 95%)

## O<sub>3</sub> indoor-outdoor

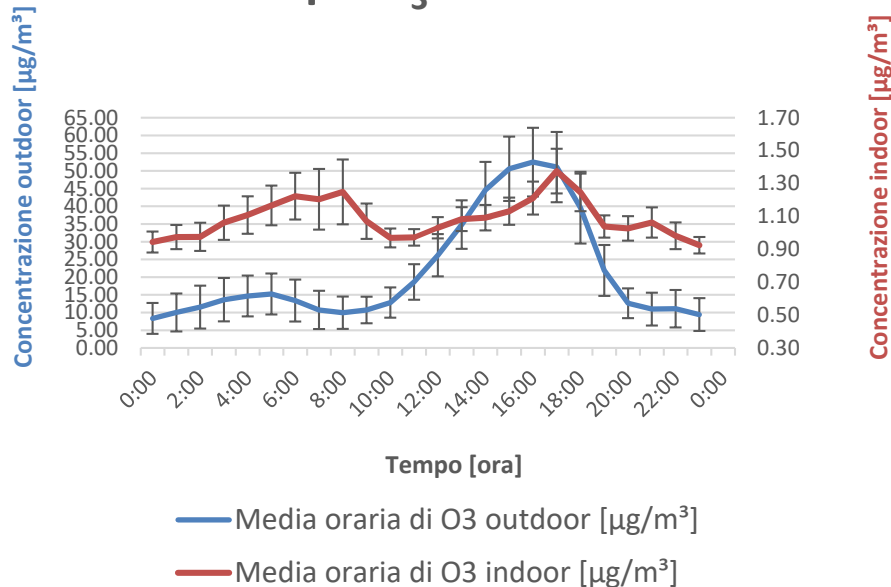


Le concentrazioni indoor sono il 5% di quelle outdoor

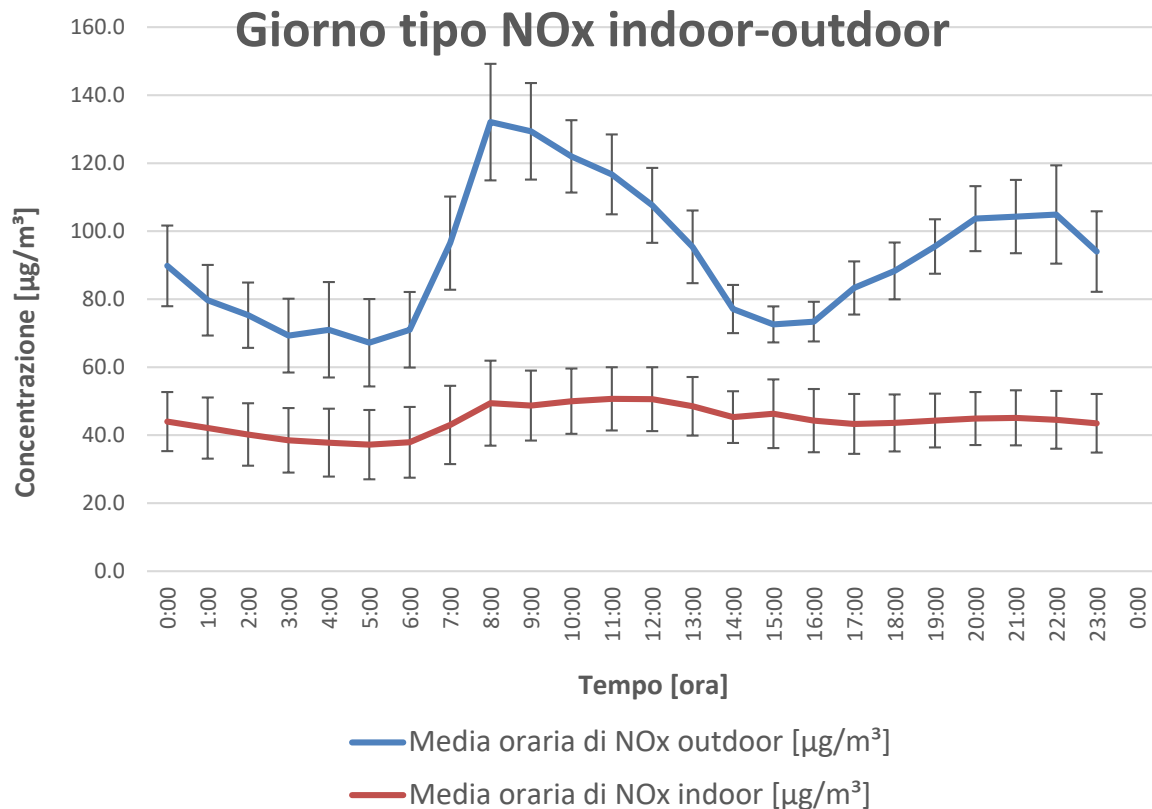
→ forte resilienza del Palazzo

I/O = 5%

## Giorno tipo O<sub>3</sub> indoor-outdoor



## RISULTATI FASE GASSOSA: NOx



NOx medio outdoor (V) **95,4**  
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\pm 4,80$  int conf 95%)

NOx medio indoor **44,3**  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
( $\pm 1,70$  int conf 95%)

**I/O = 46%**

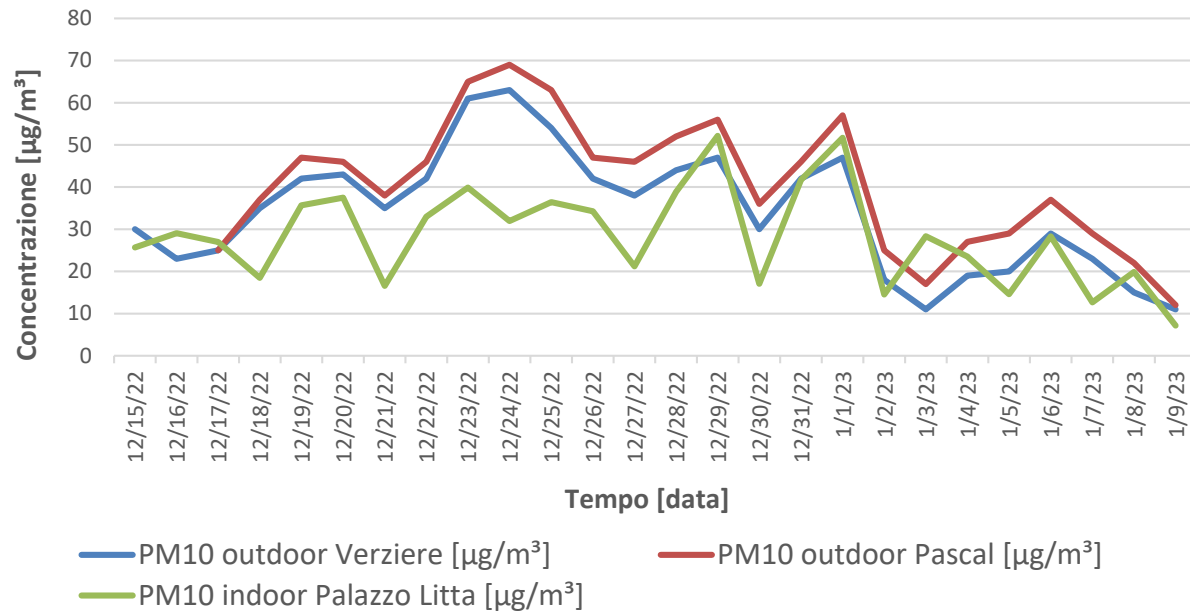
Le concentrazioni indoor sono  
circa la metà rispetto a quelle  
outdoor

→ **buona resilienza del Palazzo**



## RISULTATI FASE PARTICOLATA: PM<sub>10</sub>

### PM10 indoor-outdoor



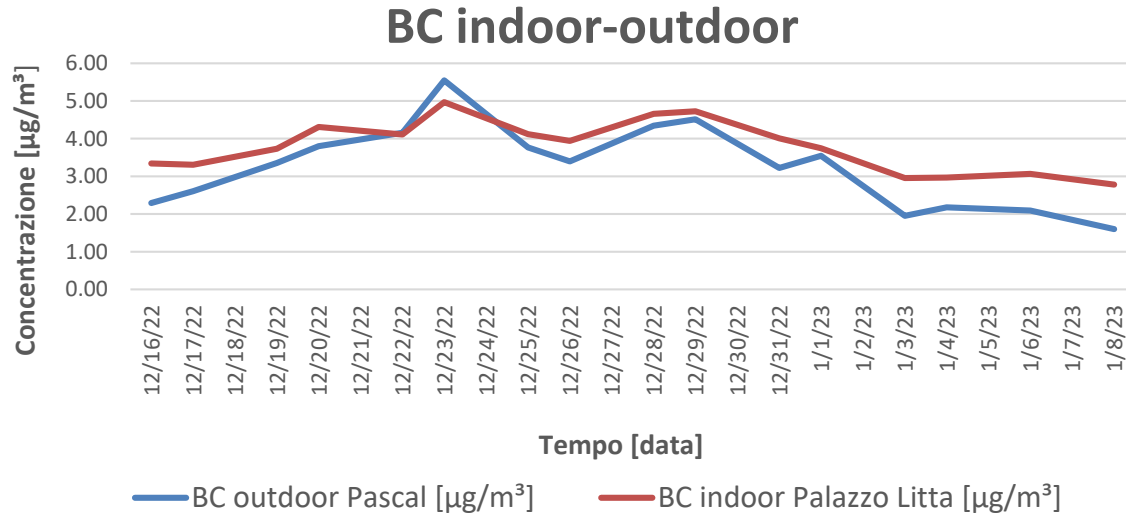
PM<sub>10</sub> medio outdoor (V)  
**34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  ( $\pm 5,84$  int conf  
95%)

PM<sub>10</sub> medio indoor  
**28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  ( $\pm 4,71$  int conf  
95%)

**I/O = 82%**

Le concentrazioni indoor  
sono l'82% di quelle  
outdoor  
→ **bassa resilienza del  
Palazzo**

## RISULTATI FASE PARTICOLATA: BC



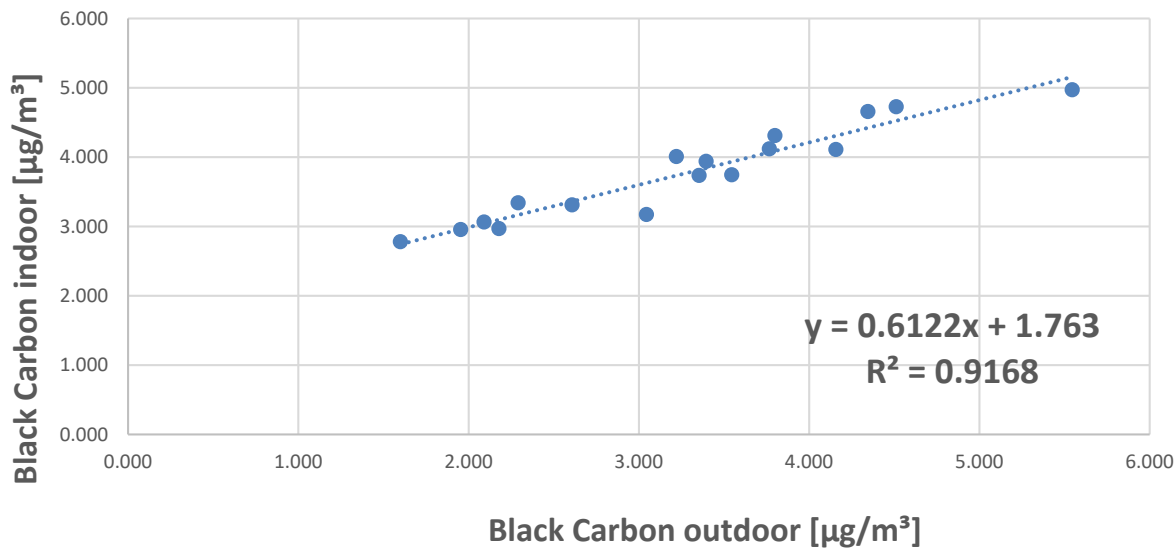
BC medio outdoor (Pa) **3,3**  
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\pm 0,49$  int conf 95%)

BC medio indoor **3,6**  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
( $\pm 0,36$  int conf 95%)

Le concentrazioni indoor  
sono più elevate rispetto a  
quelle outdoor

## RISULTATI FASE PARTICOLATA: BC

### Coefficiente di infiltrazione BC



L'indice di infiltrazione risulta essere pari a **0,6**  
→ all'interno si infila più della metà del BC outdoor

Il restante 40% deriva da una **sorgente interna**

→ **Ipotesi fonte di BC: impianto di riscaldamento estremamente datato**

BiPAC 30 marzo 2023



DIREZIONE  
REGIONALE  
MUSEI  
LOMBARDIA



MINISTERO  
DELLA  
CULTURA

SECRETARIATO REGIONALE  
PER LA LOMBARDIA

**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**