Atti del 30° Congresso Nazionale A.I.D.I.I.
a cura di: B.P. Andreini, M.C. Aprea, M. Carrieri, D.M. Cavallo, P. Castellano, R. d'Angelo, G. Gino, E. Grignani, S. Luzzi, P. Nataletti, G. Pizzella, C. Sala, G. Sciarra

Studio dei determinanti dell'inquinamento indoor in uffici del settore bancario

L. Del Buono[1], A. Spinazzè[2], A. Cattaneo[2], D. Campagnolo[2], M. Principi[3], P. Carrer[1], D.M. Cavallo[2]

[1] *Dipartimento di Scienze Biomediche e Cliniche - Ospedale Sacco, Milano*
[2] *Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università degli Studi dell'Insubria, Como*
[3] *Tutela Aziendale Servizio di Prevenzione e Protezione - Intesa Sanpaolo SpA*

Introduzione

Dal momento che la popolazione generale spende fino al 90% della tempo al chiuso, risulta evidente che gli ambienti confinati possano avere un impatto rilevante sull'esposizione totale giornaliera a inquinanti aerodispersi e sullo stato di salute degli occupanti (1). Tipicamente, in un ambiente indoor le sorgenti d'inquinamento maggiori sono localizzate al suo interno (rilascio da materiali di costruzione e di arredo e attività svolte) (2). La presenza simultanea di sorgenti di inquinamento indoor e bassi livelli di ricircolo dell'aria, può causare un innalzamento significativo delle concentrazioni indoor di inquinanti, anche di gran lunga superiore rispetto a quelle rilevate outdoor; per questo motivo è facile comprendere che l'ambiente indoor può influire in maniera determinante sulla salute (3).

In questo lavoro sono stati studiati i determinanti dell'inquinamento indoor in uffici del settore bancario, mediante la misurazione dei livelli di concentrazione ambientale di alcuni dei più rilevanti contaminanti chimici in termini di valutazione della qualità dell'aria indoor (IAQ) (Tabella I). Con i dati ottenuti mediante le campagne d'indagine ambientale, sono state eseguite tecniche statistiche per individuare eventuali differenze statisticamente significative tra gruppi di variabili.

***Tabella I** - Parametri chimici di "base" e di "approfondimento" determinati*

Parametri di base (misurati in tutte le filiali)
Particolato aerodisperso (PM_{10}, $PM_{2,5}$, PM_1, $PM_{0,5}$, $PM_{0,25}$), Anidride carbonica (CO_2) e stima dei ricambi aria/h (ACH), Biossido d'azoto (NO_2), Formaldeide (HCHO), Benzene, Toluene, Etilbenzene, Xileni (BTEX)
Parametri di approfondimento (misurati in 4 filiali)
Aldeidi (acetaldeide, acroleina, benzaldeide, butirraldeide e propionaldeide), Ozono (O_3), Terpeni (α e β-pinene e d-limonene)

Materiali e metodi

Protocollo operativo e tecniche di campionamento ed analisi

Le indagini ambientali sono state eseguite presso 6 realtà lavorative del settore terziario, nella fattispecie filiali bancarie. In queste 6 filiali è stato eseguito il medesimo protocollo sperimentale, in due stagioni differenti (estate/inverno). Il protocollo ha previsto, in tutte le filiali, un monitoraggio in simultanea per 24 ore in due postazioni di campionamento indoor (zona sportelli e zona consulenze) e una outdoor. Per ottenere delle indicazioni preliminari sulla IAQ, è stata testata e messa a punto una check-list. Per ogni filiale ne è stata compilata una durante ciascuna sessione di monitoraggio, avvalendosi dell'ausilio del personale tecnico e del direttore di filiale. Le tecniche di campionamento ed analisi scelte ed utilizzate per la realizzazione di questo studio, sono state schematizzate nella tabella II.

***Tabella II** - Tecniche di campionamento ed analisi*

Parametro	*Tecnica di campionamento e analisi*	*Note*
PM_{10}	*Campionamento attivo indiretto e successiva determinazione gravimetrica (Metodo ASTM 6552) (4). Configurazione strumentale: impattore a cascata multistadio (PCIS) Sioutas collegato a una pompa di campionamento impostata a 9 L/min. Substrato di raccolta: membrane in PTFE da 25 mm e 37 mm, condizionate in cabina climatica (almeno 24 ore) prima e dopo il campionamento.*	*Impattore e campionatori passivi sono stati collocati su un cavalletto metallico ad un'altezza di circa 1,50 m dal suolo e, dove possibile, in posizione di "centro ambiente". UNI EN 689 (6)*
$PM_{2,5}$		
PM_1		
$PM_{0,5}$		
$PM_{0,25}$		
Aldeidi	*Campionamento passivo e analisi specifica (GC-MS, HPLC e UV-VIS). Campionatori passivi specifici (Carbongraph 4, TEA, DNPH) a simmetria radiale.*	
NO_2		
BTEX		
Terpeni		
CO_2 *(con UR e T)*	*Monitor a lettura diretta: tecnologia NDIR*	*Collocati nei pressi del cavalletto metallico*
O_3	*Monitor a lettura diretta: sensore GSS*	
Ricambi aria ora	*Metodo ASTM E741 (1995) (5)*	

Trattamento statistico dei dati

I dati raccolti (monitoraggi e check-list) sono stati oggetto di analisi statistiche, per l'individuazione di differenze statisticamente significative tra gruppi di variabili. Sui dati a disposizione sono stati eseguiti una serie di trattamenti e test statistici schematizzati qui di seguito:

- statistica descrittiva. Sono stati calcolati i principali descrittori statistici al fine di: valutare la qualità dei dati raccolti, di verificarne la distribuzione, di sintetizzare il numero di variabili e per impostare le successive analisi statistiche;
- verifica della distribuzione della variabile (Test di Kolmogorov-Smirnov). Per individuare le variabili con distribuzione normale e non-normale;
- confronto tra medie ("Test T" per dati appaiati). Per definire se la differenza osservata tra la media di due campioni fosse significativa, oppure dovuta all'errore casuale di campionamento. L'intento è stato quello di definire se le differenze tra i risultati della campagna estiva e quelli della campagna invernale fossero statisticamente significativi;
- confronto multiplo tra medie (Analisi della Varianza a una via - ANOVA). Il test consiste nel suddividere o scomporre la variabilità totale di un numero di campioni nelle sue componenti. È stato eseguito per individuare differenze statisticamente significative nelle concentrazioni dei contaminanti indagati in funzione di alcune altre variabili (filiale, posizione filiale, rimodernamento filiale e posizione campionamento);

- analisi della Correlazione di Pearson. È stato utilizzato per definire l'esistenza di una relazione lineare tra due variabili. Per sua natura questo test non specifica se la relazione lineare tra due variabili sia di causa-effetto;
- analisi Fattoriale - Analisi delle Componenti Principali. Utilizzato per ridurre il numero di variabili che spiegano la varianza totale dei dati. Questo procedimento permette di trasformare un dato numero di variabili, possibilmente correlate tra loro, in un numero inferiore di variabili non correlate (componenti principali).

Tutte le elaborazioni statistiche e grafiche sono state eseguite mediante il software "IBM SPSS statistics 20". Le elaborazioni dei test statistici sono state eseguite solo per quelle variabili con un data-set composto per almeno il 95% da dati "validi" (valori validati e superiori al rispettivo limite di detezione analitico - "LOD").

Risultati

Statistica descrittiva

Nella tabella III vengono riportati i principali indicatori statistici descrittivi, per le variabili con un dataset composto per almeno il 95% da dati "validi".

***Tabella III** - Indicatori statistici descrittivi*

Parametro	*Numerosità*	*Intervallo*	*Minimo*	*Massimo*	*Media*	*Varianza*
PM_{10}	36	137,56	10,08	147,64	31,24	725,92
$PM_{2,5}$	36	77,48	8,10	85,58	22,85	244,65
PM_1	36	71,43	6,34	77,78	19,80	190,57
$PM_{0,5}$	36	67,44	5,20	72,64	17,66	160,17
$PM_{0,25}$	36	48,43	0,93	49,36	12,38	90,30
NO_2	36	98,27	12,83	111,10	61,55	714,65
HCHO	36	9,66	1,15	10,81	5,32	8,72
CO_2	28	1037,00	376,00	1413,00	601,97	60422,74
ACH	23	1,47	0,26	1,73	0,95	0,19

Verifica della distribuzione della variabile (Test di Kolmogorov-Smirnov)

Il data-set originale presentava variabili con distribuzione normale e non-normale. Per questo motivo, è stata eseguita una trasformazione logaritmica $[y = Log(x+1)]$ sulle variabili non-normali e successivamente è stato ripetuto il test, su tutto il data-set, per verificare se presentasse distribuzione log-normale. Questa ipotesi è stata verificata per tutte le variabili, per cui sono stati eseguiti test parametrici sul data-set log-trasformato e test non parametrici sul data-set originale.

Confronto stagionale

In questo studio è stato condotto una forma specifica di test, il *Test T per dati appaiati*. Il confronto tra le medie (Tabella IV), ha mostrato l'esistenza di differenze statisticamente significative (con un livello di significatività del 95%; $\rho < 0,05$) per i valori di PM_{10}, $PM_{2,5}$, PM_1, NO_2, HCHO e ACH, nel corso della campagna invernale, rispetto ai corrispondenti valori determinati nella campagna estiva.

Confronto multiplo tra gruppi

L'analisi univariata dei dati (Tabella V), ha permesso di evidenziare l'esistenza di differenze statisticamente significative ($\rho < 0,05$) nelle concentrazioni ambientali determinate, in

Tabella IV - *Sinossi dei risultati del Test T per dati appaiati*

Parametro	*Intervallo di confidenza per la differenza al 95%*		*t*	*Sig. "ρ" (2-code)*
	Inferiore	*Superiore*		
PM_{10}	-0,324	-0,040	-2,716	**0,015**
$PM_{2,5}$	-0,276	-0,040	-2,833	**0,011**
PM_1	-0,268	-0,040	-2,874	**0,011**
$PM_{0,5}$	-0,246	0,007	-1,981	0,064
$PM_{0,25}$	-0,249	0,163	- 0,436	0,668
NO_2	-0,357	-0,100	-3,758	**0,002**
HCHO	-0,287	-0,068	-3,421	**0,003**
ACH	-0,096	-0,001	-2,295	**0,045**
CO_2	-0,102	0,152	0,440	0,669

Tabella V - *Sinossi dei risultati dell'analisi univariata*

	ANOVA							
	Filiale		*Posizione filiale*		*Rimodernamento*		*Posizione campionamento*	
Parametro	*F*	*Sig (ρ)*	*F*	*Sig (ρ)*	*F*	*Sig (ρ)*	*F*	*Sig (ρ)*
PM_{10}	2,416	0,059	2,840	**0,041**	0,707	0,597	2,207	0,152
$PM_{2,5}$	1,985	0,110	2,386	0,073	0,799	0,54	2,991	0,098
PM_1	3,194	**0,020**	4,014	**0,010**	0,821	0,528	1,589	0,221
$PM_{0,5}$	3,855	**0,008**	4,776	**0,004**	1,100	0,385	0,490	0,491
$PM_{0,25}$	3,224	**0,019**	3,882	**0,011**	1,858	0,159	0,002	0,965
NO_2	1,600	0,190	1,312	0,287	1,201	0,343	0,059	0,810
HCHO	3,011	**0,026**	3,474	**0,019**	4,642	**0,009**	0,043	0,838
ACH	2,245	0,086	2,934	**0,043**	4,004	**0,017**	0,682	0,418
CO_2	4,240	**0,011**	3,069	**0,043**	3,871	**0,019**	0,029	0,867

funzione della filiale indagata e della posizione della filiale stessa (PM, HCHO e ACH). Queste differenze sono state determinate anche in relazione al periodo degli ultimi interventi di rimodernamento degli ambienti e degli impianti di ventilazione e riscaldamento (ACH, HCHO, CO_2).

Analisi di correlazione di Pearson tra variabili

Osservando i risultati del test (Tabella VI), si osservano alte correlazioni positive e statisticamente significative tra le diverse frazioni di PM($\approx$ 0,86). Correlazioni più basse, ma comunque statisticamente significative, sono state osservate tra PM e NO_2 ($\approx$ 0,36) e per la CO_2 con formaldeide (0,480) e con il numero di ACH (-0,481).

Analisi Fattoriale - Analisi dei Componenti Principali

Come si può osservare nella figura 1, il nucleo composto dalle 5 frazioni di PM, mostra sostanzialmente lo stesso contributo del NO_2 nel definire le due componenti principali. Le variabili CO_2 e HCHO mostrano elevata correlazione e come atteso, ambedue sono opposte alla variabile ACH. Allo stesso tempo queste ultime tre variabili sono ortogonali a PM e NO_2. Inserendo nell'elaborazione anche alcune variabili categoriali selezionate (rimodernamento, posizione edificio, codice posizione e codice sessione) (figura 2), viene confermato l'andamento stagionale (Cod. Ses.) delle variabili PM e NO_2. Allo stesso modo emerge co-

Tabella VI - Analisi della correlazione di Pearson

	Fattore di correlazione di Pearson (r)								
	PM_{10}	$PM_{2,5}$	PM_1	$PM_{0,5}$	$PM_{0,25}$	NO_2	HCHO	ACH	CO_2
PM_{10}	1	**0,915**	**0,876**	**0,834**	**0,664**	**0,389**	0,102	-0,053	0,111
$PM_{2,5}$		1	**0,938**	**0,896**	**0,698**	**0,349**	0,127	-0,056	0,242
PM_1			1	**0,974**	**0,804**	**0,376**	0,089	0,023	0,057
$PM_{0,5}$				1	**0,894**	**0,357**	0,079	0,018	0,065
$PM_{0,25}$					1	0,234	0,075	-0,080	0,117
NO_2						1	0,241	-0,092	-0,066
HCHO							1	-0,208	**0,480**
ACH								1	**-0,481**
CO_2									1

me la posizione di campionamento (Cod. Pos.) possa essere ben correlata con PM e NO_2. Sussiste ancora la forte correlazione negativa tra le concentrazioni di HCHO e il periodo trascorso dall'ultimo rimodernamento di strutture, arredi e impianti (Rim).

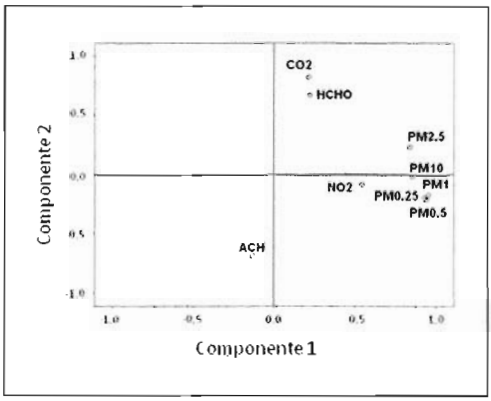

Figura 1 - Contributo delle variabili nel definire le due componenti principali

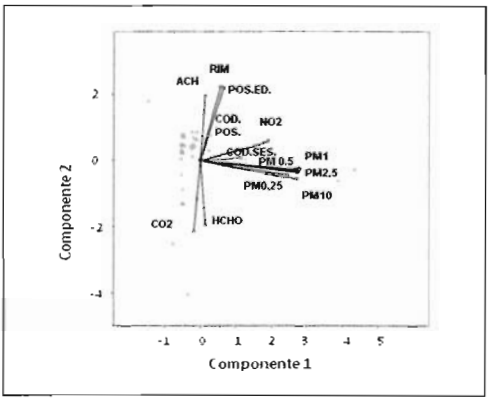

Figura 2 - Elaborazione delle componenti principali con alcune variabili categoriali selezionate

Discussione e conclusioni

Dalle evidenze raccolte durante le indagini ambientali effettuate presso sei filiali bancarie e le successive trattazioni statistiche eseguite sui dati raccolti (monitoraggi e checklist) è emerso che:

- le differenze osservate nelle concentrazioni di PM determinate, sembrano essere connesse oltre che a un andamento stagionale, anche all'attività svolta e alla collocazione della filiale. Alcune delle concentrazioni più elevate di PM_{10} e $PM_{2,5}$ sono state misurate nelle filiali più affollate; questo potrebbe essere dovuto alla presenza di sorgenti locali, quali il risollevamento da terra delle polveri sedimentate a causa del frequente transito di persone e occupanti, oltre che per il possibile impatto delle cosiddette "personal clouds" (7). Le frazioni più fini potrebbero essere più facilmente connesse a sorgenti tipicamente presenti in ambienti ad uso ufficio, quali stampanti laser;

- le concentrazioni indoor di NO_2 mostrano un comportamento fortemente stagionale ed influenzato dalle concentrazioni outdoor, generate da emissioni esterne rispetto agli ambienti indagati (es.: traffico veicolare, riscaldamento domestico);
- sussiste una buona relazione tra le concentrazioni di HCHO e gli eventuali interventi di rimodernamento e manutenzione di strutture, arredi e impianti di ventilazione delle filiali: le concentrazioni sono sensibilmente e statisticamente più basse in quelle filiali dove sono stati effettuati recenti rimodernamenti. Da questa informazione, si può evincere come la scelta dei materiali di costruzione e degli arredi può contribuire a un sensibile miglioramento della IAQ;
- le concentrazioni di CO_2 hanno mostrato una buona relazione con quelle di HCHO e, come queste ultime, possiedono una relazione inversa con gli ACH. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che un basso tasso di ricambi d'aria favorisce l'instaurarsi di alte concentrazioni di CO_2 in aria, soprattutto in caso di filiali affollate. Come nel caso della HCHO, anche per la CO_2 sussiste una buona relazione tra le concentrazioni e gli eventuali interventi di rimodernamento. Questo suggerisce che una corretta e periodica manutenzione degli impianti di ventilazione potrebbe contribuire nel miglioramento della IAQ;
- non sono state individuate relazioni significative tra tassi di ventilazioni e concentrazioni degli inquinanti aerodispersi, se non una buona relazione inversa con HCHO. La stessa relazione è stata osservata con la CO_2, come era lecito attendersi. Quindi è facile intuire come gli ACH possano contribuire a mitigare le concentrazioni indoor di alcuni contaminanti tipicamente emessi da sorgenti indoor.

Bibliografia

1. Sundell J. On the association between building ventilation characteristics, some indoor environmental exposures, some allergic manifestations and subjective symptom reports. Indoor Air 2 (Suppl): 9-148 (1994).
2. Sundell J. On the history of indoor air quality and health. Indoor Air, 14 (Suppl 7): 51-58. (2004)
3. Bernstein J.A, Alexis N, Bacchus H, Bernstein I.L, Fritz P, Horner E, Li, Mason S, Nel A, Oullette J, Reijula K, Reponen T, Seltzer J, Smith A, Tarlo S.M. The health effects of non-industrial indoor air pollution. J Allergy Clin Immunol, 121: 585-591 (2008).
4. Metodo ASTM D6552. Standard Practice for Controlling and Characterizing Errors in Weighing Collected Aerosols.
5. ASTM E741. Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution.
6. NORMA UNI EN 689. Atmosfera nell'ambiente di lavoro- Guida alla valutazione dell'esposizione per inalazione a composti chimici ai fini del confronto con i valori limite e strategie di misurazione.
7. Rodes C.E., Thornburg J.W. Breathing zone exposure assessment. Chapter 5. In L.S. Ruzer, & N.H. Harley (Eds.), Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects. Boca Raton, FL: CRC Press. (2005).