

Studio della qualità dell'aria in uffici moderni

D. CAMPAGNOLO¹, A. CATTANEO¹, A. SPINAZZÈ¹, L. DEL BUONO², R. MABILIA³,
V.G. MIHUCZ⁴, C. MANDIN⁵, A. SOMAINI¹, P. CARRER², D.M. CAVALLO¹

¹ Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università degli Studi dell'Insubria, Como

² Dipartimento di Scienze Biomediche e Cliniche - Università degli Studi di Milano, Milano

³ Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, CNR, Roma

⁴ Department of Analytical Chemistry, Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary

⁵ Scientific and Technical Centre for Building, CSTB, Marne-la-Vallée, France

Introduzione

Il Ministero dell'Ambiente nel 1991 ha definito l'inquinamento indoor come la presenza nell'aria di ambienti interni di inquinanti di tipo fisico, chimico o biologico non presenti naturalmente nell'aria esterna. La crescente attenzione verso la qualità dell'aria in ambienti indoor, è giustificata dal fatto che i lavoratori che operano nel settore terziario (uffici, commercio, banche, ospedali, scuole ecc.) rappresentano più del 67% della popolazione lavorativa italiana.

Nel novembre 2010 è nato il Progetto Europeo "OfficAir", con l'obiettivo principale di determinare la qualità dell'aria negli uffici di moderna costruzione, ampliando le attuali conoscenze tramite database, strumenti di modellazione e metodi di valutazione attraverso un approccio integrato nel valutare il rischio per la salute dovuto all'esposizione ad inquinanti indoor. Il progetto è suddiviso in tre parti e, per quanto concerne il territorio italiano, durante la prima fase chiamata "General Survey", ha coinvolto 20 edifici moderni a uso ufficio realizzati e/o ristrutturati negli ultimi 10 anni. Le fasi successive ("Detailed Investigation" e "Intervention Study") sono state maggiormente specifiche e hanno coinvolto un numero sempre inferiore di edifici, rispettivamente 4 e 2. Il presente lavoro riguarda la cosiddetta *Detailed Investigation*, condotta negli edifici identificati con i codici IT03, IT04, IT08 e IT12. In ognuno di essi sono stati eseguiti dei monitoraggi degli inquinanti indoor tra cui Sostanze Organiche Volatili, Aldeidi, Ozono, NO_x, Particolato (PM_{2.5}) e sono state raccolte informazioni su Ventilazione, Temperatura e Umidità relativa. Contestualmente, è stata compilata una checklist per ogni ufficio indagato, contenente dati su: materiali di costruzione, occupanti, sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento, arredi, apparecchiature da ufficio (stampanti, fotocopiatrici ecc.) e composizione dei prodotti chimici utilizzati (prodotti per la pulizia). Lo scopo di tutte queste indagini è stato quello di identificare i principali determinanti delle concentrazioni indoor di contaminanti aerodispersi. I dati raccolti durante il sopralluogo sono stati elaborati mediante l'algoritmo previsionale HoDa (1). Le stime del rischio ottenute tramite l'algoritmo sono state confrontate con le misurazioni strumentali.

Materiali e metodi

La campagna estiva della cosiddetta “*Detailed Investigation*” presa in esame in questo lavoro, si è svolta da giugno a ottobre 2012 in 4 edifici italiani (tabella I).

Tabella I - Codice, ubicazione, tipologia di attività lavorativa e anno di costruzione dei 4 edifici selezionati per la “*Detailed Investigation*”

Codice	Ubicazione	Attività	Anno costruzione
IT03	Firenze	Sede amministrativa	2009 (nuovo)
IT04	Firenze	Sede amministrativa	2009 (nuovo)
IT08	Sesto San Giovanni (MI)	Sede universitaria	2006 (nuovo)
IT12	Assago (MI)	Sede di società di servizi	2002 (ristrutturato)

L'attività sul campo è consistita in campionamenti che sono stati eseguiti in 4 stanze per ogni edificio e hanno avuto una durata settimanale (5 giorni lavorativi), per rappresentare un'esposizione a lungo termine negli uffici. È stato previsto anche un campionamento outdoor. La postazione di campionamento è tipicamente costituita da un cavalletto regolato ad un'altezza di circa 110 cm dal suolo (l'altezza media della zona respiratoria di un lavoratore seduto), posto in una zona centrale dell'ufficio, ad almeno 1 m di distanza da porte e finestre.

Per la misurazione delle concentrazioni di Aldeidi, SOV (Sostanze Organiche Volatili) e Ozono sono stati impiegati dei campionatori passivi a simmetria radiale. Le analisi successive sono state effettuate con HPLC in fase inversa con rivelatore UV per le Aldeidi, con Gascromatografia con rivelatore FID o MS per le SOV e con spettrofotometro per l'Ozono. Per il campionamento del biossido di azoto, invece, sono stati utilizzati dei campionatori passivi diffusivi circolari a simmetria assiale, con successiva analisi attraverso spettroscopia UV-vis. Sono stati raccolti anche dei bianchi analitici, in particolare un bianco di campo in una stanza per ogni edificio per misurare eventuali contaminazioni dovute alle operazioni di campionamento, un bianco di lotto e/o uno di trasporto per rilevare eventuali contaminazioni durante il trasferimento dei campioni ai laboratori.

La misurazione della concentrazione di $PM_{2.5}$ è stata eseguita presso una sola stanza e in un punto outdoor tramite campionamento attivo indiretto. La linea di prelievo è costituita da una pompa calibrata mediante standard primario a bolla di sapone ad un flusso costante di 10 l/s, collegata tramite un tubo in silicone ad un impattore Harvard in cui viene montato un filtro in quarzo con diametro di 37 mm e porosità di 2 μm (2). La determinazione della massa delle particelle raccolte su filtro avviene mediante metodo gravimetrico a pesata differenziale. Anche per il monitoraggio del particolato vengono raccolti i bianchi analitici, si tratta di due bianchi di campo che permettono di evidenziare l'eventuale contaminazione dei campioni, legata alle procedure di preparazione del campione per il monitoraggio.

La ventilazione viene misurata tramite tecnica passiva che utilizza gas traccianti (Perfluorocarburi). L'operazione viene eseguita in ognuna delle 4 stanze interne selezionate in ogni edificio. Il metodo utilizza sorgenti di gas traccianti costituite da piccoli cilindri di alluminio al cui interno è presente una piccola quantità di Perfluorometilcicloesano liquido che si diffonde attraverso il tappo in gomma. Il tasso di emissione tipico del gas tracciante è di 20 $\mu g/h$. Le sorgenti vanno posizionate lungo il perimetro dell'ufficio e nelle parti adiacenti (corridoi, anticamere) secondo una distribuzione che garantisca un rilascio omogeneo del gas tracciante. Dopo l'ubicazione delle sorgenti viene posto il campionatore, generalmente sul medesimo cavalletto degli altri campionatori ad un'altezza compresa tra 0,75 e 2 m dal pavimento. La concentrazione di gas tracciante viene determinata tramite gascromatografia e spettrometria di massa (GC-MS).

Tabella II - Statistica descrittiva di temperatura (°C), umidità relativa (%), ricambi d'aria (1/h), Biossido d'azoto ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e Ozono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) per ogni edificio monitorato.

Parametro		IT12	IT08	IT04	IT03
T (°C)	Media	24,9	22,7	23,9	25,2
	Mediana	24,9	22,3	23,6	25,4
	Min	22,8	22,2	23,5	24,5
	Max	25,0	24,2	25,0	25,5
	SD	0,1	0,9	0,7	0,4
Umidità relativa (%)	Media	41,8	39,2	41,6	47,7
	Mediana	42,3	39,2	41,4	46,9
	Min	39,4	38,1	39,0	46,9
	Max	43,3	40,1	44,5	49,8
	SD	1,7	0,8	2,3	1,3
Ricambi d'aria (1/h)	Media	1,0	1,5	0,9	1,0
	Mediana	0,8	1,4	0,8	1,0
	Min	0,2	0,6	0,6	0,5
	Max	2,5	2,4	1,2	1,4
	SD	1,1	0,8	0,3	0,3
Biossido di azoto	Media	22,1	26,5	19,0	17,0
	Mediana	21,5	26,8	19,1	17,1
	Min	20,8	23,8	17,4	15,3
	Max	24,7	28,5	20,5	18,3
	SD	1,8	2,0	1,4	1,1
Ozono	Media	11,8	9,3	7,0	10,9
	Mediana	11,1	9,7	6,4	8,0
	Min	9,1	6,2	4,1	5,4
	Max	15,9	11,7	11,0	23,7
	SD	3,2	2,3	3,0	6,7

valore minimo è inferiore a quello raccomandato, a causa del bassissimo tasso di ventilazione misurato in due uffici del suddetto edificio. Per il biossido di azoto nessun valore supera il valore soglia di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4). Dalla tabella si nota come i valori più elevati contraddistinguano gli edifici IT12 e IT08 rispetto a IT04 e IT03. Avendo verificato che il rapporto I/O è inferiore a 1, tale differenza può essere imputabile al diverso contesto urbano tra Milano e Firenze. Anche per l'Ozono nessun dato supera il rispettivo valore raccomandato (5). Tuttavia, un dato interessante riguarda l'edificio IT03, in cui il valore massimo (relativo alla stanza R01) è più elevato rispetto agli altri. Questo fatto potrebbe essere connesso alla presenza di alcune sorgenti indoor come le stampanti laser (6).

Dai valori riportati in tabella III si nota che IT12 e IT03 presentano valori di $\text{PM}_{2,5}$ indoor minori rispetto alla concentrazione outdoor, mentre la concentrazione indoor dell'e-

edificio IT08 è la più elevata ed è superiore al relativo valore outdoor.

Risultati e discussioni

Le indagini hanno previsto anche la misurazione in continuo di temperatura e umidità relativa nelle 4 stanze indoor e nella postazione outdoor. Questi monitoraggi sono stati effettuati con l'uso di datalogger HOBO con una frequenza di rilevamento dei parametri pari a 2,5 minuti.

La valutazione dei dati di temperatura e umidità relativa riportati in tabella II non emergono situazioni di particolare criticità. L'unica nota è il valore medio di RH più elevato per l'edificio IT03, comunque all'interno dell'intervallo raccomandato (40-60%). Per quanto riguarda le medie dei ricambi d'aria il valore minimo raccomandato di 0,35 ach (3) è sempre rispettato. Si nota, invece, che per l'edificio IT12 il

Tra le concentrazioni rilevate di Aldeidi e SOV, riportate nelle tabelle IV e V, tutti i parametri rispettano i valori soglia indicati dalle

Tabella III - Valori misurati di $\text{PM}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Codice edificio	Punto di campionamento	Concentrazione
IT12	R02	9,853
	OUT	11,118
IT08	R03	12,624
	OUT	9,325
IT03	R03	8,923
	OUT	9,925

Tabella IV - Valori di concentrazione ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) delle aldeidi rilevati in tutti gli edifici indagati

Edificio	Ufficio	Formaldeide	Acetaldeide	Acroleina	Propionaldeide	Benzaldeide	Glutaraldeide	Esanale
IT12	R01	16,895	9,099	3,314	3,382	1,407	2,509	15,437
	R02	14,014	7,099	2,904	6,589	1,236	2,827	11,950
	R03	11,897	6,373	2,476	5,489	1,058	2,653	9,875
	R04	13,244	7,786	2,757	5,696	1,205	3,021	12,076
	OUT	6,503	3,596	3,806	3,123	1,281	2,070	4,512
IT03	R01	8,626	4,331	2,449	2,216	1,246	0,697	5,575
	R02	8,411	4,378	2,116	2,482	4,887	1,536	5,703
	R03	10,410	5,681	1,848	2,405	2,939	2,223	6,715
	R04	8,760	5,108	1,910	2,215	1,729	3,192	6,756
	OUT	3,646	3,112	4,674	1,622	0,833	2,526	3,758
IT04	R01	11,820	6,054	2,690	2,239	0,750	0,495 *	9,657
	R02	8,720	4,738	3,560	1,907	0,968	0,838	6,614
	R03	13,960	6,364	2,784	2,254	1,496	0,495 *	8,508
	R04	15,669	5,738	2,653	2,224	1,065	0,495 *	8,701
	OUT	3,975	7,269	6,465	1,642	1,515	2,795	4,267
IT08	R01	16,167	4,675	1,916	1,856	0,748	1,640	8,601
	R02	18,529	5,921	2,149	2,291	1,542	1,859	10,499
	R03	23,983	5,215	2,420	2,137	1,470	2,299	9,533
	R04	13,545	4,259	2,433	1,939	0,840	1,743	8,280
	OUT	4,071	1,151 *	3,456	1,403	0,677	1,437	3,899

linee guida ad eccezione di tre contaminanti: benzene, acroleina e tricloroetilene. Dal calcolo dei rapporti indoor/outdoor, i primi due inquinanti mostrano valori inferiori o prossimi a 1, evidenziando una chiara origine esterna agli edifici e quindi difficilmente mitigabile mediante interventi tecnici da parte della gestione aziendale. Per ciò che riguarda il tricloroetilene, il rapporto indoor/outdoor in alcuni casi è pari a 1 o superiore. Come per il benzene, si tratta di una sostanza genotossica, quindi le linee guida raccomandano valori di esposizione più bassi possibile. Questo inquinante è tuttavia generalmente caratterizzato da concentrazioni inferiori al limite di rilevabilità.

I rapporti indoor/outdoor (I/O) sono stati calcolati per tutti gli inquinanti. Tra quelli aventi rapporti I/O > 3 è emersa la formaldeide in tutti gli uffici di IT03 e in tre locali di IT04. Le principali sorgenti indoor di tale inquinante sono costituite da materiali di costruzione (pannelli, compensati, truciolati), schiume isolanti contenenti resina urea-formaldeide, arredi (tappeti, tendaggi) e fumo di tabacco (7). Anche i valori I/O dell'acetaldeide sono superiori a 3 in tutti gli uffici dell'edificio IT03. Questo contaminante può essere emesso da monitor, fotocopiatrici (8), prodotti con fragranze (come deodoranti o profumatori d'ambiente) (9), prodotti per le pulizie (10) e arredi a base di pannelli truciolati (11). La Benzaldeide mostra valori I/O maggiori di 3 in due uffici di IT08; le sue possibili sorgenti

Tabella V - Valori di concentrazione ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) delle SOV rilevati in tutti gli edifici indagati

Edificio	Ufficio	Benzene	Toluene	Xileni	Etilbenzene	n-esano	Tricloroetilene	Tetracloroetilene	α -pinene	d-limonene	2-butossietanolo	2-etilesanolo	Stirene
IT12	R01	0,6	4,2	1,5	0,5	1,1	<0,01	0,69	1,7	5,8	80,1	4,6	0,7
	R02	0,5	5,3	1,3	0,5	0,9	<0,01	0,53	1,4	3,9	51,8	4,2	0,6
	R03	0,4	3,6	0,9	0,3	0,7	<0,01	0,51	1,8	1,1	7,4	6,2	0,7
	R04	0,4	5,6	1,1	0,5	0,9	<0,01	0,99	1,7	1,9	23,4	5,0	1,0
	OUT	0,6	2,9	1,9	0,4	0,9	<0,01	0,76	*	*	*	*	*
IT03	R01	1,1	2,7	1,8	1,0	1,5	<0,01	<0,01	3,2	3,5	9,7	7,6	1,6
	R02	0,7	5,0	1,0	1,3	1,8	<0,01	<0,01	4,8	6,2	17,2	5,0	0,6
	R03	0,9	3,2	1,5	1,6	1,1	<0,01	<0,01	1,3	5,9	6,1	3,9	0,8
	R04	0,9	4,7	1,7	0,7	1,5	<0,01	<0,01	3,0	4,1	14,9	4,2	0,9
	OUT	0,8	3,2	2,1	0,7	1,9	0,03	0,02	1,9	4,8	1,1	2,0	0,9
IT04	R01	1,0	4,7	1,4	1,2	1,4	0,02	<0,01	2,2	5,6	37,4	7,0	1,0
	R02	0,6	3,1	2,1	0,8	1,5	<0,01	<0,01	1,0	2,8	6,1	4,9	0,6
	R03	1,2	3,7	1,9	1,3	2,1	<0,01	<0,01	1,8	3,7	11,8	2,0	1,2
	R04	0,8	1,6	2,2	1,3	0,7	0,03	<0,01	1,3	3,1	5,9	5,1	0,7
	OUT	0,8	3,0	2,6	0,6	1,3	0,01	<0,01	1,4	4,2	0,9	1,8	1,1
IT08	R01	1,1	3,4	1,7	0,7	1,5	<0,01	<0,01	1,9	3,8	6,3	5,7	0,9
	R02	0,7	2,7	2,0	0,8	1,3	<0,01	<0,01	2,2	4,2	4,3	4,1	0,5
	R03	0,7	4,3	1,1	0,9	0,5	<0,01	<0,01	1,0	2,6	4,0	7,4	1,1
	R04	0,9	3,0	1,0	0,7	1,1	<0,01	<0,01	1,2	3,4	2,8	5,9	0,9
	OUT	1,0	3,3	2,4	0,7	1,1	0,02	0,07	1,5	3,6	0,9	1,5	0,9

(*) dato analitico mancante

indoor sono le fotocopiatrici (8), i prodotti con fragranze (9) e gli arredi a base di pannelli truciolati (11). L'esane ha un solo valore superiore a 3 in un ufficio di IT12, ma è importante specificare che tutte le misurazioni indoor sono superiori a quelle outdoor. Le sorgenti interne sono identificate nelle fotocopiatrici (8) e, soprattutto, negli arredi nuovi (12).

Per quanto concerne le SOV, i valori I/O maggiormente elevati sono stati osservati per il 2-butossietanolo. A causa della perdita dell'analita, non sono disponibili i dati outdoor per IT12, ma i valori indoor sono tra i più elevati (tabella V). Le maggiori sorgenti indoor di 2-butossietanolo sono i profumi per uso personale e i deodoranti per ambienti (8), i prodotti per la pulizia e le vernici (9). Anche il 2-etilesanolo mostra valori I/O superiori a 3, in particolare nei locali dell'edificio IT03 (anche in questo caso i dati outdoor di IT12 non sono disponibili). Il suddetto composto può derivare dai PC, dai notebook e dalle fotocopiatrici (9).

Conclusioni

Considerando che la maggior parte dei valori ottenuti dalle misurazioni è conforme alle linee guida sull'inquinamento dell'aria indoor emanate dalle organizzazioni di riferimento, si può ritenere la qualità dell'aria negli edifici indagati soddisfacente.

La stima eseguita con l'algoritmo previsionale è stata confermata dalle evidenze strumentali solo nel 35% dei casi. Si può affermare che si tratta di un utile strumento di screening.

ning nella fase di pre-campionamento ma l'efficacia è evidentemente condizionata da un elevato grado d'incertezza (superiore al 50% in questo caso).

Gli sviluppi futuri di questo studio consentiranno un confronto tra i dati presentati pocanzi e quelli della campagna invernale, al fine di verificare eventuali andamenti di tipo stagionale. Inoltre, l'intera trattazione potrà essere approfondita con l'analisi dei dati raccolti durante il cosiddetto *Intervention Study*, soprattutto per quanto concerne l'impatto specifico delle attività lavorative e di altre possibili sorgenti sulla qualità dell'aria indoor.

Bibliografia

1. Aizlewood C.E., Cox C., Peruzzo C. Assessment of health risk in buildings using health hazard algorithms (HOPE project). *Indoor Air*, 1(1): 628-632. (2005).
2. Marple V.A., Rubow K.L., Turner W.A., Spengler J.D., Low Flow Rate Sharp Cut Impactors for Indoor Air Sampling: Design and Calibration, *JAPCA*, 37: 1303. (1987).
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, 2010: "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality-ASHRAE Standard 62.1-2010".
4. World Health Organization (WHO), 2010: "WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants".
5. Health Canada, 2010: "Residential Indoor Air Quality Guideline: Ozone".
6. Tuomia T., Engström B., Niemelä R., Svinhufvud J., Reijula K., Emission of Ozone and Organic Volatiles from a Selection of Laser Printers and Photocopiers, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(8): 629-634. (2000).
7. Wu P.C., Li Y.Y., Lee C.C., Chiang C.M., Su H.J.J. Risk assessment of formaldehyde in typical office buildings in Taiwan, *Indoor air*, 13: 359-363. (2003).
8. Destailats H., Maddalena R.L., Singer B.C., Hodgson A.T., McKone T.E., Indoor pollutants emitted by office equipment: A review of reported data and information needs, *Atmospheric Environment*, 42: 1371-1388. (2008).
9. Steinemann A.C., MacGregor I.C., Gordon S.M., Gallagher L.G., Davis A.L., Ribeiro D.S., Wallace L.A., *Fragranced consumer products: Chemical emitted, ingredients unlisted*, Environmental Impact Assessment Review. (2010).
10. Nazaroff W.W., Weschler C.J., Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants, *Atmospheric Environment*, 38: 2841-2865. (2004).
11. Kim S., Kim J.-A., Kim H.-J., Kim S.D., Determination of formaldehyde and TVOC emission factor from wood-based composites by small chamber method, *Polymer Testing*, 25: 605-614. (2006).
12. Ernstgård L., Iregren A., Sjögren B., Svedberg U., Johanson G., Acute effects of exposure to hexanal vapors in humans, *Journal of Occupational Environmental Medicine*, 48(6): 573-580. (2006).