

Simulazioni di esposizione a NO₂ e PM₁₀ di bambini residenti nell'area urbana di Bologna

Simulation of children exposure to NO₂ and PM₁₀ in the urban area of Bologna (Italy)

Stefano Zauli Sajani,¹ Linda Passoni,² Otto Hänninen,³ Vanes Poluzzi,² Marco Deserti,⁴ Paolo Lauriola¹

¹ Struttura tematica di epidemiologia ambientale, ARPA Emilia Romagna

² Sezione provinciale di Bologna, ARPA Emilia Romagna

³ European Centre for Environment and Health, World Health Organization (WHO)

⁴ Servizio idro-meteorologico, ARPA Emilia Romagna

Corrispondenza: Stefano Zauli Sajani, Struttura tematica di epidemiologia ambientale, ARPA Emilia Romagna, viale Fontanelli 23, 41100 Modena; tel. 059 433626; e-mail: szauli@arpa.emr.it.

Cosa si sapeva già

- L'inquinamento atmosferico è un importante fattore di rischio per la salute umana.
- Gli studi epidemiologici e la definizione di politiche di prevenzione necessitano di progressi nella definizione dell'esposizione degli individui.

Cosa si aggiunge di nuovo

- L'applicazione a Bologna di una catena modellistica completa per la gestione della qualità dell'aria che, partendo dalla simulazione delle concentrazioni outdoor, porta alla stima dell'esposizione della popolazione.
- L'individuazione, nel campione di bambini oggetto dello studio, degli individui più esposti e dei micro-ambienti che più contribuiscono all'esposizione personale complessiva.
- La discussione delle principali criticità nella stima modellistica dell'esposizione personale all'inquinamento atmosferico.

Riassunto

Obiettivo: stima dell'esposizione a NO₂ e PM₁₀ di bambini residenti in un quartiere in prossimità del centro storico di Bologna.

Disegno: è stata stimata l'esposizione personale media di 333 bambini frequentanti 2 scuole elementari come media pesata dei livelli orari di esposizione sperimentati da ogni individuo nel periodo 01.06.2004-31.05.2005. Rispetto alla modellazione dell'esposizione, sono state definite quattro tipologie di micro-ambienti (indoor residenziale, indoor scolastico, traffico, outdoor residenziale) e tre giornate tipo (di scuola, festiva nel periodo scolastico, estiva).

Outcome principali: esposizione media annua a NO₂ e PM₁₀.

Risultati: i livelli d'esposizione medi nel campione sono risultati inferiori a quelli misurati dalla stazione fissa da traffico presente nell'area. Le esposizioni medie a NO₂ (PM₁₀) sono risultate in un giorno di scuola circa il 20% (40%) maggiori delle esposizioni tipiche nei giorni di fine-settimana del periodo scolastico e di circa il 30% (50%) più elevate di un

tipico giorno estivo. Gli individui più esposti sono risultati caratterizzati da esposizioni pari a circa 39 µg/m³ per l'NO₂ e a 18 µg/m³ per il PM₁₀, approssimativamente superiori del 50% rispetto a quelli meno esposti. Nel periodo scolastico il contributo più importante tra i diversi microambienti è risultato quello indoor residenziale (45%), seguito da quello scolastico (24%).

Discussione e conclusioni: le esposizioni dei bambini differiscono dai livelli d'inquinamento ambientale misurato dalla stazione da traffico e sono interessate, da una parte, dalla protezione degli edifici (scolastici e residenziali) e dall'altra dalle alte concentrazioni associate alla permanenza nel traffico. La modellistica d'esposizione può essere usata come uno strumento per la stima degli effetti di opzioni d'intervento sulle esposizioni e quindi sui rischi sanitari associati. È però necessaria una approfondita validazione sperimentale del modello di esposizione.

(*Epidemiol Prev* 2007; 31(5): 253-60)

Parole chiave: inquinamento atmosferico, esposizione, modellistica

Abstract

Objective: to estimate exposure to NO₂ and PM₁₀ of children living in a central area of the city of Bologna, Italy

Design: Mean personal exposure was estimated for 333 school children as weighted average of the individual hourly exposure levels during the period 1.06.2004-31.05.2005. Four microenvironments (home indoor, school indoor, traffic, home out-

door) and three typical days (school day, holidays in schooling period, and summer holidays) has been considered in the model.

Main outcome measures: annual mean exposure to NO₂ and PM₁₀

Results: exposure levels in the sample were lower than mean concentrations recorded by the monitoring station located in the study area. During the school period, mean exposures to NO₂ and to PM₁₀ were respectively 20% and 40% higher than in

holidays during school period and 30% and 50% higher than during summer holidays. Exposures of the most exposed children were 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO_2 and 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} i.e. roughly 50% higher than the least exposed children. During the school period, the most important contributions to total exposure were those of the indoor and school micro-environments.

Discussion and conclusions: *compared to ambient levels measured at traffic oriented monitoring stations, exposures of school*

children are influenced by the length of time spent in the traffic microenvironment, as well as by the protection given by the time spent at school and at home. Exposure modelling can be used in order to estimate the consequences of policy options on exposure. However, a detailed empirical validation of the exposure model is needed.

(*Epidemiol Prev* 2007; 31(5): 253-60)

Keywords: air pollution, exposure, modelling

Introduzione

Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute sono molteplici e ben documentati da numerosi studi nazionali¹ e internazionali (si veda per una rassegna complessiva il report WHO²). Tali studi sono generalmente basati sull'analisi dell'associazione tra gli eventi sanitari (principalmente mortalità e ricoveri) e le concentrazioni degli inquinanti registrate dalle centraline fisse di monitoraggio e non considerano quindi la reale esposizione degli individui che costituiscono la popolazione in studio. L'assunzione dei dati delle centraline fisse come variabili proxy dell'esposizione della popolazione, sebbene accettata per mancanza di serie storiche di dati di esposizione personale, è considerata però in ambito epidemiologico un'importante fonte di incertezza.³ Infatti, l'esposizione degli individui è molto variabile a seconda del luogo di residenza, di lavoro e delle diverse attività condotte nel corso della giornata, tanto che i livelli di esposizione personale sono talvolta notevolmente diversi da quelli rilevati dalle centraline di monitoraggio.^{4,5} Una migliore comprensione delle relazioni tra l'esposizione personale ai vari inquinanti e le concentrazioni rilevate dalle centraline di monitoraggio riveste quindi una considerevole importanza per una più corretta valutazione dei rischi sanitari legati all'inquinamento atmosferico.

Non meno importante rispetto all'ambito epidemiologico è l'applicazione degli studi d'esposizione alla gestione della qualità dell'aria e alla definizione delle politiche di prevenzione. L'individuazione dei micro-ambienti che più pesano sull'esposizione complessiva e dei sottogruppi di popolazione più esposti rappresentano obiettivi di grande rilevanza in tale contesto. La valutazione dell'esposizione, in particolare di sottogruppi sensibili, è infatti espressamente indicata dall'Organizzazione mondiale della sanità^{2,6} come una delle priorità non solo rispetto alla quantificazione degli effetti, ma anche nella definizione di politiche di prevenzione. La stessa legislazione europea indica il «grado d'esposizione delle popolazioni, in particolare dei sottogruppi sensibili», come uno dei principali fattori di cui tenere conto nella fissazione dei valori limite e delle soglie d'allarme per le concentrazioni degli inquinanti atmosferici.⁷

La valutazione dell'esposizione può essere fatta tramite attività sia sperimentali sia modellistiche.^{8,9} Le misure sono da considerare come primo strumento d'indagine, ma sono molto costose in termini d'impiego di risorse sia umane sia fi-

nanziarie. L'impiego della modellistica, infatti, viene spesso invocato non solo per le sue proprie potenzialità intrinseche (simulazione di scenari e analisi dei determinanti), ma anche come unica via percorribile nella maggior parte delle situazioni a causa della mancanza dei finanziamenti consistenti necessari per adeguate indagini sperimentali. Le direttive europee⁷ enfatizzano l'importanza della modellistica, anche se non espressamente nella valutazione dell'esposizione, come importante strumento d'analisi, di programmazione e di supporto alle decisioni.

La modellistica dell'esposizione è già da alcuni anni applicata negli Stati Uniti¹⁰ e in diversi paesi del Nord-Europa¹¹⁻¹³ come componente finale di una catena modellistica completa per la gestione della qualità dell'aria. In Italia le esperienze d'utilizzo sistematico della modellistica sono invece abbastanza isolate. Esistono alcune applicazioni operative di modelli nell'ambito della stima dell'evoluzione temporale delle concentrazioni degli inquinanti nell'aria ambiente, ma le applicazioni di modelli d'esposizione sono assolutamente episodiche.¹⁴

Anche sotto il versante delle indagini sperimentali gli studi sono in numero molto ridotto.¹⁵ Contributi importanti in questo campo sono venuti da due progetti europei appena conclusi: HEARTS (Health Effects And Risk of Transport Systems - <http://www.euro.who.int/hearts>) e FUMAPEX (integrated systems for Forecasting Urban Meteorology, Air Pollution and Population EXposure - <http://fumapex.dmi.dk>). In questo articolo vengono presentati i risultati delle simulazioni di esposizione all'inquinamento atmosferico di un gruppo di bambini residenti nell'area urbana di Bologna effettuate proprio nell'ambito del progetto FUMAPEX.

La scelta dei bambini come target è stata legata, oltre che alla disponibilità di dati personali sulle residenze e quindi sugli spostamenti casa-scuola (dati resi disponibili in forma anonima grazie alla collaborazione delle due scuole selezionate), alle indicazioni fornite dall'OMS e dai governi dell'Unione Europea in tema di priorità per lo studio e l'implementazione d'azioni per la prevenzione degli effetti dell'inquinamento atmosferico (Children's Environment and Health Action Plan for Europe, CEHAPE).^{16,17}

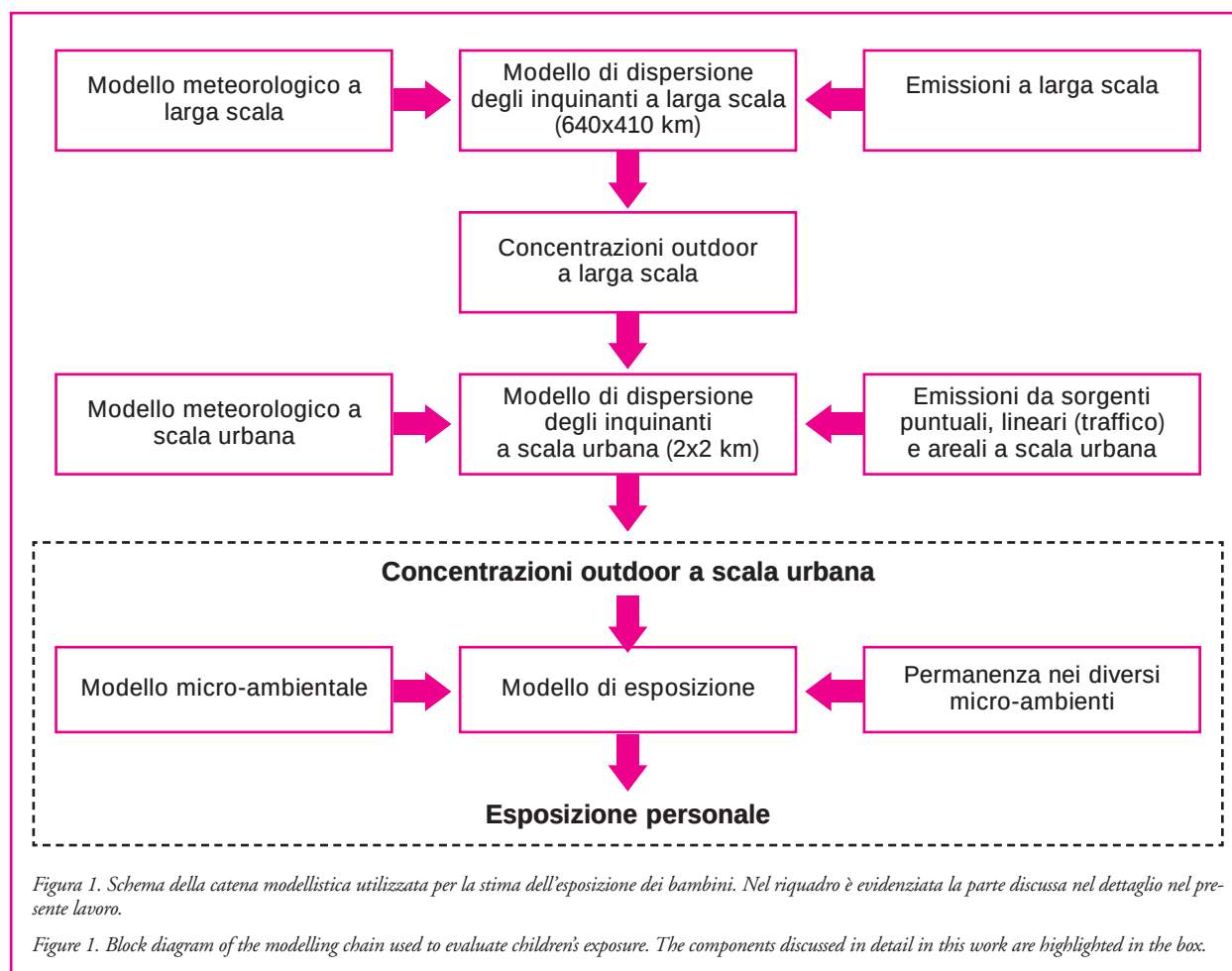
E' stato inoltre considerato importante analizzare l'esposizione in un sottogruppo di popolazione che permettesse, con un realistico impegno finanziario, una futura comparazione tra dati simulati e dati sperimentali.

Materiali e metodi

Le simulazioni d'esposizione a NO_2 e PM_{10} riguardano 333 bambini dai 6 ai 10 anni frequentanti due scuole elementari in un quartiere in prossimità del centro storico di Bologna (zona di Porta S. Felice). Le stime si riferiscono al periodo 01.06.2004 - 31.05.2005. L'area di studio è densamente popolata e caratterizzata da elevati volumi di traffico; all'interno di essa è collocata una stazione fissa di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico (centralina «S.Felice»). Occorre tuttavia tenere in considerazione che la centralina è collocata in una zona di traffico e, nonostante l'area sia in generale contraddistinta dalla presenza di canyon urbani e flussi veicolari elevati, è probabile che essa non rappresenti l'inquinamento di fondo presente nel quartiere. Le centraline fisse, infatti, a seconda della loro specifica collocazione, possono fornire valori di concentrazione, soprattutto per alcuni inquinanti, abbastanza diversi. Per esemplificare le concentrazioni presenti in altre tipologie di siti di misura all'interno dell'area urbana, si consideri che nel 2004 le concentrazioni medie annue di NO_2 delle centraline da traffico sono risultate variabili da $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rilevato presso la centralina «S.Felice»)

a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rilevato dalla centralina «Fiera»), mentre la concentrazione media annua nel sito di misura di fondo urbano (centralina «Giardini Margherita») è risultata pari a $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Per il PM_{10} le uniche centraline presenti all'interno dell'area urbana sono centraline da traffico; i livelli medi annui rilevati nel 2004 da queste stazioni sono stati pari a circa $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Si tenga presente che la letteratura associa al PM_{10} una variabilità spaziale molto più contenuta rispetto agli altri inquinanti, con una conseguente minore influenza della tipologia di centralina sui livelli medi misurati.

Un elemento essenziale nella modellistica d'esposizione è rappresentato dalla stima delle concentrazioni nell'aria ambiente (concentrazioni outdoor). Tali concentrazioni sono state ottenute utilizzando una complessa catena modellistica che, partendo dalle simulazioni dell'evoluzione temporale delle grandezze meteorologiche e delle concentrazioni degli inquinanti a larga scala (dominio di simulazione $640 \times 410 \text{ km}$), arriva alla simulazione dell'evoluzione temporale delle concentrazioni degli inquinanti a scala urbana. In particolare, il dominio di simulazione del modello a scala urbana è stato di $2 \times 2 \text{ km}$ e solo i bambini residenti in quest'area sono stati in-



clusi nello studio. A causa della complessità del sistema modellistico che porta alla stima delle concentrazioni outdoor, non è qui possibile né riportarne una descrizione dettagliata né discuterne le criticità. La figura 1 ne mostra solo lo schema logico; si rimanda per una trattazione esauriente degli aspetti specifici ai documenti conclusivi del progetto FUMAPEX (http://fumapex.dmi.dk/Pub/Docu/Reports/FUMAPEX_D8.2.fv.pdf). In questo lavoro viene illustrata solo la metodologia utilizzata per definire il modello d'esposizione (parte evidenziata nel box in figura 1).

L'esposizione è stata calcolata, a livello individuale, come la media pesata delle concentrazioni presenti nei micro-ambienti frequentati dal singolo bambino nelle diverse ore della giornata e nei diversi periodi dell'anno.

I micro-ambienti considerati sono stati quattro: indoor residenziale, indoor scolastico, outdoor residenziale e traffico. L'esposizione indoor residenziale è stata ottenuta applicando coefficienti d'infiltrazione outdoor/indoor ai dati ottenuti dalle simulazioni outdoor. I coefficienti d'infiltrazione sono stati derivati dai risultati del progetto europeo EXPO-LIS (Air pollution exposure distributions of adult urban populations in Europe - <http://www.ktl.fi/expolis>), il più importante studio europeo sulle relazioni outdoor-indoor.^{18,19} I coefficienti utilizzati per l'NO₂ e il PM₁₀ sono stati rispettivamente 0,78 e 0,70.

L'esposizione indoor scolastica è stata ottenuta applicando alle concentrazioni outdoor nei pressi delle due scuole i medesimi coefficienti d'infiltrazione utilizzati per le residenze. Le concentrazioni associate all'esposizione outdoor residenziale (legate principalmente ad attività di gioco e sport all'aperto) sono quelle stimate attraverso la catena modellistica outdoor in corrispondenza all'abitazione di ogni bambino.

La modellazione dell'esposizione durante gli spostamenti (micro-ambiente traffico) rappresenta uno degli aspetti più problematici. I risultati degli studi condotti a livello internazionale³ non sono concordi nella comparazione delle esposizio-

	media	mediana	dev std	max	Min
NO2	30,5	30,3	2,1	39,3	25,5
PM10	13,7	13,6	0,8	17,7	12,6

Tabella 1. Statistiche descrittive delle distribuzioni delle esposizioni personali medie annue a NO₂ e PM₁₀ nel campione di bambini.

Table 1. Descriptive statistics of the distribution of personal exposures to NO₂ and PM₁₀ in the sample of children.

ni associate agli spostamenti con differenti modalità di trasporto. Nello specifico del nostro studio, si è dovuto anche affrontare il problema della indisponibilità dei dati di utilizzo da parte dei bambini delle differenti modalità di trasporto. Tuttavia, nella consapevolezza della notevole approssimazione soggiacente a questa assunzione, ma sulla scorta delle considerazioni presenti nella rassegna degli studi sull'esposizione all'inquinamento atmosferico da traffico, recentemente pubblicata dall'Organizzazione mondiale della sanità,³ si è deciso di stimare l'esposizione associata agli spostamenti moltiplicando i dati di concentrazione della centralina fissa per un coefficiente indicato dall'OMS come sintesi dei valori ottenuti nei principali studi a livello internazionale sull'esposizione sui mezzi di trasporto, in particolare in auto. I coefficienti utilizzati sono stati 2,1 per l'NO₂ e 1,5 per il PM₁₀.

Il tempo impiegato da ogni bambino nei vari micro-ambienti è stato stimato usando informazioni ottenute dalle scuole selezionate per quanto riguarda la permanenza negli ambienti scolastici e da un'indagine condotta dall'Istituto superiore di sanità a Ferrara (che comprendeva anche un sotto-campione di bambini)²⁰ per quanto riguarda la permanenza outdoor per gioco e sport (tempo considerato uguale per tutti i bambini). Il tempo speso nel traffico è stato calcolato come

$$T_t = 2 \times D_{rs} \times V$$

dove D_{rs} è la distanza residenza-scuola e V è la velocità media negli spostamenti casa-scuola e viceversa (assunta per tutti uguale a 20 Km/h). Il tempo di permanenza indoor è sta-

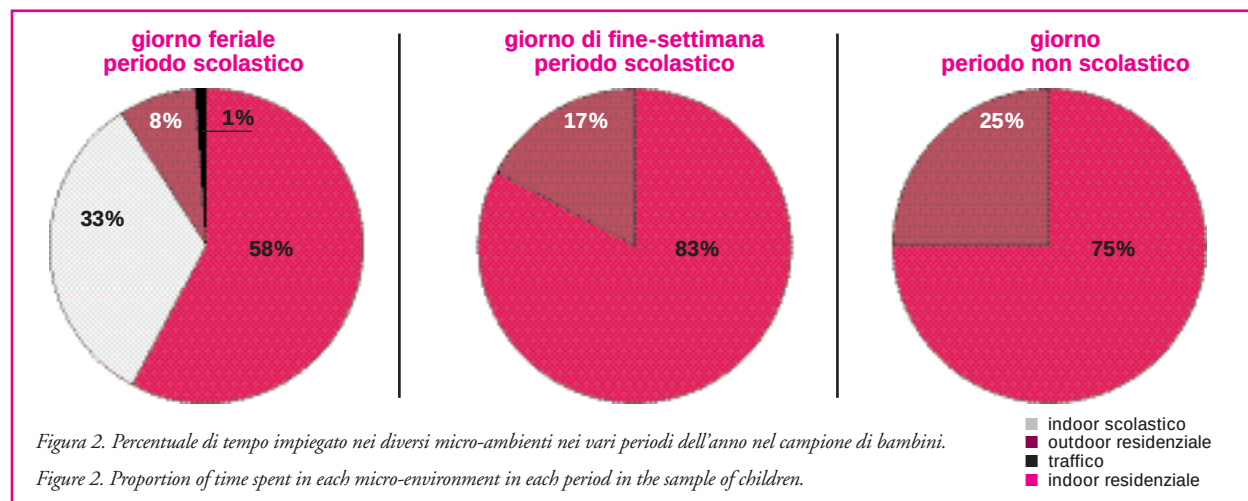




Figura 3. Concentrazioni outdoor di NO_2 in corrispondenza delle residenze dei bambini.

Figure 3. Outdoor NO_2 concentrations by the children's homes.

to ottenuto come differenza tra l'intera giornata e il tempo impiegato negli altri tre micro-ambienti.

Sono state definite tre giornate-tipo: il giorno di scuola nel periodo settembre-maggio, il giorno del fine-settimana sempre nel periodo scolastico e il giorno estivo. L'occupazione dei diversi micro-ambienti nel periodo estivo è stata ottenuta tramite considerazioni soggettive.

La figura 2 sintetizza nel campione le permanenze medie nei diversi micro-ambienti per le tre giornate tipo. In sintesi, l'esposizione media annua di ogni singolo individuo è stata ottenuta utilizzando la seguente formula:⁸

$$P_i = \sum t_{ijg} M_{ijg} / t_{\text{total}}$$

dove j è l'indice relativo al micro-ambiente (residenziale indoor, indoor scolastico, eccetra.), i è l'indice dell'individuo considerato, g è l'indice relativo alla tipologia di giorno (feriale periodo scolastico, festivo periodo scolastico, estivo), P_i è l'esposizione media pesata nel tempo per l'individuo i , M_{ijg} è la concentrazione media dell'inquinante (PM_{10} o NO_2) a cui è esposto l'individuo i nel micro-ambiente j , t_{ijg} è il numero d'ore spese nel micro-ambiente j e t_{total} è il numero totale d'ore nell'anno. Le concentrazioni medie per ogni micro-ambiente sono state ottenute partendo dalle simulazioni su base oraria. Per le esposizioni indoor il calcolo delle concentrazioni indoor è avvenuto applicando i coefficienti d'infiltrazione ai dati outdoor dell'ora precedente.

Volendo esemplificare, l'esposizione indoor scolastica (tipologia d'esposizione ovviamente presente nei soli giorni feriali del periodo scolastico) è stata calcolata mediando nel periodo settembre 2004 - maggio 2005 le concentrazioni ora-

rie stimate outdoor nei pressi della scuola frequentata dal singolo bambino tra le 7 e le 15 (i bambini si suppone rimangono a scuola tra le 8 e le 16). A questa concentrazione media è stato poi applicato un coefficiente d'infiltrazione per la stima della concentrazione media indoor. Tale valore d'esposizione contribuisce per 8 h (ore permanenza indoor a scuola) / 24 h = 0,33 (33%) all'esposizione complessiva di un giorno scolastico. Il contributo all'esposizione media pesata annua è pari a 195 gg (giorni di scuola) / 365 gg * 0,33 (contributo nel giorno) = 0,18 (18%). Approcci analoghi sono stati utilizzati per la stima dell'esposizione negli altri micro-ambienti e negli altri periodi dell'anno.

Risultati

Il primo passo nella verifica dei risultati delle simulazioni è stato l'analisi dell'adattamento delle concentrazioni outdoor, ottenute tramite la catena modellistica ai dati rilevati dalla centralina presente nell'area di studio (centralina da traffico «S.Felice»). L'accordo tra dati simulati e misurati è stato soddisfacente: i dati medi annui osservati sono risultati inferiori di circa il 16% per l' NO_2 ($54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e di circa il 21% per il PM_{10} ($33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Per quanto riguarda invece la variabilità spaziale delle concentrazioni outdoor, i livelli d'inquinamento medi annui stimati in corrispondenza delle residenze dei bambini sono risultati compresi tra 28 e $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per l' NO_2 (Figura 3) e tra 22 e $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{10} .

I livelli d'esposizione medi nel campione sono risultati pari a $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per l' NO_2 e $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{10} , sensibilmente inferiori rispetto alle concentrazioni medie outdoor simulate nel sito dove è collocata la stazione di monitoraggio. (-39% per l' NO_2 e -55% per il PM_{10}). La differenza risulta ancora più marcata (-49% e -65%, rispettivamente) se a essere presi a riferimento sono i dati osservati dalla centralina (figura 4). Le esposizioni medie a NO_2 sono risultate in un giorno di scuola circa il 20% maggiori delle esposizioni tipiche nei giorni di fine-settimana del periodo scolastico e di circa il 30% più elevate di un tipico giorno estivo. Risultati simili sono stati trovati per il PM_{10} con percentuali pari a circa il 40% e il 50%, rispettivamente.

La figura 5 riporta le distribuzioni di frequenza delle esposizioni medie annue personali a NO_2 e PM_{10} mentre la tabella 1 ne mostra alcune statistiche descrittive. Il range di variabilità dell'esposizione personale è risultato nel campione molto elevato. Gli individui più esposti sono caratterizzati da esposizioni di poco inferiori al doppio rispetto a quelli meno esposti, sia prendendo a riferimento le esposizioni a PM_{10} che a NO_2 . I bambini residenti in abitazioni poste in prossimità di strade ad alto traffico, sono risultati in media esposti a valori medi di inquinamento sensibilmente superiori alla media del campione. In particolare, il 5% dei bambini residenti nelle strade più trafficate sono risultati esposti in media a concentrazioni residenziali a PM_{10} ed NO_2 più

elevate rispettivamente del 25% e del 36% rispetto al 5% dei bambini residenti nelle strade meno trafficate. Nel periodo scolastico, in media nel campione, il contributo più importante tra i diversi microambienti all'esposizione complessiva è risultato quello indoor residenziale (45%), seguito da quello indoor scolastico (24%). L'esposizione durante gli spostamenti incide sull'esposizione personale in media per circa un 6% a fronte di un tempo di permanenza nel traffico pari allo 0,5%. In termini assoluti la permanenza nel traffico è in media di solo 6 minuti (range 2-10), con valori variabili nel campione tra 2 e 10 minuti.

Discussione

I risultati delle simulazioni d'esposizione di 333 bambini frequentanti due scuole dell'area urbana di Bologna hanno mostrato una notevole variabilità nei livelli d'esposizione personale. Tale risultato è in accordo con la maggior parte degli studi in letteratura²² ed evidenzia

l'importanza di tali tipi d'analisi per l'individuazione dei soggetti più a rischio da un punto di vista espositivo.

Un altro elemento da evidenziare nei risultati è il fatto che i livelli medi d'esposizione siano risultati inferiori alle concentrazioni medie della postazione di monitoraggio presente nell'area. Rispetto a questo punto la letteratura non fornisce un quadro coerente nella valutazione della relazione esistente tra esposizione personale e concentrazione misurata dalle centraline di monitoraggio. La maggior parte degli studi hanno infatti evidenziato una esposizione media dei bambini maggiore o comparabile a quella delle centraline fisse.^{22,23} Esistono però altri studi che, sia rispetto ai bambini in età scolare sia alla popolazione generale, individuano livelli medi d'esposizione inferiori a quelli ambientali.²⁴ Alla base di queste discrepanze vi sono varie motivazioni: la frequente bassa numerosità dei bambini oggetto delle indagini sperimentali, le considerevoli eterogeneità geografiche nelle concentrazioni tipiche nei vari ambienti di vita di particola-

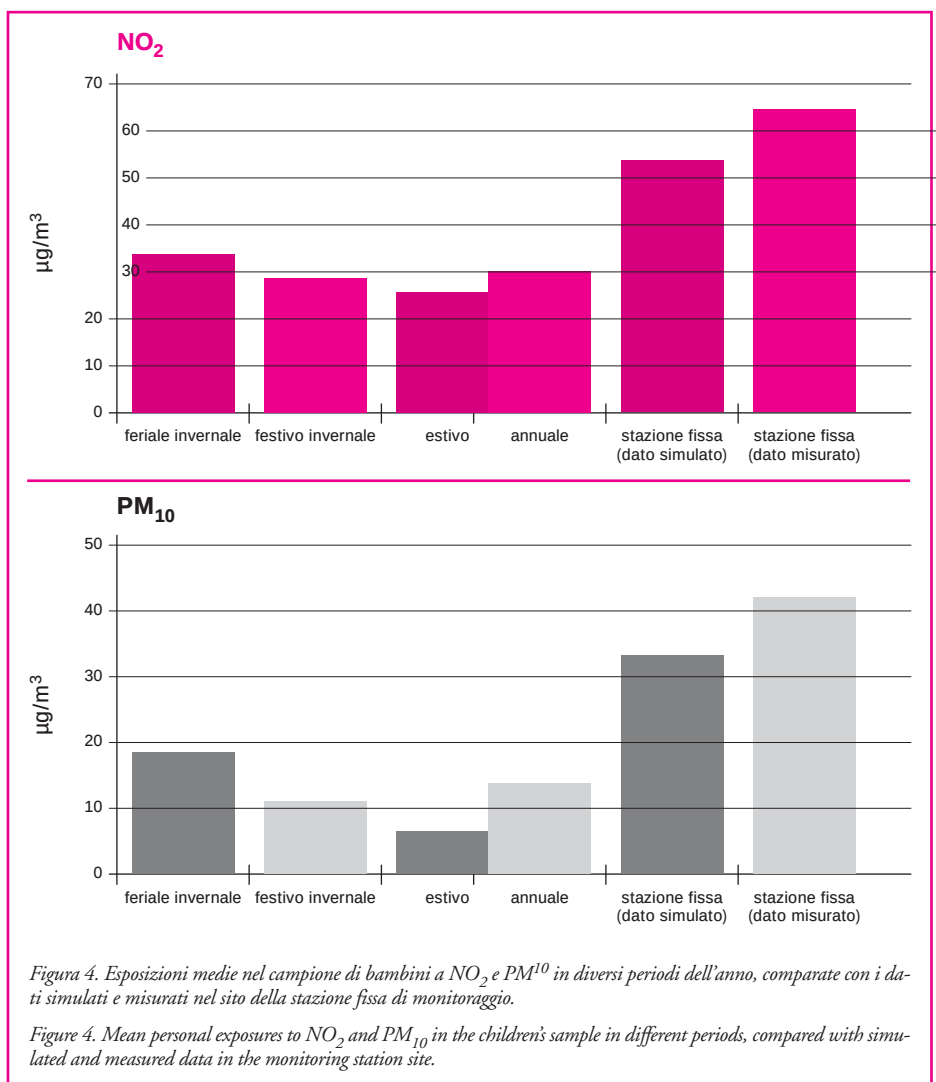
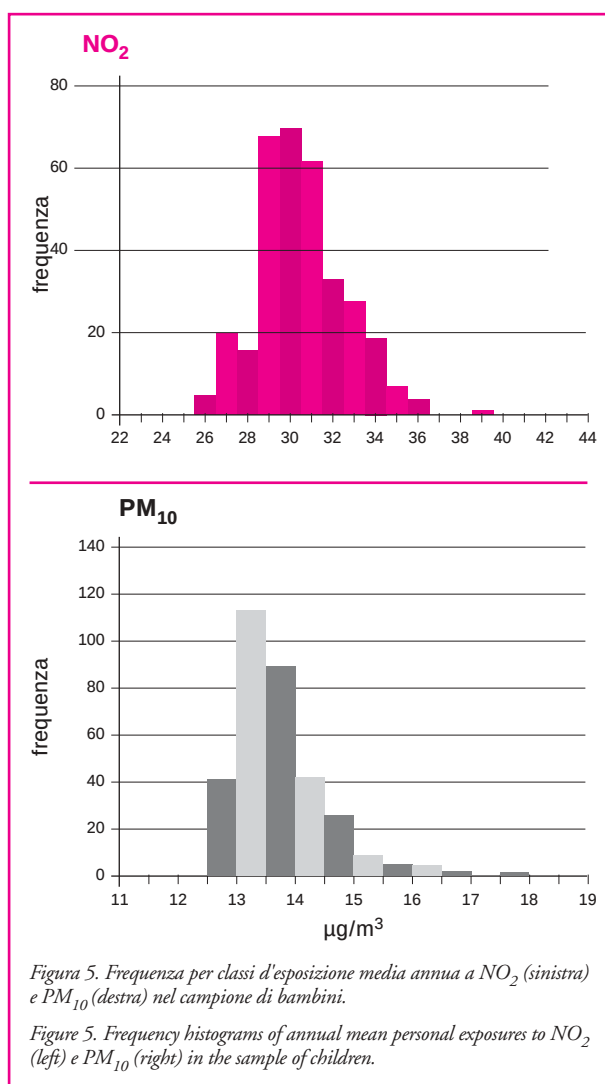


Figura 4. Esposizioni medie nel campione di bambini a NO_2 e PM_{10} in diversi periodi dell'anno, comparate con i dati simulati e misurati nel sito della stazione fissa di monitoraggio.

Figure 4. Mean personal exposures to NO_2 and PM_{10} in the children's sample in different periods, compared with simulated and measured data in the monitoring station site.

to e biossido di azoto, l'inclusione o meno nel campione monitorato dei soggetti esposti a fumo di tabacco, la collocazione delle centraline di monitoraggio considerate come riferimento (nel resto d'Europa le centraline classificate da traffico sono molto meno numerose che in Italia). Sicuramente occorre dire che la non inclusione nel modello d'esposizione del contributo delle sorgenti indoor, e in particolare dell'effetto legato alla cottura dei cibi, induce una sottostima nei risultati.^{15,25} Un altro aspetto da considerare è quello relativo all'aver incluso nel campione dei bambini solo quelli residenti all'interno del quartiere oggetto delle simulazioni ad alta risoluzione. La conseguente limitata permanenza nel traffico rappresenta sicuramente un bias negativo nella determinazione dell'esposizione media nel campione.^{26,27} Le simulazioni, concordemente con la letteratura, hanno evidenziato una grande rilevanza delle esposizioni residenziali, aspetto importante sia rispetto alla valutazione degli effetti sanitari derivanti dal risiedere in prossimità di strade traffi-



cate,³ sia rispetto alla definizione delle strategie di prevenzione. Merita una riflessione anche il contributo dell'esposizione in ambito scolastico, che contribuisce in modo non trascurabile all'esposizione complessiva (per circa 1/4 nel periodo scolastico) e rappresenta l'unico contributo comune tra tutti i soggetti del campione. Proprio per questo sarebbe utile valutare la possibilità d'utilizzare la scuola come luogo privilegiato di salvaguardia della salute dei bambini e di riduzione dell'esposizione all'inquinamento atmosferico, utilizzando sistemi di ventilazione e di filtrazione del particolato all'interno degli scuole stesse.²⁸ Nell'ambito della definizione di strategie di riduzione dell'esposizione dei bambini questa dovrebbe essere tenuta in considerazione, tanto più in un contesto quale è quello dell'esposizione all'inquinamento atmosferico dove le politiche di riduzione delle concentrazioni outdoor degli inquinanti sono difficili da affrontare a livello locale. Studi di modellistica d'esposizione potrebbero permettere in questo ambito una valutazione pre-

ventiva dei benefici attesi da tale tipo d'interventi.

Considerato il carattere prototipale dello studio di stima dell'esposizione qui presentato, si ritiene importante fare alcune puntualizzazioni in merito alle limitazioni presenti e alle criticità emerse rispetto al suo sviluppo, partendo dagli aspetti più generali, per arrivare a quelli propri dello specifico studio. In rapporto agli aspetti più generali, è possibile dire che una prima criticità è rappresentata dal fatto stesso di applicare una catena modellistica completa di qualità dell'aria. Esistono infatti diversi aspetti di ogni singolo componente della catena che sono ancora oggetto di discussione in ambito scientifico. Limitandosi agli aspetti relativi alla modellazione dell'esposizione, rimangono argomento di ricerca la quantificazione dell'esposizione degli individui nelle diverse modalità di trasporto, dei coefficienti d'infiltrazione in funzione delle diverse condizioni meteorologiche, ambientali e abitative e del contributo delle sorgenti indoor (non incluse nello studio). Le assunzioni adottate su questi aspetti rappresentano quindi una potenziale fonte d'errore nei risultati. In questi ambiti un contributo significativo alle conoscenze è stato apportato dal progetto europeo EXPOLIS, i cui risultati, sebbene qui utilizzati per affrontare alcuni aspetti della modellazione, hanno però messo in evidenza le cautele con cui in generale devono essere adottati i risultati d'indagini condotte in altre parti d'Europa e, ancora più, del mondo. Emerge quindi la necessità d'indagini sperimentali approfondite in ambito italiano, dove la configurazione delle città, le abitudini di vita e le concentrazioni dei principali inquinanti, hanno caratteristiche spesso notevolmente diverse da quelle d'altre aree d'Europa. Sempre in generale (e soprattutto nell'ottica dell'estensione delle simulazioni alla popolazione generale) è necessario affrontare il problema della carenza d'informazioni sulla mobilità delle persone. Su quest'ultimo aspetto occorrerebbe la definizione in un'ottica ambientale di strumenti d'indagine socio-demografica e in particolare delle indagini multiscopo dell'ISTAT. Obiettivo finale dovrebbe essere un database sull'utilizzo del tempo con criteri ben definiti, sull'esempio di quanto fatto negli Stati Uniti con il CHAD (Consolidated Human Activity Database - <http://www.epa.gov/chadnet1>).

Rispetto alle limitazioni presenti nelle specifiche scelte dello studio, si ritiene che meritino attenzione gli aspetti legati al contributo delle sorgenti d'inquinamento indoor e del microambiente outdoor, due aspetti già indicati come problematici ma che è utile trattare in rapporto al modo in cui sono stati affrontati nello specifico. Per quanto riguarda il primo aspetto, la scelta è stata quella di non includere tale contributo. La non disponibilità d'informazioni sulle condizioni abitative dei bambini quali, per esempio, quelle sulla presenza di fumatori o sulle modalità di cottura dei cibi, ci ha infatti indotti a rimandare a un successivo sviluppo l'inserimento di questo contributo. Scelta diversa è stata fatta invece per il contributo della permanenza outdoor, includendo in questa definizione il

tempo impiegato all'aperto sia per attività di sport e gioco sia per gli spostamenti. In questo ambito, vista la scarsa conoscenza sulle abitudini di vita dei bambini oggetto dell'analisi (scarsa conoscenza sul tipo e sul luogo delle attività svolte nel tempo libero, assenza d'informazioni sulle modalità di spostamento), si è scelto d'utilizzare informazioni ricavate indirettamente dall'indagine dell'Istituto superiore di sanità o di basarsi su considerazioni di plausibilità (soprattutto rispetto alle attività svolte nel periodo estivo). Questi aspetti necessitano sicuramente di affinamenti, anche per decidere che tipo di concentrazione abbinare a esse (nello studio si è deciso d'abbinare alle attività nel micro-ambiente outdoor la concentrazione in prossimità dell'abitazione).

Un ultimo aspetto da sottolineare riguarda l'importanza della validazione del modello su dati sperimentali: l'utilizzo dei risultati delle simulazioni nell'ambito del supporto alle decisioni (per esempio simulazione di scenari d'esposizione legati ai provvedimenti di limitazione del traffico per la riduzione dell'inquinamento) sarebbe sicuramente agevolato dalla raccolta di dati sperimentali, che però, come già detto, comportano un notevole impegno in termini economici e organizzativi.

Conclusioni

Lo studio ha permesso di sperimentare l'applicazione di una catena modellistica completa per la gestione della qualità dell'aria ed esemplificarne le potenzialità informative. La validazione e l'utilizzo sistematico di una tale catena modellistica potrebbe permettere di valutare i contributi all'esposizione personale complessiva derivanti dalla permanenza nei diversi micro-ambienti, dall'effettuazione dei diversi tipi d'attività e dall'essere interessati alle varie fonti d'emissione e sarebbe quindi di notevole utilità nell'implementazione di azioni e politiche di prevenzione basate su argomentazioni scientifiche.

Conflitti di interesse: nessuno

Bibliografia

1. Biggeri A, Bellini P, Terracini B. Meta-analysis of the Italian studies on short-term effects of air pollution – MISA 1996-2002. *Epidemiol Prev* 2004; 28(4-5): 1-100.
2. World Health Organization (WHO). *Air quality guidelines for Europe*. WHO Regional Publications, European Series N° 91, 2000.
3. World Health Organization (WHO). *Health effects of transport-related air pollution*. Copenhagen, Denmark 2005.
4. Pellizzari ED, Clayton CA, Rodes CE et al. Particulate matter and manganese exposures in Toronto, Canada. *Atmos Environ* 1999; 33(5): 721-34.
5. Kousa A, Oglesby L, Koistinen K, Kunzli N, Jantunen M. Exposure chain of urban air PM_{2.5} – association between ambient fixed site, residential outdoor, indoor, workplace and personal exposures in four European cities in the EXPOLIS-study. *Atmos Environ* 2002; 36: 3031-39.
6. World Health Organization (WHO). *Quantification of the health effects of exposure to air pollution*. European Centre for Environment and Health. Copenhagen, Denmark 2001.
7. DIRETTIVA 96/62/CE DEL CONSIGLIO del 27 settembre 1996 in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente. Gazzetta ufficiale n. L 296 del 21.11.1996.
8. Ryan PB. An overview of human exposure modelling. *J Expos Anal Environ Epidemiol* 1991; 1(4): 453-74.
9. Duan N, Mage DT. Combination of direct and indirect approaches for exposure assessment. *J Expos Anal Environ Epidemiol* 1997; 7(4): 439-70.
10. Law PL, Liou PJ, Zelenka MP, Huber AH, McCurdy TR. Evaluation of a probabilistic exposure model applied to carbon monoxide (pNEM/CO) using Denver personal exposure monitoring data. *J Air Waste Manage Assoc* 1997; 47: 491-500.
11. Kousa A, Kukkonen J, Karppinen A, Aarnio P, Koskentalo T. A model for evaluating the population exposure to ambient air pollution in an urban area. *Atmos Environ* 2002; 36: 2109-19.
12. Johansson C, Hadenius A, Johansson PA, Jonson T. SHAPE. The Stockholm study on health effects of air pollution and their economic consequences Part I: NO₂ and particulate matter in Stockholm – concentrations and population exposure. 1999; Swedish National Road Administration No. 1999: 41, Stockholm, Sweden.
13. Dimitroulopoulou C, Ashmore MR, Byrne MA, Kinnersley RP. Modelling of indoor exposure to nitrogen dioxide in the UK. *Atmos Environ* 2001; 35: 269-79.
14. De Bruin BY, Haenninen O, Carrer P et al. Simulation of working population exposure to carbon monoxide using EXPOLIS_Milan microenvironment concentration and time-activity data. *J Expos Anal Environ Epidemiol* 2004; 14: 154-63.
15. Gallelli G, Orlando P, Perdelli F, Panatto D. Factors affecting individual exposure to NO₂ in Genoa (northern Italy). *Sci Total Environ* 2002; 287: 31-36.
16. Children's Environment and Health Action Plan for Europe, EUR/04/5046267/7, 25 June 2004. Fourth Ministerial Conference on Environment and Health Budapest, Hungary, 23-25 June 2004.
17. *The effects of air pollution on children's health and development: a review of the evidence*. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2004.
18. Kousa A, Monn C, Rotko T, Alm S, Oglesby L, Jantunen MJ. Personal exposures to NO₂ in the EXPOLIS-study: relation to residential indoor, outdoor and workplace concentrations in Basel, Helsinki and Prague. *Atmospheric Environment* 2001; 35: 3405-12.
19. Hanninen OO, Lebret E, Ilacqua V et al. Infiltration of ambient PM_{2.5} and levels of indoor generated non-ETS PM_{2.5} in residences of four European cities. 2004; 38: 6411-23.
20. Istituto Superiore di Sanità. Studio di valutazione dell'esposizione inalatoria a contaminazione atmosferica nella città di Ferrara. 2005, Rapporti ISTISAN 03/19 e 05/19.
21. Hanninen OO, Alm S, Katsouyanni K et al. The EXPOLIS study: implications for exposure research and environmental policy in Europe. *J Expos Anal Environ Epidemiol* 2004; 14(6): 440-56.
22. Keeler GJ, Dvorchak JT, Yip FY et al. Assessment of personal and community-level exposures to particulate matter among children with asthma in Detroit, Michigan, as part of Community Action Against Asthma (CAAA). *Environ Health Perspect* 2002; 110(2): 173-81.
23. Linaker CH, Chauhan AJ, Inskip HM et al. Personal exposures of children to nitrogen dioxide relative to concentrations in outdoor air. *Occup Environ Med* 2000; 57(7): 472-76.
24. Rijnders E, Janssen NAH, Van Vliet HN, Brunekreef B. Personal and outdoor nitrogen dioxide concentrations in relation to degree of urbanization and traffic density. *Environ Health Perspect* 2001; 109(3): 411-17.
25. Belanger K, Gent JF, Triche EW, Bracken MB, Leaderer BP. Association of indoor nitrogen dioxide exposure with respiratory symptoms in children with asthma. *Am J Respir Crit Care Med* 2006; 173(3): 297-303.
26. Van Roosbroeck S, Wichmann J, Janssen NA et al. Long-term personal exposure to traffic-related air pollution among school children, a validation study. *Sci Total Environ* 2006; [Epub ahead of print]
27. Chau CK, TU EY, Chan DW, Burnett J. Estimating the total exposure to air pollutants for different population age groups in Hong Kong. *Environ Int* 2002; 27(8): 617-30.
28. Hanninen OO, Palonen J, Tuomisto JT, Tarja YT, Seppanen O, Jantunen M. Reduction potential of urban PM_{2.5} mortality risk using modern ventilation systems in buildings. *Indoor Air* 2005; 15(4): 246-56.