

L'INQUINAMENTO DA BENZENE A MODENA

Stefano Zauli Sajani, Paolo Lauriola
Area di Epidemiologia Ambientale - ARPA Emilia Romagna
Stefano Forti, Vittorio Boraldi, Daniela Sesti
Sezione Provinciale di Modena - ARPA Emilia Romagna

Questo lavoro costituisce una sintesi della relazione "L'inquinamento da benzene nell'area urbana di Modena" realizzata su incarico del Comune di Modena

INTRODUZIONE

Il Benzene è una sostanza cancerogena e riveste una particolare importanza in campo ambientale. La valutazione dei suoi livelli di concentrazione ha visto un importante impegno di risorse umane e finanziarie da parte sia delle amministrazioni locali che di ARPA Emilia Romagna, tanto che le iniziative attivate si pongono all'avanguardia nel territorio nazionale. Degni di citazione a tal proposito sono lo studio realizzato negli anni 2001-2002 e quello analogo, ma più limitato, effettuato negli anni 2000-2001. Tali studi, finanziati dal Comune di Modena, si inquadrano anche nel contesto di iniziative previste dal D.M. 21 Aprile 1999, che fa obbligo ai Comuni con potenziali problematiche ambientali di redigere un rapporto annuale sulla qualità dell'aria e di predisporre eventuali provvedimenti preventivi a salvaguardia della salute della popolazione. I provvedimenti sono indirizzati prioritariamente a varie forme di limitazione del traffico autoveicolare, del quale viene in tal modo sancita la centralità nella generazione dell'inquinamento urbano, e vengono vincolati ad una preventiva analisi della situazione esistente, da effettuare tramite attività sia di tipo sperimentale che modellistico. Le attività di tipo sperimentale sono incentrate sulle misurazioni tramite centraline fisse operanti in continuo e su campagne di breve estensione temporale condotte con mezzi mobili o campionatori passivi. Le centraline rappresentano ad oggi la principale fonte di informazione sullo stato della qualità dell'aria. Esse hanno il vantaggio della continuità temporale e possono quindi fornire lunghe serie storiche di dati che si rivelano molto utili sia da un punto di vista dell'analisi dei trend che da un punto di vista previsionale. Gli svantaggi sono legati al loro limitato numero, alla loro specifica collocazione e, in definitiva, alla loro rappresentatività. La concentrazione degli inquinanti primari da traffico, e del benzene in particolare è, infatti, estremamente variabile sia in senso temporale che spaziale e le centraline fisse difficilmente permettono di ricavare in modo rigoroso, neppure dove sono in numero maggiore, sia i livelli di inquinamento medi (in senso spaziale) nelle diverse città, sia la distribuzione dei diversi in-

quinanti all'interno delle città stesse. Ciò è dovuto al fatto che la città (soprattutto la tipologia urbana italiana) è un ambito nel quale il raggio di rappresentatività del dato sperimentale è molto ristretto: mentre in ambiti rurali un eventuale dato ambientale può essere rappresentativo di aree vaste (anche chilometri), in ambito urbano valori misurati all'interno di un canyon stradale e a poca distanza dietro gli edifici possono differire anche di alcuni fattori (fino a 5-6 volte). Proprio il canyon stradale è probabilmente la scala spaziale tipica dell'inquinamento atmosferico in ambito urbano. Occorre quindi analizzare in modo critico i dati delle centraline fisse e suggerire strategie di integrazione con i dati di campionatori passivi e mezzi mobili. In particolare, è stata sperimentata nel contesto degli studi sopra citati una procedura per stimare medie annue da campionamenti a finestra temporale. Tale procedura permette di ovviare al problema legato al fatto che le indagini ad alta risoluzione spaziale, a causa della loro dispendiosità, vengono condotte in limitati periodi di tempo, risultando in tal modo esposte al rischio di fenomeni anomali e transitori che possono perturbare la "generalità" del dato ottenuto.

A questo processo di integrazione di dati sperimentali differenti si sono affiancate attività di tipo modellistico per completare il processo di valutazione integrata dei livelli di inquinamento da benzene. L'utilità dell'uso sinergico delle attività sperimentali e modellistiche viene recepito anche da un punto di vista legislativo dal già citato DM 21 Aprile 1999, soprattutto nell'ambito della importante riaffermazione della logica dell'analisi integrata e della programmazione rispetto alla logica dei provvedimenti di emergenza.

L'approccio metodologico utilizzato nello studio del benzene a Modena ha mirato fino dagli inizi proprio all'integrazione tra le diverse metodologie di indagine e di misura anche perché tale approccio è l'unico che possa permettere di accedere ad un quadro ad alta risoluzione spaziale dell'inquinamento da benzene in area urbana. Il dettaglio spaziale risulta molto importante non solo per i numerosi riscontri epidemiologici disponibili in letteratura sull'effetto sulla salute dell'esposizione residenziale agli inquinanti da traffico in prossimità di archi stradali, ma anche per poter stimare in modo appropriato una esposizione media della popolazione rispetto a quegli inquinanti che hanno una grande variabilità spaziale. Proprio la stima dell'esposizione media della popolazione al benzene e degli effetti sanitari ad essa legati hanno rappresentato l'obiettivo finale di tutte le attività intraprese.

Il parametro legislativo nazionale di riferimento per il benzene è l'obiettivo di qualità, fissato dal DM del 25/11/1994 in $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come media annua (valore adottato dal 1/1/1999). La direttiva 1999/30 dell'Unione Europea stabilisce invece un vero e proprio limite di concentrazione ("valore limite per la protezione della salute umana"), fissato a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Di tale limite è prevista l'applicazione dal 1 gennaio 2006, con una tolleranza iniziale del 100% destinata a ridursi allo 0% nel 2010.

I DATI SPERIMENTALI DI BENZENE NEL COMUNE DI MODENA

Le informazioni sperimentali sulle concentrazioni di benzene derivano sia dall'attività di monitoraggio in continuo tramite stazioni fisse, sia da attività di misura straordinarie tramite campionatori passivi e mezzi mobili. Le attività di misura del benzene sono cominciate nel 1996. I dati sono stati raccolti e validati dalla Sezione di Modena dell'ARPA Emilia Romagna. Le centraline fisse collocate all'interno dell'area urbana di Modena e allestite per il monitoraggio del benzene sono due: la stazione Nonantolana, attiva dal 1998 e collocata nella prima periferia (Via Nonantolana - zona centro commerciale Torrenova) in prossimità di una strada a traffico medio-alto, e la stazione XX Settembre, operativa dal settembre del 1999 e ubicata nel centro storico in una zona a traffico limitato. I dati delle due stazioni sono quindi ricavati da situazioni con caratteristiche molto diverse e tale differenza si riflette nelle concentrazioni medie: la stazione Nonantolana è caratterizzata da valori medi di concentrazione circa doppi rispetto a XX Settembre.

L'analisi dei trend storici è vincolata al monitoraggio relativamente recente di tale inquinante. Essi paiono suggerire una leggera crescita delle concentrazioni medie dal 1998 al 2000 e un decremento nel 2001. Sono stati calcolati anche gli andamenti tipici del benzene in entrambe le stazioni rispetto al giorno tipico, alla settimana tipica e all'anno tipico. L'analisi degli andamenti medi giornalieri evidenzia la stretta dipendenza tra i flussi di traffico e la concentrazione di benzene. Sono infatti evidenziabili due picchi di inquinamento nelle fasce orarie 8-9 e 20-21. È utile notare come i picchi di concentrazione di benzene del mattino siano in fase rispetto ai picchi di traffico mentre quelli della sera risultano sfasati di circa due ore. Va inoltre evidenziato come al marcato minimo di concentrazione degli inquinanti primari nelle ore centrali della giornata non corrisponda un altrettanto marcato minimo nei flussi di traffico. Ciò è dovuto principalmente alle migliori capacità dispersive dell'atmosfera nelle ore centrali del giorno. A questo proposito, occorre dire che gli andamenti riportati sono valori medi annuali. Se si analizzano gli andamenti medi giornalieri differenziati per stagione, si evidenzia un altro aspetto importante dovuto alle differenti proprietà dispersive dell'atmosfera nelle differenti condizioni meteorologiche e nelle diverse ore della giornata. Nei mesi autunnali ed invernali, quando il sole tramonta presto, il picco serale di inquinamento risulta sensibilmente più alto del picco mattutino. L'opposto succede nei mesi estivi e primaverili quando le giornate sono più lunghe e lo strato limite planetario conserva le proprietà dispersive proprie dei vortici convettivi fino alle ore serali.

Il ruolo dell'accumulo giornaliero degli inquinanti sembra giocare un ruolo secondario anche se comunque evidenziabile nel valore più alto del picco serale di inquinamento nei mesi autunnali ed invernali: essendo infatti comparabili sia le intensità dei flussi di traffico che le proprietà dispersive dell'atmosfera,

è lecito da questo dedurre che la differenza tra i picchi di inquinamento del mattino e della sera siano da imputare all'accumulo degli inquinanti primari nelle aree di emissione.

Gli andamenti settimanali confermano la stretta dipendenza tra traffico ed inquinamento. (La scala settimanale è tra l'altro l'unica scala temporale dove il fattore meteorologia non ha influenza sugli andamenti). È infatti evidente un sensibile decremento dell'inquinamento medio nel fine settimana dove i flussi di traffico sono inferiori.

L'analisi degli andamenti annuali evidenzia concentrazioni medie dei principali inquinanti più elevate nei periodi autunnali ed invernali. Il rapporto tra massimo invernale e minimo estivo è circa uguale a 3 per la stazione di Nonantolana e a 2 per XX Settembre. La variabilità delle concentrazioni nei diversi periodi dell'anno è da imputare in modo preponderante alla variazione delle condizioni meteorologiche.

Per quanto concerne i campionamenti non in continuo, il benzene è l'inquinante per il quale se ne è fatto un largo uso. I campionatori utilizzati sono campionatori passivi a simmetria radiale, detti radielli. Essi sono stati utilizzati a Modena essenzialmente in tre modi: campagne periodiche condotte dal 1996 al 1999 a cadenza mensile e della durata di una settimana cadauna, in 5 postazioni in area urbana, 2 campagne di misura ad elevato dettaglio spaziale e diversi campionamenti legati alla verifica dell'efficacia di provvedimenti ed iniziative legati alla lotta contro l'inquinamento. Particolare importanza rivestono le due campagne ad elevata risoluzione spaziale: la prima condotta nel solo mese di novembre 1999 in 25 punti della città, la seconda negli anni 2001-2002 in 73 punti. La campagna del novembre 99 ha evidenziato livelli molto alti di concentrazione, in gran parte dei casi superiori al riferimento legislativo medio annuo. La campagna è stata però condotta in un periodo caratterizzato da condizioni di forte stabilità atmosferica e con una forte accumulazione degli inquinanti al suolo e non è quindi un dato ottenuto in condizioni di inquinamento medio. Alla campagna del novembre 1999 ha fatto seguito un più sistematico e dettagliato campionamento in 73 siti all'interno dell'area urbana effettuato da settembre 2001 a giugno 2002 con 5 periodi di campionamento di una settimana ciascuno.

INTEGRAZIONE TRA CENTRALINE FISSE E CAMPIONATORI PASSIVI E STIMA DELLE MEDIE ANNUE

La conoscenza della distribuzione dell'inquinamento all'interno delle città rappresenta uno degli obiettivi più ambiziosi e di maggior importanza in ottica sia ambientale sia epidemiologica. La bassa rappresentatività spaziale delle centraline fisse rappresenta una importante limitazione ad un loro utilizzo in questa ottica, anche prospettandone un aumento di numero: questioni di costo, ingombro, manutenzione e gestione dei dati impediscono infatti la percorribilità di una tale strada. Occorre quindi non solo un utilizzo appropriato di modellistica di vario tipo ma anche una integrazione dei

dati delle centraline fisse con i dati di strumenti di misura più "snelli" come i campionatori passivi ed i mezzi mobili. Questi ultimi prevedono però, dati gli elevati costi, un tempo di rilevazione limitato all'interno del quale eventuali episodi anomali di inquinamento (rispetto alle medie del periodo) hanno un notevole effetto distorto rispetto alle medie di lungo periodo e non sono comunque lo strumento appropriato per cogliere, oltre alla variabilità spaziale, la marcata variabilità temporale di quasi tutti gli inquinanti. La figura 1 evidenzia la grande variabilità delle concentrazioni di benzene nella stazione di Via Nonantolana nell'anno in cui è stata fatta l'ultima campagna intensiva di misure; in scuro sono rappresentati i periodi di misura con campionatori passivi.

Sebbene, quindi, campionatori fissi e mobili non permettano, da soli, una mappatura dell'inquinamento, un loro uso sinergico potrebbe consentire, a determinate condizioni, un monitoraggio più dettagliato a livello spaziale e temporale che si affiancherebbe in modo efficace alla modellistica. Qualora si stabilisse infatti che esiste una buona correlazione tra un sito non provvisto di apparati di misura in continuo di un certo inquinante e uno in cui sia collocata una centralina fissa, sarebbe possibile derivare la concentrazione nel primo sito tramite un campionamento a finestra temporale. In particolare, la procedura consiste nel fare cam-

di una buona correlazione degli inquinanti primari da traffico è suffragata del resto dalla constatazione della peculiarità dell'ambiente urbano. La città può essere infatti generalmente considerata un ambiente uniforme da un punto di vista dell'andamento temporale delle proprietà dispersive, anche se non solo le singole grandezze meteorologiche ma anche le proprietà dispersive possono avere una distribuzione estremamente puntuale (es. a causa della diversa configurazione geometrica dei canyon stradali). A questo si aggiunge che gli ambiti urbani sono interessati da una sorgente di inquinamento preponderante e dall'andamento temporale analogo in tutte le aree della città: il traffico veicolare. Questi aspetti suggeriscono la possibilità dell'esistenza di buone correlazioni non solo tra i diversi siti ma anche nello stesso sito tra i vari inquinanti primari da traffico, al di là delle loro differenti caratteristiche fisico-chimiche.

Uno studio sui dati delle centraline fisse condotto da ARPA Emilia Romagna (ARPA, 2001) ha evidenziato come, sulla base dei dati delle centraline fisse all'interno degli ambiti urbani, questo approccio appare giustificato con un errore accettabile in un numero consistente di siti e di inquinanti, soprattutto rispetto alla determinazione di medie di lungo periodo (mensili, stagionali, annuali). D'altronde, le medie di

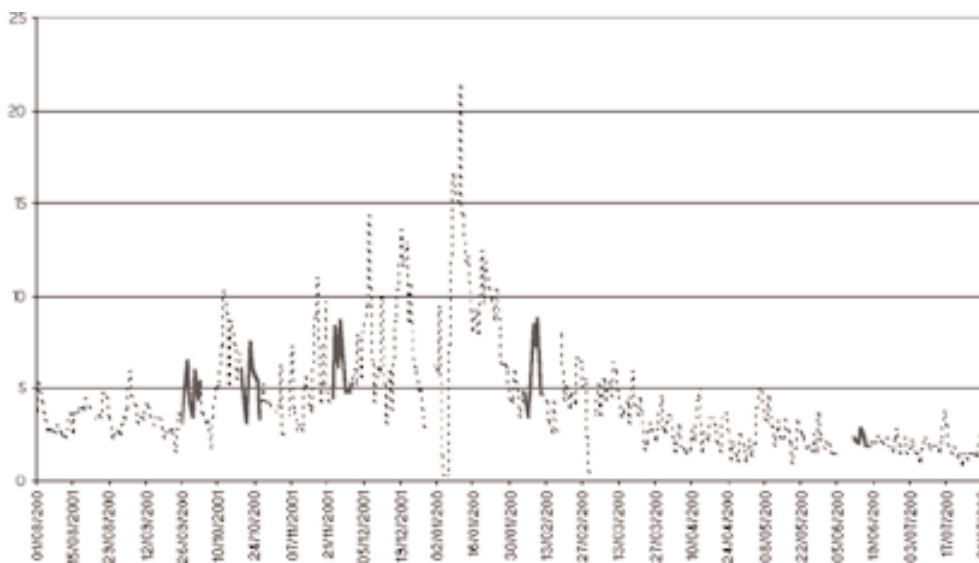


Figura 1 - Andamento temporale delle medie giornaliere di benzene nella stazione Nonantolana nel periodo 1/8/2001 - 31/7/2002. In scuro sono evidenziati i periodi delle campagne di misura intensiva con campionatori passivi

pionamenti limitati nel tempo in diversi punti della città (con mezzi mobili o campionatori passivi), calcolare il coefficiente di correlazione per ognuno di essi rispetto ad una o più centraline fisse prese come riferimento e, nel caso questo risulti superiore ad una soglia stabilita, ottenere una relazione funzionale e ricavare sulla base di questa l'andamento della concentrazione per tutto l'anno. La procedura si semplificherebbe ulteriormente nel caso si verificasse che tra due punti di misura qualsiasi di un certo inquinante all'interno dell'area urbana esiste una buona correlazione. L'esistenza

lungo periodo sono uno dei parametri più importante da un punto di vista della programmazione del territorio e, spesso, anche da un punto di vista della prevenzione sanitaria.

Si è quindi utilizzata la procedura sopra delineata per determinare le medie annue nei 73 siti ove sono stati collocati i campionatori passivi nella campagna 2001-2002 (Figura 2). Le stime per l'anno 2001 sono risultate inferiori di circa un 10% rispetto a quelle del 2000. Questa diminuzione, che rispecchia quella del-



la centralina di riferimento di Via Nonantolana, è sicuramente sensibile ma potrebbe essere da addebitare o alla diversità delle condizioni meteorologiche dei due anni considerati o anche in parte ai provvedimenti di limitazione del traffico adottati nel corso del 2001.

Per quanto riguarda i risultati dell'indagine sperimentale condotta, si può concludere, che:

- hanno più edifici che li delimitano e quindi che vedono più persone potenzialmente esposte.
5. Gli incroci sono caratterizzati da livelli di inquinamento da benzene variabili tra 7 e 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Gli incroci non rappresentano quindi solo gli "hot spot" rispetto all'inquinamento da benzene ma anche la tipologia caratterizzata dalla più marcata variabilità. È sicuramente possibile dire che la gran

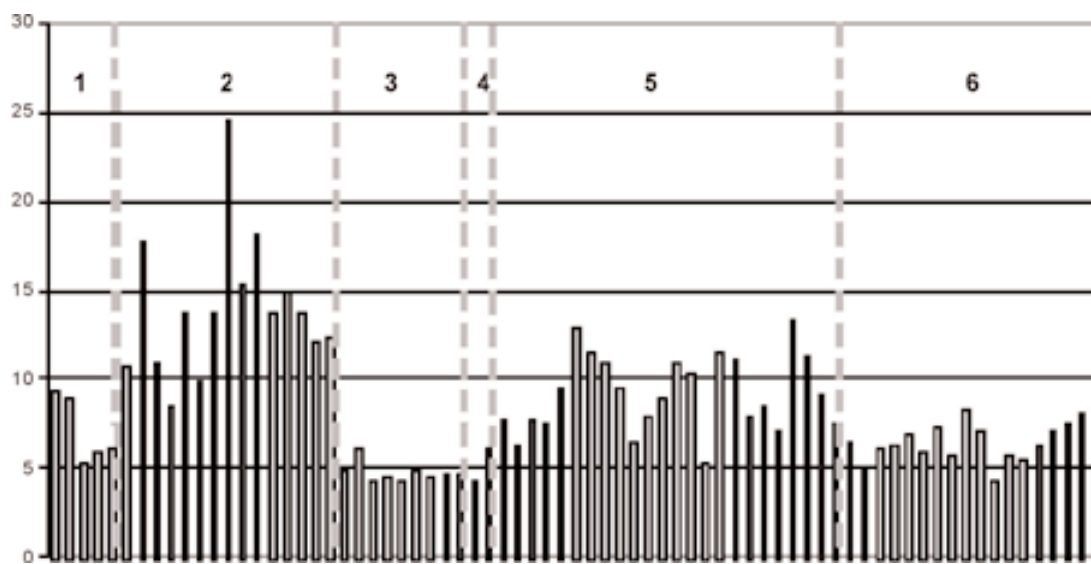


Figura 2 – Stima delle medie annue 2000 nei 73 siti di campionamento 2001-2002 suddivisi per categorie 1) Categoria Centro Storico 2) Categoria Incroci 3) Categoria Parchi 4) Categoria Poli Scolastici 5) Categoria Strade 6) Categoria Zone Residenziali

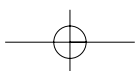
1. I parchi cittadini sono caratterizzati da livelli di inquinamento da benzene pari a circa $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le diversità di concentrazione media annua tra i parchi sono minime. L'unica diversità appena significativa è quella relativa all'area verde adiacente ai viali che costeggiano il centro storico. Pare quindi lecito parlare di un inquinamento di fondo in tutta la città di circa $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
2. Le aree residenziali sono caratterizzate da livelli di concentrazione di benzene variabili a seconda delle zone tra 4 e $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
3. Le aree del centro storico sono caratterizzate da livelli di inquinamento da benzene variabili a seconda delle zone tra 5 e $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In alcuni archi stradali del centro i livelli di inquinamento da benzene sono quindi al di sotto dei limiti di legge anche se non se ne discostano molto. Pur essendo infatti il flusso di autoveicoli in tali aree non elevato, gli ambiti stradali molto ristretti e chiusi ostacolano la dispersione degli inquinanti.
4. Gli archi stradali sono caratterizzati da livelli di inquinamento da benzene variabili da 4 a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Questa tipologia di siti risente quindi di una notevole variabilità che dipende sia dai flussi di traffico che dalla configurazione degli ambiti stradali. Esistono quindi un certo numero di archi stradali che superano o sono molto prossimi al superamento dei limiti di legge. Occorre anche rimarcare che gli archi stradali più critici sono spesso anche quelli che

parte degli incroci tra archi stradali con flussi significativi di autoveicoli è caratterizzata da livelli di inquinamento da benzene oltre i limiti di legge. Particolare importanza hanno in questo ambito i semafori e quindi le fasi di ripartenza degli autoveicoli. Non è possibile dai dati a disposizione trarre conclusioni generali sui vantaggi ambientali della sostituzione delle intersezioni regolate da semafori con intersezioni con rotonde. Si ritiene tuttavia, da valutazione qualitative sui dati, che ci possa essere un vantaggio in termini ambientali derivante dalla presenza di rotonde.

SIMULAZIONI MODELLISTICHE E CONFRONTO CON I DATI SPERIMENTALI

La parte modellistica è stata condotta dal Centro per la Prevenzione dei Danni Ambientali e Sanitari da Traffico di ARPA Emilia Romagna, che si è avvalso dell'utilizzo del software IMMIS LUFT (IVU - www.immis.de), un modello di simulazione dell'inquinamento da traffico autoveicolare in area urbana. Esso permette di stimare le medie annue delle concentrazioni di inquinanti primari da traffico all'interno dell'ambito stradale racchiuso tra edifici ("canyon" stradale): questo rappresenta l'approccio comunemente utilizzato per la valutazione delle concentrazioni di inquinanti in ambito urbano.

La meteorologia viene considerata dal modello nei termini di vento medio annuale e di andamenti tipici an-





nuali della temperatura al suolo e del vento. Il vento medio annuale è stato calcolato tramite la centralina meteorologica di C.so Cavour (vento medio annuale ≈ 1.1 m/s). Altre informazioni richieste in input dal modello sono la composizione del parco macchine e il traffico giornaliero sui singoli archi stradali.

La composizione del parco macchine adottata è riferita all'area comunale per l'anno 2000. Non è stato possibile avere dall'ACI dati più recenti.

I flussi di traffico sui principali archi stradali sono stati forniti dal Settore Traffico del Comune di Modena e ricavati utilizzando il modello di simulazione del traffico VISUM. I dati forniti da VISUM si riferiscono ad una rete stradale semplificata comprendente comunque tutti i principali archi stradali dell'area comunale. I valori di traffico giornaliero sono stati desunti dalle simulazioni riferite all'ora di punta del mattino considerando il picco di flusso come il 13,5% del flusso totale giornaliero. Questo coefficiente è stato ricavato sulla base di campionamenti su alcuni archi stradali cittadini effettuati dal Comune e dalla Provincia di Modena. Gli stessi dati sono serviti anche per dare una prima valutazione del flusso di mezzi pesanti sulla rete. I rilievi di traffico disponibili sulle arterie maggiormente utilizzate dal trasporto commerciale sono stati utilizzati per stimare un valore percentuale medio del flusso del trasporto pesante rispetto al flusso totale. Il flusso di automezzi del trasporto pubblico è stato considerato in modo dettagliato desumendolo dai percorsi e dalle frequenze delle linee cittadine.

I risultati delle simulazioni evidenziano livelli di concentrazione, in alcuni archi stradali, ben al di sopra dei limiti di legge. Le aree più a rischio, appaiono quelle in prossimità del centro storico (Viale Muratori, Via C. Menotti) e alcuni importanti archi stradali nella immediata periferia (Viale Amendola, Via Morane). Detti valori devono essere considerati realistici solo all'interno dei "canyon" stradali. Con ogni probabilità, infatti, le concentrazioni a distanza dagli archi stradali non raggiungerebbero valori così elevati. Essi rappresentano, comunque, valori a cui una parte della popolazione è effettivamente esposta (quella residente in

prossimità della strada e quella transitante sulla stessa) e sono quindi degni di particolare attenzione.

Il confronto tra medie annue ricavate dai dati sperimentali e stime modellistiche è applicabile solo alla categoria di punti di prelievo denominata "strade". La comparazione tra le due valutazioni evidenziano una generalmente ottima concordanza anche se le stime sperimentali sono generalmente più elevate di quelle modellistiche (Figura 3). La differenza potrebbe essere addebitabile ad un inquinamento di fondo derivante dal trasporto di aria inquinata o alle sorgenti di emissione di benzene non considerate dal modello quali i ciclomotori. La concordanza tra modello e dati sperimentali è migliore quando l'ambito stradale è più assimilabile ad un "canyon".

Le variabili modellistiche risultate più importanti rispetto al determinarsi dei livelli di benzene negli ambiti stradali sono state, oltre ai flussi di traffico ed alla composizione del parco macchine, i parametri geometrici dei "canyon" e la congestione degli archi stradali (individuata tramite il "daily stop and go" - percentuale tempo medio di stasi dei veicoli). L'evidenza dell'importanza dei parametri geometrici emerge del resto dall'analisi dei livelli di inquinamento in prossimità delle tangenziali, che, pur essendo caratterizzate da elevatissimi flussi di traffico sia leggero che pesante, risultano affette da basse concentrazioni di benzene proprio grazie alla conformazione "aperta" della strada. Si rivelano quindi molto più esposti al rischio inquinamento gli archi stradali racchiusi tra file contigue di edifici. Si ritiene che la configurazione geometrica degli archi stradali debba essere tenuta in debito conto sia dal legislatore, sia dalle autorità locali nella definizione dei criteri della pianificazione urbanistica. Altri parametri importanti sono quelli meteorologici: un limitato aumento del vento medio annuo può provocare radicali riduzioni delle concentrazioni stimate. Ciò costituisce, del resto, una conferma della evidenza sperimentale delle particolari problematiche ambientali che si riscontrano nelle città del bacino padano, caratterizzate da scarsa ventilazione.

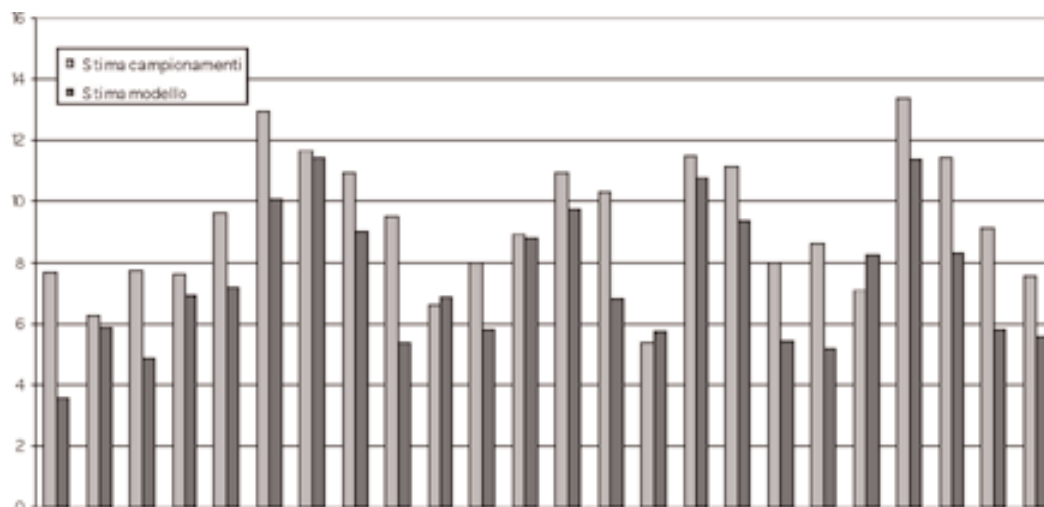
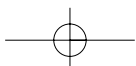


Figura 3 - Confronto tra stime delle medie annue 2000 ottenute dai dati sperimentali e dal modello di simulazione.



ESPOSIZIONE DELLA POPOLAZIONE E STIMA DI IMPATTO SANITARIO

La popolazione è esposta a benzene soprattutto attraverso l'inalazione di aria contaminata (per circa il 90%), particolarmente in aree di grande traffico automobilistico e attraverso il fumo di tabacco per fumo attivo o passivo. Il fumo di sigaretta contribuisce in modo preponderante alla dose assunta quotidianamente tanto che un soggetto fumatore inala una quantità di benzene fino a 30 volte maggiore di un non fumatore.

Il livello di rischio per la cittadinanza, che dipende dalla reale esposizione, non può essere facilmente stimato per mezzo della misura dell'inquinamento urbano outdoor. Per ottenere una stima dell'esposizione personale media della popolazione modenese, si è ritenuto opportuno utilizzare i risultati del progetto MACBETH, il più importante studio condotto a livello europeo sull'esposizione a benzene per soggetti non fumatori. Tra i risultati più importanti dello studio vi è sicuramente la definizione del rapporto tra esposizione media della popolazione e inquinamento medio outdoor. In particolare, l'esposizione media della popolazione è risultata più elevata del livello di inquinamento medio dell'area urbana. Si è ritenuto utile adottare una procedura analoga al progetto MACBETH per la stima di un valore medio urbano, in modo da poter utilizzare il rapporto misurato nell'ambito dello stesso progetto tra esposizione media personale e la media urbana così calcolata. In particolare, si è calcolata dapprima una media urbana con i dati misurati a Modena seguendo il criterio di selezione dei siti utilizzato nel progetto MACBETH, per poi poter utilizzare il rapporto media urbana/media esposizione ricavato nell'ambito del suddetto progetto per stimare l'esposizione della popolazione. Si sono quindi fatte delle medie delle stesse tipologie di punti con i dati di Modena e si sono pesate queste tipologie come nella metodologia MACBETH. Questo ha portato alla stima di una media urbana variabile tra 7 e 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il 2000 e tra 6 e 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il 2001 a seconda della riclassificazione della tipologia dei punti di misura. Applicando un rapporto tra media urbana e media di esposizione uguale a quello ottenuto a Padova (nell'ambito del progetto MACBETH) e pari a 1.4, è possibile stimare un'esposizione media della popolazione variabile tra 9 e 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il 2000 e tra 8 e 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il 2001. Dalla stima dell'esposizione media della popolazione è possibile poi fornire un ordine di grandezza degli eventi sanitari attribuibili al benzene. I danni che il benzene induce sulla salute umana sono prevalentemente a carico del sistema emolinfopoietico ed in particolare danni di tipo tossicologico, cancerogeno e genetico. Gli effetti più importanti alle concentrazioni ambientali sono quelli cancerogeni ed in particolare la sua capacità di indurre leucemie. Si tenga presente che tutte le stime relative a concentrazioni tipiche dell'esposizione della popolazione sono estrapolazioni senza livello di soglia (non esiste nessun valore di concentrazione che sia da ritenersi esente da rischi) dei risultati di studi su lavoratori esposti ad alte concentrazioni. Il livello di rischio espresso come incre-

mento di casi di leucemia mieloide nella popolazione non esposta professionalmente a benzene, è stato stimato in un intervallo tra 2.2 e 7.8 casi ogni milione di persone esposte durante la vita ad 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anche se la più recente stima di rischio unitario oncogeno nella vita effettuata dall'EPA risulta pari a 8.3×10^{-6} sempre per lo stesso tipo di esposizione. La concentrazione a cui si fa riferimento a quella associata all'esposizione e non quella derivante da misure di concentrazione outdoor. È quindi possibile fare una grossolana stima dei casi di leucemia attribuibili al benzene sotto l'ipotesi che i livelli di esposizione rimangano costanti e pari ai livelli attuali. Assumendo un rischio di 5 casi ogni milione di abitanti esposti ad una concentrazione di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, su una popolazione di circa 200.000 persone (residenti nell'area urbana o nelle immediate vicinanze) si verificherebbe qualche frazione di casi all'anno di leucemia attribuibili al benzene. Infatti se il rischio medio è di circa 5×10^{-6} (l'EPA stima tra 2.2 e 7.8 i nuovi casi di leucemia attesi su un milione di persone esposte durante la vita ad 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), il rischio per ogni anno di vita (vita media=75 anni) per ogni abitante esposto in media ad 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sarebbe di circa 7×10^{-8} . Moltiplicando questo valore per il numero degli abitanti (circa 200.000) e per una esposizione storica media pari a quella attuale si ottiene un valore appunto di qualche frazione di casi all'anno (circa 0.2).

Se si volessero invece stimare i casi di leucemia attualmente attesi e quindi derivanti dall'esposizione pregressa (ultimi 20 anni = tempo di latenza medio delle leucemie), occorrerebbe tenere presente che:

1. il tenore di benzene negli anni passati è sempre stato superiore ai livelli attuali. Negli anni precedenti il 1988 il tenore di benzene è stimabile fosse pari al 3-4%, anche se i dati non sono disponibili in quanto non esisteva una normativa specifica sul questo inquinante. Considerato che la maggior parte del benzene emesso allo scarico è benzene incombusto, è ragionevole ritenere che le emissioni medie per autoveicolo fossero almeno 7 volte maggiori di adesso, a parità di tecnologie motoristiche;
2. le autovetture immatricolate prima del 1993 erano quasi tutte non catalizzate. Solo dopo tale anno è cominciata la progressiva sostituzione di auto non catalizzate con auto catalizzate. Si ricorda che un'auto non catalizzata emette 7-8 volte più benzene di una non catalizzata;
3. al di là della presenza del catalizzatore, le autovetture degli anni '80 avevano tecnologie motoristiche più antiche ed erano più inquinanti.
4. le percorrenze medie ed il numero degli autoveicoli sono aumentati negli ultimi decenni anche se sono andate stabilizzandosi nell'ultimo decennio;

Un sommario bilancio complessivo fa ritenere che tutti i fattori sopra elencati abbiano prodotto negli ultimi 20 anni un complessivo drastico decremento delle emissioni e quindi delle concentrazioni medie di benzene (l'unico punto che influisce in senso opposto sarebbe il 4) e quindi una drastica diminuzione dell'esposizione della popolazione. È quindi probabile che

una stima dei casi di leucemia attribuibili al benzene derivanti dall'esposizione progressiva darebbe luogo ad un valore sensibilmente più elevato. Per una stima complessiva dell'andamento dell'esposizione media della popolazione occorrerebbe tuttavia un accurato calcolo dell'evoluzione di tutte le grandezze sopra citate.

CONCLUSIONI E LINEE DI SVILUPPO

Il presente studio ha permesso di aumentare in modo considerevole la conoscenza sui livelli di inquinamento da benzene all'interno dell'area urbana del Comune di Modena. L'approccio metodologico utilizzato ha visto l'integrazione tra analisi di dati sperimentali, analisi statistiche e modellistica, nell'ottica dell'individuazione delle zone della città più esposte al rischio di superamenti dei limiti di legge e di una stima degli eventi sanitari attesi attribuibili al benzene.

I risultati dello studio possono essere così sintetizzati:

1. Esistono alcuni archi stradali ove le concentrazioni medie annue eccedono gli attuali limiti di legge ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Gli archi stradali più a rischio risultano quelli in prossimità del centro storico (Viale Muratori, Via C. Menotti, Viale Reiter, Via Sigonio, etc.) e alcuni importanti archi stradali nella immediata periferia (Viale Amendola, Via Morane, Via Vignolese).
2. Le aree residenziali sono caratterizzate da livelli di inquinamento da benzene sempre al di sotto degli attuali limiti di legge;
3. Un numero notevole di intersezioni stradali con impianto semaforico eccede abbondantemente i limiti di legge;
4. I parchi cittadini presentano tutti livelli di benzene quasi uguali, indipendentemente dalla zona della città ove si trovano;
5. La quasi totalità delle zone comprese all'interno dell'area urbana presenta livelli di benzene al di sopra dei limiti previsti dalla normativa comunitaria ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a cui dal 2005 occorrerà gradualmente allinearsi con una tolleranza progressivamente decrescente;
6. È possibile stimare i valori di esposizione media della popolazione negli anni 2000 e 2001 in circa $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
7. Il trend di concentrazione del benzene a Modena non è ben identificabile da un punto di vista sperimentale;

8. Per il prossimo futuro si prevede una diminuzione dei livelli di benzene anche se la velocità e l'entità di tale decremento dipenderà dall'evoluzione delle caratteristiche della mobilità ed in particolare dall'evoluzione della composizione del parco veicolare, più che dal numero di autoveicoli;
9. In condizioni stazionarie di esposizione agli attuali livelli di concentrazione di benzene, è possibile stimare i nuovi casi di leucemia attribuibili all'esposizione al benzene in qualche frazione di casi all'anno.

Per quanto concerne le implicazioni dello studio, si ritiene opportuno che nella programmazione della rete viaria e degli insediamenti abitativi venga adeguatamente considerato l'aspetto ambientale. In particolare, la realizzazione di strade con edifici ad adeguata distanza pare essere un elemento di notevole importanza, in quanto l'effetto "canyon" risulta particolarmente rilevante nella determinazione delle alte concentrazioni degli inquinanti primari da traffico e del benzene in particolare. Si ritiene inoltre che le aree critiche individuate per il benzene possano risultare critiche anche per gli altri inquinanti primari da traffico (CO, NO_x).

Si ritiene che le linee di sviluppo dello studio siano da indirizzare essenzialmente, da un punto di vista ambientale, verso l'analisi di situazioni specifiche (inquinamento di fondo extracittadino, inquinamento nelle intersezioni viarie rispetto all'inquinamento negli archi stradali e benefici ambientali dell'inserimento rotatorie, etc.) e, da un punto di vista di sanità pubblica, verso lo studio dell'esposizione personale della popolazione con indicatori sia ambientali che biologici. Sarebbe utile, tra le altre cose, valutare biomarker sia di esposizione (es. acido trans,trans-muconico e acido S-fenilmercapturico), che di effetto precoce, che potrebbero essere utilizzati anche in una prospettiva di prevenzione secondaria (diagnosi precoce). Questi indicatori dovrebbero essere valutati e validati in un sottogruppo rappresentativo di popolazione con l'adozione prioritaria di tecniche non invasive come l'analisi di campioni di urina. I dati così ottenuti potrebbero costituire un importante aspetto nell'ambito dell'integrazione tra dati ambientali e sanitari, collocandosi nella prospettiva di un efficace sistema di sorveglianza epidemiologica. •

