

from: 30° Congresso Nazionale AIDII - 2013

Sessione 3 - RICADUTE SULLA POPOLAZIONE DELL'INQUINAMENTO DA ATTIVITA' PRODUTTIVE

## From emissions to human exposure estimates: the importance of the expertise of the occupational hygienist

Dalle emissioni fino alla stima dell'esposizione umana: rilevanza della competenza dell'igienista occupazionale

Domenico Maria Cavallo\*, Andrea Spinazzè, Davide Campagnolo, Andrea Cattaneo

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

\*Corresponding author:

Domenico Maria Cavallo, Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia, Università degli Studi dell'Insubria, Via Valleggio, 11 - 22100 Como, Italy; e-mail: domenico.cavallo@uninsubria.it

In everyday activities, people are constantly exposed to many potentially harmful agents. The exposure assessment is essential in the evaluation of their impact on public health and is also a crucial step in the estimate of the dose-response relationship between a given environmental exposure and outcome. When an organism is exposed to a chemical can have an effect only if the substance is absorbed and reaches the target organ. The interaction between a chemical and a subject depends on: the environmental concentration of the chemical; the duration of exposure; the penetration pathway; the penetration speed. Therefore, it is firstly essential to define the best possible estimate of the concentration available for absorption, which is also called "exposure level". A comprehensive exposure assessment requires a in-depth analysis of both "outdoor" and "indoor" air pollution to obtain an accurate and biologically relevant exposure estimate in the most effective and economic way. The choice of the measurement method is very important but it is very difficult to measure the real personal concentrations when the exposure assessment concerns the general population; it is then necessary to use surrogates of exposure. The two main exposure assessment approaches are classified into direct methods and indirect methods. In the latter category fall dispersion and simulation models that estimate environmental concentrations starting from fixed monitoring data. The use of environmental models allowed studies of large populations with low costs but also revealed many gaps. In fact, some of these models give inaccurate predictions on concentrations of pollutants measured in indoor environments. Some other models use both personal exposure data and environmental concentration data, allowing better estimates of the actual exposure and the prediction of theoretical exposures through the development of different possible scenarios. On the contrary, direct methods consist of determining the exposure of each study subject by the measurement of individual concentrations (external or internal dose). These techniques provide the best information for assessing exposure but are often very time and resource demanding. For this reason these methodologies were only used in studies of small groups of subjects. In addition, the determination of personal or individual exposures raises many critical issues, both methodologically and technologically. In addition, some environmental variables may increase the spatio-temporal variability of some pollutant concentrations. For all these reasons, the expertise of the "occupational hygienist" is pivotal in the exposure assessment process.

**Key words:** Exposure assessment, environmental models, environmental monitoring, exposure assessor

Nella vita di tutti i giorni le persone sono costantemente esposte a numerosi agenti potenzialmente nocivi. Al fine di valutare le conseguenze sulla salute pubblica è essenziale effettuare la stima dell'esposizione. Ciò permette di eseguire una valutazione delle interazioni tra una sostanza chimica e un organismo che richiede un'approfondita analisi dell'inquinamento atmosferico sia "indoor" che "outdoor" con lo scopo di ottenere una caratterizzazione accurata e biologicamente rilevante nel modo più efficace ed economico possibile. Questo tipo di approccio si suddivide in metodi diretti e indiretti a seconda del numero di esposti che devono essere indagati. I metodi diretti consistono nella misurazione delle concentrazioni individuali ma sono spesso caratterizzati da un'alta complessità e da costi elevati. I metodi indiretti utilizzano dei modelli di dispersione degli inquinanti che consentono studi su ampie popolazioni con costi contenuti ma presentano anche numerose lacune. La stima della concentrazione presenta numerose criticità sia di tipo metodologico sia tecnologico, inoltre vi sono alcune variabili ambientali che contribuiscono ad incrementarne la variabilità spazio-temporale. Le scelte da effettuare nella valutazione dell'esposizione sono molteplici e spesso complicate, per questo la competenza dell'"igienista occupazionale" è di fondamentale importanza sia nella misura diretta delle concentrazioni sia nella validazione dei dati ricavati dalle simulazioni modellistiche.

## Introduzione

Nello svolgimento delle comuni attività quotidiane, la popolazione è costantemente esposta a numerosi agenti potenzialmente nocivi; qualunque considerazione in merito alle possibili relative ripercussioni di questi sulla salute pubblica deve necessariamente passare attraverso una valutazione o una stima dell'esposizione. Ma un punto centrale di tale valutazione è riferito al concetto stesso di esposizione: spesso, infatti, vengono misclassificati proprio i concetti di pericolo e rischio, con quello di esposizione. Secondo elemento rilevante è l'attribuzione della sorgente del contaminante in esame: in presenza di una realtà industriale propriamente detta, dove possono essere identificate delle sorgenti puntuali o specifiche, l'analisi spesso si semplifica, tanto che talvolta possono essere utilizzati dei modelli di simulazione per la stima dell'esposizione (approccio che però non è esule da criticità). Le stesse considerazioni possono risultare invece più complicate qualora si vogliano considerare condizioni espositive più complesse, come ad esempio quelle associate ai cosiddetti "microinquinanti" ambientali (ovvero "inquinanti non convenzionali" presenti nell'aria in quantità molto modeste rispetto ad altri inquinanti ma dotati di tossicità elevata, tale da renderli pericolosi anche a bassissime concentrazioni) o quando si considera un caso di "inquinamento urbano" (quindi associato tipicamente alle sorgenti diffuse del traffico veicolare, delle caldaie, e in genere di fonti di combustione tendenzialmente non industriali). In questo ultimo caso si stanno considerando inquinanti presenti in maniera ubiquitaria in ogni ambiente di vita e potenzialmente affetti da una grande variabilità nelle condizioni e modalità di esposizione. È però evidente che in qualsiasi tipo di contesto, così come all'interno del processo della valutazione del rischio, la centralità della valutazione dell'esposizione (Exposure Assessment) è fondamentale. La valutazione dell'esposizione rappresenta dunque una fase cruciale nell'analisi della relazione dose-risposta tra una data esposizione ambientale ed un certo effetto sulla salute. Attribuire un livello di esposizione a individui in grado di sperimentare un contatto con inquinanti prodotti da un'ipotetica sorgente da cui deriverebbe un danno causale, e quindi attribuire correttamente il danno sanitario a quella sorgente (derivandone poi eventualmente il costo economico e sociale), permette di fornire elementi fondamentali e utili a mettere in atto efficaci misure di prevenzione per la salute pubblica. Se l'esposizione viene valutata in modo incompleto o errato, la successiva procedura di valutazione dei rischi per la salute risulterà invece monca o persino priva di significato [Barr & Buckley, 2011].

## Le variabili che determinano l'esposizione

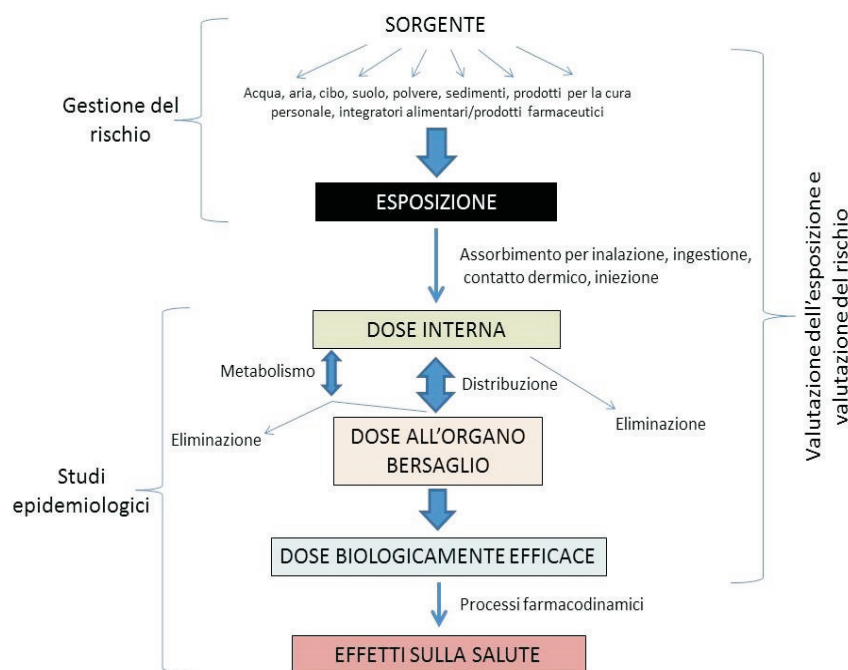
La Valutazione dell'Esposizione può essere definita una disciplina all'interno delle scienze ambientali e della vita che permette di trovare un legame fra la concentrazione di un contaminante e il contatto con il suo organo target.

Questa valutazione non può essere settoriale, ma deve sempre seguire un approccio integrato. Per quanto riguarda le vie di penetrazione, ad esempio, la più frequentemente interessata nell'esposizione in ambienti di vita e di lavoro è la via respiratoria, seguita dalla cute. La via di esposizione considerata di minore importanza è rappresentata in genere dall'apparato digerente; in realtà quest'ultima può assumere particolare rilevanza, poiché ad esempio la popolazione generale è esposta a tossici esogeni principalmente per ingestione di cibi o bevande contaminate eventualmente anche lungo la catena alimentare a seguito delle ricadute degli inquinanti emessi, e quindi successivamente immessi nell'ambiente. Tuttavia quando un organismo vivente è esposto ad un prodotto chimico, si può avere un effetto solo se la sostanza stessa viene assorbita. Definiremo quindi "assorbimento" il passaggio di una sostanza dall'ambiente esterno all'interno dell'organismo esposto e "vie di assorbimento" gli organi, sistemi o apparati attraverso i quali la sostanza esogena penetra nell'organismo. In generale la quantità della sostanza presente nell'ambiente ("dose esterna") che viene effettivamente assorbita dall'organismo ("dose interna") dipende, oltre che dalla quantità stessa con cui si entra in contatto, anche dalle caratteristiche fisico-chimiche della sostanza e da fattori individuali dei soggetti esposti. Le variabili che entrano in gioco quando si considera l'interazione tra sostanza chimica e uomo sono dunque molteplici, ma sostanzialmente riconducibili ai quattro gruppi di seguito indicati:

- **Concentrazione ambientale della sostanza:** rappresenta la prima variabile da considerare per definire l'entità dell'esposizione che può aver luogo nelle condizioni in esame.
- **Durata dell'esposizione:** è uno dei fattori più importanti che condizionano l'entità dell'esposizione e, di conseguenza, l'entità dell'effetto tossico. Infatti, l'esposizione è proporzionale alla concentrazione ambientale ed al tempo (esposizione = intensità per durata). Attualmente, i casi di patologie professionali e gli effetti avversi sulla popolazione generale sono per lo più generati da esposizioni prolungate nel tempo ad una sostanza presente a concentrazioni molto lontane da quelle letali e non ad esposizioni sub-acute ed acute, che pure accadono ma che sono sempre di tipo accidentale. Giova ricordare che il rapporto tra la durata dell'esposizione professionale rispetto a quella ambientale, che generalmente occorre negli ambienti di vita, è di circa uno a tre (8/24h).
- **Vie di penetrazione:** In rapporto alle specifiche caratteristiche chimico fisiche ed alle modalità di esposizione, una sostanza tossica può penetrare nell'organismo attraverso diverse vie, tra le quali la principale è generalmente rappresentata da quella inalatoria.
- **Velocità di penetrazione:** Un'ultima importante variabile in grado di definire i livelli di esposizione ad una determinata sostanza tossica è rappresentata dalla velo-

cità di penetrazione. In linea generale, penetrano con particolare facilità nell'organismo, attraverso qualsiasi via, le molecole apolari (capaci di diffondere facilmente attraverso il doppio strato lipidico perché la zona interna della membrana è costituita da catene idrocarburiche) e quelle più piccole (caratterizzate dagli ingombri sterici minori).

In prima approssimazione, l'esposizione di un soggetto ad un inquinante può essere dunque definita come il contatto di un soggetto con una data sostanza presente nell'ambiente ad una certa concentrazione e per un certo periodo di tempo. Per questo motivo la valutazione dell'esposizione fonda le sue considerazioni a partire dalla misura delle concentrazioni di tali inquinanti. Il processo che in genere viene utilizzato per descrivere il processo di esposizione (Figura 1) in genere considera in primo luogo la sorgente dell'agente chimico e, successivamente il suo "destino ambientale", durante il quale possono intercorrere fenomeni di varia natura e portata (trasporto, diluizione, degradazione, trasformazione, deposizione, bioaccumulo, biomagnificazione, ecc). Gli esseri umani possono quindi venire in contatto con diverse componenti ambientali che contengono un agente chimico o i suoi prodotti di trasformazione [Barr & Buckley, 2011]. (Figura 1)



**Figura 1:** Schema concettuale dei passaggi compresi tra la fase di esposizione e l'effetto [modificato da Barr & Buckley, 2011]

### Metodi di valutazione dell'esposizione

L'obiettivo della valutazione dell'esposizione è quello di ottenere una caratterizzazione accurata, precisa e biologicamente rilevante nel modo più efficace ed economico. La competenza nella definizione della metodologia e la scelta delle tecniche di misura o stima diviene determinante soprattutto in presenza di contenziosi ambientali.

L'esposizione infatti può essere valutata, classificata, misurata o modellizzata utilizzando differenti strumenti come questionari, rilievi ambientali e tecniche statistiche. I costi per l'exposure assessment aumentano ovviamente all'aumentare della accuratezza e della precisione del metodo selezionato, ed è quindi necessario riuscire a trovare un opportuno compromesso costi-benefici [Armstrong, 1996]. E' necessario sottolineare che i livelli di inquinanti ambientali presentano importanti variazioni spazio-temporali [Cattaneo et al., 2010 (a); Spinazzé et al., 2013]. Nell'ambito della valutazione e della gestione del rischio, la valutazione dell'esposizione ad agenti aerodispersi, ad esempio, deve prevedere la valutazione dei contatti di un soggetto con un determinato inquinante ambientale per un periodo di tempo sufficientemente lungo in modo da tenere conto di tutte le possibili fonti di esposizione.

La valutazione completa dell'esposizione necessita pertanto di un approfondimento sia delle caratteristiche dell'inquinamento atmosferico classicamente inteso ("outdoor") che di quello presente in ambienti chiusi non confinati ("indoor") [Polidori et al., 2007]. Specialmente per la popolazione generale, la stima dell'esposizione riguarda in genere popolazioni molto numerose e con caratteristiche variabili. Per tale motivo la scelta del metodo di misu-

ra o stima dell'esposizione è molto importante perché condiziona la potenza dello studio di epidemiologia ambientale che ne potrebbe conseguire, anche a seconda del tipo di modello utilizzato nella stima dell'errore sia della variabilità spazio-temporale sia delle caratteristiche dei bersagli più o meno sensibili (popolazione generale verso soggetti iper-suscettibili). Nella valutazione dell'esposizione della popolazione generale spesso può risultare difficile o impossibile misurare o ricostruire le concentrazioni di interesse e per tale ragione può essere necessario utilizzare dei surrogati di esposizione. Nel 1991 il National Research Committee (NRC) ha definito una gerarchizzazione delle esposizioni e dei suoi surrogati (Figura 2). L'esposizione ad agenti aerodispersi può quindi essere indagata utilizzando diversi tipi di metodologie. Questi metodi vengono in genere differenziati in diretti e indiretti (Figura 3).

### Metodi indiretti

#### Modelli epidemiologici

Gli approcci tradizionali utilizzano metodologie indirette e prendono in considerazione la misura delle concentrazioni di inquinanti nell'aria mediante punti fissi di rilevamento (in genere outdoor) e stimano le concentrazioni



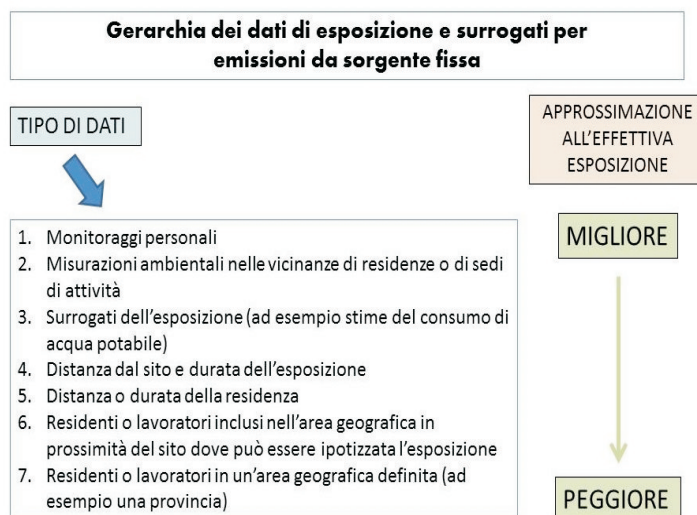
ambientali mediante modelli di simulazione e dispersione. La complessità d'uso di questi modelli è ovviamente correlabile alla portata ed alla rilevanza degli scopi dell'esercizio di stima in tutti gli ambiti applicativi. Tuttavia alcune assunzioni di calcolo risultano comunque sempre fondamentali. Il progresso nell'utilizzo di queste metodologie ha permesso di condurre negli anni, numerosi studi su ampie popolazioni con costi contenuti, evidenziandone però anche alcune lacune [Kabir & Maduga, 2010]. Per eventuale approfondimento, si veda la rassegna dei metodi di stima dell'esposizione usati in epidemiologia pubblicata da Zou e collaboratori [Zou et al., 2009].

### Modelli di dispersione

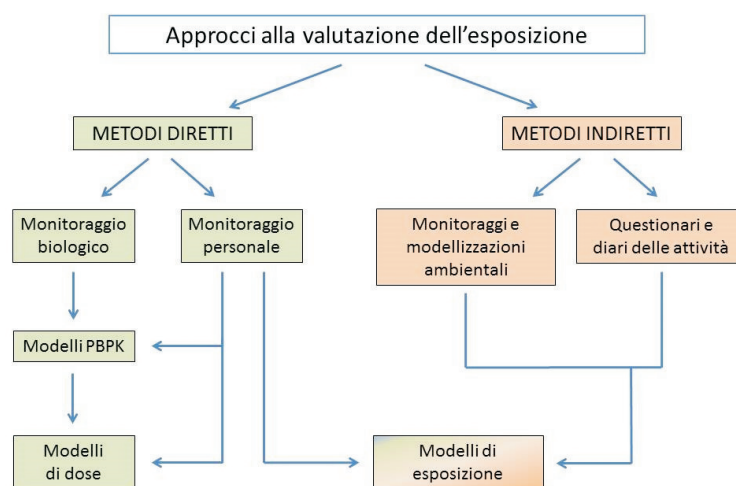
I modelli di dispersione utilizzano i dati di emissione di un agente chimico, per la previsione di concentrazioni ambientali e ricadute sul territorio. Tali modelli permettono di simulare la potenziale esposizione della popolazione di una certa area e di predire quella futura attraverso la valutazione di diversi possibili scenari. Gli strumenti matematici a disposizione (come i modelli di sorgente-recettore, o la costruzione di scenari espositivi) possono risultare più o meno rappresentativi della realtà, ma necessitano sempre di una validazione, per poter essere considerati accurati. A titolo esemplificativo viene di seguito riassunto il sistema di modelli CALMET-CALPUFF, inserito dall'U.S. EPA in Appendix A di "Guideline on Air Quality Models", che è stato sviluppato da Sigma Research Corporation, ora parte di Earth Tech, Inc., con il contributo di California Air Resources Board (CARB) [EPA, 1998]. Il sistema di modelli è costituito da tre moduli principali:

- il processore meteorologico CALMET: utile per la ricostruzione del campo tridimensionale di vento e temperatura all'interno del dominio di calcolo;
- il processore CALPUFF: modello di dispersione, che inserisce le emissioni all'interno del campo di vento generato da CALMET e ne studia il trasporto e la dispersione;
- il post-processore CALPOST: ha lo scopo di analizzare statisticamente i dati di output di CALPUFF, in modo da renderli utilizzabili per le analisi successive.

CALMET è un processore meteorologico di tipo diagnostico, in grado di riprodurre campi tridimensionali di vento e temperatura unitamente a campi bidimensionali di parametri descrittivi della turbolenza atmosferica. È adatto a simulare il campo di vento su domini caratterizzati da orografia complessa e da diverse tipologie di destinazione di uso del suolo. Il campo di vento è ricostruito attraverso stadi successivi; in particolare, un campo di vento iniziale



**Figura 2:** Gerarchia dei dati (e dei surrogati) di esposizione per emissioni da sorgenti fisse



**Figura 3:** Approcci alla valutazione dell'esposizione umana

viene processato in modo da tenere conto degli effetti orografici tramite interpolazione dei dati misurati alle centraline di monitoraggio e tramite l'applicazione di specifici algoritmi in grado di simulare l'interazione tra il suolo e le linee di flusso. CALMET è dotato, infine, di un modulo micro-meteorologico, per la determinazione della struttura termica e meccanica (turbolenza) degli strati inferiori dell'atmosfera e pertanto è in grado di caratterizzare i fenomeni di inversione termica [Scire et al., 2000 (a)].

CALPUFF è un modello di dispersione ibrido, multi-strato e non stazionario. È in grado di simulare il trasporto, la dispersione, la trasformazione e la deposizione degli inquinanti, in condizioni meteorologiche variabili nello spazio e nel tempo. CALPUFF è in grado di utilizzare i campi meteorologici prodotti da CALMET, oppure, in caso di simulazioni semplificate, di assumere un campo di vento assegnato dall'esterno, omogeneo all'interno del

dominio di calcolo. CALPUFF contiene diversi algoritmi, che gli consentono, opzionalmente, di tenere conto di diversi fattori, quali:

- l'effetto scia dovuto agli edifici circostanti (building downwash) o allo stesso camino di emissione (stack-tip downwash);
- lo shear verticale del vento;
- la deposizione secca ed umida;
- le trasformazioni chimiche che avvengono in atmosfera;
- il trasporto su superfici d'acqua;
- la presenza di orografia complessa o di zone costiere.

Per simulare al meglio le condizioni reali di emissione, il modello CALPUFF permette di configurare le sorgenti individuate attraverso geometrie puntuali, lineari ed areali. Le sorgenti puntuali permettono di rappresentare emissioni localizzate con precisione in un'area ridotta; le sorgenti lineari consentono di simulare al meglio un'emissione che si estende lungo una direzione prevalente, qual è ad esempio quella dovuta al trasporto su nastri; le sorgenti areali, infine, si adattano bene a rappresentare un'emissione diffusa su di un'area estesa [Scire et al., 2000 (b)]. CALPOST consente di analizzare i dati di output forniti da CALPUFF, in modo da ottenere i risultati in un formato adatto alle diverse esigenze di simulazione. Tramite CALPOST si possono ottenere dei file di output direttamente interfacciabili con software grafici per l'ottenimento di mappe di isoconcentrazione. I codici di calcolo richiedono come input i seguenti dati:

- dati meteorologici in superficie ed in quota, per la ricostruzione del campo di vento tridimensionale (ricostruiti in CALMET);
- dati per le sorgenti: per l'effettivo studio della dispersione degli inquinanti in aria (effettuato da CALPUFF).

Gli output del codice CALPUFF, elaborati attraverso CALPOST, consistono in matrici che riportano i valori di ricaduta calcolati per ogni nodo della griglia definita, relativi alle emissioni di singole sorgenti e per l'insieme di esse. Tali risultati possono essere elaborati attraverso un qualsiasi software di "tipo GIS" creando ad esempio mappe di isoconcentrazione/isodeposizione [Scire et al., 2000 (a)]. L'arricchimento di specifici database emissione-immissione-esposizione rappresenta quindi un possibile ed utilissimo percorso finalizzato a meglio chiarire e definire i concetti di "impatto" o di "fattori di pressione" ambientale in un sempre crescente bisogno di "sources apportionment" dei diversi contaminanti ambientali emessi in atmosfera e quindi immessi in ambienti di vita a scapito dell'esposizione e, di conseguenza, dei potenziali effetti per la popolazione [Peters et al., 2012].

## Modelli di esposizione

L'esposizione generale e complessiva ad un agente è data dall'integrazione dei livelli dell'inquinante presenti negli ambienti e dei relativi periodi di permanenza dei soggetti

in tali ambienti. A partire dalla distribuzione delle concentrazioni ambientali degli inquinanti presenti in specifici microambienti, con questi modelli di esposizione può essere stimata o simulata l'esposizione di diverse categorie di soggetti, conoscendo il profilo comportamentale e di frequentazione dei vari ambienti (ad esempio con la tecnica statistica Monte Carlo utilizzata nel progetto EXPOLIS) [Ott et al., 2000]. Tradizionalmente, per rilevare i valori di inquinamento atmosferico ai fini del controllo della qualità dell'aria, si utilizzano stazioni fisse di monitoraggio.

Tali metodologie, se da un lato presentano il vantaggio di permettere l'utilizzo e l'applicazione a popolazioni numerose delle consistenti serie storiche di concentrazioni outdoor registrate dalle reti fisse di monitoraggio, sono comunque carenti sulle concentrazioni di inquinanti misurate in ambienti confinati. Infatti non sono ancora ben conosciuti gli intervalli di concentrazione e le variazioni degli inquinanti misurati in specifici microambienti. Inoltre, l'utilizzo di modelli basati sui dati delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria, presenta il limite di utilizzare concentrazioni outdoor che, come ampiamente dimostrato, non riflettono sempre in modo rappresentativo le concentrazioni a cui può essere effettivamente esposta la popolazione che trascorre la maggior parte del tempo (anche fino al 95%) indoor [Hanninen et al., 2004; Jenkins et al., 1992]. Tuttavia, numerosi studi sull'inquinamento outdoor e indoor hanno dimostrato che i livelli ambientali rilevati con queste metodiche non rappresentano accuratamente i valori di esposizione individuali e, quindi, non possono essere utilizzati per la stima dell'esposizione individuale. Inoltre è stato ampiamente dimostrato che, per ottenere una visione più completa dell'esposizione umana e dei fattori che la determinano, risulta necessario integrare i dati monitorati nei differenti micro-ambienti con le attività svolte dai soggetti (Questionari, Time Activity Diary-TAD o Time Location Activity Diary-TLAD) [Cattaneo et al., 2010 (a)]. Questo tipo di dati, inoltre, consentono generalmente di raccogliere informazioni demografiche e cliniche della popolazione indagata, così come altre informazioni che possono influenzare l'esposizione (come la prossimità a sorgenti di inquinanti).

## Metodi diretti

Lo studio dell'esposizione ad inquinanti aerodispersi mediante metodologie dirette consiste nella determinazione dell'esposizione di ogni singolo soggetto indagato attraverso la misura delle concentrazioni individuali/personali [Cattaneo et al., 2010 (b)]. Nell'ottica della caratterizzazione di scenari espositivi quanto più aderenti alla realtà, la determinazione delle concentrazioni individuali fornisce sicuramente le informazioni migliori per la valutazione dell'esposizione rispetto ai valori forniti ad esempio dalle stazioni fisse di monitoraggio dislocate all'interno di un'area geografica anche se spazialmente ridotte. E' però necessario sottolineare che i livelli espositivi della popolazione generale sono molto più bassi rispetto a quelli tipici

degli scenari occupazionali e quindi, per la misura delle concentrazioni ed in particolare per lo studio dell'esposizione individuale, è necessario utilizzare metodologie di campionamento e di analisi molto dispendiose, sia in termini di tempo, sia di risorse economiche da dover investire. Per tale ragione queste metodologie risultano utilizzabili generalmente solo per studi su gruppi ristretti di popolazione, ancorché considerati a torto o a ragione rappresentativi, e magari utilizzando tecniche non ancora definitivamente valutate e/o validate in termini analitici. Si rischia in questo modo di compiere errori, se non si considera che la misura di tali concentrazioni rappresenta un punto ad elevata criticità, in quanto possono sussistere problematiche sia di tipo metodologico (strategie, modelli, etc.) che tecnologico (apparecchiature, strumenti e metodi). Ad ulteriore complicazione del contesto sopra descritto, è necessario sottolineare la presenza di numerose variabili ambientali che possono influire significativamente sulla qualità del monitoraggio dell'esposizione, contribuendo ad elevare il grado di variabilità spazio-temporale delle concentrazioni dei singoli inquinanti, quali impianti di ventilazione e ricambi d'aria associati [Arvanitis et al., 2010]. Lo studio dell'esposizione mediante metodologie dirette consiste nella determinazione dell'esposizione di ogni singolo soggetto indagato attraverso la misura delle concentrazioni riferite all'individuo stesso. La misura delle concentrazioni personali e individuali [si veda a tal proposito una proposta di differenziazione terminologica in Cattaneo et al., 2010 (b)] attraverso campagne di monitoraggio organizzate e realizzate da esperti "exposure assessors" è quindi di fondamentale importanza nell'ambito della valutazione del rischio in senso lato. Tale contributo va considerato come gold standard e risulta quindi ancor più valido per il rafforzamento e/o verifica, o anche eventuale correzione, dei dati ricavati dalle simulazioni modellistiche per la caratterizzazione dell'esposizione esso permette quindi di definire, oltre alle variazioni di concentrazione dei diversi parametri in funzione dei tempi di permanenza nei diversi micro-ambienti, anche i reali profili espositivi di soggetti-tipo che possono essere utilizzati per validare modelli espositivi esistenti o costruirne di nuovi sulla base delle caratteristiche della specifica realtà analizzata.

### Dall'esposizione alla dose

La quantità della sostanza presente nell'ambiente ("dose esterna") che viene effettivamente assorbita dall'organismo dipende, oltre che dalla quantità stessa con cui si entra in contatto, anche dalle caratteristiche fisico-chimiche della sostanza e da fattori individuali. Per quanto riguarda il tratto respiratorio, la penetrazione di gas, vapori, fumi e sostanze particolate (polveri, fibre ecc.) è influenzata da numerosi fattori comprendenti: fattori anatomici da ricercare nella costituzione corporea del singolo individuo, fattori di ordine fisiologico, come ad esempio l'entità della ventilazione polmonare, che può essere con-

dizionata dallo sforzo fisico, dall'età, dal peso corporeo, dall'allenamento ed infine da patologie che possono determinare una maggior o minore penetrazione di sostanze nel tratto respiratorio (per esempio l'eventuale presenza di stenosi nasale, di un'eccessiva produzione di muco, di una riduzione del calibro delle vie aeree). E' chiaro ed importante ricordare che nessuna sostanza è un veleno come tale ma, in base alle concentrazioni raggiunte a livello degli organi bersaglio, tutte le sostanze possono agire come veleni. Questa concentrazione dipende dalle modalità dell'interazione della sostanza con l'organismo, dalle proprietà fisico-chimiche della sostanza, dai fattori biologici propri dell'organismo ed infine dai fattori ambientali in cui la sostanza esogena viene a trovarsi. Appare quindi determinante la misura o, quantomeno, la miglior stima possibile della concentrazione disponibile all'assorbimento meglio definita come "livello di esposizione". Ricordiamo inoltre che si definisce "assorbimento" il passaggio di una sostanza dall'ambiente esterno all'interno dell'organismo esposto e "vie di assorbimento" gli organi, sistemi o apparati attraverso i quali la sostanza esogena penetra nell'organismo. L'assorbimento di uno xenobiotico nell'organismo umano dipende da numerose variabili che possono essere schematicamente inquadrare in tre distinti sottogruppi:

- variabili riferite all'ambiente (temperatura e umidità, aerazione, ecc.);
- variabili riferite al soggetto esposto (ventilazione polmonare, frequenza cardiaca, condizioni del tegumento cutaneo, condizioni generali di salute, ecc.);
- variabili intrinseche della sostanza in esame (caratteristiche chimico-fisiche). Le proprietà chimico-fisiche delle sostanze ne condizionano la tossicità (pericolosità), nonché la possibilità di essere assorbite dall'organismo (rischio).

Infine, il tipo di formulazione della sostanza (polvere, liquido, ecc.), cioè la forma fisica nella quale la sostanza stessa è disponibile all'impiego, e la associazione con altre sostanze, modifica in modo sostanziale la sua disponibilità biologica e rappresenta quindi una caratteristica fondamentale da considerare nella valutazione tossicologica [Campo et al., 2011].

### Conclusioni

L'obiettivo nella definizione dell'esposizione è quello di ottenere una caratterizzazione accurata, precisa e biologicamente rilevante nel modo più efficace ed economico. I costi per l'exposure assessment aumentano all'aumentare della accuratezza e della precisione ed è necessario riuscire a trovare un opportuno compromesso costi-benefici [Armstrong, 1996]. Specialmente in ambito ambientale, la stima dell'esposizione riguarda in genere popolazioni molto numerose e per tale motivo la scelta del metodo è determinante perché condiziona la potenza dello studio epidemiologico anche a seconda del tipo di modello uti-



lizzato nella stima dell'errore (classico o Berkson). Esistono due metodi principali per lo studio dell'esposizione umana ad agenti chimici: metodi indiretti (modelli di previsione ambientale) e metodi diretti (monitoraggio ambientale e biologico). Tutti questi metodi hanno l'obiettivo di fornire informazioni sulla portata, la frequenza e la durata dell'esposizione. Infatti, come evidenziato in questo sintetico lavoro la "semplice" misura di tali concentrazioni rappresenta un punto ad elevata criticità in quanto sussistono problematiche sia di tipo metodologico (strategie, modelli, etc.) che tecnologico (apparecchiature, strumenti e metodi). Ad ulteriore complicazione è necessario sottolineare la presenza nella realtà ambientale di numerose variabili che possono influire significativamente contribuendo ad elevare il grado di variabilità spazio-temporale delle concentrazioni dei singoli inquinanti. Non esiste una strategia specifica per il monitoraggio dell'esposizione, ma questa dipende dal disegno sperimentale dello studio e da altri fattori (ad esempio l'ampiezza della popolazione indagata). Ad ogni modo, l'esposizione e/o la dose assorbita, devono essere valutate nella maniera più accurata possibile. Risulta evidente come in questo percorso sia di elevata rilevanza, per non dire essenziale, la competenza e l'esperienza proprie dell'"igienista occupazionale", oggi sempre più "igienista ambientale".

## Bibliografia

- Armstrong, B.G., 1996. *Optimizing power in allocating resources to exposure assessment in an epidemiologic study*. American Journal of Epidemiology, **144** (2), 192 - 197.
- Arvanitis, A., Kotzias, D., Kephelopoulou, S., Carrer, P., Cavallo, D.M., Cesaroni, G., De, B., De, O.F., Forastiere, F., Fossati, S., Fromme, H., Haverinen-Shaughnessy, U., Jantunen, M., Katsouyanni, K., Kettrup, A., Madureira, J., Mandin, C., Molhave, L., Nevalainen, A., Ruggeri, L., Schneider, T., Samoli, E., Silva, G., 2010. *The INDEX-PM project: health risks from exposure to indoor particulate matter*. Fresenius Environ Bull, **19**, 2458 - 2471.
- Barr, D.B., Buckley, B., 2011. In *Assessing human exposure to environmental toxicants*. Encyclopedia of Environmental Health, Ed. Elsevier.
- Cattaneo, A., Taronna, M., Consonni, D., Angius, S., Costamagna, P., Cavallo, D.M., 2010 (a). *Personal exposure of traffic police officers to particulate matter, carbon monoxide, and benzene in the city of Milan, Italy*. J. Occup. Environ. Hyg., **7**, 342 - 351.
- Cattaneo, A., Taronna, M., Garramone, G., Peruzzo, C., Schlitt, C., Consonni, D., Cavallo, D.M., 2010 (b). *Comparison between Personal and Individual Exposure to Urban Air Pollutants*. Aerosol Sci. Technol., **44**, 370 - 379.
- Cattaneo, A., Peruzzo, C., Garramone, G., Urso, P., Ruggeri, R., Carrer, P., Cavallo, D.M., 2011. *Airborne particulate matter and gaseous air pollutants in residential structures in Lodi province, Italy*. Indoor Air, **21**, 489 - 500.
- Campo, L., Cattaneo, A., Consonni, D., Scibetta, L., Costamagna, P., Cavallo, D.M., Bertazzi, P.A., Fustinoni, S., 2011. *Urinary methyl tert-butyl ether and benzene as biomarkers of exposure to urban traffic*. Environ. Int., **37**, 404 - 411.
- EPA, 1998. *Analysis of the CALMET/CALPUFF modeling system in a screening mode*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Research Triangle Park, NC 27711.
- Hänninen, O.O., Lebre, E., Ilacqua, V., Katsouyanni, K., Kuenzli, N., Sram, R.J., Jantunen, M., 2004. *Infiltration of ambient PM<sub>2.5</sub> and levels of indoor generated non-ETS PM<sub>2.5</sub> in residences of four European cities*. Atmos. Environ., **38**, 6411 - 6423.
- Jenkins, P.L., Philipps, T.J., Mulberg, J.M., Hui, S.P., 1992. *Activity patterns of Californians: use of and proximity to indoor pollutant sources*. Atmos. Environ., **26A**, 2141 - 2148.
- Kabir, G. & Maduga, A.I., 2010. *Assessment of environmental impact on air quality by cement industry and mitigating measures: a case study*. Environ. Monit. Assess., **160**, 91 - 99.
- Ott, W., Wallace, L., Mage, D., 2000. *Predicting particulate (PM<sub>10</sub>) personal exposure distributions using a random component superposition statistical model*. J. Air Waste Manage. Assoc., **50**, 1398 - 1406.
- Peters, S., Vermeulen, R., Olsson, A., Van, G., Kendzia, B., Vincent, R., Savary, B., Williams, N., Woldbaek, T., Lavoue, J., Cavallo, D.M., Cattaneo, A., Mirabelli, D., Plato, N., Dahmann, D., Fevotte, J., Pesch, B., Bruening, T., Straif, K., Kromhout, H., 2012. *Development of an Exposure Measurement Database on Five Lung Carcinogens (ExpoSYN) for Quantitative Retrospective Occupational Exposure Assessment*. Ann. Occup. Hyg., **56**, 70 - 79.
- Polidori, A., Arhami, M., Sioutas, C., Delfino, R.J., Allen R., 2007. *Indoor/Outdoor relationships, trends, and carbonaceous content of fine particulate matter in retirement homes of the Los Angeles Basin*. J. Air Waste Manag. Assoc., **57**, 366 - 379.
- Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E., Yamartino, R.J., 2000 (a). In *A user's guide for the CALMET meteorological model*. Ed. Earth Tech Inc., Concord, MA.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000 (b). In *A user's guide for the CALPUFF dispersion model*. Ed. Earth Tech Inc., Concord, MA.
- Spinazzé, A., Cattaneo, A., Garramone, G., Cavallo, D.M., 2013. *Temporal variation of size-fractionated particulate matter and carbon monoxide in selected micro-environments of the Milan urban area*. J. Occup. Environ. Hyg., **10**, 652 - 662.
- Zou, B., Wilson, J.G., Zhan, F.B., Zeng, Y., 2009. *Air pollution exposure assessment methods utilized in epidemiological studies*. J. Environ. Monit., **11**, 475 - 490.