

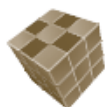


RAPPORTI ISTISAN 16|16

ISSN: 1123-3117 (cartaceo) • 2384-8936 (online)

Strategie di monitoraggio del materiale particolato PM_{10} e $PM_{2,5}$ in ambiente *indoor*: caratterizzazione dei microinquinanti organici e inorganici

G. Settimo, L. Musmeci, A. Marzocca, A. Cecinato, G. Cattani, S. Fuselli,
per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento *Indoor*



AMBIENTE
E SALUTE

ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ

Strategie di monitoraggio del materiale particolato PM₁₀ e PM_{2,5} in ambiente *indoor*: caratterizzazione dei microinquinanti organici e inorganici

Gaetano Settimo (a), Loredana Musmeci (a),
Annalisa Marzocca (b), Angelo Cecinato (c),
Giorgio Cattani (d), Sergio Fuselli (e),
per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento *Indoor*

*(a) Dipartimento di Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria,
Istituto Superiore di Sanità, Roma*

(b) Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Puglia, Bari

(c) Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma

*(d) Dipartimento di Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, Istituto Superiore per la
Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma*

*(e) già Dipartimento di Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria,
Istituto Superiore di Sanità, Roma*

ISSN: 1123-3117 (cartaceo) • 2384-8936 (online)

**Rapporti ISTISAN
16/16**

Istituto Superiore di Sanità

Strategie di monitoraggio del materiale particolato PM₁₀ e PM_{2,5} in ambiente indoor. Caratterizzazione dei microinquinanti organici e inorganici.

Gaetano Settimo, Loredana Musmeci, Annalisa Marzocca, Angelo Cecinato, Giorgio Cattani, Sergio Fuselli, per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor
2016, vi, 34 p. Rapporti ISTISAN 16/16

Obiettivo di questo documento è quello di fornire una uniformità di applicazione di metodologie che consentono di valutare la concentrazione del materiale particolato PM₁₀ e PM_{2,5} e di caratterizzare i principali microinquinanti organici e inorganici presenti su tali frazioni. Si riportano i principali fattori da considerare per pianificare le attività di monitoraggio in relazione agli ambienti e alle sorgenti indoor. Vengono descritti i principi generali e le caratteristiche dei metodi per il campionamento e l'analisi dei microinquinanti organici (PCDD/F, PCB e IPA) e inorganici (metalli e metalloidi) con riferimento alle norme elaborate a livello europeo.

Parole chiave: Inquinamento indoor; PM₁₀; PM_{2,5}; PCDD/F; PCB; IPA; Metalli; Campionamento; Analisi

Istituto Superiore di Sanità

Monitoring strategies to PM₁₀ and PM_{2,5} in indoor environments: characterization of inorganic and organic micropollutants.

Gaetano Settimo, Loredana Musmeci, Annalisa Marzocca, Angelo Cecinato, Giorgio Cattani, Sergio Fuselli, on behalf of the National Working Group on indoor air
2016, vi, 34 p. Rapporti ISTISAN 16/16 (in Italian)

This document aims to provide a harmonized framework for those methodologies intended to measure PM₁₀ and PM_{2,5} in indoor air, and to characterize the associated main organic and inorganic micro-pollutants. The relevant factors to be accounted for the monitoring plan of indoor environments and related sources are described. Moreover, the general criteria and the requirements of the sampling and analytical methods addressed to organic micropollutants (such as PCDD/Fs, PCBs, PAHs) and inorganic metals and metalloids are reported, in compliance to the EU legislative framework.

Key words: Indoor air; PM₁₀; PM_{2,5}; PCDD/F; PCB; PAH; Metals; Sampling; Analysis

Per informazioni su questo documento scrivere a: gaetano.settimo@iss.it

Il rapporto è accessibile online dal sito di questo Istituto: www.iss.it.

Citare questo documento come segue:

Settimo G, Musmeci L, Marzocca A, Cecinato A, Cattani G, Fuselli S, per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor. *Strategie di monitoraggio del materiale particolato PM¹⁰ e PM^{2.5} in ambiente indoor. Caratterizzazione dei microinquinanti organici e inorganici.* Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2016. (Rapporti ISTISAN 16/16).

Legale rappresentante dell'Istituto Superiore di Sanità: *Gualtiero Ricciardi*

Registro della Stampa - Tribunale di Roma n. 114 (cartaceo) e n. 115 (online) del 16 maggio 2014

Direttore responsabile della serie: *Paola De Castro*

Redazione: *Paola De Castro e Sandra Salinetti*

La responsabilità dei dati scientifici e tecnici è dei singoli autori, che dichiarano di non avere conflitti di interesse.

Il presente documento è stato elaborato dal Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento *Indoor* dell'ISS così come costituito con nota del 1° ottobre 2010 (Prot. PRE620/10 COR-M) dal Presidente dell'Istituto Superiore di Sanità, Prof. Enrico Garaci.

Di seguito l'elenco dei componenti:

Massimo Berico	<i>Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile</i>
Vincenza Bianchimani	<i>Regione Toscana</i>
Salvatore Bongiorno	<i>Regione Valle d'Aosta</i>
Bruno Bove	<i>Regione Basilicata</i>
Silvia Brini	<i>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</i>
Giuseppe Caredda	<i>Regione Sardegna</i>
Angelo Cecinato	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
Daniela Cimini	<i>Regione Marche</i>
Alessandro Cipriani	<i>Regione Valle d'Aosta</i>
Fabrizio Cumo	<i>Sapienza Università di Roma</i>
Annamaria de Martino	<i>Ministero della Salute</i>
Maria delle Salette Mattiacci	<i>Regione Lazio</i>
Francesco Iacono	<i>Regione Sicilia</i>
Raimondo Ibba	<i>Regione Sardegna</i>
Paolo Izzo	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Rosanna La Vecchia	<i>Regione Toscana</i>
Rosanna Mabilia	<i>Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca</i>
Salvatore Minardi	<i>Regione Sicilia</i>
Marinella Natali	<i>Regione Emilia-Romagna</i>
Angelo Pellegrino	<i>Regione Piemonte</i>
Enrico Procopio	<i>Regione Piemonte</i>
Federica Rossi Gasparini	<i>Associazione DonnEuropee Federcasalinghe</i>
Anna Santarsiero	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Genesio Scalonì	<i>Regione Marche</i>
Gaetano Settimo	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Luigi Turrio Baldassarri	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Massimo Valsecchi	<i>Regione Veneto</i>
Antonella Pillozzi	<i>Segreteria Organizzativa, Istituto Superiore di Sanità</i>
Sergio Fuselli	<i>Coordinatore del Gruppo, Istituto Superiore di Sanità</i>

Gruppo ad hoc di esperti:

Biagio Bruni	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Giorgio Cattani	<i>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</i>
Angelo Cecinato	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
Alessandro Di Menno di Bucchianico	<i>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</i>
Gianluigi de Gennaro	<i>Università di Bari</i>
Carla Jacobelli	<i>Consiglio nazionale delle Ricerche)</i>
Ettore Guerriero	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche)</i>
Annalisa Marzocca	<i>Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Puglia</i>
Gaetano Settimo	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>
Sergio Fuselli	<i>Istituto Superiore di Sanità</i>

INDICE

Presentazione	v
Introduzione	1
1. Materiale particolato sospeso PM₁₀ e PM_{2,5}: generalità	2
1.1. Definizioni	2
1.2. Caratteristiche emissive delle sorgenti	5
2. Strategia per il monitoraggio del PM₁₀ e PM_{2,5}	7
2.1. Obiettivi del monitoraggio dell'aria indoor	7
2.2. Durata e frequenza del monitoraggio	8
2.3. Scelta dei siti per il monitoraggio e posizionamento della strumentazione di prelievo	8
2.4. Misure contemporanee in aria ambiente <i>outdoor</i>	9
2.5. Misura di parametri caratterizzanti l'ambiente in esame	9
2.6. Procedure di riferimento per attività di monitoraggio	10
3. Determinazione della concentrazione di massa del PM₁₀ e del PM_{2,5}	11
3.1. Metodi di riferimento	11
4. Caratterizzazione chimica di PM₁₀ e PM_{2,5}	12
4.1. Determinazione dei microinquinanti inorganici (metalli)	12
4.2. Determinazione dei microinquinanti organici (PCDD/F, PCB e IPA)	12
Bibliografia	14
APPENDICE A	
Eventuali valutazioni complementari alle misure del PM ₁₀ e del PM _{2,5}	19
APPENDICE B	
Report delle informazioni da registrare durante i monitoraggi dell'aria <i>indoor</i>	27

PRESENTAZIONE

Nell'ambito del Gruppo di Studio (GdS) Nazionale sull'Inquinamento *Indoor* – istituito presso l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) e costituito da esperti dello stesso ISS, del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), del Ministero della Salute, del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) e delle Regioni – è emersa la necessità di predisporre un documento condiviso, che descriva le strategie e procedure da adottare per la caratterizzazione del materiale particolato aerodisperso nelle sue componenti chimico-fisiche d'interesse igienico-sanitario.

A tale proposito è stato costituito un Sottogruppo *ad hoc* composto da esperti individuati dallo stesso GdS, per la messa a punto di un documento finalizzato alla definizione di una strategia di monitoraggio del materiale particolato sospeso PM₁₀ e PM_{2,5}, che, vista l'assenza d'una regolamentazione nazionale specifica sull'aria *indoor*, stabilisca univocamente e dettagliatamente procedure di campionamento, misura e caratterizzazione chimica di natura organica e inorganica del materiale particolato PM₁₀ e PM_{2,5}, che tiene conto delle più attuali conoscenze scientifiche disponibili.

Il documento riporta una ricognizione della documentazione tecnico-scientifica più aggiornata e delle norme di riferimento disponibili, a livello europeo e internazionale, sulle metodiche di campionamento e sulle analisi da effettuare negli ambienti *indoor*, per identificare sia le sorgenti *indoor* sia i possibili apporti esterni (es. ricambio aria e sistemi di ventilazione, ecc.). Molte indicazioni sugli aspetti generali della strategia di campionamento (obiettivi, metodologie e tempi) sono riportati nelle norme tecniche UNI EN ISO 16000-1:2006 e UNI EN 12341:2014.

Il presente documento è rivolto in special modo a tutte le Strutture che, a vario titolo, sono preposte allo studio e/o al controllo della qualità dell'aria negli ambienti *indoor* in relazione alle problematiche connesse con la tutela della salute umana.

A tutt'oggi il GdS ha elaborato i seguenti documenti:

- Rapporti ISTISAN 13/4
Strategie di monitoraggio dei Composti Organici Volatili (COV) in ambiente indoor
- Rapporti ISTISAN 13/37
Strategie di monitoraggio dell'inquinamento di origine biologica dell'aria in ambiente indoor
- Rapporti ISTISAN 13/39
Workshop. Problematiche relative all'inquinamento indoor: attuale situazione in Italia. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 25 giugno 2012. Atti
- Rapporti ISTISAN 15/4
Workshop. La qualità dell'aria indoor: attuale situazione nazionale e comunitaria. L'esperienza del Gruppo di Studio Nazionale Inquinamento Indoor. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 28 maggio 2014. Atti
- Rapporti ISTISAN 15/5
Strategie di monitoraggio per determinare la concentrazione di fibre di amianto e fibre artificiali vetrose aerodisperse in ambiente indoor
- Rapporti ISTISAN 15/25
Parametri microclimatici e inquinamento indoor.

– Rapporti ISTISAN 16/15

Presenza di CO₂ e H₂S in ambienti indoor: attuali conoscenze e letteratura scientifica.

La *World Health Organization* nelle linee guida per la qualità dell'aria (1), ha indicato per la prima volta, i valori numerici di riferimento per il PM₁₀ e per il PM_{2,5}.

Nella definizione dei criteri per la pianificazione delle metodologie e delle modalità di campionamento/analisi del PM₁₀ e del PM_{2,5}, si è tenuto conto del fatto che normalmente gli occupanti degli ambienti *indoor* risultano esposti alle due componenti particellari, in concentrazioni variabili nello spazio e nel tempo, emesse da sorgenti che possono essere differenti per numero e tipologia.

Loredana Musmeci

Direttore del Dipartimento Ambiente Connessa Prevenzione Primaria

Sergio Fuselli

Coordinatore del GdS

INTRODUZIONE

L'espressione *indoor* è riferita agli ambienti di vita e di lavoro non industriali o professionali, quali quelli adibiti a dimora, svago, lavoro e trasporto. Entro questa definizione, proposta dall'Accordo Stato-Regioni del 27 settembre 2001, sono compresi le abitazioni, gli uffici pubblici e privati, le strutture comunitarie (ospedali, scuole, caserme, alberghi, banche, edifici di culto, ecc.), i locali destinati ad attività ricreative e sociali (cinema, ristoranti, bar, negozi, strutture sportive, ecc.) e infine i mezzi di trasporto pubblico e privato (auto, treno, bus, metropolitana, aereo, nave, ecc.).

Il materiale particellare (*Particulate Matter*, PM) atmosferico (PM₁₀ e PM_{2,5}) è stato classificato dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (*International Agency for Research on Cancer*, IARC) tra le sostanze e miscele di Gruppo 1, ovvero come cancerogeno accertato per l'uomo (2, 3). Esistono diverse definizioni di materiale particellare in funzione del diametro considerato (ottico, aerodinamico, ecc.). L'Organizzazione Mondiale della Sanità (*World Health Organization*, WHO) considera principalmente le frazioni dimensionali PM₁₀ e PM_{2,5}, riportando per esse i valori guida da utilizzare nella valutazione della qualità dell'aria (1, 4-8).

Attualmente la determinazione del PM₁₀ e del PM_{2,5} viene effettuata utilizzando i specifici metodi di riferimento UNI EN presenti nell'Allegato VI - Metodi di riferimento del DL.vo 155/2010 s.m.i. La Direttiva 2015/1480 della Commissione UE, che modifica vari allegati delle direttive 2004/107/CE e 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio recanti le disposizioni relative ai metodi di riferimento, alla convalida dei dati e all'ubicazione dei punti di campionamento per la valutazione della qualità dell'aria ambiente, ha indicato come unico metodo di riferimento per il campionamento delle frazioni PM₁₀ e PM_{2,5} la norma UNI EN 12341:2014 che ha sostituito le due precedenti norme UNI EN 12341:2001 e 14907:2005. A tale riguardo, il DL.vo 155/2010 s.m.i. ha confermato i limiti di concentrazione già in vigore in Italia per il PM₁₀ e ha introdotto il valore limite per il PM_{2,5}.

La norma UNI EN ISO 12341:2014 descrive le procedure di campionamento e di misura da utilizzare per la determinazione delle due frazioni granulometriche; mentre le norme UNI EN 14907:2005 e UNI EN 15852:2010 descrivono le procedure analitiche per la determinazione del contenuto totale di metalli e metalloidi nella frazione PM₁₀.

In ambienti *indoor* la norma di riferimento è la ISO 16000 nelle sue diverse parti.

Nel presente documento vengono prese in considerazione le indicazioni riportate nelle linee guida per la qualità dell'aria della WHO (1).

1. MATERIALE PARTICELLARE SOSPESO PM₁₀ E PM_{2,5}: GENERALITÀ

1.1. Definizioni

Il termine generico “materiale particellare sospeso” (*Particulate Matter*, PM) o aerosol atmosferico, definisce un sistema disperso di particelle solide e liquide, di diversa dimensione e composizione. Si tratta di particelle non sferiche, la cui dimensione viene convenzionalmente espressa in termini di diametro aerodinamico equivalente (D_{ae}), definito come il diametro di una particella sferica, di densità unitaria, dotata dello stesso comportamento aerodinamico (stessa velocità di sedimentazione) della particella in esame in aria calma, nelle stesse condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa.

Un'ulteriore definizione del PM distingue tra materiale particellare d'origine primaria e secondaria. In particolare, il PM emesso direttamente dalle sorgenti viene detto “primario”, mentre viene detto “secondario” il materiale particellare che si genera in atmosfera successivamente al rilascio di sostanze allo stato gassoso, come effetto di fenomeni di coagulazione, conversione gas-particella del tipo della nucleazione eterogenea, per condensazione di gas su particelle preesistenti e per reazioni chimiche che trasformano specie gassose in composti solidi o liquidi (1, 4-9). I vari meccanismi di formazione del PM ne influenzano la distribuzione dimensionale nell'aria ambiente; questa è generalmente compresa in un intervallo di diametri particellari tra 2,5 nm e 100 µm. L'intervallo dimensionale compreso tra 0,0025 µm e 0,1 µm viene definito come “modo ultra-fine” o dei “nuclei di Aitken” e le particelle appartenenti a questo intervallo dimensionale sono dette *ultrafini* (*Ultra-Fine Particles*, UFP). Esse sono numericamente prevalenti nel contesto del numero totale di particelle comunemente rilevabile in un campione d'aria, quantunque contribuiscano in modo poco rilevante alla massa complessiva di polvere sospesa. Il “modo di accumulazione” comprende le particelle *fini*, con diametri aerodinamici compresi tra 0,1 µm e 2,5 µm. Le particelle *fini* insieme a quelle di dimensioni maggiori contribuiscono alla quasi totalità della massa di materiale particellare sospeso in aria (2-6).

Le particelle nell'intervallo dimensionale 2,5-100 µm vengono dette *grossolane* (“modo *coarse*”). Il loro contributo alla massa sospesa totale è variabile in dipendenza del prevalere dei meccanismi di formazione e diffusione di questa frazione rispetto a quella *fine*, mentre il contributo al numero totale di particelle è minimo (2-7). Queste particelle in ambienti *indoor* sono soggette a reiterata generazione e sospensione, provocate dalle numerose attività svolte dall'uomo.

In generale, la distribuzione dimensionale e la composizione del PM sono ampiamente variabili in dipendenza di numerosi fattori; i principali tra questi sono il tipo, numero e intensità di emissione delle sorgenti, la reattività chimica (distinta dall'ambiente esterno per la presenza di ampie superfici, di reagenti gassosi specifici e per intensità d'illuminazione) e i parametri microclimatici (temperatura assoluta e i suoi gradienti intra-sala, pressione, umidità relativa, velocità di ricircolo/ricambio d'aria, correnti verticali e orizzontali) (9-13).

Alcuni Organismi internazionali, tra questi l'*International Organization for Standardization* (ISO), hanno classificato il PM sulla base della capacità di penetrazione del PM nell'apparato respiratorio umano, espressa in termini di D_{ae}.

Secondo questa convenzione vengono distinte tre frazioni principali:

- *frazione inalabile*, che è rappresentativa della porzione di aerosol che effettivamente viene campionata dalla testa umana, considerata come un campionatore a selezione dimensionale;
- *frazione toracica*, che è rappresentativa della porzione di aerosol inalabile che penetra e si deposita oltre la laringe;
- *frazione respirabile*, che è rappresentativa della porzione di aerosol che penetra e si deposita nelle vie aeree non ciliate (8).

In questi anni il Comitato Normativo Europeo (*Comité Européen de Normalisation*, CEN), ha elaborato per il PM importanti norme nelle quali veniva affrontato il tema del campionamento della frazione toracica-PM₁₀ (UNI EN 12341:2001 sostituita dalla UNI EN 12341:2014) e della frazione respirabile-PM_{2,5} (UNI EN 14907:2005 sostituita dalla UNI EN 12341:2014) a cui devono conformarsi gli strumenti di prelievo.

Nel 2013, nell'ambito del programma di aggiornamento delle normative CEN, i citati metodi di riferimento per il PM₁₀ e per il PM_{2,5} sono stati sostituiti da una unica norma di riferimento la UNI EN 12341:2014: *Aria ambiente (Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM₁₀ o PM_{2,5})*, che contiene tutta una serie di indicazioni da seguire le attività di monitoraggio delle due le frazioni granulometriche.

Le due frazioni toracica e respirabile del PM vengono considerate di particolare rilievo per quanto riguarda gli effetti sulla salute umana (2-8). Con il termine di PM₁₀ si intende l'insieme delle particelle prelevate con un sistema d'aspirazione avente un'efficienza di cattura pari al 50% in corrispondenza d'un diametro aerodinamico di 10 µm e tendente al 100% per diametri maggiori; esso è rappresentativo della frazione toracica (UNI EN 12341:2014); analogamente, per PM_{2,5} si intende l'insieme delle particelle catturate con un sistema avente un'efficienza del 50% per un diametro aerodinamico di 2,5 µm; esso è rappresentativo della frazione respirabile (UNI EN 12341:2014).

La WHO, nella revisione delle linee guida sulla qualità dell'aria (1) ha riportato, per la prima volta, i valori numerici di riferimento per il PM₁₀ e per il PM_{2,5} come concentrazioni medie in aria ambiente da non superare per contenere gli effetti negativi sulla salute, tenuto conto del fatto che è riconosciuta l'impossibilità di definire una soglia al di sotto della quale non sono previsti effetti. Considerando che gli effetti nocivi si possono verificare sia per esposizione a lungo termine che per periodi di breve durata, le linee guida riportano valori di riferimento sia delle concentrazioni medie giornaliere, sia delle medie annuali. Il valore guida WHO per l'esposizione della popolazione a PM_{2,5} su base annuale è pari a 10 µg/m³, mentre quello giornaliero è 25 µg/m³ (per il 99° percentile delle medie giornaliere di un anno, corrispondente a un massimo di tre superamenti all'anno del valore di 25 µg/m³). Per l'esposizione della popolazione a PM₁₀, il valore guida annuale della WHO è di 20 µg/m³ mentre su base giornaliera è 50 µg/m³ (per il 99° percentile delle medie giornaliere di un anno pari a 50 µg/m³, che corrisponde a un massimo di tre superamenti all'anno di 50 µg/m³).

Secondo la WHO, i valori guida definiti per il PM₁₀ e per il PM_{2,5} in aria ambiente sono applicabili anche agli ambienti *indoor* (13).

La Direttiva Europea 2008/50/CE per la valutazione e la gestione della qualità dell'aria ambiente è stata recepita in Italia attraverso il DL.vo 155/2010. Questo, con riferimento a PM₁₀ e PM_{2,5}, ha confermato i limiti di concentrazione previgenti per il PM₁₀. La sua media annua non deve superare il valore limite di 40 µg/m³ e non sono ammessi più di 35 superamenti del valore di 50 µg/m³, come media giornaliera.

Inoltre, il DL.vo 155/2010 stabilisce un valore limite di concentrazione media annuale per il PM_{2,5}, pari a 25 µg/m³. Tali valori limite si differenziano dai valori guida proposti dalla WHO.

A livello europeo, alcuni Paesi (tra cui Germania, Finlandia, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo) seguono abitualmente l'orientamento della WHO nel caso di valutazioni sui possibili effetti del PM *indoor* sulla salute della popolazione (14).

In Francia nel 2013, per migliorare le procedure di accertamento e prevenzione messe in atto dagli organismi governativi di controllo o dalle stesse imprese per auto-controllo, sono stati predisposti documenti specifici per la valutazione del PM negli ambienti *indoor*; nei documenti sono stati individuati riferimenti numerici utili ad orientare le possibili azioni o interventi (17, 18) che vanno ad integrare i valore-guida elaborati dalla WHO.

Come è stato già detto il materiale particellare atmosferico PM₁₀ e PM_{2,5} è stato inserito dall'IARC (2, 3) tra i cancerogeni di Gruppo 1 ossia agenti sicuramente cancerogeni per l'uomo. Inoltre è stata evidenziata per il PM una tossicità specifica associata a determinate fonti d'emissione, alcune delle quali, peraltro, tipiche degli ambienti *indoor*: il fumo di tabacco, la combustione di biomasse (es. legna, ecc.) le attività di cottura dei cibi (16) oltre all'eventuale intrusione di PM prodotto dalle emissioni veicolari, soprattutto quelle rilasciate dai veicoli diesel (2, 3, 15).

Di particolare rilevanza sanitaria appare il contenuto del PM₁₀ e PM_{2,5} in policlorodibenzodiossine e policlorodibenzofurani (PCDD/F), policlorobifenili (PCB), Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), e in alcuni elementi inorganici quali il piombo, nichel, cadmio, arsenico, vanadio, cromo e mercurio in relazione alla loro tossicità e, per alcuni di essi, alla loro accertata o probabile cancerogenicità per l'uomo (2-5, 17-23). Infatti, è ormai consolidato che la massima parte delle sostanze tossiche sono concentrate nella frazione *fine* PM_{2,5}, mentre soltanto i composti più volatili (specie organiche a basso peso molecolare) e gli elementi di prevalente origine crostale si accumulano nel PM più grossolano (2, 3, 17-22, 31-40).

Per la programmazione di campagne di misura in ambienti *indoor* l'ISO e il CEN hanno elaborato una serie di norme specifiche per la matrice aria, che riportano le procedure operative con cui effettuare la scelta dei punti di prelievo e le tecniche analitiche da utilizzare in tali attività:

- UNI EN ISO 16000 Aria in ambienti *indoor*
 - UNI EN ISO 16000-1:2006
Aspetti generali della strategia di campionamento.
 - UNI EN ISO 16000-12:2008
Strategia di campionamento per policlorobifenili (PCB), policlorodibenzo-p-diossine (PCDD), policlorodibenzofurani (PCDF) e idrocarburi policiclici aromatici (IPA.)
 - ISO 16000-13:2008
Determination of total (gas and particle-phase) polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) - Collection on sorbent-backed filters with high resolution gas chromatographic/mass spectrometric analysis.
 - ISO 16000-14:2009
Determination of total (gas and particle-phase) polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) - Extraction, clean-up and analysis by high-resolution gas chromatography and mass spectrometry.

- UNI EN 12341:2014 Aria ambiente
Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM_{10} o $PM_{2,5}$.
- UNI EN 14907:2005 Qualità dell'aria ambiente
Metodo normalizzato per la misurazione di Pb, Cd, As e Ni nella frazione PM_{10} del particolato in sospensione.
- UNI EN 15549:2008 Qualità dell'aria
Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di benzo[a]pirene in aria ambiente.
- UNI EN 15852:2010 Qualità dell'aria ambiente
Metodo normalizzato per la determinazione di mercurio gassoso totale.

In ambito europeo, alcuni Stati già da qualche anno hanno introdotto nella legislazione nazionale sulla qualità dell'aria *indoor* alcuni specifici valori guida o valori-limite relativi alle concentrazioni di PM_{10} e $PM_{2,5}$, utilizzando come riferimento per le attività di campionamento e caratterizzazione chimico-fisica le già citate norme EN ISO (14).

1.2. Caratteristiche emissive delle sorgenti

Per gli ambienti *indoor*, le fonti di PM (PM_{10} e $PM_{2,5}$) sono disperate e dipendono fortemente dalla presenza e dall'attività che svolge l'uomo.

Salvo rare eccezioni, le sorgenti d'inquinamento sono in massima parte artificiali. La principale classificazione delle sorgenti distingue due categorie:

- *Fonti interne*
legate principalmente, alle abitudini e alle attività degli occupanti, ai materiali impiegati, ai materiali da costruzione e d'arredo, ai prodotti per la pulizia della casa, ai processi di combustione (riscaldamento, cottura, bastoncini incenso e candele profumate, ecc.), ai sistemi di ventilazione, ecc. (2, 3, 17, 19, 24, 25). In particolare oggi una forte attenzione viene posta ai diversi processi di combustione tipici degli ambienti *indoor*, che impiegano per le esigenze energetiche quali la cottura, il riscaldamento, o altri usi (1-3, 17, 19, 24-28), diversi combustibili solidi (biomassa: legna, pellet, ecc.), gassosi (metano, butano, GPL, ecc.) e liquidi (biomassa: etanolo).
- *Fonti esterne*
in questo caso, il PM presente in aria ambiente esterna (*outdoor*) penetra negli ambienti *indoor*, contaminandoli. Principali sorgenti esterne sono quelle antropogeniche (traffico veicolare, riscaldamento degli edifici, emissioni industriali, ecc.) e quelle naturali (risollevamento del suolo, pollini, spore fungine, frammenti vegetali e animali, bio-aerosol primario, spray marino) (1-3, 17, 25-27, 29).

Le modalità con cui è effettuato il necessario ricambio dell'aria (ventilazione naturale o forzata) influiscono sui livelli di concentrazioni di PM *indoor*. Un ruolo importante nella diffusione del PM è svolto dalle condizioni microclimatiche *indoor* (temperatura e gradienti termici, umidità relativa e velocità dell'aria).

A seconda dell'inquinante (non solo il PM ma anche le sostanze in esso contenute), le sorgenti interne possono incidere sulla dipendenza dei livelli d'inquinamento *indoor* dall'intensità di quello *outdoor*.

Spesso, infatti, i rispettivi andamenti temporali risultano scarsamente correlati e il rapporto tra le concentrazioni *indoor* e *outdoor* degli inquinanti risulta maggiore di uno, a indicare che le fonti interne sono prevalenti o che comunque le sostanze, una volta penetrate in un ambiente *indoor*, sono più persistenti che in *outdoor*.

In Appendice A si riportano le misure complementari che possono essere eseguite per la caratterizzazione del PM utilizzando strumentazione ad alta risoluzione temporale (es. strumenti che misurano la concentrazione di particelle in numero, le distribuzioni dimensionali, la forma, ecc.).

2. STRATEGIA PER IL MONITORAGGIO DEL PM₁₀ E PM_{2,5}

Per la programmazione di campagne di misura in ambienti *indoor*, l'ISO e il CEN hanno definito una serie di norme specifiche che riportano le procedure operative che esplicitano le strategie di monitoraggio generali (16, 42); inoltre hanno fissato le procedure analitiche da utilizzare in tali attività per misurare i principali inquinanti chimici. Relativamente alla determinazione in massa del PM, l'ISO sta completando l'elaborazione di una specifica parte, la *Part 37: Measurement of PM 2,5 mass concentration* della norma 16000, che per la determinazione della concentrazione in massa del PM fa riferimento alla norma UNI EN12341:2014.

Per definire opportune strategie di monitoraggio del PM₁₀ o del PM_{2,5} in ambienti *indoor* è indispensabile definire in modo inequivocabile quali siano gli obiettivi della misura e conoscere, ove possibile, le caratteristiche degli ambienti, delle sorgenti, delle attività svolte dagli occupanti e i tempi di permanenza dei fruitori negli ambienti in esame. La quantità e le caratteristiche chimico-fisiche del PM dipendono inoltre dalla reattività delle sostanze che lo costituiscono e/o dai processi di formazione di nuove particelle (particelle secondarie), dall'interazione con le superfici dei materiali presenti nell'ambiente (es. materiali da costruzione e d'arredo, superfici calde e pareti fredde, ecc.), dal contributo dell'aria ambiente aria esterna (*outdoor*), dalla presenza di sistemi di ventilazione meccanica, ecc.

Per reperire ulteriori informazioni è utile compilare questionari di rilevazione simili a quello proposto in *Appendice B*. Esso riporta un elenco di voci che andranno selezionate e compilate caso per caso dall'operatore, eventualmente integrate da informazioni peculiari per il sito e la situazione operativa. L'insieme delle informazioni, raccolte in fase preventiva, risulteranno utili per la definizione dei punti di misura, della/e tecnica/che di monitoraggio da adottare e dell'opportuna durata dell'indagine di campo. Inoltre risultano essere utili per la successiva valutazione dei risultati ottenuti, per comprendere le cause d'inquinamento ed eventualmente ad intervenire con soluzioni di rimedio.

2.1. Obiettivi del monitoraggio dell'aria *indoor*

Le attività di campionamento e misura del PM₁₀ e PM_{2,5} consentono di disporre di dati e informazioni utili a condurre idonee strategie di monitoraggio ed a:

1. fornire una valutazione oggettiva che consenta di rispondere ai reclami o ai problemi posti all'attenzione delle Autorità da parte dei fruitori degli ambienti;
2. identificare le principali sorgenti *indoor* ed *outdoor* dell'inquinamento associato al PM₁₀ e PM_{2,5} e alle sue caratteristiche chimiche e stimarne i relativi contributi;
3. condurre un'attività di sorveglianza ambientale in conseguenza di situazioni accertate d'inquinamento *indoor*;
4. condurre attività di sorveglianza ambientale mirata a valutare l'efficacia di eventuali interventi di ripristino/rimedio adottati;
5. eseguire la raccolta di specifiche informazioni che agevolino i processi decisionali dei soggetti competenti, in sede di valutazione dell'esposizione degli occupanti al PM₁₀ e PM_{2,5} e alle sostanze tossiche, con riferimento ai diversi tempi di permanenza in un dato ambiente *indoor*;

6. verificare il rispetto di valori guida o di riferimento stabiliti dalle Autorità competenti o da Organismi internazionali (es. WHO).

In ogni caso, come approccio minimo per la caratterizzazione del PM sospeso occorrerà determinare la concentrazione in massa di PM₁₀ e PM_{2,5} e, se ritenuto necessario per una attenta valutazione igienico-sanitaria, si procederà alla caratterizzazione chimica del PM₁₀ e PM_{2,5} in termini di contenuto di IPA, PCDD/F, PCB, metalli e metalloidi.

In determinate situazioni, al fine di avere un quadro più completo della situazione *indoor*, può risultare utile integrare le attività di misura con quella di altri inquinanti, quali ad esempio i Composti Organici Volatili (COV) (benzene, toluene, formaldeide, solventi clorurati, ecc.).

2.2. Durata e frequenza del monitoraggio

Per pianificare l'attività di monitoraggio individuando le tecniche opportune di raccolta e caratterizzazione chimica del PM₁₀ e del PM_{2,5} presenti negli ambienti *indoor*, occorre definire il periodo temporale di osservazione, tenendo presenti i valori guida o di riferimento, stabiliti dalle Autorità competenti o contenuti nelle linee guida WHO. Infatti, se si vuole confrontare la concentrazione ottenuta con un valore-guida di riferimento, la durata del monitoraggio deve essere uguale al tempo associato al valore-guida (per il PM₁₀ e PM_{2,5} è nominalmente di 24 h). Se invece la durata del campionamento è inferiore alla durata prevista dal valore guida/riferimento, ma viene scelta in base allo svolgimento di attività lavorative, alla permanenza di persone, o all'attivazione di fonti interne, la misura fornisce un valore orientativo che risulterà utile ad individuare e a stimare i possibili contributi ai livelli di contaminazione di un dato ambiente, indotti dall'attività delle singole sorgenti in funzione al momento del rilevamento.

Pertanto, risulta necessario acquisire le informazioni circa la presenza/assenza di occupanti e quali azioni essi svolgano all'interno dei locali, sul funzionamento/attivazione degli impianti di ventilazione meccanica, riscaldamento, ecc. In ogni caso, dovranno essere specificati i parametri e le condizioni d'uso degli ambienti *indoor* per i quali le misurazioni si possano ritenere rappresentative.

La frequenza delle misure viene pianificata in relazione all'obiettivo del monitoraggio tenendo conto delle attività, della/e sorgente/i, delle possibili variazioni temporali (orarie, giornaliere, mensili, stagionali), delle variabili microclimatiche.

I campionatori di PM₁₀ e PM_{2,5} da utilizzare nelle attività di prelievo devono essere rispondenti alle caratteristiche della norma UNI EN 12341:2014.

2.3. Scelta dei siti per il monitoraggio e posizionamento della strumentazione di prelievo

Negli ambienti *indoor*, ancor più che in quelli *outdoor*, la scelta del punto preciso di prelievo riveste grande importanza ai fini della significatività e "qualità" complessiva dell'indagine. Infatti, un posizionamento poco rappresentativo dell'ambiente che si intende indagare rende l'attività di monitoraggio improduttiva. Se si tratta di un edificio, generalmente non è necessario investigare tutti i suoi ambienti ma devono essere individuate le aree più rappresentative in relazione all'obiettivo del monitoraggio (es. generalmente gli ambienti in cui le persone soggiornano per periodi più lunghi). La posizione del campionatore all'interno di un ambiente

influenza fortemente la misura e quindi i risultati (40). Se l'area indagata comprende diversi microambienti, occorrerà valutare l'opportunità d'effettuare una virtuale suddivisione di essa e stabilire al suo interno uno o più siti di campionamento. Se si ritiene che i livelli emissivi dipendono da particolari attività svolte dagli occupanti, è utile effettuare misure nell'area in cui tale attività viene svolta oltre che in posizioni "di zero" (presumibilmente non esposte/influenzate dalle attività degli occupanti).

In presenza di livelli di concentrazione anomali, può risultare utile studiare le caratteristiche emissive della/e sorgente/i utilizzando strumentazione ad alta risoluzione temporale (es. strumenti che misurano la concentrazione di particelle in numero, le distribuzioni dimensionali, la forma, ecc.) (Appendice A) e integrando possibilmente ulteriori informazioni in un apposito questionario, così come riportato in Appendice B.

Nell'operare il campionamento è necessario posizionare la strumentazione di prelievo al centro dell'area oggetto di studio o, nel caso in cui questo risulti di difficile realizzazione, almeno ad una distanza non inferiore a 1 m dalla parete più vicina e ad un'altezza di circa 1,5 m dal pavimento (40). Nel caso di uffici, scuole o asili, la testa del campionatore (punto d'ingresso dell'aria) va posizionata a un'altezza compresa tra 1 e 1,2 m dal pavimento (40). In luoghi soggetti a correnti d'aria o dotati di sistemi di ventilazione meccanica, esposti ad irraggiamento solare diretto o che ospitano fonti di calore, è sconsigliabile posizionare il campionatore nelle loro immediate vicinanze, pena la non rappresentatività delle misure nei riguardi della contaminazione dell'ambiente studiato ai fini della valutazione del rischio.

2.4. Misure contemporanee in aria ambiente *outdoor*

Al fine di individuare il contributo delle sorgenti interne ai livelli di concentrazione *indoor* di PM₁₀ e PM_{2,5} e del suo contenuto in IPA, PCDD/F, PCB, metalli e metalloidi è opportuno confrontare le concentrazioni *indoor* con le concentrazioni *outdoor*, che forniscono informazioni circa l'entità del contributo esterno, determinate contemporaneamente. È fondamentale considerare, infatti, che i processi di ventilazione e intrusione producono un costante scambio tra l'aria *outdoor* e l'aria *indoor*.

I campionamenti in aria ambiente esterna *outdoor* devono essere effettuati nelle vicinanze dell'edificio, comunque a non meno di 1 m dalla parete esterna e a un'altezza confrontabile con quella di posizionamento del campionatore all'interno della stanza dell'edificio in studio (14, 40). Se l'edificio oggetto d'indagine è dotato di sistemi di ventilazione meccanica o di climatizzazione, per valutare correttamente il contributo *outdoor* il campionatore va posizionato in prossimità della presa d'aria e lontano dalle bocche di espulsione dell'aria.

I campionatori di PM₁₀ e PM_{2,5} da utilizzare nelle attività di prelievo devono essere rispondenti alle caratteristiche della norma UNI EN 12341:2014.

2.5. Misura di parametri caratterizzanti l'ambiente in esame

La presenza di PM₁₀ e PM_{2,5} in aria ambiente *indoor*, come pure del rispettivo contenuto in IPA, PCDD/F, PCB, metalli e metalloidi, è notevolmente influenzata dalle attività svolte e dalle sorgenti presenti, dalle caratteristiche strutturali degli ambienti, dalle condizioni microclimatiche e dai ricambi d'aria. Infatti, a parità di intensità d'emissione delle sorgenti (sia interne che esterne), la diffusione del PM nell'ambiente *indoor*, la formazione e le velocità di

deposizione, adsorbimento e desorbimento dipendono unicamente da fattori che influenzano la fluidodinamica all'interno degli edifici.

Pertanto, risulta importante monitorare gli andamenti temporali dei principali parametri microclimatici quali la velocità dell'aria, la temperatura ambiente e l'umidità relativa. Parimenti, occorre conoscere la frequenza dei ricambi d'aria, il numero degli occupanti, le loro attività, il tempo trascorso da ciascuno negli ambienti investigati.

Tali informazioni sono certamente d'aiuto nell'eventuale disamina dei risultati analitici ottenuti dal monitoraggio e possono essere dedotte dalla compilazione di opportuni questionari da parte degli stessi occupanti (Appendice B). È importante anche disporre d'informazioni dettagliate sulle caratteristiche strutturali degli ambienti (dimensioni, presenza di porte, finestre, caratteristiche degli infissi, arredi, destinazioni d'uso, presenza di sistemi di ventilazione meccanica o riscaldamento, ecc.).

2.6. Procedure di riferimento per attività di monitoraggio

La misura dei livelli di concentrazione di PM₁₀ e PM_{2,5} e del loro contenuto in PCDD/F, PCB, IPA, metalli e metalloidi può essere eseguita tenendo conto delle indicazioni presenti nelle citate norme elaborate dall'ISO e dal CEN e in parte recepite dall'UNI.

In ambienti a ventilazione naturale è consigliabile effettuare, prima di iniziare le attività di raccolta del PM, una ventilazione per almeno 15 minuti, tenendo aperte porte e finestre, in assenza di attività umane. Dopo tale periodo di tempo le porte e le finestre dovranno essere richiuse per circa 8 ore (preferibilmente per un'intera notte); successivamente si procederà con il campionamento adottando l'opportuna durata, in assenza di occupanti, con porte e finestre chiuse. Successivamente la misura andrà ripetuta, con le stesse modalità, durante l'ordinario utilizzo dell'ambiente oggetto d'indagine da parte degli abituali occupanti.

In ambienti provvisti di sistemi di ventilazione meccanica o di climatizzazione, questi devono essere mantenuti accesi in operatività abituale per almeno 3 ore prima di iniziare l'attività di campionamento, monitorando opportunamente il funzionamento del sistema di ventilazione (14, 40). Dopo tale periodo di tempo si procederà con il campionamento adottando l'opportuna durata, in assenza di occupanti, con il sistema di ventilazione meccanica o di climatizzazione spento e ripetendo la misura con il sistema di ventilazione meccanica o di climatizzazione acceso.

Successivamente la misura andrà ripetuta, con le stesse modalità, durante l'ordinario utilizzo dell'ambiente oggetto d'indagine da parte degli abituali occupanti con il sistema di ventilazione meccanica o di climatizzazione acceso.

3. DETERMINAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI MASSA DEL PM₁₀ E DEL PM_{2,5}

3.1. Metodi di riferimento

Per la determinazione della concentrazione di massa del PM₁₀ e del PM_{2,5} negli ambienti *indoor* si fa riferimento al metodo standardizzato comunemente utilizzato nelle campagne di misura in aria ambiente UNI EN 12341:2014.

La direttiva 2015/1480 della Commissione UE ha confermato come metodo di riferimento la norma UNI EN 12341:2014 *Aria ambiente – Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM₁₀ o PM_{2,5}*. La norma UNI EN 12341:2014 contiene tutte le indicazioni procedurali essenziali. In particolare sono descritte in tale norma:

- le caratteristiche costruttive e prestazionali cui devono essere conformi le teste di prelievo (impattori inerziali per il “taglio” selettivo della frazione PM₁₀ e PM_{2,5}), le linee di aspirazione, i supporti per l'alloggiamento dei filtri, i sistemi di aspirazione;
- le procedure di trattamento, trasporto, condizionamento e conservazione delle membrane filtranti;
- i requisiti della bilancia analitica e le procedure per la determinazione gravimetrica;
- le procedure di controllo e assicurazione di qualità;
- i criteri di misura e l'espressione dei risultati.

Il metodo prevede il prelievo di aria, attraverso un sistema costituito da una testa di prelievo omnidirezionale di specifico disegno, in grado di selezionare per impatto inerziale la frazione PM₁₀ o PM_{2,5}, utilizzando una portata predeterminata di campionamento (2,3 m³/h). La massa del materiale particellare PM₁₀ o PM_{2,5} viene determinata per via gravimetrica. I filtri di prelievo, vengono condizionati in camera termostatica fino a peso costante, consentono, per pesata differenziale, di valutare la concentrazione di massa del PM₁₀ o del PM_{2,5} presente sul filtro.

4. CARATTERIZZAZIONE CHIMICA DI PM₁₀ E PM_{2,5}

4.1. Determinazione dei microinquinanti inorganici (metalli)

La misura della concentrazione di metalli contenuti nel PM₁₀ e nel PM_{2,5} deve essere eseguita previa digestione acida del filtro campione di PM₁₀ o PM_{2,5} secondo quanto riportato nella norma UNI EN 14902:2005 (*Qualità dell'aria ambiente – Metodo normalizzato per la misurazione di Pb, Cd, As e Ni nella frazione PM₁₀ del particolato in sospensione*).

Il metodo UNI EN 14902:2005 è stato sviluppato e validato soltanto per il PM₁₀, ma può essere utilizzato anche per la caratterizzazione dei microinquinanti inorganici associati al PM_{2,5}. Infatti, tralasciando la fase della raccolta del campione, le procedure di trattamento e analisi chimica strumentale sono applicabili a qualsiasi frazione dimensionale del PM.

In breve, la soluzione acida proveniente dalla mineralizzazione viene sottoposta ad analisi chimica mediante spettrometria di assorbimento atomico (*Atomic Absorption Spectroscopy*, AAS) con fornello di grafite (*Graphite Furnace*, GF) o per spettrometria di massa (*Mass Spectrometry*, MS) con sorgente ad induzione di plasma (*Inductively Coupled Plasma*, ICP).

Il metodo applicato deve consentire, nei limiti imposti dalle condizioni operative (volume e/o durata del campionamento), la determinazione di arsenico, cadmio, nichel e piombo, e in linea di principio anche la misura di altri metalli ad esclusione del mercurio. Per quest'ultimo, deve essere seguita la specifica norma UNI EN 15852:2010 (*Qualità dell'aria ambiente – Metodo normalizzato per la determinazione di mercurio gassoso totale*) che prevede la determinazione di mercurio gassoso totale mediante AAS con vapori freddi (*Cold Vapours*, CV), ovvero la spettrometria di fluorescenza atomica (*Atomic Fluorescence Spectrometry*, AFS) con CV.

4.2. Determinazione dei microinquinanti organici (PCDD/F, PCB e IPA)

Per la determinazione della concentrazione di IPA, PCDD/F e PCB associati al PM₁₀ o al PM_{2,5} si possono utilizzare le procedure analitiche di riferimento previste a livello nazionale, europeo e internazionale (UNI EN 15549, UNI EN ISO 16000-12, ISO 16000-13, ISO 16000-14).

I metodi sopra citati possono essere così riassunti: l'aria aspirata attraverso una testa di prelievo selettiva per le frazioni PM₁₀ o PM_{2,5} (UNI EN 12341:2014), viene filtrata attraverso membrane in fibra di vetro, quarzo o politetrafluoroetilene (PTFE) e, a valle su un eventuale adsorbente solido da utilizzare nel caso di prelievi di lunga durata superiori alle 24 ore (es. schiuma di poliuretano PUF o resine come amberlite stirene divinilbenzene-XAD2). Al termine del campionamento il filtro (più l'eventuale adsorbente solido) viene trasferito in laboratorio con opportune precauzioni al fine di evitare possibili contaminazioni, conservato a bassa temperatura (< 4°C) e al buio fino al momento dell'estrazione con solvente organico di purezza analitica (toluene, cicloesano, acetone, diclorometano, acetonitrile) da effettuarsi entro pochi giorni dal prelievo.

L'estratto organico viene sottoposto a purificazione (*clean-up*) per cromatografia su strato sottile (*Thin Layer Chromatography*, TLC) o su colonna con gel di silice attivata, mentre la

successiva analisi viene condotta mediante gascromatografia (*Gas Chromatography*, GC) accoppiata alla spettrometria di massa (*Mass Spectrometry*, MS) o alla cromatografia liquida ad alta pressione (*High Performance Liquid Chromatography*, HPLC) con rivelazione a fluorescenza (*FLuorimetric detector*, FL).

La misura della concentrazione di benzo[a]pirene nel PM₁₀ o nel PM_{2,5} deve essere eseguita secondo quanto riportato nella norma UNI EN 15549:2010 *Qualità dell'aria – Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di benzo[a]pirene in aria ambiente*.

Il metodo UNI EN 15549:2010 è stato sviluppato e validato solamente per il benzo[a]pirene. Esso necessita quindi di essere adattato alla determinazione degli altri IPA, sulla base di criteri equivalenti a quelli previsti per il BaP. È il metodo previsto dal DL.vo 155/2010 e smi che la direttiva 2015/1480 della Commissione UE ha confermato come metodo di riferimento.

La UNI EN ISO 16000-12:2008 Strategia di campionamento per policlorobifenili (PCB), policlorodibenzo-p-diossine (PCDD), policlorodibenzofurani (PCDF) e idrocarburi policiclici aromatici (IPA), richiama la norma ISO 12884:2000 *Ambient air - Determination of total (gas and particle-phase) polycyclic aromatic hydrocarbons - Collection on sorbent-backed filters with gas chromatographic/mass spectrometric analyses* che prevede il campionamento degli IPA sia in fase gassosa che particellare (PM) con campionatori di aria di tipo alto volume (con flusso di prelievo nel range 100-250 L/min) e una durata massima dei rilevamenti di 24 ore. È noto che l'utilizzo di campionatori ad alto volume in ambienti *indoor* può compromettere la rappresentatività dell'intero rilevamento (es. spostamento di quantità eccessive d'aria, ecc.), pertanto per evitare effetti di perturbazione/modificazione, è importante seguire le indicazioni della UNI EN ISO 16000-1:2006 (volume campionato ogni ora non deve essere superiore al 10% del volume dell'ambiente indagato) e quelle della UNI EN 12341:2014.

Nel caso delle PCDD/F e dei PCB, il campionamento aria *indoor* delle frazioni di PM₁₀ o PM_{2,5} deve essere eseguito secondo il metodo UNI EN 12341:2014 e la determinazione delle concentrazioni deve essere effettuata secondo quanto riportato nelle norme UNI ISO EN 16000-12, ISO 16000-13 e ISO 16000-14. In particolare, la norma ISO 16000-14 per l'estrazione, il *clean-up* e la quantificazione delle PCDD/F e PCB fa riferimento a quanto già previsto nelle norme UNI EN 1948-2, UNI EN 1948-3, UNI EN 1948-4. Pertanto, il filtro che deve essere utilizzato nel campionamento delle frazioni di PM₁₀ o PM_{2,5} deve essere artificialmente contaminato con una miscela di standard di PCDD/F e PCB marcati con ¹³C (standard di riferimento dell'intera procedura). Successivamente dopo il campionamento, il filtro e l'eventuale adsorbente solido (nel caso di durata prolungata del prelievo) vengono sottoposti ad estrazione con solvente previa aggiunta di un'aliquota di standard marcati di estrazione ¹³C₁₂. Dopo l'estrazione e la purificazione, i campioni vengono portati a piccolo volume sotto flusso di azoto e sottoposti ad un'aggiunta di una terza aliquota di standard marcati con ¹³C ed avviati all'indagine strumentale operata con la gascromatografia accoppiata alla spettrometria di massa ad alta risoluzione (*Gas Chromatography/High-Resolution Mass Spectrometry*, GC/HRMS).

BIBLIOGRAFIA

1. WHO Regional Office for Europe. *Air quality guidelines, global update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Copenhagen: World Health Organization Europe; 2006.
2. Straif K, Cohen A, Samet J (Ed.). *Air pollution and cancer*. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2013. (IARC Scientific Publications 161).
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Outdoor air pollution*, Lyon: International Agency for Research on Cancer, France. 2016. (Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 109).
4. WHO Regional Office for Europe. *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project. Technical Report*. Publications WHO Regional Office for Europe Copenhagen, Denmark, 2013.
5. WHO Regional Office for Europe. Measurement of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Europe. *Report on a WHO workshop, Berlin 27-29 October 1997*. Publications WHO Regional Office for Europe Copenhagen, Denmark, 1998.
6. WHO Regional Office for Europe. Review of Methods for Monitoring of PM_{2.5} and PM₁₀. *Report on a WHO Workshop Berlin, Germany, 11-12 October 2004*. Publications WHO Regional Office for Europe Copenhagen, Denmark, 2005.
7. WHO Regional Office for Europe. Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. European Centre for Environment and Health Bonn Office. Publications WHO Europe, Copenhagen, Denmark, 2006.
8. WHO Regional Office for Europe. Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Publications WHO Europe Copenhagen, Denmark, 2013.
9. Chan AWH, Kautzman KE, Chhabra PS, Surratt JD, Chan MN, Crouse JD, Kürten A, Wennberg PO, Flagan RC, Seinfeld JH. Secondary organic aerosol formation from photooxidation of naphthalene and alkylnaphthalenes: implications for oxidation of intermediate volatility organic compounds (IVOCs). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009;9:3049-60.
10. Scorer RS. *Meteorology of Air Pollution*. Ellis Horwood y, Chichester, 1990, pp. 160, ISBN: 0-13-577230-3.
11. Schwela D, Kotzias D. Pollution air indoor. In: *Encyclopedia of Toxicology (second edition)*. Bruce Anderson, Ann de Peyster, Shayne C. Gad, P.J. Bert Hakkinen, Michael Kamrin, Betty Locey, Harihara M. Mehendale, Carey Pope, Lee Shugart. Elsevier Press, 2005, pp. 475-489.
12. Lai HK, Bayer-Oglesby L, Colvile R, Götschi T, Jantunen MJ, Künzli N, Kulinskaya E, Schweizer C, Nieuwenhuijsen MJ. Determinants of indoor air concentrations of PM_{2.5}, black smoke and NO₂ in six European cities (EXPOLIS study). *Elsevier: Atmospheric Environment* 2006;40:1299-313.
13. WHO. *Guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2010.
14. Settimo G. Qualità dell'aria negli ambienti confinati: aspetti tecnici e legislativi. In: Santarsiero A, Musmeci L, Fuselli S per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor (Ed.). *Workshop. La qualità dell'aria indoor: attuale situazione nazionale e comunitaria. L'esperienza del Gruppo di Studio Nazionale Inquinamento Indoor. Istituto Superiore di Sanità. Roma, 28 maggio 2014. Atti*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2015. (Rapporti ISTISAN 15/4).
15. Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP). *Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos: les particules*. Rapport. HCSP. Paris, Juillet 2013.

16. Agence française de Sécurité Sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET). *Propositions de Valeurs Guides de qualité d'Air Intérieur Particules*. Rapport d'expertise collective. Comité d'experts spécialisés "Évaluation des risques liés aux milieux aériens". Groupe de travail "Valeurs guides de qualité d'air intérieur". AFSSET. Octobre 2009.
17. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *A review of human carcinogens. Part E: Personal habits and indoor combustions*. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2012. (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 100E).
18. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes*. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2013. (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 105).
19. WHO Regional Office for Europe. *Air Quality Guidelines for Europe*. Second edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91 WHO Europe, Copenhagen, Denmark, 2000.
20. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *A review of human carcinogens. Part C: Arsenic, metals, fibres, and dusts*. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2009. (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 100C).
21. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *A review of human carcinogens. Part F: Chemical agents and related occupations*. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2012. (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 100F).
22. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Polychlorinated and polybrominated biphenyls*. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2015. (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 107).
23. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Household use of solid fuels and high-temperature frying*. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2010. (IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans 95).
24. Morawska L, Salthammer T. Indoor air: Contemporary sources, exposures and global implications. *Atmospheric Environment* 2015;106: 375.
25. Amato F, Rivas I, Viana M, Moreno T, Bouso L, Reche C, Alvarez-Pedrerol M, Alastuey A, Sunyer J, Querol X. Sources of indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations in primary schools. *Sci Total Environ*, 2014;490:757-65.
26. WHO Regional Office for Europe. *Indoor air quality guidelines: household fuel combustion*. Copenhagen: WHO Europe; 2014.
27. Abt E, Suh HH, Catalano P, Koutrakis P. Relative contribution of outdoor and indoor particle sources to indoor concentrations. American Chemical Society. *Environmental Science & Technology*, 2000;34:3579-87.
28. Semple S, Garden C, Coggins M, Galea KS, Whelan P, Cowie H, Sanchez-Jimenez A, Thorne PS, Hurley JF, Ayres JG. Contribution of solid fuel, gas combustion, or tobacco smoke to indoor air pollutant concentrations in Irish and Scottish homes. *Indoor Air* 2012;22:212-23.
29. Ghosh B, Lal H, Srivastava A. Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms. *Environ Intern* 2015;85:254-72.
30. Bagnoli P, Carrozzino S, Pisani B, Righini F. Chemical characterization of the PM₁₀ fraction of airborne particulate matter in the urban atmosphere. *J Environ Pathol Toxicol Oncol* 1997;16:219-25.
31. Allen JO, Dookeran KM, Smith KA, Sarofim AF, Taghizadeh K, Lafleur AL. Measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with size-segregated atmospheric aerosols in Massachusetts. American Chemical Society. *Environmental Science & Technology* 1996;30:1023-31.

32. Kawanaka Y, Matsumoto E, Sakamoto K, Wang N, Yun SJ. Size distributions of mutagenic compounds and mutagenicity in atmospheric particulate matter collected with a low-pressure cascade impactor. *Elsevier. Atmospheric Environment* 2004;38:2125-32.
33. Kawanaka Y, Tsuchiya Y, Yun SJ, Sakamoto K. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere and estimation of the contribution of ultrafine particles to their lung deposition. American Chemical Society. *Environmental Science & Technology* 2009;43:6851-6.
34. Moreno T, Querol X, Alastuey A, Gibbons W. Identification of chemical tracers in the characterization and source apportionment of inhalable inorganic airborne particles: an overview. *Biomarkers* 2009;14 (Suppl 1):17-22.
35. Wang G, Kawamura K, Xie M, Hu S, Gao S, Cao J, An Z, Wang Z. Size distributions of n-alkanes, PAHs and hopanes and their sources in the urban, mountain and marine atmospheres over East Asia. *Atmos Chem Phys* 2009;9:8869-82.
36. Delgado-Saborit JM, Stark C, Harrison RM. Use of a versatile high efficiency multiparallel denuder for the sampling of PAHs in ambient air: gas and particle phase concentrations, particle size distribution and artifact formation. American Chemical Society. *Environmental Science & Technology* 2013;48:499-507.
37. Fernandez P, Grimalt JO, Vilanova RM. Atmospheric gas-particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in high mountain regions of Europe American Chemical Society. *Environmental Science & Technology* 2002;36:1162-8.
38. Theodosi C, Grivas G, Zarpas P, Chaloulakou A, Mihalopoulos N. Mass and chemical composition of size-segregated aerosols (PM1, PM2.5, PM10) over Athens, Greece: local versus regional sources. *Atmos Chem Phys* 2011;11:11895-911.
39. Lv Y, Li X, Xu TT, Cheng TT, Yang X, Chen JM, Linuma Y, Herrmann H. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere: sorption mechanism and source contributions to respiratory deposition. *Atmos Chem Phys Discuss* 2015;15:20811-50.
40. Fuselli S, Pilozzi A, Santarsiero A, Settimo G, Brini S, Lepore A, de Gennaro G, Demarinis Loiotile A, Marzocca A, de Martino A, Mabilia R. *Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambiente indoor*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2013. (Rapporti ISTISAN 13/4).

Normativa di riferimento

Aria indoor

- UNI EN ISO 16000:2006. *Aria in ambienti confinati. Parte 1: Aspetti generali della strategia di campionamento*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2006.
- UNI EN ISO 16000:2008. *Aria in ambienti confinati. Parte 12: 2008 Strategia di campionamento per policlorobifenili (PCB), policlorodibenzo-p-diossine (PCDD), policlorodibenzofurani (PCDF) e idrocarburi policiclici aromatici (IPA)*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
- ISO 16000:2008. *Indoor air. Part 13: Determination of total (gas and particle-phase) polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDDs/PCDFs)*. Geneva: International Organization for Standardization; 2008.
- ISO 16000:2009. *Indoor air. Part 14: Determination of total (gas and particle-phase) polychlorinated dioxin-like biphenyls (PCBs) and polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) - Extraction, clean-up and analysis by high-resolution gas chromatography and mass spectrometry*. Geneva: International Organization for Standardization; 2009.

Qualità dell'aria ambiente

- UNI ISO 7708:1998. *Qualità dell'aria. Definizioni delle frazioni granulometriche per il campionamento relativo agli effetti sanitari*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1998.
- UNI EN 12341:2014. *Aria ambiente. Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM10 o PM2,5*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2014.
- UNI EN 14907:2005. *Qualità dell'aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione di Pb, Cd, As e Ni nella frazione PM10 del particolato in sospensione*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2005.
- UNI EN 15549:2008. *Qualità dell'aria. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di benzo[a]pirene in aria ambiente*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2008.
- UNI EN 15852:2010. *Qualità dell'aria ambiente. Metodo normalizzato per la determinazione di mercurio gassoso totale*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 2010.

Esposizione in ambiente di lavoro

- UNI EN 481:1994. *Atmosfera nell'ambiente di lavoro. Definizione delle frazioni granulometriche per la misurazione delle particelle aerodisperse*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione; 1994.
- CEN 16013-1:2010. *Workplace exposure. Guide for the use of direct-reading instruments for aerosol monitoring. Part 1: Choice of monitor for specific applications*. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 2010.
- CEN 16013-2:2010. *Workplace exposure. Guide for the use of direct-reading instruments for aerosol monitoring. Part 2: Evaluation of airborne particle concentrations using optical particle counters*. Brussels: Comité Européen de Normalisation; 2010.

APPENDICE A
Eventuali valutazioni complementari
alle misure del PM₁₀ e del PM_{2,5}

Spesso negli ambienti *indoor* è importante seguire l'evoluzione di fenomeni determinati da sorgenti di emissione rapidamente variabili nel tempo, al fine di individuare la sorgente responsabile del rilascio di PM nel tempo. Inoltre può essere importante studiare l'andamento nel tempo delle concentrazioni rilevate determinato dall'interruzione del fenomeno emissivo o dall'attivazione di sistemi di trattamento dell'aria, ad esempio per valutare l'efficacia delle misure di prevenzione (1).

Queste tecniche di misura di tipo ottico possono rappresentare un interessante complemento al monitoraggio di PM₁₀ e PM_{2,5}, se utilizzate tenendo conto dei loro limiti intrinseci. Gli strumenti attraverso misure ad alta risoluzione temporale consentono di seguire l'andamento nel tempo della concentrazione di massa e della concentrazione delle particelle espressa in numero, PNC (*Particle Number Concentration*) per unità di volume.

A.1. Monitoraggio mediante tecniche ottiche

Le tecniche ottiche si basano sul fenomeno della diffusione di una radiazione elettromagnetica che incide su un campione d'aria, dovuta alla presenza di aerosol.

Oggi sono disponibili per l'effettuazione di tali misure tutta una serie di strumentazioni che utilizzano queste tecniche e che hanno in comune alcune caratteristiche quali: rapida risposta, silenziosità, portabilità, possibilità di alimentazione elettrica tramite rete o batterie.

Nel seguito sono riportati i principi di funzionamento dei più diffusi strumenti adatti all'uso in ambienti indoor, insieme ai principali svantaggi e limiti di ciascuno.

A.1.1. Nefelometri

I nefelometri sono strumenti atti a determinare il coefficiente di dispersione (*scattering*) delle particelle (b_{sp} , Mm⁻¹), ovvero il rapporto tra l'intensità della radiazione diffusa da un campione di aerosol e quella della radiazione incidente per unità di lunghezza lungo un percorso definito.

Nella configurazione più generale un campione d'aria viene convogliato attraverso un sistema di aspirazione a portata controllata all'interno di una cella di misura micrometrica (volume ottico di misura dell'ordine di 1 mm³). Una radiazione elettromagnetica focalizzata (monocromatica) nel campo del visibile o del vicino IR, d'intensità dipendente dalla sorgente (lampada a incandescenza o laser) incide sul campione che attraversa in continuo la cella di misura. Ciascuna particella diffonde la radiazione in base alle sue proprietà fisiche (indice di rifrazione, forma, dimensioni). L'intensità della radiazione diffusa entro un volume finito (caratteristico della geometria dello strumento) viene rilevata e convertita in un segnale elettrico da un componente fotosensibile (fotodiodo o fotomoltiplicatore).

Numerosi studi (2, 3), fin dai primi sviluppi della tecnica, hanno investigato le relazioni empiriche tra b_{sp} e la concentrazione di massa di diversi tipi di aerosol (M_f), esprimibile come efficienza di *scattering* per unità di massa:

$$\alpha_M = \frac{b_{sp}}{M_f} \text{ [m}^2 \text{ g}^{-1}\text{]}$$

Da notare che il parametro b_{sp} dipende principalmente dall'indice di rifrazione delle particelle, mentre la concentrazione di massa dipende dalla densità delle particelle stesse. In pratica una variazione osservata del segnale strumentale può dipendere sia da variazioni nella distribuzione dimensionale dell'aria che da variazioni delle proprietà fisiche delle particelle (densità e indice di rifrazione) e non può essere attribuita in modo univoco alla variazione di concentrazione di massa. Numerosi studi sul campo hanno mostrato una discreta correlazione tra b_{sp} e la concentrazione di massa del PM₁₀ e del PM_{2,5}. Le analisi condotte utilizzando la teoria di Mie, che permette di mettere in relazione α_M con i parametri caratteristici della particella che ha determinato la dispersione (indice di rifrazione, diametro della particella assunta sferica), hanno evidenziato che la concentrazione di massa stimata è affetta da

un'incertezza irriducibile di circa il 40%, direttamente attribuibile alla naturale variabilità dei parametri caratterizzanti l'aria in esame.

La geometria del sistema di misura è importante ai fini della definizione dell'intervallo di concentrazioni che possono essere stimate dai nefelometri.

Alcuni strumenti si basano sulla rilevazione della radiazione diffusa su un intervallo limitato dell'angolo di diffusione (*scattering*). Due geometrie principali sono state sviluppate: *forward scattering* (intervallo di rilevazione 40°-90°) e *orthogonal scattering* (intervallo angolare di rilevazione 85°-90°). Nel caso dei nefelometri integratori, il segnale in uscita è integrato su tutte le lunghezze d'onda cui lo strumento è sensibile e su un ampio intervallo angolare di direzioni di dispersione della radiazione incidente. Grazie al fatto che la radiazione diffusa viene rilevata e integrata un ampio angolo di *scattering*, i nefelometri integratori permettono di rilevare particelle e stimare la concentrazione di massa in un intervallo molto ampio di concentrazioni (da pochi $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a centinaia di mg/m^3).

I principali svantaggi, oltre a quelli già descritti relativi alla stima della concentrazione di massa, sono soprattutto relativi al fatto che l'efficienza della risposta strumentale decade rapidamente per particelle di dimensioni superiori a 10 μm , e viceversa, è nota una sovrastima nei confronti delle particelle fini, in particolare in ambienti umidi. Per ovviare a tale inconveniente alcuni strumenti sono dotati di un sistema di riscaldamento della linea di prelievo. Questo artificio tuttavia introduce un altro, in alcuni casi non meno rilevante, elemento di incertezza, dovuto alla perdita di particelle di nitrato di ammonio per volatilizzazione.

Questo aspetto può essere particolarmente critico per quelle indagini che si svolgono in ambienti *indoor* dove esistono molteplici sorgenti con possibilità di variazioni repentine della sorgente dominante (es. presenza di fumatori, attività di cucina) e delle condizioni microclimatiche.

È indispensabile quindi, condurre in parallelo alle determinazioni nefelometriche, determinazioni di concentrazioni di massa della frazione di interesse con il metodo gravimetrico di riferimento o con un metodo automatico equivalente (DL.vo 155/2010, direttiva 2015/1480) (C_r), al fine di estrapolare un fattore di correzione (k) da applicare alla massa stimata (C_m):

$$k = \frac{C_r}{C_m}$$

Alcuni strumenti consentono di raccogliere direttamente il PM (PM_{10} o $\text{PM}_{2,5}$) prelevato durante la misura su un supporto adatto a successive determinazioni gravimetriche, in modo tale da poter facilmente ottenere un valore per la C_r e calcolare il relativo fattore di correzione. Vale la pena osservare che tale fattore di correzione si applica in modo efficace al valore medio di C_m sull'intero periodo di misura usato per determinare C_r .

Applicando tale fattore si possono correggere anche le misure istantanee a maggiore risoluzione temporale, ma l'incertezza sulla stima di quest'ultime rimane indeterminata.

A.1.2. Contatori ottici di particelle (OPC)

I contatori ottici di particelle (OPC) si basano sul principio della diffusione di una radiazione monocromatica (laser), per determinare le dimensioni e il numero delle particelle per unità di volume. Si basano sulla rilevazione della radiazione diffusa su un intervallo limitato dell'angolo di diffusione (*scattering*).

Il sistema di aspirazione, a portata controllata, convoglia in continuo l'aria nella zona di misura; la radiazione diffusa da ciascuna particella viene rilevata da una cellula fotosensibile e i singoli impulsi elettrici conteggiati. Il diametro ottico delle particelle può essere dedotto sulla base delle equazioni che legano l'intensità della radiazione diffusa ai parametri ottici delle particelle (indice di rifrazione) e alle caratteristiche della radiazione incidente. Alcuni strumenti restituiscono sulla base di algoritmi precostituiti un valore di diametro (ottico) medio.

La maggior parte degli OPC possono individuare particelle in un intervallo dimensionale compreso tra 0,2 μm e 30 μm . Alcuni modelli permettono di affiancare alla misura della concentrazione di massa o in numero anche la distribuzione dimensionale dell'aria.

Hanno gli stessi vantaggi e svantaggi dei nefelometri integratori, ma hanno come principale limite la possibilità di lavorare solo per bassi livelli di concentrazione, in quanto, per concentrazioni elevate, si possono verificare errori di coincidenza dovuti al passaggio simultaneo di due o più particelle attraverso il ridotto volume ottico di misura. Alcuni strumenti consentono di correggere l'errore di coincidenza, con algoritmi di correzione derivati da calibrazioni della risposta strumentale con aria di riferimento. L'alternativa è di usare delle camere di diluizione a monte della linea di prelievo.

La concentrazione numerica di particelle in aria (PNC) può essere determinata per semplice conteggio degli impulsi che raggiungono il *detector*:

$$C_N = 0,001 \frac{N}{Q \times t}$$

dove:

N = numero di conteggi,

Q = portata dello strumento (L/min),

t = durata della misura (min).

Anche in questo caso, la relazione che lega la risposta strumentale alla concentrazione di massa del materiale particellare è empirica.

Partendo dall'assunto che le particelle siano sferiche e identificando quindi il diametro geometrico con il diametro ottico, si può esprimere la massa di una particella con la seguente equazione:

$$m_i = \frac{10^{-12}}{6} \pi D_i^3 \rho$$

dove:

m_i = massa di una particella classificata nell' i^{mo} canale dello strumento (mg),

D_i = diametro medio dell'intervallo di diametri del relativo canale di misura (μm),

ρ = densità della particella (kg/m^3).

In conclusione, la concentrazione di massa dell'aerosol stimata dai conteggi determinati è espressa dalla seguente relazione:

$$C_m = 1000 \frac{\sum m_i N_i}{Q \times t}$$

In pratica la relazione tra la risposta strumentale e la concentrazione di massa viene stimata attraverso l'uso di miscele di particelle con distribuzione dimensionale nota, adatti a rappresentare le caratteristiche medie in termini di distribuzione dimensionale e composizione dell'aria che si vuole determinare. È evidente che queste possono essere poco aderenti a situazioni reali, in particolar modo in quelle degli ambienti *indoor*. È opportuno quindi, qualora si desideri stimare la concentrazione di massa a partire da misure effettuate con OPC, effettuare misure contemporanee con strumenti di riferimento per la determinazione della concentrazione di massa, al fine di dedurre fattori di correzione in analogia a quanto indicato nel caso dei nefelometri.

Esempi e procedure relative all'applicazione di fattori di correzione per gli OPC sono riportati nei *Technical Report* del CEN 16013-1:2010 e CEN/TR 16013-2:2010.

A.1.3. Contatori ottici a nuclei di condensazione (CPC)

I contatori di particelle a nuclei di condensa (*Condensation Particle Counters* o CPC) sono stati sviluppati con l'intento di estendere le potenzialità dei metodi ottici oltre il limite di rilevabilità dimensionale della tecnica ($0,2 \mu\text{m}$) permettendo la rilevazione delle particelle *ultrafini* (UFP) che non sono rilevabili dagli OPC. Si basano per la rilevazione sullo stesso principio (*light scattering*) dei contatori ottici.

Per permettere di rilevare particelle di diametro inferiore a 0,2 μm , il flusso d'aria (continuo, laminare) viene preliminarmente convogliato attraverso una camera satura di vapori di un alcol (butanolo o isopropanolo) o acqua ultrapura cui segue l'accrescimento delle particelle per condensazione (in una seconda camera a T più bassa). Le particelle UFP diventano così rilevabili

Le apparecchiature di tipo CPC sono gli strumenti per la stima della concentrazione delle particelle aerodisperse espressa in numero (PNC).

I modelli disponibili sul mercato si differenziano per la minima dimensione rilevabile (da 2 nm a 20 nm), la massima concentrazione misurabile (da 10^3 a 10^7 particelle per cm^3), la portata di campionamento. L'efficienza di conteggio diminuisce drasticamente per dimensioni superiori a 3 μm . Fino a circa 10^3 particelle per cm^3 gli strumenti contano ciascuna particella che attraversa la cella di misura. Al di sopra di questa concentrazione gli errori di coincidenza, dovuti al passaggio simultaneo di più particelle nel volume della cella di misura, diventano frequenti. Per questo motivo, piuttosto che i singoli impulsi viene misurata l'energia della radiazione incidente diffusa dall'insieme di particelle che attraversa la cella di misura (modo fotometrico). In questo caso gli strumenti devono essere calibrati con aria a concentrazione nota. La presenza di un liquido di lavoro rappresenta un aspetto da gestire con attenzione. Gli strumenti disponibili permettono di effettuare misure continue da un minimo di sei ore, fino a diversi giorni, prima che il liquido di lavoro debba essere rifornito. Nel caso di misure prolungate con strumenti che usano un alcol come liquido di lavoro, con possibilità di fastidio per le persone presenti nel luogo di misura, occorre dotare gli strumenti di appositi sistemi di abbattimento a valle dello strumento per evitare la dispersione dei vapori di alcol nell'aria. Lo stesso accorgimento dovrà essere adottato nel caso di misure concomitanti di COV, per evitare interferenze.

A.2. Determinazione della distribuzione dimensionale

La determinazione della distribuzione dimensionale (in numero o in massa) dell'aerosol permette di aggiungere importanti informazioni a quelle ottenute mediante misure integrali, che non prevedono nessuna distinzione dimensionale delle particelle determinate, se non la selezione all'estremo superiore della distribuzione (ottenuta con una testa di prelievo che seleziona il PM avente un diametro inferiore o uguale a un determinato valore con una determinata efficienza, al diametro di taglio).

A.2.1. Impattori a cascata

Un approccio classico per determinare la distribuzione dimensionale di aria, è quello che prevede l'uso di impattori a cascata. In questi strumenti il principio della separazione per impatto inerziale permette di separare le particelle in stadi successivi (tra quattro e quindici frazioni). Infatti, la linea d'aspirazione d'aria è dimensionata in modo tale che le particelle, in base al Dae, vadano ad impattare su una superficie distinta. Ponendo in serie barriere o ugelli diversi, si determinano in funzione della velocità d'aspirazione (portata) e della geometria del sistema campionario gli intervalli dimensionali (*stadi*), in linea decrescente (le particelle più grandi sono fermate per prime); talvolta in coda si pone un filtro assoluto, per la raccolta delle particelle più piccole. Le particelle appartenenti a uno specifico intervallo dimensionale sono raccolte su appositi supporti (in quarzo, politetrafluoroetilene-PTFE o metallo) e la determinazione della concentrazione di massa delle particelle di ogni intervallo può essere effettuata per via gravimetrica. Questo processo consente di ottenere informazioni sulla distribuzione dimensionale media dell'aria nell'intervallo di osservazione, coincidente con la durata del prelievo.

Il limite di questo tipo di approccio è determinato dal fatto che, suddividendo il PM in diverse frazioni, per poter ottenere risultati al di sopra del limite di rilevabilità del metodo gravimetrico manuale occorre generalmente estendere la durata del campionamento. poiché in ambienti *indoor* non è possibile aumentare eccessivamente la velocità d'aspirazione, altrimenti se ne alterano le condizioni. Perciò in ambienti *indoor*, con presenza di sorgenti interne intermittenti, la durata del prelievo dovrà essere almeno di 24 ore, ma nella maggior parte dei casi avrà durata molto superiore (1-2 settimane).

Un altro limite all'impiego d'impattori a cascata è legato al fatto che questi strumenti presentano una rumorosità notevole, fattore da tenere sempre nella dovuta considerazione nel caso di monitoraggio

indoor. Inoltre, per ottenere la separazione in frazioni nel campo delle UFP, occorre utilizzare pompe per vuoto, con ulteriore aumento della rumorosità.

D'altra parte, la loro utilità risiede soprattutto nella possibilità di ottenere campioni di aria in più intervalli dimensionali sui quali effettuare la caratterizzazione chimica e fisica (è noto che la composizione del materiale particellare non è omogenea, ma le sostanze si ripartiscono con modalità differenti nella distribuzione dimensionale).

A.2.2. Spettrometri dimensionali

La determinazione in tempo reale della distribuzione dimensionale (in numero o in massa) del PM aerodisperso permette di aggiungere importanti informazioni a quelle ottenibili da misure integrate su intervalli di tempo medio-lungo (4).

Gli spettrometri dimensionali sono in grado di classificare il PM aerodisperso in diversi intervalli di diametri delle particelle e di stimare la concentrazione in numero e in massa delle diverse frazioni, ad alta risoluzione temporale.

Alcuni strumenti si basano sul principio di funzionamento della diffusione della luce, e sono fondamentalmente degli OPC. La classificazione è realizzata a partire dalla intensità della radiazione diffusa (ampiezza dell'impulso che raggiunge il rivelatore), che è in relazione con il diametro ottico delle particelle.

Altri tipi di strumenti si basano sulla classificazione per mobilità elettrica. Questo secondo metodo si basa sul principio fisico secondo il quale la capacità di una particella di attraversare un campo elettrico è fondamentalmente legata alle sue dimensioni.

Esistono inoltre strumenti utilizzabili per gli ambienti *indoor* che consentono di coprire l'intero intervallo dimensionale di interesse da pochi nm a 20 μm e di classificare le particelle in numerosi intervalli, anche selezionabili dall'utente. Questi sono composti da un classificatore elettrostatico accoppiato a un contatore a nuclei di condensa (CPC). La misura continua abbinata alla tecnica di scansione veloce evita discontinuità nella distribuzione e permette di effettuare misure complete in 60 secondi.

Bibliografia

1. Harrison RM, Shi JP, Zi S, Khan A, Mark D, Kinnersley R, Yin J. Measurement of number, mass and size distribution of particles in the atmosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 2000;358(1775):2567-80.
2. Heintzenberg J, Charlson RJ. Design and applications of the integrating nephelometer: A review. *J Atmos Oceanic Technol* 1996;13:987-1000.
3. HEI Review Panel on Ultrafine Particles. 2013. *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles. HEI Perspectives 3. Health Effects Institute*, Boston, MA.
4. McMurry PH. A review of atmospheric aerosol measurements. *Elsevier. Atmospheric Environment* 2000;34:1959-99.

APPENDICE B
Report delle informazioni da registrare
durante i monitoraggi dell'aria *indoor*

Documentare le condizioni (operative e al contorno) dettagliate di campionamento risulta essere di estrema utilità per la successiva valutazione dei risultati dell'indagine.

Il seguente documento elenca le principali informazioni che possono risultare utili allo scopo. Se necessario, alcune parti dello schema appresso riportato possono essere omesse, mentre nuove informazioni possono essere aggiunte.

A - INFORMAZIONI SUL CAMPIONE

- A1 - Numero di campione:
- A2 - Inquinanti monitorati:
- A3 - Indirizzo:
- A4 - Motivazioni delle misure:

B - PERIODO DI CAMPIONAMENTO

B1- Periodo di campionamento

Inizio data: ora: Fine data: ora:

Inizio data: ora: Fine data: ora:

Totale ore campionate:

B2 - Condizioni meteo del sito di campionamento

Temperatura media esterna: °C

Velocità del vento media: m/s

Umidità relativa media: %

Pioggia [] sì [] no

Nebbia [] sì [] no

Neve [] sì [] no

B3 - Tipo di campionamento

[] Automatico [] manuale

[] Continuo [] discontinuo

[] Attivo [] passivo (diffusionale)

C - LOCAZIONE DEL CAMPIONAMENTO

C1- Tipo di edificio/Attività e utilizzo

- [] Edifici residenziali
- [] Scuole/asili
- [] Uffici, Banche/Poste
- [] Residenze in prefabbricati
- [] Palestre
- [] Ospedali
- [] Magazzini/ negozi
- [] Biblioteche
- [] Altri edifici (*specificare*):

C2 - Età dell'edificio

- < 6 mesi
- < 2 anni
- < 10 anni
- da 10 a 20 anni
- > 20 anni

C3 - Tipo di area

- rurale
- urbano (suburbano)
- urbano (centro)
- area industriale
- altre tipologie (*specificare*):..... :.....

C4 - Caratteristiche dell' area

- traffico leggero
- traffico pesante
- tipologia di industria:
 - pesante:
 - chimica
 - artigianale
- distanza: principali fonti esterne d'inquinamento:.....
- suoli inquinati:

D - CARATTERISTICHE DELLE STANZE E CONDIZIONI

Superficie della stanza m²
Altezza m
Piano terra
 piano

D1 - Pareti e pavimento

- carta da parati
- rivestimenti in plastica
- stucco
- pannelli rivestiti
- pannelli in legno
- pavimento moquette/parquet/tappeti
 - area delimitata? sì no
 - da quanto tempo è in posa? (*anni*)
- pavimento con piastrelle
- pavimento in cotto
- altro (*specificare*):

D2 - Ristrutturazione

- Ristrutturazioni negli ultimi 3 mesi
 Cosa è stato ristrutturato? l'intero edificio
 l'intero appartamento
 altre stanze/locali
 il locale in esame
- Altri cambiamenti nella stanza o nelle sue immediate vicinanze (es. nelle aree attigue) negli ultimi tre mesi? sì no
 Quali (cambio occupanti, numero o abitudini):

D3 - Nuovo arredamento negli ultimi tre mesi

- sì no
 Di che tipo:

D4 - Danni da acqua

- sì no
 Quando:.....
 Tipo di danno:
 Ubicazione:
 Risistemato: sì no
 Quando:.....

D5 - Muffe visibili

- sì no
 Descrizione:

D6 - Ubicazione riscaldamento

- Stanze in case private
 Cucina
 Fornello alimentato con:
- Soggiorno
 Camera da letto
 Ufficio
 Aula
 Altre stanze: quali:.....

D7 - Tipo riscaldamento

- Riscaldamento centralizzato
 sì no
 termosifone
 riscaldamento a pavimento
 ad aria calda
 stufa
 altro:.....

D8 - Tipo di combustibile per riscaldamento e per attività culinarie

- gas naturale (rete cittadina):.....
- biomassa (specificare il tipo):
- energia elettrica:.....
- altro (specificare il tipo):.....

D9 - Posizione della stanza campionata nell'edificio

- stanza interna senza finestre
- stanza con muri esterni, diretti a
- stanza con finestre, dirette a:
 - sud
 - nord
 - ovest
 - est
- Stanza diretta a:
 - sud
 - nord
 - ovest
 - est
- Stanza non porte/ingressi chiuse aperte

D10 – Posizione dei sistemi di campionamento

- Distanza dal muro: m
- Altezza dal pavimento: m

D11 - Stanza con finestre apribili

- Tipo di finestra:
 - singola
 - multipla
 - finestra/e con vetri isolanti
- L'isolamento delle finestre è:
 - buono
 - scarso

D12 - Stato della ventilazione prima del prelievo

- Stanza completamente ventilata
 - tempo: min
- Stanza con finestre e porte chiuse
 - tempo: h
- Ventilazione utilizzata normalmente dagli occupanti

D13- Stanza con ventilazione e impianto condizionatore/climatizzatore

- in funzione per h
- spento per h

D14- Informazioni sulla ventilazione e aria condizionata

- Il sistema è dotato di umidificazione
 - vapore
 - spray
- Il sistema è operativo con % di ricircolo
- Data dell'ultima manutenzione dell'impianto di ventilazione/climatizzatore
 - totale in data:
 - parziale:
 - intervento con:

E - CLIMA DELLA STANZA E VENTILAZIONE DURANTE IL CAMPIONAMENTO**E1 - Stanza con finestre apribili**

- finestre e porte chiuse
 ventilazione utilizzata normalmente dagli occupanti

E2 - Stanza con ventilazione e aria condizionata

- Condizionatore in funzionamento
 Condizionatore spento

E3 - Parametri microclimatici aria *indoor*

- temperatura media° C
 umidità relativa media%

F. ATTIVITÀ DEGLI OCCUPANTI**F1 - Numero di persone**

Nel normale utilizzo della stanza: persone
 Durante il campionamento/prelievo persone sono permanentemente in stanza
 Animali presenti: tipo:..... numero:

F2 -Fumo di tabacco

- Stanza in cui non si può fumare
 Stanza in cui si può fumare
 Quantità di tabacco media consumata per giorno:
 numero: tipo: sigarette sigari pipe
 Si è fumato nella stanza prima di cominciare le misure:
 Quando: regolarmente saltuariamente
 Cosa?
 Quanto?
 A quando risale l'ultima volta?
- Nella stanza vicina:
- Si è fumato durante le misure:
- Cosa si è fumato:
- Quanto:

F3- Prodotti usati nella stanza

- Pulizia del pavimento:
 Nome delle marche dei prodotti di pulizia utilizzati.....
 Frequenza: raramente spesso
- Trattamenti del pavimento
 Tipo di trattamento effettuato:
 Quando?

- Pulizia e manutenzione/trattamento dell'arredamento
Nome delle marche dei prodotti di pulizia utilizzati
Frequenza: raramente spesso
- Pulizia delle finestre
Nome delle marche dei prodotti di pulizia utilizzati
Frequenza: raramente spesso
- Purificatori dell'aria
Nome delle marche dei prodotti di pulizia utilizzati
Frequenza: raramente spesso
- Eliminazione insetti
Nome delle marche dei prodotti di pulizia utilizzati
Frequenza: raramente spesso
- Altro
Nome delle marche dei prodotti di pulizia utilizzati
Frequenza: raramente spesso

*Serie Rapporti ISTISAN
numero di giugno 2016, 3° Suppl.*

*Stampato in proprio
Settore Attività Editoriali – Istituto Superiore di Sanità*

Roma, giugno 2016