



## 4. INQUINANTI, FONTI E LIVELLI

I componenti principali dell'inquinamento atmosferico, le fonti da cui provengono e l'attuale situazione in Europa in termini di emissioni e qualità dell'aria.

### INTRODUZIONE

L'inquinamento atmosferico è l'insieme “dei componenti dell’atmosfera, tra cui il particolato, le sostanze chimiche o il materiale biologico, che provocano effetti nocivi sulla salute degli esseri umani o di altri esseri viventi o che danneggiano l’ambiente. L’inquinamento atmosferico include sia sostanze non naturalmente presenti nell’aria sia sostanze naturali presenti a concentrazioni più elevate o in luoghi diversi dal normale. L’inquinamento atmosferico è prodotto sia da processi naturali come attività vulcaniche o tempeste di polvere che da attività umane come la combustione di combustibili fossili o la produzione di sostanze chimiche”. L’inquinamento prodotto da attività umane è al centro dell’interesse dei decisori ed è l’oggetto del presente opuscolo. Questo capitolo riassume le informazioni di carattere generale estratte dall’Agenzia per la Protezione dell’Ambiente degli Stati Uniti, l’Organizzazione Mondiale della Sanità, l’Agenzia Europea dell’Ambiente, e altri in relazione alle componenti della contaminazione dell’aria, fonti di emissione e livelli di concentrazione.

Gli inquinanti atmosferici possono essere classificati come primari o secondari, a seconda di come si formano. Gli inquinanti primari sono quelli emessi direttamente da processi gestiti dall'uomo, ad esempio il monossido di carbonio emesso dal tubo di scappamento di un veicolo a motore o l'anidride solforosa emessa dalle fabbriche. Gli inquinanti secondari sono quelli che si formano quando gli inquinanti primari reagiscono o intereagiscono nell'atmosfera. Un inquinante secondario molto importante è l'ozono troposferico ( $O_3$ ), che è il risultato di reazioni chimiche tra inquinanti primari e luce solare (si veda il Riquadro 4a). Alcuni inquinanti, ad esempio alcuni particolati di varie dimensioni, possono essere sia primari che secondari.

Gli inquinanti possono essere classificati anche in base alla fonte. È inoltre utile distinguere le emissioni dalle concentrazioni ambientali ("immissioni") o qualità dell'aria.

## INQUINANTI ATMOSFERICI COMUNI E MINORI

Nei paesi industrializzati, tra i principali inquinanti introdotti nell'atmosfera troviamo l'anidride solforosa ( $SO_2$ ), gli ossidi di azoto ( $NO_x$ ) tra cui il biossido di azoto ( $NO_2$ ), i composti organici volatili (COV), il particolato (PM) e l'ammoniaca ( $NH_3$ ). Il presente opuscolo tratta principalmente questi inquinanti.

L'anidride solforosa, o  $SO_2$ , fa parte della famiglia dei gas degli ossidi di zolfo ( $SO_x$ ). Lo zolfo è presente in alcune materie prime tra cui il petrolio greggio, il carbone e i minerali grezzi di metalli comuni come l'alluminio, il rame, lo zinco, il piombo e il ferro. I gas  $SO_x$  si formano quando viene bruciato il combustibile contenente zolfo, quando viene prodotta la benzina dal petrolio e quando vengono estratti i metalli dal minerale grezzo.

$NO_x$  è il termine generico che indica un gruppo di gas altamente reattivi, tutti contenenti azoto e ossigeno in varie proporzioni. I  $NO_x$  vengono emessi principalmente come risultato di combustione ad alte temperature. Il traffico stradale è una delle principali fonti dei  $NO_x$ .

Oltre ai loro effetti sulla salute, i composti di zolfo e azoto immessi nell'aria sono potenzialmente acidificanti e possono danneggiare ecosistemi terrestri o acquatici sensibili. I composti di azoto sono inoltre potenzialmente eutrofizzanti, ovvero possono generare un'eccessiva presenza di sostanze nutritive nel suolo e nell'acqua.

I COV sono composti chimici organici che in condizioni normali hanno pressioni di vapore sufficientemente elevate da vaporizzarsi notevolmente ed entrare nell'atmosfera. Una vasta gamma di molecole a base di carbonio, tra cui gli aldeidi, i chetoni e altri idrocarburi leggeri, sono classificati come COV. In base al contesto, il termine può fare riferimento sia a composti organici ben caratterizzati sia a una miscela di composizione variabile.

L'inquinamento da PM include particolati primari e secondari, formati da gas precursori di PM come  $l'SO_2$ , i  $NO_x$ ,  $l'NH_3$  e i COV. L'inquinamento da PM è una complessa miscela di particelle e goccioline estremamente piccole. L'inquinamento da particolato è formato da una serie di componenti tra cui acidi (come nitrati e solfati), composti chimici organici, metalli e particelle di terra o polvere e viene tipicamente classificato in base alla sua dimensione. Il riquadro 4b descrive nei dettagli questo importantissimo gruppo di inquinanti.

$l'O_3$  è un altro gas inquinante molto importante in molte regioni. Pur non venendo emesso direttamente,  $l'O_3$  si forma nell'atmosfera in seguito a reazioni tra  $NO_x$  e COV in presenza di calore e luce solare. Il riquadro 4a descrive nei dettagli questo inquinante secondario molto importante.

$l'NH_3$  è un comune sottoprodotto dei rifiuti di origine animale, dovuto all'inefficienza della conversione dell'azoto alimentare da parte degli animali. Il bestiame e il pollame vengono spesso alimentati con mangimi altamente proteici, che contengono azoto in eccesso per rispondere ai bisogni nutrizionali degli animali. L'azoto che non viene metabolizzato in proteine animali (latte, carne o uova) viene escreto nelle urine e nelle feci. La successiva azione microbica fa in modo che, nel processo di decomposizione del letame, venga rilasciata ammoniaca nell'atmosfera.

Altri inquinanti atmosferici vengono di solito emessi in quantità più piccole ma possono avere considerevoli effetti sulla salute a livello locale o regionale e alcuni di essi sono regolati da normative unitamente agli inquinanti atmosferici più comuni.

Le emissioni di piombo sono tuttora un grave pericolo per la salute nonostante la loro netta riduzione negli ultimi anni. Il piombo è naturalmente presente nell'ambiente e viene prodotto anche dall'uomo. Le principali fonti di emissioni di piombo sono gli autoveicoli e le industrie. In seguito alla rimozione del piombo dalla benzina negli USA, le emissioni di piombo nel settore dei trasporti

statunitense è calato del 95% tra il 1980 e il 1999 e i livelli di piombo nell'aria sono scesi del 94%. Il divieto totale di utilizzo di benzina contenente piombo nell'Unione europea è entrato in vigore nel 2000. La benzina con il piombo è ancora utilizzata in alcune parti del Sudamerica, dell'Asia, dell'Europa orientale e del Medio Oriente ma sempre più paesi hanno in progetto di vietare la benzina con il piombo nel prossimo futuro. Nei paesi in cui la

benzina contenente piombo è stata vietata, i livelli più alti di piombo nell'atmosfera sono di solito riscontrabili nelle vicinanze delle fonderie di piombo. Tra le altre fonti fisse di piombo troviamo gli inceneritori di rifiuti e i produttori di batterie al piombo acido.

Un altro esempio di un gruppo di inquinanti emessi nell'atmosfera in minori quantità ma che possono comunque provocare gravi effetti sulla salute è

**Tabella 4.1. Principali inquinanti primari e secondari prodotti dall'attività umana**

INQUINANTI	ABBREVIAZIONE	FONTE E MECCANISMO DI FORMAZIONE
<b>INQUINANTI PRIMARI</b>		
Ossidi di zolfo/anidride solforosa	SO <sub>x</sub> /SO <sub>2</sub>	Emessi dalla combustione di carbone e petrolio
Ossidi di azoto/biossido di azoto	NO <sub>x</sub> /NO <sub>2</sub>	Emessi dalla combustione ad alta temperatura
Monossido di carbonio	CO	Un prodotto della combustione incompleta di combustibili come gas naturale, carbone o legno. Gli scarichi degli autoveicoli sono la principale fonte di produzione di CO
Biossido di carbonio	CO <sub>2</sub>	Gas serra emesso dalla combustione
Composti organici volatili	COV	Prodotti dai vapori dei combustibili a base di idrocarburi e dai solventi
Particolato	PM	Prodotto da processi di erosione o di combustione. Il PM10 è la frazione delle particelle sospese di diametro uguale o inferiore a 10 µm in grado di penetrare nella cavità nasale. Il PM2.5 è formato da particelle con diametro massimo di 2,5 µm, in grado di penetrare nei bronchi e nei polmoni
Ammoniaca	NH <sub>3</sub>	Emessa dai processi agricoli
Piombo	Pb	Presente in natura, prodotto dalle fonderie di piombo, contenuto nelle vecchie vernici e nei vecchi impianti idraulici
Inquinanti organici persistenti	POP	Prodotti da processi industriali o dai sottoprodoti degli stessi
<b>INQUINANTI SECONDARI</b>		
Particolato	PM	Generato da inquinanti primari gassosi e da composti presenti nello smog fotochimico, come l'NO <sub>2</sub>
Ozono	O <sub>3</sub>	Generato in presenza di luce solare da una reazione chimica tra NO <sub>x</sub> e COV

rappresentato dagli inquinanti organici persistenti (POP – persistent organic pollutants). I POP sono composti organici resistenti alla decomposizione operata nell'ambiente attraverso processi chimici, biologici e fotolitici. Per questa ragione si è osservato che questi composti persistono nell'ambiente, possono essere trasportati su lungo raggio, danno luogo a bioaccumulazione negli esseri umani e nei tessuti animali e a biomagnificazione nelle catene alimentari, con un impatto potenzialmente significativo sulla salute umana e sull'ambiente. I POP includono pesticidi come l'aldrina, il clordano, il DDT, il dieldrin o l'endrin. Troviamo poi sostanze utilizzate nei processi industriali e nella fabbricazione di una serie di prodotti tra cui solventi, policloruro di vinile e farmaci, oltre a sottoprodoti di processi industriali come la combustione dei rifiuti.

La Tabella 4.1 sintetizza i principali inquinanti primari e secondari prodotti dall'attività umana.

## FONTI DI INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Esistono molteplici fonti di inquinamento atmosferico nelle città e nelle zone rurali. Queste fonti possono essere caratterizzate in vari modi. Di seguito vengono descritte alcune delle fonti principali e gli inquinanti ad esse associati.

### Trasporto stradale

La principale fonte di inquinamento atmosferico in molte aree del mondo è il trasporto stradale. Il trasporto stradale comprende tutte le emissioni prodotte dal traffico stradale, indipendentemente dalla dimensione del veicolo o dallo scopo per cui il veicolo è utilizzato. Le emissioni stradali contribuiscono in vari modi all'inquinamento atmosferico. Anche se in molti veicoli moderni i gas di scarico passano attraverso un convertitore catalitico prima di essere emessi, la combustione della benzina o del diesel che avviene negli autoveicoli genera la produzione di gas di scarico contenenti diversi inquinanti. Questi inquinanti includono di solito CO, NO<sub>x</sub>, COV, PM sospesi e numerosi additivi. Alcuni paesi utilizzano ancora additivi contenenti piombo nella benzina.

Le emissioni di gas di scarico non sono l'unica fonte di inquinanti legati al traffico. Anche le emissioni di carburante per evaporazione possono essere rilevanti, soprattutto quelle prodotte dai veicoli alimentati a benzina. Il traffico, inoltre, diffonde e risospende notevoli

quantità di particelle generate dall'usura degli pneumatici o dei componenti dei freni e dall'abrasione del materiale superficiale delle strade. Diversamente da altre fonti di inquinamento, le emissioni generate dal traffico si verificano nelle immediate vicinanze di luoghi in cui vivono, lavorano, camminano e si spostano le persone. È per questa ragione che i ricercatori e i decisori hanno studiato con particolare attenzione gli inquinanti legati al traffico (si veda il Riquadro 6d e l'Allegato 1).

### Fonti fisse di combustione

Anche la combustione di combustibili fossili negli impianti industriali, nelle raffinerie, nelle centrali elettriche e per usi domestici come il riscaldamento e la cucina è una fonte di inquinamento atmosferico molto importante. La combustione ad alte temperature può generare NO<sub>x</sub> e anche SO<sub>2</sub> se è presente dello zolfo nel carburante. La combustione del carburante emette inoltre COV, soprattutto in caso di combustione di carbone e petrolio. Questo tipo di inquinamento può anche essere il risultato di perdite da stabilimenti chimici. Il riscaldamento e la cottura a legna sono associati ad emissione di particolato.

### Fonti intermittenti

Gli incendi boschivi e la combustione di biomassa rappresentano una delle principali fonti di emissioni da combustione, che include la produzione di NO<sub>x</sub>, CO, COV e PM. Le emissioni di diossina possono essere provocate dall'incenerimento dei rifiuti ma anche da incendi accidentali o da eventi intenzionali come falò. Tutte le attività industriali possono inoltre generare emissioni intermittenti: ad esempio, possono verificarsi emissioni di PM quando il vento trasporta via materie prime da depositi situati in posizioni esposte.

### Fonti naturali

Molti gas e particelle in traccia presenti nell'atmosfera sono generati da processi naturali. Gli alberi e la vegetazione possono rilasciare COV biogenici. Le eruzioni vulcaniche rilasciano ceneri. Anche lo spray marino e i terreni eolici sono generati da processi naturali. Le tempeste di polvere possono provocare aumenti nelle concentrazioni di PM non solo nelle regioni aride ma anche nelle aree in cui la polvere viene trasportata dalle condizioni climatiche (si veda il Riquadro 4c).

## DA DOVE PROVENGONO I DATI SULLE EMISSIONI IN EUROPA?

I livelli e i trend delle emissioni in Europa sono riassunti sulla base del rapporto annuale sull'inventario delle emissioni della Convenzione della Comunità europea sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lungo raggio (Long-range Transboundary Air Pollution - LRTAP) [3], che presenta le principali fonti di emissioni di inquinamento atmosferico in Europa e i relativi trend dal 1990. Il rapporto viene stilato annualmente dalla Commissione europea ed è un documento ufficiale che viene presentato presso la segreteria dell'Organo esecutivo della Convenzione LRTAP. Le parti della Convenzione LRTAP (inclusa la Comunità europea) riferiscono i dati sulle emissioni da una serie di inquinanti atmosferici di rilievo, tra cui  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , COV non metanici,  $\text{NH}_3$ , CO, PM primari (PM10 e PM2.5), metalli pesanti e POP. Il

rapporto raggruppa le emissioni in categorie sulla base delle fonti, ad esempio trasporti, industria di produzione ed edilizia, settore pubblico dell'energia elettrica, ecc. Le emissioni primarie provenienti da diverse fonti vengono raggruppate per area geografica per creare banche dati sulle emissioni. L'enorme quantità di dati e i complessi metodi di modellizzazione necessari rendono difficile la creazione di banche dati sistematiche e complete. Gli inquinanti secondari non vengono misurati direttamente, ma è possibile utilizzare le emissioni primarie per stimare la formazione dei sottoprodoti secondari. Va inoltre notato che in Europa, le stime sulle emissioni non sono sempre disponibili ogni anno per tutti gli inquinanti a causa delle lacune presenti nei dati riportati dai singoli paesi. Anche la serie temporale dei dati relativi alle emissioni di PM (PM10 e PM2.5) è limitata.

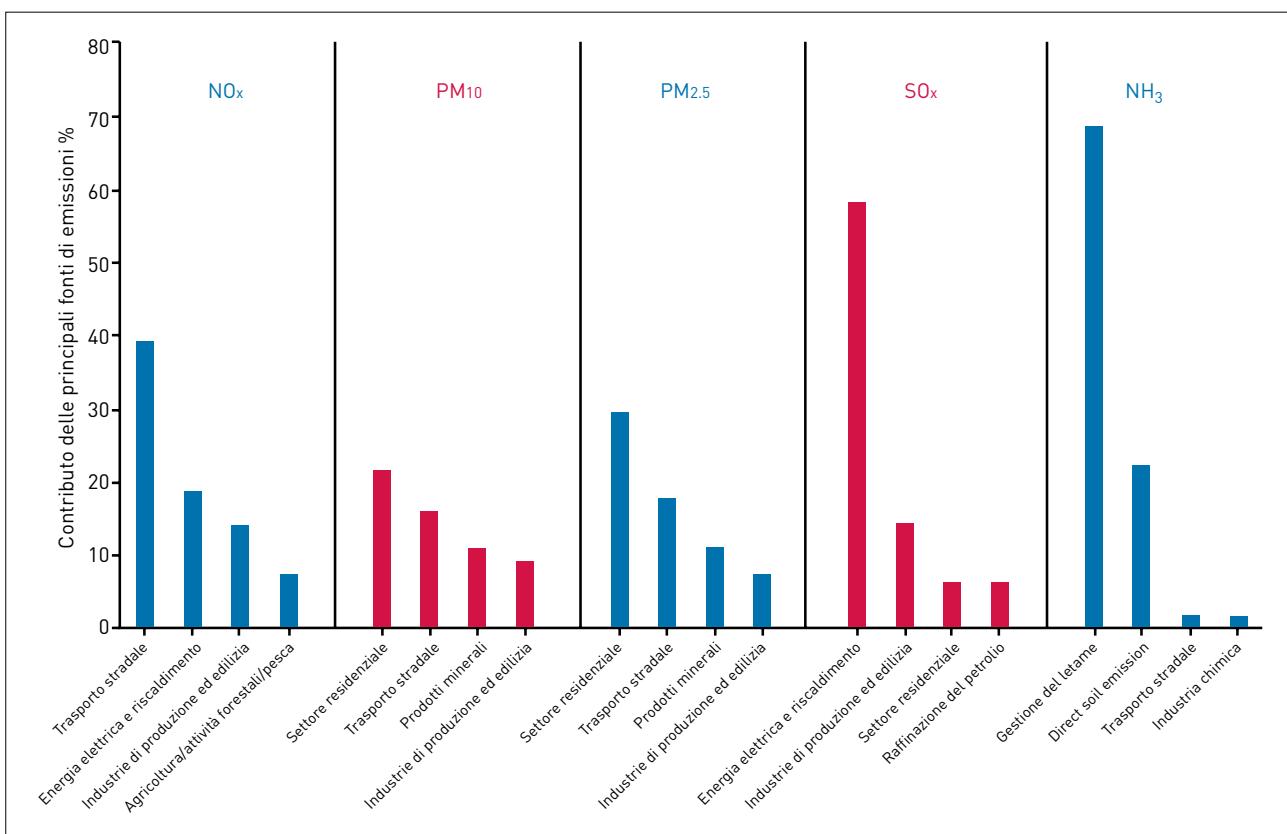
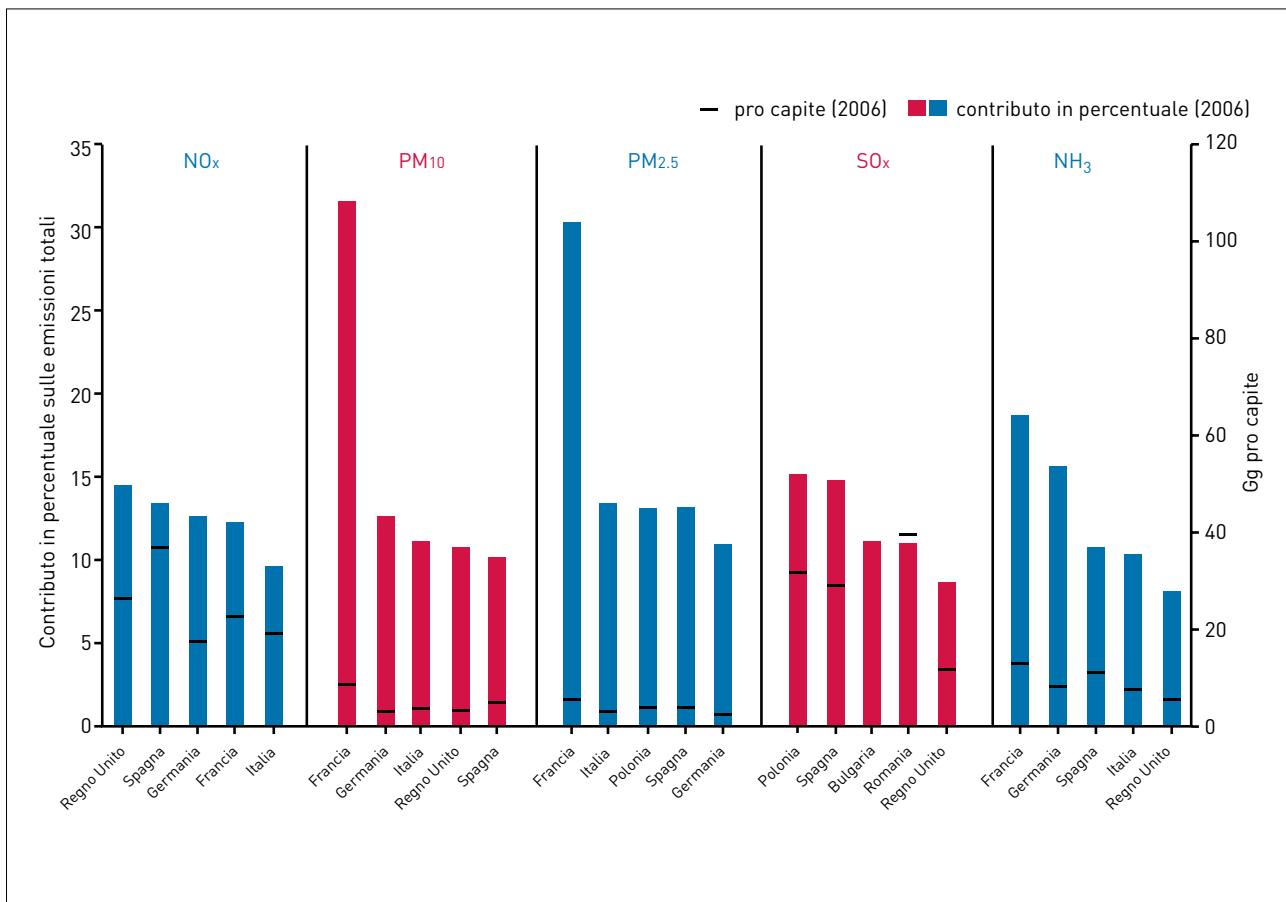


Figura 4.1. Contributi delle varie fonti di emissioni sulle emissioni totali di  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_x$  e  $\text{NH}_3$  in Europa nel 2006. Riadattato da [3].



**Figura 4.2. Contributi nazionali sulle emissioni totali di NO<sub>x</sub>, PM10, PM2.5, SO<sub>x</sub>, e NH<sub>3</sub> in alcuni Stati europei nel 2006. Riadattato da [3].**

### LE EMISSIONI DI INQUINANTI ATMOSFERICI IN EUROPA

Le attività umane sono le forze motrici dell'inquinamento atmosferico. I consumi energetici, le attività industriali, la domanda di trasporto e l'agricoltura sono le forze specifiche più direttamente legate alle emissioni. Anche il livello di sviluppo dei vari paesi influenza direttamente sulla tipologia e sul livello di emissioni.

In Europa, il trasporto stradale è la più importante fonte di emissione di NO<sub>x</sub> e la seconda fonte di emissione di PM10 e PM2.5 primari (fig. 4.1). Anche le industrie di produzione ed edilizia sono importanti fonti di emissione di NO<sub>x</sub>, PM10, PM2.5 e SO<sub>x</sub>. Il settore pubblico dell'energia elettrica e del riscaldamento è il principale responsabile delle emissioni di SO<sub>x</sub> e occupa il secondo posto per quanto riguarda le emissioni di NO<sub>x</sub>. Le attività agricole (gestione del letame ed emissione diretta dal suolo) sono responsabili della stragrande maggioranza delle emissioni

di NH<sub>3</sub>, contribuendo con una percentuale superiore al 90% sul totale.

Se si scorporano i dati suddividendoli per paese, come prevedibile, i principali emettitori sono i paesi più altamente popolati. Tuttavia, se li si analizza sulla base delle emissioni pro capite, la Spagna produce un'elevata quantità di NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> in Europa, mentre anche Polonia, Bulgaria e Romania producono grandi quantità di SO<sub>x</sub> (fig. 4.2).

È stato applicato un quadro normativo per ridurre le emissioni in tutta Europa in varie fasi (si veda l'Allegato 1). Anche se le emissioni di diversi inquinanti stanno diminuendo, le riduzioni non rispettano ancora i target previsti per la maggior parte degli inquinanti. In tutta Europa è stata raggiunta la più alta percentuale di riduzione di emissioni per i SO<sub>x</sub>: le emissioni nel 2006 si erano ridotte di quasi il 70% rispetto al 1990 e sono vicine ai target (fig. 4.3). Questa riduzione è il

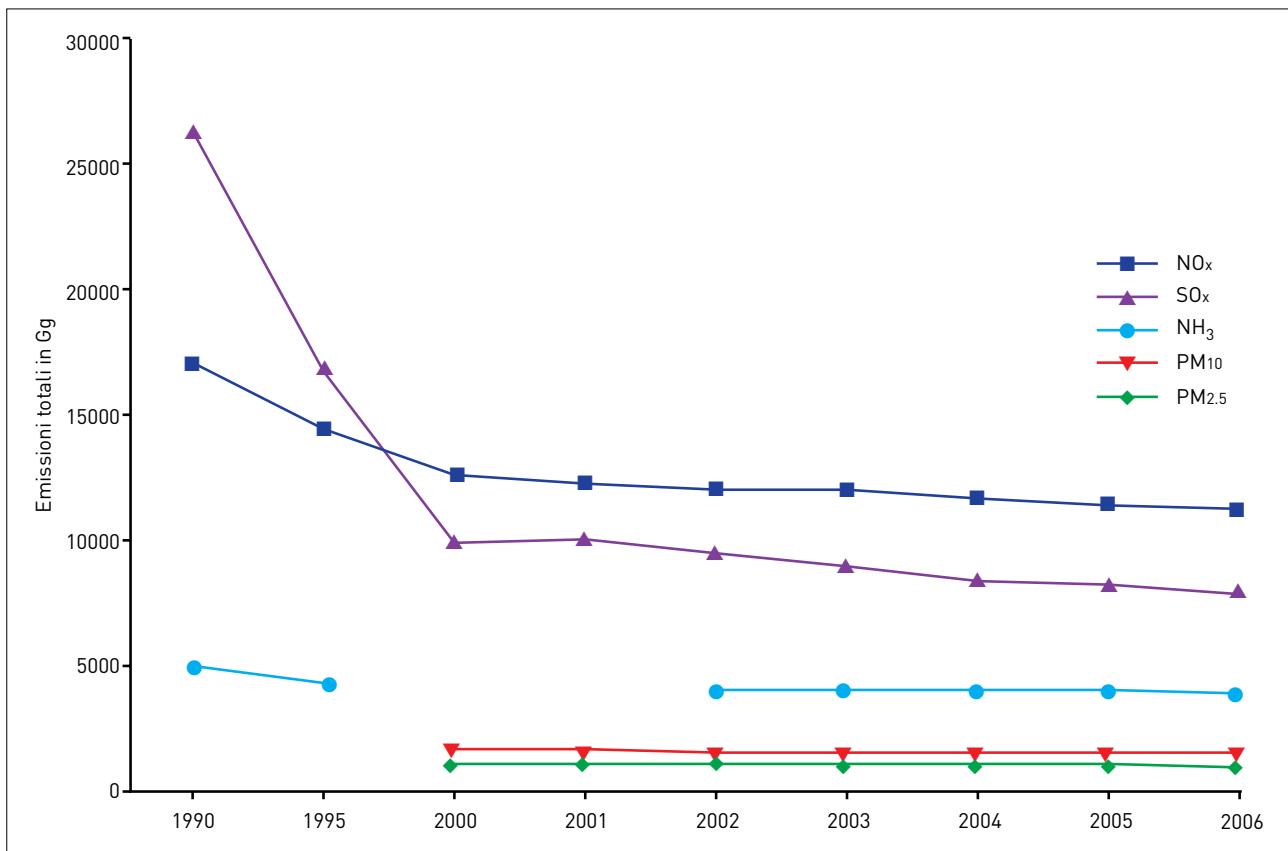
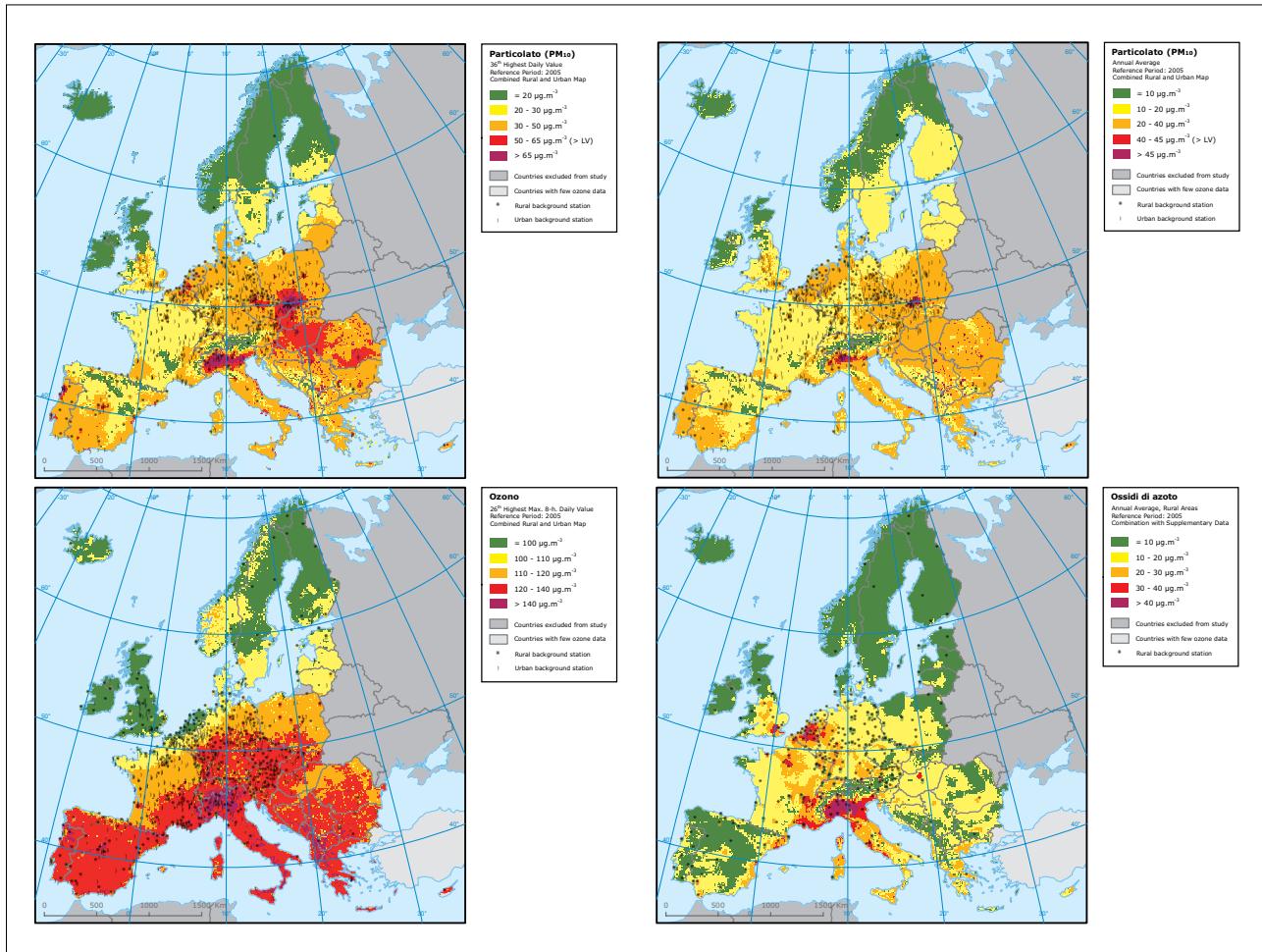


Figura 4.3. Trend delle emissioni di  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  e  $\text{NH}_3$  tra il 1990 e il 2006 e di  $\text{PM}_{10}$  e  $\text{PM}_{2.5}$  in Europa tra il 2000 e il 2006. Gg: gigagrammi. Riadattato da [3].

#### PANEL: DA DOVE PROVENGONO I DATI SULLA QUALITÀ DELL'ARIA IN EUROPA?

Le valutazioni della qualità dell'aria vengono oggi svolte di routine in molti paesi dalle autorità nazionali o locali. Si tratta di un punto di partenza fondamentale ai fini della gestione della qualità dell'aria. Tuttavia, nella maggior parte degli Stati viene misurato soltanto un numero limitato di indicatori di inquinamento atmosferico per stabilire la qualità dell'aria. In generale vengono inclusi gli inquinanti atmosferici più comuni descritti sopra. Sono questi i parametri che sono stati utilizzati come indicatori negli studi epidemiologici. I metodi di misurazione della qualità dell'aria variano sensibilmente e spaziano da campagne occasionali condotte con campionature passive a sistemi automatici di monitoraggio remoto basati su spettroscopia ad assorbimento ottico. In Europa sono stati compiuti grandi sforzi negli ultimi 10 anni per standardizzare e armonizzare le tecniche di monitoraggio e per creare piattaforme per lo scambio dei dati.

La panoramica della recente situazione della qualità dell'aria in Europa di seguito presentata si basa su una valutazione effettuata dall'Agenzia europea dell'ambiente (AEA), utilizzando i dati relativi alle concentrazioni degli inquinanti atmosferici riportati dagli Stati membri in AirBase, una banca dati online contenente informazioni sulla qualità dell'aria in Europa [4]. Va sottolineato che i dati presenti in Airbase dipendono in modo determinante dalle posizioni delle stazioni di monitoraggio rispetto alle fonti. Le stazioni di monitoraggio sono in genere classificate come rurali, suburbane o urbane ed esistono delle stazioni "hot spot" situate in prossimità di concentrazioni di traffico stradale o di attività industriali ma le definizioni di queste categorie possono variare tra i vari organismi e tra i vari paesi.



**Figura 4.4. Mappe interpolate che mostrano la qualità dell'aria in Europa per quanto concerne ozono, PM10 e NO<sub>2</sub>. Le mappe sono state fornite dalla AEA e sono disponibili all'indirizzo: <http://dataservice.eea.europa.eu>. Sono state create sulla base dei dati di misurazione presenti in AirBase in combinazione ad altri modelli di emissione. Queste mappe sono strumenti di valutazione applicabili a livello europeo e possono differire dalle valutazioni effettuate su scala nazionale.**

risultato di politiche volte a obbligare le centrali che producono calore ed elettricità a migliorare le proprie apparecchiature, a convertirsi a combustibili meno inquinanti e a diventare più efficienti. In questo periodo sono inoltre diminuite le emissioni di altri inquinanti atmosferici importanti, ma in percentuali inferiori. Nello stesso periodo, le riduzioni delle emissioni dei tre inquinanti atmosferici principalmente responsabili della formazione di ozono troposferico si sono attestate sul 35% per i NO<sub>x</sub>, sul 44% per i COV non metanici e sul 53% per il CO. I dati relativi alle emissioni di PM10 e PM2.5 sono stati compilati soltanto per il periodo 2000–2006, durante il quale le emissioni di entrambi gli inquinanti si sono ridotte soltanto del 10% circa. Il trasporto stradale

è una fonte importante di PM e NO<sub>x</sub> e la lenta riduzione di queste emissioni rivela il fatto che le politiche sui trasporti volte a limitare le emissioni non sono sufficienti per compensare il sempre maggior utilizzo di automobili e di camion in Europa.

## QUALITÀ DELL'ARIA IN EUROPA

La qualità dell'aria, spesso definita in termini di “immissioni”, dipende dalle emissioni e dal modello temporale o spaziale di dispersione, dalle reazioni chimiche e dalla formazione di inquinanti secondari. Le continue emissioni di inquinanti atmosferici hanno dato luogo a un sensibile peggioramento della qualità dell'aria

in molte parti d'Europa. Le preoccupazioni in merito alla scarsa qualità dell'aria in Europa sono legate non soltanto all'impatto sulla salute umana dell'esposizione a particolato e ozono (e, in misura minore, a NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, piombo e benzene) ma anche all'acidificazione e all'eutrofizzazione degli ecosistemi, al danneggiamento degli ecosistemi e delle coltivazioni dovuto all'esposizione all'ozono, al danneggiamento dei beni materiali e dei patrimoni culturali dovuto all'esposizione all'acidificazione e all'ozono e agli effetti dei metalli pesanti e dei POP sulla salute umana e sugli ecosistemi.

Le concentrazioni ambientali in tutta Europa sono ancora superiori rispetto agli standard stabiliti dall'Unione europea (fig. 4.4). L'Allegato 1 definisce nei dettagli il quadro normativo sulla qualità dell'aria in Europa e lo mette a

confronto con quello applicato in altre regioni geografiche od organizzazioni. Particolarmente preoccupanti sono i livelli di ozono, PM10 e NO<sub>2</sub> che colpiscono le aree urbane/suburbane e anche le aree rurali. Ad esempio, anche se le concentrazioni di ozono in Europa sono attualmente inferiori rispetto ai valori eccezionalmente elevati rilevati nel 2003, quando le concentrazioni in gran parte d'Europa hanno superato i livelli consentiti a causa di lunghi periodi di alte temperature, le concentrazioni di ozono giornaliero in gran parte dell'Europa continentale superano ancora il valore target imposto dall'Unione europea. Le concentrazioni di picco rilevate durante lo smog estivo hanno superato frequentemente i 140 µg·m<sup>-3</sup>, raggiungendo i 200 µg·m<sup>-3</sup> in alcune aree. Il valore limite imposto dall'Unione europea è di 120 µg·m<sup>-3</sup> (media su 8 ore).

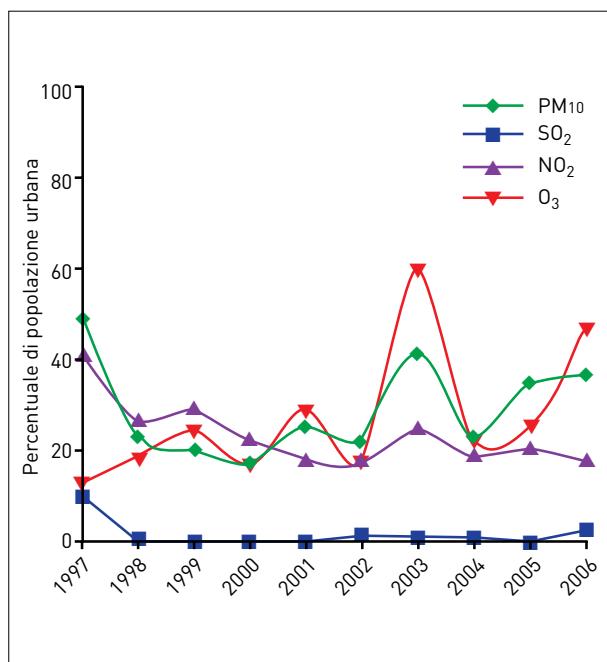
Sono state rilevate concentrazioni giornaliere medie di PM10 che superano i criteri europei a breve termine (che prevedono che non venga superato il limite giornaliero di 50 µg·m<sup>-3</sup> per più di 35 giorni) in molte zone rurali. Nelle stazioni "hot spot", il valore limite giornaliero di PM10 viene superato in molti paesi del sud dell'Europa. Anche le stazioni situate in aree urbane superano spesso il valore limite giornaliero di PM10 in molte regioni europee. Anche nelle principali aree industriali d'Europa si osservano medie annue di PM10 superiori al livello target europeo (40 µg·m<sup>-3</sup>).

In tutta Europa si registrano valori di NO<sub>2</sub> superiori ai target annui, in aree che si sovrappongono a quelle in cui vengono superati i valori target di PM10. Al contrario, le concentrazioni di SO<sub>2</sub> sono ora relativamente basse in tutta Europa e si registrano soltanto casi limitati di superamento dei limiti imposti dallo standard europeo.

In assenza di misurazioni personali, le concentrazioni ambientali possono essere considerate la migliore approssimazione dell'esposizione delle persone a inquinanti di origine esterna. Nonostante i piani di gestione della qualità dell'aria avviati a livello locale, regionale, nazionale ed europeo nell'ultimo decennio, i trend di esposizione della popolazione a diversi inquinanti atmosferici mostrano risultati variabili.

#### *Tendenze nella esposizione e violazione dei valori limite*

La porzione di popolazione urbana esposta a concentrazioni di SO<sub>2</sub> al di sopra dei valori limite a breve



**Figura 4.5. Percentuale della popolazione urbana europea residente in aree in cui le concentrazioni di inquinanti superano i valori limite/target selezionati, per il periodo compreso tra il 1997 e il 2006. I target sono i seguenti. PM10: valore limite di 50 µg·m<sup>-3</sup> (media su 24 ore), che non può essere superato più di 35 volte in un anno. NO<sub>2</sub>: valore limite medio annuo di 40 µg·m<sup>-3</sup>. Ozono: valore target massimo giornaliero di 120 µg·m<sup>-3</sup> di media su 8 ore, che non può essere superato più di 25 giorni all'anno, in media su 3 anni. SO<sub>2</sub>: valore limite di 125 µg·m<sup>-3</sup> come media giornaliera, che non può essere superato più di tre volte in un anno. Riadattato da [5].**

termine (media giornaliera di  $125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  che può essere superata per un massimo di 3 giorni all'anno) si è ridotta a meno dell'1% tra il 1997 e il 2006, come risultato delle politiche messe in atto nell'ultimo decennio per "pulire" le emissioni industriali (fig. 4.5). Anche la situazione dell' $\text{NO}_2$  è migliorata, anche se circa il 25% della popolazione urbana vive ancora in aree che presentano concentrazioni medie giornaliere o annue al di sopra del limite. È più difficile trovare esempi di miglioramento della situazione per quanto riguarda l'ozono e il PM. In anni "normali" si arriva a un massimo del 25% della popolazione urbana esposta a concentrazioni al di sopra dei valori limite; nel 2003, un anno contraddistinto da concentrazioni di ozono estremamente elevate, si è saliti a circa il 60%. Per quanto riguarda i PM10, la popolazione urbana potenzialmente esposta a concentrazioni superiori al valore limite imposto dall'Unione europea è oscillata tra il 23% e il 45% tra il 1997 e il 2004 e non si sono registrati trend in discesa percettibili in questo periodo. Anche se l'esposizione ai PM<sub>2.5</sub> può essere un indicatore migliore degli effetti sulla salute rispetto ai PM10, sono disponibili molti meno dati di monitoraggio su queste sostanze. Una stima dei livelli di PM<sub>2.5</sub> basata su un rapporto PM<sub>2.5</sub>/PM10 di circa 0,8 suggerisce che il valore target previsto dalla nuova direttiva sulla qualità dell'aria dell'Unione europea è stato superato in molte aree urbane nel 2004.

L'esposizione media a lungo termine è particolarmente importante nello sviluppo di problemi sanitari cronici; il raggiungimento di concentrazioni medie annue ridotte è pertanto un importante obiettivo delle politiche in atto. Sembra che il valore limite annuo stabilito dall'Unione europea per i PM10 (media annua di  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) non sia stato superato da molti paesi nel 2005 in media, ma una parte consistente della loro popolazione è ancora esposta a livelli superiori. E' importante sottolineare che, con la sola eccezione della Scandinavia, gran parte dei paesi superano ancora il valore target proposto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS;  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), un limite basato su dati scientifici tuttora ignorato dai responsabili delle politiche dell'Unione europea. Lo stesso vale per l'ozono e i PM<sub>2.5</sub>.

## MISCELE INQUINANTI E MARCATORI DELL'INQUINAMENTO

Le politiche per la gestione delle emissioni e della qualità dell'aria seguono un approccio orientato verso singole sostanze inquinanti, ma gli effetti sulla salute sono spesso

il risultato di esposizioni contemporanee a miscele complesse. In effetti, la letteratura epidemiologica e tossicologica disponibile non fornisce evidenza del fatto che un singolo inquinante o una singola fonte siano responsabili dell'intera gamma di effetti sulla salute che sono stati osservati (si veda il Capitolo 6 e l'Allegato 2).

La tossicità della complessa miscela di inquinanti atmosferici non è ben nota. Quando entrano nell'atmosfera, gli inquinanti emessi dalle diverse fonti vengono ulteriormente trasformati e condizionati da fattori ambientali come la temperatura e l'umidità. Questi processi modificano la composizione e quindi probabilmente anche la tossicità o le proprietà biologiche della miscela. Ad esempio, il legame tra le percentuali di mortalità giornaliera e la presenza di ozono e PM sembra essere più forte quando sono presenti entrambi gli inquinanti.

Alla luce di questi processi chimico-fisici e della simultanea emissione di diversi inquinanti, le emissioni e le concentrazioni ambientali di singoli inquinanti possono fungere da marcatori di fenomeni di inquinamento più complessi. Alcuni inquinanti possono fungere da marcatori delle emissioni provenienti da fonti specifiche. Ad esempio, le particelle ultrasottili o il carbonio elementare possono essere dei marcatori migliori rispetto a PM aventi altre dimensioni o caratteristiche di esposizione alla combustione; e la "prossimità al traffico" può riflettere meglio l'esposizione alle complesse emissioni del traffico rispetto a un singolo inquinante misurato da un dispositivo di controllo fisso. Sono in fase di studio nuovi marcatori dell'inquinamento atmosferico, tra cui le proprietà redox o alcune tipologie di PM. Tuttavia, la disponibilità di questo genere di dati è scarsa e, di conseguenza, il loro uso nella ricerca e nella formulazione di politiche è ancora limitato.

# Riquadro 4a

## Ozono troposferico e smog estivo

L'ozono è un gas inodore e incolore composto da tre atomi di ossigeno. L'ozono è presente sia nell'alta atmosfera (stratosfera) che a livello del terreno (troposfera). Nella stratosfera, l'ozono protegge la superficie terrestre dalla luce ultravioletta proveniente dalle radiazioni solari. L'ozono troposferico è invece un grave problema per la salute pubblica (si veda Riquadro 6c). L'ozono è l'ossidante fotochimico più abbondante e reattivo presente nella troposfera.

L'ozono troposferico viene generato in presenza di luce solare da una complessa reazione chimica tra  $\text{NO}_x$  e COV. Il processo consiste nell'ossidazione di ossido nitrico (NO) in biossido di azoto  $\text{NO}_2$ . La disgregazione chimica delle molecole di  $\text{NO}_2$  in unità più piccole dovuta all'assorbimento di luce (fotolisi) genera NO e un atomo di base di ossigeno, che poi reagisce con l'ossigeno molecolare per formare ozono. Le emissioni di  $\text{NO}_x$  e COV sono direttamente correlate alla produzione di ozono, quindi questi gas, che vengono emessi da auto, centrali elettriche, caldaie industriali, raffinerie, impianti chimici e altre fonti, vengono chiamati precursori dell'ozono.

In un ambiente saturo di  $\text{NO}_x$ , la concentrazione di ozono diminuisce all'aumentare delle emissioni di  $\text{NO}_x$ . Nelle vicinanze di forti fonti di emissione di  $\text{NO}_x$  l'ozono tende quindi a essere "deossidato". Questo genera un paradosso: le concentrazioni di ozono sono spesso più basse nei centri urbani, soprattutto lungo le arterie stradali molto trafficate, e più alte nelle aree suburbane e rurali. Inoltre, l'ozono è soggetto a trasporto atmosferico a lungo raggio. Pertanto, anche le aree più remote caratterizzate da ridotte emissioni di  $\text{NO}_x$  o COV possono essere colpite da elevate concentrazioni di ozono. Il trasporto è definito da processi meteorologici e chimici e può provocare spostamenti di molte centinaia di chilometri.

Un'altra conseguenza dei processi chimico-fisici legati alla contaminazione da ozono è la sua forte caratterizzazione stagionale e diurna. Le concentrazioni di ozono sono maggiori in estate e nelle ore pomeridiane a causa della sua origine fotochimica, i picchi giornalieri si verificano tipicamente durante i periodi estivi caldi e asciutti.

Gli attuali standard sulla qualità dell'aria che riguardano l'ozono puntano a ridurre al minimo il numero di giornate in cui si verificano picchi di concentrazione molto elevati. Le giornate (tipicamente poche) caratterizzate da concentrazioni molto elevate sono di solito oggetto di grande attenzione da parte dei media, ma il pubblico è meno consapevole dei periodi (spesso lunghi) in cui le concentrazioni di ozono sono leggermente più basse ma comunque pericolose per la salute. Le politiche che consentono di ottenere una considerevole riduzione delle concentrazioni di ozono portano a maggiori vantaggi per la salute pubblica rispetto alle "politiche di emergenza" che puntano alla prevenzione di pochi picchi estremi. Per questa ragione, gli scienziati e i professionisti del settore della sanità pubblica auspicano la formulazione di norme e politiche che consentano di ridurre i livelli di ozono durante l'estate.

# Riquadro 4b

## Particelle presenti nell'aria – PM10, PM2.5 e di dimensione inferiore

La miscela di particelle solide e liquide sospese nell'aria si chiama "particolato" (PM – particulate matter). Le particelle variano in numero, dimensione, forma, superficie, composizione chimica, solubilità, attività redox e origine. Il PM viene in genere classificato in base al diametro delle particelle. Vengono comunemente definite le seguenti frazioni di PM, a seconda del loro diametro aerodinamico:

- PTS: particelle totali sospese, che includono tutte le particelle fino al diametro di 30 µm.
- PM10, con diametro  $\leq 10 \mu\text{m}$ .
- Particelle grossolane, con diametro compreso tra 2,5 e 10 µm.
- PM2.5 o "particelle sottili" con diametro  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ .
- Particelle ultrasottili (UF - ultrafine) o PM0.1 con diametro  $\leq 0,1 \mu\text{m}$  (tipicamente nel range 1–100 nm).
- Le nanoparticelle presentano lo stesso range di grandezza delle UF (1–100 nm) ma si tratta più comunemente di materiali ingegnerizzati e non di PM ambientale.

Il livello di inquinamento da PM è comunemente descritto in termini di massa ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) o di numeri (n per  $\text{cm}^3$ ). Quest'ultimo criterio di misurazione è particolarmente utile per descrivere la più piccola frazione di PM ambientale siccome la massa è molto ridotta, mentre il numero di particelle può essere di molte volte più grande. Si è proposto di utilizzare, al posto della quantità, le caratteristiche del PM che ne riflettono in modo più specifico la tossicità. Ad esempio, alcuni studi hanno misurato l'attività redox del PM; questa caratteristica può fornire un'approssimazione del potenziale del PM di indurre stress ossidativo, uno dei meccanismi attraverso i quali si pensa che l'inquinamento atmosferico provochi varie conseguenze sulla salute.

Le categorie sopra descritte tentano anche di indicare le fonti e i processi di formazione delle particelle. Dato che le categorie si sovrappongono spesso, è possibile utilizzare il seguente criterio come regola generale: le particelle grossolane derivano principalmente dalla sospensione o dalla risospensione di polvere, terra o altro materiale della crosta terrestre provenienti da strade, campi agricoli, miniere, tempeste di vento o vulcani. Le particelle grossolane includono inoltre sale marino, polline, muffe, spore e altro materiale biologico. Le particelle sottili provengono principalmente dalle emissioni dirette generate da processi di combustione come quelli che avvengono nei veicoli a benzina o diesel, dalla combustione del legno, da quella del carbone finalizzata alla generazione d'energia e da processi industriali come quelli che avvengono nelle fonderie, negli impianti di produzione del cemento, nelle cartiere e nelle acciaierie. Le particelle sottili sono inoltre costituite da prodotti di trasformazione, incluse le particelle di solfati e nitrati, che vengono generate per conversione dalle emissioni primarie di zolfo e  $\text{NO}_x$  e dalle emissioni secondarie di aerosol organico da COV. Le particelle UF sono tipicamente emissioni recenti provenienti da fonti combustive come gli scarichi degli autoveicoli e le reazioni atmosferiche fotochimiche. Le particelle UF primarie hanno una vita molto breve (da pochi minuti a qualche ora) e crescono rapidamente mediante coagulazione e/o condensazione per formare aggregati complessi e più grandi, di range PM2.5. Lungo le arterie del traffico, le particelle UF sono sempre più considerate come i marcatori dell'esposizione agli scarichi "freschi" degli autoveicoli.

Vari studi tossicologici e umani suggeriscono che le particelle sottili possono assumere un ruolo determinante nell'influire sulla salute umana. La loro tossicità può essere dovuta ai solfati, ai nitrati, agli acidi e ai metalli. Le varie sostanze chimiche assorbite dalle superfici del PM possono assumere un rilievo sulla salute umana indipendentemente dalle loro dimensioni. Diversamente dalle particelle più grandi, il PM2.5 raggiunge di solito le vie aeree più piccole e gli alveoli. Le frazioni sottili rimangono inoltre in sospensione per un periodo di tempo più lungo e quindi vengono trasportate per distanze più lunghe e penetrano più facilmente negli ambienti chiusi. Nuovi studi suggeriscono inoltre che le particelle UF hanno maggiore probabilità di passare direttamente dai polmoni nel sangue e in altre parti del corpo, assumendo quindi una particolare rilevanza per quanto riguarda i possibili rischi cardiovascolari. Il ruolo delle particelle grossolane e le loro fonti sono stati studiati in maniera minore ma studi più recenti confermano che anche alle particelle di queste dimensioni sono associati effetti negativi sulla salute.

# Riquadro 4c

## Tempeste di polvere: non del tutto inoffensive

Miliardi di tonnellate di polveri desertiche si spostano nell'atmosfera ogni anno. Le principali regioni da cui provengono queste polveri sono quelle del Sahara e del Sahel nel Nord Africa e quelle di Gobi e di Takla Makan in Asia.

Le polveri trasportate dal vento assumono un ruolo importante nel ciclo ecologico mondiale. Ad esempio, le polveri provenienti dal deserto del Sahara sono essenziali per fertilizzare vaste aree dell'oceano Atlantico perché sono ricche di azoto, ferro e fosforo.

Tuttavia, i venti trasportano anche grandi quantità di polveri desertiche in regioni popolate. Le regioni colpite registrano fortissimi aumenti delle concentrazioni di polveri nell'aria che possono durare per molti giorni. In aree come quelle dell'Europa del sud, le polveri sahariane rappresentano un problema ricorrente per la qualità dell'aria e i livelli di particolato registrati in presenza di queste polveri superano i livelli raccomandati imposti dalla legge. La nuova normativa europea che stabilisce i valori giornalieri di PM10 esclude le giornate in cui il superamento dei livelli massimi è dovuto a eventi atmosferici naturali come le tempeste di polvere, si sta tuttavia ancora discutendo sul potenziale pericolo per la salute umana rappresentato da queste polveri presenti da sole o in associazione a particelle antropogeniche. È stato dimostrato che le particelle di polvere contengono funghi, virus e batteri che possono funzionare come agenti infiammatori o allergici e alcuni studi di popolazione hanno stabilito che vi è una correlazione tra tempeste di polvere ed effetti sulla salute.

Studi di modellizzazione mostrano che la quantità di polvere presente è sufficiente a influire anche sul clima. Le particelle di polvere in parte assorbono e in parte riflettono la luce solare, riscaldando l'aria ma raffreddando la superficie degli oceani. Questo favorisce la formazione di nuvole, che aumentano la riflessione della luce nello spazio. Studi recenti mostrano tuttavia che queste nuvole inibiscono le precipitazioni. La riduzione delle precipitazioni dalle nuvole provocata dalle polveri desertiche può provocare siccità, che a sua volta favorisce la produzione di ulteriori polveri, generando un possibile circolo vizioso che riduce ulteriormente le precipitazioni ed è potenzialmente in grado di accelerare i cambiamenti climatici. L'impatto delle tempeste di polvere sull'ambiente e sulla salute può essere più grave di quanto si pensi e merita una maggiore attenzione.

# Riquadro 4d

## Inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici: una battaglia comune

Storicamente, l'inquinamento atmosferico e i cambiamenti climatici sono stati gestiti dai decisori come problemi separati. Oggi ci si è resi conto che l'inquinamento atmosferico influisce sul clima a livello regionale e globale, direttamente e indirettamente, e che gran parte delle emissioni di gas serra sono legate alle emissioni di inquinanti atmosferici. Le principali fonti da cui hanno origine entrambi i problemi si sovrappongono in vari punti: l'impiego dei combustibili fossili nella produzione energetica e industriale e nei trasporti è responsabile della maggior parte delle emissioni di biossido di carbonio e di gran parte dell'inquinamento atmosferico. Pertanto, molte strategie volte a ridurre le fonti di combustione offrono vantaggi aggiuntivi molto interessanti (si veda la tabella 4d.1 che contiene esempi riferiti ad alcuni inquinanti specifici).

Gran parte dei paesi industrializzati hanno ridotto le emissioni di (alcuni) inquinanti atmosferici migliorando l'efficienza della produzione energetica e, più di recente, utilizzando tecnologie di controllo delle emissioni "end-of-pipe". La principale strategia da seguire per ridurre le emissioni di biossido di carbonio è la prevenzione delle emissioni. La prevenzione può essere raggiunta mettendo in atto cambiamenti strutturali nel settore dell'energia (maggiore efficienza ed energie rinnovabili carbon-free) e cambiamenti di comportamento (riduzione dei consumi energetici). La riduzione dell'utilizzo dei combustibili fossili si rifletterebbe sia sui cambiamenti climatici sia sull'inquinamento atmosferico. Il problema è sviluppare politiche che prevedano l'applicazione di un complesso di misure "end-of-pipe", strutturali e comportamentali che consentano di raggiungere i target in materia di inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici a costi accettabili. La collaborazione nella fase di formulazione delle politiche è particolarmente importante al fine di promuovere strategie sinergiche e non in contrasto l'una con l'altra. Un esempio di politiche contrastanti è la promozione degli autoveicoli diesel, motivata dalla maggiore efficienza di questo carburante, senza tenere conto degli effetti negativi dei gas di scarico diesel sulla salute umana.

Un'altra importante ragione per integrare le politiche è la riduzione del tempo necessario perché si manifestino i relativi benefici. Alcuni gas serra, come il biossido di carbonio, rimangono nell'atmosfera per lunghissimo tempo. Pertanto, le misure volte a ridurne le emissioni inizieranno a mostrare la loro efficacia soltanto dopo alcuni decenni. Al contrario, la riduzione delle concentrazioni di inquinanti atmosferici come PM, ozono o metano genera benefici per la salute sia immediati che a lungo termine.

**Table 4d.1. Legami esistenti tra cambiamenti climatici e inquinamento atmosferico con riferimento ai vari inquinanti**

Particolato	Il particolato assume un ruolo molto importante nel riscaldamento globale in ragione del suo contributo alla formazione delle nuvole. Le misure volte a ridurre le emissioni di particelle generate ad esempio dalla combustione del diesel, avranno il doppio effetto benefico di proteggere la salute umana a livello locale e anche il clima a livello regionale e mondiale.
Ozono	L'ozono troposferico è anch'esso un gas serra perché inibisce il processo attraverso il quale le piante contribuiscono ad assorbire il carbonio dall'atmosfera; il carbonio presente nell'atmosfera contribuisce sensibilmente al riscaldamento globale.
Metano	Il metano, un gas emesso in agricoltura e nei settori dell'energia e della gestione dei rifiuti, oltre a essere uno dei gas serra incluso nel Protocollo di Kyoto contribuisce anche alla formazione dell'ozono troposferico. Le emissioni di metano sono aumentate molto rapidamente dall'era pre-industriale. La riduzione di queste emissioni consentirà di ridurre i livelli di ozono dannoso per la salute e per gli ecosistemi e ridurrà i cambiamenti climatici.