

Allegato 5E

Considerazioni sul Particolato

Con il termine *Particolato* o *Polveri Totali Sospese (PTS)* si intende l'insieme di particelle disperse in atmosfera, solide e liquide, con diametro compreso fra 0,1 e 100 μm . Le *PTS* sono costituite da una complessa miscela di sostanze organiche e inorganiche, tra cui le principali sono sabbia, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, composti metallici, fuliggine, sali ecc.

Le particelle più grandi (con diametro maggiore di 10 μm) possono essere considerate le meno pericolose perché si depositano al suolo rapidamente e, se inalate, sono trattenute dalle prime vie respiratorie. Con il diminuire della loro dimensione, le particelle divengono via via più pericolose perché rimangono più a lungo in sospensione e perché riescono a penetrare più profondamente nell'organismo umano.

Le particelle con diametro inferiore a 10 μm (PM_{10}) sono definite anche *polveri inalabili*, in quanto sono in grado di penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio (dal naso alla laringe). Le particelle con diametro inferiore a 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) costituiscono circa il 60% del totale di PM_{10} e sono denominate *polveri toraciche* o *respirabili*, in quanto in grado di penetrare nel tratto inferiore dell'apparato respiratorio (dalla trachea agli alveoli polmonari). Queste ultime sono costituite anche da aerosol dovuti alla conversione di gas in particelle solide, a particelle derivanti dalla combustione e a vapori organici e metallici ricondensati.

Oltre a compromettere la salute umana il particolato può provocare danni o alterazioni all'ambiente e ai materiali. I principali effetti negativi causati dalla sua presenza sono:

- assorbimento della luce solare e conseguente riduzione della quantità di luce che raggiunge la superficie terrestre;
- aumento della formazione di nebbie, in quanto le particelle forniscono alle goccioline che formano la nebbia nuclei, attorno a cui formarsi;
- danni materiali, quali corrosione dei metalli, danneggiamento di circuiti elettrici ed elettronici e insudiciamento di edifici;
- interferenze con il processo di fotosintesi clorofilliana, a causa delle incrostazioni sull'apparato fogliare delle piante (soprattutto dovuto a cementifici).

Il *Particolato* può essere suddiviso, oltre che per la dimensione delle particelle che lo compongono, anche in funzione dei processi che lo hanno generato. Mediante questa seconda metodologia esso è generalmente suddiviso in *Particolato Primario* e *Particolato Secondario*.

Il *Particolato Primario* è costituito dalle particelle originatesi direttamente da processi meccanici di erosione, dilavamento e rottura di particelle grossolane, da processi di evaporazione dello spray marino in prossimità delle coste, e da processi di combustione. Esso è costituito sia da particelle fini che grossolane.

Il *Particolato Secondario* è costituito dagli aerosol generatisi dalla conversione dei gas in particelle solide. Esso si forma attraverso processi di condensazione di sostanze a bassa tensione di vapore, precedentemente formatesi attraverso evaporazione ad alte temperature, o attraverso reazioni chimiche dei gas presenti in atmosfera. Il *Particolato Secondario* è formato esclusivamente da particelle fini, generalmente con diametro inferiore a 1 μm .

La composizione del particolato dipende dall'area di provenienza e dalla tipologia della sorgente di emissione. Come si può notare dalle seguenti *Figure 5E1a-c* il particolato originato in aree urbane, rurali o naturali presenta caratteristiche non troppo diverse, tranne che per il contenuto di carbonio elementare. Si osservi che tali differenze si riscontrano nel particolato totale ma sono assai meno significative nel PM_{10} e ancor più fine, come meglio precisato nel seguito.

Figura 5E1a *Composizione Media del Particolato di Origine Urbana (Fonte: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – 2003)*

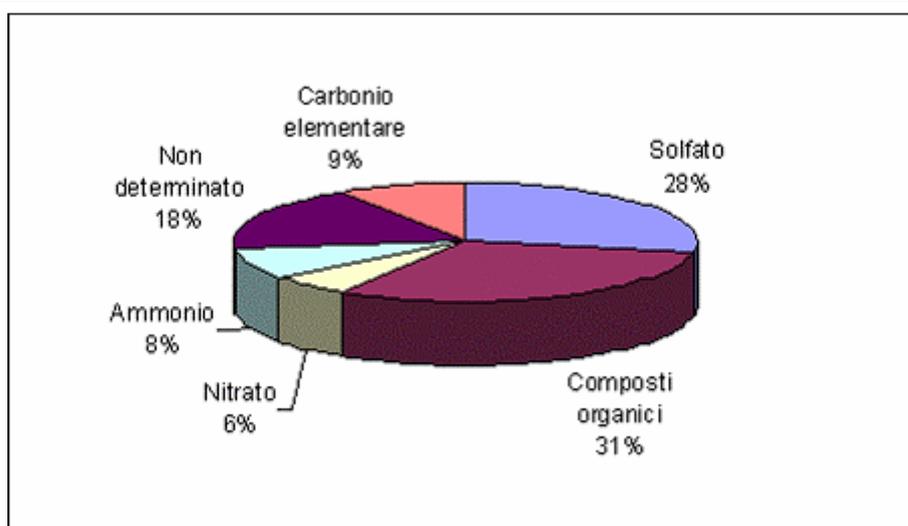


Figura 5E1b *Composizione Media del Particolato di Origine Rurale (Fonte: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – 2003)*

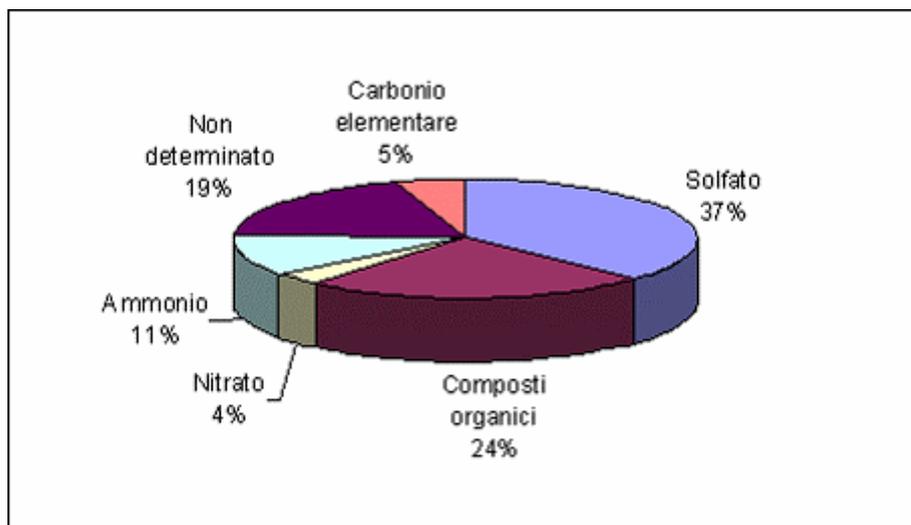
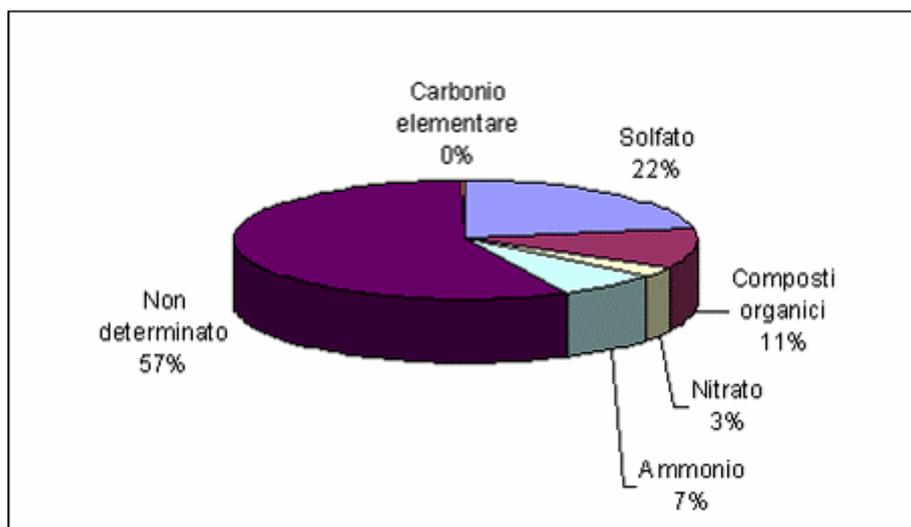


Figura 5E1c *Composizione Media del Particolato di Origine Naturale (Fonte: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – 2003)*



Come riportato nel documento "Air Quality Guidelines", un recente studio effettuato sulla fenomenologia del particolato atmosferico ha individuato nei solfati e nelle sostanze organiche i maggiori componenti, in peso, del PM₁₀ e del PM_{2.5}, a cui si aggiungono i nitrati, generalmente significativi solo nei giorni con concentrazioni di PM₁₀>50 µg/m³.

5E1.1

ORIGINE DEL PARTICOLATO PRIMARIO

Le principali origini del particolato primario sono le seguenti:

- polveri fuggitive, provenienti da attività di costruzione, attività agricole e in generale dal suolo. Le polveri fuggitive sono costituite principalmente da ossidi di alluminio, silicio, calcio, titanio, ferro e altri ossidi metallici. La loro combinazione dipende dalla geologia dell'area di interesse, dalla presenza di processi industriali come acciaierie, fonderie, miniere e cementifici;
- polveri di pollini, spore di muffe, parti di piante e insetti;
- polveri legate ai processi di combustione, come il riscaldamento domestico, produzione industriale, funzionamento di motori diesel, ecc.;
- polveri depositate sulle strade e riportate in sospensione da veicoli, polveri di erosione delle superfici stradali, dei pneumatici e di degradazione di parti dei veicoli.

Per quanto riguarda le polveri originatesi per frazionamento meccanico di particelle più grossolane bisogna rilevare che l'energia di volta in volta necessaria per ridurne la dimensione aumenta con il diminuire del diametro delle particelle stesse. Questo porta a stabilire un limite naturale oltre al quale solitamente non si originano polveri per frazionamento, pari a circa 1 μm .

5E1.2

ORIGINE DEL PARTICOLATO SECONDARIO

Come anticipato, il *Particolato Secondario* si genera dalla conversione dei gas in particelle solide, attraverso processi di condensazione o attraverso reazioni chimiche dei gas presenti in atmosfera.

Il documento "*Strategic Workplan for Particulate Matter Research: 2000 to 2004*" del *U.S. Department of Transportation* e il documento "*Air Quality Guidelines*" redatto nell'anno 2000 dall'Organizzazione Mondiale della Sanità indicano che la sua origine è dovuta, in particolare, alle seguenti classi di sorgenti:

- metalli pesanti (vaporizzati attraverso combustione). Generalmente di provenienza industriale o veicolare;
- carbonio organico ed elementare (da molecole corte di carbonio generate attraverso la combustione). Nel particolato il carbonio può essere presente sia come carbonio organico, quindi legato ad altri componenti, sia come carbonio elementare. Nel primo caso è spesso in forma instabile e semi-volatile, nel secondo forma materiali solitamente non volatili;
- solfati. Le forme più comuni di solfati presenti nel particolato sono il solfato ammonio, l'ammonio bisolfato e l'acido solforico. Questi composti derivano dalla conversione di SO_x gassoso in particelle, sono solubili in acqua e hanno un diametro solitamente inferiore a 2,5 μm ;
- nitrati. Tra i nitrati il più abbondante nel particolato è il nitrato di ammonio, che deriva da una reazione di equilibrio gas - particelle tra

ammoniaca (NH₃), acido nitrico allo stato gassoso e particolato di nitrato di ammonio.

Le particelle solide, dopo che si sono originate, crescono attraverso meccanismi di coagulazione, cioè attraverso la loro unione, o attraverso meccanismi di condensazione, cioè mediante la condensazione di gas o particelle sotto forma di vapore sulla superficie di particelle solide già formate.

L'efficienza della coagulazione è maggiore in presenza di un'alta densità di particelle, quella della condensazione in presenza di grandi quantità di superfici di condensazione. L'efficienza di entrambe, quindi, diminuisce con il crescere della dimensione delle particelle. Il limite superiore all'accrescimento delle particelle mediante questo processo è pari a circa 1 µm.

5E1.3

COMMENTI

Dalle precedenti osservazioni si ricava che il PM₁₀ è in realtà composto da due frazioni abbastanza distinte per forma chimica e granulometria: un particolato molto fine (< 1-2 µm), fondamentalmente dovuto a processi di formazione in atmosfera, ed un particolato più grossolano, prevalentemente dovuto ad emissione diretta. Dal punto di vista chimico, nel primo prevalgono composti chimici quali i solfati o nitrati, mentre nel secondo si hanno maggiori presenze dei normali costituenti il terreno.

Il particolato secondario si origina a causa di reazioni chimiche: per la stima delle concentrazioni occorre quindi conoscere la cinetica della reazione e le modalità di trasporto su lunga distanza (anche trasfrontaliera). I modelli di previsione utilizzati a livello europeo generalmente fanno uso delle seguenti reazioni per i nitrati e i solfati, considerati tra i principali componenti del particolato secondario generato dalle emissioni in atmosfera di tipo antropico.

Tabella 5E2a *Reazioni di Produzione di Particolato Secondario in Atmosfera sotto Forma di Nitrati e Solfati*

Reazione	Velocità di Reazione (k_1 [298° K])	U.M.
$2\text{NO}_2 + \text{O}_3 > 2\text{NO}_3$ (aerosol)	k_1	$\text{cm}^3 \text{molecole}^{-1} \text{s}^{-1} *$
$\text{SO}_2 + \text{OH} > \text{SO}_4$ (aerosol)	$1,35 \cdot 10^{-12}$	$\text{cm}^3 \text{molecole}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\text{HNO}_3 > \text{NO}_3$ (aerosol)	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$\text{s}^{-1} **$
$\text{SO}_2 > \text{SO}_4$ (aerosol)	$1,39 \cdot 10^{-6}$	$\text{s}^{-1} ***$

* k_1 rappresenta la velocità di reazione che descrive le reazioni di formazione di NO, NO₂, NO₃, N₂O₅ e HNO₃;
 ** velocità di reazione pari a $5,00 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ con U.R.= 90% o a $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ con U.R. > 90%;
 *** velocità di reazione pari a $1,39 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ con U.R.= 90% o a $4,17 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ con U.R. > 90%.

Come si osserva alcuni ratei sono relativamente bassi e da ciò deriva che, nel caso di una sola sorgente emissiva di precursori, la concentrazione massima di particolato secondario si manifesta a grandi distanze dalla sorgente stessa. Nel caso reale di una moltitudine di sorgenti, la conseguenza è che la concentrazione indotta da una singola sorgente è poco significativa, ma lo è molto di più la concentrazione media (nello spazio e nel tempo) indotta dalla distribuzione di sorgenti sul territorio e dalle situazioni meteorologiche medie.

I modelli di simulazione della diffusione di particolato fine devono quindi considerare grandi territori, anche a bassa risoluzione spaziale, senza necessità di definire, con accuratezza, l'uso del suolo: urbano o rurale.

Nel seguito si propone una sintesi di uno studio approfondito contenuto nel documento *Transboundary Particulate Matter in Europe (Status Report 4/2003)* del *Environmental Monitoring European Program (EMEP)* riguardante l'attendibilità dei modelli di calcolo per la stima della concentrazione atmosferica delle polveri, con particolare riferimento a PM₁₀ e PM_{2,5} che, come già descritto, comprendono interamente il particolato secondario.

Questo studio riporta diversi confronti tra le concentrazioni rilevate negli anni 2000 e 2001 nella rete di monitoraggio europea EMEP e le concentrazioni stimate tramite i modelli di calcolo EMEP Unified Model e EMEP Aerosol Dynamic Model UNI-AERO.

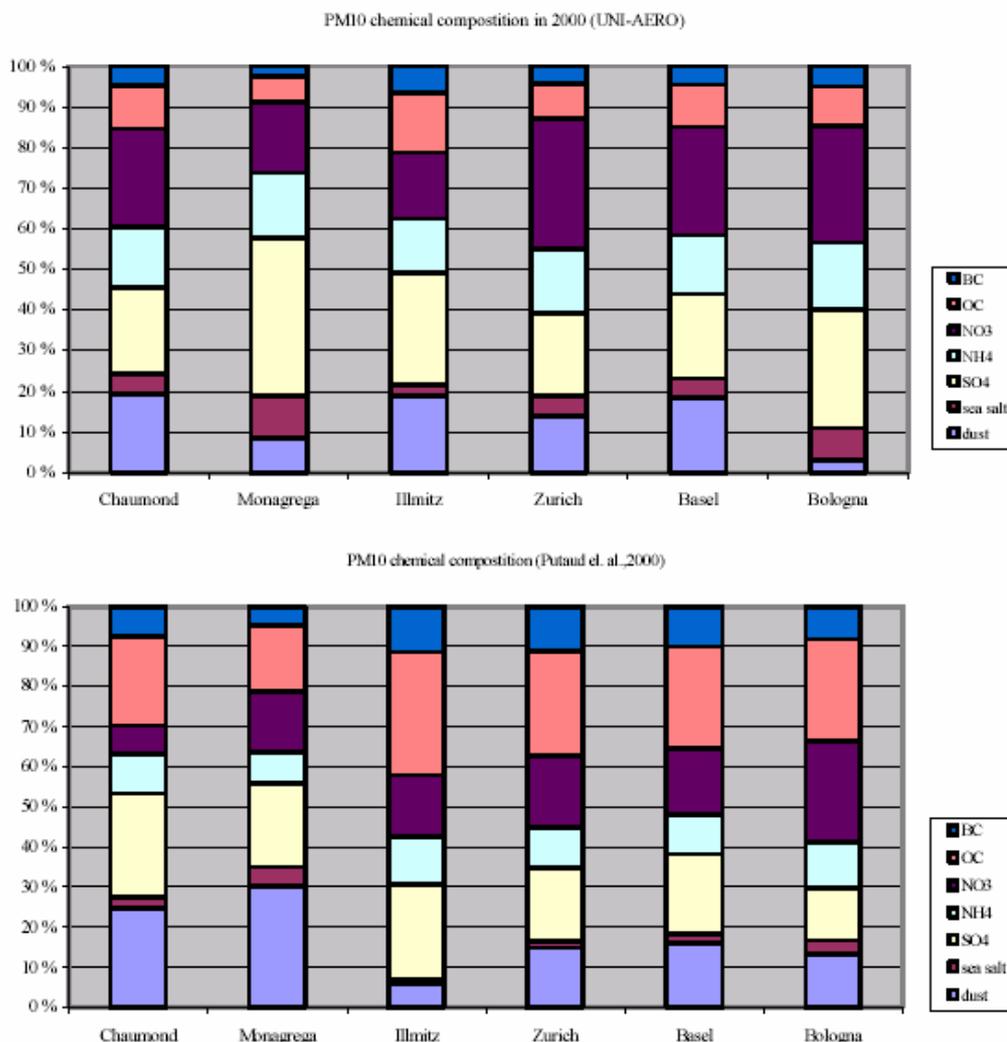
Il dominio di calcolo è quello dell'intera Europa. La risoluzione spaziale varia da 55 a 7,5 km e quella temporale è di 6 ore. Nonostante la risoluzione possa

apparire grossolana, i risultati dei confronti effettuati evidenziano una sostanziale corrispondenza tra le concentrazioni rilevate e le concentrazioni stimate di PM₁₀ presentando comunque alcune discordanze a causa della complessità della miscela di inquinanti costituenti il particolato. Dalla loro analisi si può osservare quanto segue:

- le previsioni dei modelli sulle concentrazioni al suolo di PM₁₀ e PM_{2,5} sono fortemente dipendenti dall'accuratezza del calcolo della composizione del particolato primario;
- le concentrazioni calcolate di solfati, nitrati e ioni ammonio negli aerosol atmosferici sono in buon accordo con le osservazioni;
- le differenze tra valori osservati e calcolati dei principali composti organici e del carbonio totale sono dell'ordine del $\pm 10\%$, per il carbonio organico invece del $\pm 25\%$;
- le incertezze nel calcolo di polveri di origine minerale sono elevate e possono raggiungere anche il 100%.

La seguente *Figura 5E2a* mostra il confronto tra la media annuale del contributo in peso (in percentuale) dei singoli composti alla formazione di PM₁₀ osservata tramite misurazioni (Putaud et al. – 2002) e calcolata tramite il modello EMEP Aerosol Dynamic Model UNI-AERO in diverse località europee.

Figura 5E2a Contributo Percentuale nella Composizione di PM10 dei Singoli Composti Calcolato Tramite Modellazione e Osservato (Putaud et al.)



E' quindi confermato che in generale una bassa risoluzione spaziale e temporale sono sufficienti a ben rappresentare il fenomeno di dispersione e diffusione del PM₁₀ e PM_{2.5} che non è governato da fenomeni locali.

5E2.1

SOLUZIONI PROPOSTE PER LA RIDUZIONE DELLE CONCENTRAZIONI DI PM₁₀

Le soluzioni proposte per la riduzione dell'inquinamento da PM₁₀ consistono ovviamente nel controllo separato delle emissioni di particolato primario e dei precursori del secondario.

A livello europeo l'agenzia *IIASA*, da anni impegnata nello studio di sistemi di stima dell'efficacia di sistemi di abbattimento delle emissioni, propone i seguenti dati inerenti la prevedibile riduzione di emissioni di PM₁₀ primarie.

Estimate of European primary PM₁₀ and PM_{2.5} emissions in 1990, in kilotons

	EU-15			Non-EU countries		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
Power plants	649	501	240	3209	2193	770
Industry						
- Combustion	511	330	131	660	423	171
- Production processes	761	485	314	2707	1596	1067
Domestic	1431	1055	744	3784	2301	1091
Exhaust emissions:						
- Heavy duty trucks	119	114	103	111	108	96
- Light duty vehicles	279	261	227	59	54	45
- Off-road	52	50	46	58	49	40
- Shipping	15	15	14	4	4	4
Road non-exhaust .	286	57	20	134	26	8
Material handling	162	45	2	37	24	0
Agriculture	63	30	11	70	34	13
SUM	4328	2943	1852	10833	6812	3304

European PM₁₀ and PM_{2.5} emissions projected for 2010. Percentage changes refer to 1990.

	EU-15			Non-EU countries		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
Power plants	227	212	155	1239	964	437
Industry						
- Combustion	22	21	17	92	73	43
- Production processes	300	202	144	747	502	337
Domestic	644	605	573	2343	1539	884
Exhaust emissions:						
- Heavy duty trucks	24	23	21	97	93	84
- Light duty vehicles	81	79	69	30	29	25
- Off-road	37	36	33	31	29	27
- Shipping	16	16	16	7	7	6
Road non-exhaust .	440	88	31	153	30	10
Material handling	132	55	12	100	55	12
SUM	1922	1337	1071	4838	3323	1867

Le stime di riduzione sono ottenute ammettendo:

- che sino al 2010 non vi siano miglioramenti, in Europa occidentale, nelle emissioni da parte di centrali elettriche, caldaie e combustione industriali;
- che le centrali dell'est europeo raggiungano gli standard emissivi di quelle occidentali;
- che le emissioni domestiche non subiscano controlli o regolamentazioni specifiche;
- che le emissioni da traffico si riducano essenzialmente a causa del controllo delle missioni da veicoli diesel (nessuna riduzione dalle auto a benzina o delle emissioni non direttamente dipendenti dalla combustione quali l'usura pneumatici e asfalto).

Nel 1990 la maggior fonte di emissione di PM₁₀ è costituita dalle centrali elettriche, ma questa voce comprende le centrali a combustibile solido e

liquido dell'Est Europeo. Conseguentemente, pur in assenza di interventi sulle centrali occidentali, le emissioni al 2010 sono stimate in riduzione di oltre il 50%.

Come si può concludere osservando le tabelle, è prevista una riduzione, tra il 1990 ed il 2010, del 52 e 43% delle emissioni totali di PM₁₀ e PM_{2,5} primario.

A livello regionale italiano sono state emanate numerose proposte di intervento, al fine di ridurre sia il particolato primario che secondario. Tra tutte quelle inserite nel Piano Regionale di Tutela e di Risanamento dell'Atmosfera della Regione Veneto sono espresse in modo sintetico, come sotto riportato.

- Presenza nella rete di distribuzione solo di gasolio a basso tenore di zolfo (< 50 mg/kg);
- Incentivi alla metanizzazione degli impianti di riscaldamento e di centrali termiche industriali e disincentivazione all'uso di combustibili fossili a medio-alto tenore di zolfo (es. oli pesanti, nafta), se non dotati di idonei sistemi di abbattimento delle polveri;
- Intensificazione delle verifiche in strada dei livelli di opacità dei veicoli diesel con particolare riguardo ai mezzi pesanti e commerciali;
- Intensificazione delle verifiche in strada delle prestazioni dei ciclomotori a due tempi ("cinquantini");
- Trasformazione dei veicoli di enti o aziende pubbliche alimentati a gasolio verso combustibili più eco-compatibili (metano-GPL- elettrici);
- Alimentazione con biodiesel o gasolio a basso tenore di zolfo dei veicoli di enti o aziende pubbliche alimentati a gasolio (autobus, veicoli trasporto rifiuti, autovetture, etc.);
- Incentivi alla trasformazione dei taxi verso combustibili gassosi, in primis il metano;
- Alimentazione con biodiesel o gasolio a basso tenore di zolfo dei taxi alimentati a gasolio;
- Incentivi alla trasformazione dei mezzi commerciali a prevalente azione locale, verso combustibili gassosi, in primis il metano;
- Riduzione dei livelli di emissione di polveri e IPA delle attività produttive esistenti nel territorio anche mediante accordi volontari (es. EMAS e ISO 14000) e regolamentazione del sistema delle autorizzazioni di nuovi insediamenti, al fine di migliorare complessivamente il bilancio di area;
- Attivazione di campagne di sensibilizzazione, educazione e informazione partendo dalle scuole fino a raggiungere il singolo cittadino;
- Realizzazione di barriere sempreverdi ad elevata ramificazione lungo le principali direttrici di traffico;
- Esecuzione delle operazioni di lavaggio frequenti delle strade soprattutto durante i periodi di stabilità atmosferica delle stagioni autunnali, invernali e primaverili;
- Verifica del rispetto del divieto di combustione all'aperto di ramaglie e altri residui vegetali (al fine di favorirne il conferimento a centri di riutilizzo).

Al di là della modalità di formulazione, anche le altre regioni hanno previsto strumenti simili. Interessante in Regione Lombardia il limite imposto alla temperatura interna massima agli edifici riscaldati con combustibili solidi o liquidi.

In ogni caso sono quindi previste misure per la riduzione delle emissioni di particolato primario e di ossidi di zolfo, principale precursore delle polveri sottili. A questo proposito occorre ricordare che le emissioni nazionali totali di ossidi di azoto e zolfo ammontano a 1.758.230 e 1.216.681 tonnellate/anno (escluse fonti naturali, incendi e dovute ad azioni di cambio di destinazione d'uso del suolo, ISTAT, *Statistiche Ambientali* 2000).