

LE EMISSIONI IN ATMOSFERA DEGLI INQUINANTI NELLE 24 PRINCIPALI CITTÀ ITALIANE

**M. BULTRINI, M. COLAIEZZI, M. FATICANTI, M. PANTALEONI, E. TAURINO,
C. SERAFINI, A. LEONARDI, M.C. CIRILLO**

APAT – Dipartimento Stato dell'ambiente e Metrologia Ambientale, Servizio Qualità dell'Aria

ABSTRACT

Vengono presentate le emissioni dei più importanti inquinanti per i 24 capoluoghi di provincia italiani con popolazione maggiore di 150.000 abitanti con riferimento agli anni 1995, 2000 e 2003. Le stime sono state effettuate disaggregando spazialmente le emissioni nazionali con una opportuna metodologia. Tutti gli inquinanti considerati mostrano un andamento generalmente decrescente nel tempo con l'eccezione dell'ammoniaca (escludendo il contributo dell'agricoltura) le cui emissioni crescono progressivamente dal 1995 al 2003. Per il 2003 sono riportati i contributi dei vari settori (trasporto su strada, industria, etc.) per ogni singolo inquinante. Le tendenze nel tempo e la ripartizione delle emissioni nei vari settori sono comparate con le analoghe situazioni nazionali. Le emissioni pro capite stimate per ogni città presentano una minore variabilità rispetto ai valori assoluti.

1. INTRODUZIONE

Gli inventari delle emissioni in atmosfera rappresentano uno degli strumenti indispensabili per pianificare e gestire il risanamento della qualità dell'aria. La normativa vigente sui piani e programmi inerenti alla qualità dell'aria prevede che tutte le regioni/province autonome predispongano un inventario delle emissioni secondo criteri comuni stabiliti a livello europeo, un obiettivo questo che deve essere ancora pienamente perseguito da circa un terzo delle regioni/province autonome.

Per questo motivo acquista ancora maggiore rilievo l'attività di disaggregazione spaziale dell'inventario nazionale realizzato da APAT, disaggregazione che partendo dal dato nazionale si propone di stimare le emissioni su scala provinciale e comunale. In questo contesto, il presente lavoro si pone in continuità con quello presentato da APAT (De Lauretis et al., 2004) e dal CESI (Pertot et al., 2005) rispettivamente nel I e nel II rapporto APAT sulla qualità dell'ambiente urbano. Rispetto ai lavori precedenti è stato esteso il numero di inquinanti (monossido di carbonio e ammoniaca non considerati da APAT nel 2004, benzene non considerato da CESI nel 2005) e di aree urbane prese in considerazione (estendendo il campo di osservazione ai 24 capoluoghi di provincia con popolazione superiore ai 150.000 abitanti). Inoltre, mentre i lavori precedenti hanno fornito le emissioni comunali per il solo anno 2000, in questo lavoro la stima ha interessato tre anni (1995, 2000 e 2003) il che consente di poter valutare, per ogni città, gli andamenti degli inquinanti considerati in funzione del tempo in un arco di nove anni.

Operativamente il lavoro è stato suddiviso in due passi successivi: nel primo l'inventario nazionale è stato disaggregato a livello delle 103 province italiane, nel secondo una successiva disaggregazione è stata effettuata a livello comunale per le sole 24 città di interesse.

2. METODOLOGIA

2.1 La disaggregazione provinciale

La disaggregazione provinciale del dato emissivo nazionale è stata realizzata per gli anni 1995, 2000 e 2003 adottando un approccio di tipo *top-down* (Liburdi et al., 2004).

Per ogni attività emissiva si è scelta un'opportuna "variabile surrogato" (*proxy*) che fosse correlata alla stima dell'emissione e che è stata utilizzata per ripartire a livello provinciale il dato nazionale mediante la seguente formula:

$$E_{k,i,j} = E_{k,j} \cdot S_{k,i,j} / S_{k,j}$$

dove $E_{k,i,j}$ rappresenta l'emissione provinciale relativa all'attività k , alla provincia i e all'anno j , $E_{k,j}$ è la corrispondente emissione nazionale, $S_{k,i,j}$ è il valore della variabile *proxy* associata all'attività k per l'anno j e per la provincia i , $S_{k,j}$ è il corrispondente valore nazionale della variabile *proxy*. Vale la relazione

$$S_{k,j} = \sum_{i=1}^N S_{k,i,j}$$

con $N=103$, numero delle province italiane.

La stima provinciale delle emissioni di un dato macrosettore viene ottenuta come somma delle emissioni provinciali relative alle attività che appartengono a quel macrosettore.

L'approccio utilizzato prevede l'utilizzo di variabili *proxy* di facile reperimento per i tre anni, ciò spiega il diffuso utilizzo di dati ISTAT, in particolare del numero di addetti per la disaggregazione provinciale delle emissioni delle attività industriali.

2.1.1 Gli inquinanti considerati

Gli inquinanti presi in considerazione sono il particolato minore di 10 micrometri (PM10), gli ossidi di azoto (NO_x), i composti organici volatili non metanici (COVNM), gli ossidi di zolfo (SO_x), l'ammoniaca (NH_3), il benzene (C_6H_6) e il monossido di carbonio (CO).

2.1.2 La classificazione aggregata adottata nel rapporto

La stima delle emissioni è stata effettuata utilizzando la stessa nomenclatura SNAP 97 (*Selected Nomenclature for sources of Air Pollution*) adottata da APAT nell'inventario nazionale delle emissioni, e che classifica le diverse attività emissive in settori e macrosettori. I risultati sono presentati aggregando e/o rinominando alcuni macrosettori della nomenclatura SNAP 97 come mostrato in Tabella 1.

Tabella 1: classificazione aggregata utilizzata nel presente lavoro

Macrosettori SNAP 97	Macrosettori aggregati
01 – Combustione nell'industria e impianti energetici	→ Industria
03 – Combustione industriale	
04 – Attività produttive	
05 – Estrazione e distribuzione di combustibili fossili e geotermia	
02 – Combustione non industriale	→ Riscaldamento
06 – Uso di solventi	→ Uso Solventi
07 – Trasporti stradali	→ Trasporto su strada
08 – Altri sorgenti mobili e macchinari	→ Altri trasporti
09 – Trattamento dei rifiuti e discariche	→ Trattamento rifiuti
10 – Agricoltura	→ Agricoltura
11 – Altre sorgenti ed assorbimenti	→ Natura

Nella voce altri trasporti sono inclusi il trasporto aereo e i trasporti marittimi: questi ultimi hanno un peso rilevante nelle città portuali. Per una completa tracciabilità del lavoro svolto, tutti i dati relativi alla procedura di disaggregazione (*data base* delle emissioni per i 3 anni, file Excel per la disaggregazione a livello comunale, descrizione delle variabili *proxy* per la disaggregazione a livello provinciale e grafici) sono riportati nel CD allegato al presente volume.

2.1.3 Analisi cluster per il settore trasporti

Visto il peso rilevante delle emissioni dovute al trasporto stradale si è cercato di caratterizzare al meglio tale settore ampliando la metodologia *top-down* attraverso l'introduzione di tecniche di analisi statistica multivariata (Saija et al., 2001). L'obiettivo perseguito è quello della caratterizzazione delle province italiane rispetto alla composizione del parco veicolare e alla tipologia di trasporto predominante (commerciale, passeggeri, ...). A tal fine, per il solo 2003 è stata effettuata un'analisi *cluster* delle 103 province in modo da individuare gruppi di province simili rispetto alle variabili ritenute rappresentative e riportate in Tabella 2. Sono state prese in esame variabili costruite a partire dal numero di veicoli circolanti (con particolare riguardo ai veicoli commerciali al fine di caratterizzare al meglio il peso del traffico commerciale), variabili relative ad aspetti economici (vendite di combustibili uso trazione) e variabili legate alle infrastrutture stradali presenti nelle province (lunghezza dei tratti stradali per unità di superficie).

Tabella 2: variabili utilizzate per l'analisi *cluster* delle province italiane

Variabile	Descrizione	Fonte
X_1	Lunghezza tratti autostradali/superficie provincia (km ⁻¹)	ISTAT
X_2	Lunghezza tratti non autostradali/superficie provincia (km ⁻¹)	Elab.ARPA Lombardia
X_3	Venduto benzina trazione (t)	Bollettino petrolifero
X_4	Venduto gasolio trazione (t)	Bollettino petrolifero
X_5	Rapporto tra n° di veicoli passeggeri benzina (euroll+eurolll)/(eurol+pre euro)	ACI
X_6	Rapporto tra n° di veicoli passeggeri gasolio (euroll+eurolll)/(eurol+pre euro)	ACI
X_7	Rapporto tra n° di veicoli passeggeri GPL (euroll+eurolll)/(eurol+pre euro)	ACI
X_8	Rapporto tra n° di veicoli commerciali leggeri (euroll+eurolll)/(eurol+pre euro)	ACI
X_9	Rapporto tra n° di veicoli commerciali leggeri (eurol+pre euro)/flotta veicolare	ACI
X_{10}	Rapporto tra n° di veicoli commerciali leggeri (euroll+eurolll)/flotta veicolare	ACI
X_{11}	Rapporto tra n° di veicoli commerciali pesanti (euroll+eurolll)/(eurol+pre euro)	ACI
X_{12}	Rapporto tra n° di veicoli commerciali pesanti (eurol+pre euro)/flotta veicolare	ACI
X_{13}	Rapporto tra n° di veicoli commerciali pesanti (euroll+eurolll)/flotta veicolare	ACI
X_{14}	Rapporto tra n° di motocicli 97/24/EC e convenzionali	ACI

Nella Tabella 3 seguente viene riportata una descrizione dei *cluster* delle province ottenuti dall'elaborazione con il *software* statistico R 2.2.0 (R Development Core Team, 2005).

Tabella 3: descrizione dei *cluster* e delle relative province di appartenenza

Cluster	Descrizione	Province
1	20 province ad alto sviluppo economico. All'interno del cluster si trovano diverse aree urbane nelle quali la mobilità stradale è legata ad un'intensa attività turistica e commerciale.	Alessandria, Bari, Bergamo, Bologna, Brescia, Caserta, Catania, Firenze, Napoli, Padova, Perugia, Ravenna, Reggio Emilia, Salerno, Torino, Trento, Treviso, Venezia, Verona, Vicenza
2	51 province medio-piccole e con minor peso demografico e, di conseguenza, con parchi veicolari più piccoli. Esso si distingue nettamente dagli altri per la numerosità.	Agrigento, Aosta, Arezzo, Asti, Avellino, Belluno, Benevento, Biella, Brindisi, Caltanissetta, Campobasso, Catanzaro, Cremona, Crotone, Enna, Ferrara, Gorizia, Grosseto, Imperia, Isernia, La Spezia, L'Aquila, Lecco, Lodi, Lucca, Macerata, Massa Carrara, Matera, Novara, Nuoro, Oristano, Pescara, Pistoia, Pordenone, Potenza, Prato, Ragusa, Rieti, Rimini, Rovigo, Savona, Siena, Siracusa, Sondrio, Terni, Trapani, Trieste, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli, Vibo Valentia, Viterbo

segue

Cluster	Descrizione	Province
3	30 province di dimensioni medio-grandi. Si distingue dal primo cluster per i minori consumi di carburante ed un parco auto passeggeri a gasolio e veicoli commerciali leggeri più anziano.	Ancona, Ascoli Piceno, Bolzano, Cagliari, Chieti, Como, Cosenza, Cuneo, Foggia, Forlì, Frosinone, Genova, Latina, Lecce, Livorno, Mantova, Messina, Modena, Palermo, Parma, Pavia, Pesaro Urbino, Piacenza, Pisa, Reggio Calabria, Sassari, Taranto, Teramo, Udine, Varese
4	Le 2 maggiori metropoli italiane che si distinguono nettamente da tutte le altre per popolazione e parco veicolare	Milano, Roma

Per ogni cluster è stata applicata la metodologia Copert per stimare le emissioni di sei inquinanti (PM10, NO_x, COVNM, NH₃, CO e C₆H₆), ad eccezione di SO_x poiché negli ultimi 15 anni il tenore di zolfo nei carburanti si è ridotto di ben oltre il 90%. I valori di emissione risultanti sono stati comparati con i valori provinciali ottenuti con la metodologia top-down (Saija, Romano, 2001) e aggregati per i cluster risultanti da questa analisi, ottenendo un fattore correttivo:

$$V_c^k = \frac{\sum_{i \in I_c} E_i^k - E_c^k}{\sum_{i \in I_c} E_i^k}$$

dove:

V_c^k = indice di variazione per il cluster c ed il settore veicolare k

E_c^k = emissione stimata con metodologia Copert per il cluster c ed il settore veicolare k

E_i^k = emissione della i -esima provincia per settore veicolare k stimata con disaggregazione top-down

I_c = insieme delle province appartenenti al cluster c

Per quanto riguarda il benzene, le emissioni considerate come metodologia Copert sono state calcolate per classe veicolare a partire dalle rispettive emissioni di COVNM, in accordo con quanto riportato in "Emissioni di benzene in Italia dal 1990 al 2000" (De Lauretis et al., 2003). In questo modo è stato possibile valutare un indice di variazione per settore anche nel caso del benzene, altrimenti valutato da Copert III solo a livello di macrosettore.

In Tabella 4 sono riportati i risultanti indici di variazione dove il valore negativo di V_c^k sta a significare che la stima relativa al cluster c ed effettuata mediante la metodologia Copert è superiore alla stima top-down.

Tabella 4: indici di variazione dei cluster per i sei inquinanti considerati per il 2003

Cluster	Settore veicolare	PM10	NO _x	COVNM	NH ₃	C ₆ H ₆	CO
1	Auto passeggeri	-0,07	-0,12	-0,13	-0,03	-0,03	0,01
	Veicoli commerciali leggeri	-0,02	-0,01	0,07	0,17	-0,03	0,09
	Veicoli pesanti e autobus	-0,10	-0,13	-0,14	-0,12	-0,26	-0,13
	Ciclomotori	0,05	0,07	0,07	0,06	+0,08	0,07
	Motocicli	0,01	0,07	0,12	0,09	+0,09	0,11
	Emissioni evaporative	-	-	-0,04	-	-0,16	-
2	Auto passeggeri	0,07	0,07	-0,22	0,14	-0,13	-0,06
	Veicoli commerciali leggeri	-0,04	0,01	-0,04	0,24	-0,17	-0,03
	Veicoli pesanti e autobus	0,10	0,10	0,04	0,17	-0,07	0,05
	Ciclomotori	-0,20	-0,17	-0,17	-0,17	-0,15	-0,18
	Motocicli	0,01	0,15	0,04	0,09	0,01	0,11
	Emissioni evaporative	-	-	0,02	-	-0,10	-

segue

Cluster	Settore veicolare	PM10	NO _x	COVNM	NH ₃	C ₆ H ₆	CO
3	Auto passeggeri	0,09	0,07	-0,15	0,10	-0,07	0,00
	Veicoli commerciali leggeri	0,04	0,08	0,06	0,29	-0,05	0,07
	Veicoli pesanti e autobus	0,00	-0,02	-0,05	0,06	-0,17	-0,03
	Ciclomotori	-0,15	-0,14	-0,13	-0,15	-0,11	-0,13
	Motocicli	-0,02	0,09	0,03	0,04	0,00	0,08
	Emissioni evaporative	-	-	0,06	-	-0,19	-
4	Auto passeggeri	-0,19	-0,25	0,08	-0,81	0,11	0,15
	Veicoli commerciali leggeri	0,05	0,02	0,11	-2,25	0,05	-0,03
	Veicoli pesanti e autobus	0,06	0,07	0,04	-0,07	-0,08	0,04
	Ciclomotori	0,29	0,29	0,29	0,26	0,30	0,29
	Motocicli	-0,01	0,22	0,18	-0,01	0,15	0,05
	Emissioni evaporative	-	-	-0,10	-	-0,23	

L'emissione corretta per l'*i*-esima provincia inclusa nel cluster *c* e settore veicolare *k* è:

$$\bar{E}_i^k = E_i^k (1 - V_c^k).$$

dove E_i^k è la stima provinciale ottenuta utilizzando la metodologia *top-down*.

2.2 La disaggregazione in area urbana

A partire dalla disaggregazione su base provinciale dell'inventario nazionale si è proceduto ad una valutazione delle emissioni, per gli anni 1995, 2000 e 2003, relative ai capoluoghi di provincia italiani con una popolazione superiore a 150.000 abitanti. Le 24 città oggetto di studio sono state: Torino, Genova, Milano, Brescia, Verona, Trieste, Venezia, Padova, Modena, Parma, Bologna, Firenze, Prato, Livorno, Roma, Napoli, Bari, Foggia, Taranto, Reggio Calabria, Messina, Catania, Palermo, Cagliari.

2.2.1 Dalla stima provinciale alla stima in ambito urbano

La metodologia usata per stimare le emissioni in ambito urbano prosegue l'approccio *top-down* utilizzato per la disaggregazione provinciale: sono state adottate per ciascuna categoria emissiva delle variabili *proxy* che fossero disponibili a livello comunale e correlate con l'attività emissiva (ad esempio il numero degli addetti per quanto riguarda le attività produttive, la lunghezza delle strade asfaltate per i trasporti su strada, la lunghezza dei tratti navigabili per le vie di navigazione interna, ecc.). La seguente Tabella 5 riporta le fonti delle variabili *proxy* a livello comunale che sono state utilizzate per la disaggregazione spaziale delle emissioni.

Tabella 5: indicatori utilizzati per la disaggregazione a livello comunale

Fonte	Descrizione	Variabile <i>proxy</i>
ISTAT	Censimento industria e servizi	Numero di addetti
ISTAT	Tavole edilizia	Numero nuove abitazioni
ISTAT	Censimento popolazione	Popolazione residente
Elaborazione ARPA Lombardia		Lunghezza tratti navigabili
Elaborazione ARPA Lombardia		Lunghezza strade asfaltate
Elaborazione ARPA Lombardia		Lunghezza rete ferroviaria

Il numero di addetti alle unità locali delle imprese è stato largamente impiegato come *proxy* per la disaggregazione dei macrosettori 03 (combustione industriale), 04 (attività produttive) e 06 (uso di solventi). La fonte dei dati è il censimento generale dell'industria e dei servizi degli anni 1996 e 2001 (ISTAT, 2001). Gli addetti del censimento 1996 sono stati utilizzati come *proxy* per il 1995, mentre quelli del 2001 sono stati utilizzati come *proxy* per gli anni 2000 e 2003, opportunamente rimodulati in base ai consumi elettrici delle imprese nei rispettivi anni. La popolazione residente, provinciale e comunale, è stata impiegata per la disaggregazione comunale del macrosettore 02 (riscaldamento), alcune attività dei macrosettori 05 (estrazione e distribuzione di combustibili fossili) e 07 (trasporti stradali). Il numero di nuove abitazioni per provincia e comune è stato impiegato come *proxy* per disaggregare due attività, legate all'utilizzo di solventi in ambito domestico, del macrosettore 06 (uso di solventi).

Si è assunto come ipotesi di base che l'area urbana sia coincidente con il territorio comunale. Tale approssimazione semplifica il reperimento delle variabili *proxy* con cui effettuare la disaggregazione dell'inventario e consente di valutare le emissioni relative a tutte le sorgenti contenute nei limiti comunali.

Per valutare il contributo delle sorgenti puntuali è stato adottato un approccio differente basato sulla valutazione di quanto il processo emissivo si manifesti in ambito urbano attraverso l'attribuzione di un coefficiente q compreso tra 0 ed 1. Più precisamente l'emissione provinciale dovuta all'attività emissiva delle sorgenti puntuali è stata attribuita alla corrispondente area urbana in base ad una quota variabile tra 0 ed 1 ottenuta rapportando le emissioni dovute agli impianti presenti nell'area urbana sul totale provinciale delle emissioni. Di conseguenza, per una certa area urbana, la quota q è pari a 0 se non è presente alcun impianto all'interno del confine comunale, ed è pari ad 1 se tutti gli impianti della provincia si trovano all'interno dell'area urbana. Si ottengono valori di q compresi fra 0 ed 1 nei casi in cui solo una parte degli impianti provinciali è localizzata nell'area urbana.

In alcuni casi (estensione delle foreste, macchia mediterranea, ecc.), in analogia con la metodologia adottata nel primo rapporto APAT sulle aree urbane, è stato attribuito un valore costante al coefficiente q per le varie città.

Volendo valutare le emissioni in ambito urbano non si è preso in considerazione il macrosettore 10 (agricoltura e allevamento) in quanto ritenuto non rilevante rispetto agli altri macrosettori. Al fine di rendere omogenei i confronti nei grafici e nelle tabelle seguenti il contributo del macrosettore 10 non è stato considerato per le emissioni provinciali e nazionali.

3. LE EMISSIONI IN ATMOSFERA NELLE 24 CITTÀ: I RISULTATI

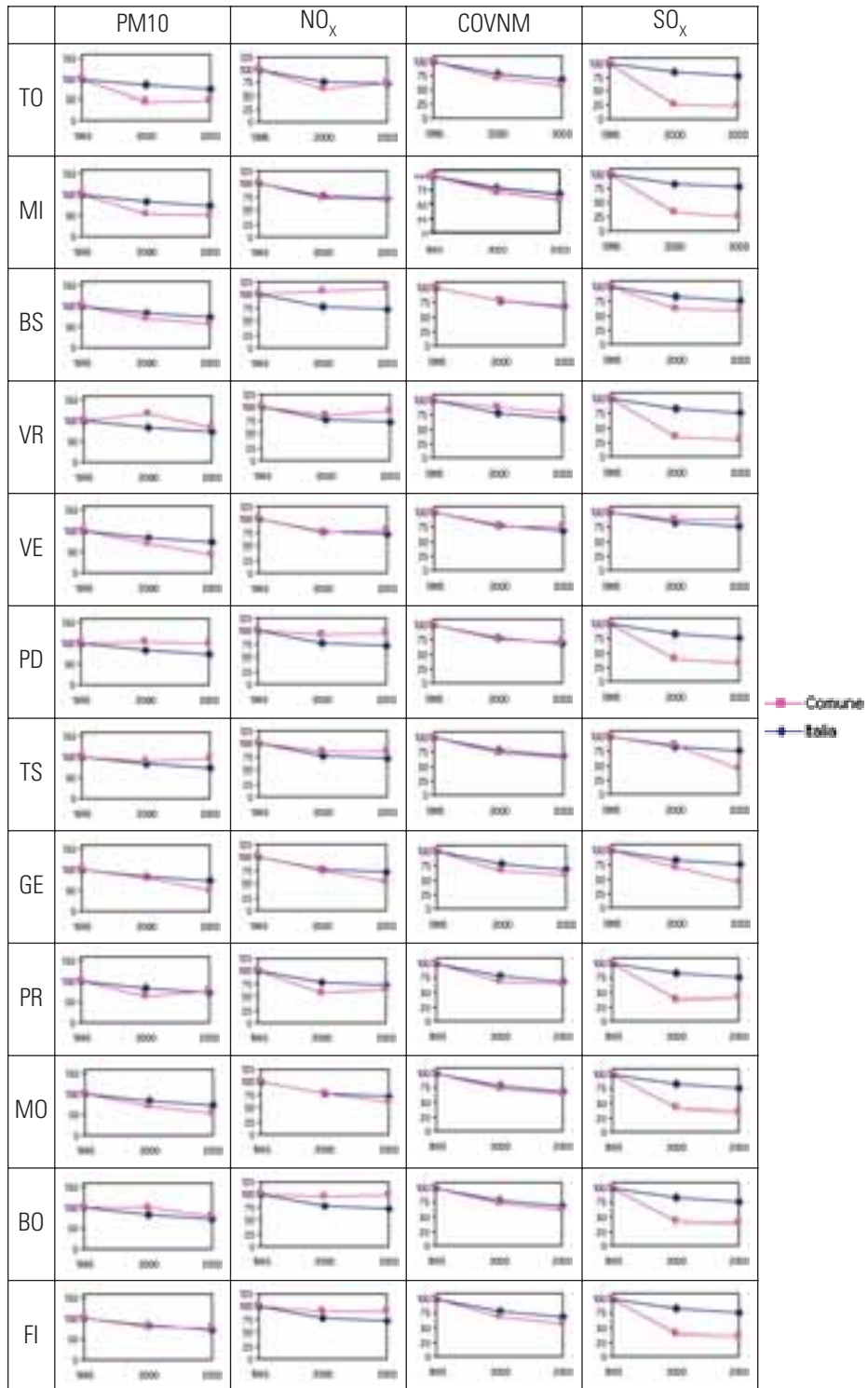
Nella Tabella 6 vengono riportate le emissioni comunali totali nelle 24 aree urbane per i diversi inquinanti considerati, assieme alle percentuali comunali delle emissioni provinciali per il 2003.

Tabella 6: emissioni comunali (esprese in tonnellate) nelle 24 aree urbane e pesi percentuali rispetto alla relative province di appartenenza – anno 2003

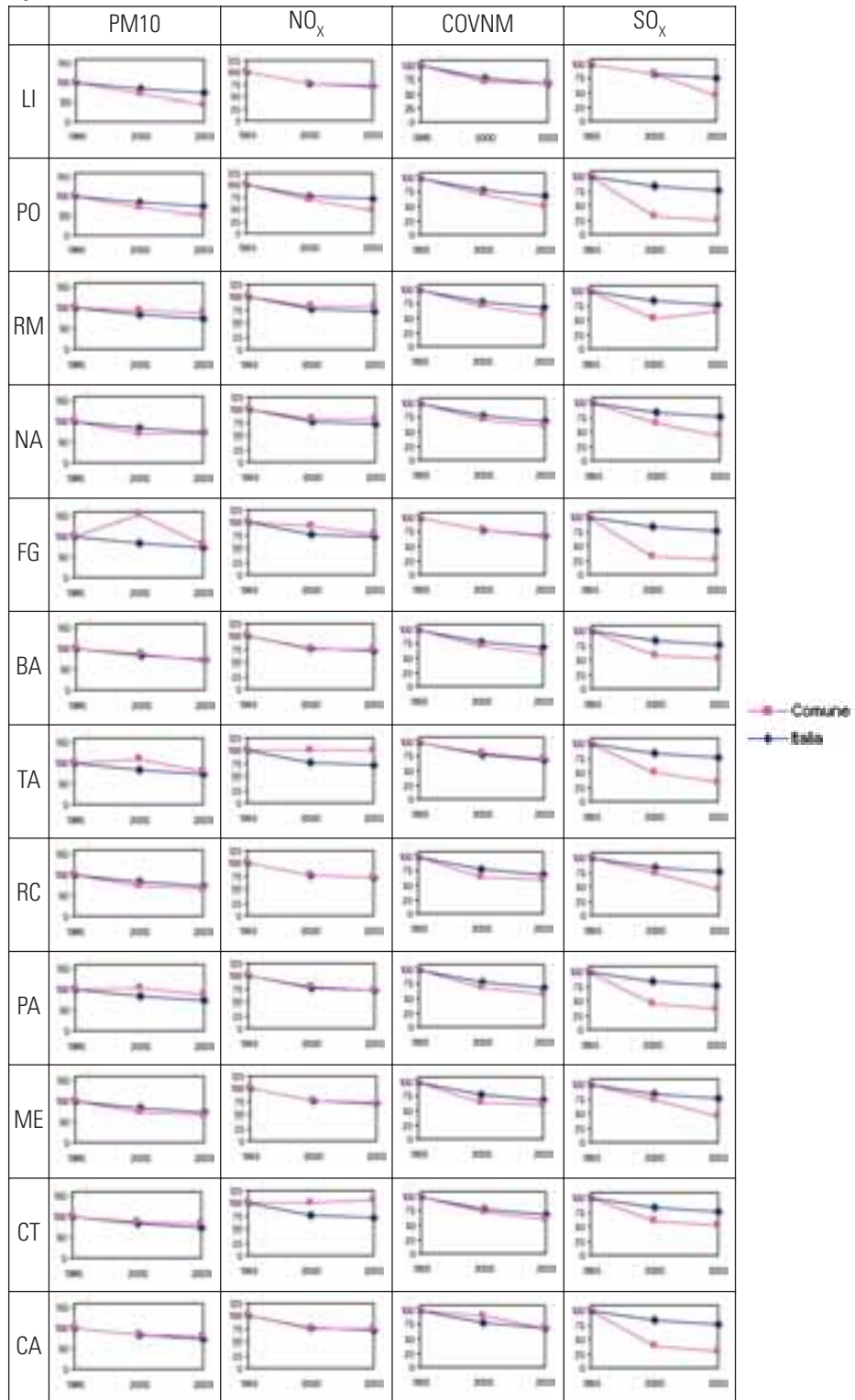
	PM10		NO _x		COVNM		SO _x		NH ₃		C ₆ H ₆		CO	
	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.	Comune	% Pr.
TO	1008	15	9357	21	16375	32	1338	25	282	32	199	34	48499	28
MI	1435	16	12104	18	21426	26	2101	15	263	18	350	31	76262	25
BS	342	10	2754	13	3010	12	1774	38	18	3	13	5	7619	12
VR	230	10	2018	11	4674	22	263	13	25	8	70	30	10420	22
VE	1177	44	20060	62	7154	34	22659	95	39	13	66	26	16589	27
PD	199	8	1871	10	2930	15	239	7	24	7	35	18	7758	18
TS	395	70	3483	68	6622	84	1058	91	19	58	84	87	17435	84
GE	1116	51	11449	59	14165	63	8320	84	182	52	205	67	50449	65
PR	380	27	2765	25	3247	35	596	43	18	13	45	38	7882	29
MO	264	14	1215	9	3546	22	435	6	66	27	45	25	9531	23
BO	462	15	6762	32	6154	29	683	20	58	14	85	35	20628	22
FI	311	12	4269	23	5969	29	489	14	39	12	87	32	19396	27
LI	418	28	6303	38	6139	37	12744	56	23	21	83	34	13549	29
PO	95	37	892	43	2388	69	321	64	9	28	33	69	6233	64
RM	2377	37	23838	32	39175	62	6534	31	992	50	664	63	144963	59
NA	1238	26	16625	32	21838	30	6054	34	126	17	340	30	74881	30
FG	158	10	1546	11	3251	23	109	13	62	21	35	19	7733	17
BA	407	14	4890	20	6051	19	2781	59	44	9	62	13	21246	20
TA	1668	69	12296	69	6984	51	14345	98	14	8	320	76	32306	58
RC	759	50	12452	64	20520	69	8018	92	15	7	221	70	44309	68
PA	564	27	4752	21	9782	49	603	11	211	46	171	50	35287	45
ME	837	32	13077	37	20634	52	8086	24	30	10	241	50	49703	51
CT	379	24	5060	34	4631	29	668	55	131	35	77	28	16054	27
CA	154	6	1442	7	2868	12	331	2	9	4	26	10	7310	13

Nei grafici seguenti (Figura 1) sono riportate le emissioni dei sette inquinanti considerati per le 24 aree urbane evidenziando l'andamento dal 1995 al 2003 in confronto all'andamento nazionale sotto forma di numero indice con valore 100 nel 1995. L'unico *trend* crescente, al netto del contributo dell'agricoltura, risulta essere quello dell'ammoniaca.

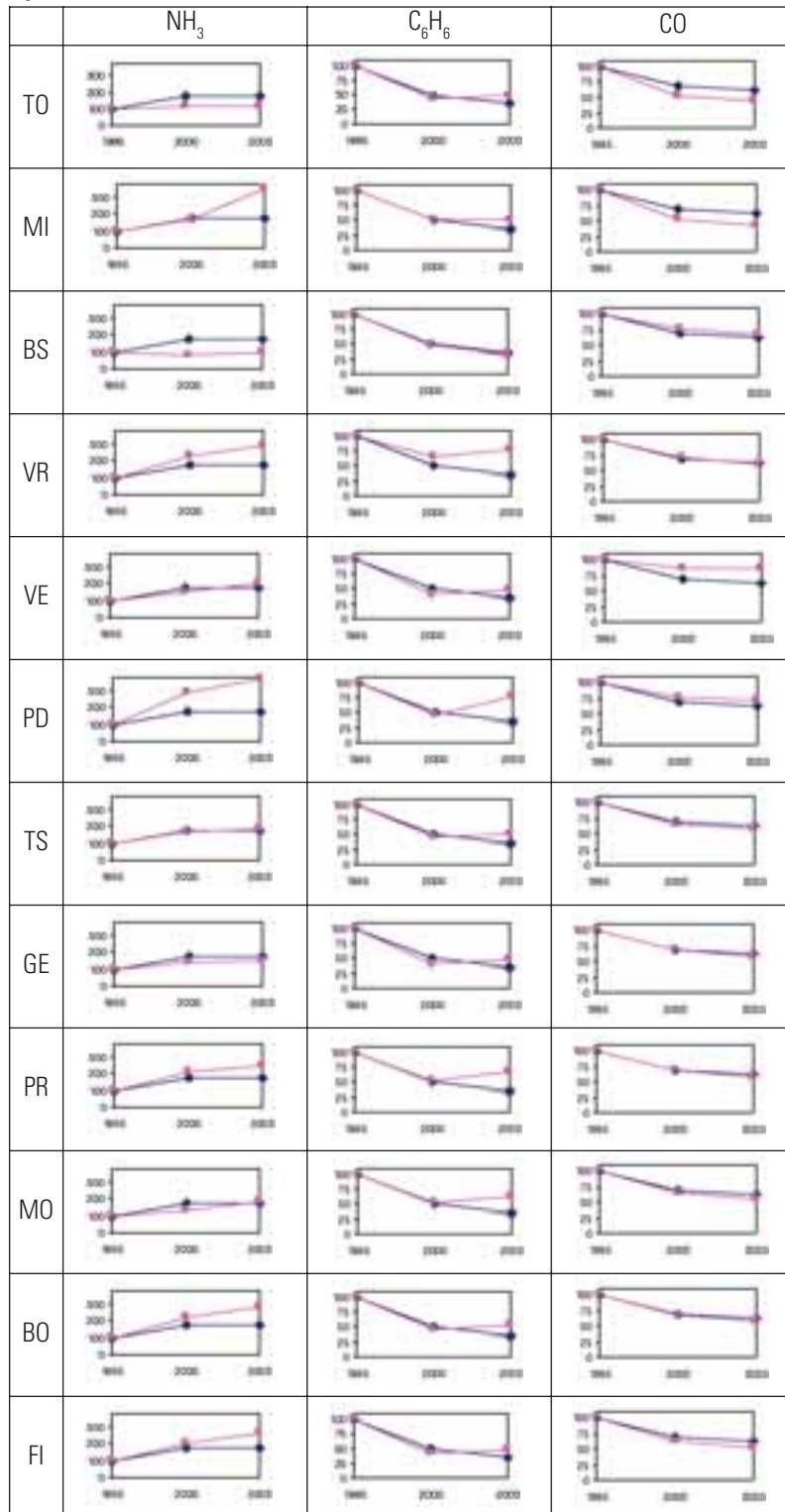
Figura 1: Confronto fra le emissioni nazionali e le emissioni delle 24 aree urbane sotto forma di numero indice con valore 100 nel 1995.



segue

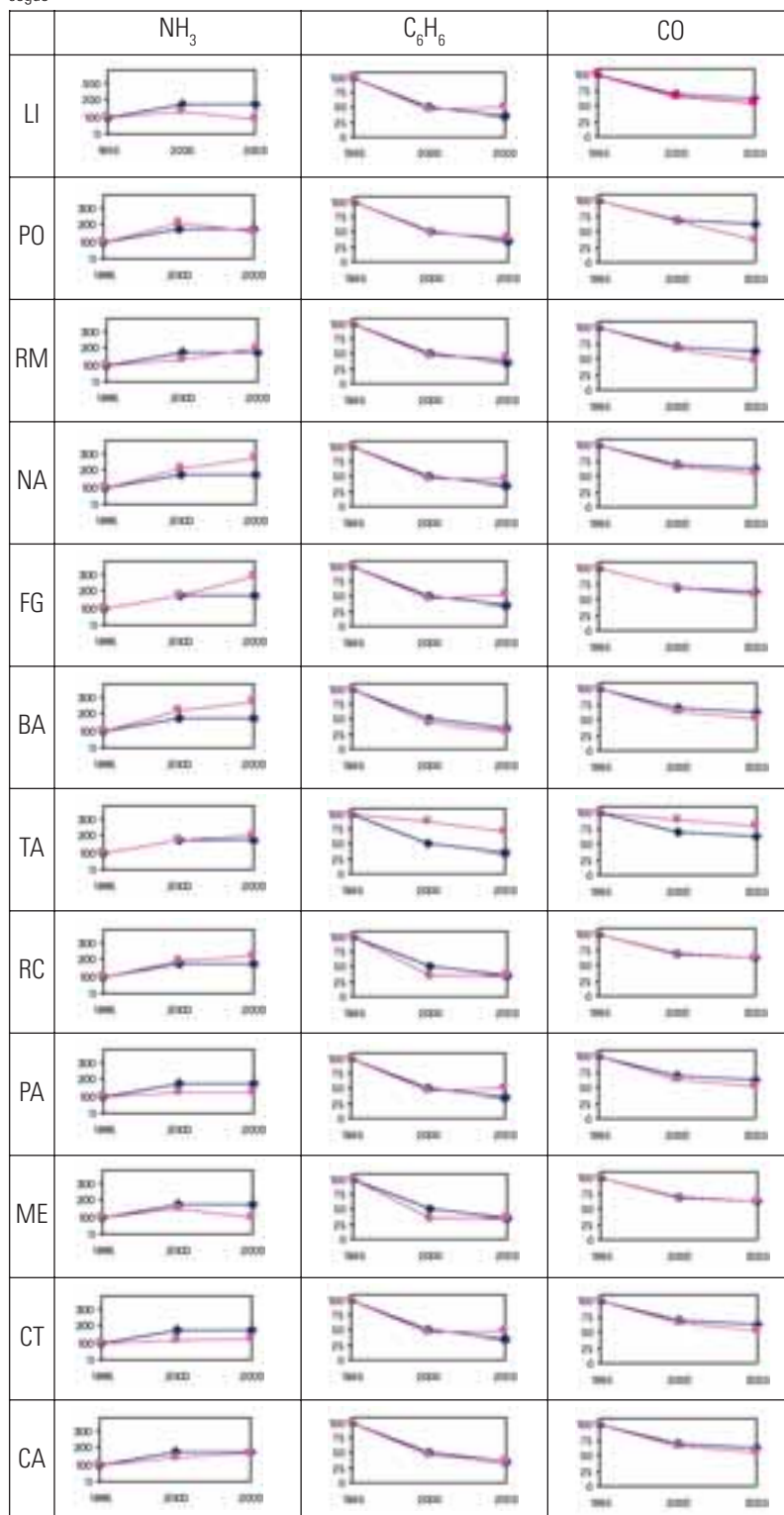


segue



Comune
Italia

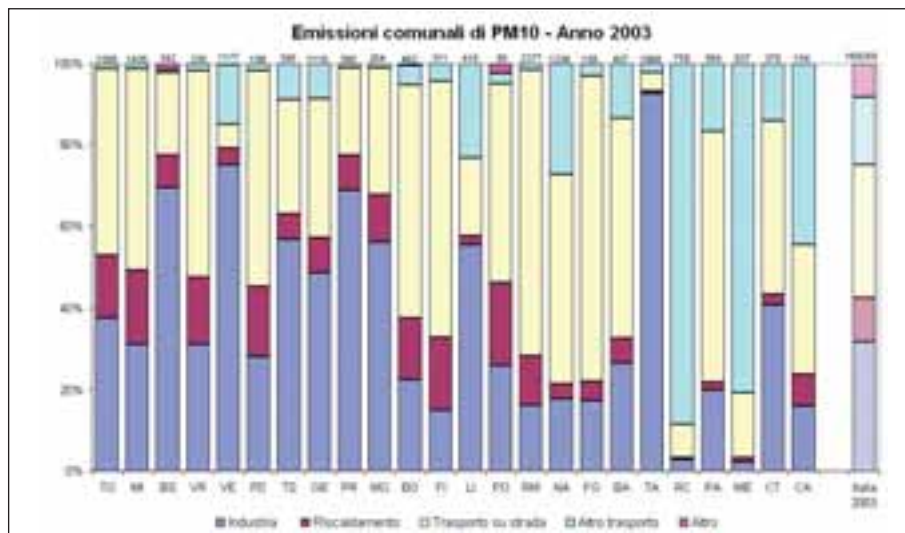
segue



Comune
Italia

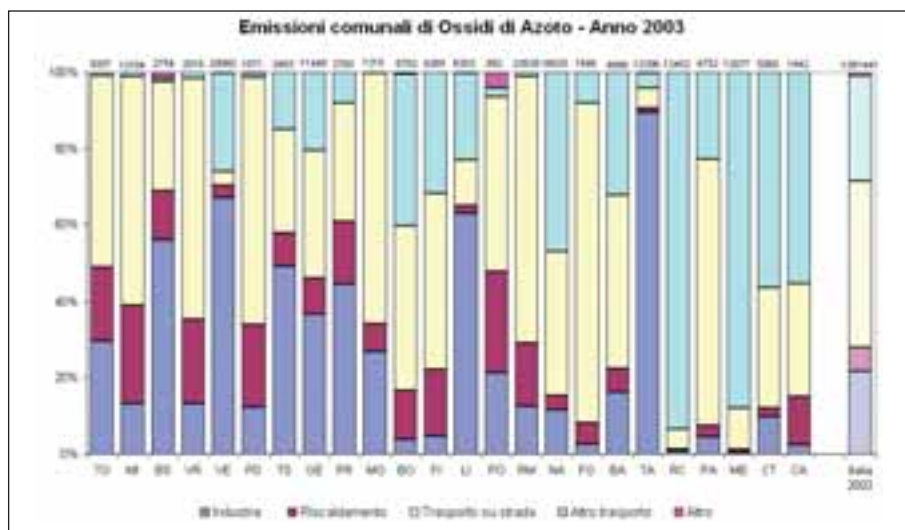
Per le emissioni di PM10 (Figura 2) il trasporto su strada costituisce la principale sorgente emissiva per oltre il 50% delle aree urbane considerate, tra cui le più grandi città italiane. In particolare per Roma il contributo del trasporto su strada alle emissioni di PM10 è del 70%. Il contributo del settore industriale è consistente in particolar modo per le aree urbane in cui sono localizzati grandi poli industriali (Taranto, Genova e Venezia); a Reggio Calabria e Messina è preponderante il contributo del trasporto marittimo incluso nella voce altro trasporto. Per le città del Centro-Nord risulta rilevante il contributo del macrosettore riscaldamento.

Figura 2: Emissioni comunali di PM10 - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)



La distribuzione di ossidi di azoto nelle diverse aree urbane (Figura 3) mette in evidenza i contributi emissivi del trasporto su strada e del settore industriale. Le città di Venezia, Taranto, Livorno e Brescia sono caratterizzate da un forte contributo dovuto agli impianti industriali. Nel

Figura 3: Emissioni comunali di ossidi di azoto - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)



caso di Brescia è rilevante l'apporto del teleriscaldamento (incluso nel macrosettore aggregato industria). Si distinguono Reggio Calabria, Messina, Catania, Cagliari e Napoli con un importante peso percentuale del trasporto marittimo e Bologna per il trasporto aereo.

Le emissioni relative ai composti organici volatili non metanici (Figura 4) sono essenzialmente dovute all'uso dei solventi, che interessano principalmente l'industria e, in misura minore, il domestico, ed al trasporto su strada, tranne che per le aree di Messina e Reggio Calabria dove incide il peso del trasporto marittimo; a Venezia, Trieste, Livorno e Taranto, oltre al contributo delle emissioni da solventi emerge un significativo contributo degli altri processi industriali.

Dall'analisi effettuata emerge che il settore industriale fornisce il maggior apporto alle emissioni comunali di ossidi di zolfo (Figura 5); i pesi percentuali più alti (90%-95%) si registrano a

Figura 4: Emissioni comunali di COVNM - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)

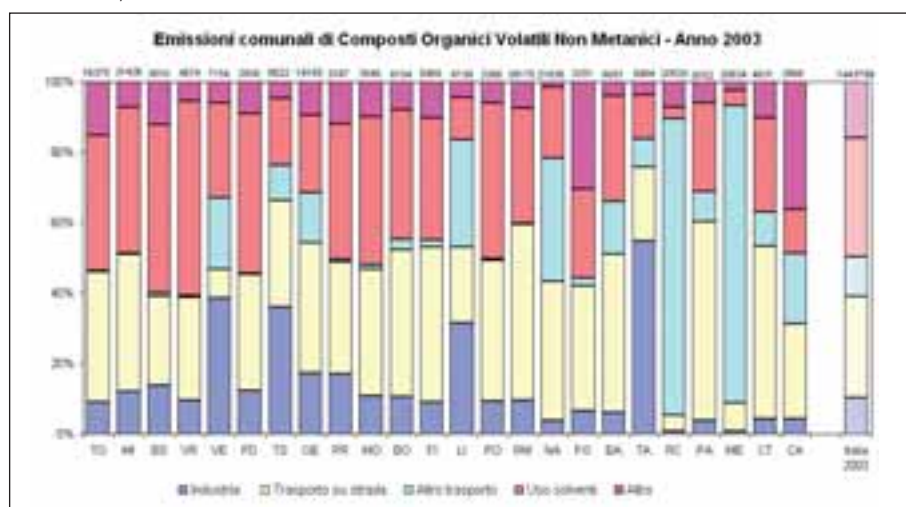
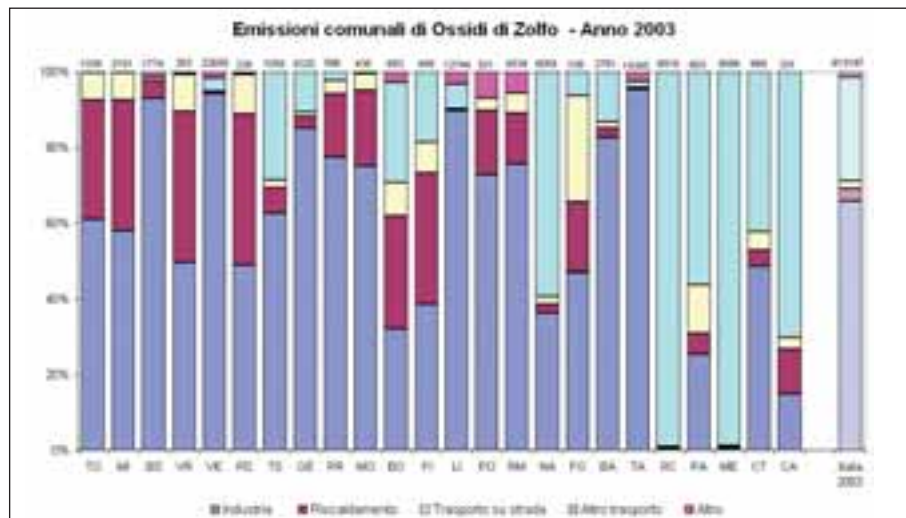


Figura 5: Emissioni comunali di ossidi di zolfo - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)



Livorno, Venezia e Taranto dove raffinerie, impianti di produzione di energia elettrica e impianti siderurgici, ricadono all'interno dell'area urbana; per le città portuali è rilevante il contributo del trasporto marittimo, in particolare per Reggio Calabria e Messina.

Il contributo maggiore alle emissioni di ammoniaca (Figura 6) proviene dal trasporto su strada per quasi tutte le 24 aree comunali prese in considerazione, in particolare per Firenze e Padova rappresenta l'unica fonte emissiva. Per Torino, Genova, Roma e Palermo è rilevante invece il peso del macrosettore del trattamento dei rifiuti e discariche, considerato nella categoria altro insieme al macrosettore natura, che arriva fino al 69% del totale comunale nel caso di Palermo. Per Venezia è importante il contributo dell'industria attribuito agli impianti di produzione di energia elettrica.

In merito alle emissioni di benzene (Figura 7), è il macrosettore del trasporto su strada a fornir

Figura 6: Emissioni comunali di ammoniaca - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)

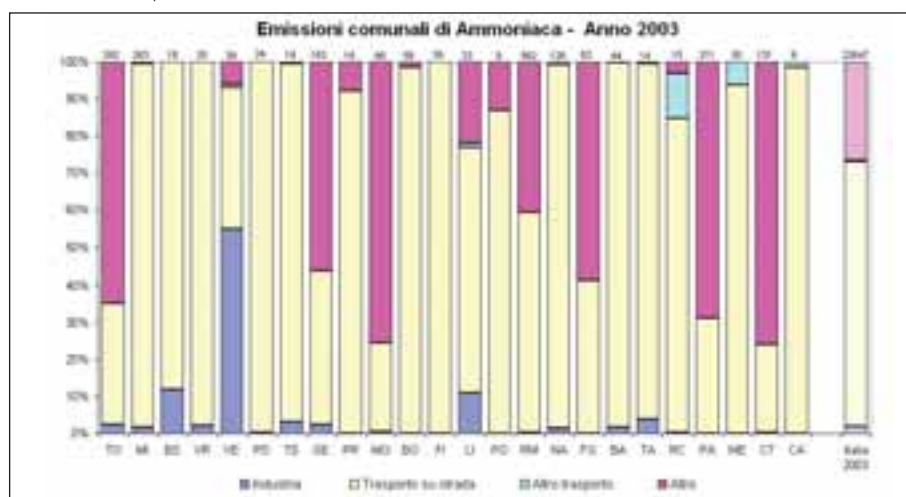
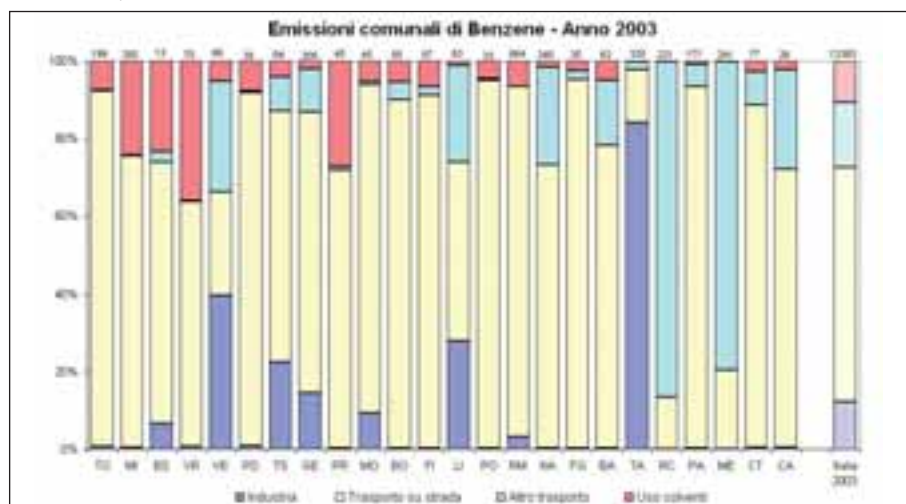


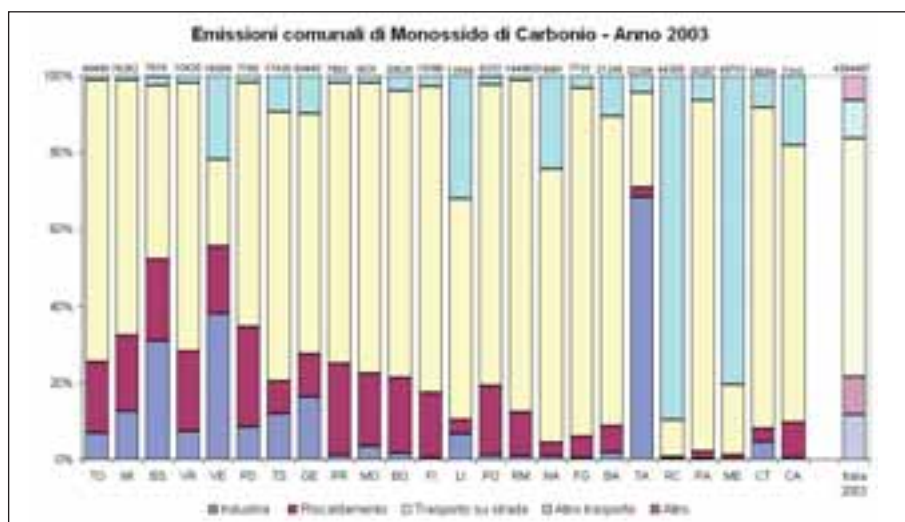
Figura 7: Emissioni comunali di benzene - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)



re il maggior contributo emmissivo; per le città portuali è consistente il contributo dovuto al trasporto marittimo. Per Parma, Verona e Milano è anche rilevante la percentuale relativa all'uso dei solventi. Si distinguono importanti contributi di natura industriale (impianti siderurgici, impianti di produzione di energia elettrica e raffinerie) nelle aree comunali di Taranto (84%), Venezia (40%), Livorno (28%) e Genova (15%).

Le emissioni di monossido di carbonio (Figura 8) sono dovute prevalentemente al trasporto su strada ad eccezione di Taranto per la presenza di grandi siti industriali e delle città portuali per il maggior peso del traffico marittimo (con un peso fino al 90% nel caso di Reggio Calabria). Per le città del centro-nord è consistente anche il contributo del riscaldamento.

Figura 8: Emissioni comunali di monossido di carbonio - ripartizione settoriale (in alto sono riportate le emissioni totali in tonnellate)



La Figura 9 riporta il trend delle emissioni comunali di PM10 nelle 24 aree urbane oggetto di studio. Le emissioni decrescono quasi ovunque, i valori più elevati del 2003 sono a Roma, Taranto e Milano. Normalizzando le emissioni per la popolazione dei rispettivi anni, si ottiene il grafico riportato in Figura 10. Viene mantenuto un *trend* decrescente nella maggior parte delle aree urbane, ma assumono una maggiore importanza le emissioni relative alle città meno densamente popolate.

Figura 9: Emissioni comunali di PM10 per gli anni 1995, 2000 e 2003

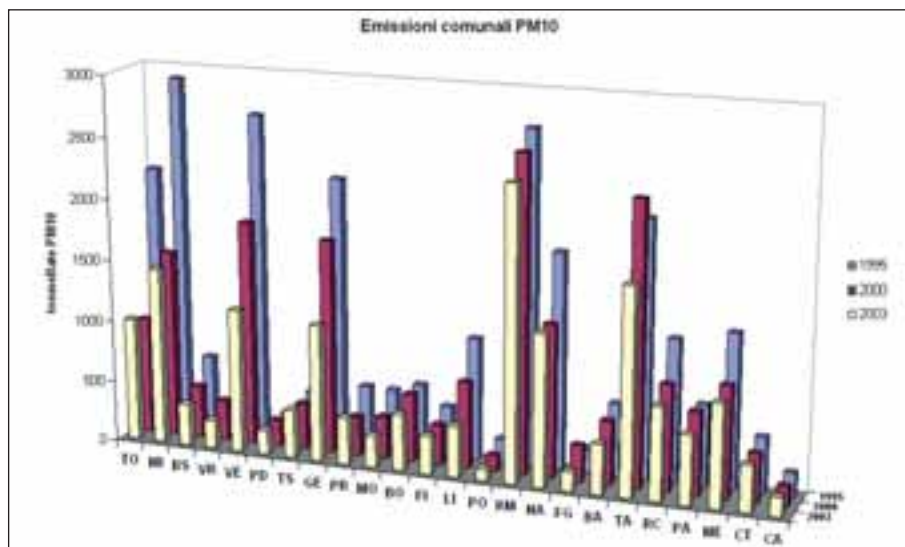
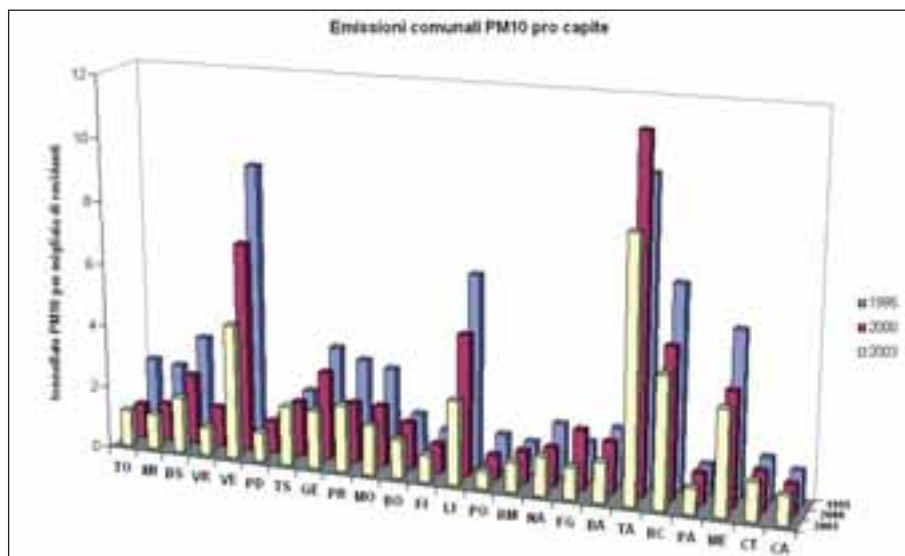


Figura 10: Emissioni comunali di PM10 pro capite per gli anni 1995, 2000 e 2003



Analizzando per tutti gli inquinanti la distribuzione dei valori assoluti delle emissioni e dei valori pro capite emerge che la distribuzione dei valori assoluti presenta una maggiore variabilità in termini di dispersione attorno al proprio valore medio. Tale tendenza è confermata se si prende in considerazione un indice adimensionale di variabilità come il coefficiente di variazione (CV) ottenuto come rapporto tra deviazione standard e media. I risultati di tale analisi sono riportati in Tabella 7.

Tabella 7: Coefficienti di variazione delle emissioni

Anno	Inquinante	CV emissioni assolute	CV emissioni pro capite
1995	PM10	85,13	86,53
	NO _x	85,64	96,07
	COVNM	98,89	95,52
	SO _x	125,41	167,29
	NH ₃	173,32	82,58
	C ₆ H ₆	109,36	104,88
	CO	116,61	64,14
2000	PM10	84,33	97,84
	NO _x	83,78	93,79
	COVNM	97,45	80,66
	SO _x	136,08	175,24
	NH ₃	160,46	64,17
	C ₆ H ₆	109,53	109,16
	CO	113,08	63,54
2003	PM10	83,85	88,43
	NO _x	84,53	101,20
	COVNM	90,86	86,58
	SO _x	137,14	167,08
	NH ₃	181,73	67,22
	C ₆ H ₆	102,27	95,10
	CO	103,20	70,07

Come si può notare dalla tabella, i coefficienti di variazione relativi alle emissioni assolute sono generalmente superiori a quelli ottenuti normalizzando rispetto alla popolazione, tranne nel caso di SO_x e NO_x in modo marcato e del PM10 in maniera più contenuta. Ciò può essere imputato al fatto che le emissioni di tali inquinanti sono in gran parte dovute al settore industriale che non dipende dalla popolazione. Tale singolarità si ripete per tutti e tre gli anni.

4. CONCLUSIONI

Le emissioni comunali presentate in questo rapporto sono state ottenute applicando la metodologia di disaggregazione *top-down* alle stime delle emissioni nazionali. Tale procedimento, se da un lato introduce un elemento di incertezza nel processo di stima, dall'altro consente di applicare una metodologia uniforme su tutto il territorio nazionale. Si rendono così possibili i confronti fra le diverse entità territoriali e la costruzione di *trend* temporali. In particolare, per il settore trasporti su strada è stata applicata un'analisi statistica multivariata per il solo anno 2003 al fine di caratterizzare meglio le emissioni rispetto a variabili legate soprattutto alla composizione del parco veicolare. Ciò rende più preciso il confronto fra le città con riferimento al 2003, ma introduce un elemento di discontinuità nelle serie storiche che tuttavia non inficia il confronto temporale con gli anni precedenti effettuato a livello di macrosettore.

Nel presente lavoro è stato adottato un approccio che prevede un facile reperimento delle variabili *proxy*, trasparenza e tracciabilità dei dati, con l'obiettivo di mettere a punto una meto-

dologia che permetta di realizzare la disaggregazione provinciale e comunale dell'inventario nazionale delle emissioni con cadenza annuale.

L'analisi dei dati mostra un *trend* decrescente per tutti gli inquinanti fatta eccezione per l'ammoniaca che presenta un andamento crescente, escludendo la componente agricoltura. I trasporti su strada e l'industria (inclusa la produzione di energia) sono i macrosettori che contribuiscono in maggior misura per tutti gli inquinanti. Per le città portuali, in particolare Reggio Calabria e Messina, vi è un forte contributo dovuto al trasporto marittimo (incluso nel macrosettoe altri trasporti).

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Servizio Sviluppo sostenibile e cambiamenti climatici dell'APAT e in particolare Riccardo De Lauretis per aver fornito i dati dell'inventario nazionale delle emissioni e per le utili indicazioni date nel corso del lavoro.

Si ringrazia ARPA Lombardia e in particolare Elisabetta Angelino, Edoardo Peroni e Giuseppe Fossati per l'aiuto fornito nel reperimento di alcune *proxy* e per le elaborazioni cartografiche relative alle vie di navigazioni interne, la rete stradale, le rete di distribuzione SNAM e la rete ferroviaria.

Si ringrazia Pier Giorgio Catoni dell'ENEA per aver fornito i bilanci energetici regionali del 1995 e 2003.

RIFERIMENTI

R. De Lauretis, R. Liburdi, *"Emissioni in atmosfera nelle aree urbane"* in: "Qualità dell'ambiente urbano. I rapporto APAT", APAT/2004.

C. Pertot, G. Pirovano, G. M. Riva, *"Inventari delle emissioni in atmosfera nelle aree urbane"* in: "Qualità dell'ambiente urbano. Il rapporto APAT", APAT/2005.

R. Liburdi, R. De Lauretis, C. Corrado, E. Di Cristofaro, B. Gonella, D. Romano, G. Napolitani, G. Fossati, E. Angelino, E. Peroni, *"La disaggregazione a livello provinciale dell'inventario nazionale delle emissioni"*. APAT CTN-ACE, 2004.

S. Saija, R. De Lauretis, R. Liburdi, *"Sviluppo ed uso di metodologie per la stima delle emissioni atmosferiche da trasporto stradale in Italia su scala provinciale"*, Rapporto 4/2001 ANPA.

S. Saija, D. Romano, *"Top-down methodology and multivariate statistical analysis to estimate road transport emissions at different territorial levels"*, Rapporto 5/2001 ANPA.

R Development Core Team (2005). *"R: A language and environment for statistical computing"*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

ISTAT, *"VIII Censimento generale dell'industria e dei servizi, 22 Ottobre 2001"*, <http://dwcis.istat.it/cis/index.htm>.

L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO NEI PRINCIPALI AGGLOMERATI ITALIANI

N. Di CARLO, C. MASTROFRANCESCO, F. MORICCI

APAT - Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale Servizio Area Urbana

ABSTRACT

L'inquinamento atmosferico costituisce un problema di grande attualità specialmente nelle aree urbane per la coesistenza in esse di numerose fonti inquinanti e di un'elevata concentrazione della popolazione esposta. Il presente lavoro costituisce un aggiornamento e un approfondimento dell'analisi della qualità dell'aria nei principali agglomerati italiani condotta già negli anni 2004 e 2005 per la redazione del Rapporto APAT sulla qualità dell'ambiente urbano. Il contributo prevede infatti l'estensione dell'analisi a 10 nuove realtà urbane rispondenti al criterio di avere popolazione maggiore di 150.000 abitanti (dati Istat 2001) ed in particolare si pone come obiettivi: l'integrazione dell'analisi degli agglomerati considerati, l'aggiornamento dell'analisi delle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria; l'aggiornamento al 2005 delle serie storiche delle concentrazioni e dei superamenti dei valori limite e della soglia di informazione degli inquinanti considerati (PM_{10} , NO_2 , SO_2 , C_6H_6 ed O_3).

Dall'analisi dei questionari e dalle informazioni raccolte tramite i gestori di rete e le autorità competenti risulta che gli agglomerati presi in considerazione sono quasi tutti costituiti da aree territoriali continue ad eccezione dei tre agglomerati a cui appartengono rispettivamente: Venezia Padova e Verona, Bari e Foggia, Taranto. Tali agglomerati sono infatti costituiti da porzioni territoriali ampie ma non adiacenti e per le aree urbane ricadenti in essi si è stabilito di seguire il criterio, già adottato lo scorso anno, di considerare, ai fini dell'analisi, i singoli comuni di Venezia, Padova, Verona, Bari, Foggia e Taranto. Un'ulteriore particolarità è costituita da Reggio Calabria, città il cui territorio non è stato ancora zonizzato. L'analisi di questa realtà urbana è stata pertanto condotta considerando unicamente il territorio comunale. Sono state invece analizzate insieme le aree urbane di Firenze e Prato, poiché appartenenti al medesimo agglomerato e poiché tra loro adiacenti.

Dall'analisi condotta sulle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria risulta che sono stati apportati dalle autorità competenti alcuni cambiamenti al set di stazioni di monitoraggio sia in termini di numero di stazioni selezionate che in termini di tipologia (alcune variazioni sono in realtà dovute a correzioni delle tipologie di stazioni effettuate dalle autorità competenti sul database BRACE dell'APAT). Il confronto tra i valori degli indicatori nelle diverse aree urbane condotto sul medesimo anno evidenzia l'esistenza di una certa disomogeneità tra le scelte adottate dalle Regioni.

Per quanto riguarda le serie storiche delle concentrazioni e dei superamenti, i dati raccolti confermano una situazione piuttosto critica per il PM_{10} : nelle aree urbane considerate si verificano infatti per la quasi totalità degli anni presi in esame superamenti dei limiti di legge sia in termini di concentrazione media annua sia in termini di numero di giorni di superamento del valore limite giornaliero. Maggiori superamenti si registrano generalmente nelle stazioni di tipo traffico rispetto alle stazioni di fondo a testimoniare il notevole contributo del traffico sull'inquinamento dell'aria nelle aree urbane. Anche relativamente alle concentrazioni medie annue di NO_2 i valori massimi registrati nelle stazioni di traffico, tranne poche eccezioni, superano il valore limite per l'intero periodo in esame. Per quanto riguarda il numero di ore di superamento della concentrazione media oraria in diversi agglomerati si osservano generali miglioramenti. Nel caso del C_6H_6 e dell' SO_2 gli andamenti riportati evidenziano una tendenza complessiva alla diminuzione delle concentrazioni in aria di questi inquinanti.

In pratica l'analisi effettuata in base ai dati disponibili ha messo in evidenza che tutti gli ag-

glomerati, ad eccezione di Foggia-Bari e Taranto, hanno registrato almeno un superamento di uno degli inquinanti monitorati. Principali responsabili dei superamenti, come già detto, sono risultati essere il PM_{10} e l' NO_2 .

1. PREMESSA

L'inquinamento atmosferico costituisce un problema di grande attualità specialmente nelle aree urbane per la coesistenza in esse di numerose fonti inquinanti (principalmente trasporti e riscaldamento) e di un'elevata densità della popolazione esposta. L'impatto degli inquinanti atmosferici sulla salute umana ha forti ripercussioni a livello sanitario, come dimostrato ormai da numerosi studi condotti da organismi/enti di ricerca di carattere nazionale ed internazionale. Non da ultimo, si ricorda il risultato di un recente studio condotto dall'OMS per conto dell'APAT ("Impatto sanitario del PM_{10} e dell'ozono in 13 città italiane", anno 2006) che stima pari a circa 8.000 il numero di morti l'anno, tra il 2002 e il 2004, dovuti agli effetti a lungo termine delle concentrazioni di PM_{10} in 13 grandi città italiane.

2. INTRODUZIONE

Il presente lavoro costituisce un aggiornamento e un approfondimento dell'analisi della qualità dell'aria nei principali agglomerati italiani condotta negli anni 2004 e 2005 ai fini della redazione del "Rapporto APAT sulla qualità dell'ambiente urbano". Il contributo prevede infatti l'estensione dell'analisi a 10 nuove realtà urbane rispondenti al criterio di essere capoluoghi di provincia e di avere popolazione maggiore di 150.000 abitanti (dati ISTAT 2001). In particolare il contributo si pone come obiettivi:

- l'integrazione dell'analisi degli agglomerati definiti dalla normativa con dati aggiornati su popolazione, superficie e comuni compresi;
- l'aggiornamento dell'analisi delle centraline di monitoraggio della qualità dell'aria in termini di numero e tipologia delle centraline, sulla base dei nuovi dati reperiti;
- l'aggiornamento al 2005 delle serie storiche delle concentrazioni e dei superamenti dei valori limite e della soglia di informazione degli inquinanti considerati per gli agglomerati già analizzati e la ricostruzione delle stesse serie storiche per le aree urbane di nuova trattazione.

Qui di seguito viene riportata una sintesi del lavoro svolto il cui testo integrale è disponibile nel CD-rom allegato al presente volume oppure accedendo al sito www.areemetropolitane.apat.it.

3. CARATTERIZZAZIONE DELLE AREE URBANE OGGETTO DI STUDIO

Per la selezione degli aree urbane da analizzare sono stati selezionati i 24 capoluoghi di provincia con più di 150.000 abitanti (dati Istat 2001) e sono stati individuati i corrispondenti agglomerati (definiti ai sensi del D.Lgs 4 agosto 1999 n. 351), dichiarati dalle Regioni nell'anno 2005 tramite i questionari dell'Allegato XII al DM 60/02 relativi alla qualità dell'aria dell'anno 2004¹. In realtà alcune delle aree urbane con più di 150.000 abitanti risultano appartenere al medesimo agglomerato (è il caso di Firenze e Prato e degli agglomerati delle Regioni Veneto e Puglia). Dall'analisi dei questionari e dalle informazioni raccolte, tramite le autorità competenti e i gestori di rete, risulta che gli agglomerati presi in considerazione sono quasi tutti costituiti da aree territoriali contigue ad eccezione di tre agglomerati cui appartengono rispettivamente:

- Venezia, Padova e Verona,

¹ Nel caso di Trieste è stata individuata la corrispondente zona non-agglomerato poiché è stata così definita dalla Regione Friuli Venezia Giulia.

- Bari e Foggia,
- Taranto.

Tali agglomerati sono infatti costituiti da porzioni territoriali ampie ma non adiacenti. Un'ulteriore particolarità è costituita da Reggio Calabria, città, come le altre considerate in questo lavoro, con più di 150.000 abitanti, il cui territorio non è stato ancora zonizzato dalla Regione Calabria.

Nella tabella 1 sono riportati gli agglomerati individuati dalle Regioni e i relativi dati di popolazione, superficie e comuni compresi reperiti negli Allegati XII al DM 60/02 relativi alla valutazione e gestione della qualità dell'aria del 2004. Per gli agglomerati di Milano, Brescia, Cagliari e per i tre agglomerati di cui sopra (relativi cioè a Venezia-Padova-Verona, Bari-Foggia, Taranto), le Regioni non hanno riportato in tali allegati XII l'elenco dei rispettivi comuni, per questi agglomerati pertanto tali informazioni sono state reperite dalle autorità competenti/gestori di rete. Il confronto degli agglomerati condotto sulla base dei dati disponibili riportati negli allegati XII al DM60/02 per gli anni precedenti (relativi cioè alla valutazione della qualità dell'aria del 2002 e 2003) ha rivelato variazioni degli agglomerati considerati dovuti a cambiamenti alla zonizzazione apportati dalle Regioni nel corso degli anni. In particolare l'analisi ha portato ai seguenti esiti:

- l'agglomerato di Milano ha registrato un aumento della superficie da 580 km² a 1057 km² dal 2002 al 2003 e della popolazione da 2.438.544 a 3.361.921 abitanti;
- l'agglomerato comprendente Verona, Venezia e Padova ha registrato una variazione della superficie da 1.373 km² nel 2002 a 1.350 km² nel 2003 a 1.643 km² nel 2004, la popolazione è passata da 1.049.399 a 1.033.982 a 1.168.001 abitanti;
- l'agglomerato di Parma ha registrato un aumento della superficie da 574 km² a 749 km² dal 2003 al 2004 e della popolazione da 213.218 a 242.621 abitanti;
- l'agglomerato di Modena ha registrato un aumento della superficie da 565 km² a 648 km² dal 2003 al 2004 e della popolazione da 295.198 a 326.494 abitanti;
- l'agglomerato di Bologna ha registrato un aumento della superficie da 688 km² a 738 km² dal 2003 al 2004 e della popolazione da 547.768 a 550.630 abitanti;
- per l'agglomerato di Firenze e Prato gli allegati XII al DM 60/02 dal 2002 al 2004 riportano una diminuzione del dato di superficie da 942 km² a 188 km² (per il 2003 non sono disponibili informazioni). Tale variazione è però da imputarsi al fatto che nel 2004 la Regione Toscana ha preso in considerazione per la compilazione del questionario solo le aree urbanizzate dei comuni facenti parte dell'agglomerato stesso anziché la totalità delle superfici dei comuni compresi;
- l'agglomerato di Palermo ha registrato una diminuzione della superficie da 727 km² a 228 km² dal 2002 al 2003 e un aumento della popolazione da 711.531 a 761.852 abitanti; da precisare che tali variazioni sono dovute al fatto che il numero di comuni compresi nell'agglomerato è aumentato ma per il dato di superficie la Regione Siciliana ha considerato unicamente le aree urbanizzate;
- l'agglomerato di Cagliari ha registrato un aumento della superficie da 14 km² a 92 km² dal 2002 al 2003 e della popolazione da 547.768 a 550.630 abitanti.

Le variazioni evidenziate sono riconducibili al fatto che, con il recepimento delle direttive comunitarie in materia di qualità dell'aria e l'entrata in vigore delle corrispondenti normative nazionali, ha avuto inizio una fase di adeguamento, che, nel caso dell'Italia, anziché procedere come previsto con un'unica definitiva zonizzazione del territorio, ha comportato una progressiva revisione dei criteri di zonizzazione e una variazione nel corso degli anni del set di centraline di monitoraggio scelte per la valutazione e gestione della qualità dell'aria.

Ai fini del presente studio i capoluoghi di provincia Firenze e Prato, poiché appartenenti al medesimo agglomerato e poiché tra loro adiacenti, sono stati analizzati insieme. Nel caso dei tre agglomerati di Venezia-Padova-Verona, Bari-Foggia e Taranto, come detto costituiti da aree territoriali non contigue, si è stabilito di seguire il criterio già adottato nel Rapporto APAT 2005, ossia di considerare i singoli comuni di Venezia, Padova, Verona, Bari, Foggia e Taranto. Anche nel caso di Reggio Calabria è stato preso in considerazione il solo territorio comunale.

La tabella 2 riporta l'elenco delle aree urbane analizzate nel presente studio secondo i criteri di cui sopra con i dati corrispondenti di popolazione, superficie e comuni compresi.

Tabella 1: Caratterizzazione degli AGGLOMERATI da parte delle Regioni (fonte dati: ALL XII al DM 60/02 relativi alla valutazione e gestione della qualità dell'aria dell'anno 2004, autorità competenti/gestori di rete)

Agglomerato	Superficie dell'Agglomerato (km ²)	Popolazione dell'Agglomerato (n° di abitanti)	Comuni Compresi nell'Agglomerato
Torino	367	1.298.510	Torino, Beinasco, Grugliasco, Settimo Torinese, Borgaro Torinese, Venaria Reale, Collegno, Orbassano, Rivoli, San Mauro Torinese, Moncalieri, Nichelino
Milano ⁽¹⁾	1.057	3.361.921	Milano, Canegrate, Cerro Maggiore, Cesate, Garbagnate Milanese, Lainate, Legnano, Nervino, Parabiago, Pogliano Milanese, Rescaldina, San Giorgio su Legnano, San Vittore Olona, Busto Arsizio, Caronno Pertusella, Cassano Magnago, Castellanza, Gallarate, Gerenzano, Origgio, Somarate, Saronno, Uboldo, Arosio, Cabiante, Cantù, Capiami Intimiano, Carugo, Casnate con Bernate, Como, Figino Serenza, Fino Mornasco, Grandate, Lipomo, Mariano Comense, Noverate, Senna Comasco, Barlassina, Bovisio, Masciago, Carate Brianza, Cesano Maderno, Desio, Giussano, Lentate sul Severo, Limbiate, Meda, Seregno, Severo, Varedo, Verano Brianza, Monza, Muggiò, Villasanta, Lissone, Veduggio al Lambro, Arcore, Vimercate, Concorezzo, Agrate Brianza, Caponago, Carugate, Brughiero, Nova Milanese
Brescia ⁽¹⁾	397	368.642	Borgosatollo, Botticino, Bovezzo, Brescia, Castel Mella, Castenedolo, Cellatica, Collebeato, Concesio, Flero, Gardone, Valtrompia, Gussago, Lumezzane, Marchino, Nave, Rezzato, Roncadelle, San Zeno, Naviglio, Sarezzo, Villa Carcina
Verona ⁽¹⁾	1.642,75	1.168.001	Borgosatollo, Botticino, Bovezzo, Brescia, Castel Mella, Castenedolo, Cellatica, Collebeato, Concesio, Flero, Gardone, Valtrompia, Gussago, Lumezzane, Marchino, Nave, Rezzato, Roncadelle, San Zeno, Naviglio, Sarezzo, Villa Carcina
Venezia ⁽¹⁾			
Padova ⁽¹⁾			
Trieste ⁽²⁾	84	211.184	Trieste
Genova	244	610.307	Genova
Parma	749	242.621	Collecchio, Felino, Fidenza, Fontanellato, Fontevivo, Noceto, Parma, Sala Baganza, Sorbolo, Torrile, Treccasali
Modena	648	326.494	Bastiglia, Campogalliano, Carpi, Castelfranco Emilia, Castelnuovo Rangone, Modena, Nonantola, San Cesario sul Panaro, Soliera, Spilamberto
Bologna	738	550.630	Argelato, Bentivoglio, Bologna, Calderara di Reno, Casalecchio di Reno, Castelmaggiore, Castenaso, Granarolo dell'Emilia, Ozzano dell'Emilia, Pianoro, San Lazzaro di Savena, Sasso Marconi, Zola Predosa
Firenze ⁽¹⁾	188	941.959	Bagno a Ripoli, Calenzano, Campi Bisenzio, Empoli, Firenze, Lastra a Signa, Montelupo Fiorentino, Scandicci, Sesto Fiorentino, Signa, Montale, Pistoia, Montemurlo, Poggio a Caiano, Prato
Prato ⁽¹⁾			
Livorno	88	365.868	Livorno, Rosignano Marittimo, Cascina, Montopoli in Val d'Arno, Pisa, Pontedera, Santa Croce sull'Arno
Roma	1.282	2.460.000	Roma
Napoli	117	1.008.419	Napoli
Foggia ⁽¹⁾	7.135	1.874.530	Altamura, Andria, Bari, Barletta, Bisceglie, Bitonto, Canosa di Puglia, Cerignola, Corato, Fasano, Foggia, Francavilla Fontana, Galatina, Gioia del Colle, Gravina in Puglia, Grottaglie, Lecce, Lucera, Manduria, Manfredonia, Martina Franca, Modugno, Molfetta, Monopoli, Nardò, Ostuni, Putignano, Ruvo di Puglia, San Giovanni Rotondo, San Severo, Santeramo in Colle, Terlizzi, Trani, Triggiano
Bari ⁽¹⁾			
Taranto ⁽¹⁾	883	351.615	Brindisi, Massafra, Mesagne, Taranto
Reggio di Calabria	ND	ND	ND
Palermo	228 ⁽²⁾	761.852	Altofonte, Monreale, Palermo, Villabate, Bagheria
Messina	211	236.621	Messina
Catania	252	360.161	Catania, Misterbianco, Motta S. Anastasia
Cagliari ⁽¹⁾	92	158.35	Cagliari, Monserrato, Quartucciu, Quartu S.Elena, Selargius

(1) l'elenco dei comuni compresi nell'agglomerato è stato fornito dalle autorità competenti e/o gestori di rete non essendo reperibile dall'Allegato XII al DM60/02 relativo alla valutazione e gestione della qualità dell'aria del 2004.

(2) il comune di Trieste risulta ZONA NON AGGLOMERATO

Tabella 2: Caratterizzazione delle aree urbane oggetto del presente studio (fonte dati: Allegati XII al DM 60/02 relativi alla valutazione e gestione della qualità dell'aria dell'anno 2004, autorità competenti/gestori di rete)

Aree urbane	Superficie dell'Area Urbana (km²)	Popolazione dell'Area Urbana (n° di abitanti)	Comuni Compresi nell'Area Urbana
Torino	367	1.298.510	Torino, Beinasco, Grugliasco, Settimo Torinese, Borgaro Torinese, Venaria Reale, Collegno, Orbassano, Rivoli, San Mauro Torinese, Moncalieri, Nichelino
Milano	1.057	3.361.921	Milano, Canegrate, Cerro Maggiore, Cesate, Garbagnate Milanese, Lainate, Legnano, Nervino, Parabiago, Pogliano Milanese, Rescaldina, San Giorgio su Legnano, San Vittore Olona, Busto Arsizio, Caronno Pertusella, Cassano Magnago, Castellanza, Gallarate, Gerenzano, Origgio, Somarate, Saronno, Uboldo, Arosio, Cabiato, Cantù, Capiamo Intimiano, Carugo, Casnate con Bernate, Como, Figino Serenza, Fino Mornasco, Grandate, Lipomo, Mariano Comense, Noverate, Senna Comasco, Barlassina, Bovisio, Masciago, Carate Brianza, Cesano Maderno, Desio, Giussano, Lentate sul Severo, Limbiate, Meda, Seregno, Severo, Varedo, Verano Brianza, Monza, Muggiò, Villasanta, Lissone, Veduggio al Lambro, Arcore, Vimercate, Concorezzo, Agrate Brianza, Caponago, Carugate, Brughiero, Nova Milanese
Brescia	397	368.642	Borgosatollo, Botticino, Bovezzo, Brescia, Castel Mella, Castenedolo, Cellatica, Collebeato, Concesio, Flero, Gardone, Valtrompia, Gussago, Lumezzane, Marchino, Nave, Rezzato, Roncadelle, San Zeno, Naviglio, Sarezzo, Villa Carcina
Verona	207	253.208	Verona
Venezia	413	271.073	Venezia
Padova	93	204.870	Padova
Trieste	84	211.184	Trieste
Genova	244	610.307	Genova
Parma	749	242.621	Collecchio, Felino, Fidenza, Fontanellato, Fontevivo, Noceto, Parma, Sala Baganza, Sorbolo, Torrile, Treccasali
Modena	648	326.494	Bastiglia, Campogalliano, Carpi, Castelfranco Emilia, Castelnuovo Rangone, Modena, Nonantola, San Cesario sul Panaro, Soliera, Spilamberto
Bologna	738	550.630	Argelato, Bentivoglio, Bologna, Calderara di Reno, Casalecchio di Reno, Castelmaggiore, Castenaso, Granarolo dell'Emilia, Ozzano dell'Emilia, Pianoro, San Lazzaro di Savena, Sasso Marconi, Zola Predosa
Firenze-Prato	188	941.959	Bagno a Ripoli, Calenzano, Campi Bisenzio, Empoli, Firenze, Lastra a Signa, Montelupo Fiorentino, Scandicci, Sesto Fiorentino, Signa, Montale, Pistoia, Montemurlo, Poggio a Caiano, Prato
Livorno	88	365.868	Livorno, Rosignano Marittimo, Cascina, Montopoli in Val d'Arno, Pisa, Pontedera, Santa Croce sull'Arno
Roma	1.282	2.460.000	Roma
Napoli	117	1.008.419	Napoli
Foggia	507	155.203	Foggia
Bari	116	316.532	Bari
Taranto	217	202.033	Taranto
Reggio di Calabria	236	180.353	Reggio di Calabria
Palermo	228	761.852	Altofonte, Monreale, Palermo, Villabate, Bagheria
Messina	211	236.621	Messina
Catania	252	360.161	Catania, Misterbianco, Motta S. Anastasia

4. CARATTERIZZAZIONE DELLE STAZIONI DI MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

Per l'analisi dello stato di qualità dell'aria sono state prese in considerazione le stazioni di monitoraggio selezionate dalle Regioni ai fini della valutazione e gestione della qualità dell'aria per l'anno 2004 e riportate negli allegati XII al DM 60/02 trasmessi alle autorità competenti nell'anno 2005. Rispetto alle edizioni precedenti del "Rapporto APAT sulla qualità dell'ambiente urbano" dunque, si è lavorato con un set di stazioni più aggiornato corrispondente a quello ritenuto dalla Regione rappresentativo dello stato di qualità dell'aria del proprio territorio per l'anno 2004.

Nei casi particolari di Venezia, Verona, Padova, Bari, Foggia e Taranto, data la zonizzazione del territorio caratterizzata da aree territoriali non contigue, sono state prese in considerazione le sole stazioni di monitoraggio site nei territori dei rispettivi comuni. Anche per Reggio Calabria si sono considerate unicamente le stazioni di monitoraggio situate nell'area comunale e, poiché in questo caso il territorio non è stato zonizzato, le informazioni riguardanti le stazioni di monitoraggio e i dati registrati da tali stazioni sono state fornite direttamente dal comune di Reggio Calabria non essendo disponibili nell'allegato XII al DM60/02.

L'analisi ha riguardato solo le stazioni di tipo fondo e di tipo traffico, le stazioni di tipo industriale non sono state prese in considerazione.

Nella tabella 3 viene riportata una sintesi delle analisi delle centraline di monitoraggio utilizzate dalle Regioni per la valutazione e gestione della qualità dell'aria delle aree urbane considerate negli anni 2002, 2003 e 2004.

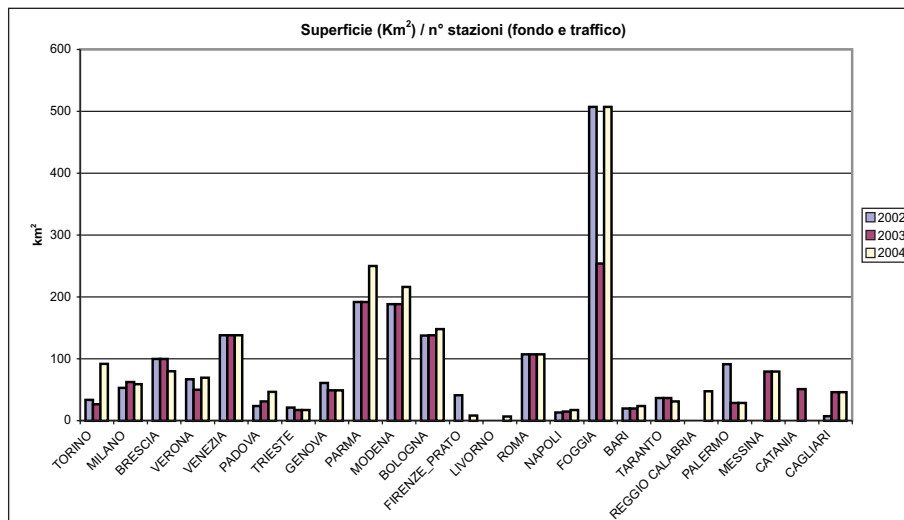
Da tale analisi risulta che sono stati apportati dalle autorità competenti alcuni cambiamenti al set di stazioni di monitoraggio. In particolare la tabella mostra le variazioni del numero di stazioni di monitoraggio prescelte ed evidenzia il fatto che le autorità competenti si trovino ancora in una fase di transizione in cui il set di stazioni scelto per la valutazione e gestione della qualità dell'aria non è stato ancora definitivamente individuato. Da precisare che alcune variazioni sono dovute a correzioni delle tipologie di stazioni effettuate dalle autorità competenti sul database BRACE dell'APAT.

Al fine di permettere confronti tra le diverse realtà urbane sono stati calcolati gli indicatori "popolazione/n° stazioni", "superficie/n° stazioni" (fig. 1 e fig. 2) relativamente al totale delle stazioni (fondo + traffico). Nell'analisi dell'andamento degli indicatori nei 3 anni per ciascuna realtà urbana bisogna in realtà considerare che alcune variazioni sono imputabili, oltre che al cambiamento del n° di stazioni, anche a variazioni di popolazione e superficie dell'agglomerato. Il confronto tra i valori degli indicatori nelle diverse aree urbane condotto sul medesimo anno inoltre evidenzia l'esistenza di una certa disomogeneità tra le scelte adottate dalle Regioni.

Tabella 3: Confronto tra il numero di centraline di monitoraggio di tipo fondo e di tipo traffico utilizzate dalle Regioni ai sensi del DM60/2002 ai fini della valutazione e gestione della qualità dell'aria negli agglomerati considerati negli anni 2002, 2003 e 2004 (dati ALL XII al DM 60/02 e metadati BRACE)

AGGLOMERATO	N.ro Stazioni di Fondo			N.ro Stazioni di Traffico			N.ro Stazioni di Traffico + Fondo		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004
TORINO	5	6	2	6	8	2	11	14	4
MILANO	5	6	7	6	11	11	11	17	18
BRESCIA	4	4	5	0	0	0	4	4	5
VERONA ⁽¹⁾	1	1	1	2	3	2	3	4	3
VENEZIA ⁽¹⁾	2	2	2	1	1	1	3	3	3
PADOVA ⁽¹⁾	2	1	1	2	2	1	4	3	2
TRIESTE	1	1	1	3	4	4	4	5	5
GENOVA	1	2	3	3	3	2	4	5	5
PARMA	1	1	1	2	2	2	3	3	3
MODENA	1	1	1	2	2	2	3	3	3
BOLOGNA	1	1	1	4	4	4	5	5	5
FIRENZE/PRATO	12	8	15	11	9	9	23	17	24
LIVORNO ⁽²⁾	4	4	5	9	9	9	13	13	14
ROMA	4	4	4	8	8	8	12	12	12
NAPOLI	1	1	1	8	7	6	9	8	7
FOGGIA ^{(1) (2)}	0	2	0	1	0	1	1	2	1
BARI ⁽¹⁾	1	1	2	5	5	3	6	6	5
TARANTO ⁽¹⁾	1	1	2	5	5	5	6	6	7
REGGIO di CALABRIA ⁽³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PALERMO	1	1	1	7	7	7	8	8	8
MESSINA ⁽²⁾	ND	0	0	ND	5	5	ND	5	5
CATANIA ⁽⁴⁾	1	1	1	4	4	4	5	5	5
CAGLIARI	1	1	1	1	1	1	2	2	2
TOTALE	50	50	57	90	100	89	140	150	146

Figura 1: Superficie per numero totale di stazioni di monitoraggio (fondo e traffico) nelle aree urbane considerate⁽⁵⁾ (dati ALL XII al DM 60/02 relativi alla valutazione e gestione della qualità dell'aria del 2004, metadati BRACE, autorità competenti/gestori di rete)



¹ Le stazioni indicate ricadono nel territorio comunale

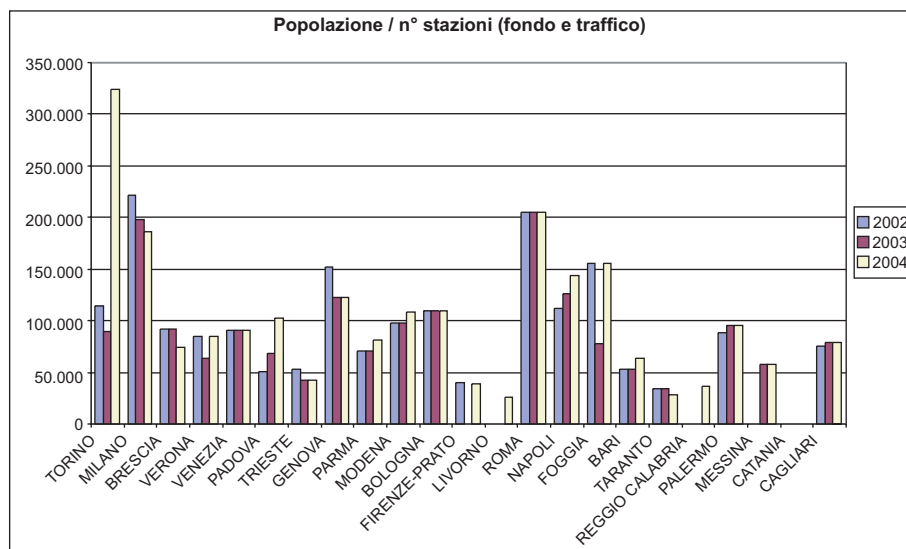
² Per l'anno 2002 di 2 stazioni di Livorno, 1 stazione di Foggia e 4 stazioni di Messina non è nota la tipologia

³ Il territorio di Reggio Calabria non risulta zonizzato

⁴ Di 12 stazioni di Catania non è nota la tipologia per nessuno dei tre anni considerati

⁵ Per Verona, Venezia, Padova, Foggia, Bari, Taranto e Reggio Calabria l'analisi è stata condotta a livello comunale; per le rimanenti aree urbane l'analisi è stata condotta a livello di agglomerato.

Figura 2: Popolazione per numero totale di stazioni di monitoraggio (fondo e traffico) nelle aree urbane considerate⁶ (dati ALL XII al DM 60/02 relativi alla valutazione e gestione della qualità dell'aria del 2004, metadati BRACE, autorità competenti/gestori di rete)



5. LA QUALITÀ DELL'ARIA NELLE AREE URBANE OGGETTO DI STUDIO

In accordo con le analisi condotte negli anni precedenti, per la valutazione dello stato di qualità dell'aria sono stati presi in considerazione i seguenti inquinanti: PM_{10} , NO_2 , C_6H_6 , O_3 , ed SO_2 . Di questi inquinanti sono stati analizzati gli indicatori di qualità dell'aria definiti dalla normativa nazionale (DM60/02 e DLgs 183/2004) e tali indicatori sono stati confrontati con i valori limite normati.

In particolare l'analisi riporta i valori massimi e minimi delle concentrazioni medie annue e del numero di ore/giorni di superamento dei valori limite/soglia di informazione registrati per gli anni dal 1993 al 2005 nelle stazioni di tipo fondo e di tipo traffico. Per mancanza di dati non sono state fornite informazioni sullo stato di qualità dell'aria della città di Foggia mentre per l'agglomerato di Catania non è stato possibile condurre un'analisi sulla base della tipologia di stazioni di monitoraggio. Ad ogni dato riportato (concentrazione o numero di superamenti) è associato il numero delle centraline di monitoraggio che hanno fornito le informazioni richieste. Per i motivi che stanno alla base delle variazioni del numero di tali centraline, variazione riportata dai grafici, si rimanda a quanto già detto nel paragrafo precedente sulla caratterizzazione delle centraline di monitoraggio per la qualità dell'aria.

Nelle fig. 3, 4 e 5 vengono presentate le serie storiche relative al PM_{10} e all' O_3 per gli anni dal 1993 al 2005 rimandando alla consultazione del testo integrale le serie storiche degli altri inquinanti considerati.

Per l'inquinamento da PM_{10} i grafici confermano ad oggi una situazione piuttosto critica con il superamento dei limiti di legge (sia in termini di concentrazione media annua sia in termini di numero di giorni di superamento del valore limite giornaliero) esteso alla maggior parte delle

⁶ Per Verona, Venezia, Padova, Foggia, Bari, Taranto e Reggio Calabria l'analisi è stata condotta a livello comunale; per le rimanenti aree urbane l'analisi è stata condotta a livello di agglomerato.

24 aree urbane analizzate e alla quasi totalità degli anni presi in esame. Maggiori superamenti si registrano generalmente nelle stazioni di tipo traffico rispetto alle stazioni di fondo.

Per quanto riguarda le concentrazioni medie annue di PM_{10} registrate nelle stazioni di traffico, soltanto Trieste, Bari e Cagliari si sono sempre mantenute al di sotto del limite di legge.

Per quanto riguarda il numero di giorni di superamento della concentrazione media giornaliera, valori superiori al limite di 35 superamenti annui in tutte le stazioni considerate si sono registrati a Torino, Milano, Brescia, Verona, Venezia (ad eccezione del 2001), Padova, Parma, Modena (tranne il 2001) e Bologna. Anche a Genova (ad eccezione del 2004), Livorno, Roma, Napoli, Palermo si registrano superamenti per tutti gli anni monitorati ma limitatamente alle sole stazioni di traffico.

Nella figura 5 è riportato il numero di giorni di superamento della soglia di informazione di $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrati nelle stazioni degli agglomerati considerati negli anni dal 1993 al 2005 sia nelle stazioni di tipo fondo che di tipo traffico. L'andamento complessivo dei dati registrati risulta caratterizzato da una certa irregolarità con valori molto elevati nel 2003, anno "anomalo" per quasi tutte le città analizzate a livello non unicamente nazionale ma europeo.

Per quanto riguarda C_6H_6 e SO_2 la situazione appare buona e/o in costante miglioramento mentre assai più critico è l'inquinamento prodotto da NO_2 .

Figura 3/A: Valori minimi e massimi delle concentrazioni medie annue di PM₁₀ registrati nelle stazioni considerate (valore limite al 2005 ai sensi del DM60/02: 40 µg/m³)

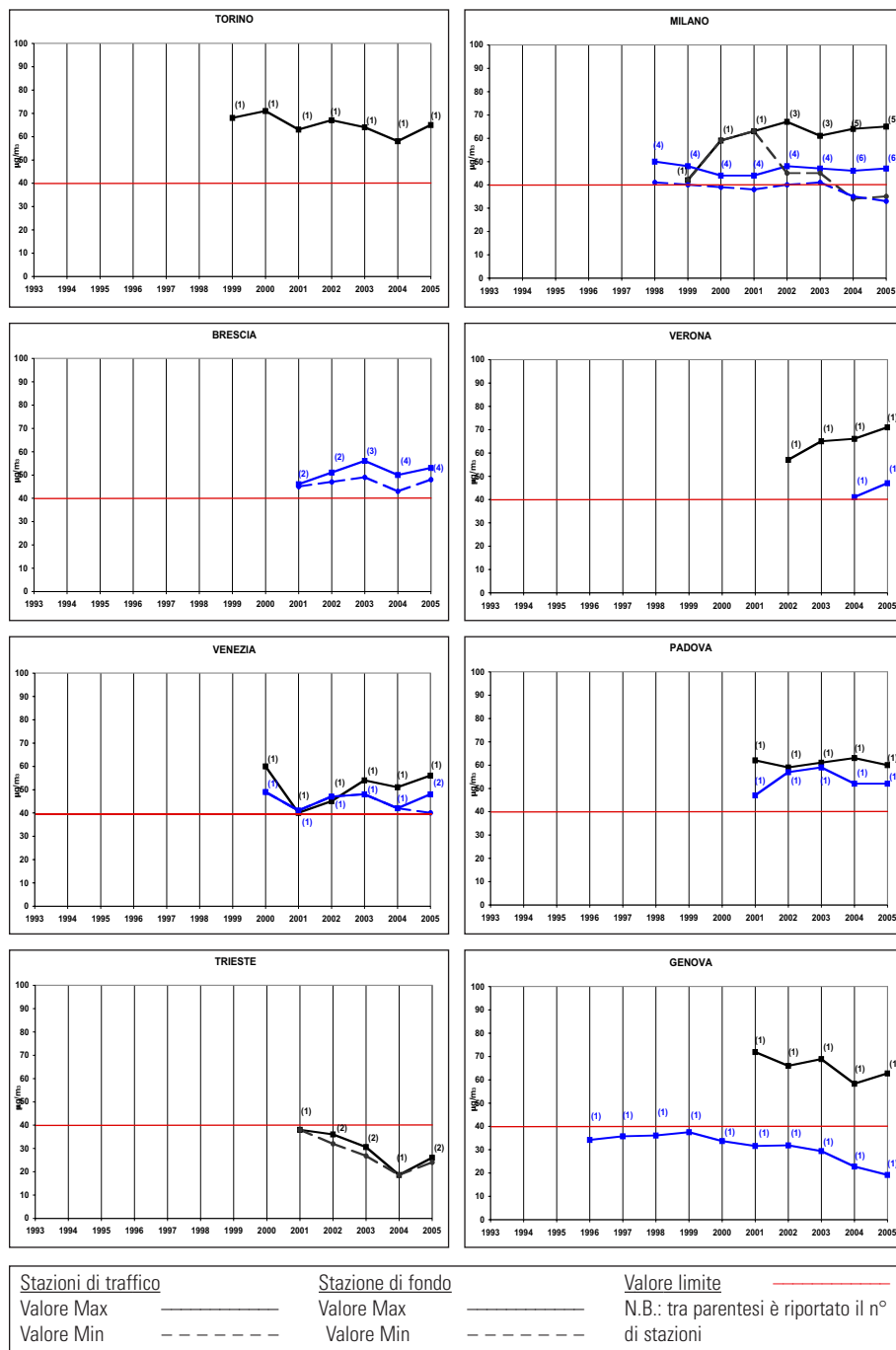


Figura 3/B: Valori minimi e massimi delle concentrazioni medie annue di PM₁₀ registrati nelle stazioni considerate (valore limite al 2005 ai sensi del DM60/02: 40 µg/m³)

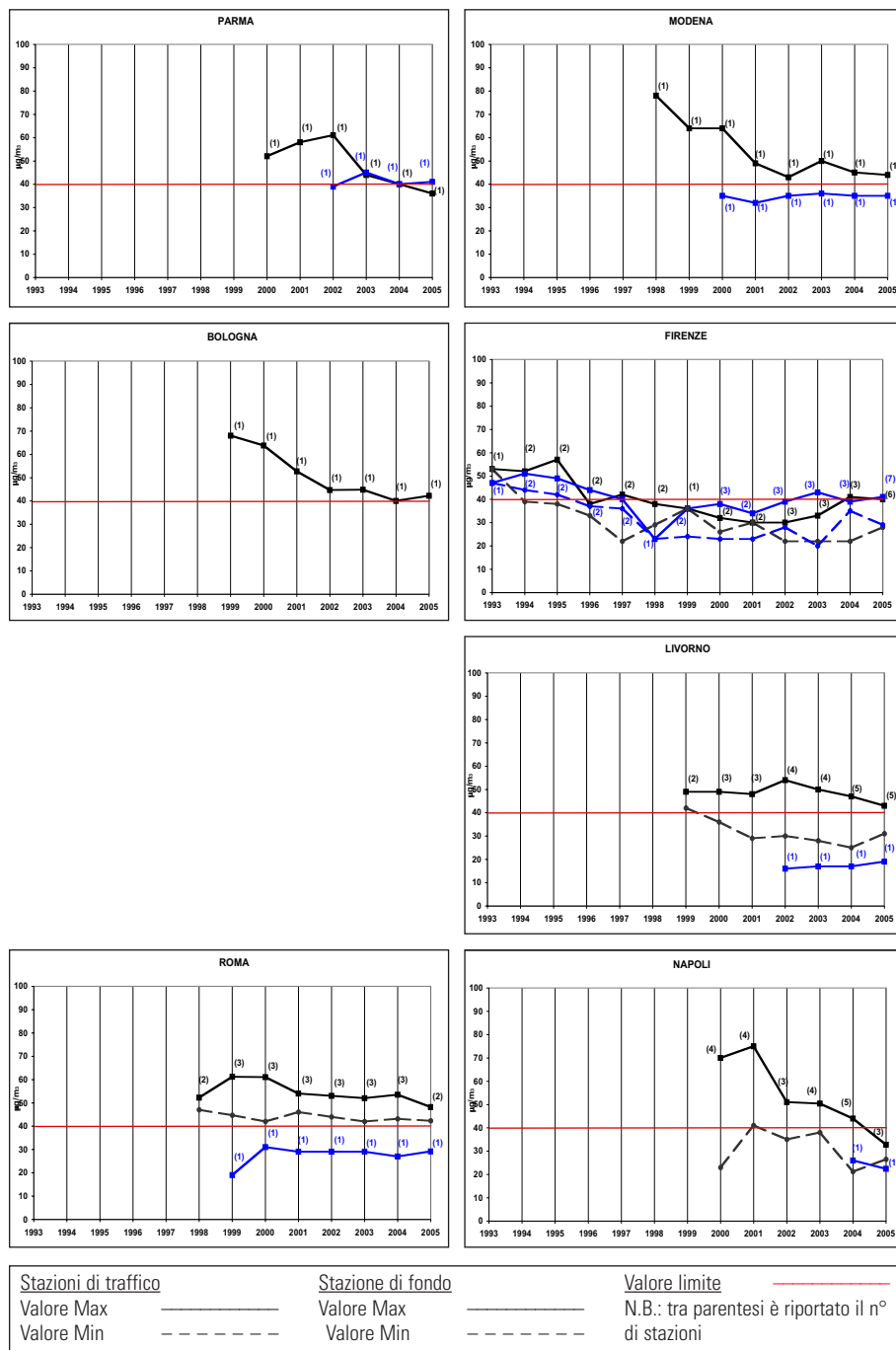


Figura 3/C: Valori minimi e massimi delle concentrazioni medie annue di PM₁₀ registrati nelle stazioni considerate (valore limite al 2005 ai sensi del DM60/02: 40 µg/m³)

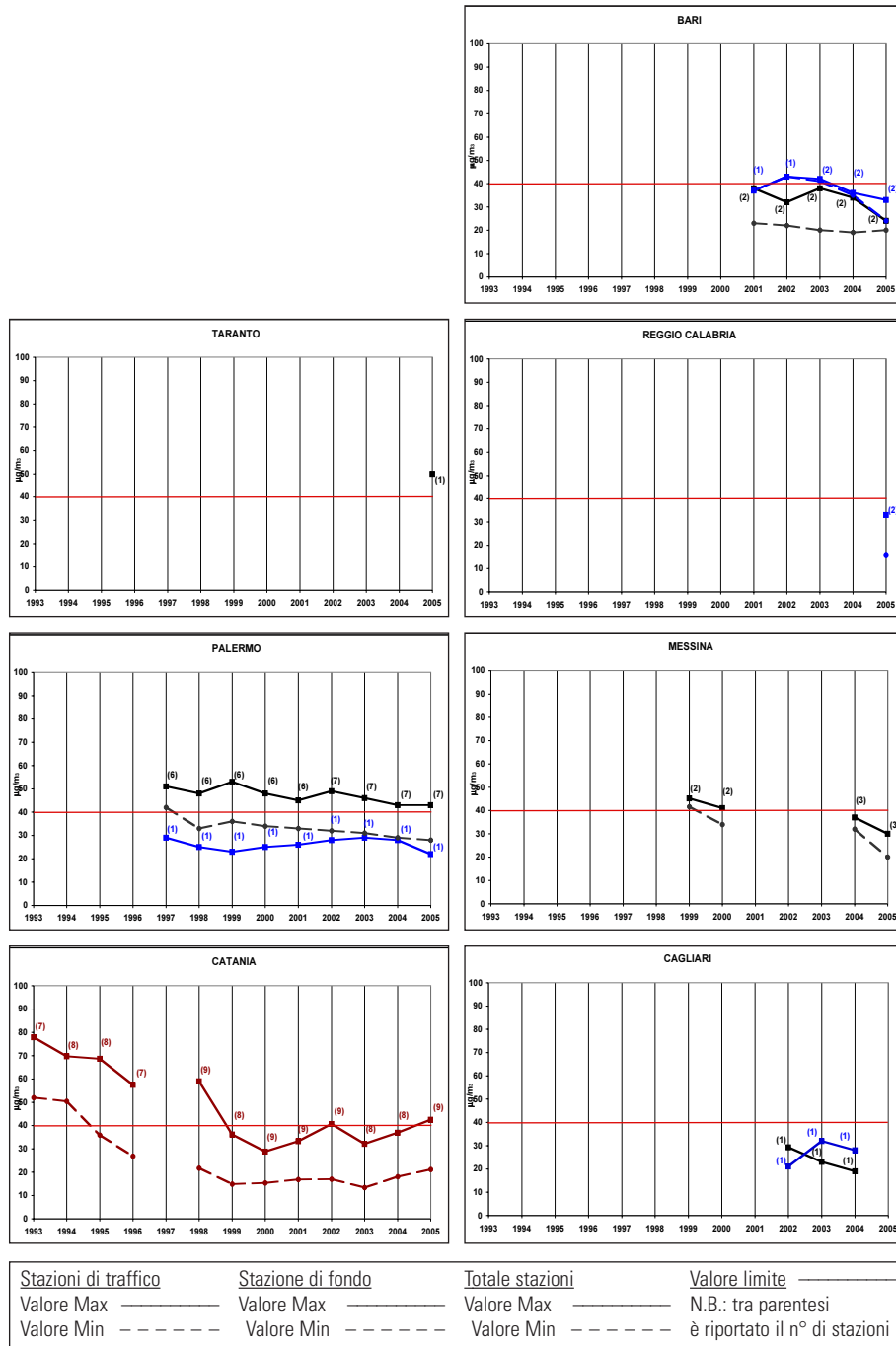


Figura 4/A: Valori minimi e massimi del numero di giorni di superamento del valore limite giornaliero di PM₁₀ registrati nelle stazioni considerate (numero massimo di superamenti consentiti al 2005 ai sensi del DM60/02: 35)

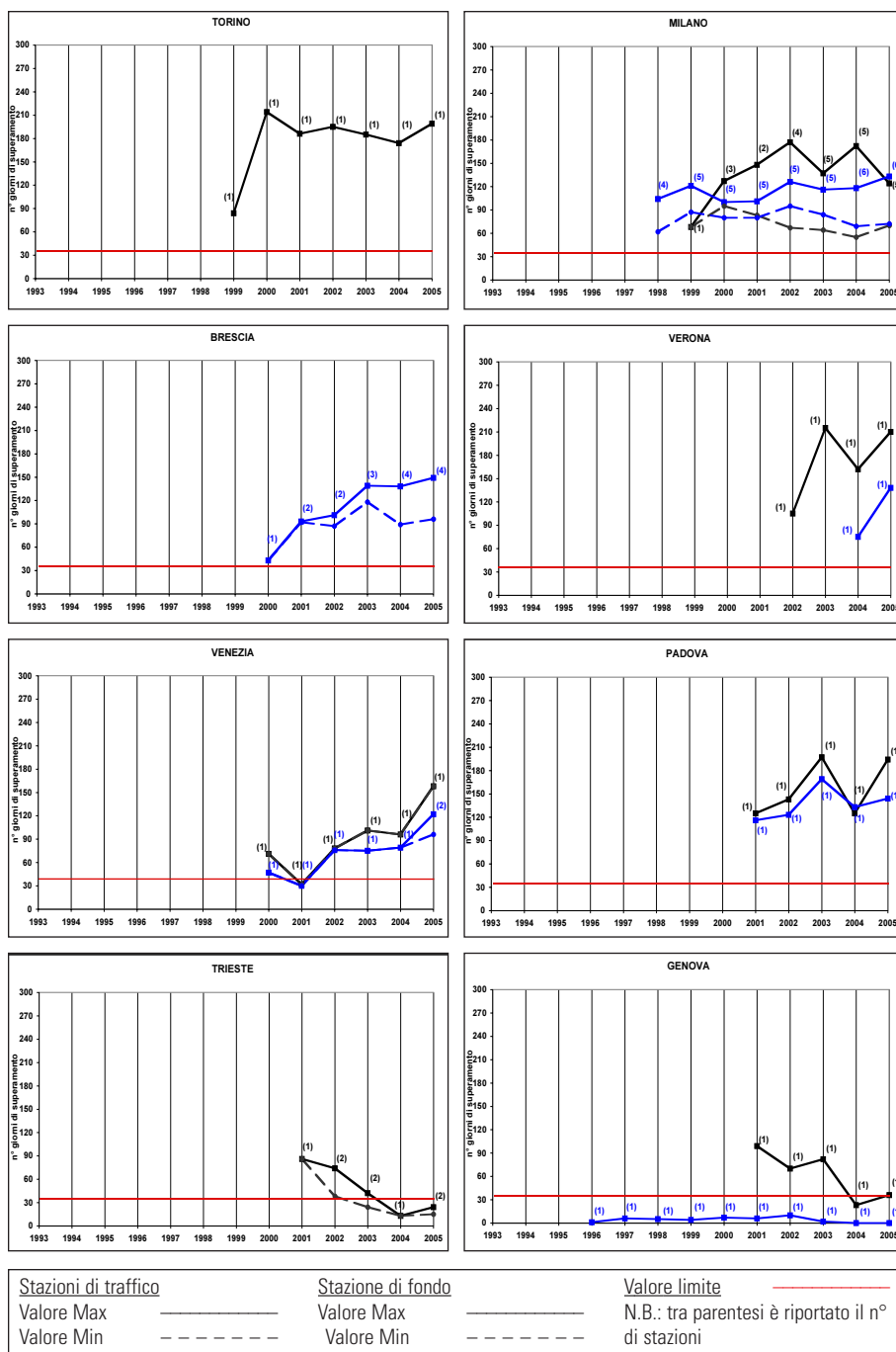


Figura 4/B: Valori minimi e massimi del numero di giorni di superamento del valore limite giornaliero di PM₁₀ registrati nelle stazioni considerate (numero massimo di superamenti consentiti al 2005 ai sensi del DM60/02: 35)

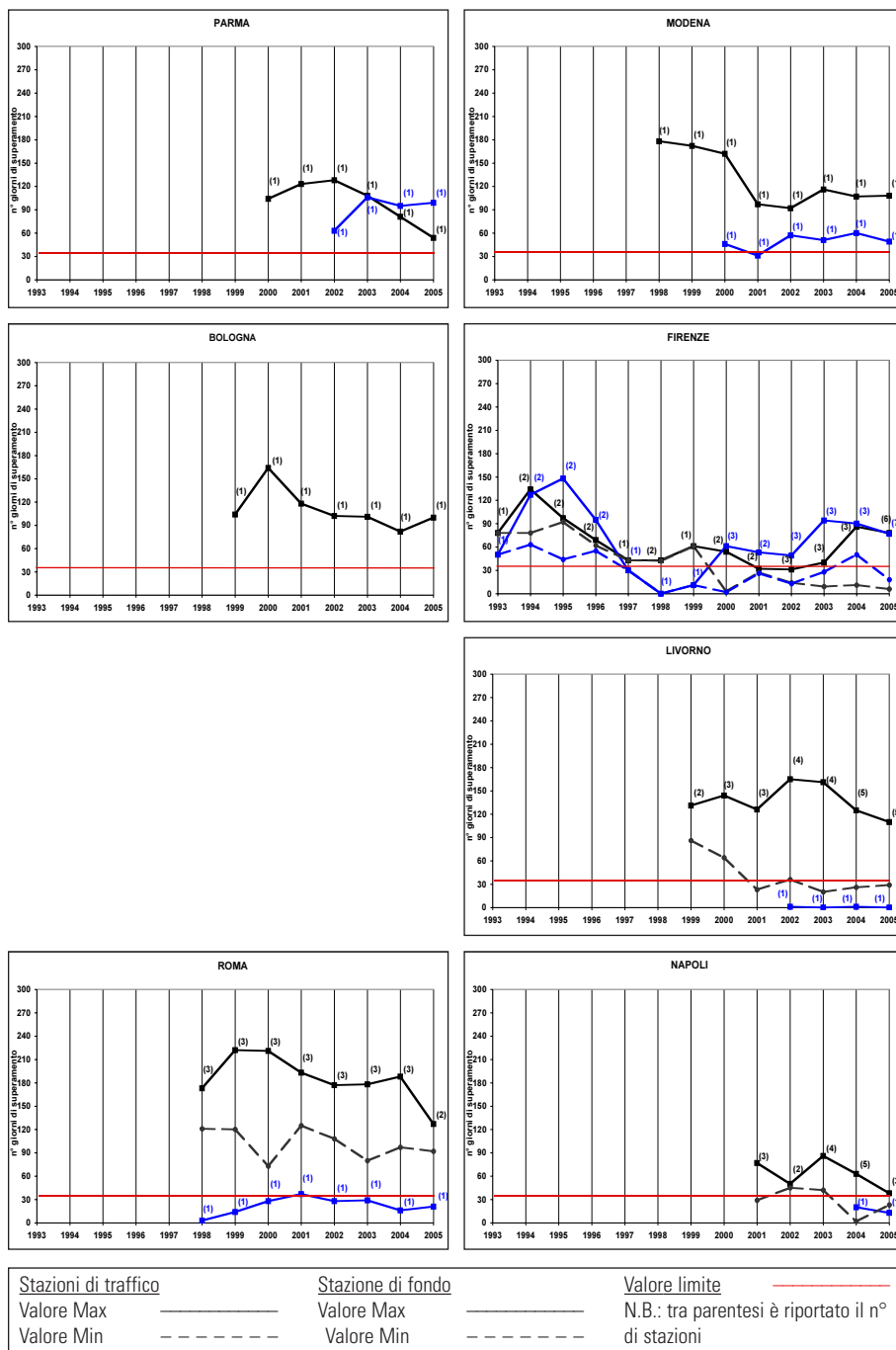


Figura 4/C: Valori minimi e massimi del numero di giorni di superamento del valore limite giornaliero di PM_{10} registrati nelle stazioni considerate (numero massimo di superamenti consentiti al 2005 ai sensi del DM60/02: 35)

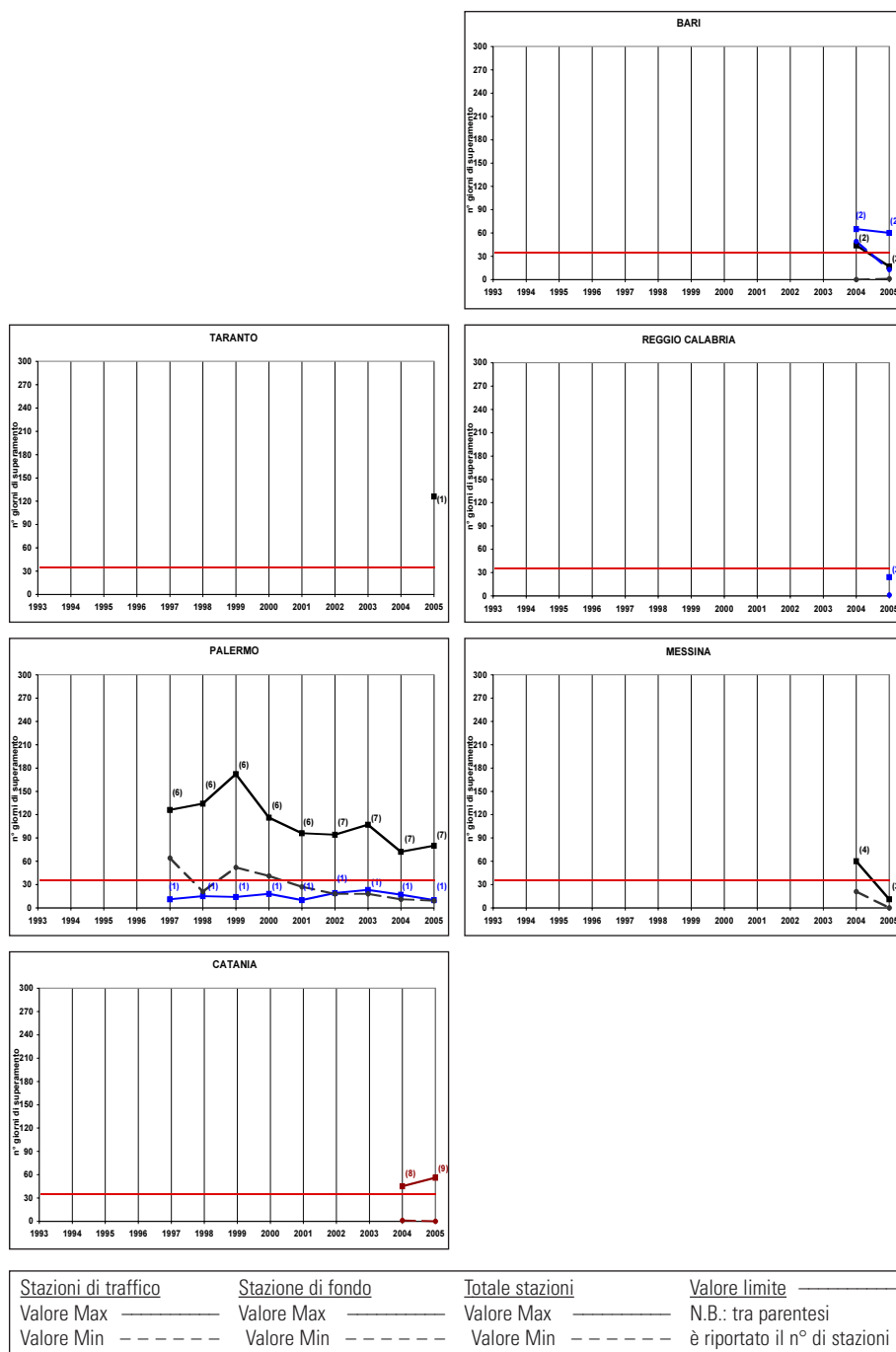


Figura 5/A: Valori massimi e minimi del numero di giorni di superamento della soglia di informazione di O₃ registrati nelle stazioni considerate (DLgs 183/04)

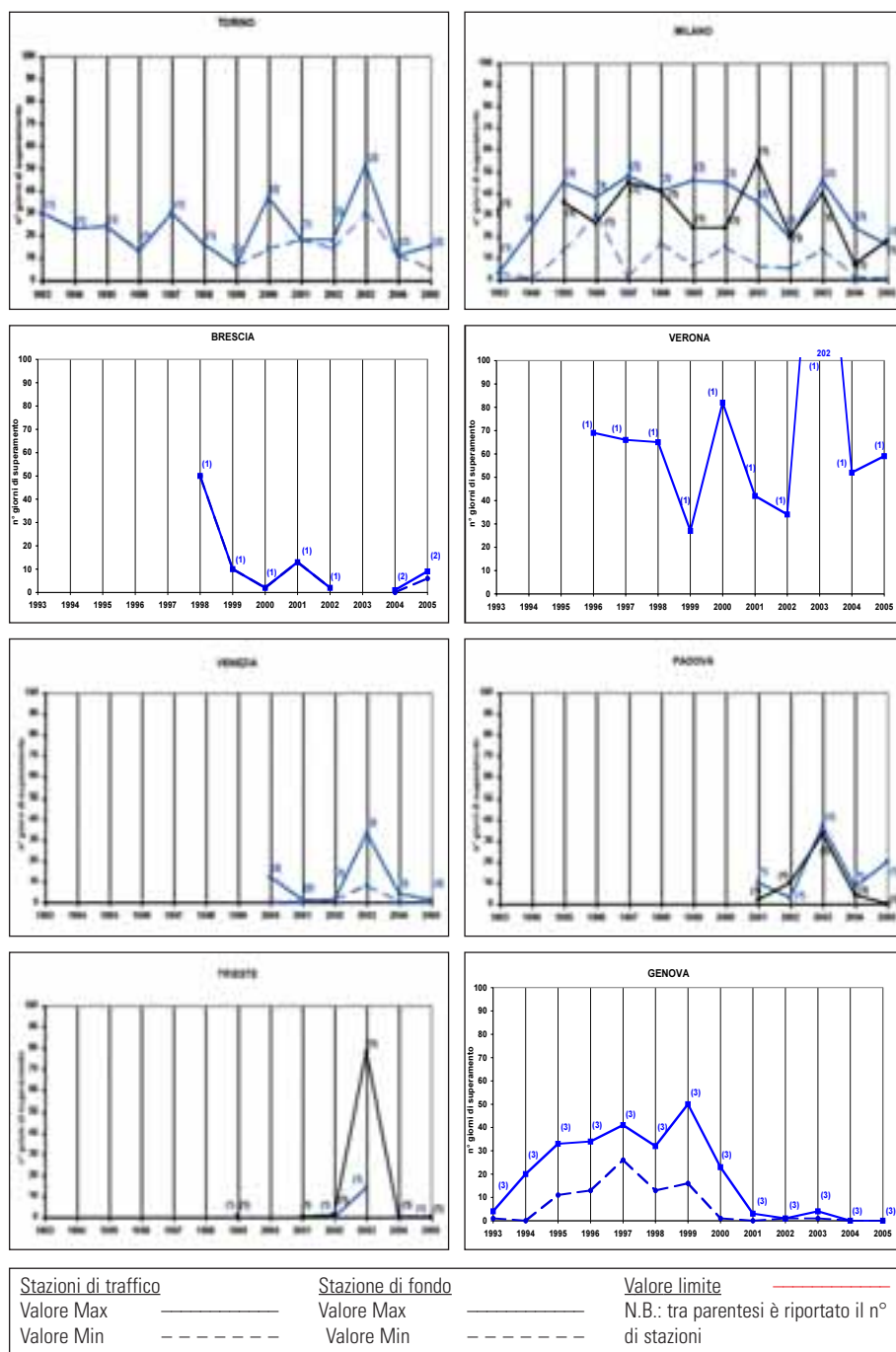


Figura 5/B: Valori massimi e minimi del numero di giorni di superamento della soglia di informazione di O₃ registrati nelle stazioni considerate (DLgs 183/04)

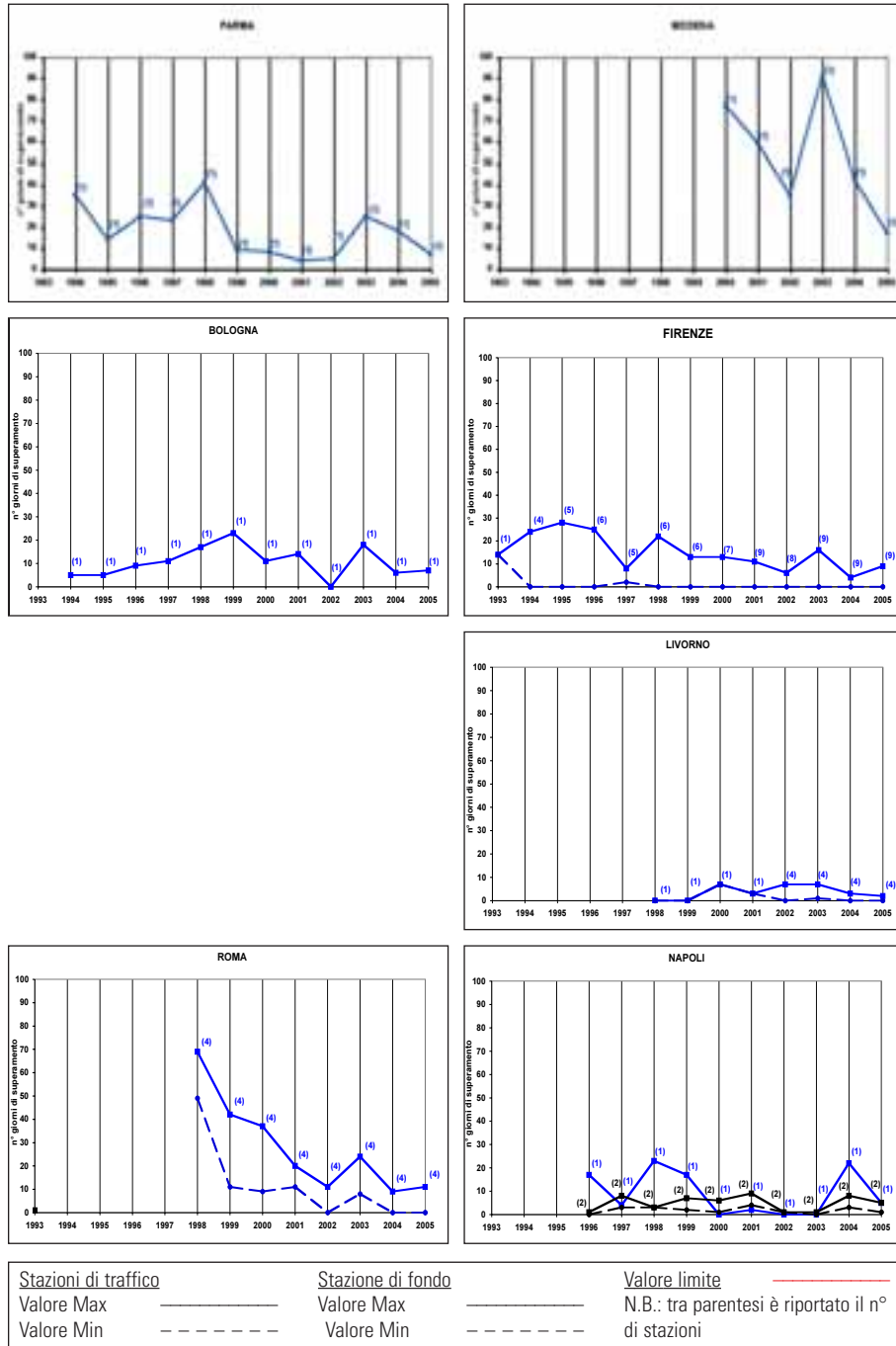
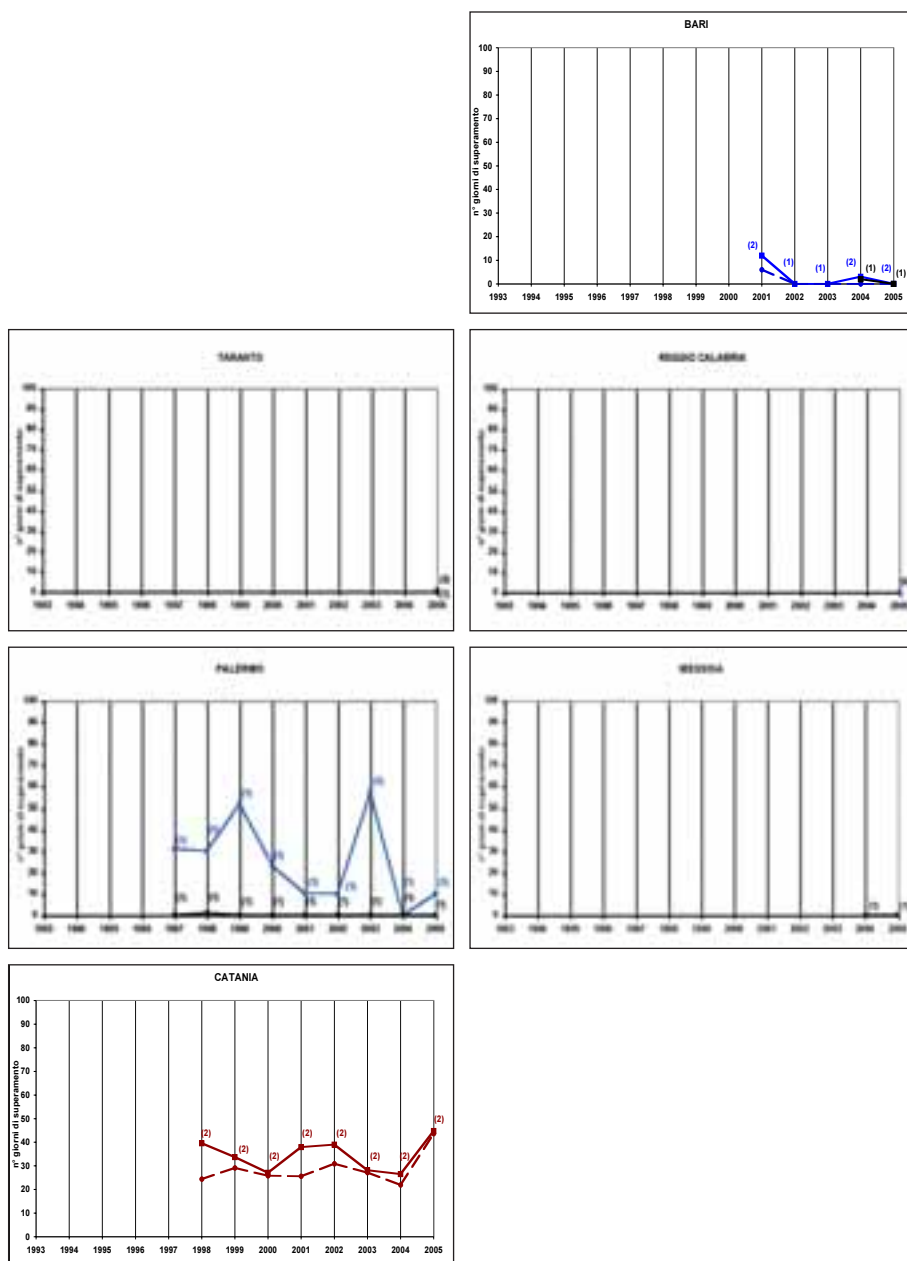


Figura 5/C: Valori massimi e minimi del numero di giorni di superamento della soglia di informazione di O₃ registrati nelle stazioni considerate (DLgs 183/04)



Stazioni di traffico	Stazione di fondo	Totale stazioni	Valore limite
Valore Max —————	Valore Max —————	Valore Max —————	N.B.: tra parentesi
Valore Min - - - - -	Valore Min - - - - -	Valore Min - - - - -	è riportato il n° di stazioni

6. PIANI E PROGRAMMI DI RISANAMENTO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

Le Regioni nelle cui zone e agglomerati si verificano superamenti dei valori limite degli inquinanti hanno l'obbligo, a meno delle deroghe/proroghe previste dalla normativa, di adottare un Piano di risanamento della qualità dell'aria entro 18 mesi dalla fine dell'anno in cui è stato registrato il superamento stesso. Se i superamenti si verificano per più inquinanti, le Regioni devono predisporre un "Piano Integrato" per tutti gli inquinanti coinvolti (art. 8 comma 3 del DLgs. 351/99).

Dal confronto tra i dati di qualità dell'aria registrati e i valori limite imposti dalla normativa per l'anno 2004 (tabella 3), anno al quale si riferisce il set di stazioni scelte, risulta che tutti gli agglomerati, ad eccezione di Foggia-Bari e Taranto, hanno registrato almeno un superamento di uno degli inquinanti monitorati e per tale motivo le Regioni competenti dovranno provvedere alla elaborazione di un Piano o di Piani integrati di risanamento della qualità dell'aria. Si ricorda che la predisposizione dei Piani di risanamento di qualità dell'aria presuppone la precedente suddivisione del territorio in zone secondo il DLgs.351/99, di conseguenza per la Regione Calabria non è possibile, data la mancanza della zonizzazione dell'area di Reggio Calabria, fare alcuna considerazione sulla obbligatorietà o meno da parte della Regione di predisporre i suddetti piani.

Si ricorda inoltre che anche lì dove non sono stati registrati superamenti dei valori limite, le Regioni hanno comunque l'obbligo di adottare un Piano di Mantenimento della qualità dell'aria (art. 9 del DLgs 351/99) al fine di mantenere i livelli al di sotto dei limiti normativi.

Tabella 3: Superamento dei valori limite relativi a PM₁₀, NO₂, SO₂ e C₆H₆ per l'anno 2004.

AGGLOMERATO	SUPERAMENTI REGISTRATI NELL'ANNO 2004			
	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	C ₆ H ₆
TORINO	SI	SI	NO	NO
MILANO	SI	SI	NO	NO
BRESCIA	SI	SI	NO	NO
VERONA	SI	SI	NO	NO
VENEZIA	SI	NO	NO	NO
PADOVA	SI	SI	NO	NO
TRIESTE	NO	SI	NO	SI
GENOVA	SI	SI	NO	NO
PARMA	SI	SI	NO	NO
MODENA	SI	SI	nd	NO
BOLOGNA	SI	SI	nd	NO
FIRENZE-PRATO	SI	SI	NO	SI
LIVORNO	SI	SI	NO	NO
ROMA	SI	SI	NO	SI
NAPOLI	SI	SI	NO	nd
FOGGIA	nd	nd	nd	nd
BARI	nd	NO	NO	NO
TARANTO	nd	NO	NO	nd
REGGIO CALABRIA	nd	nd	nd	nd
PALERMO	SI	SI	NO	SI
MESSINA	SI	nd	nd	NO
CATANIA	SI	SI	NO	SI
CAGLIARI	NO	NO	nd	SI

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

D.Lgs. 4 agosto 1999 n.351 "Attuazione della direttiva 96/62/CE in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente"

D.M. 2 aprile 2002 n.60 "Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio"

D.Lgs. 21 maggio 2004 n.183 "Attuazione della direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria"

Database BRACE – APAT

Allegati XII del DM 60/02 relativi all'anno 2002, 2003 e 2004.

Si ringraziano:

Dott. Mauro Maria Grosa – ARPA Piemonte – Torino

Dott. Giancarlo Tebaldi – Arpa Lombardia – Dipartimento di Milano

Dott.ssa Anna Di Leo – Arpa Lombardia – U.O. Qualità dell'aria

Dott.ssa Giovanna Marson – ARPAV - Venezia

Dott. Fulvio Daris – ARPA FVG – Dipartimento Provinciale di Trieste

Dott. Enrico Daminelli – Dipartimento Provinciale di Genova-Ufficio Elaborazioni Dati Ambientali

Dott.ssa Barbara Cipolli - ARPA Emilia Romagna – Bologna

Dott.ssa Antonella Anceschi – ARPA Emilia Romagna – Rete di monitoraggio aria – Modena

Dott.ssa Claudia Pironi – ARPA Emilia Romagna – Responsabile Rete Monitoraggio Qualità dell'Aria – Parma

Dott. Daniele Grechi – ARPAT – Dipartimento di Firenze

Dott. Furio Forni – Regione Toscana

Dott.ssa Silvia Anselmi – Servizio Prevenzione Inquinamento Atmosferico – Dipartimento X Comune di Roma

Dott.ssa Ilaria Attanasio – Agenzia Napoletana Energia e Ambiente – Napoli

Dott. Lorenzo Angiuli – ARPA Puglia – Bari

Dott. Pasquale Bonocore – Comune di Reggio Calabria

Ing. Marcello Vultaggio – AMIA spa – Rete di rilevamento della qualità dell'aria – Palermo

Dott. Antonino Celona – Provincia di Messina

Dott. Carmelo Oliveri – Comune di Catania

Dott. Nicola Cogoni – ARPAS – Cagliari

per le informazioni fornite in merito ai dati di qualità dell'aria degli agglomerati e dei comuni considerati

SOSTITUZIONE DI COMBUSTIBILI FOSSILI CON BIO-COMBUSTIBILI E SOLARE TERMICO NELLE AREE URBANE MAGGIORMENTE INQUINATE

G. PINO, L. SELLER, M. PAOLUCCI, R. MARCECA, F. GERI, S. VENGA

APAT- Dipartimento Nucleare, Rischio Tecnologico ed Industriale
Servizio Osservatorio sulle Tecnologie – Settore Innovazione Tecnologica

ABSTRACT

L'obiettivo principale che si intende conseguire attraverso la sostituzione parziale dei combustibili fossili con Bio-Combustibili (Bio-Diesel, Bio-EtanoLO, Biogas e Syngas) con l'introduzione di miscele di Bio-combustibili (come da Dlgs 30 Maggio 2005, n.128 in attuazione della Direttiva 2003/30/CE), ed anche con il solare termico (pannelli solari) in una area metropolitana (come Torino, Milano, Trieste, Genova, Bologna, Roma, Napoli, ecc.), è quello di valutare gli effetti benefici sulla qualità dell'aria urbana, come la riduzione dei gas serra e di inquinanti, oltre ad un notevole risparmio di combustibili fossili sostituiti così da fonti rinnovabili.

A tal fine, partendo dagli inventari delle emissioni in atmosfera nelle aree urbane e note pure le quantità e le rispettive percentuali dei combustibili fossili utilizzati (es. benzina, gasolio, metano, carbone, ecc.) nei rispettivi servizi come il trasporto locale ed il riscaldamento domestico, si potranno evidenziare e valutare per le rispettive *miscele* che si realizzeranno, in funzione delle quantità di Bio-Combustibili disponibili a livello nazionale e locale, così come pure per le rispettive superfici disponibili per il solare termico, i vantaggi locali come la riduzione degli inquinanti nell'aria e quelli globali come la riduzione dei gas serra.

Alternativa interessante, ed anche di più immediata realizzazione, potrà essere quella di sviluppare un **modello locale** per aree (o quartieri) di una città che sono normalmente molto inquinate, dove sono pure disponibili dei dati di inquinamento effettivi in Comuni e/o Circoscrizioni, ma anche in APAT e/o ARPA, facendo appropriate analisi e valutazioni di sostituzione parziale dei combustibili utilizzati e mettendo a punto una vera e propria metodologia da potere successivamente convalidare attraverso i continui monitoraggi locali.

Al momento questa proposta potrebbe riguardare i Comuni o le Aree Metropolitane che hanno la gestione dei rifiuti urbani (solidi ed umidi) e gli impianti di depurazione delle acque reflue, dai quali si ricava normalmente Biogas che può essere utilizzato, previa separazione della CO₂, come *Bio-Metano* sia immettendolo nella rete esistente del gas naturale, per tutti gli usi che se ne possono fare negli edifici pubblici e privati, nelle piccole e medie industrie, ecc. sia utilizzarlo direttamente nel campo dei trasporti pubblici urbani, come gli autobus e taxi a metano.

Sarebbe pure proponibile, fin da subito, cominciare a dotare gli edifici pubblici (asili nido, scuole, uffici, ospedali, caserme, piscine, ecc.) ma anche quelli privati (in ristrutturazione o di nuova costruzione), di pannelli solari per la produzione di acqua calda per tutti gli usi che se ne potrà fare nel riscaldamento/raffrescamento di locali e nell'utilizzo come semplice acqua per usi sanitari con notevole risparmio di fossili e conseguente riduzione di inquinanti vari e gas serra. Un tale *modello*, già convalidato a livello locale, di sostituzione parziale dei fossili con fonti rinnovabili, quali i bio-combustibili e l'energia solare termica, potrà essere di immediato utilizzo per tutte le aree urbane più inquinate che producono energia dalla combustione dei fossili, sia nel trasporto che nel riscaldamento/raffrescamento, estendendolo successivamente anche alle aree metropolitane più densamente popolate.

INTRODUZIONE

Gli attuali modelli di trasporto difficilmente potranno continuare ad essere alla base del nostro sistema socio-economico per lungo tempo, sia per l'impatto non sostenibile sull'ambiente e la salute, sia per le prospettive a lungo termine sulla disponibilità delle varie fonti energetiche. (De Santi et al. 2005)

Nella UE i trasporti sono responsabili di oltre il 30% dei consumi energetici ed il 98% di questi è soddisfatto attraverso l'utilizzo di fonti fossili importate da altri Paesi, di conseguenza la crescita delle emissioni di CO₂ in questo settore è considerata come una delle principali cause del mancato raggiungimento degli obiettivi di Kyoto (UE, 2005).

A breve termine non esistono soluzioni definitive ed in attesa di nuove tecnologie ad "emissioni zero (ZEV)", i veicoli con motore a combustione interna (MCI) alimentati con combustibili fossili rappresenteranno ancora, probabilmente, la tecnologia dominante almeno fino al 2030. In questo lasso di tempo i Bio-Combustibili derivati dalle biomasse: BioDiesel, BioEtanolo e Biogas rappresentano una valida alternativa per sostituire quote di combustibili fossili; infatti sono compatibili con le tecnologie già esistenti, non contribuiscono all'aumento delle emissioni di gas serra ed infine possono fornire nuove opportunità di sviluppo economico.

L'UE ha elaborato una strategia comune per il loro sviluppo e con la Direttiva 2003/30/Ce ha individuato degli "obiettivi indicativi nazionali" che ogni Stato Membro dovrà raggiungere entro il 2010; in Italia questa Direttiva è stata recepita con il Decreto 30 maggio 2005, n. 128.

Il presente lavoro si propone di stimare gli effetti sulla qualità dell'aria (in termini di emissioni) correlati alla parziale sostituzione di una quota di combustibili fossili con Bio-Combustibili e con il Solare Termico sia nel campo dei trasporti che in quello del riscaldamento/raffrescamento/acqua sanitaria, mediante l'utilizzo di un "modello locale".

Successivamente tale "modello locale" sarà esteso ad un'area urbana o metropolitana attraverso una possibile sperimentazione in un'area prescelta, con un ulteriore studio di valutazione dell'efficacia della sostituzione, correlando la riduzione delle emissioni alle concentrazioni rilevate nell'aria.

1. RIFERIMENTI NORMATIVI

Contesto Europeo

La promozione dei biocombustibili è una delle azioni adottate dalla Unione Europea per raggiungere obiettivi di più ampio respiro, ovvero l'incremento delle fonti energetiche rinnovabili, la diminuzione delle emissioni di CO₂ ed una maggiore indipendenza energetica.

A livello europeo, i provvedimenti di carattere normativo più rilevanti che riguardano la promozione dei biocombustibili sono:

- La **Direttiva 2003/30/CE** che invitava ogni Stato Membro a fissare degli obiettivi quantitativi di utilizzo dei biocarburanti. Tali obiettivi dovevano essere basati sui livelli di riferimento proposti della direttiva, ossia il 2% sul totale di carburanti (benzina e diesel) immessi nel mercato entro dicembre 2005 e il 5,75% entro dicembre 2010.
- La **Direttiva 2003/96/CE** che modificava il quadro comunitario delle accise sugli oli minerali per consentire l'applicazione di aliquote ridotte sulle miscele contenenti biocombustibili.

Attualmente, la quota del 2% prevista per il 2005 non è stata raggiunta; anche se ogni Stato Membro avesse centrato gli obiettivi fissati a livello nazionale, complessivamente saremmo arrivati all'1,4%. La Commissione Europea al riguardo ha avviato procedimenti di infrazione per sette Paesi, tra cui l'Italia, nei quali sono stati fissati obiettivi ridotti rispetto alla Direttiva 2003/30/Ce senza addurre una motivazione adeguata.

La necessità di sviluppare maggiormente la produzione dei biocombustibili è stata comunque

ribadita nella comunicazione "Strategia dell'UE per i biocarburanti" (COM (2006) 34 del 8.2.2006), nella quale si esamina il ruolo che gli stessi possono ricoprire nell'ambito dello sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili e della sicurezza degli approvvigionamenti energetici. In particolare, la strategia dell'UE per i biocarburanti si propone tre finalità precise:

- promuovere maggiormente i biocarburanti nell'UE e nei paesi in via di sviluppo e garantire che la loro produzione e il loro utilizzo siano in generale compatibili con l'ambiente;
- avviare i preparativi per un utilizzo su vasta scala dei biocarburanti migliorandone la competitività in termini di costi attraverso l'ottimizzazione della coltivazione di materie prime dedicate ed il sostegno alla diffusione sul mercato; incrementando il fattore di scala dei progetti dimostrativi ed eliminando gli ostacoli di carattere non tecnico;
- esaminare le opportunità che si aprono per i paesi in via di sviluppo grazie alla produzione di materie prime per biocarburanti e di biocarburanti e definire il ruolo che l'UE potrebbe svolgere nell'incentivare lo sviluppo di una produzione sostenibile.

Parallelamente a queste iniziative, nella "strategia per i biocarburanti", allo scopo di agevolare l'impiego di un più ampio ventaglio di biomasse¹ nella produzione del biodiesel, si fa riferimento alla possibilità di modificare le attuali norme tecniche riguardanti gli standard qualitativi ed i relativi metodi di misura (EN 14214 Autotrazione; EN 14213 Riscaldamento).

Contesto Italiano

In Italia la Direttiva 2003/30/CE è stata recepita con il Decreto Legislativo 30 maggio 2005 n.128, anch'esso finalizzato a promuovere l'utilizzazione dei biocombustibili o di altri combustibili rinnovabili in sostituzione del diesel e della benzina nei trasporti

Nel decreto vengono fissati degli obiettivi nazionali espressi come percentuale sul totale del carburante immesso al consumo nel mercato nazionale e calcolati sulla base del tenore energetico:

- 1% entro il 31 dicembre 2005
- 2,5% entro il 31 dicembre 2010

Recentemente, in relazione al Decreto n. 128, è stata emanata la Legge 11 marzo 2006 n. 81 dove viene stabilito che:

- *Per il conseguimento degli obiettivi di cui all'articolo 3 del Decreto Legislativo 30 maggio 2005, n. 128, e per favorire lo sviluppo della filiera agroenergetica, è incentivata la produzione e la commercializzazione di bioetanolo, per un periodo di sei anni a partire dal 1° gennaio 2008.*
- *Dal 1° luglio 2006 i produttori di carburanti diesel e di benzina sono obbligati ad immettere al consumo biocarburanti di origine agricola oggetto di un'intesa di filiera, o di un contratto quadro, o di un contratto di programma agroenergetico in misura pari all'1% dei carburanti diesel e della benzina immessi al consumo nell'anno precedente. Tale percentuale, espressa in potere calorifico inferiore, è incrementata di un punto per ogni anno, fino al 2010.*

Al fine di garantire l'origine nazionale dei prodotti destinati a biocombustibili, la legge prevede la stipulazione di intese di filiera, accordi quadro o di un contratto di programma e la garanzia di tracciabilità per ricostruire il percorso del biocombustibile attraverso le fasi della produzione, trasformazione e distribuzione con particolare riferimento all'origine del prodotto agricolo.

Da questo provvedimento si aspetta un nuovo impulso al settore; nel 2005 in Italia sono state consumate 13.461.000 t di benzina e 24.408.000 t di gasolio per autotrazione (dati Unione Petrolifera) e l'immissione dell'1% di biocombustibili significherebbe commercializzare 278.000 t di BioDiesel e 221.000 t di bioetanolo.

¹ Vedi definizione di biomassa art. 2 Direttiva 2003/30/CE

2. TECNOLOGIE DI PRODUZIONE DEI BIO-COMBUSTIBILI

Attualmente, le tecnologie utilizzate su larga scala per la conversione delle biomasse in bio-combustibili liquidi e gassosi sono: il processo di esterificazione per la produzione di BioDiesel a partire da oli vegetali; il processo di fermentazione per la produzione di etanolo a partire da piante saccarifere e amidacee, ed infine il processo di digestione anaerobica per la produzione di biogas da residui organici.

Bio-Diesel

Bio-diesel è il nome con cui, generalmente, si indica una miscela di esteri-metilici ottenuti da diverse tipologie di sostanze grasse: oli di origine vegetale e materie grasse di scarto.

In Europa come sostanza di partenza viene utilizzato principalmente olio di colza ma possono essere utilizzati altri oli vegetali come l'olio di girasole, l'olio di soia e l'olio di cocco.

L'olio viene estratto attraverso pressatura e per via chimica tramite solventi con rese che arrivano al 36-38% in peso. Una volta raffinato, l'olio è sottoposto alla reazione di transesterificazione, ovvero viene fatto reagire con una miscela di metanolo e catalizzatori. Questo procedimento ha come risultato la scissione delle molecole di trigliceridi in tre molecole più piccole di estere, diminuendo così la viscosità dell'olio che altrimenti non potrebbe essere usato direttamente negli attuali motori a combustione interna. La successiva aggiunta di additivi ne aumenta la stabilità all'ossidazione nel lungo periodo e migliora le prestazioni nelle diverse condizioni climatiche.

Alla fine del processo si ha una miscela composta al 97% da esteri metilici e come co-prodotto si ottiene glicerina. Approssimativamente per, i territori italiani, possiamo considerare una resa di 1t di BioDiesel per ettaro coltivato ad oleaginose.

Bio-Etanolo

La produzione di Etanolo a partire da biomasse avviene tramite il processo fermentativo ad opera di microrganismi capaci di scindere i polimeri della biomassa in composti sempre più semplici tramite idrolisi enzimatica. Per questo motivo, la complessità del processo è funzione della struttura molecolare della biomassa di partenza: per piante saccarifere (canna da zucchero, barbabietola) non sono richieste particolari operazioni di pretrattamento ed idrolisi mentre diventano necessarie sulle biomasse amidacee (grano, mais, orzo e sorgo) e ancora più su quelle lignocellulosiche. A valle della fermentazione è necessario concentrare l'etanolo prodotto riducendo l'acqua residua a valori accettabili.

Dai trattamenti successivi alla fermentazione si ottiene, al massimo, una soluzione azeotropica acqua-alcool che deve essere ulteriormente arricchita in etanolo fino al 98,5%, valore previsto per la commercializzazione come combustibile. Ciò può essere ottenuto mediante vari processi, utilizzabili anche in combinazione tra loro: distillazione azeotropica, distillazione estrattiva, estrazione liquido-liquido, uso di filtri molecolari, pervaporazione e metodi "pressure swing".

La resa dell'etanolo per il territorio nazionale è di circa 4500 l/ha ovvero circa 3,5 t/ha.

Bio-Metano

Il Bio-Metano viene prodotto principalmente attraverso il trattamento del biogas derivato dalla degradazione biologica anaerobica della sostanza organica presente nei RSU e nei reflui organici ad opera di microrganismi.

La conversione biologica dei substrati organici più complessi avviene tramite una catena di processi biologici diversi che si sviluppano in fasi distinte: idrolisi, acidogenesi, acetogenesi ed infine metanogenesi.

Il prodotto finale dell'intero processo può essere considerato proprio il metano in quanto l'unico composto non reattivo dell'intero processo.

Questa reazione avviene spontaneamente nelle discariche o in reattore dedicati chiamati digestori anaerobici.

Il biogas per essere utilizzato come combustibile deve rispettare delle specifiche molto precise per non compromettere i motori in cui viene utilizzato, per tale motivo sono necessari dei trattamenti volti ad eliminare tutte le sostanze indesiderate presenti: CO₂, H₂O, H₂S e alogenati. La sequenza dei trattamenti necessari per utilizzare il biogas come combustibile normalmente comprende:

- una compressione a 10 – 15 bar
- una desolfurazione ed una decarbonatazione (separazione della quota di CO₂) attraverso un water scrubbing
- una disidratazione
- una dealogenazione attraverso l'utilizzo di carboni attivi
- una compressione a 250-300 bar.

Tabella 1: Componenti del biogas dannosi per i motori e relativi sistemi di trattamento

Componente	Effetto	Pretrattamento/sistema
Acqua	Ostruzione condotte di gas	Condensazione per refrigerazione
	Formazione di condense acide	Estrazione per assorbimento
Anidride carbonica	Modifica dei parametri di combustione	Estrazione per adsorbimento
	Acidificazione delle condense	Estrazione per assorbimento
Composti solforati	Emissioni maleodoranti	Estrazione per adsorbimento
	Produzione di SO ₂ dopo combustione	
	Acidificazione delle condense	
Composti clorurati	Produzione di HCl dopo combustione	Estrazione per adsorbimento
	Tossicità	
Composti fluorurati	Produzione di HF dopo combustione	Estrazione per adsorbimento
	Impatto sulla atmosfera	

Fonte: Spazzafumo, 2004

Al termine dei trattamenti si ottiene una miscela di biogas arricchita in metano al 97-98% con un PCI vicino a quello del gas naturale che può essere utilizzata nei motori senza particolari svantaggi.

La produzione di biocombustibili per autotrazione a livello europeo è stimabile intorno ai 2 Mtep, una quota che rappresenta meno dell'1% del mercato.

La difficoltà nello sviluppo e nella diffusione dei biocombustibili è legata sostanzialmente al loro costo di produzione non competitivo rispetto a quello dei derivati del petrolio; per questo motivo, nonostante il costante aumento del prezzo del greggio, è necessario un miglioramento delle tecnologie esistenti e lo sviluppo di una seconda generazione di combustibili prodotte attraverso processi innovativi (Gassificazione, Fisher-Tropsch, Idrolisi del materiale lignocellulosico, ecc.).

3. EMISSIONI DA BIOCOMBUSTIBILI

3.1 Emissioni regolamentate

Le misure legislative finalizzate alla riduzione delle emissioni e lo sviluppo tecnologico hanno portato ad un miglioramento delle prestazioni ambientali dei motori a combustione interna; ciò nonostante il trasporto rappresenta ancora una delle principali fonti di inquinamento delle aree urbane.

In attesa degli sviluppi tecnologici necessari per arrivare a veicoli ad "emissioni zero" occorre proseguire nell'affinamento delle tecnologie esistenti per migliorare le loro prestazioni ambientali; per far questo è possibile intervenire migliorando la qualità dei combustibili e degli oli lubrificanti, ottimizzando il processo di combustione e perfezionando i sistemi di trattamento dei prodotti di combustione.

Considerato che il rinnovo del parco veicolare richiede tempi medio-lunghi, l'UE considera l'introduzione su larga scala di biocombustibili liquidi e gassosi, utilizzati in miscela con i fossili, un'alternativa capace di produrre effetti in tempi rapidi, in quanto tali miscele sono utilizzabili con veicoli a motore esistenti ed integrabili nell'attuale sistema di distribuzione del carburante². L'effetto dell'utilizzo di carburanti alternativi sulle emissioni inquinanti dei motori è tuttora oggetto di ampia discussione in quanto i risultati degli studi effettuati non sono sempre confrontabili ed a volte discordano tra loro su alcune tematiche, come risulta possibile verificare dall'esame dei lavori presenti in letteratura³ e citati in bibliografia.

Il problematico confronto dei risultati delle esperienze sperimentali può essere in parte ascrivibile ai diversi standard emissivi (Euro I, II, III, IV) dei motori su cui sono effettuati i test ed alle miscele utilizzate in quanto queste spesso contengono quote variabili di combustibili tradizionali che a loro volta possono differire per caratteristiche chimico-fisiche. Un'ulteriore variabilità dei risultati è dovuta ai diversi dispositivi di post-trattamento per la riduzione delle emissioni allo scarico, quali catalizzatori ossidanti o filtri antiparticolato. Il calcolo delle emissioni infine viene effettuato utilizzando dei cicli di prova standardizzati che possono interessare l'intero veicolo (prove su rulli) o solo il motore (banco di prova). Questo tipo di valutazioni seppure approvate e ritenute rappresentative, non riescono a rispecchiare fedelmente l'utilizzo reale dei veicoli e variano a seconda del metodo utilizzato.

Tra i numerosi studi reperibili in letteratura, ai fini della nostra trattazione ed in considerazione della completezza dei dati presentati e degli argomenti trattati, è interessante citare quello che è stato sviluppato nel 2000 dall'istituto di ricerca finlandese VTT nell'ambito di un'attività dell'IEA (International Energy Agency) sulle emissioni di diverse tipologie di biocombustibili utilizzati su mezzi di trasporto pubblici.

Lo studio considerava 11 diverse tipologie di combustibili tra cui:

- diesel conforme alla norma EN590 con un contenuto di zolfo inferiore a 500 ppm;
- BioDiesel al 100% derivato da colza, soia e oli vegetali esausti;
- miscela al 30% di BioDiesel con diesel EN590;
- diesel svedese con contenuto di zolfo inferiore a 10 ppm;
- miscela al 30% di BioDiesel con diesel a basso tenore di zolfo;
- miscela al 15% di etanolo con diesel a basso tenore di zolfo;
- una emulsione canadese di diesel e acqua al 10%.

Queste diverse tipologie di combustibili sono state utilizzate in bus omologati Euro II, uno standard molto diffuso anche negli autobus circolanti in Italia. I veicoli erano provvisti di due diverse tipologie di trattamento dei gas esausti; in un caso un catalizzatore ossidante, nell'altro un catalizzatore ossidante ed un filtro antiparticolato CRT (Continuously Regenerating Trap).

I risultati dello studio finlandese hanno evidenziato che miscelando bio-esteri con il diesel fossile si è riscontrata una riduzione delle emissioni di CO e di idrocarburi (HC). Le differenze tra le emissioni considerate diminuiscono se i motori sono provvisti di sistemi di trattamento dei gas di scarico in quanto tali sistemi, in alcuni casi, portano comunque alla riduzione del 95% dell'inquinante trattato. Utilizzando diesel a basso contenuto di zolfo miscelato con il bio-estere la quantità di particolato prodotto diminuiva ulteriormente.

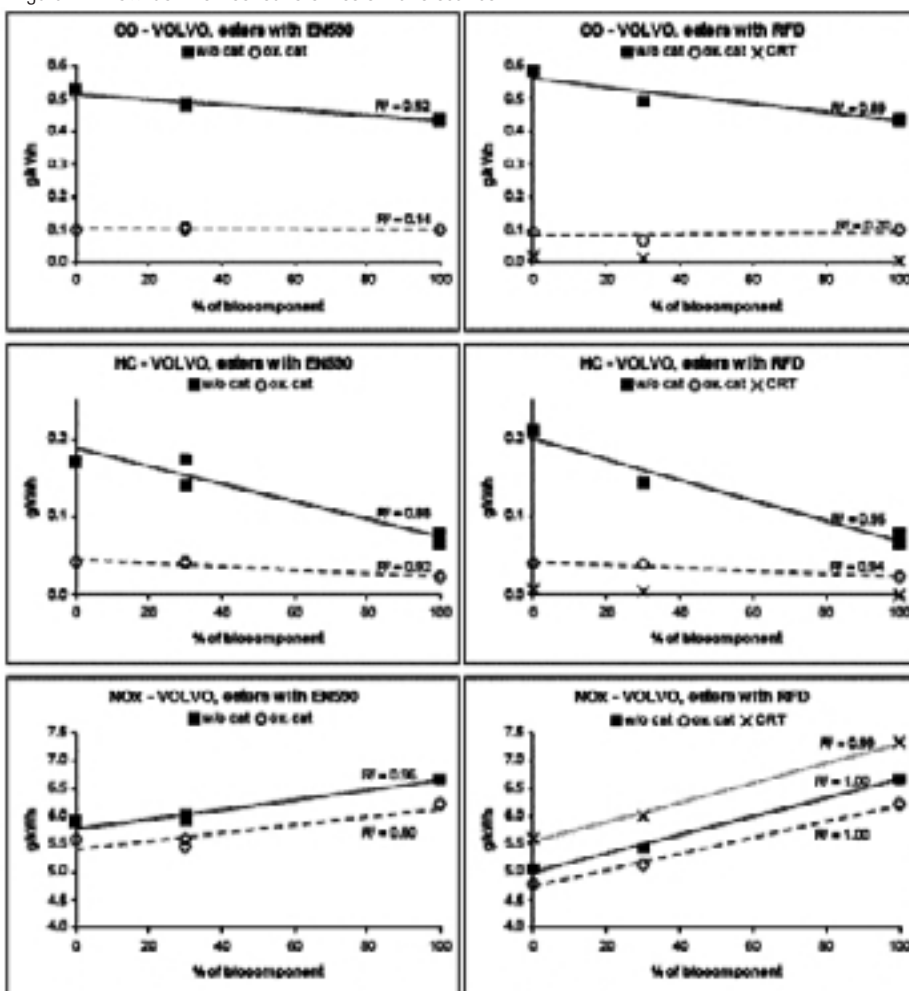
² Vedi note introduttive Direttiva 2003/30/Ce

³ La combustione di gasolio o di una miscela biocombustibile/gasolio in un motore diesel produce oltre un migliaio di composti più o meno pericolosi per l'ambiente e per l'uomo. La composizione di tale mix varia sensibilmente sotto l'influsso di diversi fattori pertanto una trattazione tecnica esaustiva richiederebbe molto spazio ed esula dalle finalità di questo lavoro.

Riguardo al particolato, all'aumentare della quota di biodiesel in miscela, è stata inoltre riscontrata una variazione qualitativa dello stesso; ovvero un aumento della Frazione Organica Solubile (SOF) a scapito della frazione carboniosa, nonché una riduzione della granulometria che rende il particolato più facilmente inalabile.

Per quel che riguarda l'azoto lo studio ha evidenziato un aumento lineare delle emissioni di NOx proporzionale alla percentuale del combustibile di origine vegetale miscelato. Questo effetto si è riscontrato sia con il bio-estere miscelato a diesel ad alto contenuto di zolfo che con quello a basso contenuto di zolfo. Va comunque sottolineato che, con miscele fino al 30% di BioDiesel, l'aumento delle emissioni di NOx è contenuto e non supera il 6-7% rispetto alle emissioni del diesel fossile. Nella figura 1 e nella figura 2 sono riassunti gli effetti sulle emissioni regolamentate e sulla mutagenicità del particolato all'aumentare della quota di bio-estere miscelata con il diesel.

Figura 1: Effetti del BioDiesel sulle emissioni allo scarico



EN590: diesel conforme alla norma EN590

RFD: Swedish Environmental Class 1 diesel fuel. Diesel con contenuto di zolfo <10 ppm

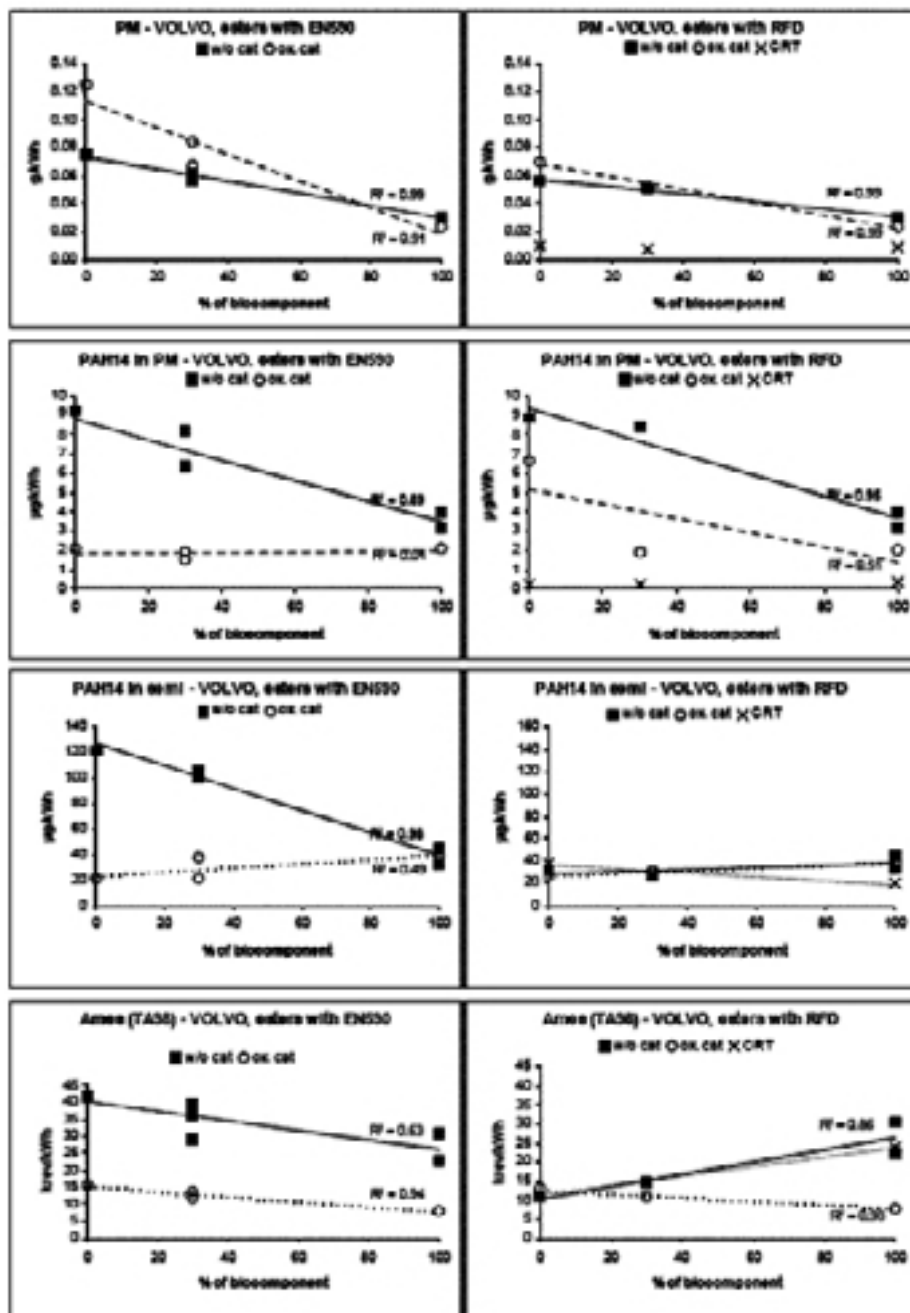
W/O cat: senza catalizzatore

OX cat: con catalizzatore ossidante

CRT: Continuously Regenerating Trap

Fonte: VTT, 2000

Figura 2: Gli effetti del BioDiesel sulle emissioni di PM e PAH e sulla mutagenicità (test Ames) del particolato



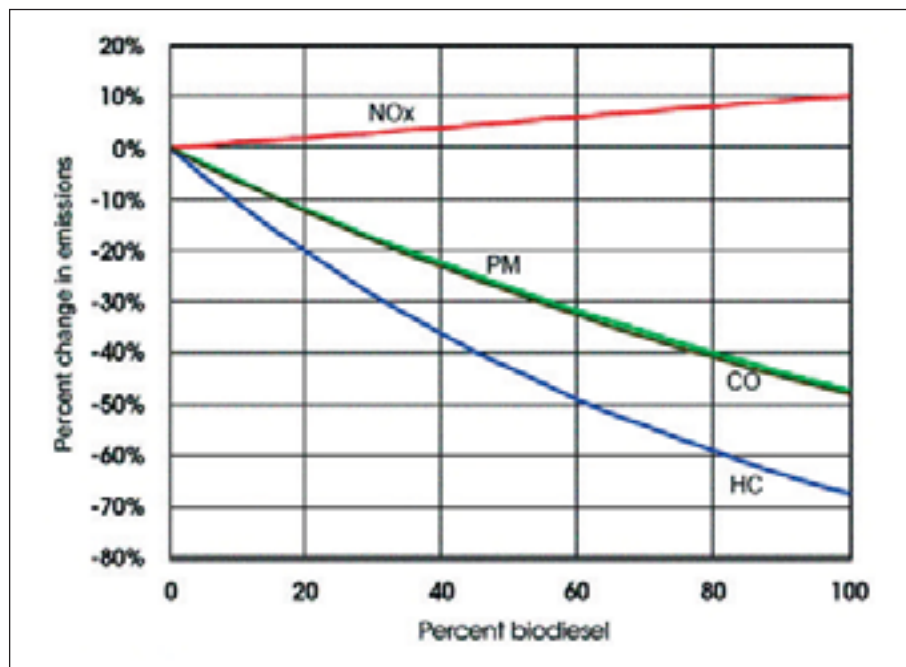
Esters: Biodiesel
 EN590: diesel conforme alla norma EN590
 RFD: Swedish Environmental Class 1 diesel fuel.
 Diesel con contenuto di zolfo <10 ppm
 W/O cat: senza catalizzatore
 OX cat: con catalizzatore ossidante

CRT: Continuously Regenerating Trap
 Ames (TA98): Test di mutagenicità condotto su batteri
 PAH14 in PM: Polifenoli aromatici presenti nel particolato
 Fonte: VTT, 2000

L'EPA in uno studio intitolato "A Comprehensive Analysis of BioDiesel Impacts on Exhaust Emissions" (EPA420-P-02-001 October 2002) arriva a risultati analoghi ed evidenzia le correlazioni tra quantità di BioDiesel usato in miscela con il diesel tradizionale e le emissioni degli inquinanti nei gas esausti dei motori.

La Figura 3 mostra la sintesi dei risultati che sostanzialmente indicano una diminuzione generalizzata degli inquinanti ad eccezione degli NOx che aumentano fino al 10% rispetto al diesel convenzionale.

Figura 3: Variazione delle emissioni di inquinanti in relazione alla quota di BioDiesel



Fonte EPA,2002

3.2 Emissioni non regolamentate

Le emissioni di gas ad effetto serra derivate dall'utilizzo dei biocombustibili sono da tempo oggetto di studi che comprendono non solo la fase di combustione ma si estendono all'intero ciclo di vita utilizzando la metodologia LCA (Life Cycle Assessment).

In questo campo, recentemente (2004), è stato svolto uno studio da JRC/EUCAR/CONCAWE per conto della Commissione Europea nel quale sono stati comparati, in termini di costo e di CO₂ evitata, differenti biocombustibili considerando l'intero ciclo di vita "well to wheels", ovvero dal pozzo alle ruote.

I risultati hanno mostrato che tutti i biocombustibili contribuiscono ad evitare delle quote variabili di emissione di gas serra a seconda della tecnologia utilizzata per la loro produzione e per il loro utilizzo. Il biocarburante più vantaggioso è risultato comunque il bio-metano derivato dalla digestione anaerobica dei rifiuti e dei reflui zootecnici, in quanto il suo utilizzo ne evita l'immissione in atmosfera.

4. CONFRONTO CON LE EMISSIONI DEI COMBUSTIBILI FOSSILI NEL TRASPORTO URBANO: IL CASO DI ROMA

Il trasporto pubblico locale di Roma è gestito da due società Trambus e SITA, che si avvalgono di una flotta di oltre 2700 autobus. La flotta è composta da motorizzazioni diesel con standard emissivi differenti alle quali si aggiungono 63 mezzi a zero e a basse emissioni.

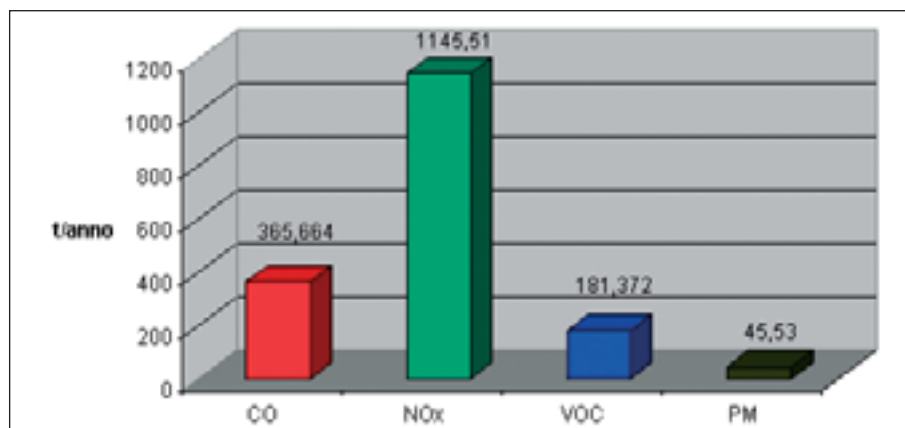
Tabella 2: Composizione Flotta ATAC

Standard emissivo	N. Bus
EURO 0	474
EURO 2	853
EURO 3	1130
EURO 3 + CRT	254
	2711

Fonte: Elaborazione su dati ATAC,2005

L'ATAC, utilizzando la metodologia COPERT III, ha effettuato una stima delle emissioni della flotta di autobus alimentata a gasolio. Poiché, come è stato detto, le emissioni in atmosfera sono fortemente influenzate dalla tipologia di motorizzazione, è stato ripartito il volume di km percorsi nel 2004 dalle vetture, in base alle diverse classi di omologazione. Partendo da questi dati i responsabili ATAC hanno potuto effettuare una stima delle emissioni degli inquinanti regolamentati.

Figura 4: Emissioni inquinanti flotta ATAC – Stima Anno2004



Fonte: ATAC, 2005.

Purtroppo, il modello COPERT III non contempla i biocarburanti tra le categorie dei combustibili per autotrazione; per poter ottenere dei risultati confrontabili, una volta sostituita una quota dei combustibili fossili, sarebbe necessaria una calibrazione dei parametri di input del programma che consideri la variazione delle caratteristiche chimico-fisiche dei carburanti in seguito alla miscelazione e la costruzione di curve di emissione a caldo ed a freddo per i motori⁴. Al momento la mancanza di questi dati rende inutilizzabile la metodologia COPERT III per stimare l'effettiva riduzione delle emissioni della flotta ATAC conseguente all'utilizzo di biocarburanti. Comunque, per stimare almeno l'ordine di grandezza delle emissioni che verrebbero evitate, si può pensare di applicare a questi dati i valori di riduzione calcolati su una miscela al 20% di Bio-Diesel, quali indicati nello studio dell'EPA citato precedentemente ed illustrati nella Figura 3.

⁴ Attualmente è in fase di sviluppo la nuova versione COPERT IV che considera tali nuove tematiche.

Tabella 3: Stima emissioni evitate con miscela di BioDiesel al 20%

	NOx	VOC	CO	PM
Emissioni (t)	+ 23	- 38,2	- 40,2	- 4,59
% sul totale	+ 2%	-21,1%	-11%	-10, 1%

Nel 2004 i mezzi pubblici del comune di Roma hanno percorso 132,6 milioni di Km utilizzando tutti Diesel a basso contenuto di zolfo (Dati ATAC, 2005).

Considerando per Roma un consumo medio dei bus di 60,2 l/100 km (Spazzafumo, 2004) si arriva a stimare il fabbisogno medio annuo di gasolio ovvero 66.654 t/anno. Tenuto conto del diverso contenuto energetico dei combustibili sarebbero necessarie 15.190 t/anno di BioDiesel per garantire la quota per la miscelazione al 20% con il gasolio fossile.

Tabella 4: Stima consumo carburante della flotta

Percorrenza km vettura/anno	Consumo medio autobus l/100 km	Consumo medio annuo (t)	BioDiesel miscela al 20% (t)	Superficie necessaria (ha)
132.600.000	60,2	66.654	15.190	15000

La sostituzione di un kg di gasolio con circa 1,13 kg di BioDiesel (quantità equivalente in termini energetici) comporta il risparmio di una quantità di anidride carbonica variabile da 2,4 kg a 3,2 kg (CTI,2000) quindi l'utilizzo di BioDiesel al 20% nel trasporto pubblico di Roma porterebbe a una riduzione di CO₂ eq variabile tra 36.500 t/anno e 48.600 t/anno.

5. QUANTITÀ DI BIO-COMBUSTIBILI DISPONIBILI LOCALMENTE

Biocombustibili liquidi

Il Comune di Roma ha stipulato un Protocollo d'intesa con la Federazione Provinciale Coldiretti per la promozione e l'impiego dei biocarburanti.

L'obiettivo è quello di destinare a colture per fini energetici 10.000 ha della Regione Lazio nell'anno 2007 attraverso un progetto pilota ed arrivare a 100.000 ha nell'anno 2008. Tra le priorità del protocollo si fa riferimento proprio allo studio delle problematiche connesse con l'uso dei biocarburanti nelle flotte di proprietà delle amministrazioni pubbliche.

Considerando la produzione media per il territorio Italiano, la superficie dedicata a colture energetiche per il 2007 potrebbe produrre 10.000 t di BioDiesel; dunque sufficienti a coprire i 2/3 della domanda di BioDiesel per i trasporto pubblico.

Biocombustibili gassosi

Attualmente nella discarica di Malagrotta è presente già un impianto di produzione di bio-metano che tratta 1000 Nm³/h per produrre circa 400 Nm³/h di bio-metano. Questo combustibile alimenta una flotta di 20 autocompattatori.

Un'ulteriore sviluppo nella produzione di biogas per la produzione di energia e di bio-metano per autotrazione è legato a una diversa gestione dei rifiuti. Dati AMA indicano una percentuale del 25%, di frazione organica nel rifiuto indifferenziato che finisce nella discarica di Malagrotta; una migliore organizzazione della raccolta differenziata dell'umido con l'intercettazione di una quota dell'organico del 20% potrebbe alimentare uno o più impianti di digestione anaerobica capaci di produrre il biogas sufficiente per una flotta di 200-260 autobus urbani, assumendo una percorrenza media degli autobus di 48.500 km/anno ed un consumo medio per bus di 22 MJ/km (VTT, 2005).

Tabella 5: Frazione Organica Disponibile nei RSU di Roma

RSU Indifferenziati t/anno	Contenuto di Frazione Organica % FO	Frazione Organica t/anno	% Raccolta Differenziata FO	Frazione Organica disponibile t/anno
2147397	25	536849,25	20	107369,85

Fonte: Elaborazione su dati APAT, AMA.

Tabella 6: Produzione Teorica media di Bio-metano da impianti di Digestione Anaerobica in base ai dati della Tabella 5

Tipologia Digestore	Produzione di BIO-CH ₄			Produzione di Bio-CH ₄ (Nm ³ /anno)
	Produzione di Biogas Nm ³ /t	Produzione Tot Nm ³ /anno	% CH ₄	
Dry (Sostanza Solida >20%)	130	13958080	55	7676944
Wet (Sostanza Solida <10%)	98	10522245	55	5787234

Fonte : Elaborazione APAT

Tabella 7 Energia fossile risparmiata in base all'ipotesi di produzione contenute in Tabella 6

PCI BIO-Metano MJ/Nm ³ (97% di CH ₄)	Energia Risparmiata MJ/anno	Diesel equivalente t/anno	Litri diesel
36,6	280976160	6689	8011867
	211812797	5043	6039715

Fonte : Elaborazione APAT

6. UTILIZZO DI DISPOSITIVI SPECIALI PER LA RIDUZIONE DI INQUINANTI

L'avanzamento tecnologico negli ultimi anni, oltre ad aver migliorato i sistemi di iniezione e controllo della combustione attraverso l'elettronica, ha prodotto dispositivi di post-trattamento dei gas di scarico capaci di abbattere alcune specie inquinanti.

I sistemi di abbattimento attualmente disponibili comprendono:

- catalizzatori a tre vie (TWC) di nuova generazione per auto a benzina e a gas;
- catalizzatori ossidanti per motori diesel;
- catalizzatori de-NO_x;
- filtri antiparticolato.

Nello specifico i sistemi antiparticolato prevedono la rigenerazione, termica e/o catalitica e meccanica, che in parte può avvenire automaticamente durante il normale funzionamento del veicolo, semplificandone la manutenzione.

La rigenerazione termica può essere agevolata attraverso l'aggiunta di additivi nel combustibile finalizzata ad abbassare la temperatura di combustione del particolato⁵.

Questi dispositivi, normalmente presenti sui veicoli di recente immatricolazione, possono essere installati anche sui veicoli circolanti tramite operazioni di retrofit, ottenendo una riduzione delle emissioni di particolato e di altri inquinanti.

⁵ La rivista dei combustibili. Vol. 56, fasc. 4-5, 2002. F. Avella. "Le nuove tecnologie per la riduzione delle emissioni degli autoveicoli" – 1° CONVEGNO NAZIONALE SUL PARTICOLATO ATMOSFERICO Università di Milano Bicocca 12 -14 maggio 2004

In Italia, nel 2002 l'ATM (Milano) ha avviato una sperimentazione sui filtri antiparticolato CRT™ (Continuously Regenerating Trap) per il retrofit di autobus equipaggiati con motori Euro 2, estendendola successivamente anche ad autobus con motori Euro 3 per un totale di 600 unità.

Il programma di sperimentazione prevedeva una collaborazione tra ATM ed Eni Tecnologie finalizzata a verificare, attraverso la simulazione del reale percorso di linea urbana di Milano su un banco a rulli, l'efficacia di tali dispositivi in funzione del chilometraggio percorso.

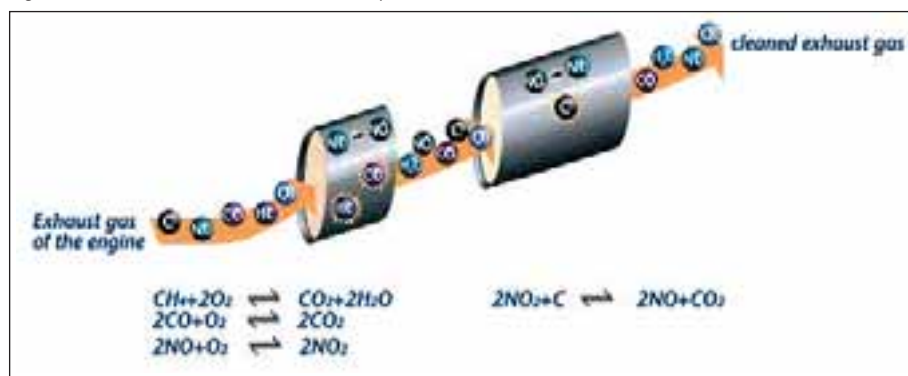
Secondo tale sperimentazione, il filtro utilizzato si è dimostrato efficace nell'abbattimento di CO, HC e PM (sia totale che PM2,5) anche dopo 20.000 km di percorrenza. In assenza di filtro antiparticolato il PM 2,5 ammonta a circa 85-90% del PM totale, in accordo con dati di letteratura, mentre nei motori equipaggiati con filtro lo stesso si colloca intorno al 70% del PM totale.

Nel filtro CRT™, la fuliggine prodotta viene bruciata in modo continuo a temperature comprese tra 200-450 °C. Il dispositivo filtrante, infatti, è in grado di ossidare in continuo, su catalizzatore ossidante (Pt), il particolato trattenuto da un filtro con passaggio del biossido di azoto (NO₂), a sua volta generato dall'ossidazione di una parte degli NO presenti nei gas di scarico. In questo modo la massa del particolato emessa diminuisce fino al 95%.

Va comunque sottolineato che l'adeguamento di questi mezzi comporta l'insorgere di alcune problematiche :

1. Per essere efficiente necessita di combustibile a basso tenore di zolfo (max 50 ppm).
2. Il funzionamento del filtro stesso porta ad un aumento, seppure contenuto, delle emissioni di NO₂ in quanto il catalizzatore ossidante muta il rapporto tra NO₂ e NO nel flusso dei gas di scarico. Purtroppo, l'NO₂ è 5 volte più tossico per le vie respiratorie rispetto all'NO.
3. Il filtro è soggetto comunque ad intasamento che può comportare un aumento della compressione dei gas di scarico con possibili ripercussioni sul buon funzionamento del motore.
4. Sono necessari dei lubrificanti con caratteristiche di alta qualità. Infatti i pori dei filtri si intasano gradualmente a causa delle ceneri prodotte nella combustione dei componenti dell'olio motore (principalmente solfato di calcio e fosfato di zinco). Queste sostanze non vengono rimosse dai normali processi termici di rigenerazione dei filtri e continuano ad accumularsi nel filtro causando un aumento della contro-pressione seguita da un aumento del consumo di carburante⁶.

Figura 5: Schema di funzionamento del dispositivo CRT™



Fonte: HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG

⁶ Inoltre, la parziale combustione degli oli lubrificanti contribuisce ad aumentare la frazione organica solubile del particolato, con formazione di aldeidi, IPA, ecc.

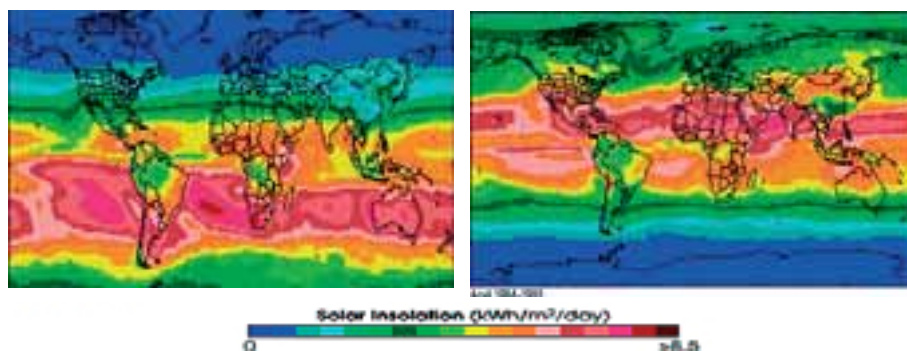
7. RISCALDAMENTO DOMESTICO ED ACQUA CALDA SANITARIA: SOLARE TERMICO

Nella utilizzazione del solare termico l'Italia, nonostante la favorevole posizione geografica, si trova al decimo posto fra i paesi dell'UE a 15, con solo 8 mq di collettori solari ogni mille abitanti, rispetto ad una media europea di 31 mq.

Oltre l'80% di tali collettori si trovano in Austria, Germania e Grecia, con una recente rapida crescita in Spagna. In particolare solo in Germania oltre 800.000 famiglie usano energia solare per riscaldare l'acqua per uso domestico.

La radiazione ha una componente diretta, costituita da quella parte di radiazione che non ha subito la diffusione delle particelle presenti in atmosfera ed una diffusa, che giunge in maniera isotropica dal cielo. La sua densità può arrivare a 1.000 W/m^2 (nelle giornate di cielo sereno); la radiazione solare resta la fonte energetica più abbondante e pulita sulla superficie terrestre e la sua distribuzione è visualizzata nelle due mappe sottostanti.

Figura 6: Distribuzione intensità radiazione solare a Gennaio ed Aprile



Fonte: World Energy Council (WEC)

Come si vede la disponibilità di energia solare non dipende solo dalla latitudine ma anche dalla stagione.

Il rendimento dei pannelli solari è aumentato nell'ultimo decennio, rendendo commercialmente competitive varie applicazioni nell'edilizia, nel terziario e nell'agricoltura. L'applicazione più comune è il collettore solare termico utilizzato per scaldare acqua sanitaria. Un metro quadrato di collettore solare può scaldare una quantità di acqua tra 40 e 300 litri in un giorno ed a $45\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ a secondo dell'efficienza di trasformazione dell'energia radiante del sole in energia termica, che varia con le condizioni climatiche e con la tipologia di collettore tra 30% e 80%.

La tecnologia è quella dei collettori piani che consistono in una serpentina di rame o un fascio di tubi disposti in parallelo che vengono posti a contatto mediante saldatura metallica con una lastra annerita. All'interno della serpentina (o dei tubi) scorre un fluido che assorbe il calore della lastra riscaldandosi e trasportando il calore alle utenze.

Per ottimizzare il riscaldamento del fluido la serpentina viene separata dall'atmosfera tramite una lastra di vetro: è fondamentale per il rendimento che l'aria sigillata all'interno del collettore sia completamente secca (si deve assolutamente evitare la formazione di condensa) per evitare le perdite per conduzione e convezione.

Tale tecnologia è impiegata immediatamente per il riscaldamento di acqua e ambienti domestici ed utilizza sia la componente diretta che quella diffusa della radiazione solare.

L'Italia offre condizioni meteorologiche molto favorevoli all'uso dell'energia solare; il valore di insolazione è compreso tra 1.200 (Nord) e 1.750 (Sud) kWh/m^2 all'anno.

Nonostante una differenza tra nord e sud intorno al 40%, l'irraggiamento incidente su un m^2

rimane comunque maggiore del fabbisogno termico annuo pro capite necessario alla preparazione di acqua calda nel residenziale.

A queste condizioni un impianto solare standard consente di risparmiare fino all'80% dell'energia necessaria per la preparazione di acqua calda e fino al 40% della domanda complessiva di calore per l'acqua calda e il riscaldamento degli ambienti.

La produzione di acqua calda sanitaria è uno dei modi più semplici di utilizzare il solare termico, ottenendo rilevanti vantaggi dal punto di vista del risparmio energetico, della riduzione dei gas ad effetto serra e dell'inquinamento atmosferico.

Il Ministero dell'Ambiente ha diffuso alcuni calcoli relativi ad un progetto per soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria di una famiglia di quattro persone; si considera una necessità pro capite di 60 litri di acqua al giorno, da portare dai 15 °C dell'acquedotto a 45 °C, con un utilizzo di calore di 1.500 kcal/giorno-pro capite; si quantificano in:

- 4.249 kcal/giorno-pro capite, la corrispondente quantità di energia che deve essere spesa nella centrale termoelettrica, nel caso di scaldabagno elettrico, sulla base del rendimento dello scaldabagno, del parco elettrico italiano e delle perdite lungo la rete di distribuzione; il rendimento finale risulta del 35%;
- 1.875 kcal/giorno-pro capite, nel caso di utilizzo di una caldaia a gas, nel caso peggiore di rendimento della stessa pari all'80%;
- 748 kcal/giorno-pro capite, nel caso di caldaia integrata da collettori solari.

Nelle figure sono riportati alcuni esempi di impianti solari realizzati in Europa, che mostrano chiaramente come questa tecnologia sia applicabile sia ad edifici di piccole e grandi taglie ad uso sia residenziale e/o alberghiero (ma anche aziendale e pubblico), sia ad interi distretti come nel caso del Marstal in Danimarca, che è il più grande distretto europeo alimentato ad energia solare.

Figura 7: Esempi di applicazioni del solare termico



a) L'impianto solare per il riscaldamento di un distretto più grande d'Europa misura 20.000 m²; Marstal, Denmark – ESTIF



b) Impianto di riscaldamento solare e a Biomasse, 4.900 m², Aeroeskøbing, Denmark – ESTIF

segue



c) L'impianto solare per il riscaldamento di una piscina – ESTIF



d) Impianto di riscaldamento in un albergo - ESTIF



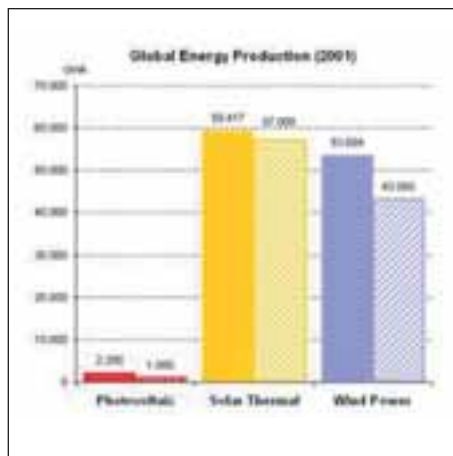
e) Impianto solare per il riscaldamento in caso di impiego in piccoli edifici residenziali – ESTIF



f) Impianto solare impiegato per il riscaldamento di grandi edifici residenziali – ESTIF

La figura seguente mette in evidenza il grado di maturità della tecnologia dei collettori solari, paragonabile a quella eolica, e mostra quanto ancora deve crescere invece il settore del fotovoltaico

Figura 8: Confronto tra diverse tecnologie rinnovabili in termini di produzione energetica globale



Per ciascuna delle tecnologie considerate la colonna di sinistra rappresenta la stima effettuata dalla relativa Associazione Industriale Europea (EPIA per il PV, ESTIF per il solare termico and EWEA per l'eolico), mentre quella di destra mostra la stima effettuata dall'UNDP (United Nations Development Programme) – fonte ESTIF.

Essendo l'energia solare una fonte aleatoria sulla superficie terrestre, i collettori solari termici vanno realisticamente considerati integrativi rispetto alle tecnologie tradizionali; essi vanno quindi considerati capaci di fornire direttamente solo parte dell'energia necessaria all'utenza, energia che altrimenti dovrebbe essere prodotta dalla caldaia tradizionale.

La percentuale di energia termica prodotta annualmente da un collettore solare termico rispetto al fabbisogno termico degli utenti prende il nome di fattore di copertura del fabbisogno termico annuo; a Roma, per un sistema che ottimizzi il rapporto costi/energia prodotta, questo fattore non supera il 65%.

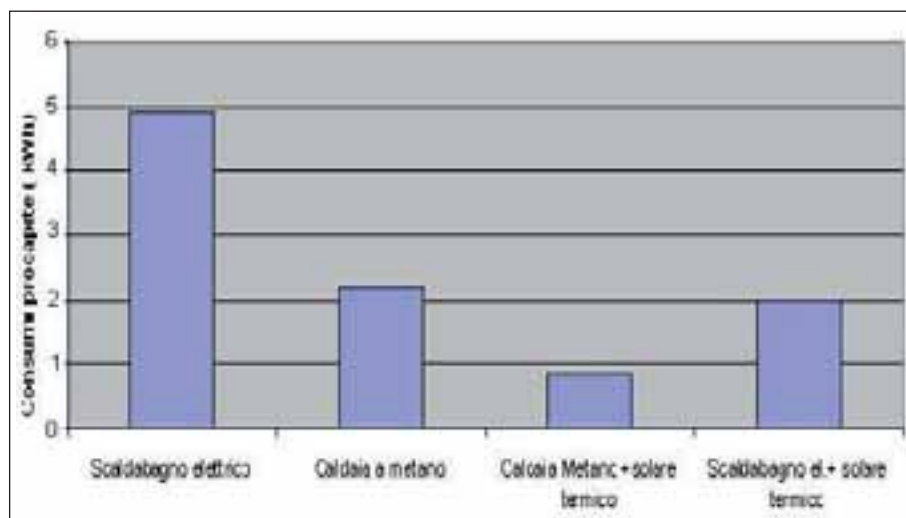
Questo limite è comune a moltissime tecnologie basate su fonti rinnovabili, il più delle volte caratterizzate da disponibilità aleatoria o periodica. A causa di ciò, con il crescere delle dimensioni dell'impianto, cresce il fattore di copertura del carico termico, ma la relazione tra il costo dell'energia e l'energia prodotta resta lineare fino al 55%-60%.

Superato questo valore, il costo continua ad aumentare linearmente con le dimensioni dell'impianto, mentre l'energia prodotta aumenta meno rapidamente, il che si traduce in un maggiore costo dell'unità di superficie di collettore.

È per questo motivo che un collettore solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria dimensionato correttamente viene progettato per soddisfare il 60%-65% del fabbisogno termico.

La figura seguente mostra il confronto tra il fabbisogno energetico necessario per la produzione di acqua calda sanitaria mediante scaldabagno elettrico, caldaia a gas, sistema caldaia gas/collettore solare termico e sistema scaldabagno elettrico/collettore solare termico, ferme restando le ipotesi sopra enunciate ed il quantitativo pro-capite di acqua necessaria.

Figura 9: Consumo energetico in rapporto alla tecnologia utilizzata



Fonte: ISES

Si osserva che nel passaggio dalla soluzione con scaldabagno elettrico a quella con caldaia a gas integrata da collettori solari, il consumo energetico pro-capite passa da 4,93 a 0,87 kWh. È il caso più interessante, dunque, che porta ad una riduzione dell'82% del consumo energetico, a parità di servizio reso.

Le migliori garanzie per il buon funzionamento di un impianto sono, oggi come in passato:

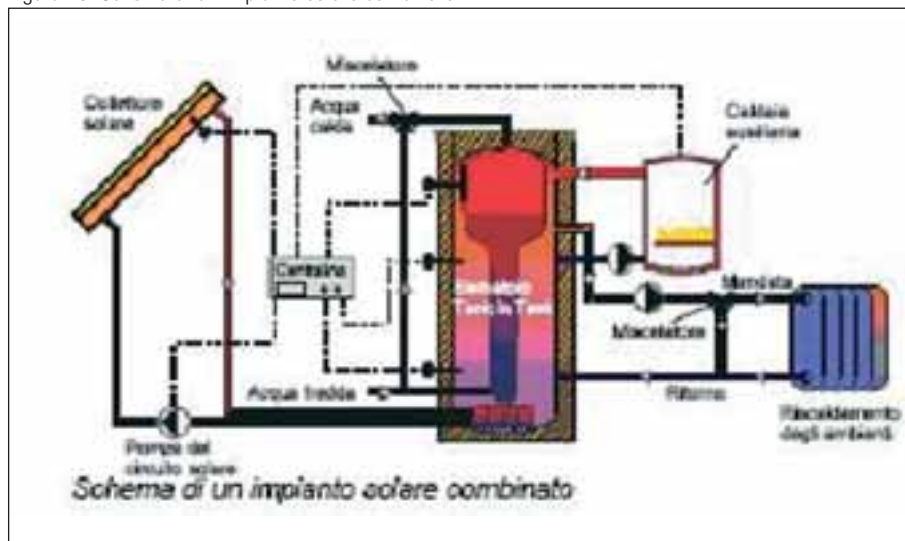
- Componenti solidi e di buona qualità
- Schemi di impianto comprovati e più semplici possibile (tenere conto dei consigli dei produttori)
- Evitare di sovradimensionare i collettori
- Installazione appropriata (coibentazione)

Il mercato offre una grande varietà di tipologie di impianti solari combinati.

L'accumulo tampone è l'unità termica centrale e come tale viene integrata nell'impianto di riscaldamento. Per portare a regime termico l'accumulo tampone, l'impianto solare riscalda la parte inferiore del serbatoio, mentre la caldaia e altri eventuali generatori di calore vengono collegati alla parte superiore.

Il circuito di riscaldamento è allacciato direttamente al serbatoio, mentre l'acqua sanitaria viene fornita attraverso la miscelazione con acqua fredda.

Figura 10: Schema di un impianto solare combinato



Il compito di un impianto combinato è quello di fornire contemporaneamente calore a diverse temperature, da una parte al circuito dell'acqua sanitaria, dall'altra a quello del riscaldamento. Per questo è possibile operare con due diversi serbatoi, ma la maggior parte dei produttori ricorrono a sistemi integrati con un serbatoio centrale.

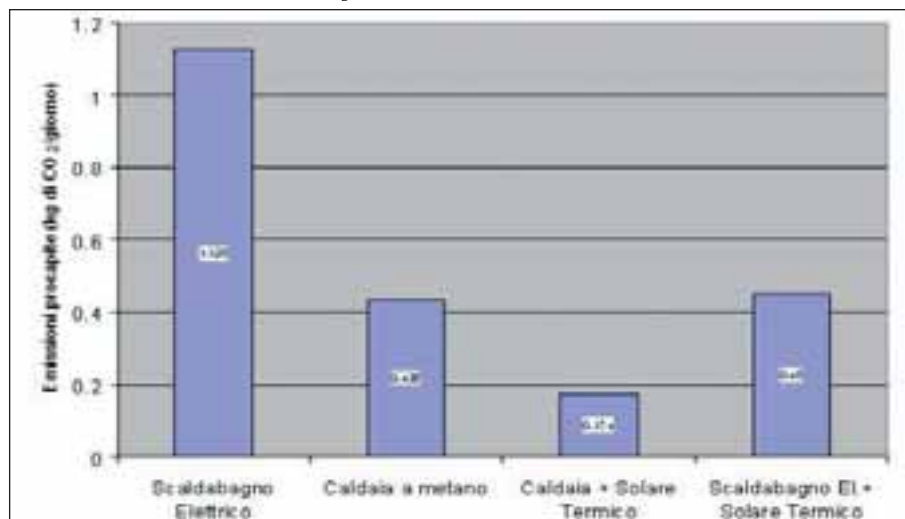
Questi sistemi sfruttano il fenomeno della stratificazione termica dell'acqua. Una buona stratificazione si ripercuote positivamente sul funzionamento e sull'efficienza di un impianto solare. Le principali caratteristiche degli impianti sono rappresentate dal tipo di serbatoio, dalla gestione del sistema e dall'integrazione dei componenti.

Un vantaggio degli impianti combinati è dato dal serbatoio tampone, che permette anche un migliore funzionamento della caldaia. La caldaia non è, infatti, costretta ad accendersi continuamente a ogni minima richiesta di calore: è sufficiente che essa riscaldi tutta la parte superiore dell'acqua nel serbatoio tampone – la prima a essere erogata – e quindi può spegnersi per un lungo periodo.

Le emissioni di gas ad effetto serra per gli scaldabagni elettrici sono di 1,125 kg CO₂/giorno pro-capite, a fronte di 0,436 kg CO₂/giorno pro-capite per caldaia a metano, di **0,174 kg CO₂/giorno pro-capite per un impianto ibrido solare/gas** e di 0,45 kg CO₂/giorno pro-capite per un impianto ibrido solare/scaldabagno elettrico.

La figura seguente rappresenta una stima delle emissioni di CO₂ generate nelle diverse tipologie di impianti (fonte ISES):

Figura 11: Stima delle emissioni di CO₂ generate nelle diverse tipologie di impianti



Fonte: ISES

Il mercato offre oggi impianti combinati a costi compresi tra 750 e 1.000 €/m² di superficie di collettori, comprensivi di installazione e messa in opera.

Mediamente un impianto di 10 m² determina costi di investimento compresi tra 7.500 e 10.000 €. Il costo d'impianto dipende dal dimensionamento del sistema rispetto al fabbisogno termico totale, dalla integrazione con il sistema tradizionale e dal rapporto tra fabbisogno estivo ed invernale.

Il risparmio energetico annuo varia tra 306 kWh/m²-y e 729 kWh/m²-y.

Elevati risparmi per metro quadrato si raggiungono in particolare quando, oltre al fabbisogno per acqua calda, ne esiste uno ulteriore (per esempio una piscina).

8. UTILIZZO DEL SOLARE TERMICO NELLE AREE URBANE

Nella UE, un terzo del consumo complessivo di energia è dovuto ai consumi domestici (riscaldamento, condizionamento, illuminazione, alimentazione apparecchiature elettriche), responsabili di circa il 20% delle emissioni totali di gas serra ed inquinanti della stessa UE.

La maggior parte dell'energia consumata in casa serve per circa il 70% nel riscaldamento, il 18% per ottenere acqua calda ad uso sanitario e di cucina ed il 12% per l'illuminazione e l'alimentazione degli apparecchi elettrici.

Per esempio in Emilia-Romagna si consuma ogni anno energia per l'equivalente di circa 12.000.000 di tonnellate di petrolio, di cui 2.600.000 (oltre il 20%) sono destinate alla climatizzazione degli edifici civili.

In particolare, nelle abitazioni, **il riscaldamento degli ambienti** assorbe la quota più rilevante dei consumi di energia (70%), seguito dalla produzione di acqua calda ad uso sanitario e di cucina (20%) e dai consumi elettrici per elettrodomestici ed illuminazione (10%).

Attraverso un sistema di pannelli solari montati sulla superficie del tetto di un edificio si potrà produrre acqua calda e si può dunque calcolare la quota di energia termica che potrà essere ricavata e le quantità di emissioni evitate di gas serra ed inquinanti vari per la mancata combustione dei combustibili fossili utilizzati per il riscaldamento domestico e la produzione di acqua calda sanitaria.

A tal riguardo nell'Appendice vengono riportate le rispettive valutazioni.

9. RISCALDAMENTO AUTONOMO E SOLUZIONE CON SISTEMA CENTRALIZZATO IBRIDO

Gli impianti al servizio degli appartamenti possono essere configurati come segue:

1. impianti monoblocco con pannelli solari e relativi accumulatori termici posti sul tetto e separati per ciascun appartamento, integrati da altrettante piccole caldaie poste negli appartamenti; non è una soluzione adeguata per i costi determinati dal notevole fascio di tubazioni (isolate termicamente) necessarie per collegare i singoli accumulatori termici ai vari appartamenti; inoltre ogni pannello solare fornisce energia ad un solo appartamento e, se questo è vuoto o con un numero di utenti inferiore a quello di progetto, il calore in eccesso non può essere utilizzato; infine per gli appartamenti lontani dal tetto è necessario attendere un certo tempo fra la richiesta di acqua calda e la sua erogazione;
2. sistema centralizzato di pannelli solari al servizio di tutto l'edificio collegati a due soli collettori, di adeguata dimensione, uno di andata ed uno di ritorno, cui attingono gli accumulatori termici posti nei vari appartamenti; ciascun accumulatore termico è integrato da una caldaia e l'acqua calda è erogata rapidamente;
3. sistema centralizzato di pannelli solari al servizio di tutto l'edificio che riforniscono di acqua calda un accumulatore di calore comune; a tale accumulatore attingono i vari appartamenti, ciascuno integrando il fabbisogno di calore con una specifica piccola caldaia;
4. sistema centralizzato di pannelli solari e caldaia centralizzata di riscaldamento.

Il metano è comunemente preferito agli altri fossili in quanto essendo quasi privo di zolfo, assicura condizioni ottimali di combustione e riduce le emissioni inquinanti.

L'ultimo schema d'impianto citato, appare in controtendenza rispetto agli altri in quanto la diffusione dell'uso del metano ha stimolato la realizzazione di impianti di riscaldamento e per acqua sanitaria unifamiliari, molto spesso rinunciando agli impianti centralizzati esistenti.

L'utilizzo di caldaie unifamiliari si basa principalmente su motivazioni economiche, in quanto ciascun appartamento è riscaldato in relazione al suo reale utilizzo.

Tale scelta impiantistica presenta dei punti di debolezza per i seguenti motivi:

- Un impianto di riscaldamento centralizzato può essere agevolmente dotato di misuratori delle calorie effettivamente consumate, capaci anche di consentire il contenimento dei consumi;
- Ogni appartamento scambia calore con gli appartamenti contigui e con l'esterno, causando in alcune situazioni un aumento dei consumi negli appartamenti con gli impianti in funzione.
- La combustione del gas nelle caldaie unifamiliari può avvenire in modo non ottimale sia a causa dei transitori determinati dai frequenti cicli di accensione e di spegnimento, sia a causa di un tiraggio non adeguato quando le canne fumarie, come accade nella maggior parte dei casi per impianti realizzati in edifici esistenti, non raggiungono l'altezza del tetto con l'inconveniente di una dispersione degli inquinanti non adeguata.
- Il rendimento delle caldaie diminuisce al diminuire della potenza installata.

Alle considerazioni di cui sopra si aggiungono quelle relative alla sicurezza. Infatti, in base al rapporto per il 2005 del Comitato Italiano Gas, le caldaie centralizzate a metano hanno determinato solo l'1,5% dei 202 incidenti da gas, le caldaie unifamiliari il 42,1% e gli scaldacqua il 23,3%.

10. RAFFRESCAMENTO EDIFICI: SOLARE TERMICO

L'utilizzo del solare termico per il raffrescamento degli ambienti rappresenta una opportunità molto interessante in quanto in Europa circa il 30% del consumo di energia primaria è dovuto al riscaldamento e al condizionamento degli edifici; il condizionamento sta assumendo un ruolo sempre più rilevante, con una grande espansione del mercato dei condizionatori di piccola taglia (Room Air Conditioners – RAC). Tale fenomeno comporterebbe un consumo di energia pri-

maria al 2020 pari a 4 volte quello del 1996.

Il mercato italiano di condizionatori di piccola taglia è il più vasto d'Europa e tale situazione amplifica il consumo energetico e, nei periodi estivi, il rischio di eventuali black-out indotti da condizioni meteorologiche avverse. Sembrano quindi necessari interventi regolatori del mercato del condizionamento e l'applicazione di misure per la riduzione del consumo.

La problematica è molto sentita a livello internazionale. Infatti l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) ha costituito la Task 25 SHC (Solar Heating and Cooling) per lo sviluppo di tecnologie di condizionamento dell'aria basate sullo sfruttamento dell'energia solare termica.

Vengono considerate tre tecnologie: ad assorbimento, ad adsorbimento e sistemi "Desiccant and Evaporative Cooling (DEC)".

Si tratta di tecnologie non semplici e non applicabili a sistemi di piccola capacità (rari i sistemi con capacità inferiore a 100 kW).

Tutte queste tecnologie possono utilizzare acqua calda a temperatura compresa fra i 60 e i 100 °C, fornita da solare termico convenzionale. Sono quindi tecnologie che una volta adeguatamente sviluppate risulteranno particolarmente adatte ad impianti centralizzati di riscaldamento e di raffrescamento.

11. RISPARMIO DI COMBUSTIBILI FOSSILI ED EMISSIONI EVITATE

L'utilizzo dei Bio-Combustibili per il trasporto e del Solare Termico per il riscaldamento/raffrescamento degli edifici potrebbe evitare l'impiego di grandi quantità di combustibili fossili quali il gas naturale, il gasolio, le benzine, l'olio combustibile ed il carbone; questo contribuirebbe alla riduzione delle emissioni di gas serra e di sostanze inquinanti.

Le aree urbane potranno avere grandi vantaggi dalla sostituzione anche parziale dei combustibili utilizzati attualmente per il trasporto ed il riscaldamento/raffrescamento sia dal punto di vista energetico che da quello ambientale.

Per ottenere questi risultati il ciclo dei rifiuti urbani dovrà essere razionalizzato in modo che il Bio-Metano per il trasporto possa essere ottenuto dalla parte umida degli stessi rifiuti mentre la gassificazione della restante parte solida potrebbe contribuire al riscaldamento domestico ed alla produzione di elettricità ed acqua calda (co-generazione).

In futuro, anche l'utilizzo della tecnologia del Solare Foto-Voltaico per la produzione di energia elettrica potrà dare un contributo attraverso la generazione distribuita nel territorio (microgenerazione) recando vantaggi in termini ambientali in quelle zone di produzione posizionate all'interno di aree metropolitane.

La qualità dell'aria potrà migliorare in funzione del grado di sostituzione dei combustibili con fonti rinnovabili ma solo il suo monitoraggio continuo potrà quantificare meglio i vantaggi ambientali conseguiti attraverso politiche energetiche alternative ed incentivi fiscali.

Il **Municipio XV del Comune di Roma** ha già iniziato una politica di sostituzione dei fossili attraverso la progressiva installazione di pannelli solari negli Asili Nido ricadenti nel proprio territorio. Ha già quantificato l'apporto solare ed il risparmio di combustibile per la produzione di acqua calda sanitaria. In breve tempo procedendo su questa strada anche per altri edifici pubblici e coinvolgendo gli altri Municipi (20) che potranno adottare simili soluzioni, si avranno enormi vantaggi ambientali ed energetici.

Sempre a Roma opera una flotta dell'AMA (Azienda per la Raccolta Rifiuti) di 20 auto-compattatori a metano da circa 10 anni alimentati a Bio-Metano prodotto nell'impianto di Malagrotta (Municipio XV).

Gli **Enti Locali** hanno in mano la possibilità di migliorare la qualità dell'aria nelle loro rispettive aree metropolitane in quanto sovente gestiscono, tramite le loro municipalizzate, sia i Trasporti locali, sia la gestione dei Rifiuti Urbani (solidi ed umidi), sia la gestione della Depurazione delle acque reflue (fanghi di depurazione), sia la Generazione di energia elettrica ed anche termica (co-generazione).

CONCLUSIONI

Si possono fare alcune considerazioni che indirizzano verso una scelta ben definita.

La disponibilità potenziale di Bio-Metano, derivato dal biogas di discarica controllata e da gestione anaerobica, potrebbe essere sufficiente a coprire il fabbisogno delle flotte urbane di autobus.

Sia le discariche che i reflui (urbani e zootecnici) sono comunque fonti di emissioni di gas clima-alteranti ed il loro impiego per fini energetici costituisce già di per sé un abbattimento dell'impatto ambientale.

In un confronto basato sui soli costi interni, il Bio-Metano fornisce una soluzione più economica sia rispetto al gasolio che rispetto al metano. Inoltre in un confronto basato sulle sole emissioni il Bio-Metano fornisce una soluzione certamente meno impattante rispetto al gasolio e mediamente meno impattante del metano.

Circa poi il confronto basato sulla monetizzazione delle emissioni, e quindi sul computo sia dei costi interni che di quelli esterni, il Bio-Metano risulta meno costoso sia del gasolio che del metano.

Infine la scelta di utilizzare quanto più possibile le discariche e gli allevamenti per recupero energetico sembra la più razionale per l'applicazione esaminata; un ulteriore vantaggio economico ed ambientale potrebbe essere ottenuto separando quindi la frazione organica umida degli RSU ed inviandola, compresi pure i fanghi di depurazione delle acque reflue, al processo di digestione anaerobica.

Analogamente l'utilizzo del solare termico per il riscaldamento domestico o per la produzione di acqua calda sanitaria, con la sostituzione del metano/olio combustibile, potrebbe contribuire alla riduzione degli inquinanti e dei gas serra.

Nel prossimo futuro è auspicabile l'avvio di una attività progettuale finalizzata alla razionalizzazione gestionale dei rifiuti urbani, dei fanghi di depurazione delle acque reflue e dei reflui zootecnici, con conseguente cessazione del conferimento in discarica dei RSU attraverso raccolta differenziata e separazione della parte solida ed umida dei rifiuti.

Successivamente, potranno essere utilizzate tecnologie di gassificazione della parte solida degli RSU, attraverso gassificatori avanzati (doppio stadio) che produrranno un Syngas (miscela di H₂ e CO), con basso tenore di catrame (tar).

Tale syngas potrà essere utilizzato in sistemi energetici co-generativi (uso contemporaneo di energia elettrica e termica) aiutando così l'attuale sistema energetico attraverso la generazione di elettricità distribuita nel territorio metropolitano, anche con la distribuzione di acqua calda per riscaldamento domestico ed acqua sanitaria, che si aggiunge così a quella che si può produrre con il solare termico.

La parte umida dei rifiuti potrà essere utilizzata nei Reattori di Digestione anaerobica per la produzione di Biogas (miscela di CH₄ e CO₂) da utilizzare per alimentare le flotte di autobus pubblici nelle aree metropolitane con il Bio-Metano.

Gli impianti di cui sopra potranno nascere così nelle periferie non abitate delle rispettive aree metropolitane, con possibile riduzione anche dei problemi di inquinamento prodotto per la raccolta dei rifiuti.

In questo modo si ha la possibilità di utilizzare correttamente le risorse basate soprattutto sui rifiuti e reflui (urbani e zootecnici) e si potrà dare una risposta sia alla riduzione dei gas serra che a quella degli inquinanti nei territori metropolitani.

Occorrerà però realizzare le rispettive reti di distribuzione del Biogas e dell'energia elettrica e termica prodotti partendo dalle zone periferiche, dove saranno localizzati gli impianti di trasformazione ed energetici, e verso le zone urbanizzate utilizzando nelle aree urbane anche le tecnologie "no-dig" (senza necessità di realizzare scavi e trincee nel terreno) con grande riduzione di inquinamento.

BIBLIOGRAFIA

- A Comprehensive Analysis of BioDiesel Impacts on Exhaust Emissions Technical Report - (EPA420-P-02-001), October 2002.
- ATAC spa. Relazione Annuale del Comune di Roma Anno 2004/2005 "Trasporto Pubblico Investimenti e Progetti per l'Ambiente".
- Attività PROBIO della Regione Lombardia. Allegato 2: Aspetti legislativi, tecniche ambientali del Biodiesel e dell'ETBE. A cura di Regione Lombardia, Comitato Termotecnico Italiano. Gennaio 2004.
- Biofuels in the European Union A vision for 2030 and beyond – Final draft report of the Biofuels Research Advisory Council – 2006
- Biogas as Vehicle Fuel - A European Overview. Trendsetter Report No 2003:3. Stockholm, October 2003.
- Bus Emission Evaluation: 2002-2004 Summary Report; N. Nylund and K. Erkkila, VTT Processes, Finland 2005
- Caserini S. et al. "Relazione tecnico-scientifica: emissione di inquinanti dalla combustione in impianti termici civili" Rapporto ARPA Lombardia – Settore Aria, Allegato n. 1 alla D.G.R. VII/17533 del 17/05/2004, B.U.R.L. 2° supplemento straord. al n. 22 del 27 maggio 2004.
- Direttiva 1998/69/CE
- Direttiva 1999/96/CE
- Direttiva 2003/17/CE
- Direttiva 98/70/CE
- EUBIONET.Liquid Biofuels Network Activity Report.France, April 2003.
- EUCAR, JRC and CONCAWE 2004. Well to well analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context.
- F. Avella. "Le nuove tecnologie per la riduzione delle emissioni degli autoveicoli" – 1° CONVEGNO NAZIONALE SUL PARTICOLATO ATMOSFERICO Università di Milano Bicocca 12-14 maggio 2004
- Giovanni F. De Santi, Giorgio Martini. L'inquinamento da traffico e prospettive future – Ispra (VA), Italia
- Giuseppe Spazzafumo. Stato dell'Arte sulla Produzione ed Utilizzo di Biocombustibili: Metanolo, Etanolo, Biodiesel e Biogas per il Trasporto Urbano in Sostituzione delle Fonti Energetiche Fossili. Relazione APAT 04-RIS-4141
- Il contenimento delle emissioni tramite sistemi di post trattamento fumi. L'esperienza di ATM S.p.A., Lucio Bozzetti, Giornata di Studio "Circolazione dei mezzi pesanti in area urbana: fattori di emissione, ipotesi di intervento e soluzioni" Bologna, 13 novembre 2003.
- ISES ITALIA - Sezione della International Solar Energy Society
- Jerry D. Murphy - Anaerobic digestion and biogas - Composting conference - 5 Maggio 2005, Portlaoise.
- La rivista dei combustibili. Vol. 56, fasc. 4-5, 2002
- Protocollo d'intesa per la produzione e l'impiego dei biocarburanti tra Comune di Roma e Federazione Provinciale Coldiretti Roma.
- Research Report ENE5/33/2000. IEA/AMF Annex XIII: EMISSION PERFORMANCE OF SELECTED BIODIESEL FUELS-VTT's CONTRIBUTION. Espoo, October 2000.
- Solar Combi-Systems - Impianti solari termici per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria e degli ambienti; Ambiente Italia
- Tendenze oli lubrificanti per autovetture ed autocarri, L.Carcano – PA SERVICE Srl, AMME – ASMECCANICA, Napoli 21 Maggio 2004.

BIBLIOGRAFIA WEB

<http://europa.eu.int>
<http://www.ambienteitalia.it/solare/fsprogetti.htm> Ambiente Italia srl – Istituto di Ricerche
<http://www.estif.org/1.0.html> European Solar Thermal Industry Federation
<http://www.iea-shc.org/> International Energy Agency (IEA)
<http://www.isesitalia.it/homed.html>
<http://www.paesedelsole.org>
<http://www.swt-technologie.de/html/negst.html>
www.cti2000.it
www.romaperkyoto.org
www.unione petrolifera.it

APPENDICE

Energia solare termica ottenibile ed emissioni di gas serra ed inquinanti evitate

La potenza ottenibile dai pannelli solari è (media Estate – Inverno) circa il 40% della radiazione solare incidente (mediamente circa **1.000 W/m²**).

Con **400 W/m²** sarà possibile riscaldare acqua per uso sanitario e di cucina per una abitazione di 100 m² (con 25 m² di pannelli solari) attraverso la potenza di 10 kW; in 6 ore di insolazione al giorno si potrà ottenere **60 kWh/d** di energia.

Con tale energia si potrà riscaldare circa **1,50 m³/d** di acqua a circa 50 °C assumendo la temperatura dell'acqua in ingresso a 15 °C (**ΔT=35°C**).

Una famiglia di 4 persone, in una abitazione di **100 m²**, consuma in media **240 litri** di acqua calda al giorno (circa **60 l** di acqua calda al giorno/persona); l'energia consumata sarà quindi:

$$240 \text{ kg} \times 1,0 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times 35 \text{ }^\circ\text{C} = \mathbf{9,75 \text{ kWh/d}}$$

A fronte di un consumo medio giornaliero di circa **10 kWh/d**, per produzione di acqua calda per usi sanitari e domestici, la rimanente quota **50 kWh/d** potrà essere utilizzata per il riscaldamento domestico.

Nel periodo invernale le ore di insolazione media giornaliera si aggirano sulle **6 ore/d**, per cui nei sei mesi (**180 d**) di riscaldamento si potranno utilizzare (sempre per una abitazione di 100 m², con 25 m² di pannelli solari e con 400 W/m² di radiazione solare incidente), mediamente:

$$0,40 \text{ kW/m}^2 \times 25 \text{ m}^2 \times 6\text{h/d} \times 180\text{d} = \mathbf{10.800 \text{ kWh}}$$
 (energia solare termica disponibile nei 180d)

$$10 \text{ kWh/d} \times 180\text{d} = \mathbf{1.800 \text{ kWh}}$$
 (consumo medio di energia per acqua calda-sanitaria nei 180d)

$$10.800 \text{ kWh} - 1.800 \text{ kWh} = \mathbf{9.000 \text{ kWh}}$$
 (energia disponibile per il riscaldamento nei 180d).

Per il riscaldamento di una abitazione di 100 m², con un buon isolamento termico e considerando mediamente 10 ore di riscaldamento al giorno, occorrerà un fabbisogno di **100 kWh/d** (10kWx10h/d); il solare termico potrà dare un contributo pari a circa **50 kWh/d** (9.000

kWh/180d), cioè circa il 50% del fabbisogno termico necessario per il riscaldamento domestico.

Dato che l'impianto solare integra il sistema di riscaldamento al **50%**, il consumo totale **annuo** di energia termica nelle abitazioni che hanno un buon isolamento termico delle pareti perimetrali, si aggira in media sui **215 kWh/m²-y** [(10 kWh x 365d + 100 kWh/d x 180d) / 100 m²].

Per cui in un anno il solare contribuirà per **12.650 kWh/y** [(1.800 kWh/180d x 365d =) **3.650 kWh/y**, produzione di acqua calda-sanitaria, e **9.000 kWh**, integrazione riscaldamento domestico].

Essendo il fabbisogno totale di **21.650 kWh/y** (3.650 kWh/y + 18.000 kWh/y), allora il solare termico contribuirà per circa il **58%** (12.650 kWh/y / 21.650 kWh/y).

Poiché l'energia termica totale annua richiesta, per una famiglia di 4 persone in una abitazione di **100 m²**, sarà di **21.500 kWh/y** (215 kWh/m²-y x 100 m²) allora la differenza di **8.850 kWh/y** (21.500 kWh/y - 12.650 kWh/y) dovrà essere fornita dai combustibili fossili.

Per cui la quantità di fossile (**gas naturale o metano**) evitata sarà:

Energia solare termica disponibile: **12.650 kWh/y**; $H_{i-CH_4} = 37 \text{ MJ/m}^3$ od anche **10,30 kWh/m³**;

Volume di **metano** evitato: **12.650 kWh/y x (1/10,30) kWh/m³ = 1.231 m³CH₄/y**.

Energia prodotta in un anno dal **metano**: **37 MJ/m³ x 1.231 m³CH₄/y = 0,04555 TJ/y**

Per le **emissioni** occorre riferirsi ai **fattori di emissioni** specifici per **TJ** prodotto nella combustione (fonte: Regione/ARPA Lombardia).

Premesso che il fattore di emissione specifico per la **CO₂** che viene emessa nella combustione del **metano** è di **55 t-CO₂/TJ**, od anche di **198 g-CO₂/kWh**, allora la quantità di **CO₂** evitata dalla mancata combustione di **1.231 m³CH₄/y** si aggira, in un anno, su circa:

2,50 t CO₂/100m²-y

Contestualmente va inclusa anche la quantità evitata di **NO_x** (inquinante e precursore del particolato) che verrà prodotta sempre nella combustione del **metano** dovuta alle alte temperature raggiunte nelle camere di combustione; tale fattore di emissione per il metano è di **50 g-NO_x/GJ**.

Per cui la quantità di **NO_x** evitata dalla mancata combustione di **1.231 m³CH₄/y** si aggira, in un anno, su circa:

2,28 kg NO_x/100m²-y

La quantità totale di particolato (**PTS**) evitata, sempre per la combustione del **metano** pari a **1.231 m³CH₄/y** e tenendo conto del fattore di emissione che è **200 g-PTS/TJ**, si aggira in un anno su circa:

9,11 g-PTS/100m²-y

La quantità di **CO** evitata, sempre per la combustione del **metano** pari a **1.231 m³CH₄/y** e tenendo conto del fattore di emissione che è **25 g-CO/GJ**, si aggira in un anno su circa:

1,14 kg-CO/100m²-y

La quantità di **COV** evitata, sempre per la combustione del **metano** pari a **1.231 m³CH₄/y** e tenendo conto del fattore di emissione che è **5 g-COV/GJ**, si aggira in un anno su circa:

0,23 kg-COV/100m²-y

La quantità di **SO_x** evitata, sempre per la combustione del **metano** pari a **1.231 m³CH₄/y** e tenendo conto del fattore di emissione che è **0,5 g-SO_x/GJ**, si aggira in un anno su circa:

22,78 g-SO_x/100m²-y

A questo punto basterà conteggiare le abitazioni (normalizzate a 100 m²) per avere un'idea sulle quantità di gas serra ed inquinanti che si possono evitare in un anno con l'introduzione del solare termico nelle abitazioni.

LE EMISSIONI IN ATMOSFERA DAI VEICOLI. NOTE TECNICHE SU CRITICITÀ DI STIMA E SU SOLUZIONI ALTERNATIVE PER CARBURANTI, RETROFIT E TECNOLOGIE MOTORISTICHE.

**F. AVELLA^(a), M. BEGGIATO^(b), G. CATTANI^(c), R. DE LAURETIS^(c), F. DEL MANSO^(b),
N. DI CARLO^(c), D. GRECHI^(e), G. PEDE^(f), P. PICINI^(f), G. PINO^(c), M.V. PRATI^(g),
G. ZAMBONI^(h)**

^(a) Stazione Sperimentale dei Combustibili, Milano, ^(b) ARPAL, ^(c) APAT, ^(d) Unione Petrolifera, ^(e) ARPAT, Dipartimento provinciale di Firenze, ^(f) ENEA, ^(g) CNR - Istituto Motori, Napoli, ^(h) Università di Genova.

ABSTRACT

Il Rapporto "Qualità dell'ambiente urbano" edito da APAT si va configurando e consolidando come un appuntamento annuale in cui numerosi autori offrono contributi monografici specialistici per illustrare i variegati aspetti della problematica richiamata dal titolo del citato Rapporto. I destinatari della pubblicazione sono, almeno in via principale, gli Amministratori locali ai quali si intende mettere a disposizione uno strumento di ricognizione sui problemi ambientali, sullo stato attuale e sulle possibili misure di miglioramento della situazione.

Uno dei temi più sentiti è certamente quello della qualità dell'aria e delle emissioni da traffico in quanto, salvo poche eccezioni, proprio queste sono individuate come il più rilevante fattore di pressione e la principale causa di inquinamento atmosferico.

Le medie pongono grande attenzione al tema anche per i riflessi sul vivere quotidiano determinati dall'armamentario dei provvedimenti assunti per mitigare l'effetto del traffico. Si pensi alle varie forme dirette e indirette di restrizione alla circolazione (targhe alterne, zone a traffico o a sosta controllati, "blocco" veicoli EURO 0, etc...), si pensi agli investimenti per infrastrutture (piste ciclabili, parcheggi, etc...) o per incentivare veicoli a più basso impatto (elettrici, a gas, etc...).

Nel "mare magnum" delle misure adottate si trova un po' di tutto, con efficacia talvolta deludente o poco documentata.

Nello spirito del Rapporto sulle aree urbane, ci sembra utile tentare una estrema sintesi di quanto la tecnologia mette a disposizione per ridurre le emissioni inquinanti allo scarico dei veicoli a motore (in questo senso va letto il termine "alternative" nel titolo di questa nota).

Lo sforzo (e il limite) è quello di costringere in forma di schede le informazioni essenziali relative alle varie soluzioni tecnologiche, limitandosi a trattare solo di quelle concretamente disponibili ad oggi o nel brevissimo orizzonte temporale e, per ciascuna di esse, offrire la valutazione sommaria ma tecnicamente corretta dei presumibili vantaggi ottenibili nonché l'effettivo campo di impiego.

Le schede proposte fanno riferimento a tre gruppi distinti di tecnologie disponibili, di cui uno è relativo ai carburanti "alternativi" impiegabili al posto della normale benzina o gasolio, uno è relativo ai "retrofit" ovvero quei dispositivi installabili post vendita per depurare i gas di scarico, il terzo illustra le nuove tecnologie motoristiche correntemente applicate su veicoli presenti nel normale circuito commerciale e che presentano un più basso impatto.

Un contributo introduttivo, meno schematico ma certamente utile, verte su alcuni aspetti generali della problematica e punta a chiarire il reale significato tecnico di talune definizioni nonché a illustrare i problemi e le incertezze di stima quando si tratti di valutare l'efficacia di taluni provvedimenti di scenario.

Riteniamo importante che il "decisore" sia ben informato anche di aspetti solo apparentemente di dettaglio in modo che possa avere maggiore consapevolezza di cosa e quanto sia effettivamente possibile fare e valutare.

Per taluni degli argomenti trattati, nel CD allegato sono inseriti articoli che più diffusamente illustrano i singoli aspetti.

1. ASPETTI GENERALI SULLE MODALITÀ DI STIMA DELLE EMISSIONI DA TRAFFICO

1.1. Differenza fra limiti di omologazione e fattori di emissione

1.1.1. Cos'è il limite di omologazione

Un qualsiasi veicolo (compreso le parti che lo compongono quali i dispositivi di frenatura e di illuminazione, le cinture di sicurezza, gli indicatori di direzione, i sedili, etc...), per poter essere immesso sul mercato e poter circolare liberamente nel territorio dell'Unione Europea, deve essere sottoposto a prove di omologazione effettuate secondo procedure specifiche.

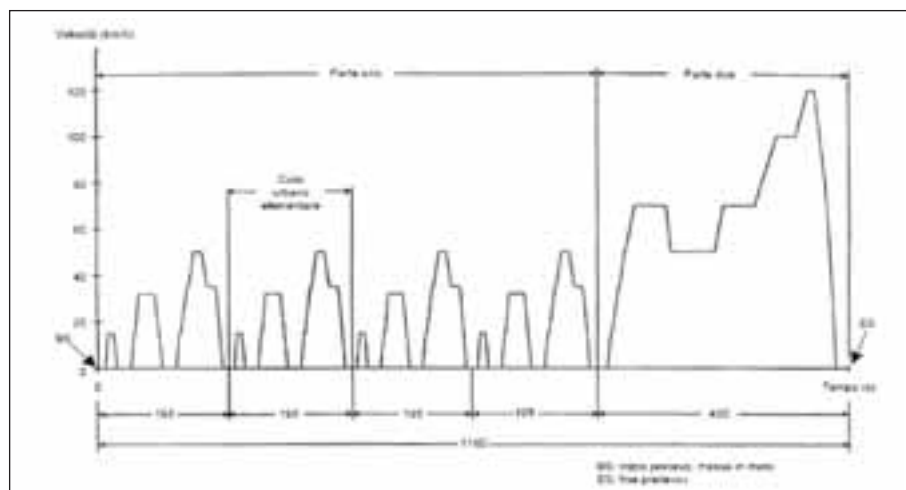
Anche le emissioni di sostanze nocive allo scarico devono rispettare dei limiti massimi di emissione.

Gli inquinanti sottoposti al controllo di laboratorio per l'omologazione sono il monossido di carbonio (CO), gli idrocarburi incombusti (HC), gli ossidi di azoto (NOx) e, per i veicoli diesel, anche il materiale particolato (PM). I veicoli a due ruote, le autovetture e gli autoveicoli commerciali leggeri (peso a pieno carico " 3,5 t) sono sottoposti a una prova di simulazione di percorso su banco dinamometrico a rulli per verificare se rispettano i limiti alle emissioni imposti con le direttive europee in vigore. La prova viene effettuata misurando la quantità in grammi dei singoli inquinanti prodotti da un veicolo durante lo svolgimento di un ciclo di guida standardizzato europeo (ciclo NEDC per gli autoveicoli a quattro ruote) nel quale sono stabiliti le velocità, le accelerazioni, i cambi di marcia ed il numero di volte e la durata in cui il veicolo è fermo. I limiti sono espressi in g/km.

Per gli autoveicoli commerciali pesanti (peso a pieno carico $\geq 3,5$ t) vengono effettuate tre prove differenti secondo la direttiva attuale (EURO 4 ed EURO 5) sul solo motore (al banco dinamometrico) ed i limiti sono espressi in g/kWh.

In figura I è riportato il profilo delle velocità relativo al ciclo di omologazione NEDC attualmente utilizzato per gli autoveicoli passeggeri e per i veicoli commerciali leggeri. Il ciclo è composto di quattro cicli elementari "urbani" e da un ciclo "extraurbano". Durante il ciclo elementare urbano, della durata di 195 secondi, la velocità massima è di 50 km/h, mentre la velocità media è pari a 18,7 km/h. Nel ciclo extraurbano la velocità massima è di 120 /h e la velocità media è pari a 62,6 km/h.

Figura I: Ciclo di guida standard europeo per l'omologazione delle autovetture e degli autoveicoli commerciali leggeri (NEDC) (Direttiva 91/441/CE e successive modifiche).



1.1.2. Cos'è il fattore di emissione

Come è facile intuire, nell'uso quotidiano il profilo di velocità, le accelerazioni, i cambi marcia e gli "stop&go" sono profondamente diversi da quelli del ciclo di omologazione e dipendono fortemente dalle reali condizioni di traffico e dallo stile di guida che si possono avere in un determinato contesto spazio-temporale. Per avere una stima delle emissioni in condizioni di marcia più possibilmente vicine alle reali condizioni di guida sono stati elaborati, partendo da dati sperimentali, dei fattori di emissione dipendenti dalla velocità media di spostamento che tengono conto della temperatura di esercizio del motore e della presenza degli eventuali dispositivi di abbattimento. In genere, i maggiori livelli di emissione si hanno sia in condizioni di basse velocità medie di spostamento (traffico congestionato) che a velocità di spostamento elevate (motore che funziona ad alti carichi).

Come si vede dalla Figura II, il fattore di emissione è una curva (Fonte COPERT III) che ha un andamento dipendente dalla velocità media di spostamento. Il limite alle emissioni valido per l'omologazione è invece un valore fisso, indipendente dalla velocità e determinato come precedentemente detto.

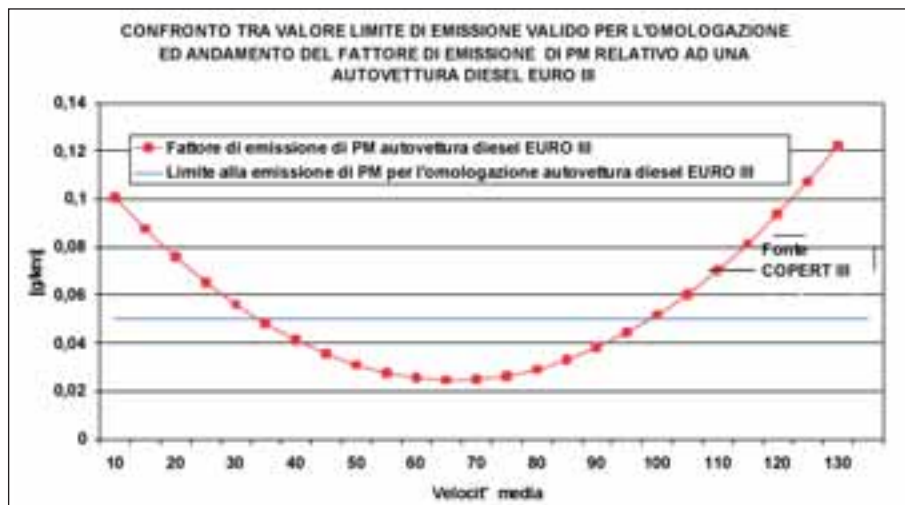
Pertanto, per la stima delle emissioni determinate dal traffico autoveicolare occorre considerare il fattore di emissione di una specie inquinante di una specifica categoria di autoveicoli e non il valore del limite di omologazione.

Come corollario delle informazioni di cui sopra, possiamo dire che il rispetto del limite di omologazione, che può essere ampio o contenuto, viene verificato su veicoli o motori nuovi, su un ciclo standardizzato non reale e solo per taluni inquinanti (c.d. "regolamentati").

Invece, il fattore di emissione viene determinato in base all'esito di rilevamenti su veicoli in uso (in buono stato di manutenzione ma non nuovi) su cicli reali diversificati e può essere determinato per tutti gli inquinanti. Rappresenta un dato medio per una intera categoria di veicoli.

Il rispetto di limiti di omologazione più bassi non implica necessariamente più bassi fattori di emissione

Figura II: Confronto tra limite di omologazione e fattore di emissione.



1.2. Calcolo delle emissioni da traffico

La stima delle emissioni di inquinanti atmosferici da trasporti stradali si avvale di un modello di calcolo denominato COPERT (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Traffic).

Il punto di partenza della stima è il reperimento dei dati di input relativi al fattore di emissione, al parco circolante e alle percorrenze per ciascuna categoria di veicoli a motore.

Le categorie di veicoli in cui viene suddiviso il parco circolante sono oltre 100 e tendono a differenziare le caratteristiche strutturali del veicolo (cilindrata, peso, etc...), quelle di impiego (trasporto passeggeri o merci) e quelle tecnologiche (carburante di alimentazione, limite di omologazione).

1.2.1. Fattori di emissione

Per ciascuna classe dei veicoli individuata come sopra indicato, occorre disporre del fattore di emissione che esprime la quantità di ciascun inquinante emessa nella percorrenza di 1 km, in cui deve essere compresa una quota a "freddo" da fissare in funzione del ciclo di guida (tipo di percorso, velocità media).

I fattori di emissione sono reperibili in letteratura anche se per taluni di essi vi sono differenze non trascurabili secondo la fonte. I fattori di emissione per veicoli nuovi o relativamente nuovi non sono disponibili o non lo sono quelli derivanti da prove sperimentali.

In una valutazione più completa, si dovrebbero stimare anche le emissioni evaporative (tipicamente di benzina dal sistema di alimentazione del motore e dal serbatoio) e non solo quelle dallo scarico. Tuttavia, specie per i veicoli più moderni, queste sono trascurabili e comunque limitate a vapori di benzina (HC). Per il PM è invece significativa la quota di emissioni dovuta alle usure (freni, frizione, pneumatici, asfalto), chiaramente non influenzata dalle caratteristiche tecnologiche del motore quanto piuttosto da quelle del veicolo e in particolare dal peso e dallo stile di guida. Altra importante sorgente di PM da traffico è costituita dalla quota di "risospensione", anch'essa funzione soprattutto del fondo stradale e del peso del veicolo.

1.2.2. Parco circolante

Per i dati relativi al parco circolante, la fonte di riferimento è l'ACI, che fornisce i dati relativi alla consistenza numerica in base alle risultanze sullo stato giuridico dei veicoli, tratte dal Pubblico Registro Automobilistico (PRA)¹, per tipologia di veicolo (autovetture, autocarri merci, autobus, e motocicli) e, all'interno di una stessa tipologia, per alimentazione, cilindrata, portata o fasce d'uso, standard emissivo.

I dati nazionali per le varie tipologie di veicoli sono disaggregati sia a livello comunale (per i comuni con più di 30.000 abitanti) che provinciale, secondo la ripartizione in categorie così come richiesta per la stima delle emissioni inquinanti.

Le principali criticità e incertezze del sistema sono determinate da varie cause. Vi sono differenze tra il circolante teorico (iscritto al PRA) e quello effettivo imputabili a: disallineamento temporale fra effettiva dismissione del veicolo e registrazione della radiazione, veicoli iscritti ad altri registri diversi dal PRA (es.: Ministero della Difesa, Croce Rossa Internazionale, Ministero degli Esteri), veicoli fermi presso i concessionari, veicoli radiati d'ufficio perchè non risulta pagata la tassa automobilistica per almeno tre anni consecutivi (si tratta di circa 1,9 milioni di veicoli, di cui 1,2 milioni di autovetture, parte dei quali, potenzialmente potrebbero circolare comunque).

Inoltre, nell'ambito della disaggregazione provinciale e comunale, un fattore di incertezza tra parco veicolare iscritto e realmente circolante è legato ai veicoli iscritti in una provincia ma circolanti effettivamente in altre. È il caso, in particolare, dei mezzi di proprietà di aziende (che spesso iscrivono i loro mezzi nella provincia dove è presente la sede legale, pur operando su altre province del territorio) e delle aziende di trasporto pubblico.

¹ Il PRA è l'Istituto in cui vengono registrati tutti gli eventi legati alla vita "giuridica" del veicolo dalla sua nascita, con l'iscrizione, alla sua morte, con la radiazione.

Per il parco veicolare ciclomotori non si dispone di un database ufficiale a livello nazionale, né a livello provinciale o comunale. I dati esistenti e disponibili sono quelli relativi al numero di contrassegni personali (c.d. targhette) rilasciati dagli uffici provinciali della Motorizzazione Civile che, com'è noto, sono riferiti ai singoli cittadini e non a ciascun ciclomotore.

Altri dati disponibili sono le stime effettuate dalla Associazione Nazionale delle Imprese di Assicurazione (ANIA, anni 1998 - 2000) e i dati relativi al venduto annuo forniti dai costruttori aderenti all'Associazione Nazionale Ciclo Motociclo Accessori (ANCMA). Utilizzando i dati disponibili, stime relative al parco nazionale dei ciclomotori circolanti nel 2004 sono state effettuate da ANCMA (5.388.881) e dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ufficio di Statistica (4.632.399). Si osserva una forbice piuttosto ampia che, stante l'autorevolezza degli Enti produttori dei dati, dimostra l'incertezza di cui soffrono i dati di base.

Per ottenere una stima relativa al parco ciclomotori su base provinciale e comunale, è possibile considerare il rapporto tra numero di contrassegni emessi annualmente su base provinciale e nazionale come variabile *proxy* da cui stimare il numero di ciclomotori per provincia, partendo dalla stima nazionale. Per ottenere la stima su base comunale, è possibile introdurre l'ulteriore ipotesi che il rapporto fra il totale dei motocicli e il totale dei ciclomotori sia pari a quello a livello provinciale.

I risultati ottenuti con tale metodologia appaiono notevolmente sovrastimati rispetto a quelli, incerti per altri motivi, ricavabili dal riscontro sul pagamento della tassa di circolazione per ciclomotori. Tuttavia questi ultimi risultati trovano sommario riscontro anche in verifiche "sul campo", basate sul rapporto fra motocicli (targati) e ciclomotori, rapporto che ormai in molte realtà urbane si aggira intorno all'unità.

Il numero di ciclomotori disaggregato per standard emissivo può essere ottenuto introducendo l'ulteriore ipotesi che l'anno di immatricolazione del ciclomotore sia uguale all'anno di emissione del contrassegno. In questo modo è sufficiente sommare il numero di contrassegni emessi nell'intervallo di validità di ciascuna direttiva sulle emissioni (1993-1998 per i Convenzionali EURO 0; 1999-2002 per le motorizzazioni EURO 1; da 2003 per le motorizzazioni EURO 2). La stima finale è soggetta ovviamente a un'incertezza notevole, pur offrendo un quadro verosimile della situazione.

Ad accrescere anche notevolmente l'incertezza della stima di parco circolante in un dominio spaziale relativamente piccolo (es. area urbana) interviene la differenza fra il circolante effettivo nell'area e la quantità di veicoli di proprietà di residenti nel/nei comune/i dell'area urbana che è la base informativa dei dati rilevati dal PRA. Si tenga conto che le aree urbane costituiscono poli attrattori e che il pendolarismo per motivi di studio e di lavoro può incrementare non poco l'entità dei veicoli in circolazione in un determinato ambito spaziale, indipendentemente dall'effettiva residenza del proprietario dei medesimi (scambi intercomunali, interprovinciali o addirittura interregionali in funzione della rete infrastrutturale e dei collegamenti socio economici fra aree).

1.2.3. Percorrenze annue totali e in ambito urbano

Le percorrenze medie annue distinte per ciascuna tipologia di veicoli possono essere ricavate come risultato di una analisi incrociata delle differenti fonti informative come il Conto Nazionale dei Trasporti (CNT - Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti), le pubblicazioni dell'ACI, dell'Unione Petrolifera e della Confederazione generale italiana del Traffico e dei Trasporti (CONFETRA). Tutte queste fonti infatti forniscono, peraltro non in maniera esaustiva e continuativa, dati di percorrenze medie per classi di veicoli variamente aggregate.

La disaggregazione per tipologie di veicolo viene quindi ottenuta da un lato individuando percorrenze tali che i valori medi per classi aggregate di veicoli siano confrontabili con quelli pubblicati e, dall'altro proporzionando, all'interno di ciascuna classe, le percorrenze medie in modo da rispettare le differenze tra quelle delle diverse tipologie di veicoli, principalmente in funzione delle anzianità degli stessi e del tipo di alimentazione. Quindi, ad esempio, ai veicoli a

gasolio o a gas di petrolio liquefatto (GPL) vengono attribuite percorrenze medie annue più alte di quelle dei veicoli a benzina, così come ai veicoli più nuovi rispetto a quelli più vecchi.

Per i ciclomotori possono essere utilizzate le percorrenze riportate in ricerche di mercato ad hoc (es. Piaggio, 2001). Per i motocicli sono disponibili dati ACI. Per quel che riguarda le percorrenze con modalità di guida autostradale, è possibile fare un confronto con quanto pubblicato da AISCAT e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti sul CNT relativamente al traffico sulle autostrade.

Per passare alle percorrenze limitatamente al solo ambito urbano possiamo fare riferimento a output di modelli trasportistici, quando possibile verificati con dati di flussi di traffico disponibili a livello locale. Con modalità più empiriche, possiamo attribuire un fattore moltiplicativo alle percorrenze annuali che può essere ipotizzato in funzione dell'uso specifico delle varie tipologie di veicoli. Ad esempio, possiamo immaginare pari a 1 il fattore per i ciclomotori (tipico ed esclusivo uso "urbano") e, viceversa, pari a 0,1 per i veicoli merci pesanti (trasporti a largo raggio). La validazione dell'esito della stima di emissione, calcolata su base annuale come sommatoria dei contributi di ciascuna categoria di veicoli ottenuti mediante il prodotto dei tre fattori (emissione, parco circolante, percorrenza), viene effettuata attraverso il riscontro con la quantificazione dei consumi di carburanti per lo stesso anno di riferimento (desunti dal Bilancio Energetico Nazionale – Ministero delle Attività Produttive) in virtù del fatto che, parallelamente al fattore di emissione, è fissato il consumo specifico. Se ciò è relativamente semplice a livello nazionale, i margini di incertezza crescono sensibilmente nella riduzione del dominio spaziale di valutazione e in particolare per stime a livello comunale (di cui non sono noti dati ufficiali di carburanti erogati).

La valutazione di scenario locale in funzione di variazione della composizione del parco circolante o del carburante di alimentazione soffre di incertezze talvolta molto elevate per la inadeguata conoscenza del fattore di emissione di veicoli nuovi o di quelli relativi a uso di carburanti diversi da benzina/gasolio.

Consistenti indeterminazioni si hanno anche sulla stima del parco circolante di ciclomotori e dell'intero parco circolante in ambiti territoriali soggetti a forti flussi quotidiani o periodici (pendolarismo, zone turistiche).

2. RACCOLTA DI SCHEDE

Di seguito si presenta una scheda per ciascun carburante o dispositivo retrofit o tipologia di motore che ad oggi viene indicato come migliorativo rispetto alle soluzioni correnti ed è sovente oggetto anche di incentivi sia a livello nazionale che locale.

Nella logica di illustrare brevemente solo quanto sia disponibile da subito e per questo sia oggetto di attenzione da parte dei decisori pubblici attraverso provvedimenti cogenti o in procinto di essere assunti, si trascura tutto quanto fa parte di soluzioni importanti e possibili ma la cui adozione su scala adeguata si verificherà in un futuro non immediato come, ad esempio, l'idrogeno e le celle a combustibile o *fuel cell*.

Inoltre, non vengono presentate schede riferite ad altri dispositivi o prodotti che, pur essendo presenti sul mercato, non sembrano mostrare effetti significativi in termini di riduzione delle emissioni inquinanti o, quantomeno, i benefici dichiarati non appaiono ancora sufficientemente documentati.

A titolo di esempio, ricordiamo la famiglia di dispositivi che vengono proposti per provocare una non meglio specificata "polarizzazione" delle molecole di carburante. L'EPA ha pubblicato specifici rapporti di prova su vari modelli di questo tipo di dispositivi, senza tuttavia riscontrare gli effetti dichiarati dal costruttore (<http://www.epa.gov/otaq/consumer/reports.htm>) né sulle emissioni né sui consumi di carburante.

Anche taluni additivi per l'olio lubrificante, indicati come migliorativi delle prestazioni del veicolo in quanto dovrebbero determinare l'aumento della compressione nei cilindri, non appaio-

no testati in maniera sufficiente e, salvo le generiche dichiarazioni dei produttori, non sembrano adeguatamente valutati in termini di efficacia di riduzione delle emissioni allo scarico.

Gli argomenti di ogni scheda sono più diffusamente ed esaurientemente trattati in articoli inseriti nel CD allegato alla pubblicazione.

2.1. Carburanti alternativi

2.1.1. Bioetanolo

Sinonimi	Alcol etilico, etanolo.
Composizione	Alcol etilico (CH ₃ CH ₂ OH) idrato (95 % vol) o anidro.
Origine	Fermentazione e distillazione di cereali da amido (grano, mais, ecc...), coltivazioni zuccherine (sorgo zuccherino, topinambur, bietola), prodotti ortofrutticoli eccedentari, residui e sottoprodotti agroindustriali (vinacce, ecc...). L'etanolo per uso autotrazione da miscelarsi con benzina dovrà essere conforme alla norma di qualità europea EN 15376 (11 parametri chimico-fisici) ancora in via di definizione in ambito CEN.
Disponibilità	Attualmente non disponibile se non per contingenti di importazione molto limitati e a disposizione di aziende petrolifere per produzione di ETBE.
Campo di applicazione	Tipicamente per veicoli a benzina a 2 e a 4 tempi (in Svezia è sperimentato l'uso di miscela stabilizzata di bioetanolo 15% - gasolio 85% su bus). Il bioetanolo puro (idrato), come sostituto integrale delle benzine (in uso in Brasile), e la miscela all'85% volume di bioetanolo anidro in benzina (E85, già disponibile in Svezia) possono essere impiegati solo in motori appositamente progettati (FFV = Flex Fuel Vehicle). L'uso di bioetanolo anidro come componente fino al 5% volume nella benzina non richiede modifiche ai motori degli autoveicoli in circolazione. L'etanolo può essere usato anche come etere (ETBE = etere etil-terz-butilico) da aggiungere alla benzina in quantità non superiori al 15 % volume.
Effetto sulle emissioni	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂: riduzione in quanto "fonte rinnovabile" (la quantità emessa viene riassorbita in fase di crescita della pianta, salvo quota necessaria per la trasformazione e il trasporto-distribuzione); - l'uso di benzina contenente etanolo al 5% volume (E5) non determina significative variazioni delle emissioni inquinanti regolamentate e non regolamentate, mentre non vi sono dati sufficienti a caratterizzare le emissioni inquinanti dei veicoli dedicati (FFV) non ancora in commercio in Italia, alimentabili con la miscela E85.
Costo	Non determinato. In ogni caso significativamente più alto della benzina.
Effetti negativi	L'etanolo presenta: numero di ottano MON più basso del corrispondente etere (ETBE) in grado di non compensare la perdita di numero di ottano determinata dalla riduzione degli idrocarburi aromatici nella benzina; tensione di vapore più elevata che determina una penalizzazione economica per l'espulsione dei butani (idrocarburi leggeri impiegati per modulare la tensione di vapore della benzina finita) e l'incompatibilità con la specifica estiva della benzina (a meno di una esplicita deroga, che dovrebbe essere comunque concessa a livello UE); più elevata concentrazione di benzene nei vapori a causa della formazione di un azeotropo col benzene contenuto nella benzina; elevata solubilità in acqua e igroscopicità del prodotto anidro che possono causare fenomeni di "smiscelazione" con separazione delle fasi benzina-etanolo, rendendo difficoltoso o impossibile l'avviamento del motore. Per mantenere anidro il carburante occorrono pesanti azioni nella catena distributiva (bonifica completa del sistema dalla presenza di acqua, con adattamento di linee e serbatoi per prevenire possibili ingressi accidentali; impiego continuato di benzine contenenti etanolo, per mantenere anidro il sistema; adozione delle precedenti precauzioni da parte di tutti gli operatori per consentire le permutate di prodotto). Considerato che il sistema logistico nazionale, caratterizzato da una forte presenza di cabotaggi e dalla prescrizione di spianamento con acqua di taluni oleodotti per ragioni di sicurezza, l'utilizzo di etanolo in miscela con benzina appare impraticabile mentre più percorribile risulta l'uso come ETBE (v. nota).
Incentivi	Defiscalizzazione per renderlo competitivo con la benzina. Incentivo alla produzione (L. 81/06); obbligo di immissione di una quota sul mercato (Direttiva 2003/30/CE e Decreto 12/05).
Note	L'ETBE. Al fine di superare i problemi evidenziati ma mantenere il vantaggio di "fonte rinnovabile", la soluzione migliore appare quella di utilizzare come componente di sostituzione parziale della benzina l'etil-terz-butil etere (ETBE) che viene ottenuto per eterificazione dell'etanolo con isobutilene (di derivazione petrolifera). Con l'eccezione della Svezia, dove solo piccole quantità di miscela E85 è venduta per alimentare flotte di qualche migliaio di autoveicoli "dedicati"(FFV), tutte le proiezioni di impiego del bioetanolo in Europa sono sotto forma di ETBE.

2.1.2. Gas Naturale (GN)

Sinonimi	Metano.
Composizione	Dipende dal luogo di provenienza: costituito da 95-98% metano (CH ₄).
Origine	Importazione da vari paesi (Russia, Olanda, Algeria).
Disponibilità	Circa 500 distributori in Italia, soprattutto al centro-nord. Per motivi di sicurezza, l'installazione di un distributore è soggetta a vincoli relativi alle distanze. Il gas naturale per uso autotrazione non è soggetto ad alcuna norma di qualità, ma i requisiti al punto di distribuzione devono mantenersi nei limiti dei parametri chimico-fisici indicati nei "Terms of Reference" predisposti dalla CUNA.
Campo di applicazione	Autoveicoli con motore ad accensione comandata trasformati da solo benzina a bi-fuel (impianto retrofit) o prodotti in fabbrica mono e bi-fuel. È possibile convertire motori diesel pesanti (per bus e autocarri) in motori ad accensione comandata alimentabili solo col gas naturale anche se a costi molto elevati. Il motore e il veicolo progettati per l'uso di metano offrono prestazioni e caratteristiche migliori rispetto a quelli trasformati.
Effetto sulle emissioni	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂: riduzione rispetto alla benzina (per rapporto C/H più basso); - inquinanti regolamentati: riduzione significativa soprattutto per veicoli EURO 0, privi di convertitore catalitico; per autobus alimentati con gas naturale il livello di emissione del particolato e degli ossidi di azoto è nettamente inferiore (da 40 a 86% in meno per PM e da 38 a 58% in meno per NOx) rispetto a autobus diesel privi di filtro antiparticolato. Per autoveicoli pesanti diesel (bus e autocarri) di modello recente, dotati di tecnologie avanzate di abbattimento delle emissioni (catalizzatori de-NOx e filtri antiparticolato), i benefici di natura ambientale con l'alimentazione a gas naturale si riducono sensibilmente, come documentato con estese indagini sperimentali condotte negli USA e in Europa; - inquinanti non regolamentati: non è noto l'effetto sull'emissione di particolato per gli autoveicoli leggeri rispetto all'alimentazione a benzina; riduzione significativa per benzene; - efficienza del catalizzatore: ridotta per il metano incombusto.
Costi	<ul style="list-style-type: none"> - carburante: circa due terzi rispetto alla benzina (valutazione come costo chilometrico); - trasformazione post vendita: da 1200 € circa per auto a carburatore, a 2300 € per auto EURO 4;
Effetti negativi	Perdita volume di carico per inserimento bombole, lieve perdita di potenza, minore autonomia di percorso, limitata disponibilità di rifornimento (soprattutto in talune zone).
Aspetti normativi	È richiesta omologazione specifica per aggiornamento carta di circolazione (non comprende verifiche sui gas di scarico).
Incentivi	Sì, per la trasformazione post vendita (quando previsti dalle normative locali e nazionali) e per l'acquisto di veicoli nuovi ad uso commerciale.
Note	L'effettiva riduzione di emissione di inquinanti da un veicolo convertito a gas naturale rispetto allo stesso modello nella configurazione originale alimentato con benzina non risulta ad oggi sufficientemente documentata in quanto non sono disponibili dati sperimentali. Le poche esperienze indicano una minore emissione di CO, ma un incremento di idrocarburi incombusti, costituiti prevalentemente da metano e praticamente esenti da idrocarburi aromatici, anche in presenza di un convertitore catalitico trifunzionale dell'ultima generazione. Considerate le caratteristiche della benzina ora in commercio (priva di piombo, benzene <1%), le ridotte emissioni da motori a benzina omologati in base alle Direttive Europee e soprattutto EURO 3 ed EURO 4 (quasi trascurabile per PM), la non obbligatorietà del controllo in officina delle emissioni a seguito della conversione di un veicolo in uso, i vantaggi ambientali risultano più certi se riferiti all'equivalente veicolo diesel, specialmente se di vecchio modello che tuttavia non è convertibile.

2.1.3. GPL

Sinonimi	Gas di petrolio liquefatto, gas propano liquido, propano-butano.
Composizione	Miscela propano-butano circa 40-60% (variabile in ampio range di valori).
Origine	Petroliфера.
Disponibilità	Ampia disponibilità di distributori in Italia (circa 2100). La qualità (parametri chimico-fisici) del GPL per autotrazione distribuito ai punti vendita è regolamentata attraverso la norma europea EN589.
Campo di applicazione	Solo per veicoli a ciclo Otto trasformati da solo benzina ad alimentazione bi-fuel o prodotti direttamente in fabbrica in versione mono e bi-fuel.
Effetto sulle emissioni	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂: riduzione da 10 a 15 % rispetto all'alimentazione a benzina (rapporto C/H più basso); - inquinanti regolamentati: i pochi risultati sperimentali disponibili indicano una diminuzione significativa dei tre inquinanti (CO, HC, NO_x), anche se talvolta è stato riscontrato un incremento dell'emissione degli NO_x; - inquinanti non regolamentati: non significativa per PM, significativa per il benzene, l'1,3-butadiene e gli IPA; - efficienza catalizzatore: praticamente invariata.
Costi	<ul style="list-style-type: none"> - carburante: circa la metà rispetto alla benzina (valutazione come costo chilometrico); - conversione: da 700 € circa per autovetture a carburatore, a 1800 € per auto EURO 4; - veicoli nuovi: extracosto di 1000 € rispetto alla motorizzazione monofuel a benzina.
Effetti negativi	Modesta perdita volume di carico per inserimento bombola, possibili divieti di parcheggio al coperto (ai piani interrati <-1 per impianti non rispondenti alla norma E6701 del 2001).
Aspetti normativi	È richiesta omologazione specifica per aggiornamento carta di circolazione (non comprende verifiche sui gas di scarico in officina).
Incentivi	Sì, quando disponibili, per la conversione post vendita.
Note	<p>L'effettiva riduzione di emissione di inquinanti su un veicolo convertito a GPL rispetto allo stesso modello nella configurazione originale non risulta ad oggi sufficientemente documentata in quanto non è disponibile un numero sufficiente di dati sperimentali. Le poche esperienze indicano una minore emissione di CO, di HC e degli NO_x anche se talvolta è stato osservato un sensibile incremento dell'emissione di quest'ultima specie inquinante.</p> <p>Considerate le caratteristiche della benzina ora in commercio (priva di piombo, benzene <1%), le ridotte emissioni da motori a benzina omologati in base alle Direttive Europee e soprattutto EURO 3 ed EURO 4 (quasi trascurabili per PM), la non obbligatorietà del controllo in officina delle emissioni a seguito della conversione di un veicolo in uso, i vantaggi ambientali risultano più certi se riferiti all'equivalente veicolo diesel, specialmente se di vecchio modello che, tuttavia, non è convertibile.</p>

2.1.4. Gasolio emulsionato

Composizione	Miscela stabilizzata di gasolio con 12 – 15 % di acqua e additivi (disperdenti, stabilizzanti, etc..).
Origine	Petrolifera.
Disponibilità	Solo extra rete; l'emulsione è soggetta in Italia alla norma di qualità CUNA NC-637-01.
Campo di applicazione	Solo per veicoli diesel tipicamente facenti parte di flotte (trasporto pubblico locale, distribuzione merci, etc.). Non sono necessarie modifiche al veicolo o al motore.
Effetto sulle emissioni	- CO ₂ : lieve riduzione proporzionale alla riduzione netta di consumo di carburante (circa 3-5%); - inquinanti regolamentati: riduzione sensibile dell'emissione di PM (intorno al 40%), significativa quella di NO _x e di CO (in media, rispettivamente, 14% e 11%), invariata o aumentata quella di HC secondo il tipo di motore; - inquinanti non regolamentati: riduzione significativa di IPA (proporzionale al PM).
Costo	Leggermente inferiore al gasolio (risparmio netto 5%).
Effetti negativi	Lieve riduzione potenza (rilevabile in impieghi gravosi).
Aspetti normativi	Nessuna norma per gli autoveicoli alimentati con emulsione.
Incentivi	Accisa ridotta.
Note	Sono di fondamentale importanza la qualità del gasolio base e la demineralizzazione dell'acqua utilizzati per la preparazione dell'emulsione.

2.1.4. Biodiesel

Composizione	Esteri metilici di acidi grassi ottenuti per transesterificazione dei trigliceridi costituenti gli oli vegetali.
Origine	Oli vegetali ottenuti da varie colture (colza, girasole, soia, palma e altre), oli vegetali esausti e grassi animali.
Disponibilità	In miscela fino al 5% nel gasolio commerciale (B5) e a concentrazioni del 20-30 % in alcuni punti di vendita extra-rete per flotte di autoveicoli diesel pesanti (bus urbani, autocarri). Non disponibile puro ai punti vendita della rete di distribuzione nazionale e ai punti vendita extra-rete. Il biodiesel da impiegare puro o in miscela con gasolio è soggetto alla norma europea EN 14214 che ne fissa i requisiti minimi di qualità (28 parametri chimici e fisici). Le miscele gasolio/biodiesel al 20-30 % volume (B20-B30) sono regolamentate su base nazionale con la norma CUNA 637-02.
Campo di applicazione	Completa intercambiabilità delle miscele fino al 5% volume col gasolio per gli autoveicoli diesel di tutte le classi (leggeri e pesanti) e delle miscele fino al 20% volume per i soli autoveicoli pesanti (flotte dedicate). Nel caso di utilizzo di biodiesel puro sono eventualmente necessarie alcune modifiche al motore dei veicoli esistenti.
Effetto sulle emissioni	- CO ₂ : riduzione per la quota parte di olio vegetale in quanto combustibile originato da "fonte rinnovabile"; - inquinanti regolamentati: nessuna variazione significativa con le miscele fino a 5% volume, mentre con biodiesel puro riduzioni significative medie di emissione CO (circa 50 %), di HC (circa 60-70%) e di particolato (circa 50%) e incremento dell'emissione di NO _x (circa 10%). Gli effetti, comunque, dipendono dal modello di motore e dalla presenza o meno di dispositivi antinquinamento (catalizzatore ossidante); - inquinanti non regolamentati: significativa per SO ₂ (non contiene zolfo), mentre non sono chiari gli effetti determinati dall'uso del biodiesel puro sull'emissione degli IPA e delle aldeidi.
Costo	Come gasolio per miscele fino al 5%, non determinato per quello puro.
Effetti negativi	Nessuno in miscela fino al 5%. L'impiego di biodiesel puro può determinare problemi di compatibilità dei materiali con cui sono costruite le parti meccaniche a contatto col combustibile (tubazioni, pompa di iniezione, iniettori, ecc.) dei motori di autoveicoli diesel convenzionali.
Aspetti normativi	Consentito l'uso in miscela con gasolio fino al 5% e in miscela fino al 30% in flotte dedicate. Obbligo di immissione di una quota sul mercato (Direttiva 2003/30/CE e Decreto 12/05).
Incentivi	Solo a livello di defiscalizzazione contingentata (per renderlo competitivo con gasolio).
Note	Sono in atto le prime sperimentazioni per valutare l'impiego diretto di olio vegetale in luogo di biodiesel o del gasolio. Talune prove sono in corso su motori stazionari (pompe) o lenti (trattori) ed evidenziano la necessità di varie modifiche al motore diesel originale al fine di garantire sufficienti prestazioni ed adeguata affidabilità.

2.2. Retrofit

2.2.1. Filtri meccanici per fumi diesel

Tipologie	C-DPF (Catalytic-Diesel Particulate Filter); CR-DPF (Continuous Regenerating-Diesel Particulate Filter).
Principio di funzionamento	Lo scarico dal motore diesel passa attraverso un dispositivo filtrante ceramico o di carburo di silicio, con struttura a nido d'ape chiusa che blocca il particolato. La rigenerazione del filtro viene effettuata automaticamente per autocombustione del deposito carbonioso e può avvenire: <ul style="list-style-type: none"> - in maniera discontinua nel tipo C-DPF attraverso l'incremento della temperatura di combustione determinata da un'iniezione di eccesso di combustibile e facilitata, talvolta, con l'impiego di additivi organo-metallici nel combustibile; questo sistema si presta ad essere impiegato su autovetture e veicoli diesel leggeri; - in maniera continua nel tipo CR-DPF (mediante produzione di NO₂ per ossidazione di NO, presente nei gas scarico, su un catalizzatore ossidante posto a monte del filtro. <p>La frequenza di rigenerazione (per filtri tipo C-DPF) dipende dalla quantità di particolato emesso dal motore e quindi sia dallo standard emissivo del modello di autoveicolo che dal modo di impiego. Nella fase di rigenerazione non si verificano emissioni significativamente maggiori di quelle che si rilevano in fase di accumulo.</p>
Aspetti normativi	È ammessa la sostituzione del silenziatore originale con uno omologato, comprensivo del dispositivo filtrante. La modifica del sistema di scarico, invece, è soggetta a omologazione. Per i bus, la sostituzione è ammessa solo per veicoli omologati pre-EURO, EURO 1 ed EURO 2. Per i veicoli commerciali pesanti non sono state date indicazioni specifiche. La situazione ad oggi risulta confusa (montaggio libero?? Vietato perché non è consentito alterare la componentistica e la configurazione originale??) Una bozza di decreto del Ministero dei Trasporti riguardante la possibilità di inserire il filtro sui veicoli commerciali pesanti è in attesa di parere della CE.
Costo	In funzione della dimensione del filtro (ovvero del motore). In linea di massima 3000-6000 €.
Disponibilità	Disponibili vari tipi prodotti da aziende diverse.
Applicabilità	L'applicazione come retrofit dei filtri a rigenerazione continua è su veicoli diesel, in particolare per bus, veicoli commerciali e macchine operatrici.
Effetti negativi	La presenza del catalizzatore ossidante determina l'incremento di emissione di NO ₂ (aumenta il rapporto NO ₂ /NO). Occorre manutenzione periodica (ogni 40.000-50.000 km). Possibile lieve incremento dei consumi di combustibile per l'incremento progressivo della contropressione allo scarico (da 0% a nuovo, fino al 5% prima della rigenerazione, 3% medio).
Limitazioni di impiego	Se con catalizzatore ossidante come i filtri CR-DPF, è richiesto l'uso di gasolio a bassissimo contenuto di zolfo (ULSD <10 ppm di S).
Effetti ambientali	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂: lieve incremento proporzionale al consumo; - inquinanti regolamentati: abbattimento di PM (90-95% in massa e 95-99% in numero di particelle); riduzione di CO e di HC se presente il catalizzatore ossidante; nessuna variazione per l'emissione degli NO_x ma cambia il rapporto NO₂/NO se presente il catalizzatore; - inquinanti non regolamentati: notevole riduzione dell'emissione di IPA e di altri composti organici adsorbiti sul particolato. In fase di rigenerazione (per filtri tipo C-DPF), si può avere un incremento dell'emissione di CO.
Note	In alternativa, sono disponibili filtri "usa e getta" non rigenerabili (in materiale celluloso), installati a valle di un sistema di raffreddamento fumi a temperatura inferiore a 130°C. Una valvola by pass evita l'autoaccensione del filtro in caso di eccesso di temperatura (la presenza di questo elemento sembrerebbe impedirne l'omologazione in base alla bozza di Decreto all'esame della CE).

2.2.2. Catalizzatore ossidante per fumi diesel.

Nome	Oxy-cat.
Principio di funzionamento	Lo scarico dal motore diesel passa attraverso un dispositivo metallico o ceramico, con struttura a nido d'ape aperta, su cui è depositato uno strato di allumina contenente metalli nobili finemente dispersi con attività catalitica ossidante (platino - palladio).
Aspetti normativi	È ammessa la sostituzione del silenziatore originale con uno omologato, comprensivo del catalizzatore.
Costo	In funzione della dimensione del catalizzatore (ovvero del motore). In linea di massima 300-1000 € per autovetture, 1000-3000 € per veicoli pesanti.
Disponibilità	Disponibili vari tipi prodotti da aziende diverse.
Applicabilità	L'applicazione tipica è su veicoli diesel, sia autovetture che commerciali leggeri e pesanti (con vincoli come per filtri antiparticolato – v. scheda 2.2.1.).
Effetti negativi	Incremento di emissione di NO ₂ (come per filtri antiparticolato tipo CR-DPF – v. scheda 2.2.1.).
Limitazioni di impiego	Richiedono l'uso di gasolio a basso contenuto di zolfo (LSD <50 ppm di S). Non è indispensabile l'uso di gasolio ULSD (S <10 ppm) in quanto la formazione di solfati in forma di particelle non provoca inconvenienti come invece avviene nei filtri antiparticolato.
Effetti ambientali	<ul style="list-style-type: none">- CO₂: nessuno;- inquinanti regolamentati: abbattimento limitato di PM in massa e in numero (20-40%); notevole riduzione di CO e di HC; nessuna variazione sull'emissione degli NO_x totali;- inquinanti non regolamentati: riduzione limitata di IPA e altri composti organici volatili e adsorbiti sul particolato.

2.3. Tecnologie motoristiche

2.3.1. Autoveicoli ibridi

Descrizione	Veicoli dotati sia di motore termico (a benzina o diesel) che di motore(i) elettrico(i).
Tipologie, caratteristiche.	<p>Secondo la modalità di accoppiamento dei due propulsori, si identificano i seguenti tipi:</p> <p>1. IBRIDO "SERIE". La coppia alle ruote è fornita dal solo motore elettrico, come nei veicoli elettrici a batteria. Nella marcia a potenza ridotta il sistema di generazione aziona direttamente il motore elettrico e, se c'è un margine, ricarica contemporaneamente le batterie, presenti in numero ridotto rispetto ad un veicolo solo elettrico; le batterie restituiscono questa energia quando richiesto, integrando la potenza erogata dal generatore. Il funzionamento a regime ottimale del gruppo di generazione consente così un livello molto ridotto di emissioni nocive, che si annullano quando il veicolo marcia con la sola energia accumulata dalle batterie. Con questa modalità di utilizzo l'autonomia è però minima, 20-30 km, in funzione del ridotto numero di batterie installate.</p> <p>2. IBRIDO "PARALLELO". La trasmissione diretta alle ruote della potenza del motore termico consente nella marcia extraurbana un migliore rendimento rispetto all'ibrido "serie", esempio tipico ne è la Honda Civic IMA. L'integrazione di potenza, quando necessaria, è fornita da un motore elettrico in parallelo meccanico al termico. Il motore funziona da generatore in frenata; è anche possibile, ma non sempre, la marcia con il solo motore elettrico (a potenza ridotta) con percorrenze ancor minori che nel serie, perché la batteria è ridotta al minimo compatibile con la massima richiesta di potenza del motore elettrico. Schemi meccanici più sofisticati, come quello adottato dalla Toyota per la Prius, uniscono il meglio dei due sistemi, "serie" e "parallelo", e garantiscono prestazioni ineguagliate in termini di emissioni e consumi. In questa tipologia è compreso un tipo "minimo" dotato, in pratica, di motorino di avviamento opportunamente potenziato.</p> <p>3. IBRIDO "SPLIT". Veicoli a quattro ruote motrici, con due sistemi di trazione indipendenti, uno termico ed uno elettrico. Tale configurazione è scarsamente utilizzata perché a fronte di una grande elasticità di funzionamento è fortemente penalizzata dai pesi e dagli ingombri di due motorizzazioni indipendenti, dagli elevati consumi specifici che tali pesi comportano e da un impatto ambientale, nel caso di funzionamento del motore termico, pari a quello di un veicolo convenzionale.</p>
Costruttori	<ul style="list-style-type: none"> - ibrido "parallelo": prodotti di serie Toyota, Honda, Lexus, (Ford e General Motors nell'immediato futuro); - ibrido "serie": applicato negli autobus da diversi costruttori italiani (IVECO, TecnoBus, BredaMenarini, EPT Cacciamali) ed esteri (Orion).
Costi	Extra costo di acquisto: 0-10% rispetto alla versione a benzina, 0-5% rispetto alla versione diesel. Su taxa di circolazione e costo assicurazione: riduzione per minore potenza del motore termico. Manutenzione: come versioni standard.
Disponibilità	Entro tempi "normali" per auto di serie, su ordinazione per bus.
Affidabilità	Non diversa da veicoli tradizionali.
Incentivi	Solo per enti pubblici (Decreti Ronchi).
Tipo di utilizzo (per massimizzazione efficace)	<p>Uso urbano (riduzione delle emissioni per uso propulsione elettrica in accelerazione e recupero in frenata, frequenti soste con spegnimento del motore termico).</p> <p>Se dotati di accumulatore di capacità sufficiente, possono essere guidati in solo elettrico (es. in aree di particolare rilievo ambientale) sia pure con limitata autonomia (20-30 Km).</p>
Effetti negativi	Nessuno di rilievo.
Limitazioni di impiego	Nessuna di rilievo.
Effetti ambientali	<p>Le prestazioni dei veicoli ibridi in campo ambientale sono state oggetto di numerosissime campagne di sperimentazione, al banco e su strada.</p> <p><u>Emissioni inquinanti regolamentati</u>: riduzione generalizzata.</p> <p>Esempi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - bus IBRIDO rispetto a diesel: CO -95%, NOx - 60%, PM - 70% - auto PRIUS rispetto a limiti EURO 4: CO - 82%, NOx - 87%, HC - 80% <p><u>Emissioni inquinanti non regolamentati</u>: Sono ipotizzabili analoghe riduzioni di emissione per benzene, IPA, aldeidi. Il miglioramento ottenibile nelle emissioni è evidente, ed il maggior costo d'acquisto è già ripagato, in alcuni casi, dal minor costo di esercizio.</p> <p><u>Consumi ed emissione di CO₂</u>: riduzione 10-20% rispetto a diesel, 20-30% rispetto a benzina.</p>

2.3.2. Ciclomotori con motore a 2 tempi a iniezione e a 4 tempi

Generalità	Il motore a 2 tempi (2T), a fronte di innegabili vantaggi in termini di semplicità costruttiva e di potenza specifica, è caratterizzato da elevate emissioni di incombusti (HC) e di olio lubrificante. All'applicazione della Direttiva Europea 97/24/CE, in vigore dal 17/6/99, è stato possibile rispettare i limiti imposti per la prima e la seconda fase (EURO 1 e EURO 2) anche con motori 2T, attraverso modifiche sulla taratura dei motori e l'introduzione del catalizzatore ossidante allo scarico e/o l'iniezione di aria secondaria. Tuttavia, alcuni costruttori hanno puntato su motori a 4 tempi (4T) o a 2 tempi con iniezione diretta (2Ti), nonostante l'incremento dei costi, ma anche in previsione di ulteriori restrizioni sui limiti di omologazione.
Costo	Extra costo rispetto a motorizzazione 2T: 10 - 20% (200 – 400 €).
Incentivi	Periodicamente vengono erogati incentivi per l'acquisto di veicoli di tecnologia più recente. L'ultimo accordo di programma tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ed ANCMA, siglato nell'aprile 2005 e divenuto operativo il 20/05/05, stabiliva un contributo di 250 €, per un budget complessivo di 2.5 milioni di €, per l'acquisto di veicoli EURO 2, senza obbligo di rottamazione di un vecchio veicolo. Tale tipo di accordo ha indubbiamente immesso sul mercato ciclomotori più "puliti", ma non ha tolto dalla circolazione molti di quelli vecchi e più inquinanti.
Tipo di utilizzo	Tipicamente urbano.
Consumi ed emissioni di CO ₂	La motorizzazione 4T presenta consumi ed emissioni di CO ₂ inferiori del 30-40% rispetto alla motorizzazione 2T; è presumibile che anche i motori 2Ti presentino benefici rispetto ai propulsori tradizionali.
Emissioni di inquinanti regolamentati	1. Motorizzazione 4T rispetto a 2T - HC: notevolmente inferiori (non si verifica il corto circuito della carica tipico dei motori 2T nel momento in cui le luci di lavaggio e di scarico sono contemporaneamente aperte, che provoca il passaggio di miscela fresca direttamente dal cilindro allo scarico); - CO: inferiori (si possono utilizzare miscele più "magre" in quanto non è necessario integrare la lubrificazione); - NOx: incrementate; l'unico dato disponibile, riferito a veicolo EURO 1, evidenzia un fattore di emissione pari a 200 mg/km, paragonabile a quelli delle auto a benzina EURO 1 e 2 (la miscelazione dei gas di scarico con la carica fresca nella fase di lavaggio che si verifica nel motore 2T comporta minori temperature nel cilindro e quindi una ridotta formazione di questo inquinante). 2. Motorizzazione 2Ti rispetto a 2T Non sono disponibili dati consolidati: l'applicazione dell'iniezione diretta è finalizzata ad eliminare il cortocircuito della carica e, di conseguenza, l'emissione di HC dovrebbe risultare notevolmente ridotta.
Emissioni di inquinanti non regolamentati	PM: il tipo di tecnologia motoristica ed il particolare sistema di lubrificazione del motore 2T causano notevoli emissioni di questo inquinante. Per i ciclomotori pre EURO ed EURO 1 con motore 2T i fattori di emissione a caldo di PM disponibili possono ritenersi sufficientemente affidabili: - pre EURO 1: 200 mg/km (circa come auto diesel pre EURO); - EURO 1: 30 mg/km (circa come auto diesel EURO 4); Per i ciclomotori EURO 2 equipaggiati con motori 2T tradizionali (con catalizzatore ossidante + iniezione di aria secondaria) l'emissione di PM a caldo dovrebbe risultare ridotta (intorno ai 5 mg/km), così come per i motori 4T (per i quali sono disponibili dati solo per versioni EURO 1, intorno ai 15 mg/km). Nel caso dei motori 2Ti, due diverse attività sperimentali hanno invece evidenziato emissioni a caldo di PM elevate (circa 100 mg/km). Ulteriore aspetto da approfondire sono le emissioni a freddo, che per i 2T tradizionali catalizzati risultano consistenti (circa 100 mg/km), mentre mancano informazioni su tutte le altre motorizzazioni. Le emissioni di benzene, in prima approssimazione, sono proporzionali a quelle di HC totali.
Effetti ambientali	Considerate le consistenti riduzioni di emissione conseguibili con l'uso del motore 4T e 2Ti rispetto al tradizionale 2T, gli effetti ambientali sono da considerarsi senz'altro positivi su HC e benzene. Per il PM i benefici sono invece da valutare sulla base della diffusione delle due tipologie di motorizzazioni e delle ulteriori informazioni necessarie alla definizione di fattori di emissione consolidati. La loro quantificazione non risulta peraltro agevole in considerazione delle incertezze connesse alla determinazione del numero di veicoli (v. punto 1.2.2. "Parco circolante") e agli altri dati necessari (suddivisione per standard emissivo, fattori di emissione, etc...).
Note	È pratica diffusissima la manomissione del motore per aumentarne le prestazioni. Tale operazione è relativamente semplice sui propulsori a 2 tempi, talvolta già predisposti per le modifiche ed in grado di sviluppare potenze ben superiori a quelle necessarie per procedere alla velocità massima stabilita dal Codice della Strada. In queste condizioni il comportamento in termini di emissioni è ben differente da quello misurato nella fase di omologazione e di questo bisogna tenere conto nella definizione dei fattori di emissione e nel calcolo dei relativi inventari. Come già evidenziato nella descrizione iniziale, i motori a 4T erogano potenze sensibilmente inferiori e quindi, oltre ad essere probabilmente più complessa, l'eventuale manomissione non consente incrementi elevati di prestazioni e velocità.

Note	<p>Inoltre, non appare sufficientemente garantita l'efficienza del catalizzatore posto allo scarico di un motore 2T nell'incremento delle percorrenze e nelle modalità di impiego in campo.</p> <p>I fattori di emissione a caldo di alcune tipologie veicolari calcolati per una velocità media tipica della guida in ambito urbano (fonte: database COPERT III) mostrano che i ciclomotori 2T nelle versioni EURO 2 emettono una quantità di HC, per chilometro percorso in ambito urbano, di poco inferiore ad una autovettura EURO 1 (cc<1400) e circa 20 volte superiore ad una analoga autovettura a benzina EURO 4.</p> <p>In estrema sintesi, la motorizzazione 4T risulta intrinsecamente più pulita e quindi più affidabile e molto meno suscettibile di pratiche di manomissione.</p>
------	---

MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA, STUDIO DELLA TURBOLENZA ATMOSFERICA E SIMULAZIONE DI DISPERSIONE DI INQUINANTI NEL CENTRO STORICO DI BOLOGNA

V. POLUZZI*, **S. RICCIARDELLI***, **F. FERRARI***, **M. RIDOLFI***, **S. RUIBA***, **P.P. FRANCESCHI***,
A. NEROZZI*, **I. RICCIARDELLI***, **P. RINALDI****, **M. ASCANELLI****, **M. NARDINO*****,
T. GEORGIADIS***, **G. BRUSASCA******, **A. PIERSANTI******, **G. TINARELLI******,
R. MAZZETTI*****, **C. RONDININI*******.

*Arpa Sezione Provinciale di Bologna, **Arpa Sezione Provinciale di Ferrara, ***CNR Bologna,
****ARIANET S.r.l., *****Unità Ambiente Comune di Bologna

1. PREMESSA

Nel periodo dal 14/11/2003 al 04/12/2003 si è svolta una campagna di monitoraggio per valutare la qualità dell'aria nel centro storico di Bologna, con campionamenti eseguiti in Via Farini, Via Rizzoli e in 2 punti di Via D'Azeglio (Galleria dei Notai e Piazza dei Celestini) all'interno dell'isola pedonale, come evidenziato in fig. 1.

Sono stati effettuati campionamenti per la determinazione di diversi inquinanti atmosferici quali: materiale particolato espresso come PTS, PM10 e PM2,5, Benzene, Ossidi di Azoto, Monossido di Carbonio, Biossido di Zolfo [1], Idrocarburi policiclici aromatici [2] e Ozono [3]. I risultati ottenuti per quest'ultimo inquinante non vengono qui discussi in quanto poco significativi visto il periodo autunnale/invernale della campagna di misura.

Nello stesso periodo è stato effettuato dal CNR IBIMET di Bologna uno studio della turbolenza superficiale e, più in particolare, dei parametri di stabilità atmosferica.

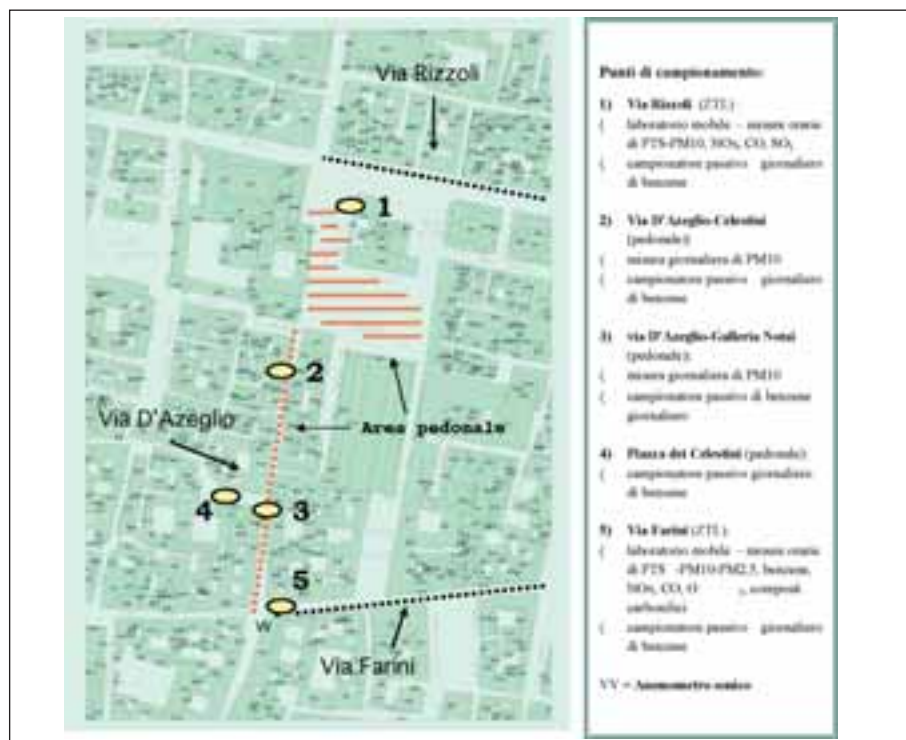
A tal scopo sono stati utilizzati, durante la campagna di misura, un anemometro sonico e un analizzatore di gas all'infrarosso che hanno campionato, ad alta frequenza, le componenti del vettore vento, la temperatura dell'aria, l'umidità specifica e la concentrazione di anidride carbonica.

Al fine di studiare l'impatto del traffico veicolare sulle concentrazioni, il Comune di Bologna ha misurato i flussi di veicoli in transito in via Ugo Bassi (conteggi mediante tubi pneumatici) e Arpa Emilia-Romagna ha rilevato i transiti in via Farini (mediante un sistema di videoripresa e conteggio automatico posto sul mezzo mobile di campionamento della qualità dell'aria).

A supporto delle misurazioni sperimentali, ARIANET S.r.l., in collaborazione con l'Unità Ambiente del Comune di Bologna, ha realizzato un'applicazione di modellistica numerica di microscala per il calcolo della dispersione degli inquinanti in atmosfera nella zona, tenendo conto delle emissioni del traffico veicolare nelle strade adiacenti e simulando l'effetto della complessa conformazione dell'edificato urbano sulla dispersione.

L'obiettivo di tale indagine è stata la valutazione delle concentrazioni di alcune sostanze inquinanti in un'area pedonale del centro storico di Bologna contornata da strade all'interno della ZTL (Zona a Traffico Limitato); con l'aiuto dei parametri di turbolenza e micrometeorologici si è poi effettuata un'applicazione di tipo modellistico al fine di simulare i comportamenti di alcuni degli inquinanti monitorati.

Figura 1: Collocazione dei punti di monitoraggio dei parametri di qualità dell'aria e dell'anemometro sonico



2. ANALISI DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

2.1 Frazione del Materiale Particolato $PM_{2,5}$

Il valore medio di $PM_{2,5}$ misurato in Via Farini risulta di $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ che rappresenta circa il 63% del corrispondente valore di PM_{10} rilevato nello stesso punto.

2.2 Frazione del Materiale Particolato PM_{10}

Nella Tabella 1 sono riportati i valori medi giornalieri delle concentrazioni di PM_{10} rilevati nelle quattro postazioni di prelievo: emerge come il valore medio di tutto il periodo di monitoraggio sia notevolmente superiore in Via Farini ($99 \mu\text{g}/\text{m}^3$) rispetto agli altri tre punti nei quali le concentrazioni rilevate sono praticamente equivalenti.

Tabella 1 - Materiale Particolato PM_{10} , tempo di mediazione 24 ore

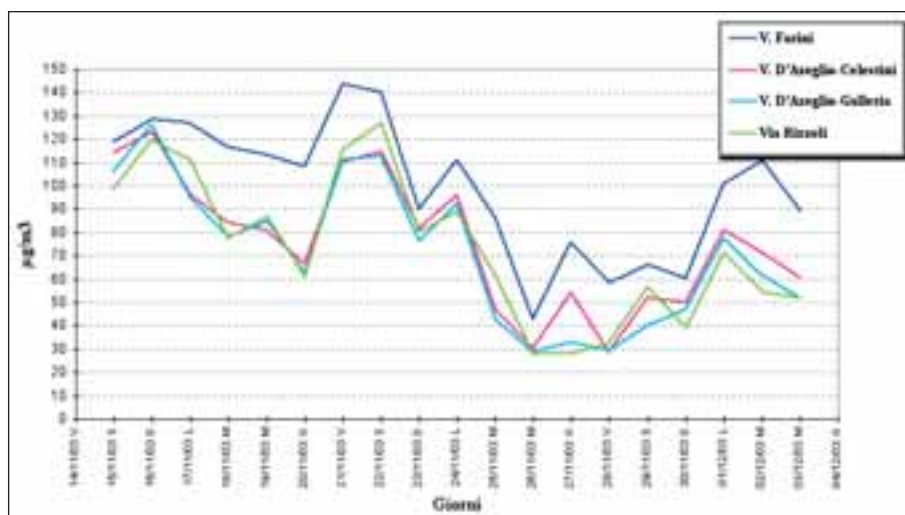
Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	% di valori > $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	% di valori > $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$
			$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		
Via Farini	14/11-04/12/2003	19	43	144	99	94,7	89,5
Via D'Azeglio-Celestini	14/11-04/12/2003	19	28	123	76	84,2	68,4
Via D'Azeglio-Galleria	14/11-04/12/2003	19	29	126	71	68,4	63,2
Via Rizzoli	14/11-04/12/2003	19	28	127	73	78,9	63,2

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

I valori di PM10 rappresentano rispettivamente il 69% e l'82% di PTS di via Farini e di via Rizzoli.

Il Grafico 1 riporta le concentrazioni giornaliere di PM10 nei quattro punti di prelievo durante il periodo di monitoraggio e mostra come l'andamento di tali concentrazioni nelle varie giornate sia assolutamente coincidente in tutte le zone monitorate.

Grafico 1 - PM10: valori medi giornalieri rilevati nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.3 Particolato Totale Sospeso (PTS)

Le concentrazioni giornaliere di PTS sono state misurate nei due Laboratori Mobili, in Via Farini ed in via Rizzoli. I risultati, ottenuti mediante determinazione gravimetrica, sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2 - Particolato Totale Sospeso, tempo di mediazione 24 ore

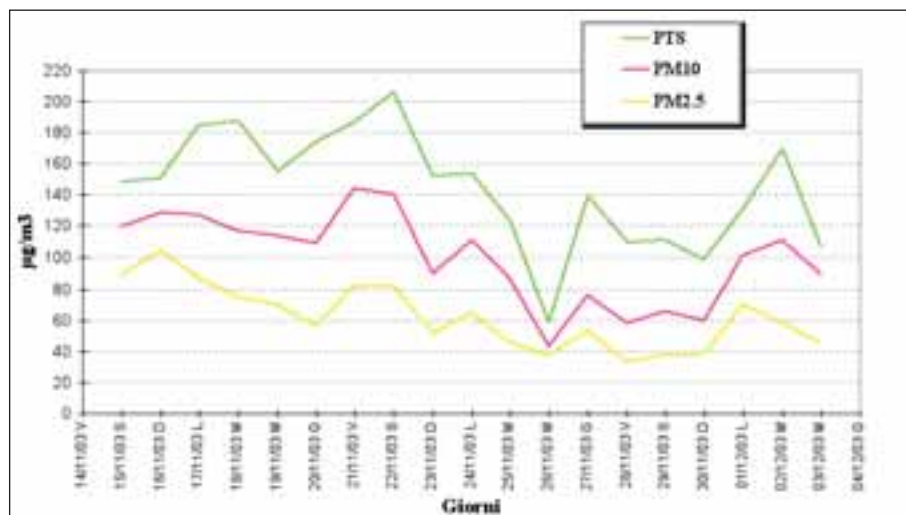
Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Valore 95° percentile µg/m³	Numero di valori > 300 µg/m³
			µg/m³	µg/m³	µg/m³		
Via Farini	14/11-04/12/2003	19	59	206	144	189	0
Via Rizzoli	14/11-04/12/2003	14	42	145	89	142	0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

La tabella tiene conto delle disposizioni relative alle PTS imposte dal D.P.C.M. 28 Marzo 1983, ad oggi abrogato dal D.M. 2 aprile 2002 n. 60. I valori medi registrati sono inferiori al valore limite di 150 µg/m³ da valutare, comunque, sulla media dei valori giornalieri di un intero anno. Il Grafico 2 evidenzia la notevole correlazione tra i valori giornalieri di concentrazione di PTS, PM10 e PM2,5 rilevati in Via Farini.

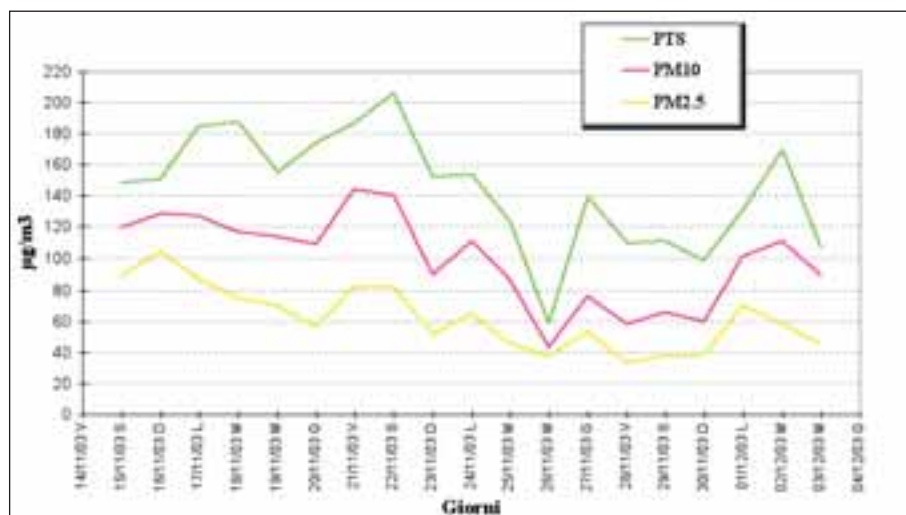
Nel Grafico 3 si nota la correlazione tra i dati giornalieri di PTS e PM10 misurati in Via Rizzoli.

Grafico 2 – PTS, PM10, PM2,5 valori medi giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 3 – PTS e PM10 valori medi giornalieri rilevati in via Rizzoli



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.4 Benzo(a)pirene

Le concentrazioni degli IPA dispersi in aria sono stati determinati nei campioni prelevati per la misura del PM10 e PM2,5 in Via Farini, nei campioni di PM10 prelevati nelle due postazioni di Via D'Azeglio e nei campioni di PTS prelevati in Via Rizzoli.

Nella Tabella 3 sono riportati le concentrazioni medie, minime e massime di benzo(a)pirene rilevate in ogni postazione di prelievo nel periodo di indagine.

Tabella 3 – Benzo(a)pirene, Tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori >1 µg/m³	% di valori >1 µg/m³
			µg/m³	µg/m³	µg/m³		
Via Farini (PM2,5)	14/11-04/12/03	19	0,88	2,98	1,95	17	89,5
Via Farini (PM10)	14/11-04/12/03	19	0,84	3,14	1,96	18	94,7
V. D'Azeglio-Celestini (PM10)	14/11-04/12/03	19	0,13	0,59	0,26	0	0
V. D'Azeglio-Galleria (PM10)	14/11-04/12/03	19	0,26	1,75	0,72	4	21,1
Via Rizzoli (PTS)	14/11-04/12/03	19	0,64	3,80	1,85	16	84,2

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

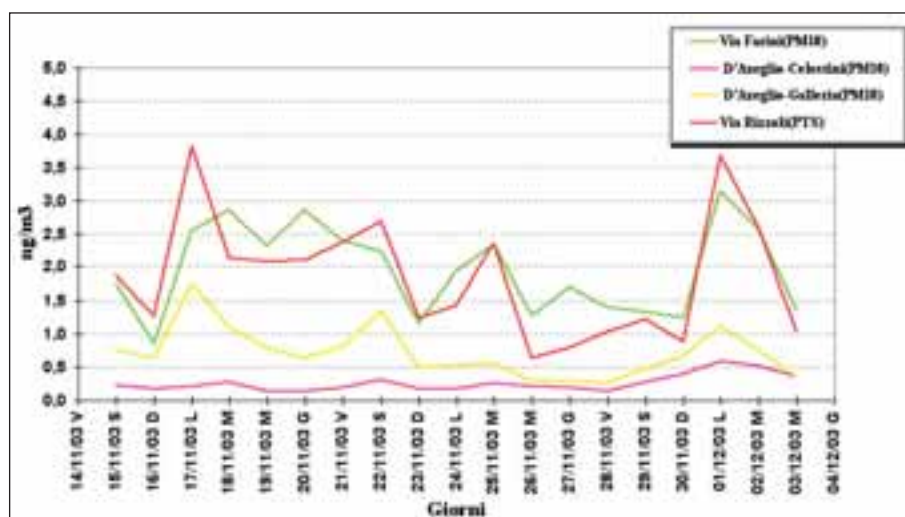
Si rileva innanzitutto come i valori delle concentrazioni medie del benzo(a)pirene siano coincidenti nei campioni di PM10 e di PM2,5 prelevati nella postazione di Via Farini, ad indicare come tutti gli IPA siano nel particolato con granulometria inferiore al PM2,5. Questo è ulteriormente confermato nel Grafico 5, che dimostra come anche i valori giornalieri di benzo(a)pirene trovati nei campioni di PM10 e PM2,5 siano sempre molto simili.

È rilevante notare come mentre i valori di benzo(a)pirene di Via Farini e Via Rizzoli sono molto simili, quelli delle due postazioni di Via D'Azeglio (area pedonale) risultano notevolmente inferiori.

In particolare, il benzo(a)pirene di Via D'Azeglio-Celestini risulta molto basso anche rispetto a quanto rilevato in Via D'Azeglio-Notai. Tale andamento risulta in contrasto con quello degli altri parametri rilevati nelle due postazioni, i quali hanno, al contrario, fornito valori di concentrazione molto simili.

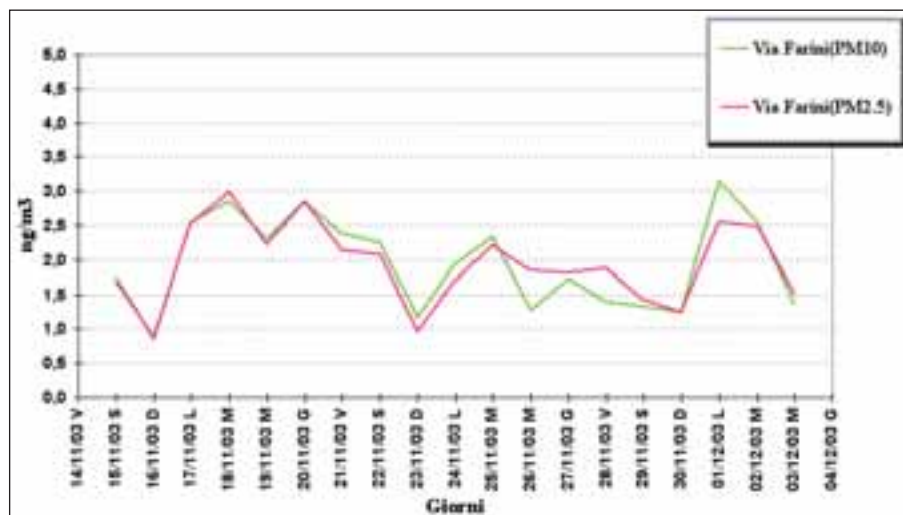
La notevole diversità nelle concentrazioni medie di benzo(a)pirene relativa al periodo di indagine in questi due punti è d'altra parte costantemente presente in tutti i valori di concentrazione determinati nei 19 singoli campioni giornalieri, come si evince dal Grafico 4 dove si evidenzia pure la notevole corrispondenza nell'andamento delle concentrazioni giornaliere tra le varie postazioni.

Grafico 4: Benzo(a)pirene, andamento dei valori medi rilevati nel centro di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 5 - Benzo(a)pirene, andamento dei valori medi giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.5 Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)

Nella Tabella 4 sono riportate le concentrazioni medie, minime e massime di alcuni IPA rilevate nel periodo di indagine nelle varie postazioni di prelievo. Tali valori sono formati dalla somma delle concentrazioni di sette IPA, quali:

benzo(a)antracene, benzo(b)fluorantene, benzo(k)fluorantene, benzo(j)fluorantene, benzo(a)pirene, dibenzo(a,h)antracene e indeno(1,2,3-cd)pirene.

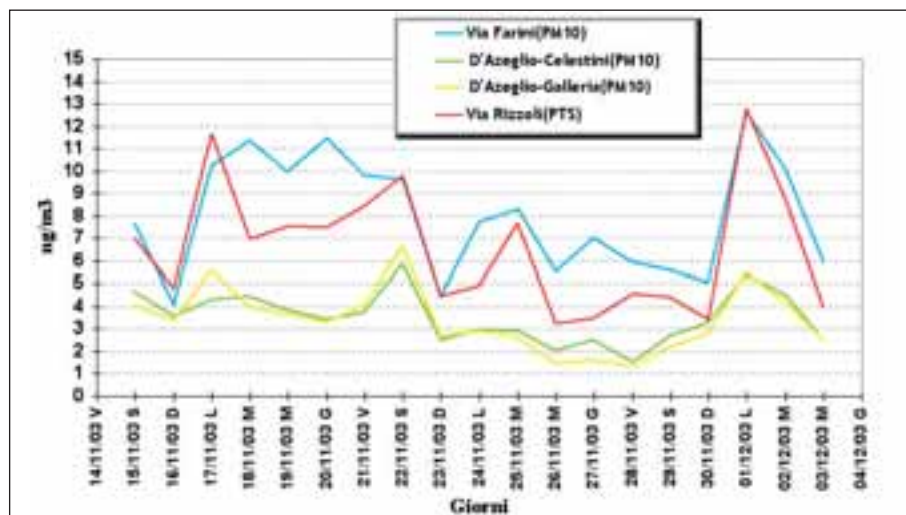
Dalla Tabella 4 e dal successivo Grafico 7 si evidenzia come anche le concentrazioni di IPA, al pari di quella del solo benzo(a)pirene, sono coincidenti nei campioni di PM10 e di PM2,5: il valore medio più elevato si è riscontrato in Via Farini, quello di Via Rizzoli è leggermente inferiore e i due di Via D'Azeglio sono notevolmente più bassi come evidenziato nel grafico 6. È importante inoltre sottolineare che non si evidenzia più la differenziazione rilevata nel caso del benzo(a)pirene.

Tabella 4: Idrocarburi Policiclici Aromatici, tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio
			µg/m³	µg/m³	µg/m³
Via Farini (PM2,5)	14/11-04/12/03	19	3,88	11,63	8,02
Via Farini (PM10)	14/11-04/12/03	19	4,06	12,61	8,02
V. D'Azeglio-Celestini (PM10)	14/11-04/12/03	19	1,00	5,86	3,36
V. D'Azeglio-Galleria (PM10)	14/11-04/12/03	19	1,34	6,60	3,38
Via Rizzoli (PTS)	14/11-04/12/03	19	3,25	12,74	6,59

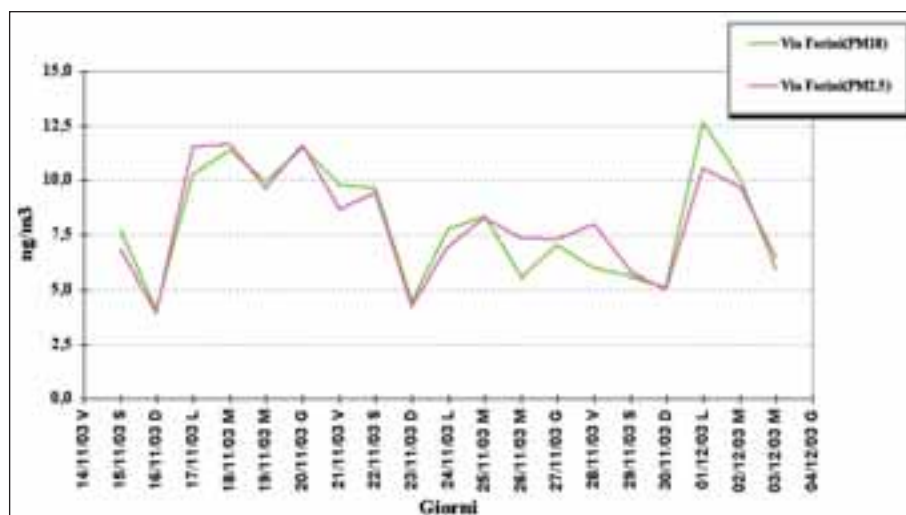
Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 6: Andamento degli IPA nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 7: Idrocarburi Policiclici Aromatici, valori medi giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.6 Benzene

Nella Tabella 5 sono riportati i valori medi, minimi e massimi di benzene misurati nei 19 giorni di indagine nelle varie postazioni di campionamento e le percentuali di giornate in cui è stato superato il valore di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valore limite annuale per la protezione della salute umana in vigore fino al 2005, ed il valore di $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, che costituirà tale limite dal 2010, come previsto dal Decreto n° 60 del 2 Aprile 2002.

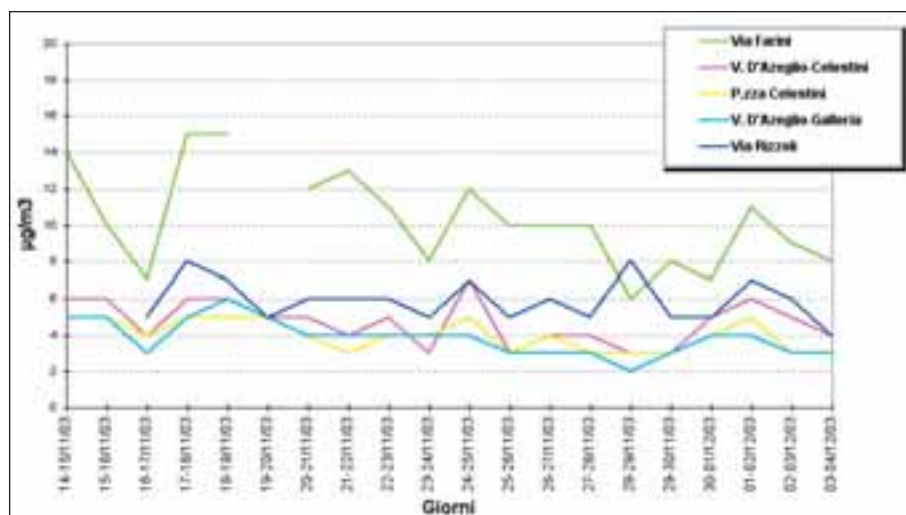
Tabella 5: Benzene, tempo di mediazione 24 ore

Postazioni	Periodo di campionamento	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	% di valori > 5 µg/m³	% di valori > 10 µg/m³
			µg/m³	µg/m³	µg/m³		
Via Farini (G.C.)	14/11-04/12/03	19	7	16	11	100,0	57,9
Via Farini (Passivi)	14/11-04/12/03	19	6	15	10	100,0	42,1
V. D'Azeglio-Celestini (Pass.)	14/11-04/12/03	20	3	7	5	30,0	0,0
Piazza Celestini (Passivi)	14/11-04/12/03	20	3	5	4	0,0	0,0
V. D'Azeglio-Galleria (Pass.)	14/11-04/12/03	20	2	6	4	5,0	0,0
Via Rizzoli (Passivi)	14/11-04/12/03	19	4	8	6	57,9	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Si evidenzia come la concentrazione media del periodo indagato misurata in Via Farini sia anche in questo caso la più elevata, circa la metà quella di Via Rizzoli e appena inferiori a quest'ultima quelle rilevate nelle tre postazioni ubicate nell'isola pedonale, Via D'Azeglio-Celestini, Via D'Azeglio-Notai e Piazza dei Celestini.

Grafico 8: Benzene, valori medi di 24 ore rilevati con campionatori passivi a Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.7 Monossido di Carbonio (CO)

Si può notare, dalle tabelle 6 ed 7, come i valori di CO siano sempre notevolmente superiori in Via Farini rispetto a Via Rizzoli, considerando sia i valori medi di 1 ora che di 8 ore.

Tabella 6: Monossido di Carbonio, tempo di mediazione 1ora

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori > 40 mg/m³	% di valori > 40 mg/m³
			mg/m³	mg/m³	mg/m³		
Via Farini	14/11-04/12/03	477	0,6	5,9	2,4	0	0,0
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	471	0,0	3,2	0,8	0	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

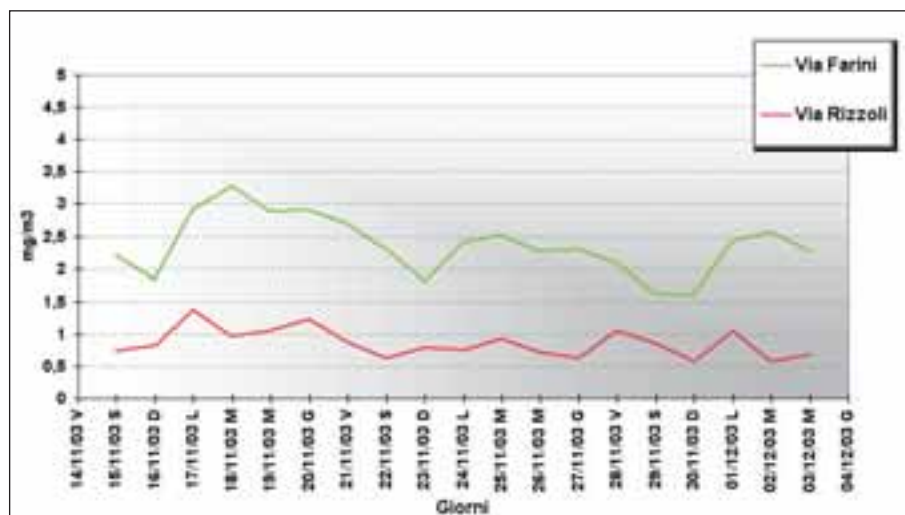
Tabella 7: Monossido di Carbonio, tempo di mediazione 8 ore (media mobile)

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori > 10 mg/m ³	Numero di valori > 14 mg/m ³
			mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³		
Via Farini	14/11-04/12/03	472	0,9	4,5	2,4	0	0,0
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	472	0,2	2,0	0,8	0	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Dal Grafico 9 sembra non emergere, in Via Rizzoli, la diminuzione domenicale dei valori di CO, al contrario di quanto riscontrato in Via Farini. Tale situazione può derivare sia dalla diversa tipologia delle due postazioni di rilievo sia dalle caratteristiche del gas CO. Il campionatore di Via Rizzoli, infatti, è stato posizionato in una zona molto aperta che permette la dispersione del CO, gas che peraltro ha la caratteristica di diffondersi velocemente e quindi di essere presente quasi come fondo nelle zone prossime all'emissione.

Grafico 9: Monossido di Carbonio, valori medi giornalieri rilevati nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.8 Biossido d'Azoto (NO₂)

I dati relativi all'NO₂ misurati nelle postazioni dei Laboratori Mobili di Via Farini e Via Rizzoli sono riportati nella Tabella 8: anche per questo inquinante i valori di Via Farini sono superiori, pur in misura non rilevante.

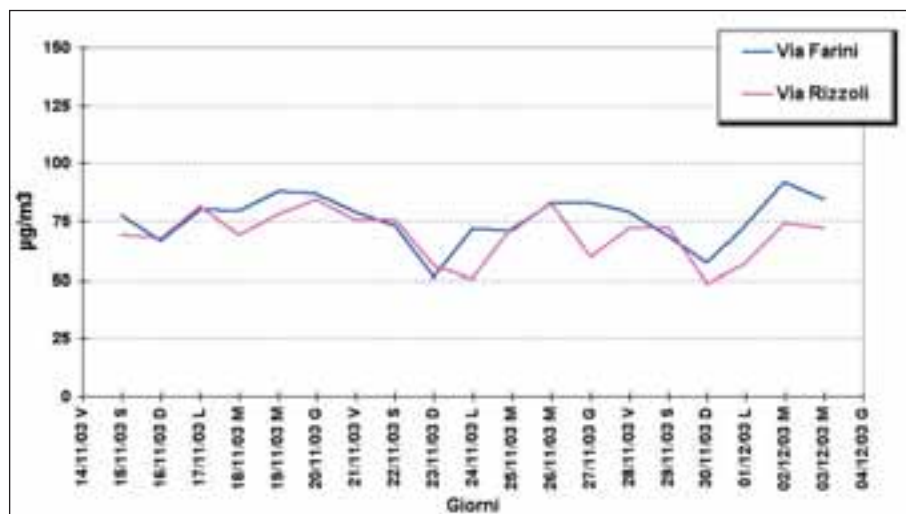
Tabella 8: Biossido di Azoto, tempo di mediazione 1ora

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Valore 98° percentile	Valore 99,8° percentile	N. di valori > 200 µg/m ³
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³		
Via Farini	14/11-04/12/03	474	24	157	76	127	150	0
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	464	13	132	69	117	127	0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Non vi è stato alcun superamento dei valori calcolati sia come 98° (DPCM 28 Marzo 1983, DPR 203/88) che come 99,8° percentile (DM 60/02) delle concentrazioni medie di un'ora rispetto al valore limite di 200 µg/m³.

Grafico 10: Biossido di Azoto, valori medi giornalieri rilevati nel centro storico di Bologna



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Il Grafico 10 evidenzia come i valori medi giornalieri di NO₂ rilevati durante l'intera campagna nelle due postazioni nelle quali è stato monitorato mostrano un andamento simile tra loro con concentrazioni inferiori nelle varie domeniche rispetto ai giorni feriali.

2.9 Biossido di Zolfo (SO₂)

I valori rilevati di SO₂ dal Laboratorio Mobile ubicato in Via Rizzoli sono riportati in Tabella 9.

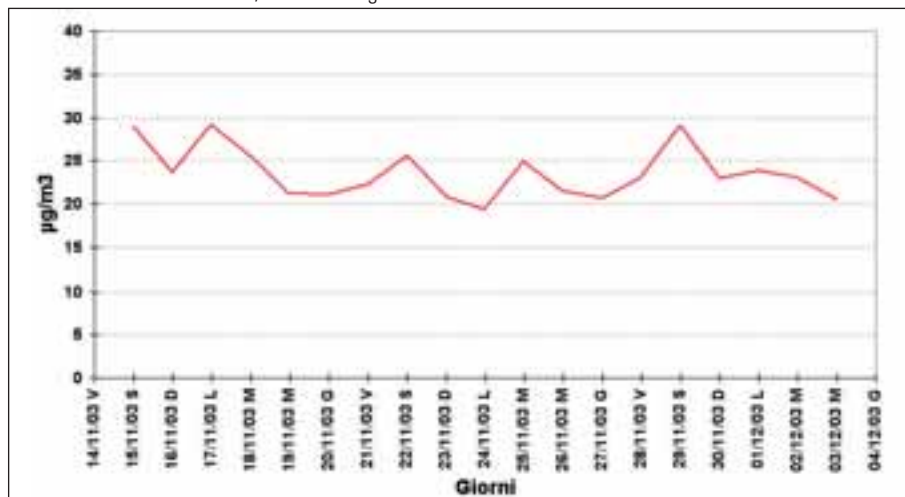
Tabella 9: Biossido di zolfo, tempo di mediazione 1 ora

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Numero di valori	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio	Numero di valori > 350 µg/m ³	% di valori > 350 µg/m ³
			µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³		
Via Rizzoli	14/11-04/12/03	479	15	47	24	0	0,0

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Il Grafico 11 riporta i valori medi giornalieri di SO₂: si nota come nell'arco del periodo di indagine ci sono state fluttuazioni limitate.

Grafico 11: Biossido di Zolfo, valori medi giornalieri rilevati in via Rizzoli



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

2.10 Dati dei flussi di traffico

IL Laboratorio Mobile dell'Arpa di Bologna, posizionato in Via Farini, ha potuto valutare il flusso di traffico, in termini di numero totale di veicoli transitati, attraverso il sistema ad elaborazione di immagine di cui è dotato.

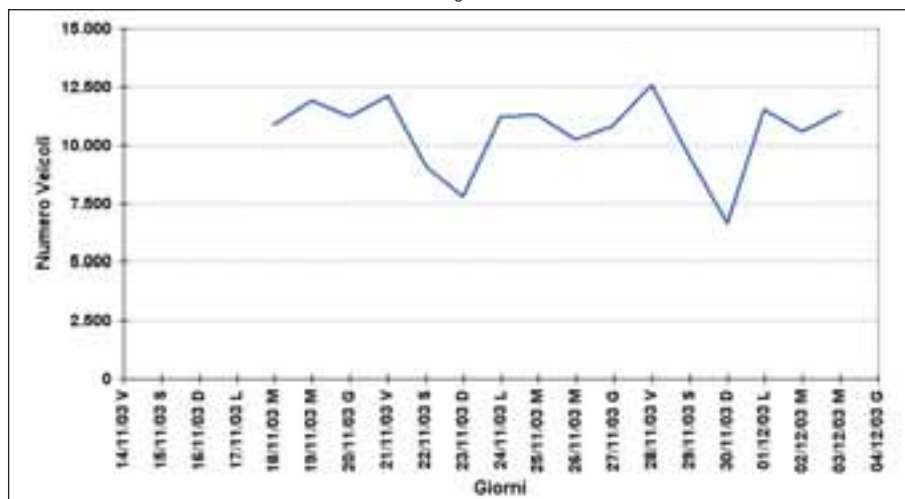
In Tabella 10 sono riportati i valori minimo, massimo e medio delle medie orarie e giornaliere.

Tabella 10: Valori orari e giornalieri dei flussi di traffico

Postazioni	Periodo di monitoraggio	Veicoli totali orari			Veicoli totali giornalieri		
		Minimo	Massimo	Medio	Minimo	Massimo	Medio
Via Farini	17/11-04/12/03	21	910	438	6613	12564	10539

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Grafico 12: Andamento del numero di veicoli totali giornalieri rilevati in via Farini



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna

Il Grafico 12 riporta il numero di veicoli transitati in ogni giornata di indagine. Pur con particolari condizioni (frequenti code, transito su corsie affiancate e soste selvagge) che ingannano, seppur limitatamente, il conteggio dei veicoli, si può riconoscere che nei giorni feriali si superano regolarmente gli 11.000 veicoli in transito, con valori leggermente superiori al venerdì, mentre nei fine settimana il flusso di traffico diminuisce sensibilmente, con circa 9.000 transiti al sabato e 7.000 alla domenica. Dall'analisi dei dati emerge inoltre una dipendenza tra i flussi di traffico e le concentrazioni rilevate di benzene ed IPA; tale correlazione non risulta così evidente per il materiale particolato.

3. STUDIO DELLA TURBOLENZA ATMOSFERICA

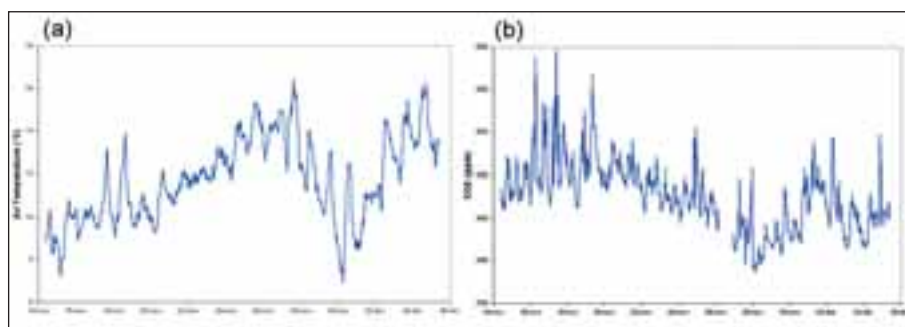
3.1 Risultati

Attraverso le immagini dei satelliti sia MODIS che AVHRR sono state investigate le condizioni meteorologiche durante la campagna di misura. In particolare, sono state monitorate le condizioni di copertura del cielo, al fine di correlare i valori di concentrazione di CO_2 alle condizioni del cielo e ad eventi precipitativi [4].

Durante la campagna di misure le condizioni sono state quasi sempre di cielo coperto, a parte alcuni giorni di cielo sereno ed è stato registrato un evento di pioggia il 26 novembre.

In Figura 2 sono riportati gli andamenti della temperatura dell'aria (Figura 2-a) e della concentrazione di CO_2 (Figura 2-b).

Figura 2: Andamento della temperatura dell'aria (a) e della concentrazione di anidride carbonica (b)

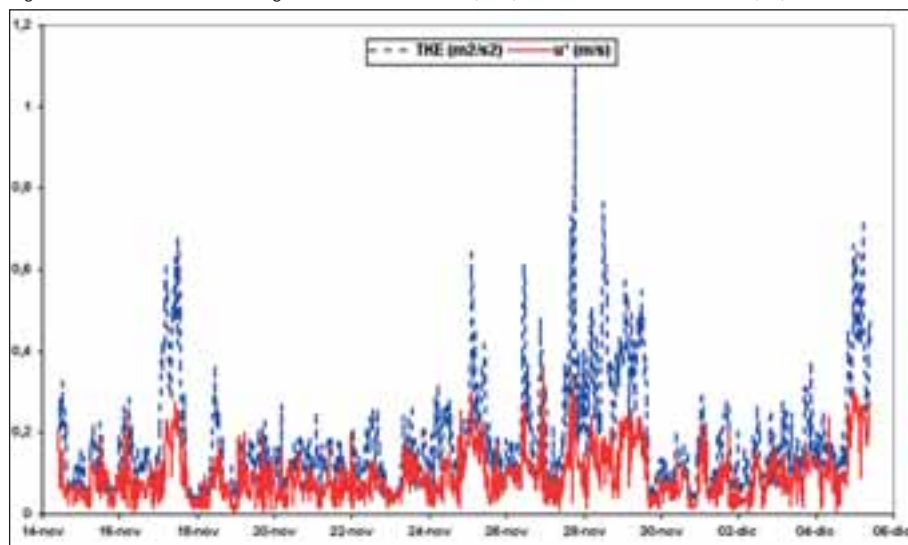


Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

Si può notare come queste due variabili scalari siano fortemente anti-correlate e come il periodo di misura può essere diviso in pre e post evento precipitativo. Durante il primo periodo si ha un trend di crescita della temperatura dell'aria e una decrescita della concentrazione di CO_2 . Dopo l'evento precipitativo (il 26 Novembre) si è registrata una diminuzione della temperatura dell'aria e un conseguente incremento della CO_2 (350 ppm = zone non inquinate).

Mettendo in relazione il trend della concentrazione di CO_2 con la turbolenza atmosferica (Figura 3), valutata dall'andamento dell'energia cinetica (TKE) indicatore dell'intensità turbolenza atmosferica si è visto che il 28 e 29 novembre si sono registrati valori elevati della TKE che hanno causato l'abbassamento della CO_2 portandola ai valori minimi registrati. Questo incremento nella turbolenza atmosferica, dovuto probabilmente a condizioni di cielo sereno che hanno favorito sia l'incremento della temperatura dell'aria, ma anche l'intensità dei moti convettivi, ha creato un consistente rimescolamento delle masse d'aria favorendo quindi lo scambio d'aria tra superficie e atmosfera portando alla superficie l'aria "più pulita" dell'atmosfera sovrastante.

Figura 3: Andamento dell'energia cinetica turbolenta (TKE) e della velocità di frizione (u^*)



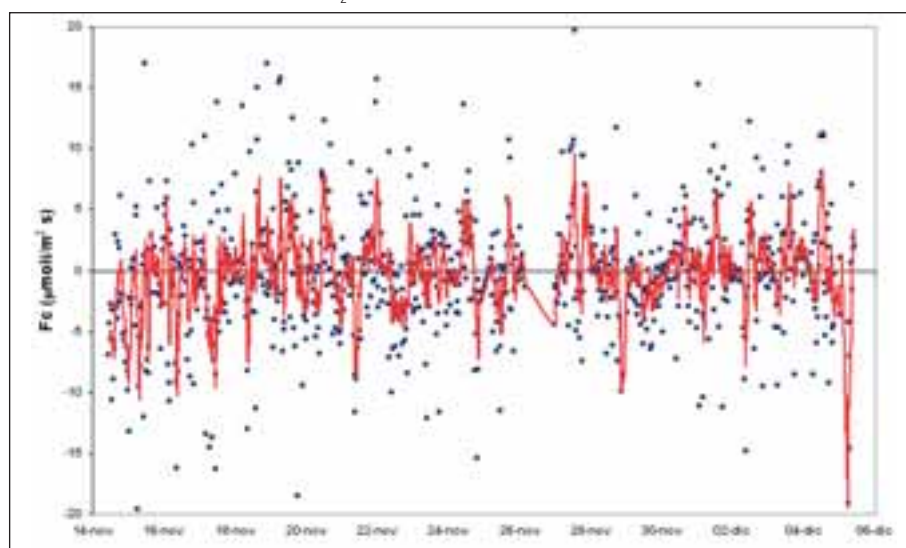
Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

L'andamento del flusso di anidride carbonica è riportato in Figura 4: se è positivo si ha immissione di CO_2 dalla superficie verso l'atmosfera (sorgente di CO_2) e viceversa i valori negativi indicano un assorbimento da parte della superficie di CO_2 (pozzo di CO_2).

L'alternanza dei valori indica il carattere turbolento del fenomeno, che è quindi fortemente dipendente delle condizioni locali che si sviluppano nel canopy urbano.

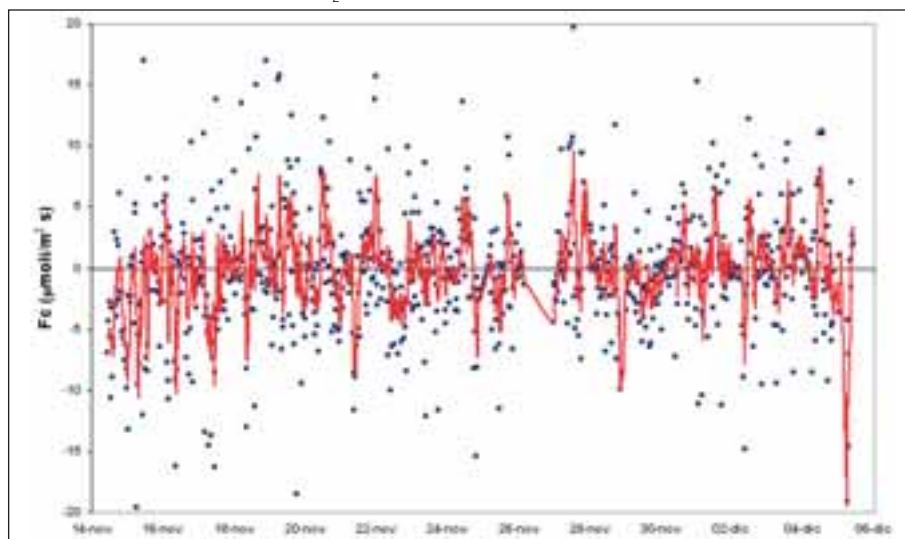
Se si considera un giorno ferialo (giovedì 27 Novembre) possiamo notare come l'immissione di CO_2 in atmosfera sia fortemente legato alle ore del giorno in cui il traffico risulta più intenso (Figura 5).

Figura 4 - Andamento del flusso di CO_2 durante tutto il periodo di misura



Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

Figura 5: Andamento del flusso di CO₂ durante il giorno feriale giovedì 27 Novembre



Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

Si hanno valori negativi del flusso durante le prime ore del mattino e nel pomeriggio dalle 15 alle 18; durante le ore di maggior traffico i valori diventano positivi e si alzano notevolmente, soprattutto nell'orario intorno alle 12 dove l'attività solare massima favorisce la formazione dei moti convettivi incrementando il rimescolamento nello strato superficiale.

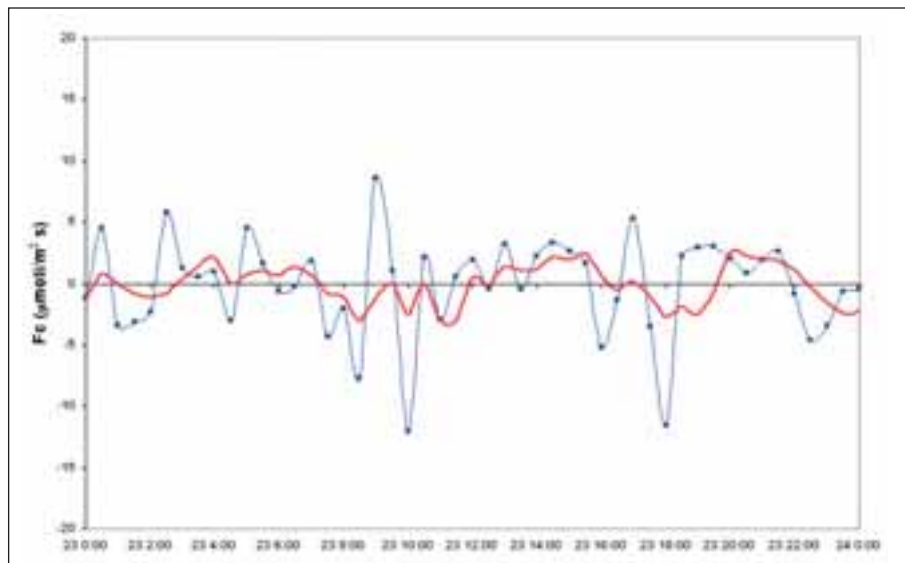
Se consideriamo un giorno festivo (domenica 23 Novembre, Figura 6) possiamo notare i valori minori del flusso di CO₂ che, durante la giornata, si mantiene sostanzialmente intorno allo zero, a indicare una fortissima dipendenza dalle condizioni di traffico cittadino.

Il vento si distribuisce in direzione Nord-Sud a causa dell'incanalamento delle masse d'aria lungo la direzione della strada, dovuto principalmente alla presenza dei palazzi. L'intensità del vento è relativamente bassa, eccetto per l'evento già citato di incremento della turbolenza atmosferica a seguito dell'evento precipitativo.

L'intensità e la direzione del vettore vento sono riportati in Figura 7.

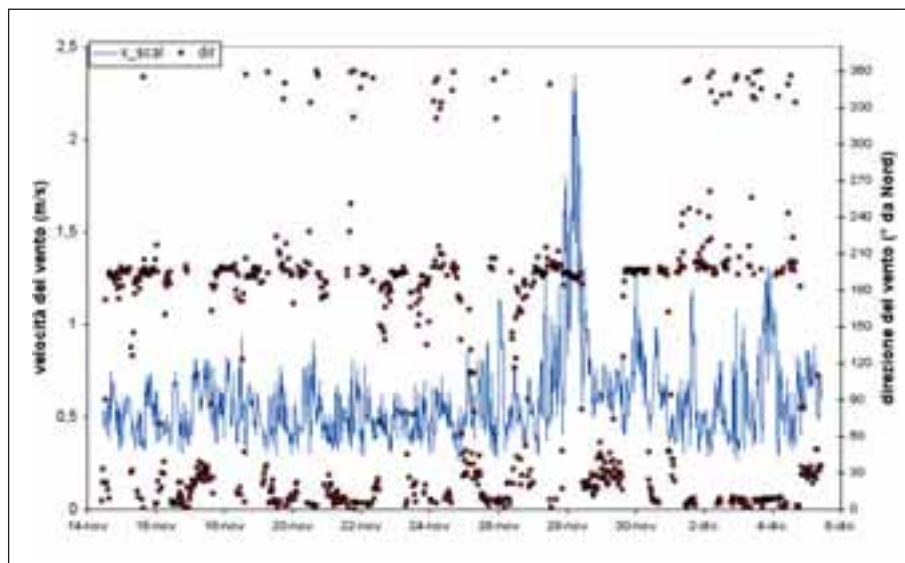
Infine i flussi di calore latente e sensibile, ottenuti attraverso l'elaborazione dei dati dell'anemometro sonico e dell'IRGA (LICOR 7500) con la tecnica eddy covariance, sono riportati in Figura 8. Il flusso di calore latente è durante tutto il periodo di misura circa nullo, a causa della mancanza di superficie che traspira e che quindi distribuisca vapore in atmosfera. D'altro canto il flusso di calore sensibile è sempre positivo, a differenza di quello che accade in un sito rurale dove si ha una forte dipendenza dall'evoluzione della radiazione giornaliera. Questo è dovuto alla così detta isola di calore della città, che fa sì che l'area urbana abbia una temperatura maggiore della periferia circostante dovuta alla presenza massiccia di aree asfaltate e cementate.

Figura 6: Andamento del flusso di CO₂ durante un giorno festivo (Domenica 23 Novembre 2003)



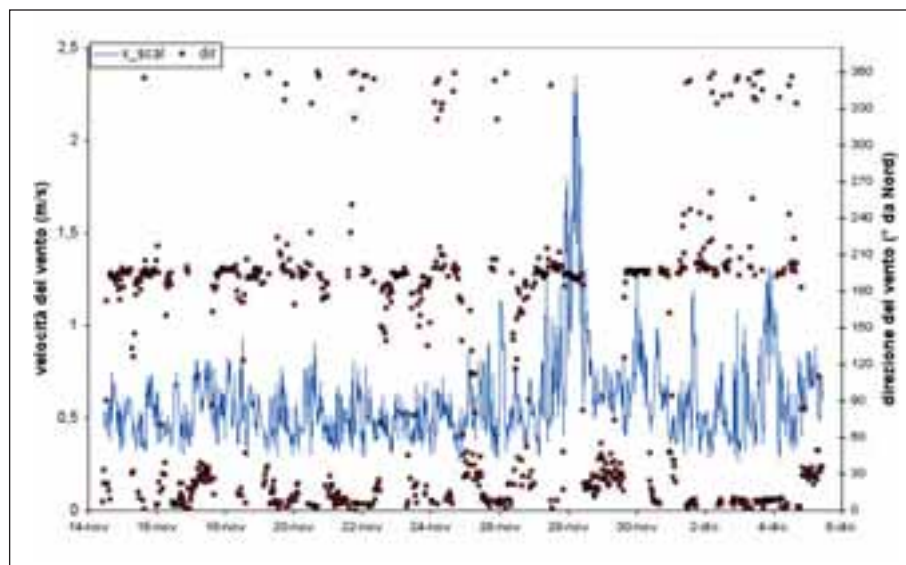
Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

Figura 7: Andamento della velocità e della direzione del vettore vento



Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

Figura 8: Andamento del flusso calore sensibile (H0) e del flusso di calore latente (LE)



Fonte dati: CNR IBIMET Bologna

4. VALUTAZIONE DELLA DISPERSIONE DI INQUINANTI

4.1 Modelli utilizzati

L'applicazione modellistica si è svolta in due fasi:

- calcolo delle emissioni inquinanti generate dal traffico veicolare presente nelle strade del dominio considerato; la ricostruzione è stata effettuata tramite il software di Arianet TREFIC (*TR*afic *E*mission *I*mproved *C*alculation) [8], in uso presso il Comune di Bologna, che implementa la metodologia ufficiale europea CORINAIR/COPERT [9] con alcune integrazioni ed aggiornamenti, in particolare relative all'emissione di PM10, calcolate con l'utilizzo dei fattori di emissione IIASA [5], che tengono conto anche delle emissioni "non esauste" (usura di freni e pneumatici, abrasione dell'asfalto);
- simulazione della dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi dal traffico veicolare, tenendo in considerazione l'effetto degli edifici; a partire dall'orografia tridimensionale del tessuto urbano di Bologna (disponibile presso il settore tecnico del Comune), è stato utilizzato il software di Arianet MSS (Micro-Swift-Spray) [7, 14], che è costituito da un modello meteorologico [6] in grado di ricostruire un campo tridimensionale di flusso medio non divergente intorno ad ostacoli, accoppiato ad un codice Lagrangiano a particelle [10, 11, 12, 13], per riprodurre la diffusione degli inquinanti.

4.2 Dati in ingresso e caratteristiche della simulazione

La simulazione di dispersione ha riguardato un periodo di 24 ore, ossia la giornata di venerdì 21 novembre. La data è stata scelta perché in quel giorno la concentrazione media giornaliera di PM10 in via Farini, ossia la postazione di misura "più inquinata", raggiunge il valore massimo nei 21 giorni della campagna di monitoraggio, pari a 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il dominio della simulazione è un parallelepipedo dalle dimensioni orizzontali di 220 x 600 m^2 e verticale di 1000 m; la figura visualizza la struttura tridimensionale degli edifici compresi nel dominio, lungo una prospettiva est-ovest.

Figura 9: Rappresentazione tridimensionale del dominio di simulazione



Fonte dati: Comune di Bologna

Gli inquinanti riprodotti nella simulazione sono NO_x , PM10 e benzene, ossia le specie che più frequentemente raggiungono concentrazioni vicine o superiori ai limiti normativi giornalieri e annuali.

4.3 Calcolo delle emissioni

Le emissioni del traffico stradale nella zona di studio sono da attribuire essenzialmente ai due sistemi viari, costituiti entrambi da tre strade: via Indipendenza – via Ugo Bassi – Via Rizzoli a nord, via D’Azeglio (parte aperta al traffico) – via Farini – via Carbonesi a sud. Tali strade sono arterie centrali della città, essenziali per lo svolgimento del traffico nel centro storico, in particolare la cosiddetta “T” (così nominata per comodità nel prosieguo della relazione) a nord, che include un tratto urbano della via Emilia. Pertanto per queste strade sono disponibili dati sperimentali o modellistici di flussi di traffico. Per ognuna di esse il modello richiede l’indicazione della lunghezza, quindi del flusso veicolare e della velocità media di percorrenza, specificati per motocicli, autovetture, veicoli commerciali leggeri e pesanti.

I dati suddetti di flusso complessivo sono riportati nella tabella 11.

Tabella 11: Flussi veicolari complessivi utilizzati in TREFIC

Strada	Flusso (veicoli/giorno)	Fonte del dato
Indipendenza	16349	misure sperimentali 2001
Ugo Bassi	29302	misure sperimentali 2004
Rizzoli	25658	misure sperimentali 2001
Farini	18768	modello di traffico
D’Azeglio	3754	stima empirica
Carbonesi	18768	modello di traffico

Fonte dati: Comune di Bologna, Arpa Emilia-Romagna

Le velocità medie sugli archi stradali sono state ipotizzate in base all’esperienza maturata in precedenti simulazioni analoghe. Per migliorare la rappresentazione, sono state differenziate le velocità nei tratti lontani dai 2 incroci (più alte) da quelle nei tratti afferenti agli incroci. I valori sono riportati in Tabella 12.

Tabella 12: Velocità medie di percorrenza utilizzate in TREFIC

Velocità (km/h)	2 ruote	auto	commerciali leggeri	commerciali pesanti
Archi adiacenti all’incrocio	35	30	30	20
Archi non adiacenti all’incrocio	40	35	35	20

Fonte dati: Comune di Bologna

I dati relativi alla composizione qualitativa del parco veicolare circolante, in termini di categorie COPERT, provengono dalle statistiche ACI sui veicoli iscritti al Pubblico Registro Automobilistico nel Comune di Bologna al 31/12/2002 e sono stati rielaborati dall'Unità Ambiente del Comune di Bologna, integrandoli con conteggi specifici sulla flotta dei mezzi pubblici.

La zona in esame ha un impianto urbanistico medievale e presenta diverse limitazioni al traffico, caratteristiche che implicano la necessità di una ricostruzione particolareggiata dello split modale dei veicoli, possibile attraverso i dati dei conteggi di traffico sopra citati, che mostrano una ripartizione riportata in tabella 13. È possibile notare la rilevanza del contributo dei mezzi a due ruote e degli autobus, in particolare nelle tre strade della "T".

In termini di emissione, ciò comporta un consistente contributo di benzene, da parte soprattutto di ciclomotori e motocicli a 2 tempi, e di polveri, dalla combustione del gasolio da parte degli autobus e dall'effetto di risospensione, quest'ultimo difficilmente quantificabile e quindi non considerato nel calcolo.

Tabella 13: Composizione percentuale del parco circolante per le 4 macrocategorie COPERT

frazione (%)	2 ruote	auto	commerciali leggeri	commerciali pesanti
Indipendenza	40	40	7	13
Ugo Bassi	40	44	7	9
Rizzoli	49	34	6	11
Farini	33	55	7	5
D'Azeglio	33	55	7	5
Carbonesi	33	55	7	5

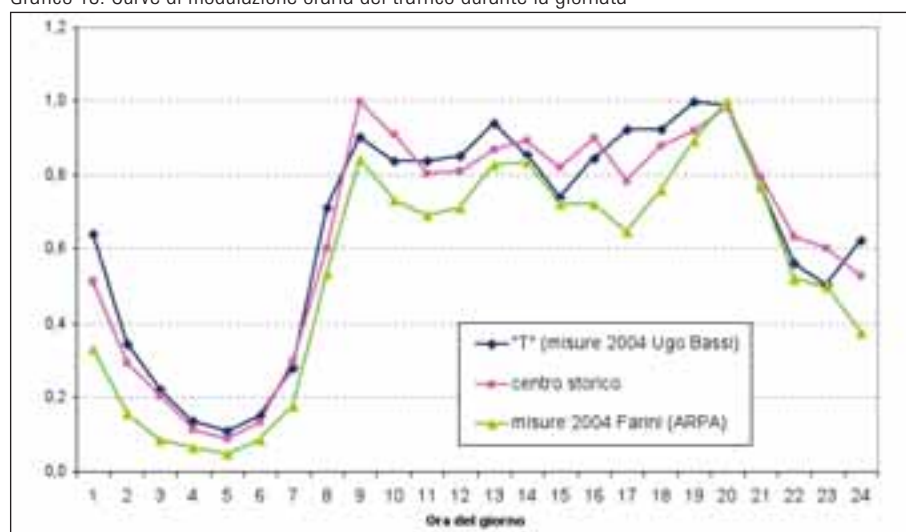
Fonte dati: ACI, Comune di Bologna

L'andamento orario dei flussi di traffico nell'arco della giornata è stato riprodotto utilizzando i dati sperimentali del 2004 forniti dall'Unità Ambiente del Comune di Bologna.

La figura 13 riporta tali dati (curve blu e viola) a confronto con le misure effettuate da Arpa in via Farini (curva gialla). Le curve sono molto simili, a parte qualche differenza quantitativa.

Le strade della "T" sono sorgenti fra loro confrontabili e sensibilmente più impattanti di via Farini e via Carbonesi, interessate da un traffico totale simile a quello di via Independenza ma con una presenza minore di ciclomotori e autobus. Le emissioni di via D'Azeglio sono molto minori rispetto alle altre strade considerate.

Grafico 13: Curve di modulazione oraria del traffico durante la giornata



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, Comune di Bologna

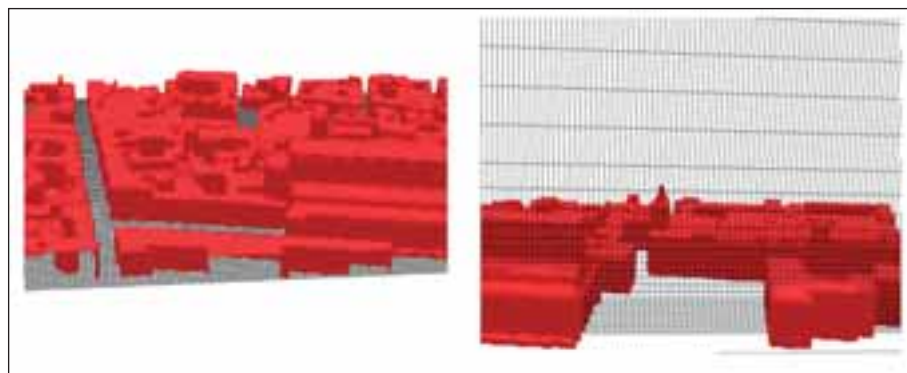
4.4 Meteorologia

La situazione meteorologica sinottica del 21 novembre 2003 vede l'Italia coperta dalle nubi, che tuttavia non hanno portato precipitazioni a Bologna. La stazione meteorologica di Bologna - Borgo Panigale ha misurato in quel giorno alti livelli di umidità giornaliera (90%) e una temperatura di 9°C, in linea con le medie climatologiche del periodo. Si è trattato quindi di una situazione tipica del bacino padano nella stagione autunno-invernale, con vento debole e limitato irraggiamento solare, condizioni che favoriscono l'accumulo di inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera.

La ricostruzione tridimensionale dei campi di vento e turbolenza, effettuata dal modulo SWIFT, si è basata sui dati locali di direzione e velocità del vento misurati dall'anemometro sonico del CNR a circa 5 metri di altezza e sui profili verticali di vento calcolati dal codice meteorologico diagnostico CALMET, in uso presso ARPA Emilia-Romagna.

All'interno del dominio, la griglia di calcolo delle concentrazioni ha una risoluzione fissa di 2 m nelle due direzioni orizzontali, mentre in verticale il grigliato è più fitto (1.5 m) vicino al suolo, per diradare con l'aumentare della quota. Nel complesso la risoluzione della griglia di calcolo al suolo è molto elevata, al fine di potere seguire l'evoluzione della concentrazione all'interno del canyon di via D'Azeglio, che nei punti più stretti è largo circa 5 metri.

Figura 10 - Visualizzazione del grigliato orizzontale (sinistra) e verticale (destra) utilizzato dal sistema MSS per rappresentare i dati meteorologici e le concentrazioni



Fonte dati: Comune di Bologna; elaborazione: ARIANET S.r.l.

Il codice MicroSpray utilizza lo stesso grigliato di celle per rappresentare i valori di concentrazione di inquinante. Le simulazioni meteorologiche realizzate con il modello MicroSwift forniscono campi 3D a cadenza oraria. Il modello MicroSpray interpola i dati meteorologici sulla posizione spazio-temporale di ogni particella. MicroSpray produce campi di concentrazione per le specie simulate a cadenza oraria, mediando i valori istantanei ottenuti campionando le posizioni delle particelle ad intervalli temporali regolari.

La ricostruzione dei campi tridimensionali di vento e turbolenza nel dominio di simulazione dà buoni risultati per quanto riguarda la velocità del vento, dato che SWIFT utilizza il dato anemometrico come condizione al contorno. Invece i parametri della turbolenza locale, ossia le varianze delle componenti orizzontale e verticale della velocità del vento (rispettivamente σ_v e σ_w), risultano sovrastimati dal modello, se messi a confronto con i rilievi anemometrici, a causa del posizionamento dello strumento di misura, chiuso su 2 dei 6 lati di provenienza del vento dalla parete del palazzo e dal pavimento del balcone su cui è posto.

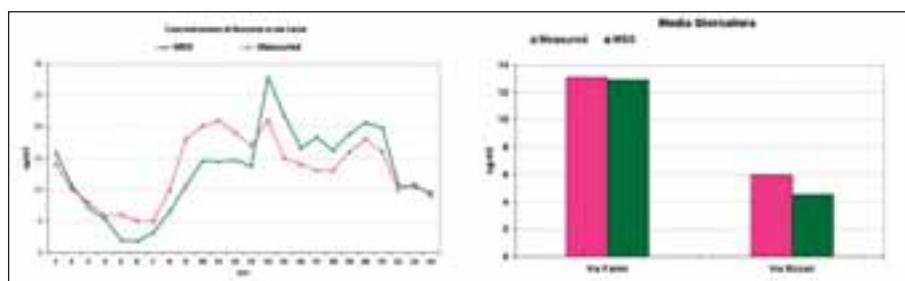
4.5 Risultati

I risultati della simulazione di dispersione sono diversi a seconda del tipo di inquinante e del punto di valutazione della differenza fra concentrazione misurata e simulata.

I Grafici 14 e 15 presentano il confronto fra misure e simulazione per il benzene nei punti di campionamento a bordo strada trafficata, cioè via Farini e via Rizzoli. SPRAY riproduce con efficacia l'andamento orario in via Farini dove il rimescolamento dell'atmosfera è ostacolato dalla conformazione degli edifici (canyon urbano); in questo punto è ancora migliore la corrispondenza con il valore di concentrazione media giornaliera. In via Rizzoli, dove il volume di rimescolamento è maggiore, la corrispondenza della media giornaliera è comunque soddisfacente.

Questo fenomeno è rappresentato efficacemente dal modulo di dispersione a microscala, che si rivela adatto a seguire situazioni complesse come la diffusione degli inquinanti in ambiente edificato, caratterizzato da zone di ricircolo e di accumulo degli inquinanti scarsamente influenzate dal vento prevalente.

Grafici 14 e 15: Benzene in via Rizzoli e via Farini

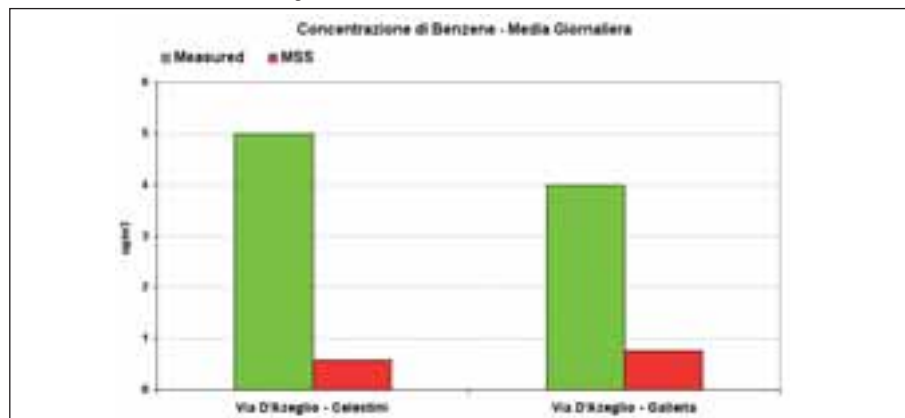


Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

Spostandosi verso i 2 punti di campionamento nella zona pedonale di via D'Azeglio, il modello non riesce a riprodurre le concentrazioni reali (Grafico 16). Ciò è probabilmente dovuto alla mancanza di alcune sorgenti emissive nella rappresentazione modellistica, quali il parcheggio dei motocicli all'ingresso di via D'Azeglio pedonale e il parcheggio di piazza dei Celestini. Inoltre è verosimilmente sottostimata l'intensità del vento misurato, cosicché nella simulazione il benzene emesso dal traffico in via Farini non riesce ad arrivare nelle postazioni di rilevamento di via D'Azeglio.

Grafico 16: Benzene in via D'Azeglio



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

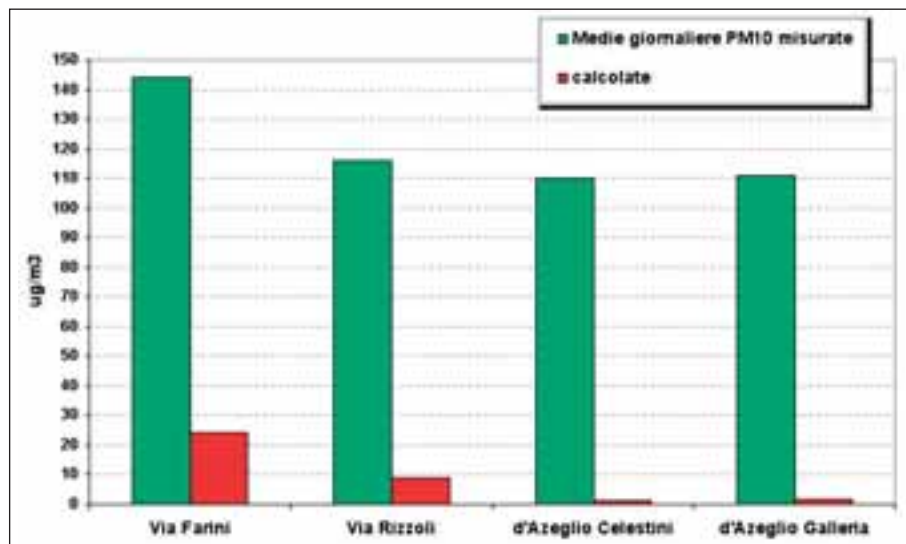
Passando ad esaminare gli NO_x nelle postazioni a bordo strada (le sole per cui sono disponibili le misure), l'andamento orario simulato resta aderente qualitativamente a quello reale, ma l'entità dei valori di concentrazione è sottostimata (Grafici 17, 18 e 19). Ciò è dovuto alla mancanza nella simulazione delle emissioni da sorgenti diverse dal traffico veicolare, in particolare la combustione negli impianti di riscaldamento. Inoltre, nella simulazione non si tiene conto dell'ingresso di aria già inquinata da NO_x emessi all'esterno della zona.



Grafici 17, 18 e 19 – NO_x in via Farini e via Rizzoli
 Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

Infine, osservando i valori di PM10, si riscontra una notevole sottostima rispetto ai valori reali, più evidente nei punti nella zona pedonale. Il grafico 20 riporta i valori della concentrazione media giornaliera.

Grafico 20 – PM10 in tutti i punti di campionamento



Fonte dati: Arpa Emilia-Romagna, ARIANET S.r.l.

Il fenomeno è di interpretazione complessa. Come per gli ossidi di azoto, non sono state considerate le sorgenti emissive diverse dal traffico e soprattutto la concentrazione di fondo (sorgenti naturali e antropogeniche) che nell'area della Pianura Padana raggiunge valori medi annuali di 20-25 µg/m³ per un effetto di scarsa circolazione negli strati bassi dell'atmosfera che impedisce la dispersione degli inquinanti emessi.

Nella simulazione è stato trascurato un altro importante effetto, ossia la produzione di particolato secondario in atmosfera, generato dalle trasformazioni chimiche a carico di specie gassose come ossidi di azoto, solfati e ammonio.

L'effetto delle trasformazioni chimiche è descrivibile modellisticamente, ma allo stato attuale della disponibilità di potenza di calcolo non è possibile accoppiare un modello lagrangiano "inerte" come MicroSPRAY con un meccanismo chimico.

Tuttavia, riguardo al PM10, vale la pena sottolineare come l'effetto del solo traffico veicolare nella strada dove viene effettuata la misura porti a una concentrazione media giornaliera pari a 25 µg/m³ in via Farini e 10 µg/m³ in via Rizzoli; tali valori spiegano le differenze riscontrate tra ciascuna delle concentrazioni misurate nelle 4 stazioni considerate (Grafico 20) e il valor medio delle stesse, il quale può essere ritenuto il valore di fondo urbano dell'area di studio per il giorno venerdì 21 novembre 2003.

CONCLUSIONI

L'indagine ha dimostrato come l'area pedonale analizzata sia sottoposta a valori di particolato non molto diversi rispetto da quelli rilevati nelle strade della ZTL immediatamente limitrofe. Probabilmente la superficie dell'area pedonale relativamente piccola, nonché la scarsa possibilità di diffusione degli inquinanti dovuti alla geometria delle strade, genera una quasi-stazionarietà delle concentrazioni. I dati, relativamente più alti in Via Farini rispetto a via

Rizzoli, sono imputabili alla minore larghezza della strada e alla presenza dei portici che impediscono ulteriormente il ricambio delle masse d'aria; tale andamento risulta evidente anche per il benzene, il quale mostra valori sensibilmente alti in via Farini, ma non particolari differenze tra via Rizzoli e le postazioni dell'area pedonale

Nello stesso tempo le concentrazioni degli IPA, pur se la loro ricerca avviene negli stessi campioni utilizzati per la determinazione gravimetrica del particolato, dimostrano al contrario un notevole decremento allontanandosi dai punti in cui è concentrato il passaggio degli automezzi.

È quindi possibile ritenere che gli IPA presenti nel particolato vicino alla zona della sua emissione, possano trasformarsi chimicamente durante la migrazione di tale materiale solido nelle zone adiacenti: in tale zone sembra quindi essere presente un particolato che contiene percentualmente meno IPA rispetto a quelle vicine al punto di formazione degli stessi IPA. Si conferma comunque che tali inquinanti afferiscono alla parte più fine del particolato.

Per quanto riguarda gli aspetti modellistici, la suite TREFIC + Micro-Swift-Spray ricostruisce efficacemente la circolazione a microscala in una zona dall'orografia complessa come quella del centro di Bologna e riproduce correttamente le concentrazioni di benzene misurato in punti adiacenti a strade trafficate, quali le postazioni di misura di via Farini e via Rizzoli. Meno efficace è la rappresentazione della diffusione del benzene nella zona pedonale di via D'Azeglio, probabilmente a causa della mancanza di alcune sorgenti di emissione e dell'anemologia introdotta nelle simulazioni.

Nel confronto con le concentrazioni misurate, gli ossidi di azoto e le polveri risultano sottostimati dal modello. Le cause sono la mancanza nelle simulazioni del contributo emissivo dei riscaldamenti e della concentrazione di fondo urbano (molto inquinato e omogeneo su vasta area). Per il PM10 in aggiunta è importante il contributo delle reazioni chimiche in atmosfera, che formano particolato secondario a partire da altri inquinanti: tale effetto non è stato trattato nella modellizzazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Decreto Ministeriale n° 60 del 2 Aprile 2002 "Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio"
- [2] Decreto Ministeriale del 25/11/94 "Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di attenzione e di allarme per gli inquinamenti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti di cui al decreto ministeriale 15 aprile 1994".
- [3] Decreto Legislativo n° 183 del 21 maggio 2004 "Attuazione della direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria"
- [4] Sozzi R. and M. Favaron, 1996. Sonic anemometry and thermometry: theoretical basis and data-processing software, Elsevier Science Ltd., 11 N° 4, pp 259-270.
- [5] IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis, RAINS-Europe homepage. <http://www.iiasa.ac.at/~rains/>
- [6] Kaplan H. and Dinard N., 1996: A Lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain. *Atmospheric Environment*, 30 (24), 4197 - 4207.
- [7] Moussafir J., Oldrini O., Tinarelli G., Sontowski J, Dougherty C.: "A new operational approach to deal with dispersion around obstacles: the MSS (Micro-Swift-Spray) software suite", 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes Garmisch 1-4 June 2004.
- [8] Nanni A., Radice P., Piersanti A. (2005) ARIANET TREFIC ("Traffic Emission Factor Improved Calculation") User manual - Version 4.0. ARIANET R2005.02, Milano, Gennaio 2005.

- [9] Ntziachristos N. e Z. Samaras, 2000: COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (Version 2.1). European Environment Agency, technical report No 49.
- [10] Rodean H.C., 1996: Stochastic Lagrangian models of turbulent diffusion. American Meteorological Society Meteorological Monographs, 26 (48).
- [11] Thomson D.J. 1987: Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. J. Fluid Mech., 180, 529-556.
- [12] Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Moussafir J., Tampieri F., Trombetti F., 1994: Lagrangian particle simulation of tracer dispersion in the lee of a schematic two-dimensional hill", Journal of Applied Meteorology, 33, N. 6, 744-756.
- [13] Tinarelli G., 2001: SPRAY 3.0. General description and user's guide, ARIANET R2001.8