

LA VALUTAZIONE DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO DA TRAFFICO VEICOLARE TRAMITE IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI “COPERT” E “MOCAR”

M.la AGOSTINACCHIO, D. CIAMPA, S. OLITA

*Università della Basilicata, DAPIT
Viale dell'Ateneo Lucano, 10
saverio.olita@unibas.it*

ABSTRACT

Il problema dell'inquinamento atmosferico desta particolari preoccupazioni soprattutto nelle aree urbane, dove elevata è la produzione di inquinanti e maggiore è la popolazione esposta al rischio di danni alla salute. In particolare, all'interno dei centri urbani, le emissioni diffuse degli scarichi del traffico autoveicolare avvengono spesso nelle condizioni peggiori (stati di inversione termica in bassa quota, funzionamento non a regime dei motori nel traffico congestionato, etc.). Nella presente memoria gli Autori propongono una metodologia operativa finalizzata alla valutazione delle emissioni di inquinanti generate dal traffico stradale, per poi procedere alla valutazione della dispersione del carico inquinante generato nell'ambiente circostante sia esso urbano, suburbano o extraurbano. La metodologia implementa, per la valutazione delle emissioni, un modello (COPERT 4 - Computer Programme to calculate Emissions from Road Traffic) che si basa sull'elaborazione di un ampio insieme di parametri, che tengono conto delle caratteristiche generali del fenomeno e delle specifiche realtà di applicazione. Tale modello è stato indicato dall'EEA (European Environment Agency) quale strumento da utilizzare per la stima delle emissioni dovute al trasporto stradale nell'ambito del programma CORINAIR (CORE INventory AIR) per la redazione degli inventari nazionali delle emissioni. La valutazione delle concentrazioni al suolo degli inquinanti emessi da trasporto stradale è stata, a sua volta, effettuata facendo ricorso all'impiego di un modello stazionario di media complessità, denominato MOCAR. L'applicazione della metodologia proposta consente di individuare le aree più critiche del territorio comunale, ovvero le aree in cui più elevato è il rischio che si verifichino episodi acuti di inquinamento atmosferico per gli inquinanti (CO, NO_x, COVNM, PM₁₀, etc.). La metodologia consente, altresì, di sviluppare delle simulazioni di scenario atte ad individuare le strategie più efficaci ai fini del contenimento dell'inquinamento atmosferico, per cui si configura come valido strumento di supporto alle decisioni che le Amministrazioni locali debbono porre in essere per contrastare il fenomeno inquinante.

KEYWORDS

Inquinamento atmosferico, emissioni da traffico, COPERT, MOCAR.

17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna
10-12 Settembre 2008

INTRODUZIONE

L'inquinamento atmosferico costituisce uno dei principali impatti sull'ambiente prodotto dal sistema delle infrastrutture viarie, soprattutto dal trasporto su gomma, sia per la sua netta predominanza sulle altre modalità di trasporto, sia per il fatto che l'emissione di sostanze inquinanti è diffusa sul territorio ed in particolare all'interno delle aree urbane.

Il problema dell'emissione nell'atmosfera di sostanze inquinanti con caratteristiche tossiche e nocive non sembra essere limitato solo ai grandi agglomerati urbani, poiché anche in città di dimensioni relativamente modeste possono verificarsi situazioni a rischio di tossicità per l'uomo e la vegetazione. La rilevanza del problema è ampiamente riconosciuta dalla Legislazione vigente [1], che esercita un'attività di controllo a priori sulle emissioni dei veicoli e a posteriori sulla concentrazione massima accettabile di alcuni inquinanti nell'aria. In condizioni meteorologiche particolari, che possono verificarsi più volte nel corso dell'anno, le concentrazioni degli inquinanti superano le soglie di accettabilità e ciò rende necessaria l'adozione di provvedimenti di emergenza, quali la chiusura totale o parziale delle città al traffico privato.

Degno di nota è l'obbligo riservato per legge ai Comuni o agli Enti competenti di realizzare una rete di monitoraggio, con l'ausilio di centraline automatiche dislocate in punti critici della città, in risposta all'esigenza di controllare sistematicamente i livelli di inquinamento dell'atmosfera urbana, per quindi documentarne il rispetto, ovvero, il superamento degli standard di qualità dell'aria nel territorio interessato.

Il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico condotto con questi strumenti permette di conoscere in maniera molto precisa la concentrazione delle sostanze prese in considerazione e di effettuare confronti tra stazioni anche lontane tra loro. Tale metodo, tuttavia, viene generalmente applicato per il rilevamento di un ristretto numero di sostanze (CO, SO₂, NO_x, COVNM - Composti Organici Volatili Non Metanici, O₃, polveri), rispetto alla molteplicità dei contaminanti immessi nell'atmosfera (ad es. composti aromatici, metalli pesanti, etc.). Inoltre, per loro natura, le reti non sono in grado di fornire informazioni relative a tutte le aree in cui non sono disponibili i misuratori o di stimare l'approssimarsi dell'evento critico.

Per un approccio più completo e sintetico della valutazione dello stato di degrado ambientale risulta particolarmente utile affiancare, alle reti suddette, strumenti di simulazione (modelli), che siano in grado di riprodurre l'emissione, il trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera. Le due tecniche di valutazione, la misurazione diretta in punti fissi opportunamente scelti e i modelli di simulazione, si integrano a vicenda e forniscono, se ben usate, una visione più completa e più utile ai fini operativi.

GLI AGENTI INQUINANTI

Gli inquinanti prodotti dal sistema dei trasporti possono essere classificati secondo molteplici criteri. A seconda della genesi, essi possono essere distinti in primari e secondari; i primi vengono direttamente immessi nell'atmosfera, mentre i secondi sono il prodotto delle reazioni degli inquinanti con gli altri componenti dell'atmosfera.

In relazione agli aspetti normativi, gli inquinanti si distinguono in regolamentati e non, a

seconda che l'entità delle emissioni da parte dei veicoli e da altre sorgenti civili e industriali, e le relative concentrazioni nell'atmosfera, siano soggetti o meno a limiti di legge. Gli effetti negativi degli inquinanti sono dovuti alla loro concentrazione nell'aria, che può essere misurata in unità di densità, ad esempio in microgrammi di inquinante per metro cubo di aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), oppure in unità di volume, cioè in parti di inquinante in un milione di parti in aria (ppm) o in un miliardo di parti in aria (ppb). La prima unità di misura può essere utilizzata sia per gli inquinanti gassosi, che per quelli dispersi in atmosfera sotto forma di particelle (particolato); la seconda è usata solo per i gas.

Non è possibile misurare né prevedere le concentrazioni istantanee degli inquinanti, poiché esse fluttuano rapidamente in modo caotico come conseguenza delle collisioni molecolari e delle variazioni casuali della velocità e della direzione del vento. Comunque non è necessario misurare o prevedere le concentrazioni istantanee, poiché esse non causano effetti dannosi, che sono invece prodotti dalle medie delle concentrazioni su lunghi periodi di tempo.

I principali componenti delle emissioni dei veicoli a motore sono costituiti da: Vapore acqueo H_2O , Azoto N , Anidride carbonica CO_2 , Monossido di carbonio CO , Piombo Pb , Anidride solforosa SO_2 , Ossidi di azoto NO_x , polveri o particolato PM_{10} ; Idrocarburi incombusti HC (BTEX – Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xileni), Ozono O_3 . I primi 3 componenti non sono considerati inquinanti (a parte gli effetti a lungo termine sul clima da parte del CO_2), le altre sostanze sono ritenute causa di effetti nocivi, ovvero, sono considerate sostanze inquinanti. Ovviamente la presenza nell'atmosfera di tali sostanze non è dovuta esclusivamente al traffico veicolare, anche se quest'ultimo gioca un ruolo sicuramente centrale, soprattutto in ambito urbano.

IL MONITORAGGIO ATMOSFERICO

Le attività di monitoraggio atmosferico non si esauriscono con il controllo dei parametri meteorologici e di qualità dell'aria, ma focalizzano l'attenzione sugli eventi di accumulo degli inquinanti e sulle interazioni tra meteorologia e dispersione. Tale approccio richiede uno studio analitico dei fenomeni causa-effetto e l'integrazione di dati, metodi e strumenti. Per una valutazione più dettagliata dello stato dell'ambiente, infatti, risulta particolarmente utile affiancare alle reti di monitoraggio sia strumenti statistici, che modelli di simulazione, in grado di riprodurre l'emissione, la micrometeorologia, il trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera. D'altronde la rete di monitoraggio, sebbene risulti articolata e tecnologicamente avanzata, fornisce informazioni di tipo puntuale, anche se continue nel tempo. Al fine di estendere i dati puntuali all'intero ambito territoriale di analisi è necessario ricorrere all'utilizzo di strumenti e tecniche geostatistiche. Anche la normativa vigente [1] prevede che i sistemi di valutazione della qualità dell'aria integrino misurazioni in punti fissi con tecniche modellistiche e che, allo scopo di ottenere indicazioni complementari e supplementari, il rilievo dei parametri sia effettuato tramite l'esecuzione di campagne di misura con metodi e mezzi diversi da quelli indicati come ufficiali.

OBIETTIVI DELLO STUDIO

Nell'ambito del monitoraggio della qualità dell'aria in area urbana, uno dei principali

17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna

10-12 Settembre 2008

problemi emergenti è la correlazione tra i livelli di traffico e i livelli di inquinamento. Nella presente memoria si è inteso mettere a punto una metodologia di valutazione delle emissioni dovute al traffico, in grado di fornire risposte inerenti l'inquinamento prevedibile nelle condizioni meteorologiche più gravose.

Tale metodologia è stata applicata con riferimento alla città di Potenza, il cui assetto urbanistico articolato, tra l'altro, impedisce il rapido smaltimento degli ingorghi da traffico. Le situazioni critiche si presentano soprattutto durante il periodo invernale, quando, unitamente all'instaurarsi di persistenti situazioni meteorologiche caratterizzate da calme di vento e assenza di pioggia, risulta massimo il carico di traffico e dunque molto elevata la conseguente emissione di sostanze inquinanti.

In particolare, la procedura è stata finalizzata alla valutazione delle emissioni totali riferite a tutto il territorio comunale degli inquinanti CO, CO₂, NO_x e PM₁₀ e alla determinazione delle loro dispersioni al suolo lungo i tratti principali della rete stradale urbana.

Lo studio si è articolato nella successione delle seguenti fasi operative:

- valutazione delle emissioni da traffico nella città di Potenza tramite implementazione del modello COPERT (COPERT 4 rev. 5) e determinazione dei fattori di emissione specifici, in riferimento alle caratteristiche dei veicoli, per gli inquinanti considerati;
- caratterizzazione dei flussi di traffico sulle principali arterie cittadine e realizzazione del data input emissivo per il modello di simulazione MOCAR (modello di dispersione degli inquinanti da traffico), che ha consentito il confronto con i dati rilevati nei diversi punti di misura sia mediante il monitoraggio in continuo, che attraverso campionamento passivo.

IL MODELLO COPERT

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 [16], basato su un ampio insieme di parametri che tengono conto delle caratteristiche generali del fenomeno e delle specifiche realtà di applicazione. Questa metodologia è stata indicata dall'EEA (European Environment Agency, Agenzia Europea per l'Ambiente) come lo strumento da utilizzare per la stima delle emissioni da trasporto stradale nell'ambito del programma CORINAIR (CORE INventory AIR) per la realizzazione degli inventari nazionali delle emissioni [2].

Il programma è stato finanziato e sviluppato dall'EEA nel quadro delle attività dello European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC) per fornire ai paesi europei un insieme di strumenti indispensabili alla realizzazione degli inventari annuali delle emissioni. Tutto ciò al fine di raccogliere, in modo trasparente e standardizzato, dati coerenti e comparabili tra loro, in accordo con le specifiche delle convenzioni e dei protocolli internazionali, nonché della legislazione dell'Unione Europea.

COPERT 4 rev.5 [3] è un programma “.NET” in ambiente Windows[®] e rappresenta il quarto aggiornamento della metodologia sviluppata da un gruppo di lavoro internazionale. L'applicazione software del COPERT 4, sviluppata per la compilazione di inventari nazionali su base annuale, è stata anche utilizzata a risoluzioni spaziali e

temporali più alte (scala comunale) per la compilazione di inventari urbani. Un modulo software, addizionale e separato, stima le emissioni dirette da motori a combustione interna utilizzati in applicazioni “*off-road*” come agricoltura, silvicoltura, giardinaggio, industria, navigazione, ferrovie.

COPERT 4 si applica ad autoveicoli, veicoli commerciali leggeri e pesanti, bus, motocicli e ciclomotori suddivisi secondo 63 diverse categorie veicolari per classi di cilindrata, o portata, tipo di alimentazione, normativa di riferimento. Permette la stima delle emissioni di tutti gli inquinanti regolamentati dalla normativa europea (CO, NO_x, COVNM, PM e CO₂) sulla base dei consumi di combustibile. Consente, altresì, di calcolare le emissioni di alcuni inquinanti non regolamentati come CH₄, N₂O, NH₃, SO₂, metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), inquinanti organici persistenti (POP) e, infine, è in grado di fornire le emissioni di Composti Organici Volatili Non Metanici (COVNM), suddivise nelle singole specie.

La stima delle emissioni viene effettuata in base alla scelta di un insieme di parametri quali velocità medie, percorrenze e curve di consumo ed emissione “*speed-dependent*”. In particolare queste ultime vengono fornite dal modello come “*best fitting*” di diverse curve relative a prove sperimentali, solitamente definite in letteratura “*cicli di guida*”.

Le emissioni stimate possono generalmente considerarsi costituite da tre componenti:

- emissioni prodotte durante l'attività del motore stabilizzato termicamente (emissioni “*a caldo*” - hot emission);
- emissioni generate durante la partenza a temperatura ambiente: partenza a “*freddo*” ed effetti di preriscaldamento (cold over-emission). Convenzionalmente, rappresentano le emissioni che si verificano quando la temperatura dell'acqua di raffreddamento è inferiore a 70°C. Alla somma delle emissioni a caldo e di quelle a freddo viene abitualmente dato il nome di emissioni allo scarico (exhaust emission);
- emissioni di COVNM dovute all'evaporazione del combustibile.

Le emissioni a caldo sono stimate per tutte le tipologie di veicoli, le emissioni a freddo per i veicoli leggeri, quelle evaporative sono rilevanti per i soli veicoli a benzina.

IL MODELLO MOCAR

L'implementazione di un modello che sia in grado di simulare la dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi dagli autoveicoli non è semplice da realizzare per una molteplicità di problemi operativi, tra i quali si citano, ad esempio:

- la difficoltà di stimare e/o misurare le emissioni inquinanti dei veicoli, considerato che esse dipendono dal loro stato di manutenzione, dal tipo di guida adottata, dalla tipologia ed età del veicolo e dalla sua velocità;
- il regime di turbolenza locale di tipo meccanico, che si produce a causa del movimento dei veicoli nelle vie, che si va a sovrapporre alla naturale turbolenza atmosferica (di tipo meccanico e/o convettivo), andando a modificare sensibilmente la situazione microclimatica locale;
- la discontinuità nella struttura micro-meteorologica del territorio prodotta dalla struttura fisica delle vie. Tale discontinuità provoca la nascita e la rapida evoluzione di un “*internal boundary layer*”, caratterizzato da una struttura termica e di turbolenza che rende estremamente difficoltosa la dispersione degli inquinanti.

17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna
10-12 Settembre 2008

Un modello che consente di simulare la dispersione degli inquinanti emessi dagli autoveicoli deve essere quindi necessariamente complesso, se si vuole rappresentare correttamente la realtà. Tra i principali modelli sviluppati fino ad oggi si citano, ad esempio, HIWAY2 (Petersen, 1980), CALINE4 (Benson, 1984 y 1992), GM (Chock, 1978) e GFLSM (Luhar y Patil, 1989).

Il modello MOCAR (*Modello per la simulazione della dispersione degli inquinanti emessi dagli autoveicoli*) [8], sviluppato con riferimento a esperienze acquisite dai Ricercatori del Nord Europa (J. Harkonen J et al, 1995), si colloca tra i modelli di media complessità. La sua caratteristica peculiare è quella di essere relativamente semplice, di non richiedere informazioni impossibili da reperire o difficili da stimare e di consentire di ottenere una buona rappresentazione del livello di qualità dell'aria nell'ambito di un sistema di arterie stradali più o meno complesso come, ad esempio, quello che caratterizza una città di grande dimensione.

Dal punto di vista fisico, MOCAR considera le emissioni di ogni segmento stradale come una o più fonti di tipo lineare, ciascuna caratterizzata da un tasso di emissione costante su tutto il segmento. Considerato che MOCAR è un modello di tipo stazionario, l'emissione da ciascun segmento può variare solo a livello orario e permane costante per tutta l'ora di simulazione.

CASO DI STUDIO: LA CITTÀ DI POTENZA

Come già evidenziato, la metodologia descritta è stata applicata con riferimento alla città di Potenza ed è stata finalizzata alla valutazione delle emissioni dell'intero territorio comunale e delle dispersioni al suolo di inquinanti CO, CO₂, NO_x e PM₁₀ lungo i tratti principali della rete stradale urbana (Cfr. Figura 1).

La base dati per l'implementazione dei modelli

I dati di base disponibili sulla composizione del parco veicolare circolante nel comune di Potenza, riferiti all'anno 2005, sono stati forniti dall'ACI e suddivisi in base alle categorie COPERT, ossia:

- per *alimentazione* - benzina, gasolio, GPL;
- per *cilindrata* - autovetture a benzina suddivise in tre classi (inferiore a 1400cc, compresa tra 1400 e 2000cc e superiore a 2000cc), autovetture diesel e GPL suddivise in due classi (minori e maggiori di 2000cc), ciclomotori con cilindrata inferiore a 50cc e motocicli suddivisi in tre classi (tra 50 e 250cc, tra 250 e 750cc e superiori a 750cc);
- per *portata* - mezzi commerciali suddivisi in leggeri e pesanti. Sono definiti leggeri quelli con peso a pieno carico inferiore a 3,5t, corrispondenti in media a quelli con portata massima di 1,5t, e pesanti quelli nelle classi di peso a pieno carico maggiori di 3,5t (tra 3,5 e 7,5t, tra 7,5 e 16, tra 16 e 32t e superiori a 32t) a cui si aggiungono autobus e pullman di linea.

Tutte queste categorie, secondo opportune combinazioni, sono state ulteriormente suddivise per classi di immatricolazione. Nel presente studio non si sono considerati i dati relativi ai ciclomotori per la loro modesta entità. La Figura 2 riporta, a titolo di

esempio, i dati indicanti le numerosità delle diverse classi veicolari riferite alle sole autovetture.

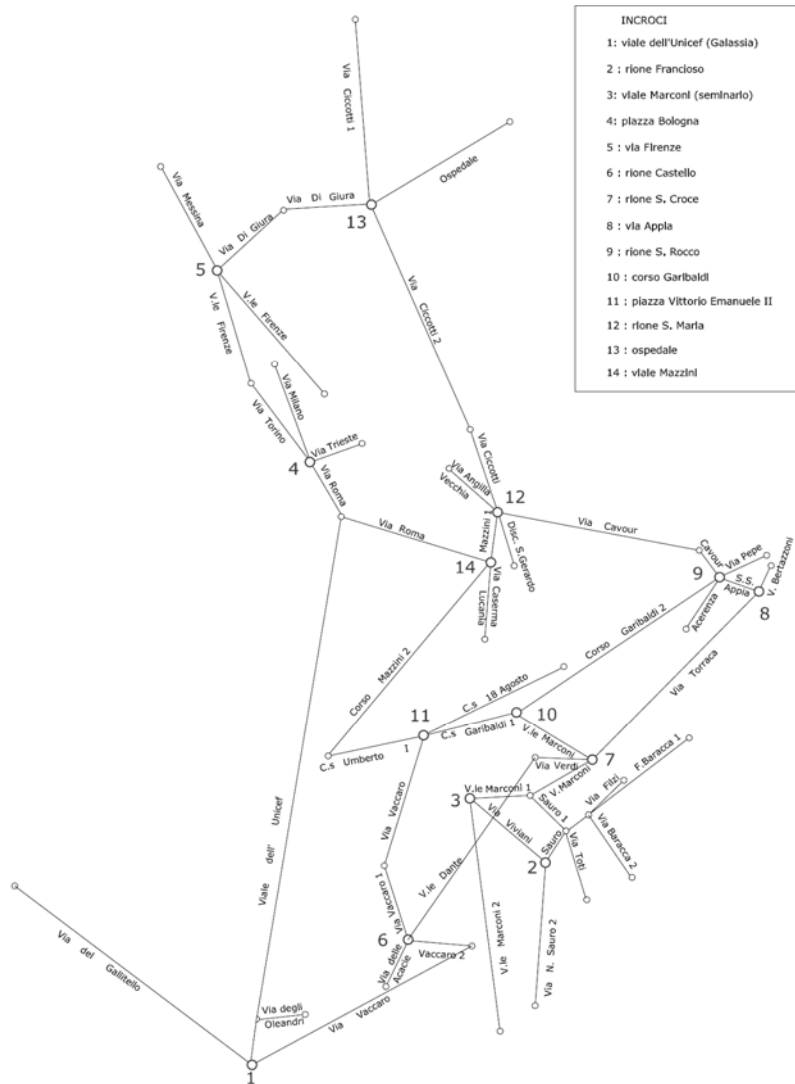


Figura 1 – Grafo della rete viaria urbana della città di Potenza presa in esame

Le percorrenze medie annue considerate dal modello COPERT e distinte per ciascuna tipologia di veicoli, rappresentano il risultato di una analisi incrociata sviluppata in base a diverse fonti, tra le quali si citano: il Conto Nazionale dei Trasporti (Ministero dei Trasporti) [9], le pubblicazioni dell'ACI, dell'Unione Petrolifera e della CONFETRA (Confederazione generale italiana del Traffico e dei Trasporti), relative al periodo compreso tra il 1998 ed il 2005. Tali fonti forniscono, sia pure in modo non esaustivo e

17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna

10-12 Settembre 2008

continuativo, dati di percorrenze medie per classi di veicoli, aggregati variamente. Per le velocità medie non sono state individuate specifiche fonti informative nazionali; tuttavia, analizzando diversi casi di studio e articoli di stampa specializzata, sono state confermate le velocità medie suggerite dal modello.

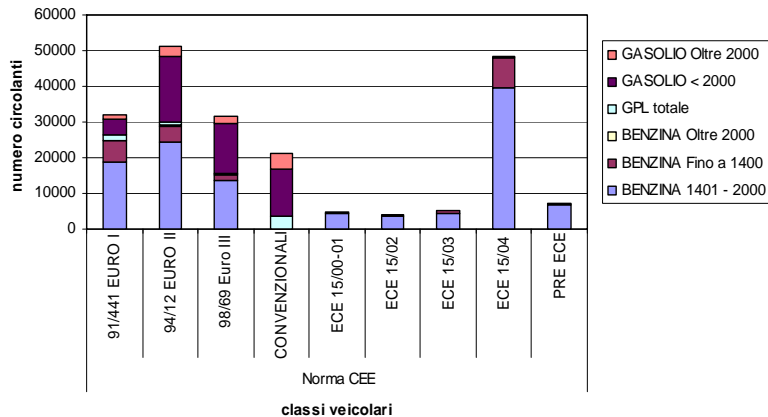


Figura 2 – Autovetture circolanti nel Comune di Potenza (2005)

Le temperature medie mensili minime e massime in °C sono state registrate nel 2005 dalla stazione di rilevamento meteorologica ARPAB (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale in Basilicata) situata a Potenza in Corso Umberto I e sono riportate in Tabella 1.

Un parametro importante per il calcolo delle emissioni per evaporazione di carburante, è costituito dalla sua pressione di vapore (RVP - Reid Vapour Pressure) a 37,8 °C ossia a 100 °F. Tale parametro è un indice della tendenza al passaggio del carburante dallo stato liquido allo stato gassoso ed i suoi valori sono forniti direttamente dal COPERT e variano a seconda della nazione per la quale si decide di applicare il modello.

Ai fini dell'applicazione del modello MOCAR per la valutazione delle dispersioni di inquinanti sulla rete stradale individuata in Figura 1, i flussi di traffico, espressi in termini di autovetture equivalenti relativi nell'ora di punta (13.00-14.00 di un giorno tipico feriale) sono stati desunti dai dati del PUT del Comune di Potenza riferiti all'anno 1993. L'attualizzazione dei flussi al 2005 è stata effettuata, sulla base di specifiche analisi, incrementando del 20% i valori relativi al 1993.

Tabella 1 – Temperature medie mensili a Potenza rilevate nel 2005

MESE	Tmax (°C)	Tmin (°C)	MESE	Tmax (°C)	Tmin (°C)
Gennaio	16,8	- 4,5	Luglio	37,0	12,8
Febbraio	10,5	- 5,8	Agosto	36,1	11,6
Marzo	20,5	- 6,7	Settembre	29,1	9,5
Aprile	22,6	0,1	Ottobre	23,0	2,3
Maggio	28,1	8,2	Novembre	19,6	- 1,9
Giugno	31,8	6,9	Dicembre	12,1	- 4,0

Le emissioni da trasporto stradale a Potenza – Output COPERT IV

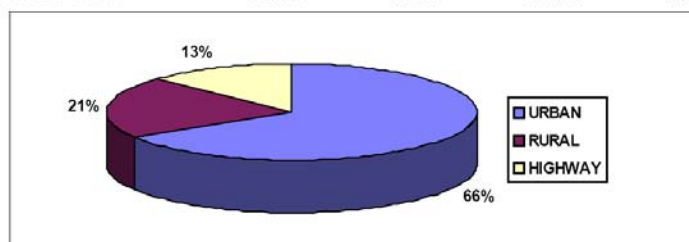
I risultati forniti dal modello COPERT per il caso di studio consentono di valutare i carichi totali dei principali inquinanti, vale a dire NO_x, CO, CO₂ e PM₁₀ prodotti annualmente dal settore dei trasporti stradali nel comune di Potenza. La Tabella 2 riporta, a titolo di esempio, i risultati relativi all'inquinante CO.

Le emissioni ottenute sono suddivise in base alla tipologia di distribuzione spaziale (zona urbana, zona rurale e autostradale) e in base alle diverse tipologie di veicoli.

Tabella 2 – Risultati dell'emissione dell'inquinante CO

Driving Mode oriented

Sector	Urban [t]	Rural [t]	Highway [t]	Total [t]
Passenger Cars	9.401	2.431	1.635	13.468
Gasoline <1,4 l	7.427	1.270	679	9.377
Gasoline 1,4 - 2,0 l	1.435	813	362	2.610
Gasoline >2,0 l	71	46	14	132
Diesel <2,0 l	166	186	98	450
Diesel >2,0 l	24	43	31	98
LPG	278	72	450	801
Light Duty Vehicles	306	162	86	553
Gasoline <3,5t	194	41	29	264
Diesel <3,5 t	112	120	57	290
Heavy Duty Vehicles	155	268	285	708
Gasoline >3,5 t	4	8	3	15
Diesel 3,5 - 7,5 t	37	64	35	136
Diesel 7,5 - 16 t	37	59	43	139
Diesel 16 - 32 t	57	104	144	305
Diesel >32t	20	32	61	113
Buses	9	5	8	22
Urban Buses	4	0	0	5
Coaches	5	5	8	18
Motorcycles	770	485	96	1.351
2-stroke >50 cm ³	230	165	28	423
4-stroke <250 cm ³	178	104	25	307
4-stroke 250 - 750 cm ³	301	172	33	507
4-stroke >750 cm ³	61	43	10	113
Grand Total:	10.642	3.350	2.110	16.102



17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna

10-12 Settembre 2008

Risulta evidente che le emissioni totali prodotte sul percorso urbano sono significativamente maggiori di quelle rurali ed autostradali; infatti sono risultate pari al 66% con un totale di 10642t, contro il 13% (2110t) e il 21% (3350t) rispettivamente ottenute per l'ambito autostradale e rurale. Per gli ossidi di azoto (NO_x) le emissioni prodotte sul percorso urbano (25%) sono invece risultate lievemente inferiori rispetto a quelle rurali (38%) e autostradali (37%) per un totale di 1220t, cioè 600t in meno rispetto agli altri due percorsi. La situazione in termini di percentuale per l'inquinante PM_{10} è simile a quella di NO_x . Difatti le emissioni prodotte sul percorso rurale (39%) e autostradale (35%) sono lievemente maggiori di quelle ottenute per l'ambito urbano (26%), ma con un contributo in tonnellate decisamente diverso rispetto all'inquinante precedente. Per l'ambito urbano si è ottenuto un totale di 101t, per l'ambito rurale di 150t e per quello autostradale di 133t. Infine per la CO_2 si è ottenuto che le emissioni totali prodotte sul percorso rurale (40% ossia 315976t) sono maggiori rispetto al percorso urbano (28%, ossia 228626t) ed autostradale (32%, ossia 262102t.).

A determinare queste diverse distribuzioni concorrono diversi fattori, tra cui la distribuzione percentuale della percorrenza media annua nelle diverse zone (variabile a seconda della tipologia di veicolo) e i fattori d'emissione a motore freddo dei diversi inquinanti, che risultano superiori per il CO, rispetto agli altri inquinanti.

Per quanto riguarda la distribuzione dei carichi inquinanti prodotti dalle diverse tipologie di veicoli, si può notare che le emissioni di NO_x e PM_{10} dei mezzi commerciali pesanti hanno un peso relativo nettamente superiore a quello da essi rappresentato nella composizione del parco; lo stesso avviene per le autovetture (diesel, benzina, GPL) per quanto riguarda le emissioni di CO. Infine, l'insieme dei motocicli risulta ininfluente sulle emissioni di NO_x e PM_{10} .

Le quantità complessive di sostanze emesse in atmosfera dai mezzi di trasporto su strada dipendono sia dalle emissioni specifiche dei singoli veicoli, denominate anche *fattori di emissione*, che dalla numerosità delle diverse flotte (veicoli a benzina, diesel, GPL, veicoli catalizzati e non, ecc.) e dalle relative percorrenze.

Il modello COPERT stima le emissioni di una data categoria veicolare, a partire dalla curva di emissione "*speed-dependent*", in seguito alla scelta di un valore di velocità media, considerato rappresentativo del relativo ciclo di guida (urbano, extraurbano, autostradale). Il *fattore di emissione* è il quantitativo di inquinante emesso in un chilometro percorso da un veicolo "tipo" della categoria veicolare considerata e viene calcolato rapportando il corrispondente dato di emissione totale (stimato per mezzo di COPERT ed espresso in tonnellate/anno) al prodotto del numero di veicoli appartenenti a quella categoria per le relative percorrenze medie annue (esprese in km/anno):

$$FE_{ijk} = \frac{E_{ijk}}{(P_j \cdot Perc_{jk})} \quad (1)$$

dove:

- FE_{ijk} rappresenta il fattore di emissione dell'inquinante i , per la categoria veicolare j sul percorso k (espresso in grammi per veicolo e per chilometro);
- E_{ijk} rappresenta l'emissione totale dell'inquinante i , per la categoria veicolare j sul percorso k (espressa in tonnellate/anno);
- P_j è il numero di veicoli appartenenti alla categoria veicolare j ;
- $Perc_{jk}$ è la percorrenza media annua del veicolo appartenente alla categoria j ,

effettuata sul percorso k (espressa in km/anno).

I fattori di emissione così stimati sono dei valori “medi” ricavati dalla calibratura complessiva del modello, in cui, i fattori di emissione sono delle curve dipendenti dalla velocità. I valori dei fattori emissivi ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{veic}^{-1}$) per i principali inquinanti (CO , CO_2 , PM_{10} e NO_x) sono stati calcolati relativamente al Comune di Potenza. La Tabella 3, a titolo di esempio, riporta i valori *hot emission factors* (fattori emissivi a caldo) stimati per le sole autovetture.

Tabella 3 – Fattori emissivi a caldo stimati per le auto

Sector	Subsector	Tech	COu	COv	COh	PMu	PMv	PMh	NOxu	NOxh	NOxr
Passenger Cars	Gasoline <1,4l	PRE ECE	36,98	22,50	15,95	0	0	0	1,65	2,05	1,99
		ECE 15/00-01	27,11	14,57	18,62	0	0	0	1,65	2,02	1,99
		ECE 15/02	23,07	9,22	8,26	0	0	0	1,50	2,91	1,90
		ECE 15/03	23,28	10,69	7,62	0	0	0	1,56	3,28	2,01
		ECE 15/04	13,94	6,28	4,38	0	0	0	1,56	2,77	1,94
		Euro I - 91/441/EEC	4,05	0,51	4,93	0	0	0	0,37	0,71	0,34
		Euro II - 94/12/EC	2,76	0,34	3,35	0	0	0	0,13	0,26	0,12
		Euro III - 98/69/EC	2,27	0,28	2,76	0	0	0	0,09	0,17	0,08
		Gasoline 1,4 - 2,0l	PRE ECE	36,98	22,50	15,52	0	0	0	1,88	3,13
	ECE 15/00-01		27,11	14,38	19,87	0	0	0	1,88	3,20	2,52
	ECE 15/02		23,07	9,22	9,32	0	0	0	1,69	3,66	2,15
	ECE 15/03		23,28	10,69	8,74	0	0	0	1,65	3,83	2,34
	ECE 15/04		13,94	6,28	4,54	0	0	0	1,86	3,81	2,53
	Euro I - 91/441/EEC		4,57	0,99	5,11	0	0	0	0,37	0,74	0,33
	Euro II - 94/12/EC		3,11	0,68	3,47	0	0	0	0,13	0,26	0,12
	Euro III - 98/69/EC		2,56	0,56	2,86	0	0	0	0,09	0,18	0,08
	Gasoline >2,0l		PRE ECE	36,98	22,50	16,08	0	0	0	2,31	5,75
		ECE 15/00-01	27,11	14,38	21,28	0	0	0	2,31	6,01	3,66
		ECE 15/02	23,07	9,22	9,32	0	0	0	1,91	4,10	2,43
		ECE 15/03	23,28	10,69	9,58	0	0	0	2,69	5,38	3,17
		ECE 15/04	13,94	5,27	5,01	0	0	0	2,24	4,58	2,64
		Euro I - 91/441/EEC	6,54	1,10	2,85	0	0	0	0,49	0,67	0,40
		Euro II - 94/12/EC	4,45	0,75	1,94	0	0	0	0,18	0,24	0,14
		Euro III - 98/69/EC	3,67	0,61	1,60	0	0	0	0,12	0,16	0,10
		Diesel >2,0l	Conventional	0,85	0,52	0,35	0,27	0,14	0,23	0,63	0,64
	Euro I - 91/441/EEC		0,73	0,17	0,33	0,09	0,04	0,11	0,90	0,80	0,52
	Euro II - 94/12/EC		0,73	0,17	0,33	0,09	0,04	0,11	0,90	0,80	0,52
	Euro III - 98/69/EC		0,73	0,17	0,33	0,07	0,03	0,08	0,69	0,62	0,40
	Diesel <2,0l	Conventional	0,85	0,49	0,35	0,27	0,14	0,25	0,96	1,09	0,72
		Euro I - 91/441/EEC	0,73	0,14	0,41	0,09	0,03	0,13	0,90	0,88	0,50
		Euro II - 94/12/EC	0,73	0,14	0,41	0,09	0,03	0,13	0,90	0,88	0,50
		Euro III - 98/69/EC	0,73	0,14	0,41	0,07	0,02	0,09	0,69	0,68	0,38
	LPG	Conventional	4,51	1,83	18,52	0	0	0	1,93	3,01	2,53
		Euro I - 91/441/EEC	1,98	1,28	6,07	0	0	0	0,40	0,35	0,29
		Euro II - 94/12/EC	1,35	0,87	4,13	0	0	0	0,14	0,13	0,10
		Euro III - 98/69/EC	1,11	0,72	3,40	0	0	0	0,09	0,08	0,07

Tali fattori di emissione, misurati in grammi per veicolo e per chilometro, consentono di effettuare dei confronti quantitativi tra le emissioni delle diverse categorie di veicoli, a loro volta differenziate per classi di età, tipo di alimentazione, cilindrata o portata, ciclo di guida e tipo di percorso. In particolare si osserva che il tipo di percorso può essere “a caldo” o “totale”, dove per totale si intende l'emissione calcolata dal modello sull'intero percorso comprendente la parte a freddo, a caldo e, nel caso dei COVNM, la quota evaporativa. Nel presente studio non sono stati presi in esame i composti organici volatili non metanici COVNM, per cui le emissioni evaporative non sono state

17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna

10-12 Settembre 2008

considerate nel computo “totale”. Per simulare il ciclo di guida urbano il modello COPERT è stato calibrato per un percorso medio di 12km alla velocità media di 25km/h. Su tale ciclo è stato considerato “a freddo” il 25% del percorso effettuato. A titolo di esempio, con riferimento alle sole autovetture, la Figura 3 riporta i fattori di emissione relativi all'inquinante CO totali e per percorrenza a caldo.

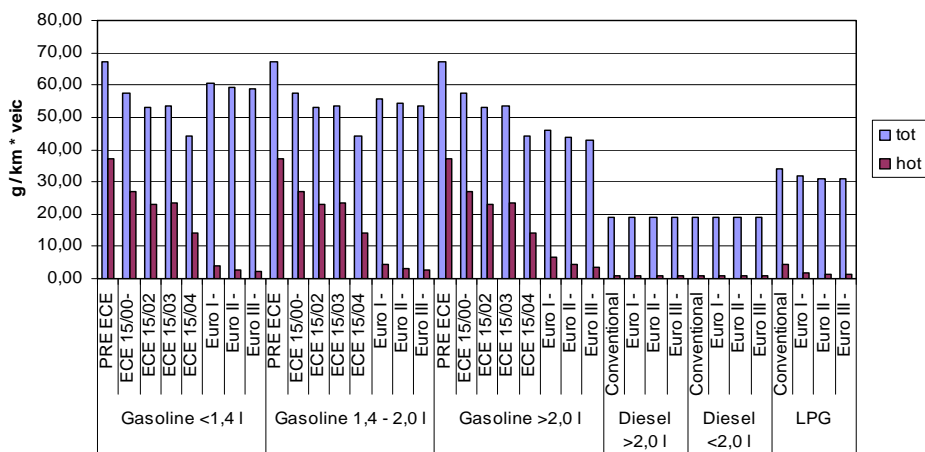


Figura 3 – Fattori di emissione CO totali e per percorrenza per le autovetture

La dispersione delle emissioni

Per la valutazione della distribuzione del carico inquinante proveniente dal settore dei trasporti sul territorio comunale è stato necessario effettuare una rappresentazione della rete stradale della città per mezzo del grafo semplificato di Figura 1, che considera le arterie stradali cittadine più importanti.

Per la stima del carico inquinante prodotto da ciascun tratto stradale è stato necessario calcolare e applicare fattori di emissione medi ponderati per percorrenza (espressi in $g \cdot km^{-1} \cdot veic^{-1}$) che tenessero conto del contributo di ciascuna categoria di veicoli sulle emissioni di ogni inquinante considerato. Tale contributo dipende essenzialmente da tre fattori caratteristici di ogni categoria veicolare:

- il fattore di emissione specifico, espresso in $g \cdot km^{-1} \cdot veic^{-1}$, relativo ad un determinato inquinante e per un certo ciclo di guida;
- la distanza media annua percorsa da ciascun veicolo, espressa in $km \cdot anno^{-1} \cdot veic^{-1}$, sul particolare ciclo di guida;
- il numero di veicoli circolanti nel comune di Potenza divisi per tipologia.

Per ogni inquinante e per il ciclo guida urbano è stato perciò determinato il fattore di emissione medio ponderato, sulla base dei fattori d'emissione a caldo, pari a 9,56, 3,20 e 0,17 $g \cdot km^{-1} \cdot veic^{-1}$ rispettivamente per gli inquinanti CO, NO_x e PM. I fattori di emissione medi ponderati per percorrenza vengono forniti anche dall'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), che ha realizzato inventari statisticamente rappresentativi della situazione nazionale e che possono essere utilizzati in simulazioni di “scenario”, per i quali sia nota la composizione del parco circolante e sia possibile

attribuire, a ciascuna categoria veicolare, i valori di percorrenza per ciclo di guida [6]. I valori dei fattori di emissione medi relativi al ciclo di guida urbano e agli inquinanti considerati, ottenuti per il comune di Potenza, si discostano di poco da quelli forniti dall'ANPA che risultano pari a 12,62, 3,11 e 0,26 g·km⁻¹·veic⁻¹ rispettivamente per gli inquinanti CO, NO_x e PM. Utilizzando le informazioni relative ai flussi di traffico orari e applicando i fattori di emissione ponderati è stato possibile determinare il carico inquinante prodotto da ogni segmento del grafo stradale, relativamente all'ora di punta 13.00-14.00. Le simulazioni modellistiche MOCAR, che riproducono la dispersione degli inquinanti ottenute con i dati di input (sorgenti e meteorologia) descritte nei paragrafi precedenti, permettono di descrivere i livelli di concentrazione dei diversi inquinanti presenti nel comune di Potenza e di confrontarli con i valori limite fissati dalla normativa vigente [1]. La ricostruzione modellistica produce un forte gradiente di concentrazione con i valori maggiori in vicinanza dell'asse stradale considerato; i valori del parametro tendono a diminuire molto velocemente all'aumentare della distanza dall'asse stradale stesso. I risultati possono essere riportati, in forma tabellare, oppure in modo più efficace, con curve di isoconcentrazione su supporto cartografico (Cfr. Figura 4). Con riferimento al monossido di carbonio nell'ora di punta la concentrazione oraria è risultata compresa nell'intervallo 0,1÷0,70 mg/m³ con valori elevati in corrispondenza dei principali incroci della rete stradale (viale dell'Unicef, corso Garibaldi, rione S. Rocco e piazza Vittorio Emanuele II). Ciò deriva dal fatto che essi rappresentano delle zone particolarmente critiche per questo inquinante, in quanto in tali incroci stradali confluiscono vie caratterizzate da traffico intenso e con fattori di emissione elevati per il CO. La città di Potenza presenta, infatti, uno sviluppo urbano fortemente condizionato dalle caratteristiche morfologiche del territorio e la sua struttura insediativa è suddividibile in due blocchi, la città antica e la periferia. Per questa particolare conformazione urbanistica il traffico locale si sposta da un capo all'altro della città, lungo direttrici di traffico principale sud – nord e est – ovest, che poi confluiscono negli incroci sopra citati.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata proposta una metodologia operativa finalizzata sia alla valutazione delle emissioni di inquinanti generate dal traffico stradale su scala comunale che, successivamente, alla determinazione della dispersione del carico inquinante generato nell'ambiente circostante. La metodologia implementata per la valutazione delle emissioni il modello COPERT 4, che si basa sull'elaborazione di un ampio insieme di parametri, che tengono conto delle caratteristiche generali del fenomeno e delle specifiche realtà di applicazione. La valutazione delle concentrazioni al suolo degli inquinanti emessi da trasporto stradale è stata a sua volta effettuata facendo ricorso all'impiego di un modello stazionario di media complessità, denominato MOCAR. L'applicazione della metodologia proposta ha consentito di individuare, attraverso una rappresentazione a curve isoconcentrazione, le aree più critiche del territorio comunale ovvero le aree in cui più elevato è il rischio che si verifichino episodi acuti di inquinamento atmosferico. La metodologia rende, altresì, possibile lo sviluppo delle simulazioni di scenario atte ad individuare le strategie più efficaci ai fini del contenimento dell'inquinamento atmosferico. In conclusione la positiva esperienza

17° Convegno Nazionale SIIV

Università Kore - Enna

10-12 Settembre 2008

maturata nel presente studio, consente agli Autori di auspicare l'applicazione della metodologia proposta anche in contesti territoriali di diversa entità e configurazione.

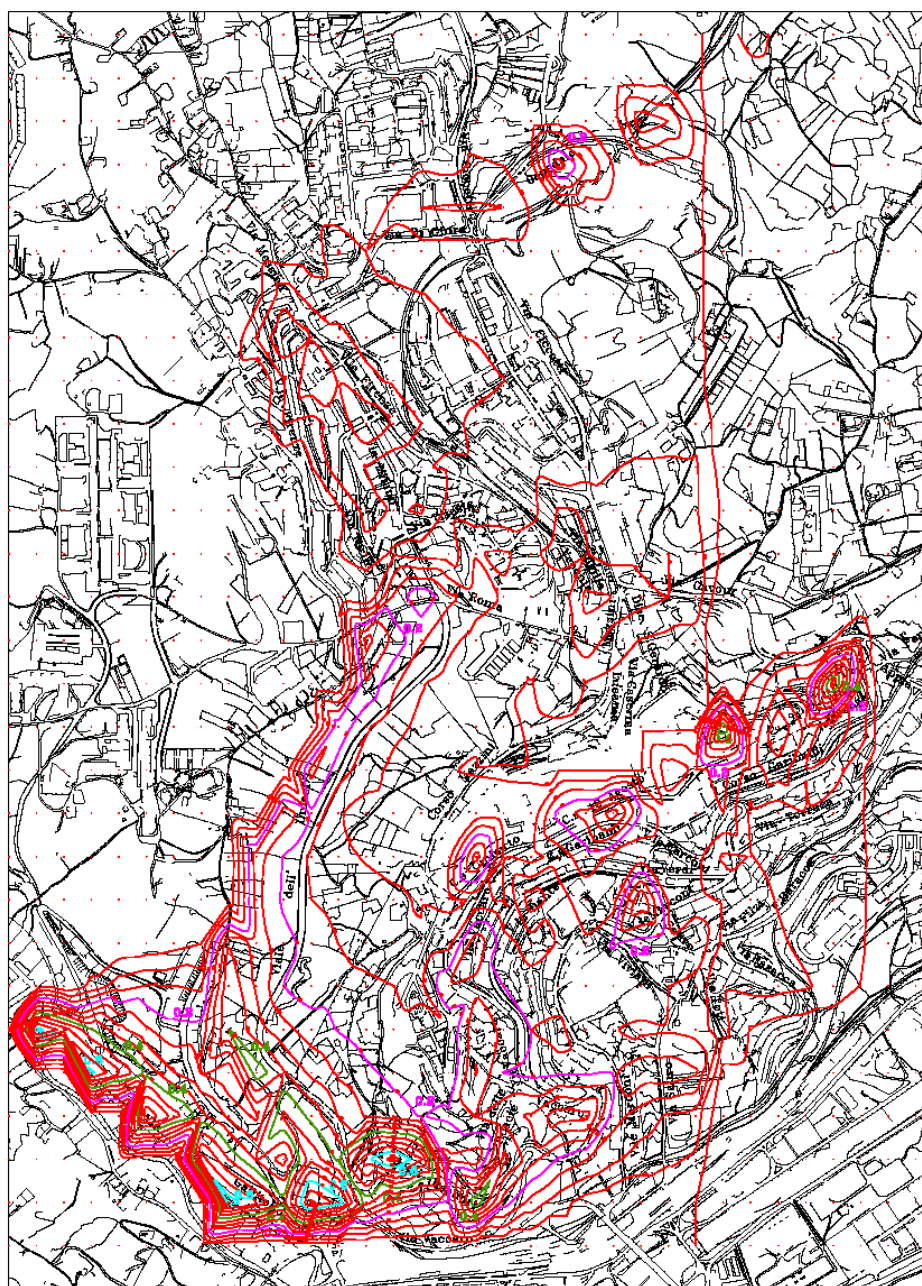


Figura 4 – Dispersione delle concentrazioni di CO

BIBLIOGRAFIA

- [1] NORMATIVA ARIA (2008): http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/Aria/Normativa_Aria/.
- [2] EMEP/CORINAIR Emission (2008): http://reports.eea.europa.eu/EMEP_CORINAIR4/en/page002.html
- [3] COPERT IV (2008): <http://lat.eng.auth.gr/copert/>.
- [4] COPERT IV USER'S MANUAL (2008): <http://lat.eng.auth.gr/copert/files/tech01.pdf>.
- [5] ARPAB (2006): "Annuario dei dati ambientali regionali-2006", Potenza, 2006.
- [6] APAT (2005): "La mobilità in Italia: indicatori su trasporti e ambiente-dati di sintesi – Anno 2005", 2005.
- [7] ARPAB (2004): "Annuario dei dati ambientali regionali-2004", Potenza, 2004.
- [8] R.Sozzi, (2004): "MOCAR modello per la Simulazione della Dispersione degli Inquinanti emessi dagli Autoveicoli", ARPA LAZIO, 2004.
- [9] MINISTERO DEI TRASPORTI (2003): "Conto Nazionale dei Trasporti -2003", Direzione Generale programmazione, organizzazione e coordinamento, 2003, Istituto Zecca dello Stato.
- [10] ACI (2003): Percorrenze medie annue dei veicoli, dati forniti ad ANPA su richiesta, sito web: SINAnet <http://www.sinanet.anpa.it/aree/atmosfera/emissioni/>.
- [11] APAT (2003): "Le emissioni atmosferiche da trasporto stradale in Italia dal 1990 al 2000".
- [12] M. Agostinacchio, S. Olita, (2003), "Sull'applicabilità di un modello diffusivo per la previsione delle concentrazioni di inquinanti da traffico veicolare in ambito urbano", Atti del XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. (Società Italiana Infrastrutture Viarie) - Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Padova 30-31 Ottobre 2003.
- [13] Agenzia Nazionale per la Prevenzione e l'Ambiente, (2001), "I modelli nella valutazione della qualità dell'aria".
- [14] Contaldi M., Ilacqua M. (2001), "Analisi dei fattori di emissione di CO₂ dal settore dei trasporti -Metodo di Riferimento IPCC, metodologia COPERT ed analisi sperimentali" - RTI AMB-EMISS 3/2001.
- [15] Agenzia Nazionale per la Prevenzione e l'Ambiente, "Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale", Serie Stato dell'ambiente, n. 12, 2000.
- [16] Contaldi M., De Lauretis R., Picini P. (2000): "Analisi e validazione di metodologie per il calcolo delle emissioni inquinanti dei trasporti", Rapporto Tecnico ANPA, Giugno 2000.
- [17] Ntziachristos L., Samaras Z. (1999): "COPERT III, Computer Programme to Calculate Emissions from Road Traffic – Methodology and Emission Factors", Final Draft, European Topic Centre on Air Emissions, Thessaloniki, 1999.