

Lo strumento GIS per la valutazione dell'inquinamento atmosferico da traffico urbano. Applicazione ad una zona critica della rete stradale genovese

E. MASSA, M. STAGI, A. NORDIO^(*), T. COSSO, B. FEDERICI^(**) & D. SGUERSO

DIMSET – Università degli Studi di Genova

^(*)annalisa.nordio@unige.it, ^(**)bianca.federici@unige.it

Sommario

A supporto delle decisioni di pianificazione urbana risulta importante disporre di strumenti adeguati alla conoscenza dei livelli di concentrazione delle sostanze inquinanti emesse dal traffico veicolare. Il presente lavoro vuole mettere in evidenza come l'utilizzo dello strumento GIS possa risultare utile ai fini descritti, ed addirittura innovativo se utilizzato non solo per georeferenziare e visualizzare informazioni ma anche come strumento che prenda in input tali dati, avvii procedure di calcolo sequenziali e semi-automatiche, e produca opportuni output che possano indicare linee di azione di tipo programmatico e/o di pianificazione.

Si è focalizzata l'attenzione sulle concentrazioni al suolo di due particolari inquinanti, il monossido di carbonio e gli ossidi di azoto, presenti in uno dei principali nodi di traffico della città di Genova, in prossimità del Mercato ortofrutticolo di C.so Sardegna.

Le caratteristiche del flusso di traffico circolante sono state rilevate in sito tramite l'ausilio di videocamera, ed utilizzate come input di modelli di emissione e dispersione degli inquinanti predisposti e tarati per la strada in esame; mediante procedure di calcolo avviate con il GIS free software e open source GRASS, si sono ottenute le mappe delle concentrazioni di CO e NOx per diversi scenari meteorologici ed in diverse condizioni di traffico.

Il confronto tra le mappe di concentrazione ottenute ed i valori limite imposti dalla normativa vigente ha consentito di mettere in luce le criticità esistenti.

In un'ottica di tipo territoriale, ad esempio a scala comunale, tale strumento GIS, interfacciato con un appropriato database, consentirebbe di formulare, mediante l'individuazione delle zone a più alta concentrazione di inquinanti, adeguate strategie di pianificazione atte alla mitigazione dei livelli di inquinamento atmosferico da traffico.

1. Introduzione

Le strette correlazioni tra condizioni ambientali e di salute della popolazione emerse da studi eseguiti congiuntamente dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (European Environmental Agency – EEA) e dal Centro Europeo per l'Ambiente e la Salute (European Centre for Environment and Health/World Health Organization - Eceh/Who) individuano nell'inquinamento atmosferico dovuto alle emissioni in atmosfera uno dei maggiori responsabili delle conseguenze sulla salute dell'uomo. Considerando che la qualità delle emissioni in atmosfera è in stretta relazione con le tecnologie di combustione, in ambito comunitario sono stati individuati cinque settori quali principali fonti di inquinamento atmosferico, di seguito riportati in ordine di incidenza crescente:

- produzione di energia;
- trasporto veicolare;
- produzione industriale;

- agricoltura;
- altri.

Dai primi tre settori, ossia energia, industria e trasporti, si origina pressoché il totale delle emissioni in atmosfera, come evidenziato dalla tabella 1 (tratta dal sito www.apat.gov.it)

<i>Emissioni</i>	<i>Energia</i>	<i>Industria</i>	<i>Trasporti</i>
CO ₂	33%	24%	24%
CO	ND	ND	69%
NO _x	< 20%	13%	63%
COVNM	ND	37%	47%
SO ₂	60%	25%	ND
Particolati	40-55%	15-30%	10-25%

Tabella 1 - Suddivisione degli inquinanti per settori di emissione (Fonte: EEA).

Si noti come i trasporti stradali costituiscono il macro settore maggiormente responsabile delle emissioni di NO_x, COVNM (composti organici volatili diversi dal metano) e CO. In particolare nelle aree urbane i trasporti sono responsabili di oltre il 60% delle emissioni di NO_x e COVNM e complessivamente di oltre il 90% delle emissioni di CO e CO₂ [2].

Lo sviluppo urbano in aree densamente urbanizzate quali quella genovese non ha potuto soddisfare le sempre maggiori esigenze dei trasporti su gomma, producendo soventi situazioni di congestionamento durante le ore di punta, soprattutto in corrispondenza delle arterie principali della città.

Tali gravi problemi di viabilità possono talvolta comportare un superamento dei limiti di concentrazione degli inquinanti imposti dalla normativa vigente, specialmente in condizioni meteorologiche sfavorevoli al ricambio d'aria agli strati atmosferici bassi.

I provvedimenti più urgenti da adottare devono dunque comprendere una razionalizzazione e ottimizzazione del sistema complessivo dei trasporti per le reti attuali, in funzione anche delle problematiche di tipo ambientale [3, 4, 6, 11].

A supporto delle decisioni per una corretta pianificazione urbana risulta importante disporre di uno strumento quali i GIS (Geographic Information System) in grado di integrare la conoscenza del territorio con informazioni distribuite di diversa natura [10, 18]. Un Sistema Informativo Geografico è infatti un insieme organizzato di procedure, metodi matematici, risorse umane e materiali (dati, software) utilizzato per memorizzare, elaborare e visualizzare informazioni geografiche spazialmente distribuite di origine eterogenea, risultando così un potente ed importante strumento di supporto alla pianificazione ed alla gestione del territorio.

Nel presente lavoro è stato utilizzato il GIS GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), software libero e del quale è disponibile il codice sorgente (Free e Open Source Software). La possibilità di accedere e modificare il codice sorgente permette di implementare modelli di calcolo specifici per applicazioni d'interesse, come nel caso in esame; mentre il fatto che sia libero ne facilita la distribuzione e diffusione gratuita.

Le sue funzionalità vanno dall'analisi spaziale alla modellistica ambientale, dalla generazione di mappe tematiche all'integrazione con DBMS, dalla visualizzazione 2D e 3D di dati spazialmente distribuiti, alla gestione e memorizzazione di dati.

Da una analisi della rete stradale genovese [1, 8, 23], uno dei rami meno "sostenibili" dal punto di vista dell'inquinamento risulta essere C.so Sardegna, strada attraversante i popolosi quartieri di S. Fruttuoso

e di Marassi, particolarmente trafficata a causa della sua posizione centrale di collegamento oltre che per la presenza del mercato ortofrutticolo a servizio dell'intera città, verso il quale ogni giorno converge un importante flusso di veicoli pesanti.

Tale strada, costituita da quattro corsie, due per ogni senso di marcia, presenta una particolarità proprio a causa del mercato: nella fascia oraria del mattino, in particolare fino alle ore 11, le due corsie in direzione S-N vengono chiuse al traffico veicolare nel tratto immediatamente adiacente al mercato per consentire lo svolgimento delle operazioni connesse alle attività di carico e scarico della merce; il traffico in tal senso di marcia viene quindi interamente deviato nella corsia interna normalmente riservata al senso di marcia opposto (fig. 1). La capacità della strada risulta pertanto dimezzata nel tratto esaminato riducendosi ad una corsia per senso di marcia.

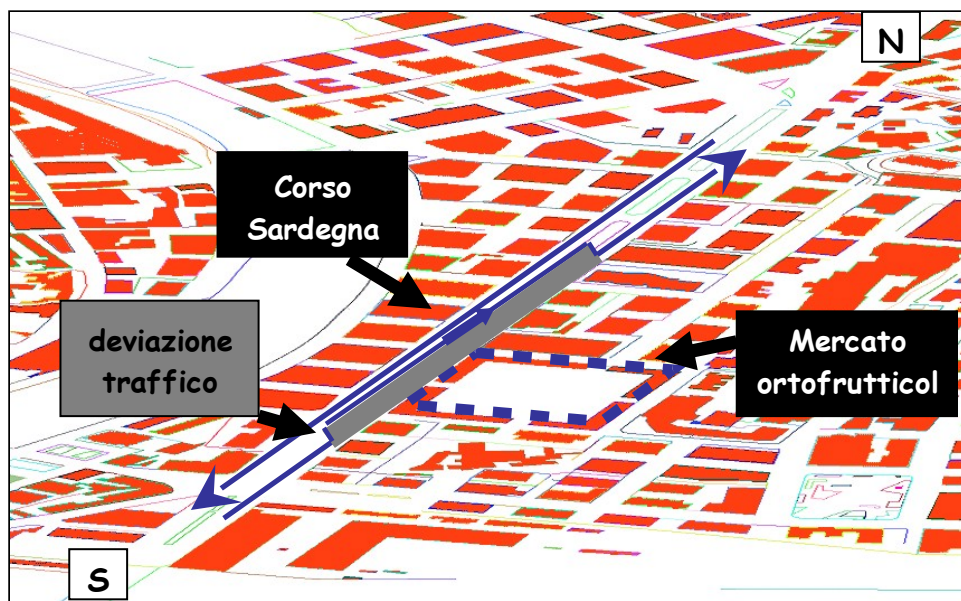


Figura 1 – Schematizzazione della deviazione del flusso di Corso Sardegna.

Nel presente lavoro si vogliono analizzare per la strada in esame, con particolare riguardo al tratto critico appena descritto, le concentrazioni al suolo di due inquinanti, il monossido di carbonio CO e gli ossidi di azoto NOx, al fine di evidenziare eventuali superamenti dei Limiti Normativi di Qualità dell'Aria, imposti dal D.Lgs n. 351 del 04/08/1999.

Si richiamano pertanto in primis alcuni modelli teorici ed il modello di analisi adattato alla realtà geometrica e di traffico di Corso Sardegna utilizzati per l'analisi dell'inquinamento atmosferico da traffico urbano (§ 2 e 3). Vengono quindi descritte le fasi operative del lavoro a partire dalla rilevazione in sito del flusso di traffico, la determinazione della velocità media dei veicoli circolanti, il calcolo dei fattori di emissione pesati e delle relative immissioni fino all'ottenimento delle mappe delle concentrazioni per diversi scenari meteorologici ed in diverse condizioni di traffico (§ 4). Infine, viene presentato il confronto eseguito tra le mappe di concentrazione ottenute ed i valori limite imposti dalla normativa vigente in materia: da tale confronto è stato possibile evidenziare le criticità esistenti, fornendo così uno strumento atto alla verifica preventiva delle differenti ipotesi di progetto, per una simulazione delle stesse.

2. Modelli per l'analisi dell'inquinamento atmosferico da traffico

Lo schema metodologico completo che tiene conto delle relazioni tra le diverse tipologie di modelli per l'analisi dell'inquinamento atmosferico da traffico, alla base del presente lavoro, è rappresentato in figura 2. Si premette che la concentrazione degli inquinanti in un punto generico dell'area in esame è schematizzabile come somma di un *contributo locale*, dovuto al traffico che fluisce nelle immediate vicinanze (rete locale), e di un contributo di fondo, detto anche *contributo d'area*, dovuto al traffico presente nell'intera area.

Ciascun contributo viene calcolato utilizzando i seguenti modelli (fig. 2):

- il *modello di traffico* permette di calcolare la velocità media dei flussi veicolari, nota la geometria della rete viaria in forma di grafo e la matrice Origine-Destinazione riportante il traffico giornaliero medio per diversi tronchi stradali in esame;
- il *modello di emissione* fornisce i fattori emissivi, ossia la quantità di inquinante emessa da ciascuna categoria di veicoli nell'unità di tempo o di spazio, in funzione del parco veicolare, dei flussi calcolati dal modello di traffico, e delle condizioni ambientali (umidità, temperatura, ...);
- il *modello di dispersione (o diffusione)* permette di calcolare le concentrazioni d'inquinante nell'atmosfera, noti i fattori emissivi e le condizioni meteorologiche (vento, pioggia, ...).

I modelli di emissione e dispersione sono entrambi compresi dal termine *modelli di impatto*, i quali descrivono in generale l'impatto dei fenomeni inquinanti nell'ambiente circostante.

Si noti che, per il calcolo del contributo locale e del contributo d'area, tali modelli si riferiranno a scale spaziali e temporali diverse

Un approccio completamente differente alla simulazione dei fenomeni connessi all'inquinamento atmosferico da traffico veicolare in ambito urbano, consiste nell'utilizzo di *modelli di regressione*, illustrati nel paragrafo 2.3.

Nei paragrafi seguenti si analizzano in sintesi le peculiarità di ciascun modello.

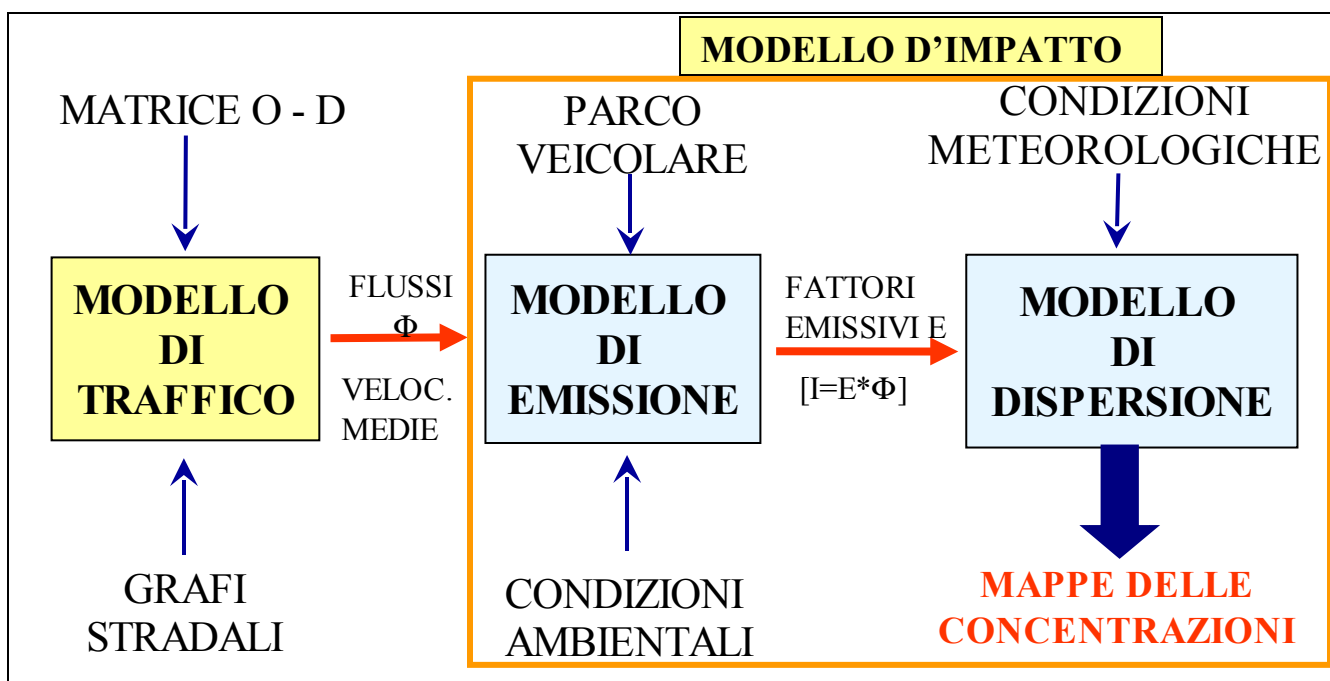


Figura 2 - Schema dei modelli necessari alla valutazione dell'inquinamento atmosferico da traffico.

2.1 I modelli di traffico

I modelli di traffico si basano sulla rappresentazione della rete stradale in forma di grafo, ossia costituita da *archi* (tratti stradali omogenei) e *nodi* (intersezioni). Lo studio può avvenire a diverse scale [5, 21], considerando, ad esempio, la sola viabilità primaria, oppure anche le strade di scorrimento, di quartiere e locali; il livello di dettaglio dipende dalla precisione del modello ricercata, dall'ampiezza dell'area in esame, e dalla categoria di strade interessate dall'analisi. L'offerta delle infrastrutture stradali è definita quantitativamente dalle caratteristiche geometriche degli elementi lineari (dimensione e composizione della carreggiata, sviluppo planimetrico ed andamento altimetrico) e dalle caratteristiche delle intersezioni. L'offerta funzionale di ciascun elemento costitutivo della rete stradale è espressa attraverso una *curva di deflusso* che correla la velocità del flusso veicolare al volume del flusso stesso; un altro parametro caratterizzante gli archi stradali è il tempo di percorrenza.

I modelli di traffico comprendono a loro volta:

- un *modello di deflusso*, che fornisce le condizioni di moto medie dei veicoli, nell'unità di tempo o di spazio, in funzione delle caratteristiche del moto (velocità, accelerazione, sosta, ecc.);
- un *modello di code*, che consente il calcolo delle lunghezze delle code e dei tempi medi di attesa nei punti di accesso controllati da semaforizzazione o da diritto di precedenza.

I modelli di coda possono implementare:

- *modelli di microsimulazione* (si veda il software TRIPS della Citilabs, www.uagworld.com/trips/);
- *modelli analitici* (i più noti sono i modelli di Wardrop [24], di Webster [25] e dell'Highway Capacity Manual [23]);
- *modelli ad analogia idraulica*.

2.2 I modelli di impatto

Come già evidenziato, i modelli d'impatto comprendono i *modelli di emissione e di dispersione*, descrivendo in generale l'impatto del traffico sui fenomeni inquinanti dell'ambiente circostante [19].

I *modelli di emissione* consentono di calcolare i fattori di emissione [9], ossia la quantità di sostanze inquinanti emesse dai veicoli nelle differenti condizioni operative. Il valore può essere riferito alla distanza percorsa [$\text{g km}^{-1} \text{veic.}^{-1}$], al tempo di funzionamento [$\text{g h}^{-1} \text{veic.}^{-1}$], ad un particolare ciclo di guida [$\text{g test}^{-1} \text{veic.}^{-1}$].

I modelli di emissione presenti in letteratura si differenziano per il grado di disaggregazione nella rappresentazione dei parametri a cui le emissioni possono essere ricondotte. I modelli aggregati utilizzano condizioni medie del parco veicolare in una data epoca, mentre i modelli disaggregati considerano in forma appunto disaggregata il contributo alle emissioni dei veicoli per differenti categorie, ad esempio funzione dell'anno di immatricolazione. I modelli di emissione più diffusi in letteratura sono di tipo disaggregato.

La simulazione del fenomeno dell'emissione di inquinanti atmosferici da parte dei veicoli transitanti lungo una rete viaria può essere condotta attraverso due differenti approcci analitici. Il primo, di tipo *dinamico*, consiste nella costruzione di modelli matematici che esprimano le emissioni di una data sostanza in funzione del tempo; tale approccio porta alla definizione di un modello di emissione detto di *microsimulazione* o "*modale*", basato su valori istantanei di velocità ed accelerazione di un dato tipo di veicolo. Attraverso il secondo approccio, di tipo *statico*, si effettua invece la simulazione delle emissioni medie in un intervallo temporale definito. Quest'ultimo metodo di valutazione, essendo coerente con i modelli di pianificazione dei trasporti attualmente più diffusi, è quello più utile ad una valutazione complessiva del funzionamento del sistema di trasporto in riferimento all'inquinamento

dell'aria. Esso, infatti, permette di mettere in relazione diretta le variabili che descrivono il comportamento medio del traffico con quelle che esprimono i conseguenti livelli di emissione attraverso la velocità media dei flussi veicolari.

Un modello di simulazione delle emissioni inquinanti prodotte dai veicoli stradali consente la determinazione dell'entità delle emissioni in funzione delle molteplici variabili da cui esse sono influenzate.

Si riportano alcuni fattori che influenzano le tipologie e le entità delle emissioni inquinanti, raggruppati nei seguenti parametri:

- caratteristiche costruttive del veicolo, distinte in caratteristiche *generali* del veicolo (peso a vuoto, efficienza aerodinamica, ecc.) e caratteristiche *dell'apparato di propulsione* (tipo di motore, tipo di combustibile utilizzato, caratteristiche del fluido evolvente, tipo di dispositivi di controllo delle emissioni, caratteristiche di cilindrata e potenza);
- stato della meccanica del veicolo (stato delle usure, manutenzioni);
- condizioni operative del veicolo in un flusso di traffico (relative alla dinamica del motore ed allo stato termodinamico del fluido evolvente in fase di combustione);
- condizioni dell'ambiente esterno (stato dell'aria esterna, caratteristiche geometriche della strada, scabrezza della superficie stradale, condizioni di traffico, tipo di uso del veicolo).

In realtà, dato il notevole numero di variabili in gioco, si tende a fissare alcune di esse; le principali variabili possono pertanto restringersi solo a quelle relative alla dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione. Le emissioni, relative a ciascuna categoria veicolare ed alle condizioni di riferimento fissate, sono dette *emissioni di base*, note una volta fissato lo stato del veicolo. Recenti norme su collaudi e controlli emissivi favoriscono tale assunzione.

Il modello di emissione maggiormente applicato in Europa è il Modello COPERT [20], descritto nel paragrafo successivo.

I modelli di dispersione (o diffusione) comprendono:

- *un modello meteorologico*, per il calcolo dei parametri atmosferici richiesti dai modelli di dispersione, a partire dai dati meteorologici di routine [7, 22];
- *un modello di dispersione per il calcolo del contributo locale*, cioè originato dalle emissioni nelle strade adiacenti il punto di interesse, che tenga conto delle condizioni di traffico sulla rete locale, e delle caratteristiche plano-volumetriche degli edifici (es. strade a canyon); poiché un elevato grado di dettaglio risulta molto oneroso in termini computazionali, il modello viene in genere applicato solo ad aree di limitata estensione;
- *un modello di dispersione per il calcolo del contributo d'area*, cioè per la determinazione del contributo originato dalle aree più distanti; questo contributo cresce di importanza con le dimensioni dell'area urbana.

Sulla base del tipo di descrizione del moto adottata, i modelli di diffusione si distinguono in:

- *euleriani*
- *lagrangiani*

I primi adottano un sistema di riferimento fisso e determinano sia il campo delle velocità del vento che il campo della concentrazione degli inquinanti. Sono utilizzati entro ampie scale spazio-temporali di riferimento e schematizzano il volume atmosferico sopra l'area oggetto di studio mediante una struttura cellulare tridimensionale (3D). Tra i modelli euleriani si ritrovano quelli cosiddetti *a box* (e *a multi-box*) che schematizzano tale volume atmosferico in un'unica cella, rappresentante solitamente un'intera area urbana. Essi sono poco adatti a descrivere fenomeni locali.

I modelli lagrangiani fanno riferimento ad un volume di atmosfera, tipicamente un parallelepipedo, che viene seguito nei suoi spostamenti per effetto del vento. In questi modelli le traiettorie di un elevato numero di particelle inquinanti sono simulate stocasticamente, e da queste si risale alle concentrazioni

medie nei punti di interesse. Tale approccio, data la sua complessità, risulta poco utilizzato nella valutazione dell'inquinamento da traffico.

I modelli usualmente preferiti nello studio dell'inquinamento da traffico sono infine i *modelli di tipo gaussiano*, che costituiscono una particolarezzazione dei modelli euleriani, sotto opportune ipotesi limitative (stazionarietà delle emissioni e delle condizioni meteorologiche, non reattività degli inquinanti, assenza di ostacoli alla dispersione, quali, suolo e edifici).

2.2.1. Il modello di emissione COPERT

Il modello COPERT (*COmputer Programme to calculate Emissions from Road Traffic*) è un modello di emissione non modale basato su un ampio insieme di parametri che tengono conto delle caratteristiche generali del fenomeno e delle specifiche realtà di applicazione [20]. Tale metodologia è stata indicata dall'EEA come lo strumento da utilizzare per la stima delle emissioni da trasporto stradale nell'ambito del programma *Corinair* [14] per la realizzazione dell'inventario nazionale delle emissioni (fig. 3).

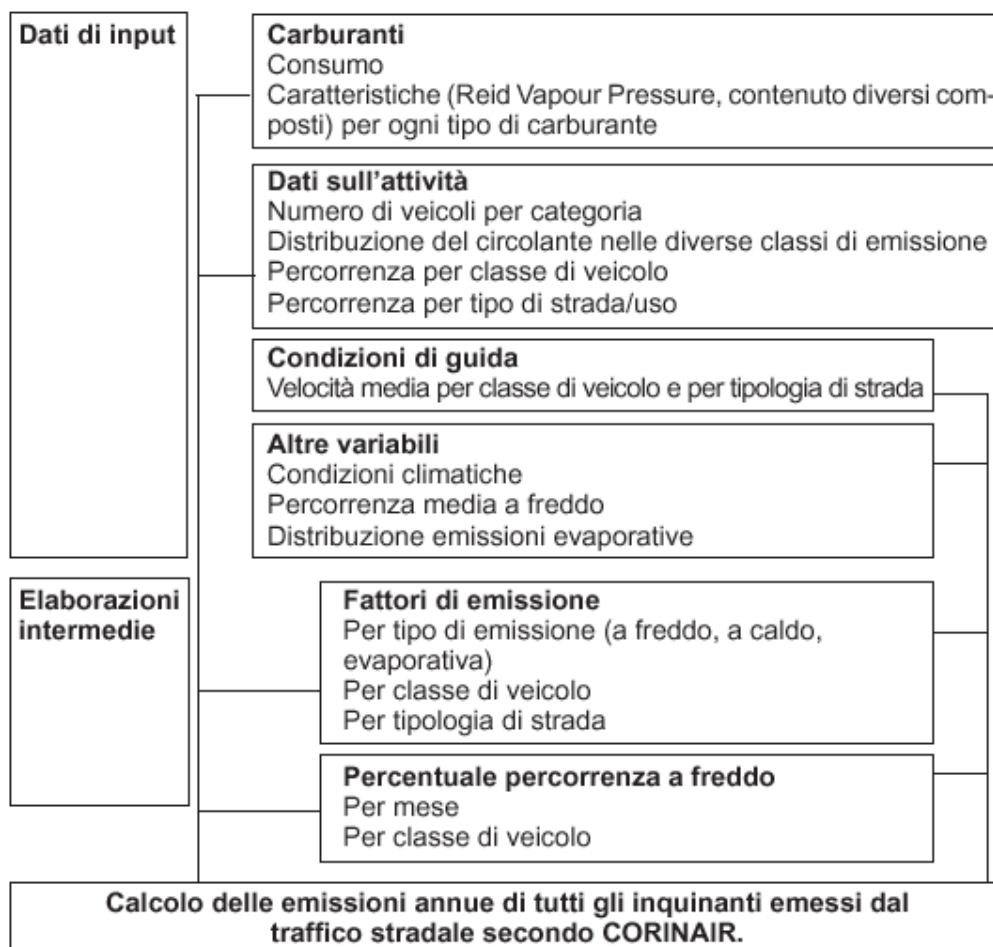


Figura 3: Diagramma di flusso del Programma COPERT per il calcolo delle emissioni annue di tutti gli inquinanti emessi dal traffico stradale secondo il progetto Corinair [14].

Le emissioni da veicoli su strada si possono esprimere come la somma di tre tipologie di contributi:

$$E = E_{hot} + E_{cold} + E_{evap} \quad (1)$$

dove:

- E_{hot} rappresentano le *emissioni a caldo*, ossia le emissioni dei veicoli i cui motori hanno raggiunto la loro temperatura di esercizio;
- E_{cold} è il termine che tiene conto dell'effetto delle *emissioni a freddo*, ossia delle emissioni durante la fase di riscaldamento del veicolo;
- E_{evap} sono le *emissioni evaporative* costituite dai soli COVNM (composti organici volatili diversi dal metano) rilevanti per i soli veicoli a benzina.

Il modello COPERT considera le informazioni relative al parco circolante suddiviso per *tipologia di veicolo* (autovetture passeggeri, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti, ciclomotori e motoveicoli), tipo di *combustibile* utilizzato (benzina, gasolio, G.P.L.), *classe di anzianità*, in relazione alle normative europee di introduzione di dispositivi per la riduzione delle emissioni, *classe di cilindrata* (per le autovetture) o di *peso complessivo* (per i veicoli commerciali); a ciascuna classe dei veicoli così ripartiti sono associate altre informazioni relative alle condizioni di guida quali le *percordanze medie annue* e le *velocità medie* distinte in base al *ciclo di guida* ovvero alla tipologia di percorso effettuato (urbano, extraurbano, autostradale).

Ad ogni classe e per ciascun inquinante sono associate delle funzioni di stima delle emissioni e dei consumi dipendenti dalla velocità. Tali funzioni rappresentano delle *curve medie di emissione* e di *consumo di carburante* ricavate da misure di emissioni per diverse tipologie e marche di veicoli e si riferiscono a prove realizzate in vari paesi europei, su una varietà di cicli di guida urbani ed extraurbani, inclusi quelli previsti dalle varie normative europee. Allo stato attuale, non sono ancora disponibili studi completi che consentano di utilizzare specifiche curve nazionali.

Nella tabella 2 è riportata la suddivisione dei veicoli che è richiesta dal programma COPERT: autovetture, veicoli commerciali leggeri, mezzi pesanti, autobus, ciclomotori e motocicli. Ciascuna categoria è suddivisa in diverse classi, definite sulla base del carburante utilizzato e della potenza del motore. Quest'ultima variabile per le autovetture è rappresentata dalla cilindrata, per i veicoli commerciali è espressa dalla portata lorda e per gli altri veicoli dalla destinazione d'uso. Per ognuna delle classi, il parco circolante è distribuito per gruppi di anzianità corrispondenti alla normativa sulle emissioni in vigore alla data di prima immatricolazione, ai quali è applicabile, quindi, lo stesso fattore di emissione.

Da queste considerazioni essenziali appare evidente come per utilizzare correttamente il modello si debbano fornire numerose informazioni in realtà non sempre disponibili in Italia nel dettaglio necessario. Risulta quindi indispensabile ricostruire e stimare alcuni di questi dati, attraverso le informazioni di base disponibili presso le fonti censite [12, 13].

2.3 I modelli di regressione

La simulazione dei fenomeni connessi all'inquinamento atmosferico da traffico veicolare in ambito urbano può essere condotta, in via semplificata, attraverso i *modelli di regressione*. Questi sono determinati a partire dai dati di traffico e di concentrazione delle sostanze inquinanti, rilevati mediante le rispettive reti di monitoraggio opportunamente distribuite sul territorio.

Un'analisi di questo tipo è rivolta essenzialmente alla determinazione delle relazioni esistenti tra i parametri del traffico e delle concentrazioni di inquinanti in riferimento ad una singola arteria stradale;

generalmente è mirata a descrivere una realtà stradale specifica, i cui risultati non sono riferibili a priori ad altri archi urbani simulati. È strategia comune però individuare opportuni coefficienti sperimentali validi per differenti tipologie di strade, le cui valutazioni solitamente avvengono tramite regressione lineare basata sul criterio di stima dei minimi quadrati, senza pertanto tenere conto degli aspetti intermedi del processo inquinante.

Categoria veicolo	Classe	Normativa di emissione	Categoria veicolo	Classe	Normativa di emissione
Automobili	Benzina <1,4l	PRE ECE ECE 15/00-01 ECE 15/02 ECE 15/03 ECE 15/04 Improved Conv. Open Loop Euro I - 91/441/EEC Euro II - 94/12/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005	Veicoli commerciali leggeri	Gasolio <3,5t	Convenzionali Euro I - 93/59/EEC Euro II - 96/69/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005
	Benzina 1,4 - 2,0l	PRE ECE ECE 15/00-01 ECE 15/02 ECE 15/03 ECE 15/04 Improved Conv. Open Loop Euro I - 91/441/EEC Euro II - 94/12/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005	Veicoli Pesanti	Benzina >3,5t	Convenzionali
	Benzina >2,0l	PRE ECE ECE 15/00-01 ECE 15/02 ECE 15/03 ECE 15/04 Euro I - 91/441/EEC Euro II - 94/12/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005		Gasolio <7,5t	Convenzionali Euro I - 91/542/EEC Stage I Euro II - 91/542/EEC Stage II Euro III - COM(97) 627 Euro IV - COM(1998) 776 Euro V - COM(1998) 776
	Gasolio <2,0l	Convenzionali Euro I - 91/441/EEC Euro II - 94/12/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005		Gasolio 7,5 - 16t	Convenzionali 91/542/EEC Stage I 91/542/EEC Stage II Euro III - COM(97) 627 Euro IV - COM(1998) 776 Euro V - COM(1998) 776
	Gasolio >2,0l	Convenzionali Euro I - 91/441/EEC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005		Gasolio 16-32t	Convenzionali 91/542/EEC Stage I 91/542/EEC Stage II Euro III - COM(97) 627 Euro IV - COM(1998) 776 Euro V - COM(1998) 776
	GPL	Convenzionali Euro I - 91/441/EEC Euro II - 94/12/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005		Gasolio >32t	Convenzionali 91/542/EEC Stage I 91/542/EEC Stage II Euro III - COM(97) 627 Euro IV - COM(1998) 776 Euro V - COM(1998) 776
	2 Tempi	Convenzionali	Autobus	Bus urbani	Convenzionali 91/542/EEC Stage I 91/542/EEC Stage II Euro III - COM(97) 627 Euro IV - COM(1998) 776 Euro V - COM(1998) 776 Euro II - 94/12/EC
	Benzina <3,5t	Convenzionali Euro I - 93/59/EEC Euro II - 96/69/EC Euro III - 98/69/EC Stage 2000 Euro IV - 98/69/EC Stage 2005	Ciclomotori	Bus da turismo	Convenzionali 91/542/EEC Stage I 91/542/EEC Stage II Euro III - COM(97) 627 Euro IV - COM(1998) 776
	Veicoli commerciali leggeri		Motocicli	<50cm ³	Euro V - COM(1998) 776 Convenzionali 97/24/EC Stage I 97/24/EC Stage II
				2 Tempi >50cm ³	Convenzionali 97/24/EC
			4 Tempi 50 - 250cm ³	Convenzionali 97/24/EC	
			4 Tempi 250 - 750cm ³	Convenzionali 97/24/EC	
			4 Tempi >750cm ³	Convenzionali 97/24/EC	

Tabella 2: Autoveicoli per categoria, fonte di alimentazione, classe di cilindrata e peso, classificati secondo le norme di emissione COPERT III [20]

3. Descrizione del modello di analisi applicato alla realtà urbana genovese

La metodologia procedurale utilizzata nel presente lavoro può essere così descritta:

- 1 - individuazione della/delle arterie stradali (C.so Sardegna) e delle sostanze inquinanti (CO e NOx) da prendere in esame e definizione delle ipotesi teoriche di partenza relative ai fenomeni di traffico, di emissione e di diffusione;
 - 2 - acquisizione dei dati di traffico relativi ai tronchi stradali considerati, unitamente alle condizioni meteo-climatiche generali interessanti l'intera area urbana;
 - 3 - applicazione di un opportuno modello di deflusso (all'interno del modello di traffico) che descriva, in termini sufficientemente realistici, il parametro rappresentato dalla velocità media dei veicoli al variare dei veicoli circolanti;
 - 4 - calcolo dei fattori di emissione pesati, per ogni inquinante dell'aria considerato, in funzione della velocità media tramite il modello di emissione;
 - 5 - calcolo delle immissioni per unità di tempo e per unità di lunghezza in corrispondenza del tronco stradale in esame, per ogni singola sostanza inquinante considerata;
 - 6 - applicazione di un modello di dispersione semplificato mediante l'utilizzo di alcune relazioni previsionali esprimenti le concentrazioni previste per ogni sostanza inquinante considerata, in funzione delle condizioni meteo-climatiche generali; tali relazioni sono ottenute mediante analisi di regressione di tipo esponenziale;
 - 7 - elaborazione di mappe tematiche in grado di fornire previsioni sui livelli di inquinamento.
- Si riporta di seguito descrizione più dettagliata delle suddette fasi.

1 - Come già illustrato nel paragrafo introduttivo, l'area oggetto di studio è l'arteria stradale di C.so Sardegna in Genova, mentre le sostanze inquinanti su cui si è concentrata l'attenzione sono CO e NOx. Al fine di determinare le tratte omogenee in cui suddividere la strada, nel luglio 2005 è stata effettuata una campagna di rilevamento delle caratteristiche geometriche e dei dati di traffico relativi a C.so Sardegna. Sono stati così individuati 12 tratti, 6 per senso di marcia, all'interno dei quali si ritiene che il flusso di traffico si mantenga pressoché costante.

2 - In corrispondenza di ognuno di questi tratti, è stata valutata l'entità del flusso mediamente transitante in fasce orarie stabilite, corrispondenti a 3 situazioni tipo: mattino, pomeriggio, sera. In particolare, tramite l'impiego di videocamera, sono stati registrati i veicoli transitanti sulla corsia in un intervallo di tempo pari ad un'ora. Le riprese sono state effettuate nelle fasce orarie 8-9 (mattino), 13-14 (pomeriggio) e 19-20 (sera), in corrispondenza dei diversi tratti individuati. Per ogni ripresa oraria effettuata si è valutato il flusso di traffico medio corrispondente [veicoli/ora] che costituisce il primo parametro di input del modello da utilizzare per la creazione delle mappe di concentrazione degli inquinanti considerati nel presente studio.

Si evidenzia inoltre come nel computo dei veicoli si sia tenuto conto dell'alta percentuale di ciclomotori transitanti, assegnando un fattore di conversione 1: 3, ipotizzando cioè che 3 veicoli su due ruote corrispondano ad 1 autoveicolo, come suggerito in letteratura per l'analisi dei valori medi di emissione.

I dati sulle concentrazioni, necessari per un confronto finale con le simulazioni ottenute, sono stati ricavati dalla centralina di rilevamento ed analisi della qualità dell'aria posta a circa metà della lunghezza della strada stessa.

3 - Ai fini della determinazione della velocità media V_m dei flussi veicolari, è stata utilizzata un'espressione a doppia aliquota, funzione della velocità media, al netto dei tempi di attesa in corrispondenza delle semaforizzazioni, e del tempo medio di attesa in corrispondenza degli impianti

semaforici. La prima viene calcolata mediante il modello di deflusso di Festa e Nuzzolo tarato opportunamente sulla realtà di C.so Sardegna [15, 16, 17], mentre per il secondo si ricorre al metodo dell'H.C.M. (Highway Capacity Manual) [23], con opportune ipotesi.

Il modello di deflusso risultante è, in conclusione, esprimibile in funzione della lunghezza della strada (L), della larghezza utile (Lu), della pendenza media (P), del numero di semaforizzazioni (Ns), consentendo di determinare la velocità media V_m dei veicoli in funzione del solo flusso di traffico ϕ .

Dunque il modello di deflusso così ottenuto [17], tarato su Corso Sardegna (L=1170 m, Lu=7 m, P=0.84 %, Ns= 4), è espresso dalla seguente relazione:

$$V_m = 4212 / \left(4212 \frac{1}{44.49 - 0.108 \cdot 10^{-5} \phi^2} + 22.05 \frac{1}{1 - 0.000272 \phi} + 0.000121 \phi^2 (0.000419 \phi - 1 + \sqrt{(0.000419 \phi - 1)^2}) \right) \quad (2)$$

4 - Per il calcolo dei fattori di emissione si fa riferimento ad un approccio di tipo statico (§ 2.2) che rende molto più semplice e veloce il procedimento.

Si determina cioè per ciascun inquinante un unico fattore di emissione funzione della velocità media appena calcolata, che tenga conto sia della composizione sia dell'età del parco veicolare (dati Automobile Club Italiano - A.C.I.).

Il calcolo dei fattori di emissione E_n pesati per l'inquinante considerato viene determinato [20] utilizzando l'espressione:

$$E_n = \sum_{i=n-j}^n e_{ni} f_{ni} \quad \left[\text{g km}^{-1} \text{ veic.}^{-1} \right] \quad (3)$$

in cui:

n è l'anno in cui viene effettuata la simulazione;

i rappresenta uno dei j anni precedenti ad n , ossia l'anno di produzione del veicolo;

e_{ni} è il fattore medio di emissione per un veicolo prodotto nell'anno i riferito all'anno n ;

f_{ni} è la frazione dell'intero parco veicolare circolante costituita dai veicoli prodotti nell'anno i riferita all'anno n considerato.

Sostituendo nella sommatoria i valori dei diversi parametri e operando opportune semplificazioni si ottengono per i due inquinanti considerati le seguenti relazioni:

$$E_{CO} = 176.36 V^{-0.8351} \quad \left[\text{g km}^{-1} \text{ veic.}^{-1} \right] \quad (4)$$

$$E_{NO_x} = 2.1034 + 0.002 V + 0.00007 V^2 \quad \left[\text{g km}^{-1} \text{ veic.}^{-1} \right] \quad (5)$$

Si noti che per il monossido di carbonio l'andamento delle emissioni è monotono decrescente all'aumentare della velocità di percorrenza V , mentre per gli ossidi di azoto l'andamento è monotono crescente e la funzione convessa di tipo parabolico.

5 - Una volta determinati i fattori di emissione per i due inquinanti oggetto di studio, si calcola la quantità totale di sostanze inquinanti immesse nell'atmosfera attraverso la semplice relazione:

$$I_i = E_i \phi \quad \left[\text{g km}^{-1} \right] \quad (6)$$

Questa permette di ricavare le immissioni totali I prodotte dall'intero flusso veicolare, nell'intervallo di

tempo orario per chilometro di strada, in funzione dei fattori di emissione pesati E e del flusso veicolare ϕ .

6 - Note le immissioni per ciascuno dei due inquinanti considerati, si determinano le concentrazioni al suolo attraverso espressioni ricavate da analisi di regressione esponenziale [17] sui valori delle concentrazioni rilevate dalla centralina di rilevamento presente nel sito in esame.

Le regressioni sono state effettuate considerando cinque differenti condizioni meteo-climatiche, caratterizzanti l'intera area urbana:

- condizione meteorologiche 1: elevata insolazione estiva;
- condizione meteorologiche 2 : discreta insolazione primaverile-autunnale;
- condizione meteorologiche 3: debole insolazione invernale;
- condizione meteorologiche 4: cielo coperto;
- condizione meteorologiche 5: pioggia.

In tabella 3 sono riportati i risultati delle analisi di regressione relative alla strada in esame per le differenti condizioni meteorologiche.

Condizione meteorologiche	Monossido di carbonio	Ossidi di zolfo
1	$C=0.2252\exp(0.0002I)$	$C=22.339\exp(0.0006I)$
2	$C=0.2019\exp(0.0002I)$	$C=10.014\exp(0.0009I)$
3	$C=0.1935\exp(0.0002I)$	$C=35.17\exp(0.0006I)$
4	$C=0.0364\exp(0.0003I)$	$C=20.771\exp(0.0006I)$
5	$C=0.1461\exp(0.0002I)$	$C=18.353\exp(0.0006I)$

Tabella 3 – Risultati delle regressioni in funzione delle condizioni meteo-climatiche.

7 - Si dispone ora di tutti gli elementi per poter realizzare delle mappe di concentrazione al suolo degli inquinanti considerati, funzione dei diversi parametri sin qui trattati (età del veicolo, velocità, condizioni meteorologiche e stagionali, ...), ottenendo così diversi scenari molto utili per una analisi dell'area oggetto di studio al fine di valutare gli eventuali effetti degli interventi sul territorio, quali modifiche alla viabilità e/o al parco vetture.

4. Applicazione tramite il software GIS GRASS

Per poter applicare i modelli precedentemente descritti e ottenere come risultato finale le mappe di concentrazione necessarie ad evidenziare il livello di inquinamento atmosferico, è stato utilizzato il GIS GRASS nella versione 5.4. Viene di seguito descritta la procedura seguita, con i relativi comandi impiegati.

La mappa vettoriale relativa a C.so Sardegna è stata trasformata in formato raster (*v.to.rast*); quindi si è proceduto alla sua divisione in tratti omogenei preventivamente individuati, mediante un'operazione di delimitazione manuale (*r.digit*) che ha permesso anche di assegnare ad ogni specifica area una categoria (numero intero progressivo compreso tra 1 e 12), affinché questa possa essere identificata univocamente nelle elaborazioni successive (fig. 4).

Come ultima operazione preliminare, si è proceduto all'assegnazione alle rispettive aree dei valori di flusso rilevati (si veda il § 3); ciò è stato fatto attraverso il comando *r.mapcalc*, programma di elaborazione molto potente di GRASS che permette di eseguire calcoli logici ed algebrici anche complessi all'interno di mappe raster e tra esse. Nel caso specifico, per l'assegnazione di un valore di flusso X ad un certo tratto Y si è utilizzata una espressione del tipo:

$$\text{flusso_trattoY} = \text{if}(\text{map_input} = \text{Y}, \text{X}, 0) \quad (7)$$

dove la mappa di input è il raster della strada suddivisa nei tratti omogenei. Ripetendo l'operazione per ogni tratto è così possibile ottenere le 12 mappe dei flussi dei singoli tratti, relativamente ad ognuno dei tre scenari: mattino, pomeriggio, sera. Tali risultati sono stati poi uniti mediante il comando *r.patch* ottenendo *mappe dei flussi di traffico* per l'intera strada per ciascun momento del giorno; questa operazione d'unione è stata effettuata per agevolare le elaborazioni successive, in quanto i modelli utilizzati consentono di applicare la medesima formula contemporaneamente a tutte le aree, avendo queste come unico valore differente il flusso veicolare rilevato.

Interrogando il software è possibile ottenere i valori medi dei flussi per ogni tratto. Tali valori sono riportati in tabella 4, per ogni tratto omogeneo componente la strada e per ogni situazione tipo.

In seguito, è stata ottenuta la *mappa delle velocità medie* relativa ad ogni momento del giorno, applicando l'eq. 2, relativa al modello di deflusso scelto, alla mappa dei flussi di traffico, tramite il comando *r.mapcalc* con la seguente sintassi:

$$V_{\text{media}} = 4212 / (4212 * (1 / (44.490.108 * \exp(10,5) * \exp(\text{flusso},2))) + 22.05 / (10.000272 * \text{flusso}) + 0.000121 * \exp(\text{flusso},2) * (0.000419 * \text{flusso} + \sqrt{\exp(0.000419 * \text{flusso},2)})) \quad (8)$$

Si noti come il valore del flusso relativo ad ognuna delle situazioni considerate sia l'unica variabile. La mappa, riportata in figura 5, relativa al flusso rilevato al mattino mostra valori nulli della velocità media veicolare in corrispondenza del tratto escluso al traffico prospiciente il mercato ortofrutticolo. Come intuibile, il valore più basso di velocità, non nullo, si ha nel tratto corrispondente in cui viene convogliato il traffico in direzione S-N. Al pomeriggio e alla sera, invece, quando cioè la viabilità ritorna alla normalità, si registrano valori sostanzialmente costanti in tutti i tratti.



Figura 4 - Visualizzazione dei tratti omogenei in cui C.so Sardegna è stato suddiviso.

Tratto	Mattina	Pomeriggio	Sera
1	850	1000	1200
2	1200	1200	800
3	750	925	1330
4	1660	875	1070
5	0	925	1330
6	2410	875	1770
7	700	900	1300
8	1600	800	950
9	680	1000	1200
10	1620	900	1000
11	280	300	350
12	100	500	200

Tabella 4 – I valori medi di flusso rilevati, per tratto omogeneo e situazione tipo [veic/h].

Sempre attraverso il comando *r.mapcalc*, si sono quindi costruite le *mappe delle emissioni* di inquinanti da parte dei veicoli transitanti, separatamente per CO e NO_x, per mezzo delle eq. 4 e 5 a partire dalle mappe della velocità media dei veicoli stessi mediante la seguente sintassi:

$$E_{CO} = 176.36 * \exp(V_{media}, 0.8351) \quad (9)$$

$$E_{NOx} = 2.1034 + 0.002 * V_{media} + 0.00007 * \exp(V_{media}, 2) \quad (10)$$

Le mappe in figura 6 mostrano i valori di emissione di CO ottenuti relativamente agli scenari mattino, pomeriggio e sera. I valori maggiori si rilevano al mattino nel tratto critico dove si raggiungono valori pari a 13.1 g km⁻¹veic.⁻¹, mentre i restanti tratti, oltre allo stesso nel resto della giornata sono mediamente caratterizzati da emissioni di CO pari a 9 g km⁻¹veic.⁻¹.

In figura 7 sono invece rappresentati i corrispondenti valori delle emissioni di NO_x; si noti come essi sono pressoché costanti in tutti gli scenari considerati, pari a 2 g km⁻¹veic.⁻¹. Ciò è dovuto ad una minor dipendenza, delle emissioni di ossidi di azoto rispetto a quelle di monossido di carbonio, da una variazione della velocità media dei veicoli.

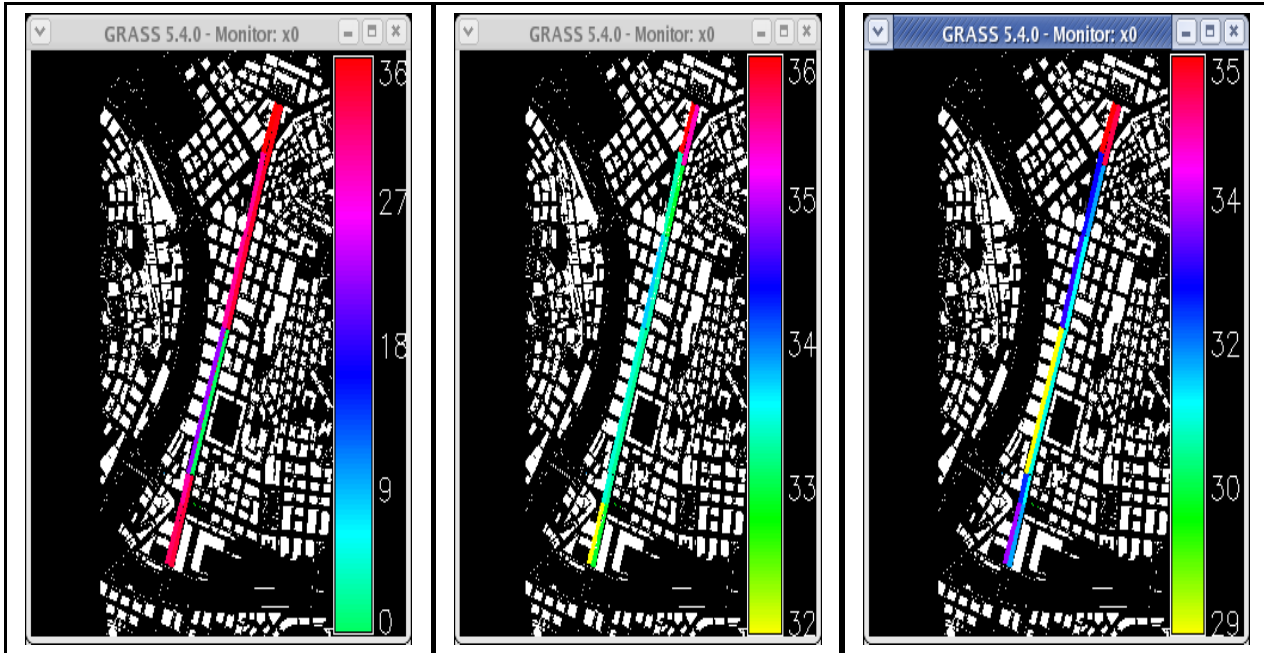


Figura 5 - Valori della velocità media veicolare derivanti dal modello di deflusso, rispettivamente, a partire da sinistra, per il flusso di traffico rilevato al mattino, al pomeriggio ed alla sera.

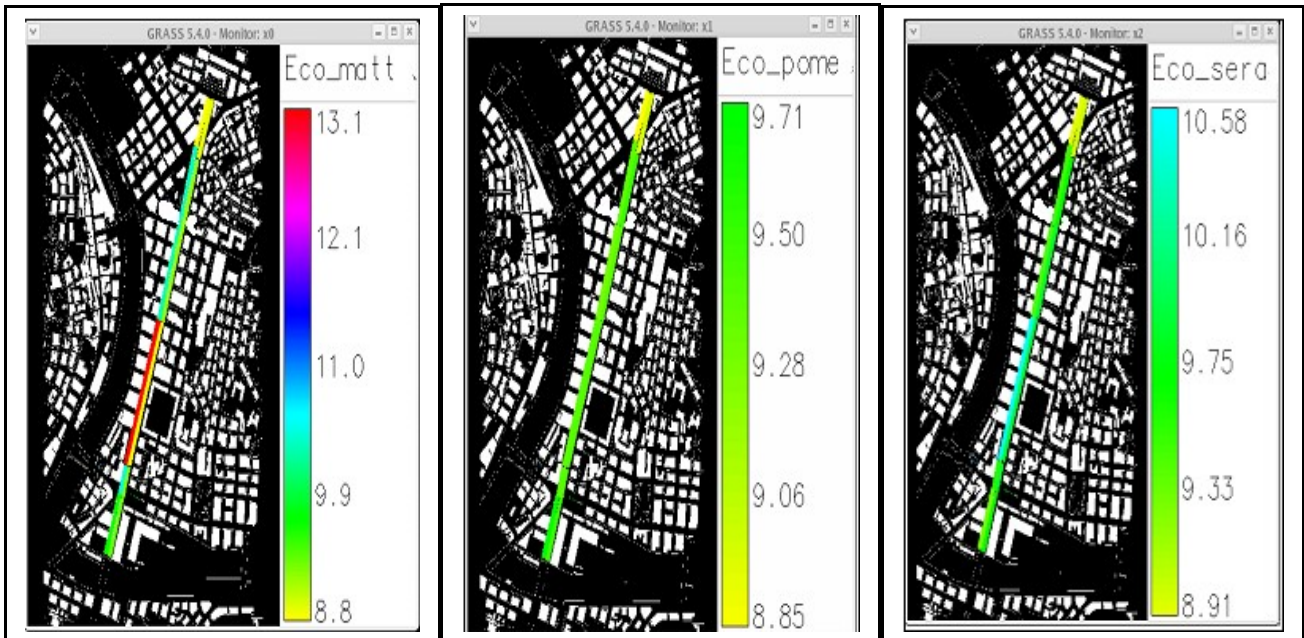


Figura 6 - Valori delle emissioni di CO derivanti dal modello di emissione, rispettivamente, a partire da sinistra, per gli scenari mattino, pomeriggio e sera.

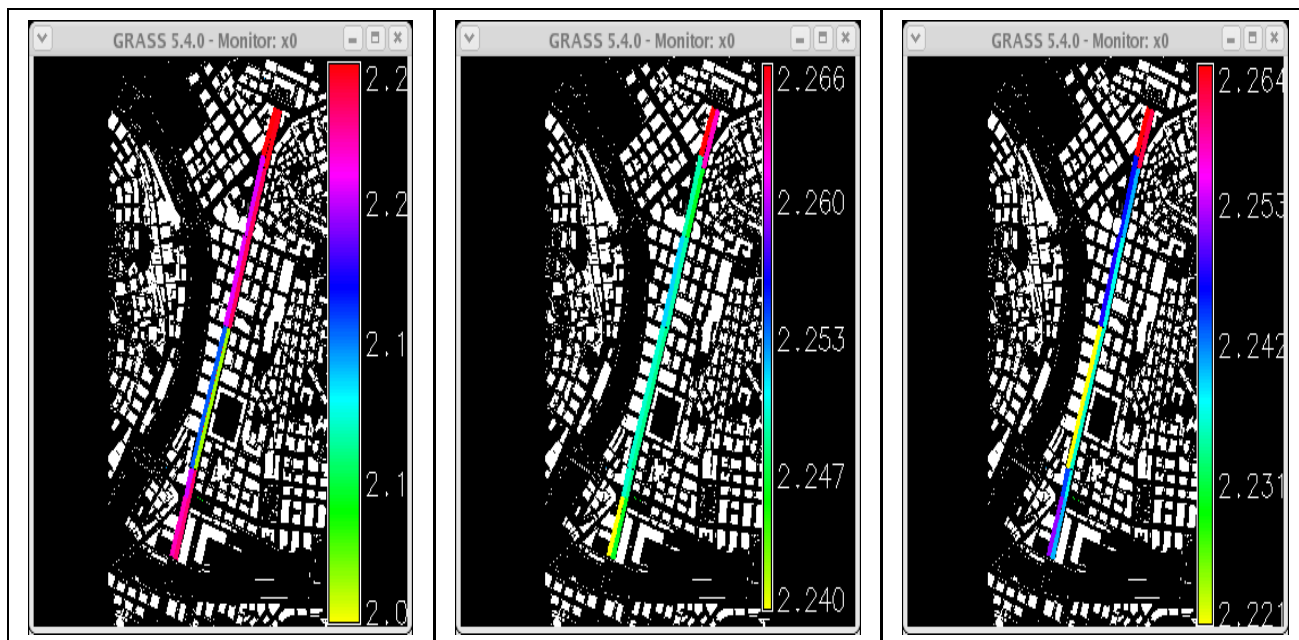


Figura 7 - Valori delle emissioni di NO_x derivanti dal modello di emissione, rispettivamente, a partire da sinistra, per gli scenari mattino, pomeriggio e sera.

In seguito, si sono costruite le *mappe delle immissioni* di inquinanti in atmosfera, separatamente per CO e NO_x, come prodotto della mappa delle emissioni per la mappa dei flussi di traffico (eq. 6) attraverso il comando *r.mapcalc*.

In figura 8 si può osservare come al pomeriggio e alla sera in tutti i tratti il valore relativo alle immissioni di CO si aggira mediamente intorno a 10000 g km⁻¹, mentre al mattino nel tratto critico esso risulta addirittura tre volte superiore. Invece le immissioni di NO_x, come mostrato in figura 9, raggiungono valori doppi rispetto a quelli ricavati per tutti gli altri tratti e per il tratto stesso nello scenario pomeridiano e serale.

Infine, a partire dalle mappe delle immissioni di CO e NO_x, attraverso le relazioni di regressione esponenziale riportate in tabella 3, è possibile ottenere le *mappe delle concentrazioni* al suolo delle due sostanze inquinanti in funzione dei 5 diversi scenari meteo-climatici.

In figura 10 sono riportate le mappe delle concentrazioni di CO ricavate per lo scenario mattutino e serale in condizione di elevata insolazione estiva, e per quello pomeridiano in condizione di cielo coperto, essendo risultate tali condizioni meteo-climatiche le più critiche nelle rispettive fasce giornaliere. Come si può osservare, il tratto critico mostra concentrazioni molto alte di CO al mattino, con valori superiori di due ordini di grandezza rispetto alle altre condizioni analizzate e notevolmente superiori al limite imposto dalla normativa vigente sulla qualità dell'aria fissato a 40 mg/m³.

In figura 11 sono raffigurate le concentrazioni di NO_x per i tre scenari nelle medesime condizioni meteo climatiche della figura 10. Anche in questo caso il tratto critico mostra concentrazioni molto alte al mattino, con valori che addirittura quintuplicano quelli normalmente presenti in condizioni di traffico pomeridiano e che sono di molto superiori al limite normativo fissato a 200 µg/m³.

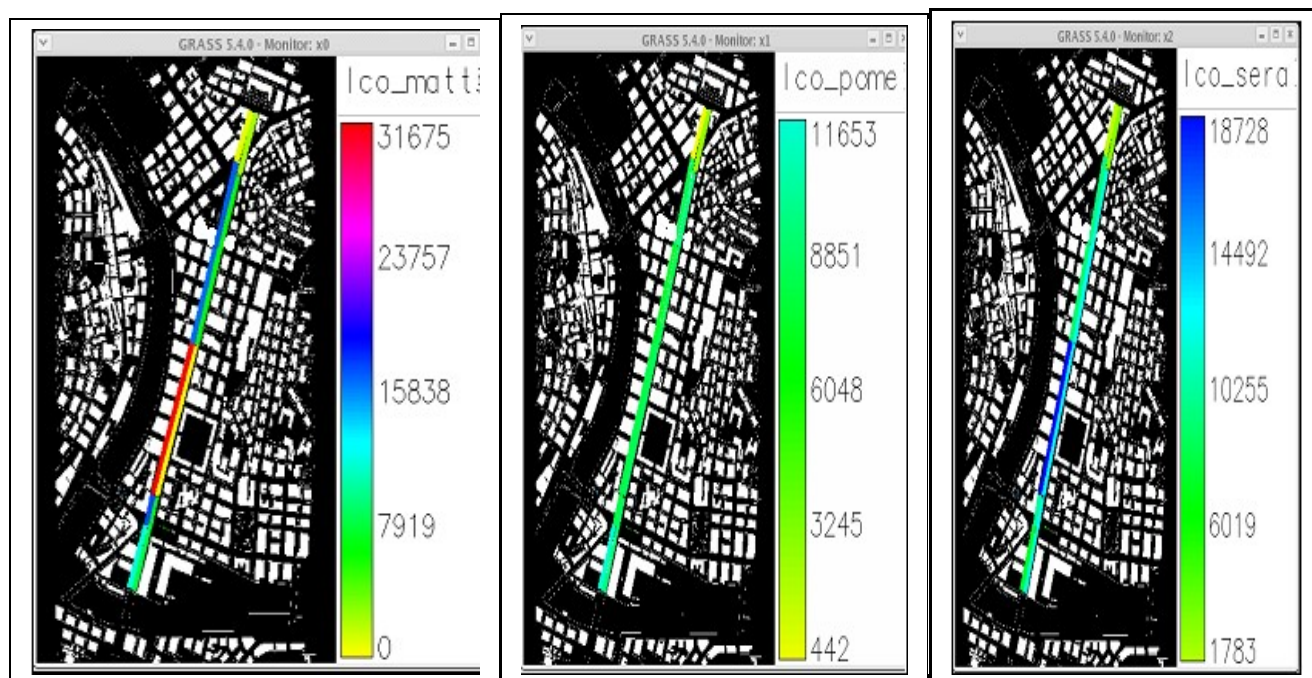


Figura 8 - Valori delle immissioni di CO derivanti dal modello di dispersione, rispettivamente, a partire da sinistra, per gli scenari mattino pomeriggio e sera.

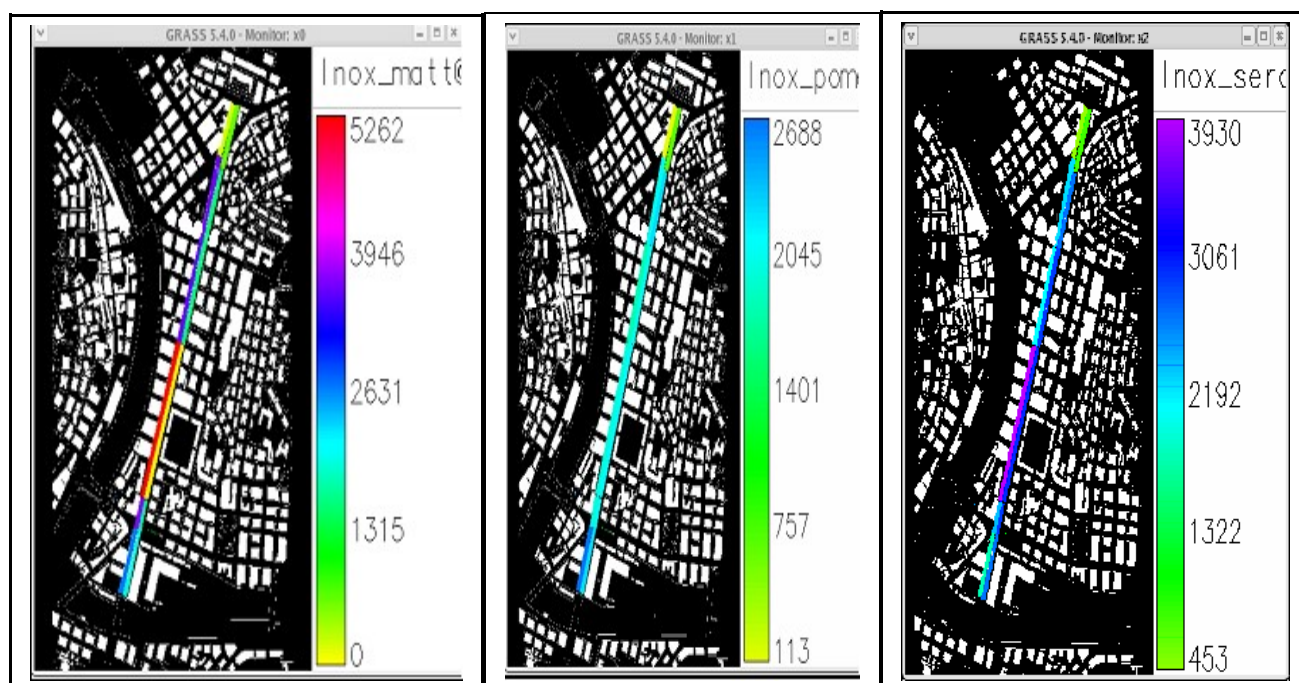


Figura 9 - Valori delle immissioni di NO_x derivanti dal modello di dispersione, rispettivamente, a partire da sinistra, per gli scenari mattino, pomeriggio e sera.

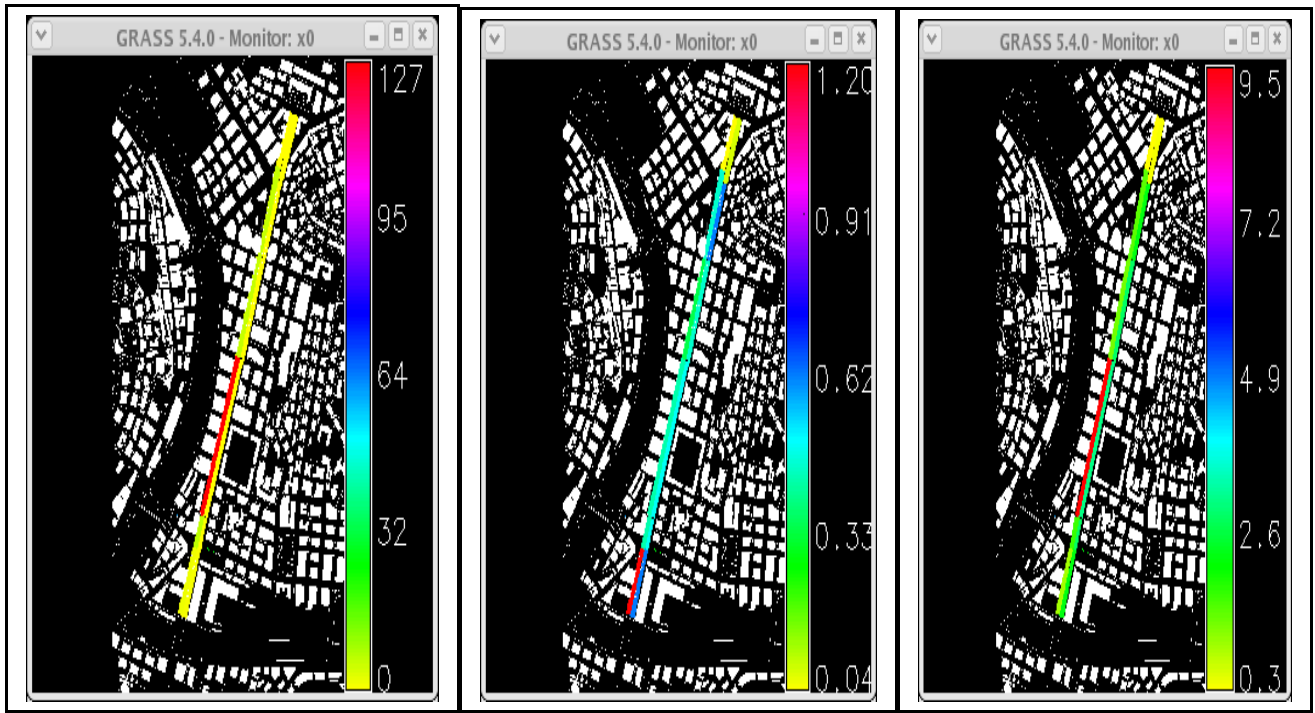


Figura 10 - Valori delle concentrazioni di CO per gli scenari mattutino in condizione di elevata insolazione estiva, per quello pomeridiano in condizione di cielo coperto, e quello serale in condizione di elevata insolazione estiva, rispettivamente.

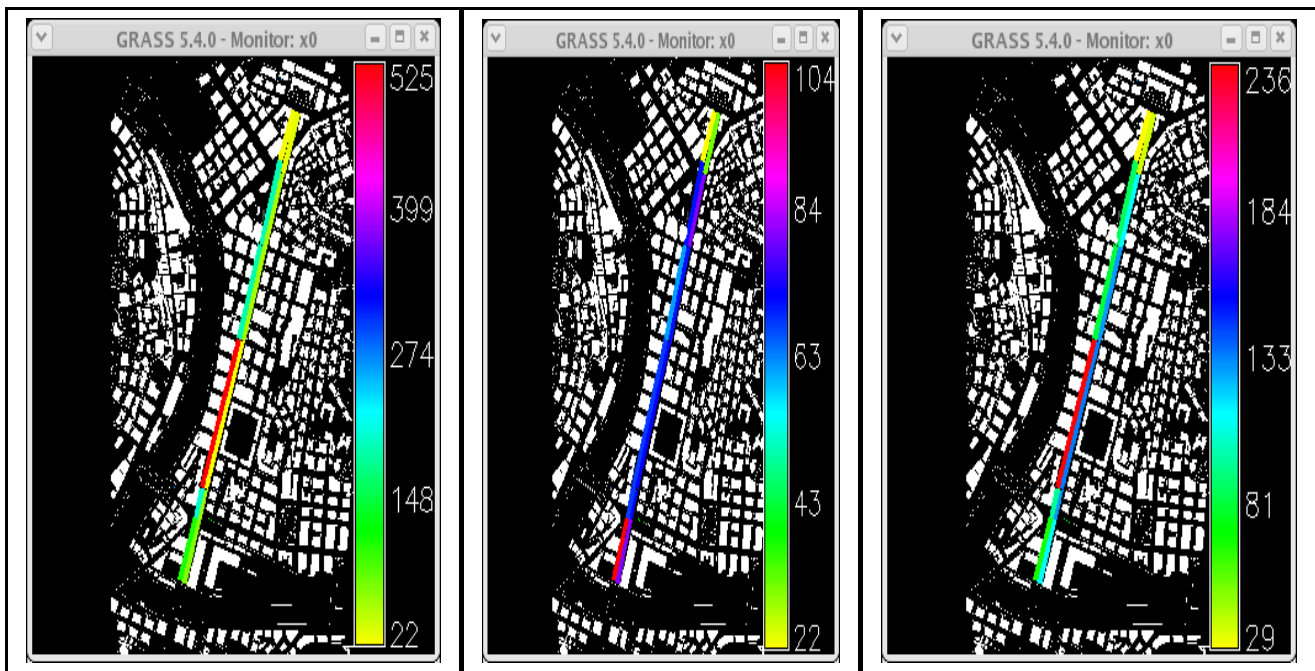


Figura 11 - Valori delle concentrazioni di NOx per gli scenari mattutino in condizione di elevata insolazione estiva, per quello pomeridiano in condizione di cielo coperto, e quello serale in condizione di elevata insolazione estiva, rispettivamente.

In generale, dall'analisi delle mappe ottenute si possono trarre le seguenti conclusioni:

- la condizione di elevata insolazione estiva è generalmente contraddistinta dai valori più alti di concentrazione di CO per unità di immissione inquinante nell'atmosfera, mentre i valori ottenuti per gli NO_x in tale condizione meteo sono intermedi rispetto alle altre condizioni considerate; i valori massimi di concentrazione per gli NO_x si hanno in caso di discreta insolazione primaverile-autunnale.
- le concentrazioni prodotte dalle immissioni veicolari nell'ambiente generalmente diminuiscono al variare della condizione meteo, dalla elevata insolazione estiva (condizione 1 di tabella 3) al cielo coperto (condizione 4 di tabella 3); i fenomeni di accumulo delle sostanze inquinanti negli strati più bassi dell'atmosfera appaiono maggiormente favoriti nei mesi più caldi caratterizzati da una quasi assenza di gradienti di tipo termico e dinamico sul piano orizzontale;
- come atteso, la condizione di pioggia (condizione 5 di tabella 3) è contraddistinta dai più bassi valori di concentrazione per unità di immissione inquinante nell'atmosfera; le precipitazioni infatti producono significativi processi di lavaggio degli inquinanti presenti nei bassi strati dell'atmosfera. A questo fenomeno si aggiungono infine rimescolamenti atmosferici verticali e forti venti orizzontali, connessi al passaggio della perturbazione responsabile dell'evento meteorico.

Per identificare chiaramente le zone nelle quali si verifichi il superamento dei limiti normativi, ed associarvi l'entità del superamento, sono state costruite le *mappe di superamento dei limiti normativi* come differenza tra le mappe delle concentrazioni relative ai flussi rilevati e la mappa che riporta il valore del limite normativo dello specifico inquinante. In particolare, ai tratti in cui i valori di concentrazione eccedono i limiti normativi, vengono associati i valori di superamento degli stessi, mentre viene associato valore nullo ai tratti in cui tali limiti non vengono superati, mediante il comando *r.mapcalc* e la seguente sintassi:

$$\text{zone_sup_limX} = \text{if}(\text{C}_{\text{XY}} - \text{C}_{\text{X_limiti}} > 0, \text{C}_{\text{XY}} - \text{C}_{\text{X_limiti}}, 0) \quad (11)$$

dove C_{XY} è la mappa di concentrazione dell'inquinante X nella condizione Y (corrispondente ad un determinato scenario meteorologico ed in corrispondenza di una certa fascia oraria), mentre C_{X_limiti} è la mappa appositamente costruita delle concentrazioni dell'inquinante X al limite di normativa in ognuno dei 12 sottotratti in cui la strada è stata suddivisa.

In questo modo per una determinata condizione di flusso e un particolare scenario meteo-climatico, è possibile evidenziare in quali zone le concentrazioni d'inquinanti risultano superiori ai limiti e, confrontando mappe relative a diversi scenari, si è in grado di evidenziare quali siano le condizioni meteo in presenza delle quali si verifica un minor ricambio atmosferico e di conseguenza un aumento dei valori di concentrazione al suolo.

In figura 12 sono riportate ad esempio due mappe di superamento dei limiti normativi per entrambi gli inquinanti considerati.

Il processo che si è seguito, se pur non concettualmente complicato una volta che siano noti i modelli di deflusso da utilizzare tarati sulla specifica realtà oggetto di studio, ha richiesto un notevole impegno soprattutto per le numerose mappe che un processo a catena come questo genera. Al fine di automatizzarlo, si è ricavata l'espressione che, per ogni condizioni meteo-climatiche, dal valore del flusso di traffico permette di ottenere direttamente quello della concentrazione dell'inquinante, evitando di creare le mappe di velocità, emissioni ed immissioni. A titolo di esempio si riporta quella relativa alla concentrazione di CO nello scenario di elevata insolazione estiva:

$$\begin{aligned}
C_{co_s1} = & 0.2252 * \exp(0.0002 * 176.36 * \exp(4212 / (4212 * (1 / (44.490.108 * \exp(10,5) * \exp(\text{flux},2)))) \\
& + 22.05 / (10.000272 * \text{flux}) + 0.000121 * \exp(\text{flux},2) * (0.000419 * \text{flux} - 1 \\
& + \sqrt{\exp(0.000419 * \text{flux} - 1,2)})) , 0.8351) * \text{flux} .
\end{aligned}
\tag{12}$$

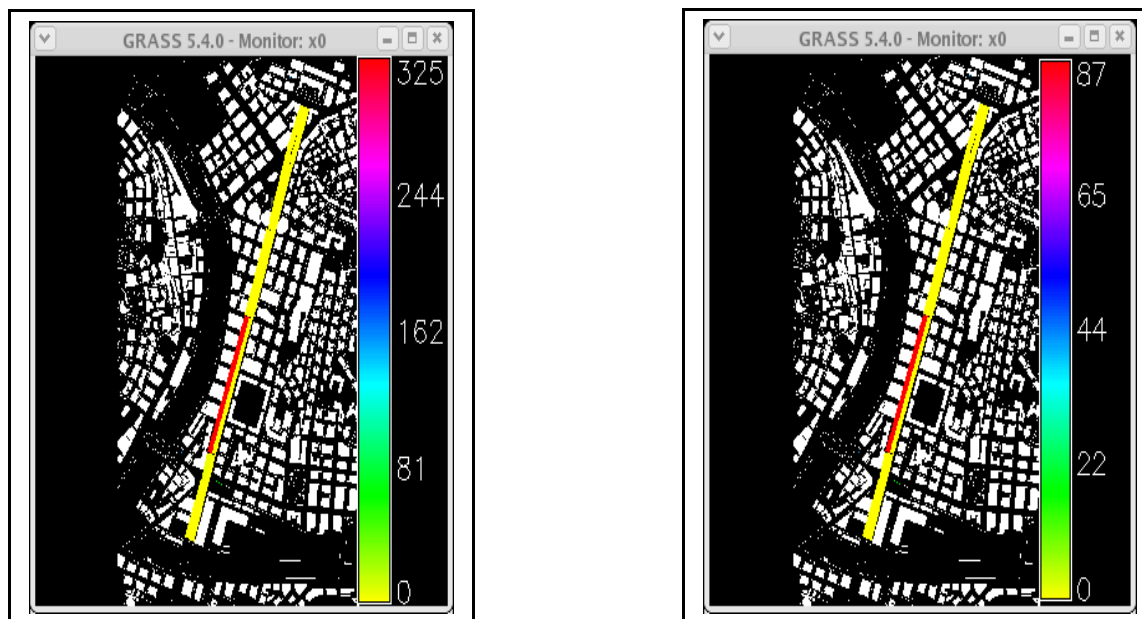


Figura 12 - Valori del superamento dei limiti normativi di NOx (a sinistra) e di CO (a destra) al mattino in condizioni di elevata insolazione estiva.

5. Conclusioni

A supporto delle decisioni di pianificazione urbana risulta importante disporre di strumenti adeguati alla conoscenza dei livelli di concentrazione delle sostanze inquinanti emesse dal traffico veicolare.

Nel presente lavoro, l'attenzione è stata posta sulle concentrazioni al suolo di due particolari inquinanti, il monossido di carbonio e gli ossidi di azoto, presenti in uno dei principali nodi di traffico della città di Genova, nei pressi del mercato ortofrutticolo di C.so Sardegna.

Sono stati rilevati in sito, tramite l'ausilio di videocamera, i flussi di traffico circolante; in seguito sono stati implementati nel GIS Free Software e Open Source GRASS modelli di emissione e diffusione degli inquinanti tarati sulla strada in esame, ottenendo le mappe delle concentrazioni di CO e NOx per diversi scenari meteo-climatici ed in diverse condizioni di traffico.

Dall'analisi critica delle mappe realizzate è stato possibile individuare fasce orarie e scenari meteo-climatici particolarmente sfavorevoli in cui si evidenziano superamenti anche consistenti dei limiti normativi nel tratto antistante il mercato ortofrutticolo. Tale evidenza è conseguenza diretta della deviazione del flusso stradale in un'unica corsia durante le ore del mattino, in cui il traffico intenso risente negativamente del restringimento della carreggiata.

E' importante sottolineare, però, come la rilevazione del flusso su cui il presente studio si è basato non risulti del tutto rappresentativa della situazione tipo che si realizza per buona parte dell'anno, in quanto il rilievo è stato effettuato nel mese di luglio. In tale mese, infatti, il contributo apportato al flusso ad esempio dalle attività scolastiche è totalmente assente, mentre più in generale le attività lavorative sono

parzialmente ridotte, rendendo i veicoli circolanti, sia pubblici che privati, notevolmente ridotti. In corrispondenza dei mesi autunnali, invernali e primaverili è quindi ragionevole ritenere che il flusso di traffico sia maggiore in tutte le zone del tratto stradale considerato, con rallentamenti ancora più evidenti in corrispondenza del mercato, in cui si manifestano sempre i maggiori problemi di congestione.

Si fa inoltre presente come la bontà dei risultati ottenuti è avallata anche dal fatto che, nella realtà pianificatoria di C.so Sardegna, l'Amministrazione Comunale ha deciso di spostare il mercato in altra zona della città.

Il presente lavoro, anche se applicato ad una sola arteria stradale, ha dimostrato le potenzialità di analisi dello strumento GIS in generale e del software GRASS in particolare, molto utile per la pianificazione. Una corretta pianificazione urbana dei trasporti, infatti, prevede l'analisi delle problematiche esistenti e la definizione di strategie efficaci tese a ridurre il traffico veicolare attraverso provvedimenti di diverso tipo, da valutare di volta in volta relativamente alle specificità dell'area oggetto di studio ed alle ripercussioni che si avrebbero nelle zone circostanti.

Si sottolinea infine l'importanza di integrare il presente modello con uno o più database contenenti tutte le informazioni necessarie alle elaborazioni di GRASS [10].

BIBLIOGRAFIA

1. AA.VV., "Simulazione numerica di inquinamento atmosferico da traffico urbano nella città di Genova. Relazione della Provincia di Genova", Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Fisica, 1997.
2. ANPA, "Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale - I fattori di emissione medi per il parco circolante in Italia", Serie Stato dell'Ambiente 12/2000.
3. ATA - Sezione Liguria & DIMSET – Università di Genova, Atti Giornata di Studio "Inquinamento e Traffico nei centri urbani: situazione, soluzioni tecniche e prospettive", Genova, 26 Ottobre 2000.
4. ATA - Sezione Liguria & DIMSET – Università di Genova, Atti Giornata di Studio "Soluzioni Tecniche per una Mobilità Sostenibile in Ambito Urbano", Genova, 24 Ottobre 2002.
5. Badalato L. (Regione Liguria) et al, "Un modello statistico per la zonizzazione del territorio ai sensi del D.M. 60", 2004.
6. Brescianini C., Capobianco M., Zamboni G., "Analisi degli Effetti di Provvedimenti di Limitazione del Traffico Veicolare sulla Qualità dell'Aria in un Grande Centro Urbano", 56° Congresso Nazionale ATI, Napoli, 9/2001.
7. Calastrini F., Gualtieri G., "Convenzione per un incarico per la predisposizione e applicazione di modelli meteo-diffusionali per la valutazione della qualità dell'aria. Relazione Finale", Regione toscana e provincia di Livorno, Luglio 2003.
8. Capobianco M., Dagnino R., Mastretta M., Zamboni G., "Road Vehicles Emissions under Real Urban Driving Conditions", Fisita 2002, World Automotive Congress, Helsinki, 6/2002.
9. Capobianco M., Zamboni G., "Valutazione dei fattori emissivi dei veicoli stradali: problematiche e metodologie", Genova, 2002.
10. Cemin A., Ciolli M., Ragazzi M., Zanoni M., "Sistema integrato GIS-database per la gestione dei dati di traffico e produzione di mappe delle emissioni. Applicazione alla città di Trento". *IA : ingegneria ambientale*, 2004, v. XXXIII, n. 10, p. 479-487.
11. Comune di Genova, Ordinanze sindacali n. 457 del 28.09.2000 e n. 325 del 10.10.2000 – Limitazione della circolazione e della sosta veicolare dal 02.10.2000 su parte del territorio

- cittadino, in conseguenza del livello di concentrazione di sostanze inquinanti nell'aria, nell'interesse della salute pubblica e dell'ambiente.
12. Contaldi M., "Consumi ed emissioni nel settore dei trasporti: applicazione della metodologia Corinair coerente alle specificità del parco nazionale", Convegno AIEE, Roma, 22 ottobre 1999.
 13. Contaldi M., De Lauretis R., Picini P., "Analisi e validazione di metodologie per il calcolo delle emissioni inquinanti dei trasporti", ANPA, Giugno 2000
 14. Corinair Project, "European inventory of emissions of pollutants in the atmosphere", Commission of the European Communities, 1997.
 15. Festa D.C., "L'inquinamento da traffico nelle aree urbane", Atti dell'XI Corso di aggiornamento in Tecniche per la difesa dall'inquinamento, a cura di G. Frega, Editoriale Bios, 1990
 16. Festa D.C., De Luca V., "Sviluppo di un sistema di modelli per la valutazione dell'inquinamento atmosferico prodotto dal traffico veicolare" - Atti del 2° Convegno Nazionale del CNR/PFT2, Genova, 29-31 Maggio 1995.
 17. Festa D.C., Nuzzolo A., "Analisi sperimentale delle relazioni velocità-flusso per le strade urbane", Le Strade, N. 1266, 1990.
 18. Gualtieri G., Tartaglia M., "Predicting urban traffic air pollution: a GIS framework", Transportation Research - D, Vol. 3 n. 5, pp. 329-336, Elsevier Science, 1998.
 19. Negrenti E. (ENEA), Zanini G. (ENEA), Petrova Kolarova M., "Integrating a new traffic emissions model with an urban dispersion model: an innovative approach for integrating urban transport policies and air quality management in the city of Rome", Air Pollution '99 Int'l Conference, San Francisco, Luglio 1999.
 20. Ntziachristos L., Samaras Z., "COPERT III – Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport – Methodology and Emission Factors" (Version 2.61), 2001.
 21. Postorino M.N., "Appunti integrativi del corso di Metodi quantitativi per la pianificazione dei trasporti", Università Mediterranea di Reggio Calabria, 1999.
 22. Provincia di Genova, "Rapporto Annuale della Qualità dell'Aria – Anno 2001", Area 8-Ambiente - Ufficio Elaborazioni Dati Ambientali, 2001.
 23. Transportation Research Board, "Highway Capacity Manual", 2000.
 24. Wardrop, "Some theoretical aspects of road traffic research", Proc. Instn. Civ. Engrs, Part II,1(2),325-362, 1952.
 25. Webster, "Traffic signals settings", Road Research Technical Paper, 39, Her Majesty's Stationary Office, London, 1958.

SITI INTERNET CONSULTATI

<http://aix.meng.auth.gr/lhtee/index.html>
<http://amb-emiss.anpa.it/eptransport/>
<http://www.apat.gov.it>
<http://www.arb.ca.gov>
<http://www.aria.it>
<http://www.aria-net.it>
<http://www.arpab.it>
<http://www.arpa.emr.it>
<http://www.arpalazio.it>
<http://www.arpalombardia.it>
<http://www.arpal.org>
<http://www.arpa.piemonte.it>

<http://www.eea.europa.eu/>
<http://www.enea.it>
<http://www.epa.gov/scram001>
<http://www.europa.eu.int/comm/eurostat>
<http://grass-italia.com.polimi.it/>
<http://grass.itc.it/>
<http://www.iiasa.ac.at>
<http://www.ingegneria.unige.it/associazioni/ata/>
<http://www.regione.emilia-romagna.it>
<http://www.ricerchetrasporti.com>
<http://www.sinanet.it>
<http://www.uagworld.com/trips/>