

Contratto di Ricerca tra Comune di Brescia e Dipartimento di
Elettronica per l'Automazione (Università degli Studi di Brescia)
Responsabile scientifico: prof. Giovanna Finzi

**Emissioni dei veicoli in autostrada
e simulazione dell'impatto sulla qualità
dell'aria nell'area metropolitana bresciana**

Giovanna Finzi, Veronica Gabusi, Marialuisa Volta

Novembre 2006

Indice Generale

Indice Generale	I
Figure	I
Tabelle	II
Introduzione	1
Stima delle emissioni in autostrada	4
I fattori di emissione	5
Le emissioni	11
Simulazioni dell'impatto sulla qualità dell'aria	16
Valutazione dell'impatto di riduzione della velocità massima in autostrada	16
Confronto con una politica di limitazione alla circolazione su strade urbane	23
Conclusioni	26
Bibliografia	27

Figure

Figura 1 – L'area metropolitana bresciana, la sua orografia e la rete viaria principale.	2
Figura 2 - Ripartizione percentuale delle emissioni di ossidi di azoto stimata per il caso di riferimento [4] (parco circolante al 2000, velocità massima di percorrenza dei veicoli in autostrada: 110 km/h).	2
Figura 3 - Ripartizione percentuale delle emissioni di polveri sottili direttamente emesse (PM10) e comprensive della risospensione (PM10 Lohmeyer) stimate per il caso di riferimento [4] (parco circolante al 2000, velocità massima di percorrenza dei veicoli in autostrada: 110 km/h).	3
Figura 4 - Profilo di modulazione giornaliera.	5
Figura 5 – Fattori di emissione autostradali per gli ossidi di azoto (NOx).	7
Figura 6 – Fattori di emissione autostradali per le polveri sottili senza risospensione (PM10) e con risospensione (PM10 Lohmeyer – scala logaritmica).	8
Figura 7 – Fattori di emissione autostradali per il monossido di carbonio.	9
Figura 8 - Stima delle emissioni di NOx al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato.	11
Figura 9 - Stima delle emissioni di PM10 al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato.	12
Figura 10 - Stima delle emissioni di PM10 comprensivo di risospensione al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato (ordinate in scala logaritmica)	12
Figura 11 - Stima delle emissioni di CO al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato.	13
Figura 12 - Emissioni per categoria veicolare: autoveicoli.	14
Figura 13 - Emissioni per categoria veicolare: veicoli commerciali leggeri.	14
Figura 14 - Emissioni per categoria veicolare: veicoli commerciali pesanti.	15

Figura 15 - Emissioni per categoria veicolare: motocicli. _____	15
Figura 16 - Concentrazione media annuale di NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 130 km/h). __	17
Figura 17 - Concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 130 km/h). __	18
Figura 18 - Concentrazione media annuale di PM10 Lohmeyer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 130 km/h). _____	19
Figura 19 – Variazione percentuale delle concentrazioni medie annuali di NOx conseguenti alla riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 130 km/h a 110 km/h (sinistra) e da 130 km/h a 90 km/h (destra). _____	21
Figura 20 – Variazione percentuale delle concentrazioni medie annuali di PM10 conseguenti alla riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 130 km/h a 110 km/h (sinistra) e da 130 km/h a 90 km/h (destra). _____	22
Figura 21 – Concentrazione media annuale di NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 110 km/h). __	24
Figura 22 – Variazione percentuale delle concentrazioni medie annuali di NOx: riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 110 km/h a 90 km/h (destra) e all'adozione del provvedimento di circolazione a targhe alterne (sinistra). _____	24
Figura 23 – Concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 110 km/h). __	25
Figura 24 –Variazione delle concentrazioni medie annuali di PM10: riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 110 km/h a 90 km/h (destra) e all'adozione del provvedimento di circolazione a targhe alterne (sinistra). _____	25

Tabelle

Tabella 1- Contributi dei diversi comparti emissivi per la provincia di Brescia [1]. _	1
Tabella 2 - Fattori di emissione in funzione della velocità (range di riferimento: 60–150 Km/h). _____	10
Tabella 3 - Emissioni veicolari complessive sul tratto di autostrada A4 esaminato al variare della velocità massima di percorrenza e loro variazione % rispetto al limite di 130 km/h (dati al 2003). _____	13

Introduzione

Nella provincia di Brescia il traffico su strada nel suo complesso costituisce una delle principali sorgenti di emissioni in atmosfera, contribuendo in modo significativo alle emissioni di ossidi di azoto e polveri sottili. La Tabella 1 sintetizza le emissioni stimate nell'ambito dell'inventario INEMAR (Inventario EMISSIONI ARia) della Regione Lombardia [1]; l'analisi di tali dati evidenzia che il trasporto su strada concorre all'emissione di ossidi azoto per il 47%, a quella di PM10 per il 29%.

Tabella 1- Contributi dei diversi comparti emissivi per la provincia di Brescia [1].

	<i>NOx</i>	<i>CO</i>	<i>PM2.5</i>	<i>PM10</i>	<i>PTS</i>
Produzione energia e trasform. combustibili	4.59 %	0.03 %	0.23 %	0.34 %	0.40 %
Combustione non industriale	8.95 %	33.23 %	30.76 %	25.15 %	22.39 %
Combustione nell'industria	18.65 %	4.18 %	4.83 %	5.10 %	6.07 %
Processi produttivi	4.78 %	30.49 %	11.75 %	21.02 %	21.00 %
Uso di solventi			0.10 %	0.20 %	0.21 %
Trasporto su strada	47.41 %	28.98 %	32.90 %	29.25 %	29.12 %
Altre sorgenti mobili e macchinari	13.61 %	1.09 %	11.51 %	9.62 %	8.55 %
Trattamento e smaltimento rifiuti	1.19 %	0.04 %	0.04 %	0.03 %	0.03 %
Agricoltura	0.48 %	0.01 %	2.64 %	5.09 %	8.56 %
Altre sorgenti e assorbimenti	0.34 %	1.96 %	5.24 %	4.19 %	3.68 %
Totale	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

L'analisi è stata condotta su un dominio di lato 30 km comprendente Brescia e parte della provincia (Figura 1), caratterizzato da una molteplicità di sorgenti emissive, e da particolari regimi meteorologici che favoriscono il ristagno degli inquinanti in atmosfera [2], [3]. La fitta rete viaria include numerose strade statali e provinciali e due autostrade: l'autostrada A4 Torino – Trieste attraversa la parte sud del comune di Brescia, mentre l'autostrada A21 Brescia – Piacenza - Torino si innesta nella A4 in corrispondenza del casello di Brescia Centro.

La stima delle emissioni veicolari in tale dominio ha evidenziato il ruolo predominante delle emissioni autostradali rispetto ai contributi da traffico urbano ed extraurbano ([2], [3], [4]). L'apporto ai diversi inquinanti in atmosfera, in termini percentuali, delle varie categorie stradali è illustrato graficamente nelle Figure 2 e 3, considerando il parco circolante al 2000; oltre agli ossidi di azoto, sono prese in considerazione sia le polveri sottili direttamente emesse dai veicoli che il contributo dovuto al fenomeno della risospensione, la cui rilevanza aumenta in caso di condizioni meteorologiche caratterizzate da venti deboli e scarse precipitazioni. In particolare, per la stima di tali fattori di emissione è stato adottato un approccio metodologico proposto in ambito scientifico internazionale europeo [5] e derivato da quello statunitense [6].

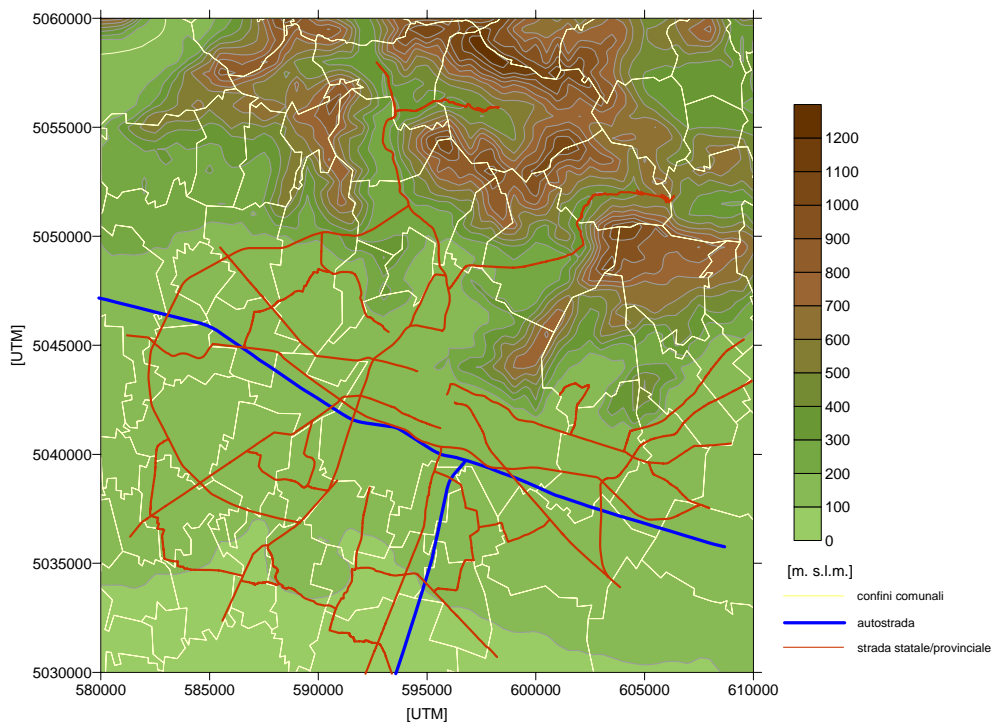


Figura 1 – L'area metropolitana bresciana, la sua orografia e la rete viaria principale.

A partire dalla constatazione che dunque le emissioni autostradali rappresentano un contributo molto significativo nel bilancio totale delle emissioni da traffico, scopo di questo studio è fornire una valutazione della variazione di tali emissioni in funzione della velocità massima di percorrenza che possa essere imposta tramite opportuni provvedimenti legislativi su tali arterie. E' infatti interessante quantificare gli effetti di una possibile misura di contenimento delle emissioni, focalizzati sulla riduzione dei limiti massimi di velocità in autostrada, soprattutto sui tratti prossimi ad agglomerati urbani.

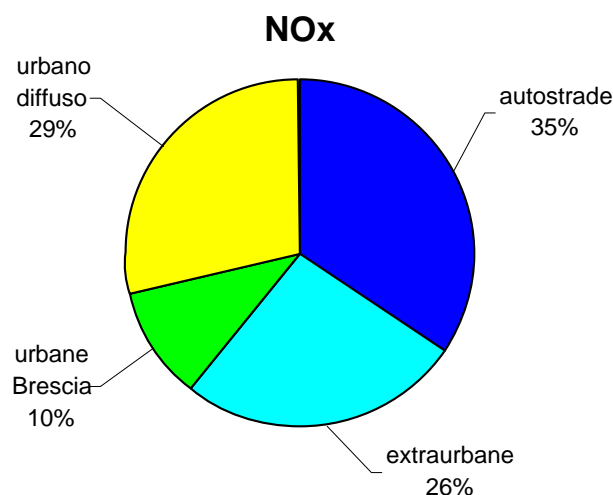


Figura 2 - Ripartizione percentuale delle emissioni di ossidi di azoto stimata per il caso di riferimento [4] (parco circolante al 2000, velocità massima di percorrenza dei veicoli in autostrada: 110 km/h).

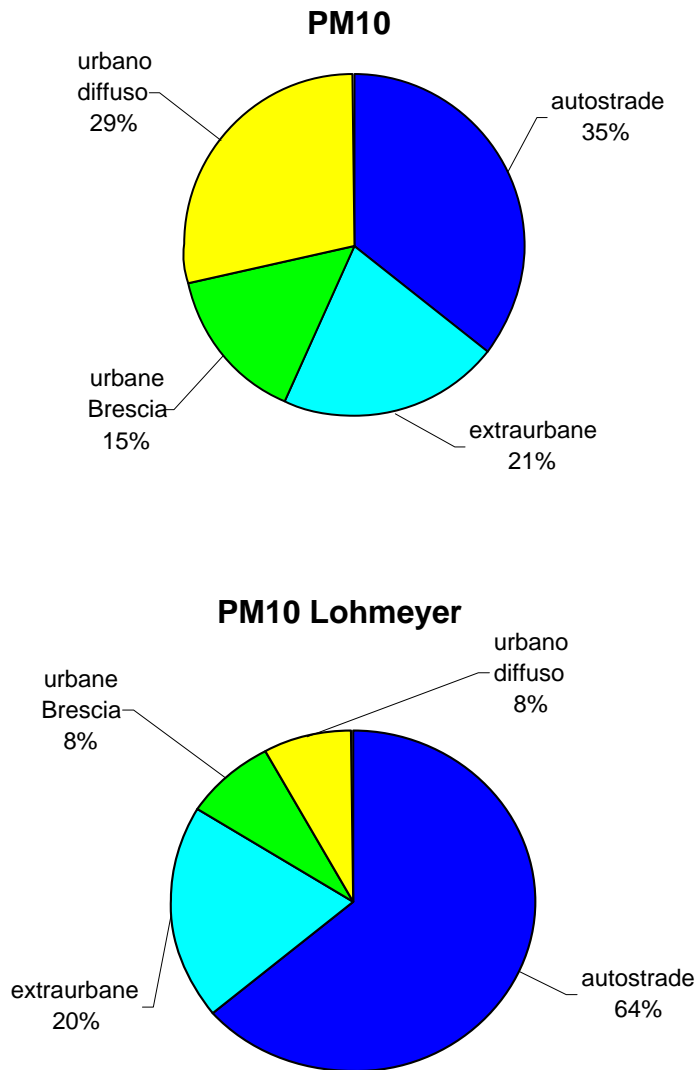


Figura 3 - Ripartizione percentuale delle emissioni di polveris sottili direttamente emesse (PM10) e comprensive della risospensione (PM10 Lohmeyer) stimate per il caso di riferimento [4] (parco circolante al 2000, velocità massima di percorrenza dei veicoli in autostrada: 110 km/h).

Stima delle emissioni in autostrada

Al fine di trarre informazioni utili alla sintesi di politiche di contenimento delle emissioni in autostrada, è opportuno analizzare come variano i fattori di emissione e le conseguenti emissioni dei veicoli, in funzione della velocità di percorrenza.

Le emissioni da traffico, in generale, per un inquinante i ed una classe di veicolo c possono essere calcolate secondo la formula:

$$E_{i,c} = EF_{i,c} \cdot n_c \cdot l$$

dove

- $E_{i,c}$ [g/h] sono le emissioni dell'inquinante i per la classe di veicoli c ;
- $EF_{i,c}$ [g/km] rappresenta il fattore di emissione, caratteristico della tipologia di veicolo c , relativo all'inquinante i ;
- n_c [h⁻¹] è il numero di veicoli di classe c che transitano nell'intervallo di tempo considerato sul tratto di strada;
- l [km] è la lunghezza del tratto stradale preso in esame.

Le emissioni dell'inquinante i sul tratto di arteria stradale considerata risultano essere date da:

$$E_i = \sum_c E_{i,c}$$

In questo studio, sono stati predisposti *run* del modello di calcolo TREFIC (*TRaffic Emission Factor Improved Calculation*) [10] in condizioni di traffico diverse, al fine di ottenere i fattori di emissione relativi al **tratto di autostrada A4** che ricade all'interno del dominio di calcolo (Figura 1).

Poiché i flussi di traffico ipotizzati si riferiscono all'ora di punta ([2], [3], [4]) le emissioni stimate devono essere opportunamente riscalate per essere rappresentative delle emissioni medie di un'ora; tale operazione viene effettuata considerando il profilo di modulazione oraria di riferimento già utilizzato in [2], [3], [4] (Figura 4).

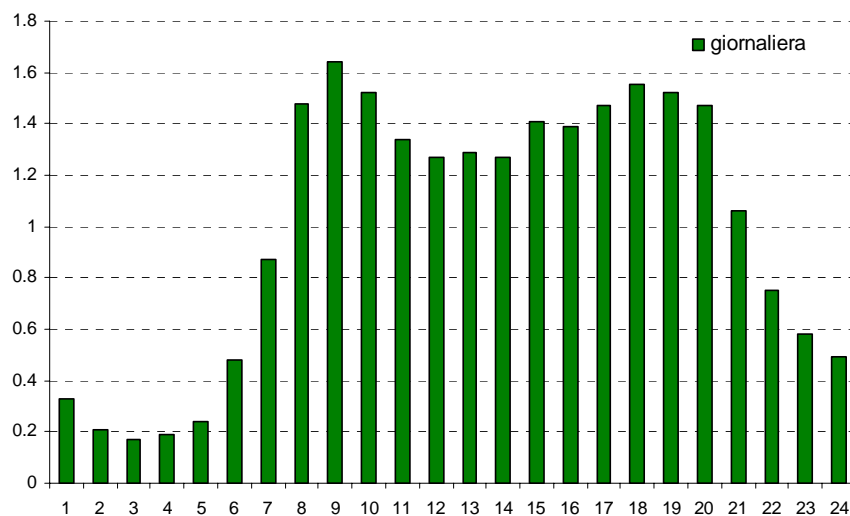


Figura 4 - Profilo di modulazione giornaliera.

La procedura di analisi modellistica ha portato ai seguenti risultati:

- Stima dei fattori di emissione “aggregati” per tipologia di mezzo circolante a partire dai parametri della rete, ossia dal flusso di veicoli circolanti e dalla lunghezza del tratto autostradale. L’intervallo di valori presi in esame per la velocità massima varia dai 60 km/h a di 150 km/h, con passo pari a 10 km/h.
- Stima delle emissioni, per ogni categoria aggregata di veicoli (autoveicoli, commerciali leggeri, commerciali pesanti e motocicli), al variare della velocità massima di percorrenza imposta.

I fattori di emissione

Per ogni categoria veicolare, al variare della velocità di percorrenza, sono stati stimati i fattori di emissione per i seguenti inquinanti:

- ossidi di azoto (NO_x);
- polveri sottili direttamente emesse (PM₁₀);
- polveri sottili comprensive del termine di risollevarmento (PM₁₀ Lohmeyer);
- monossido di carbonio (CO).

Il modello di calcolo TREFIC utilizzato per le stime dei fattori di emissioni da traffico, implementa un approccio metodologico innovativo, sviluppato in Germania [5]. Tale formulazione, derivata da un modello iniziale proposto dall’EPA (*Environmental Protection Agency*) statunitense [6], tiene conto sia dei contributi provenienti dalle “sorgenti primarie” proprie dei veicoli (tubi di scappamento, componenti del veicolo, ecc.) che del materiale che giunge sulla strada dall’esterno e viene risollevarmento dalle ruote dei veicoli stessi. Il fattore di emissione così ottenuto ($EF_{Lohmeyer}$), somma dei contributi diretti e di quelli dovuti alla risospensione, risulta espresso come:

$$EF_{Lohmeyer} = a \cdot k \cdot (sL)^{0.52} \cdot W^{2.14} \cdot \left[\frac{1}{0.85} \cdot (1 - 0.5 \cdot r) \right]$$

dove

- a è un coefficiente dipendente dalla nazione presa in esame;
- k è il fattore di correzione della formulazione EPA introdotto da Lohmeyer;
- sL (*silt load*, ossia carico di polveri) quantifica lo stato superficiale della strada;
- W rappresenta il peso medio del veicolo sulla strada;
- r descrive la piovosità che caratterizza il sito su base annuale.

Poiché, nell'ambito dell'aggiornamento recentemente effettuato per le emissioni da traffico [4] si sono resi disponibili i data set relativi ai parchi circolanti sia nell'anno 2000 e che nel 2003, tali fattori sono stati calcolati per entrambi i periodi, consentendo pertanto di analizzare anche gli effetti del rinnovamento del parco dal 2000 al 2003. I risultati sono riportati nelle Figure 5, 6 e 7, mentre la formulazione matematica delle funzioni interpolanti stimate è riportata nella Tabella 2.

E' opportuno ricordare che il modello TREFIC implementa la metodologia europea COPERT ([8], [9]). Di conseguenza, per ogni singola classe di veicolo, equipaggiato con una specifica tecnologia, è stato stimato un appropriato fattore di emissione al variare della velocità di percorrenza. A partire da questi sono stati stimati fattori di emissione medi, rappresentativi di tutta la categoria veicolare in esame.

Per gli NOx (Figura 5) l'analisi dei fattori di emissione evidenzia che l'aumento della velocità di percorrenza al di sopra del valore soglia di 100 km/h porta ad un incremento dei fattori di emissione per tutte le classi veicolari. D'altra parte, al di sotto di tale soglia, i fattori di emissione dei mezzi commerciali pesanti presentano una diminuzione a fronte dell'aumento di tutte le altre classi veicolari.

Per quanto riguarda il PM10 direttamente emesso (Figura 6), si riscontra un aumento dei fattori di emissione all'aumentare delle velocità di percorrenza; se si considera anche il fenomeno della risospensione si ottengono valori molto più elevati, ma costanti al variare della velocità di percorrenza dei veicoli. Infine, non si hanno variazioni tra i profili del 2000 rispetto a quelli del 2003, poiché nella formula di Lohmeyer non si tiene conto della variazione della tipologia dei veicoli.

Infine, per i fattori di emissione del CO (Figura 7) viene riportato anche un secondo grafico a scala più fine, allo scopo di evidenziare le peculiarità delle diverse funzioni. Il primo grafico riporta in modo comparato i fattori di emissione di tutti i mezzi, mentre nel secondo sono raffigurati solo gli andamenti dei fattori stessi solo per le autovetture e i mezzi commerciali. L'analisi evidenzia che i valori dei fattori di emissione dei motocicli predominano rispetto agli altri; quelli delle autovetture e dei mezzi leggeri risultano essere tra loro simili, con un trend di crescita. Per i mezzi pesanti la curva dei fattori di emissione risulta invece diminuire al crescere della velocità.

La formulazione matematica dei fattori di emissione in funzione della velocità di percorrenza è stata ottenuta interpolando con una funzione di tipo polinomiale i valori calcolati ed è riportata in Tabella 2. Poiché si sono presi in considerazione parchi circolanti riferiti ad anni diversi, si evidenziano diversità anche in termini di composizione: con il rinnovamento del 2003 si riduce il numero dei veicoli maggiormente inquinanti e si registra un aumento di quelli equipaggiati con tecnologie a minore impatto sulla qualità dell'aria. Ne conseguono differenze nelle curve interpolanti essenzialmente nei parametri che le caratterizzano.

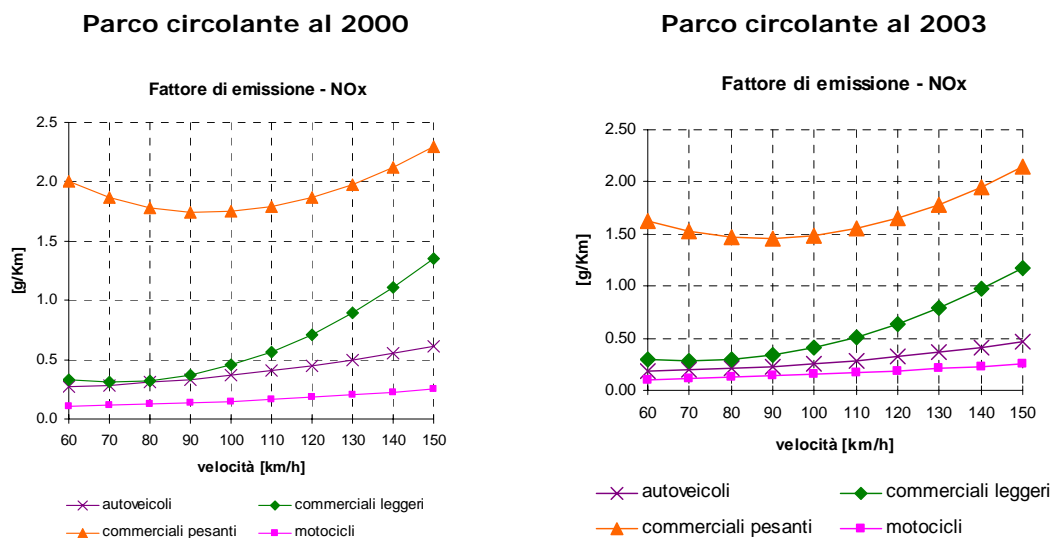
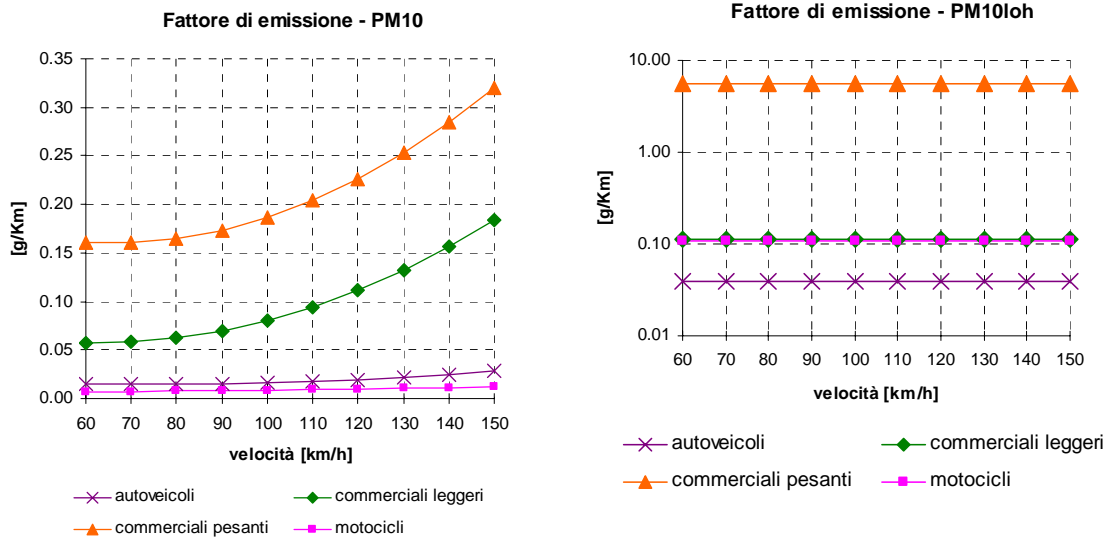


Figura 5 – Fattori di emissione autostradali per gli ossidi di azoto (NOx).

Parco circolante al 2000



Parco circolante al 2003

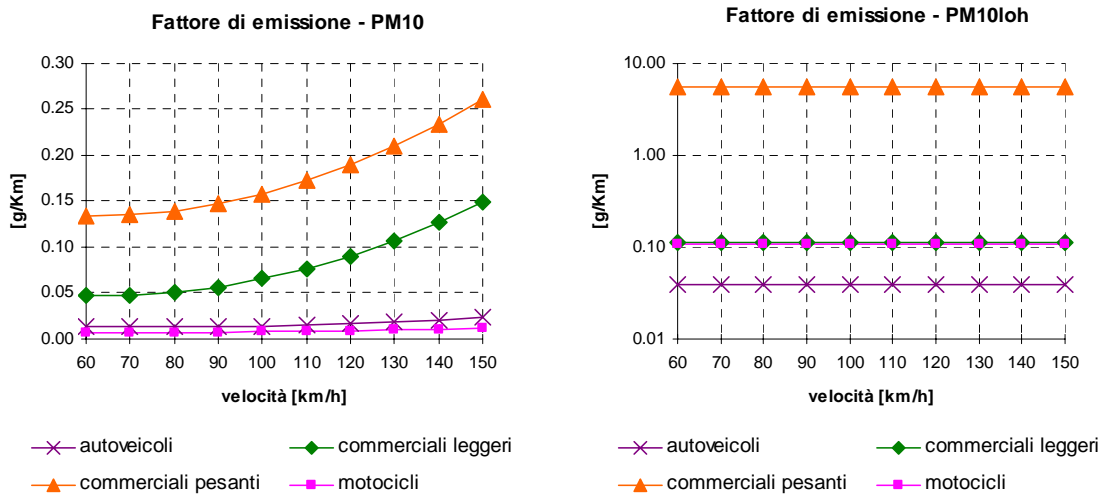
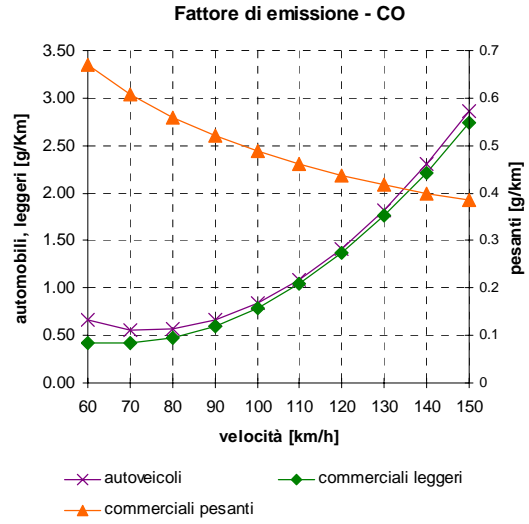
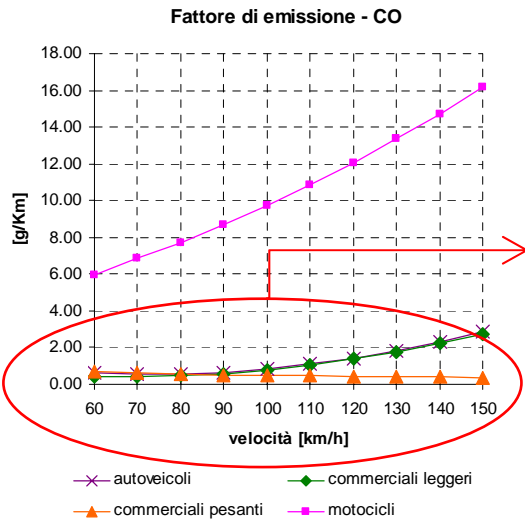


Figura 6 – Fattori di emissione autostradali per le polveri sottili senza risospensione (PM10) e con risospensione (PM10 Lohmeyer – scala logaritmica).

Parco circolante al 2000



Parco circolante al 2003

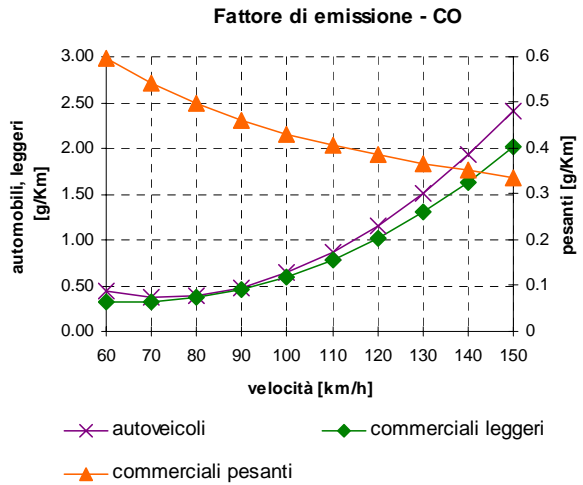
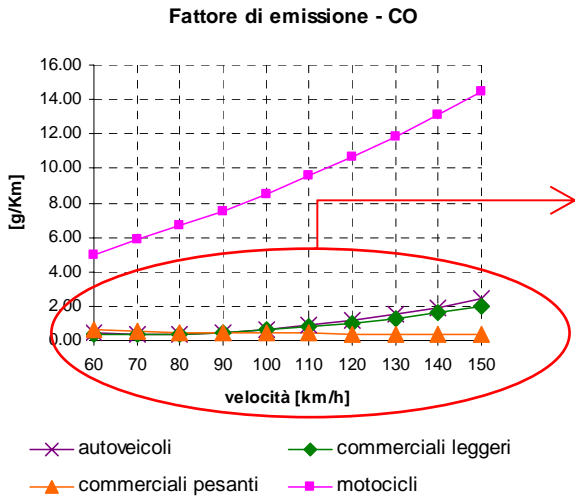


Figura 7 – Fattori di emissione autostradali per il monossido di carbonio.

Tabella 2 - Fattori di emissione in funzione della velocità (range di riferimento: 60–150 Km/h).

<i>Inquinante</i>	<i>Categoria veicolo</i>	<i>Parco circolante</i>	<i>Fattore di emissione [g/km]</i>
NOx	Autovetture	2000	$+0.0028V^2 + 0.008V + 0.2573$
		2003	$+ 0.0026V^2 + 0.0011V + 0.185$
	Commerciali leggeri	2000	$+0.0166V^2 - 0.0683V + 0.3805$
		2003	$+ 0.014V^2 - 0.0565V + 0.3454$
	Commerciali pesanti	2000	$-0.0004V^3 + 0.0263V^2 - 0.2069V + 2.1808$
		2003	$-0.0003V^3 + 0.0236V^2 - 0.1668V + 1.7685$
	Motocicli	2000	$+0.001V^2 + 0.0049V + 0.1015$
		2003	$+ 0.0011V^2 + 0.0052V + 0.098$
PM10	Autovetture	2000	$+0.0003V^2 - 0.0013V + 0.0159$
		2003	$+ 0.0002V^2 - 0.001V + 0.0139$
	Commerciali leggeri	2000	$+0.0017V^2 - 0.0044V + 0.06$
		2003	$+ 0.0013V^2 - 0.0035V + 0.0492$
	Commerciali pesanti	2000	$+0.0022V^2 - 0.0066V + 0.1645$
		2003	$+ 0.0016V^2 - 0.0038V + 0.1359$
	Motocicli	2000	$+5E-5V^2 + 3E-5V + 0.0071$
		2003	$+3E-5V^2 + 0.0001V + 0.0064$
PM10 Lohmeyer	Autovetture	2000	0.040
		2003	0.040
	Commerciali leggeri	2000	0.111
		2003	0.111
	Commerciali pesanti	2000	5.475
		2003	5.475
	Motocicli	2000	0.108
		2003	0.108
CO	Autovetture	2000	$+0.001V^3 + 0.0228V^2 + 0.7773V + 5.1594$
		2003	$-0.0002V^3 + 0.0378V^2 - 0.1679V + 0.5605$
	Commerciali leggeri	2000	$+0.0333V^2 - 0.1092V + 0.499$
		2003	$+0.0235V^2 - 0.072V + 0.371$
	Commerciali pesanti	2000	$-0.0002V^3 + 0.0065V^2 - 0.0774V + 0.7403$
		2003	$-0.0007V^3 + 0.0092V^2 - 0.0794V + 0.6686$
	Motocicli	2000	$+0.001V^3 + 0.0228V^2 + 0.7773V + 5.1594$
		2003	$+0.001V^3 + 0.0198V^2 + 0.7249V + 4.2712$

Le emissioni

Nel seguito sono riportate le stime delle emissioni di NO_x (Figura 8), di PM₁₀ (Figure 9 e 10) e di CO (Figura 10) per i soli tratti autostradali compresi nel dominio di Figura 1, ponendo a confronto i trend stimati per il parco al 2000 con quelli aggiornati al 2003.

Sul tratto autostradale in esame, le automobili sono la fonte principale delle emissioni di NO_x rilasciate in atmosfera, mentre il contributo percentualmente meno significativo è attribuibile alla circolazione dei motocicli. Relativamente ai mezzi commerciali, si osserva che le emissioni dovute ai mezzi leggeri presentano una rapida crescita oltre i 100 km/h, mentre quelle dovute ai mezzi pesanti, che peraltro hanno per legge limiti di velocità propri, restano pressoché costanti. Nel confronto fra i due parchi circolanti esaminati, pur risultando maggiori le quantità di inquinanti emesse calcolate per il parco al 2000, si osservano comportamenti qualitativamente simili al variare della velocità.

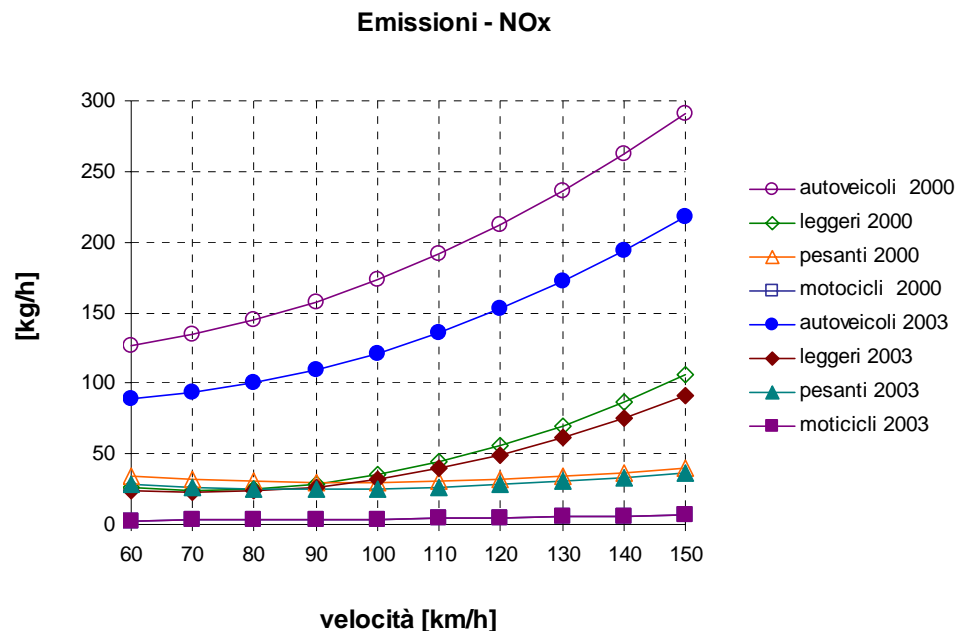


Figura 8 - Stima delle emissioni di NO_x al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato.

Anche l'apporto più consistente alle emissioni totali di polveri sottili è dovuto alle automobili che transitano a velocità al di sotto de 130 km/h; infatti, oltre tale soglia, prevale il contributo dovuto ai mezzi commerciali leggeri che cresce più rapidamente fino a superare il contributo degli autoveicoli; tale superamento è maggiormente evidente per il parco circolante al 2000. E' opportuno osservare che oltre i 110 km/h le emissioni dei mezzi commerciali leggeri calcolate con il parco al 2000, superano quelle riferite al 2003. Considerando anche il fenomeno del risolleciamento con la formula di Lohmeyer, l'apporto maggiore alle emissioni è attribuibile ai mezzi commerciali pesanti, il cui contributo supera di un ordine di grandezza i contributi degli altri mezzi circolanti.

Emissioni - PM10

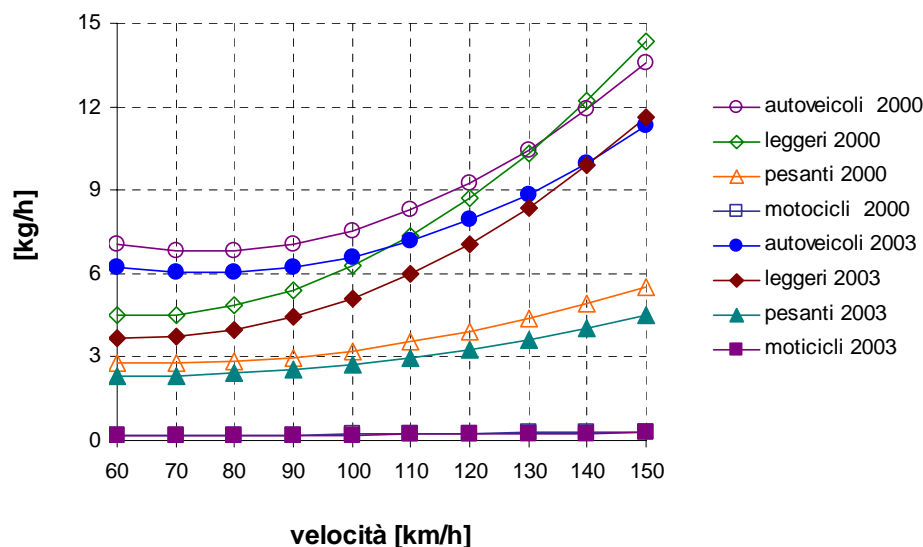


Figura 9 - Stima delle emissioni di PM10 al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato.

Emissioni - PM10_{10h}

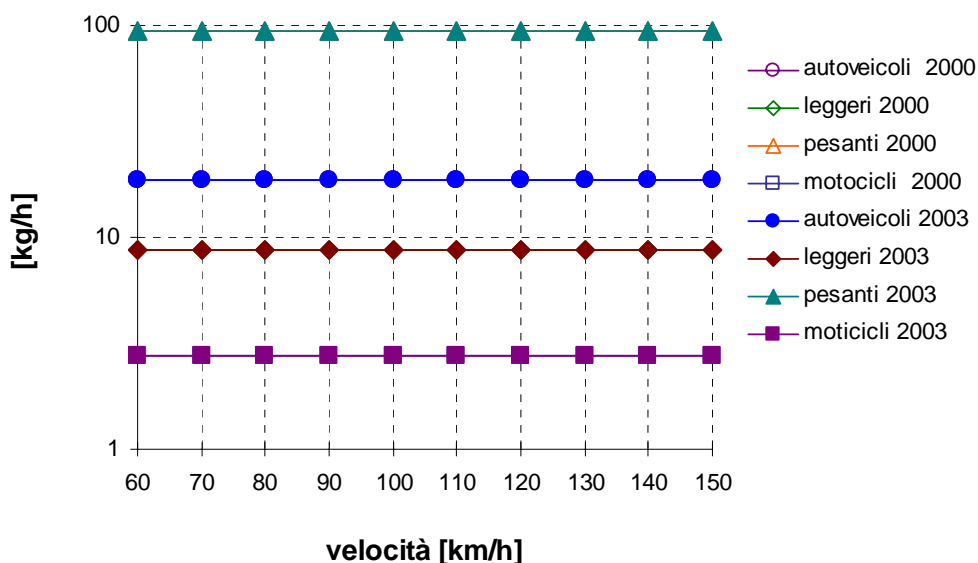


Figura 10 - Stima delle emissioni di PM10 comprensivo di risospensione al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato (ordinate in scala logaritmica)

Relativamente al monossido di carbonio, si osserva che le emissioni degli autoveicoli presentano una prima diminuzione per velocità inferiori a 70km/h, seguita da una rapida crescita al crescere della velocità. I motocicli presentano un trend di crescita quasi lineare, all'aumentare della velocità. Il contributo dei mezzi commerciali pesanti è del tutto trascurabile.

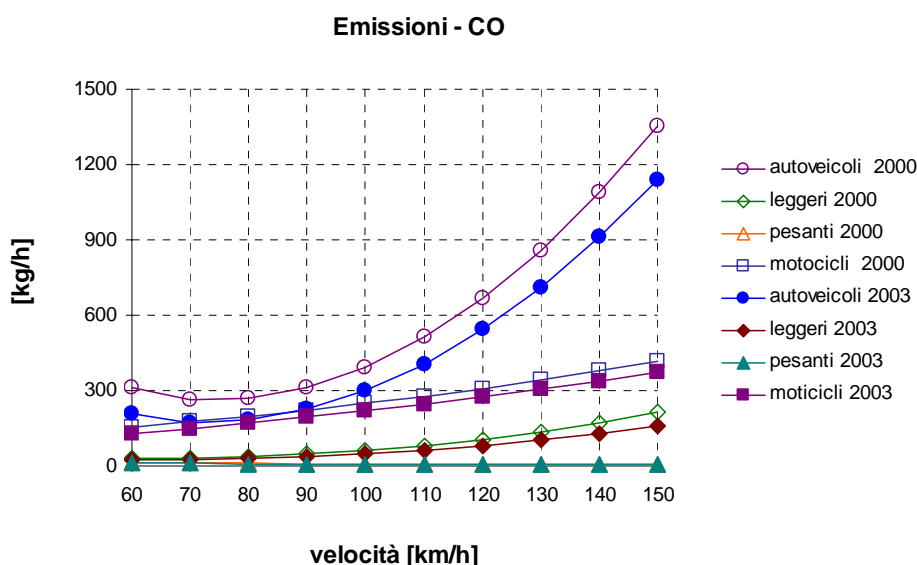


Figura 11 - Stima delle emissioni di CO al variare della velocità per le diverse tipologie di veicoli circolanti sul tratto di autostrada A4 esaminato.

Al fine di quantificare le conseguenze di un'eventuale riduzione del limite massimo di percorrenza sulle arterie autostradali, sono state calcolate:

- le emissioni complessive sul tratto di autostrada A4 al variare della velocità di percorrenza;
- la loro variazione percentuale rispetto al valore limite di 130 km/h, che rappresenta il limite massimo di percorrenza attualmente in vigore per automobili, mezzi commerciali leggeri e motocicli.

La Tabella 3 presenta i risultati ottenuti: riducendo progressivamente di 10 km/h il limite massimo di velocità di percorrenza, le emissioni complessive variano significativamente sino ad arrivare a diminuzioni di circa il 40% per NOx e PM10, e 60% per CO quando la velocità massima di percorrenza è fissata ad 80 km/h.

Tabella 3 - Emissioni veicolari complessive sul tratto di autostrada A4 esaminato al variare della velocità massima di percorrenza e loro variazione % rispetto al limite di 130 km/h (dati al 2003).

Emissioni	Massima velocità di percorrenza [km/h]											
	130		120		110		100		90		80	
	kg/h	Δ%	kg/h	Δ%	kg/h	Δ%	kg/h	Δ%	kg/h	Δ%	kg/h	Δ%
NOx	269		235	-13%	206	-23%	183	-32%	165	-39%	152	-43%
PM10	21		18	-12%	16	-23%	15	-31%	13	-37%	13	-40%
PM10 Lohmeyer	125		125	-	125	-	125	-	125	-	125	-
CO	1122		902	-20%	719	-36%	573	-49%	464	-59%	392	-65%

Infine, allo scopo di consentire un'ulteriore confronto fra i risultati, le Figure 12, 13, 14 e 15 illustrano graficamente gli andamenti delle emissioni dei diversi inquinanti, stimate per ogni categoria di veicolo, in funzione della velocità massima di percorrenza.

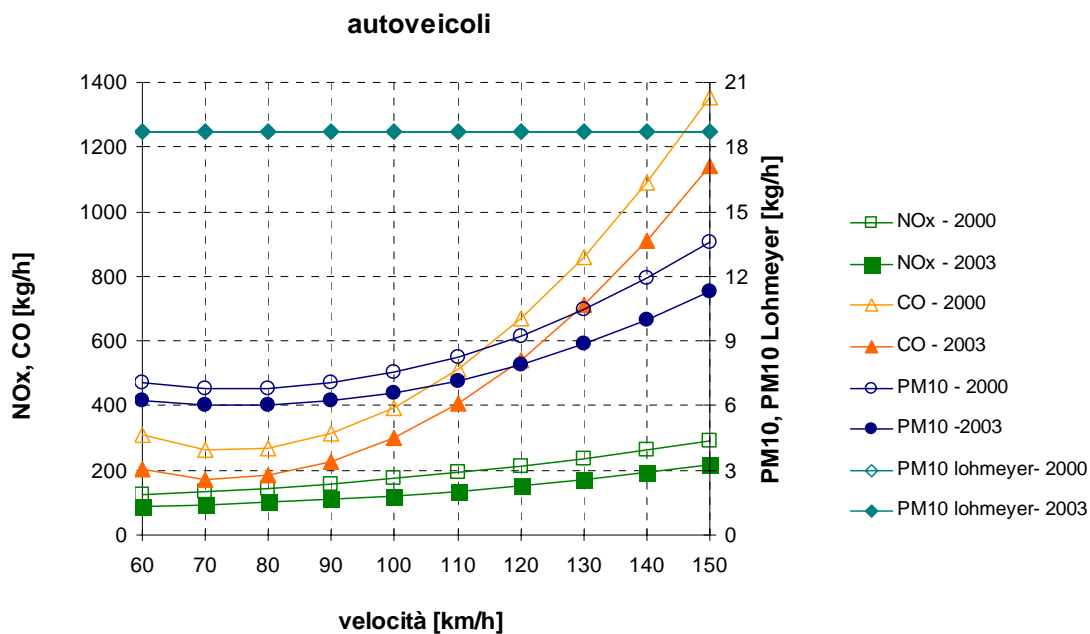


Figura 12 - Emissioni per categoria veicolare: autoveicoli.

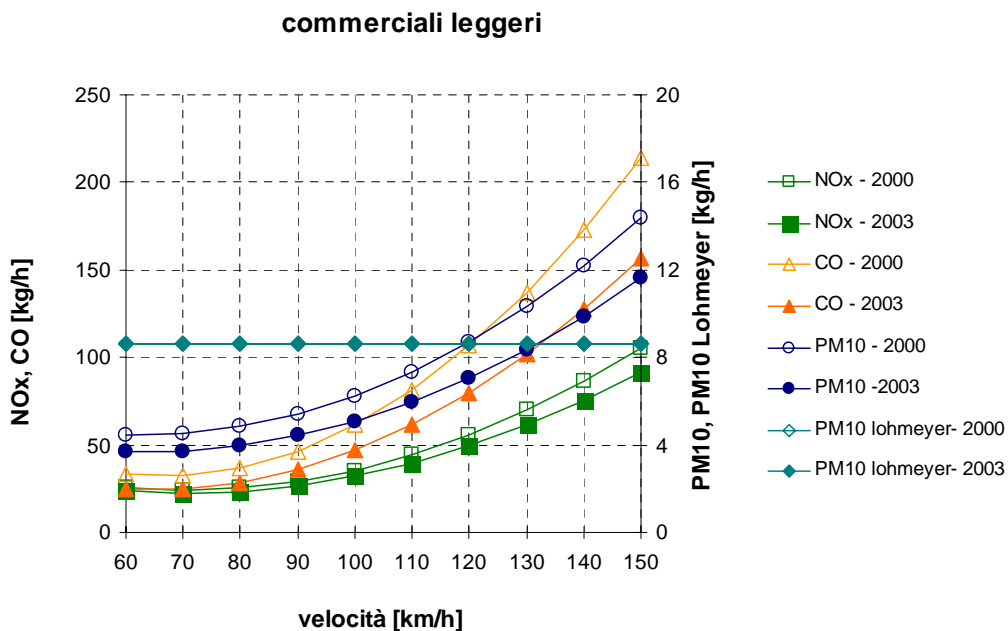


Figura 13 - Emissioni per categoria veicolare: veicoli commerciali leggeri.

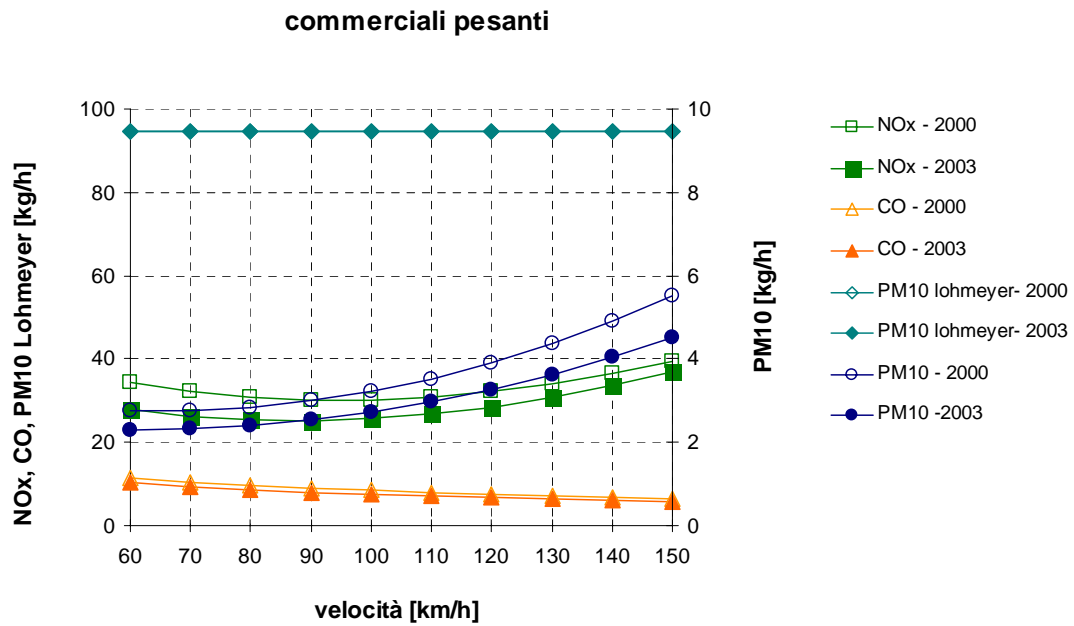


Figura 14 - Emissioni per categoria veicolare: veicoli commerciali pesanti.

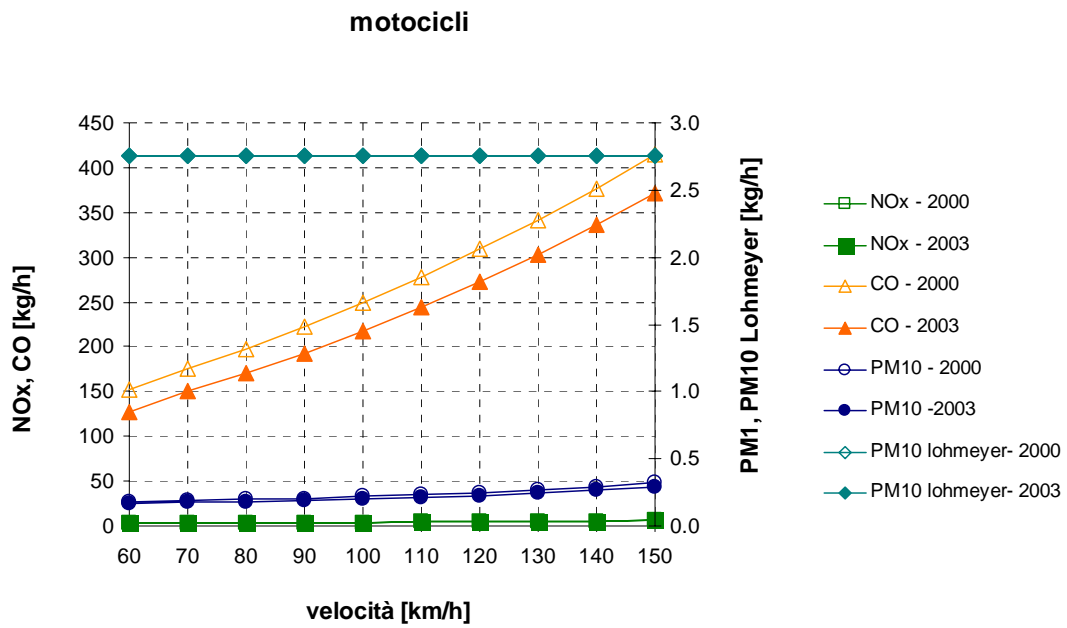


Figura 15 - Emissioni per categoria veicolare: motocicli.

Simulazioni dell'impatto sulla qualità dell'aria

Al fine di valutare i benefici sulla qualità dell'aria derivanti dalla variazione di velocità massima di percorrenza in autostrada sono state effettuate, con il modello gaussiano ARIA Impact™ [10], delle simulazioni modellistiche dell'impatto medio annuale del solo traffico veicolare sul dominio preso in esame (Figura 1).

Nel seguito viene prima mostrato in modo comparato l'impatto sulla qualità dell'aria del territorio esaminato conseguente all'adozione di ridotti limiti di velocità di percorrenza nel tratto autostradale.

Successivamente vengono poste a confronto le riduzioni di concentrazioni dei diversi inquinanti conseguenti all'adozione di provvedimenti di contenimento della circolazione sulle sole strade comunali, provinciali e statali dell'area critica bresciana rispetto a provvedimenti limitati ai soli tratti autostradali.

Valutazione dell'impatto di riduzione della velocità massima in autostrada

Poiché attualmente in Italia la velocità massima dei veicoli in autostrada è fissata a 130 km/h, è stata effettuata una simulazione modellistica imponendo tale limite massimo di percorrenza. Le altre ipotesi alla base della simulazione sono di seguito elencate:

- i parametri meteorologici di interesse sono ricavati dai dati della stazione di misura situata a Verziano, nella parte meridionale del dominio;
- le emissioni dovute al traffico veicolare in autostrada sono calcolate sulla base del parco circolante in Italia stimato al 2000.

L'impatto sul territorio ottenuto in corrispondenza a tale scenario è illustrato graficamente nelle Figure 16, 17 e 18 rispettivamente per gli ossidi di azoto, le polveri sottili (senza e con termine di risospensione). I valori massimi per le concentrazioni di ossidi di azoto arrivano sino a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ circa; si può osservare che i livelli di concentrazione delle polveri variano di un ordine di grandezza a seconda che si consideri o meno il fenomeno della risospensione: la concentrazione massima del PM10 passa dai 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a circa 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le mappe di isoconcentrazione al suolo mettono in evidenza che i valori massimi sono raggiunti nella parte del dominio corrispondente all'asse viario autostradale che attraversa il territorio in esame, mentre i valori minimi di concentrazione calcolati sono localizzati nelle aree periferiche, principalmente nella parte settentrionale.

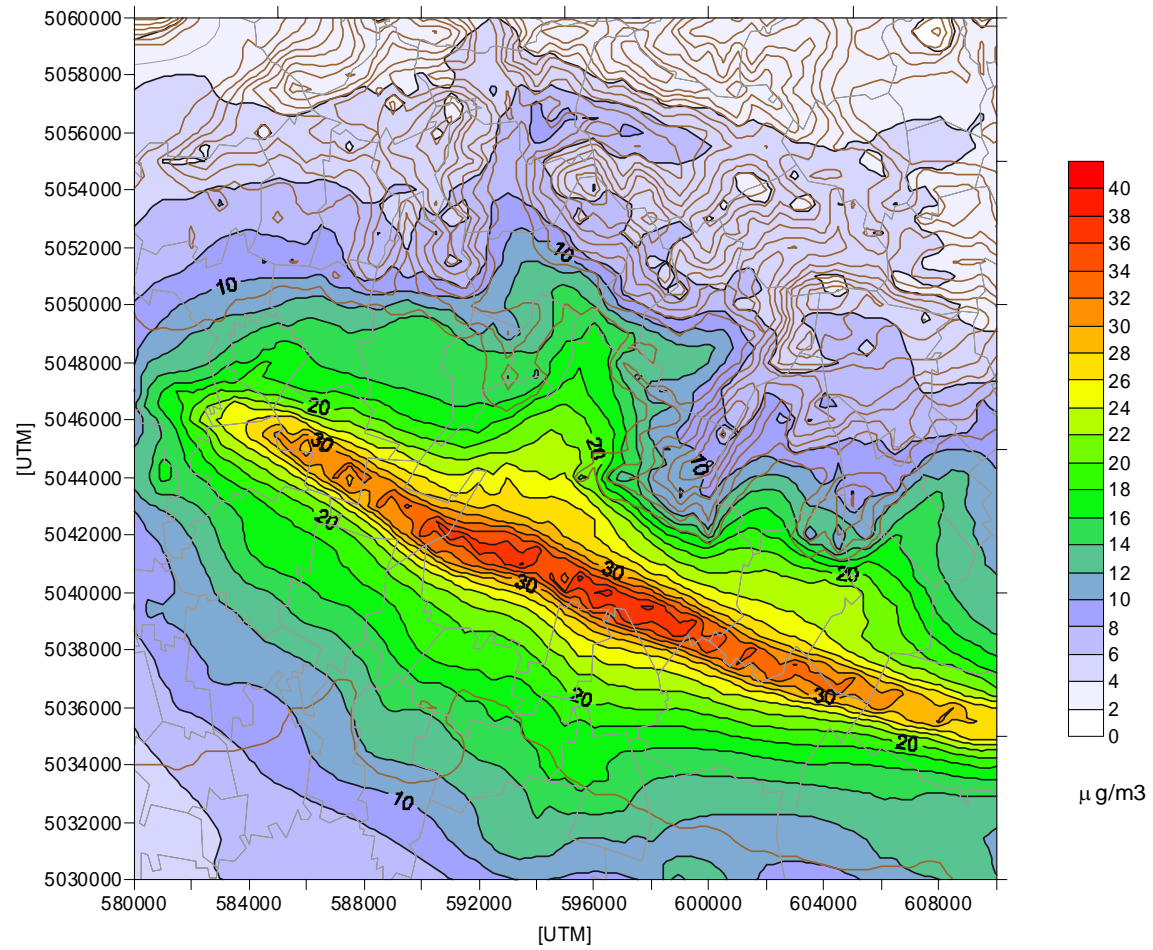


Figura 16 - Concentrazione media annuale di NOx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 130 km/h).

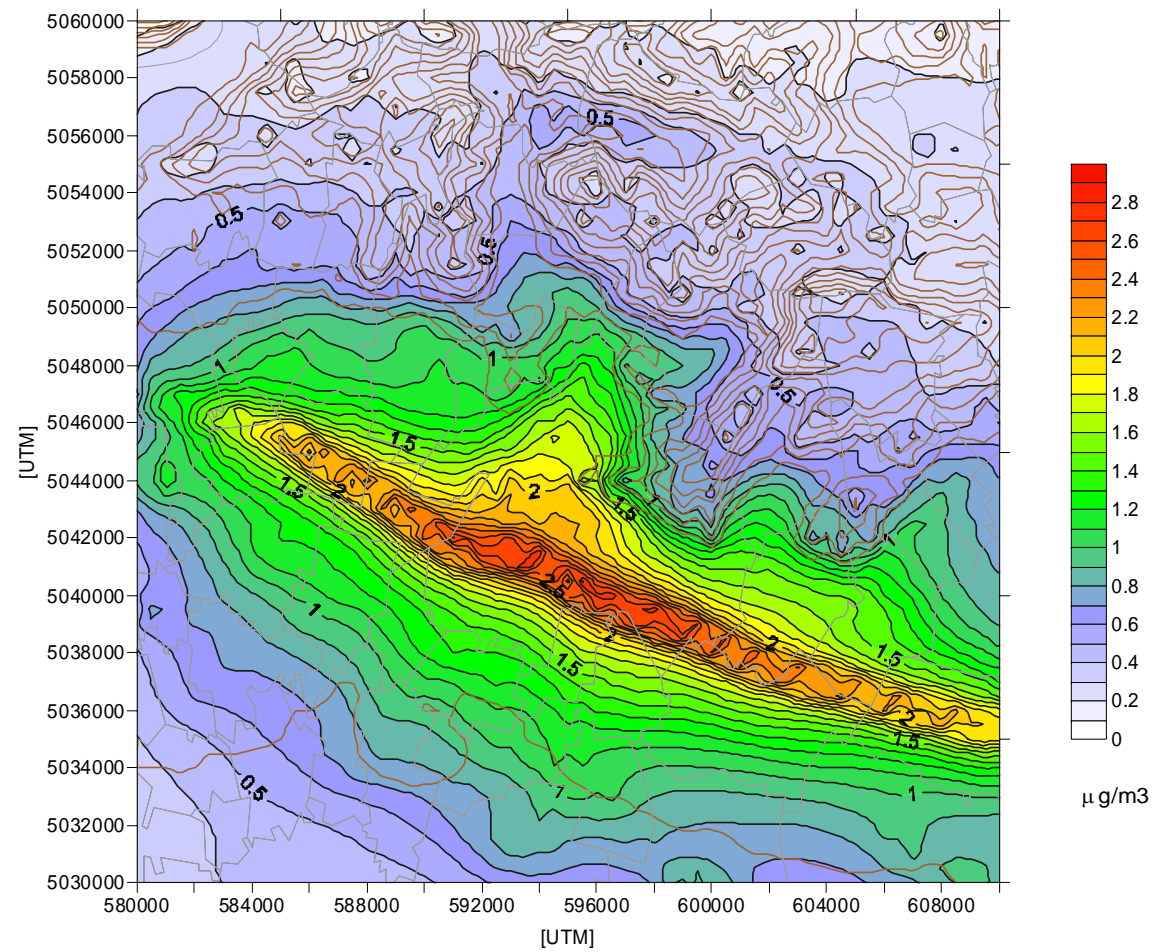


Figura 17 - Concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 130 km/h).

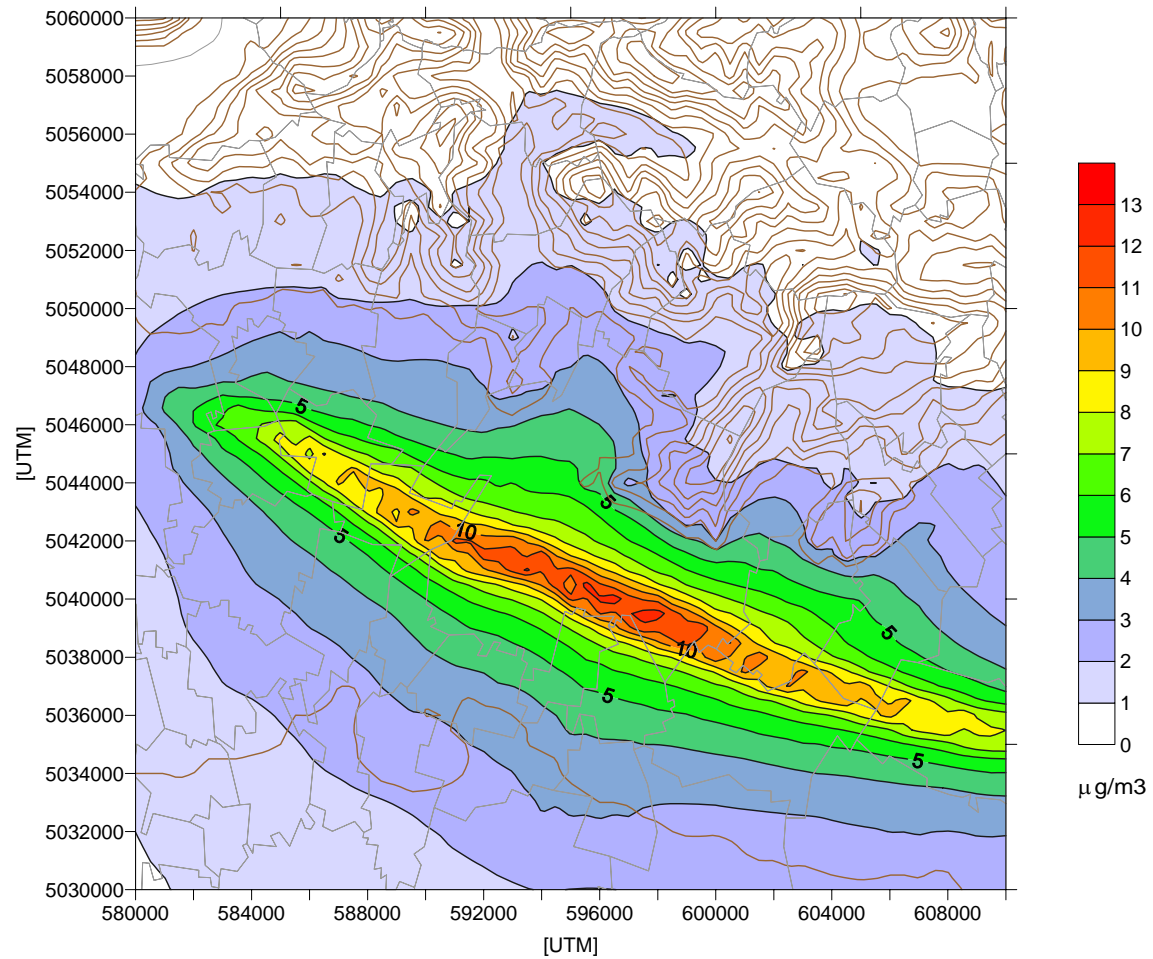


Figura 18 - Concentrazione media annuale di PM10 Lohmeyer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 130 km/h).

Per valutare l'effetto in termini di qualità dell'aria della limitazione di velocità sono state predisposte due simulazioni in cui la massima velocità di percorrenza in autostrada è stata fissata rispettivamente a 110 km/h e a 90 km/h. In Tabella 2 sono state presentate le corrispondenti variazioni per le emissioni

L'effetto sui livelli di concentrazione degli inquinanti sul dominio è stato valutato per le due ipotesi di riduzione, rispettivamente da 130 km/h a 110 km/h e da 130 km/h a 90 km/h, calcolando la variazione delle concentrazioni ($\Delta c\%$), definita come:

$$\Delta C_i \% = \left\{ 100 \times \frac{C_i - C_{130}}{C_{130}} \right\}$$

dove c_i è la concentrazione media annuale calcolata utilizzando i dati emissivi dello scenario preso in esame e c_{130} è la concentrazione media annuale che si ottiene quando la velocità massima in autostrada è pari a 130 km/h.

Nelle Figure 19 e 20 sono riportate le variazioni che si ottengono per gli ossidi di azoto e per le polveri direttamente emesse. E' opportuno ricordare che nel caso del risollevarimento, stimato con la formula di Lohmeyer, le stime delle emissioni non dipendono dalla velocità e quindi le variazioni risultano essere nulle.

Analizzando le mappe si osserva che per la riduzione di 20 km/h al di sotto dell'attuale limite di velocità, ossia passando da 130 km/h a 110 km/h, le massime variazioni percentuali sono pari al 17% per gli NOx e al 19% per le polveri. Le variazioni massime risultano in corrispondenza del tratto di autostrada A4 sud-orientale, mentre nel territorio comunale di Brescia le variazioni raggiungono il 7%.

Nel secondo caso esaminato, ovvero se la velocità massima varia da 130 km/h a 90 km/h, si ha una riduzione massima delle concentrazioni dell'ordine del 30 %, sia per gli ossidi di azoto che per le polveri. In questo caso le riduzioni all'interno del Comune di Brescia arrivano ad un massimo del 17%.

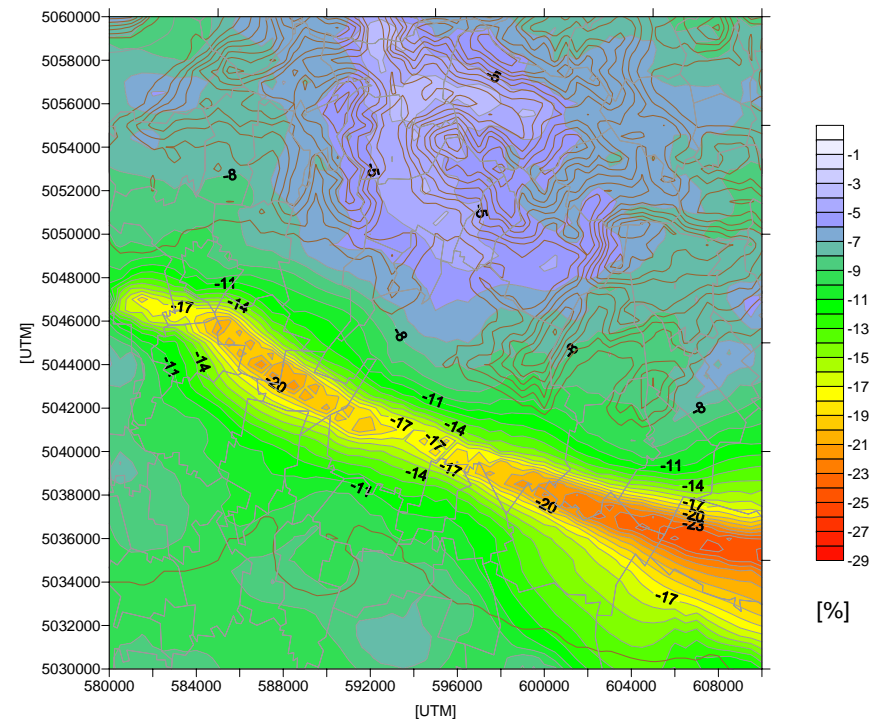
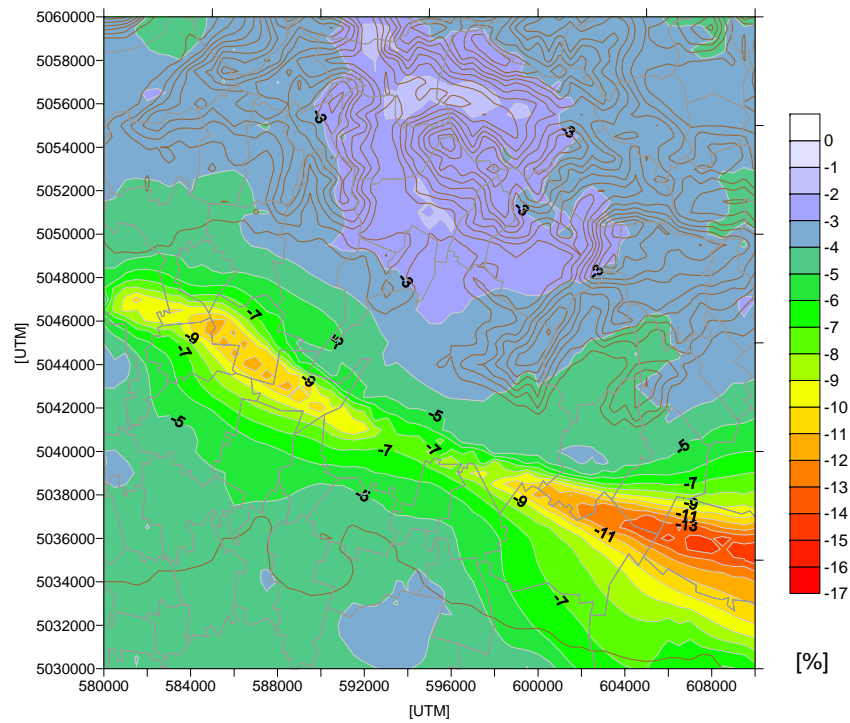


Figura 19 – Variazione percentuale delle concentrazioni medie annuali di NOx conseguenti alla riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 130 km/h a 110 km/h (sinistra) e da 130 km/h a 90 km/h (destra).

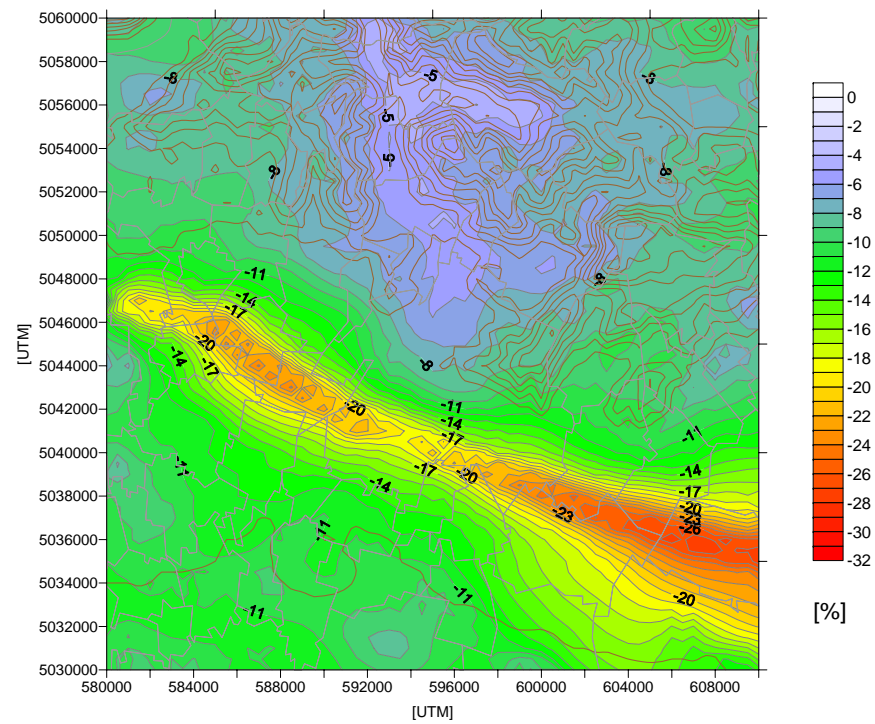
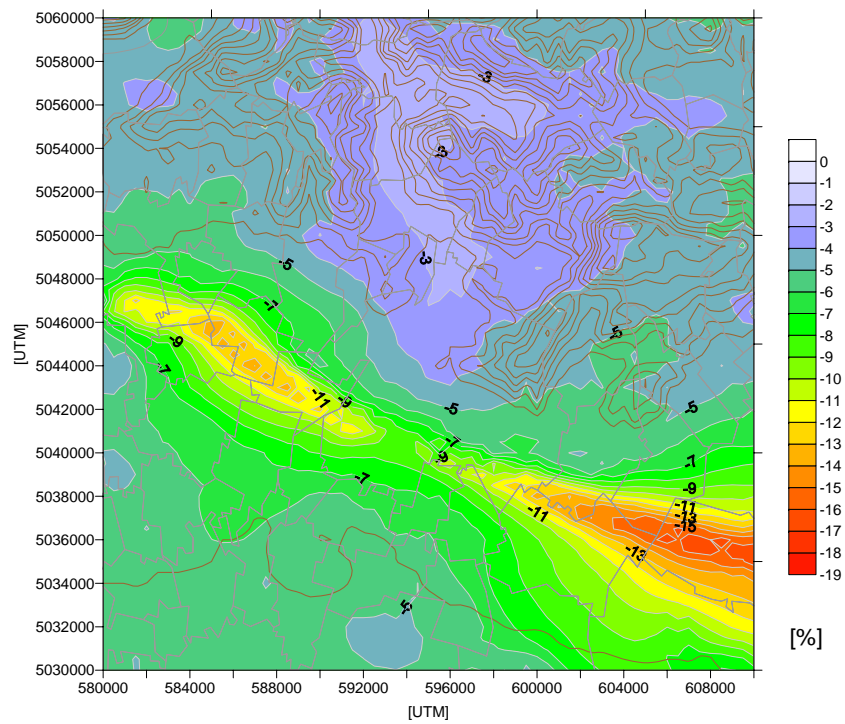


Figura 20 – Variazione percentuale delle concentrazioni medie annuali di PM10 conseguenti alla riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 130 km/h a 110 km/h (sinistra) e da 130 km/h a 90 km/h (destra).

Confronto con una politica di limitazione alla circolazione su strade urbane

Gli effetti sul dominio esaminato della limitazione della velocità massima di percorrenza in autostrada sono ora posti a confronto con quelli ottenibili da provvedimenti limitativi alla circolazione su strade urbane, provinciali e statali.

In particolare, è stato preso in esame lo scenario che prevede la circolazione dei veicoli a targhe alterne nei comuni dell'area critica bresciana [4]. L'analisi sul territorio comunale ha portato alla stima di una riduzione del 40% dei veicoli nei tratti di rete limitati dal provvedimento.

Lo scenario è stato quindi predisposto ipotizzando una riduzione del 40% per:

- le emissioni relative alla circolazione urbana del Comune di Brescia;
- le emissioni relative alla circolazione sulle strade extraurbane all'interno dell'Area Critica di Brescia;
- le emissioni relative al traffico diffuso all'interno dell'Area Critica.

Poiché nello studio presentato in [4] è stata ipotizzata una velocità massima di percorrenza in autostrada di 110 km/h, il confronto tra le due politiche di limitazione del traffico è stato effettuato con riferimento a tale velocità massima.

Pertanto vengono messi a confronto sull'intero dominio di Figura 1 i seguenti scenari di traffico autoveicolare:

- a) circolazione a targhe alterne nell'area critica bresciana, con velocità massima in autostrada pari a 110 km/h;
- b) limitazione della velocità massima a 90 km/h solo in autostrada.

Nelle Figure 21 e 23 vengono presentate, rispettivamente per gli ossidi di azoto e per le polveri sottili, le distribuzioni spaziali delle concentrazioni medie annuali al suolo simulate per lo scenario di riferimento. Le Figure 22 e 24 presentano la distribuzione spaziale delle riduzioni di concentrazione simulate in corrispondenza degli scenari a) e b).

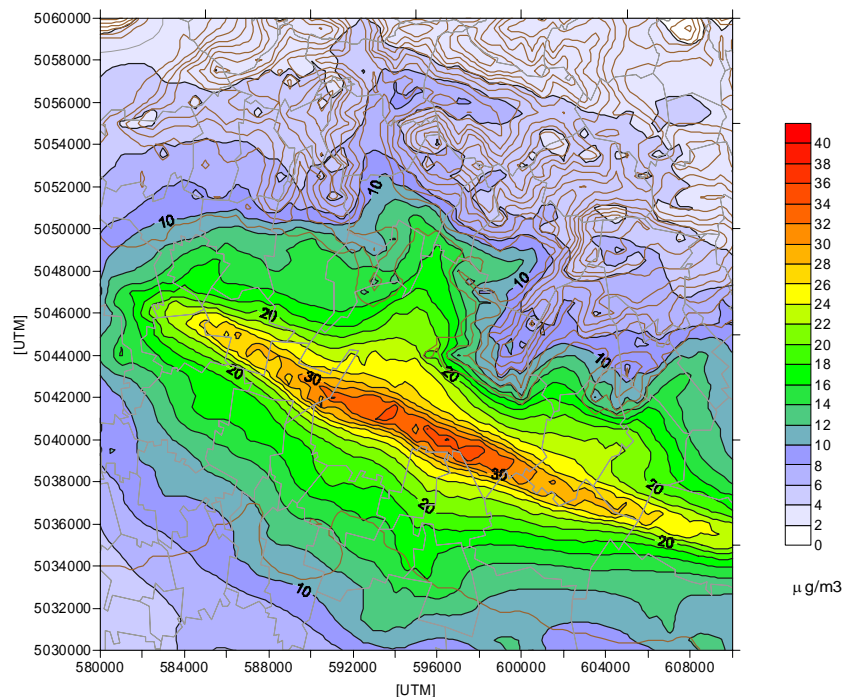


Figura 21 – Concentrazione media annuale di NO_x (µg/m³) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 110 km/h).

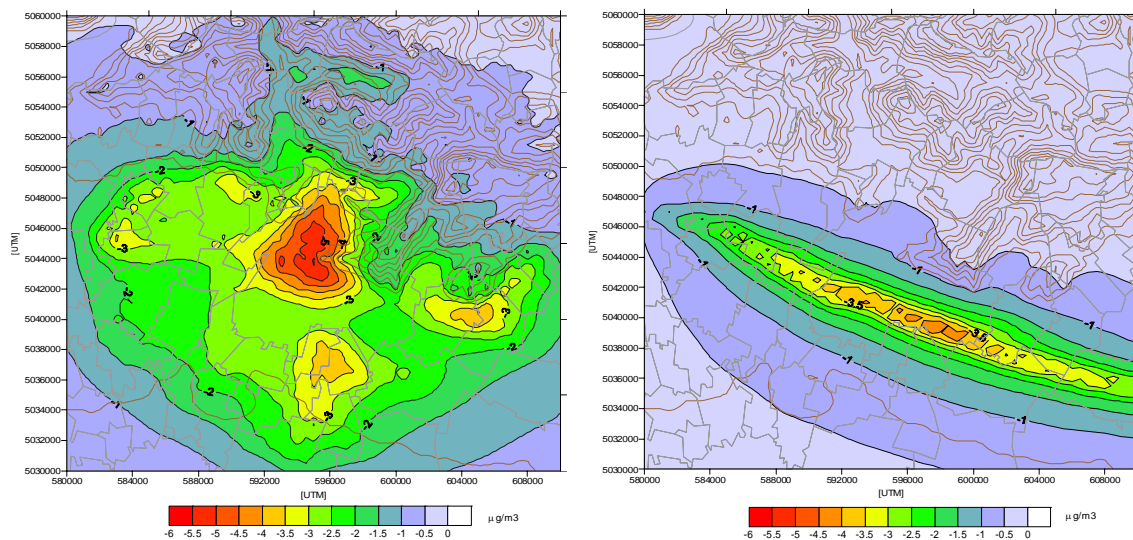


Figura 22 – Variazione percentuale delle concentrazioni medie annuali di NO_x: riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 110 km/h a 90 km/h (destra) e all'adozione del provvedimento di circolazione a targhe alterne (sinistra).

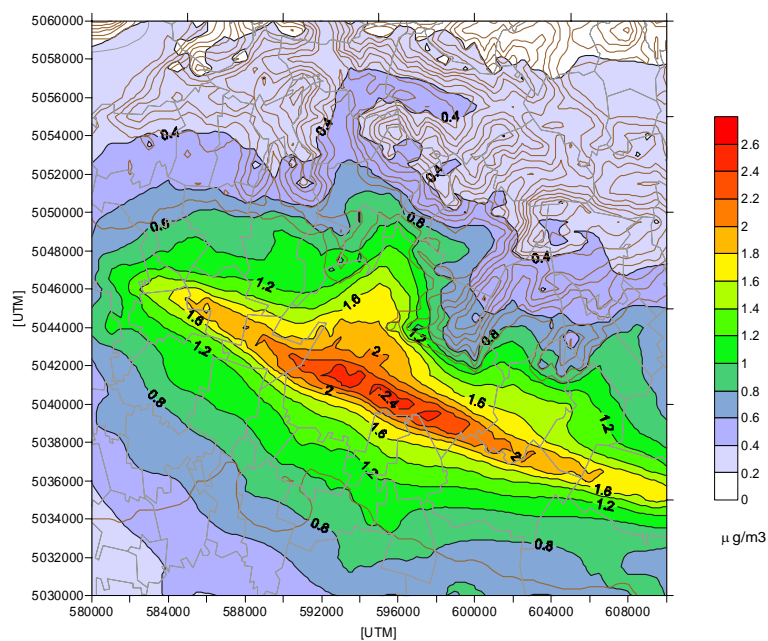


Figura 23 – Concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) attribuibile al solo traffico veicolare nel dominio (velocità massima in autostrada: 110 km/h).

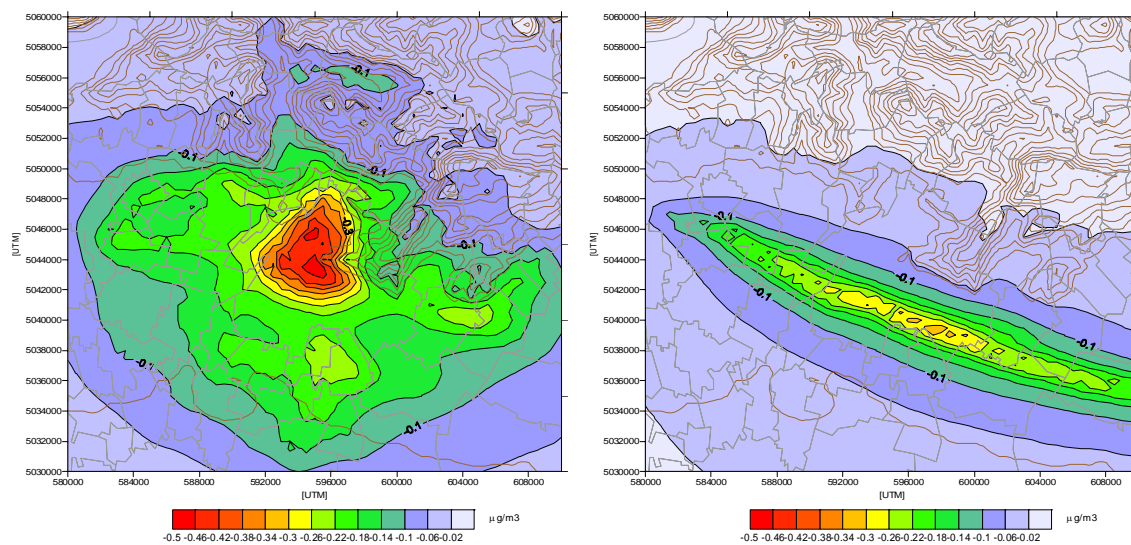


Figura 24 –Variazione delle concentrazioni medie annuali di PM10: riduzione della velocità dei veicoli in autostrada da 110 km/h a 90 km/h (destra) e all'adozione del provvedimento di circolazione a targhe alterne (sinistra).

Conclusioni

Lo studio ha avuto come oggetto la stima dei fattori di emissione e delle emissioni in autostrada e dell'impatto sulla qualità dell'aria, al fine di fornire supporto ai Manager Ambientali nella definizione di possibili misure di contenimento delle emissioni inquinanti in atmosfera, tramite la regolamentazione della velocità massima di percorrenza di tali arterie stradali. E' stato preso in esame il tratto di autostrada A4 prossimo all'area urbana di Brescia che costituisce una delle sorgenti principali delle emissioni di ossidi di azoto e polveri fini nell'area considerata.

A partire dalle informazioni relative alla composizione del parco circolante in Italia (parco circolante al 2000 e al 2003), attraverso il modello di calcolo TREFIC, sono stati sia stimati i fattori di emissione relativi agli autoveicoli, ai mezzi commerciali leggeri e pesanti e ai motocicli per gli NOx, il PM10 ed CO che le emissioni di tali inquinanti in atmosfera.

L'analisi dei fattori di emissione al variare della velocità ha messo in evidenza i seguenti punti:

- Per gli ossidi di azoto la velocità massima di 100 km/h può essere assunta come soglia critica. Al di là di tale valore, infatti, si osserva una crescita dei valori dei fattori di emissione di tutte le tipologie di veicoli esaminati; particolarmente variegato è il comportamento dei mezzi commerciali: per quelli leggeri è stata identificata una curva di crescita di tipo quadratico, mentre per quelli pesanti la curva interpolante è di tipo cubico.
- I fattori di emissione delle polveri sottili direttamente emesse dipendono, per tutte le categorie di veicoli, dalla velocità massima di percorrenza attraverso una funzione di tipo quadratica: si osserva dunque un aumento sempre maggiore al crescere della velocità di percorrenza. Il fattore di emissione per le polveri che tiene conto anche del risollevarimento calcolato con la formula di Lohmeyer, pur risultando indipendente dalla velocità dei veicoli, risulta maggiore rispetto a quello calcolato senza risospensione.
- Per quanto riguarda i fattori di emissioni del monossido di carbonio, l'analisi ha evidenziato due diversi comportamenti: per autoveicoli, mezzi commerciali leggeri e motocicli si registra un aumento dei fattori di emissione al crescere della velocità; al contrario per i mezzi pesanti, con l'aumento della velocità si ha una diminuzione dei ratei di emissione. Inoltre si osserva che per questo inquinante il contributo maggiormente critico è quello dei motocicli.

Il confronto fra i profili di emissione stimati con il parco circolante all'anno 2000 e quelli al 2003 evidenziano trend simili. D'altra parte, l'analisi delle emissioni stimate per il tratto preso in esame di autostrada A4 ha evidenziato che il rinnovamento del parco circolante porta a riduzioni delle emissioni per tutti gli inquinanti esaminati.

Per quanto riguarda poi le concentrazioni al suolo, le simulazioni modellistiche di impatto effettuate con il modello gaussiano ARIA Impact™ hanno consentito di valutare i possibili benefici derivanti da una riduzione delle velocità massime di percorrenza dei veicoli in autostrada. L'analisi ha messo in evidenza che una riduzione della velocità dei veicoli che transitano in autostrada porta un miglioramento della qualità dell'aria, sia in termini di NOx che di PM10, crescente al diminuire del limite di velocità da 130 a 90 Km/h prevalentemente nelle aree più prossime all'asse autostradale.

Infine, gli effetti sul dominio esaminato della limitazione della velocità massima di percorrenza in autostrada sono posti a confronto con quelli ottenibili da

provvedimenti limitativi alla circolazione su strade urbane, provinciali e statali. In particolare, è stato preso in esame lo scenario che prevede la circolazione dei veicoli a targhe alterne nei comuni dell'area critica bresciana.

Come era prevedibile, riducendo la velocità di percorrenza in autostrada l'area che presenta i benefici maggiori è essenzialmente estesa alle vicinanze dell'arteria autostradale stessa. D'altra parte, il provvedimento di circolazione a targhe alterne interessa maggiormente le aree urbanizzate. È opportuno ricordare che tutte le simulazioni sono state effettuate ipotizzando che i provvedimenti rimanessero in vigore con continuità in tutti i giorni dell'anno solare 2000.

Bibliografia

- [1] Regione Lombardia, (2006). INEMAR (INventario EMISSIONI ARia)
<http://www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/inemarhome.htm>
- [2] Finzi, G., Volta, M., Capretti, A. (2004). Studio di Dispersione Atmosferica di Inquinanti Emessi sul Territorio Bresciano. Rapporto Tecnico, Comune di Brescia, Università degli Studi di Brescia.
- [3] Finzi, G., Volta, M., Capretti, A. (2006) "Studio modellistico dell'incidenza delle emissioni industriali sulla distribuzione degli ossidi di azoto in atmosfera nel territorio bresciano", *Automazione e Strumentazione*, Vol. LIV(2), p. 86-93.
- [4] Finzi, G., Gabusi, V., Volta, M. (2006) Aggiornamento dell'analisi modellistica della dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi sul territorio bresciano e simulazione di scenari emissivi. Università degli Studi di Brescia.
- [5] Duering, I., Schulze, E., Jacob, J., Reichenbaecher, W., Lohmeyer, A. (2002) "Estimation of the 'non-exhaust pipe' PM10 emissions of streets for practical traffic air pollution modelling", Proc. From the 8th Int. Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes.
- [6] US Environmental Protection Agency (1993) "Emission factor documentation for AP-42": <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0201.pdf>
- [7] ARIANET (2005). TREFIC („Traffic Emission Factor Improved Calculation“) – User Manual (version 4.0). Rapporto ARIANET R2005.02.
- [8] Kouridis, C., Ntziachristos, L., Samaras, Z. (2000). COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport - User manual, European Environment Agency Technical report No 50.
- [9] Ntziachtistos, L., Samaras, Z. (2000). COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport – Methodology and emission factors (version 2.1). European Environment Agency Technical report No 49.
- [10] ARIA Technologies (2005). General Design and User's Manual – ARIA Impact v. 1.4. Rapporto ARIA/2005.023