Effettuazione di simulazioni relative a scenari di riduzione dei veicoli diesel nella città di Milano

Autori

G. Calori, A. Nanni, N. Pepe, C. Silibello

Riferimento

ARIANET R2018.18

Dicembre 2018

ARIANET s.r.l. | via Gilino, 9 - 20128 Milano (MI) - ITALY | tel. +39-02/27007255 | fax +39-02/25708084 |
e-mail: info@aria-net.it | pec: arianet@pec.it web:www.aria-net.it
Cap. Soc. E 90.000,00 • R.E.A. n° 1635752 | Codice Fiscale e Partita IVA 03079010967

Rapporto ARIANET R2018.18

Autori: G. Calori, A. Nanni, N. Pepe, C. Silibello

Cliente:

Associazione Cittadini per l'aria

Via Lentasio, 9 - 20122 Milano (MI)

Sommario

Sintesi **1**

1. Introduzione e scopo del lavoro **3**

2. Descrizione dominio di calcolo e del modello utilizzato **5**

3. Emissioni **7**

3.1 Inventario INEMAR 7

3.2 STIMA DELLE EMISSIONI INQUINANTI IN ATMOSFERA DAL TRAFFICO STRADALE NEL COMUNE DI MILANO 12

4. Risultati delle simulazioni **20**

5. Conclusioni **29**

Bibliografia **30**

Appendice A – Il Sistema Modellistico utilizzato **31**

A.1. Componenti del sistema modellistico 31

A.2. Calibrazione del modello di dispersione 33

A.3. Stima delle concentrazioni medie annuali 37

Sintesi

Il settore **"Trasposto su strada"** rappresenta il **74%** delle **emissioni di ossidi di azoto** ($NOx=NO+NO_2$) che insistono sul Comune di Milano ed i **veicoli alimentati a gasolio** contribuiscono per circa il **93%** a tali emissioni (fonte INventario EMissioni Aria – INEMAR – Regione Lombardia). A partire da tali dati, l'Associazione Cittadini per l'aria ha richiesto ad ARIANET di stimare l'impatto delle emissioni di veicoli alimentati a gasolio circolanti nell'area urbana milanese sulle concentrazioni medie annuali di NO_2. Ciò è stato effettuato mediante un complesso sistema modellistico che tiene conto della dispersione degli inquinanti emessi e delle trasformazioni chimiche che avvengono in atmosfera in funzione della meteorologia. Le emissioni derivanti dal traffico veicolare che insistono nell'area urbana milanese, sono state stimate utilizzando le informazioni fornite all'Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) del Comune di Milano (grafi di rete integrati, caratteristiche geometriche e strutturali della rete stradale, flussi di traffico) e la metodologia ufficiale Europea COPERT 5 (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Traffic), che costituisce la versione più aggiornate del programma di calcolo delle emissioni da traffico realizzato dalla EEA (European Environment Agency) nell'ambito del programma CORINAIR. Al fine di includere gli apporti emissivi interni ed esterni al Comune di Milano, sono state considerate tutte le altre tipologie di sorgenti (traffico al di fuori del Comune di Milano, riscaldamento domestico, attività industriali, etc.) presenti nell'area di studio.

Sono state quindi condotte due simulazioni corrispondenti ai seguenti due scenari:

1. **ex-ante**: corrispondente al quadro emissivo all'anno 2017 (periodo di riferimento durante il quale l'Associazione ha promosso la campagna "NO2, NO grazie", effettuata dai cittadini dall'11 febbraio all'11 marzo 2017 a Milano ed in altri comuni dell'area metropolitana);
2. "**NO Diesel**": corrispondente al quadro emissivo all'anno 2017 nel quale sono state annullate le emissioni derivanti da TUTTI i veicoli alimentati a gasolio, ad eccezione dei bus di pubblica utilità, circolanti sulla rete stradale del Comune di Milano.

La situazione "NO Diesel" non corrisponde ad uno scenario realistico, poiché non è stata effettuata alcuna ipotesi circa la sostituzione dei veicoli a gasolio con altra tipologia di veicoli e/o ipotesi alternative di mobilità urbana; essa rappresenta una situazione limite, mediante la quale si mira a stimare il massimo potenziale di riduzione teoricamente ottenibile agendo sui soli veicoli a gasolio.

I risultati relativi alla simulazione dello scenario "ex-ante" mostrano, per l'area urbana milanese, concentrazioni medie annuali di NO_2 superiori al valore limite in larga parte del territorio comunale (circa **il 75%**) e valori più elevati delle lungo le circonvallazioni a Nord del centro cittadino. Tali stime trovano conferme dai dati della rete di qualità dell'aria di ARPA Lombardia, che evidenziano livelli di NO_2 superiori al valore limite nella città metropolitana di Milano ed evidenziano la capacità del sistema modellistico di riprodurre i livelli di NO_2 osservati.

I risultati relativi allo scenario "NO Diesel" forniscono una risposta alla domanda: *quali sarebbero i livelli di NO2 nell'area milanese in assenza di emissioni derivanti da veicoli alimentati a gasolio?* Le concentrazioni medie annuali al suolo di NO_2 corrispondenti a tale scenario evidenziano valori di NO_2 superiori al valore limite solo lungo le tangenziali ad Est ed a Nord dell'area urbana ove nello scenario considerato, non sono state peraltro annullate le emissioni di veicoli diesel. Tali risultati confermano la rilevanza delle emissioni associate a tale tipologia di veicoli.

A partire dai risultati di tali simulazioni è stato costruito un abaco mediante il quale è possibile stimare l'aumento percentuale della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il limite di legge sulle medie annuali (40 µg/m^3) a fronte di limitazioni della circolazione per tutti i veicoli (auto, LDV e HDV) alimentati a gasolio distinti per categoria Euro. L'utilizzo di tale abaco fornisce utili risposte alla domanda: *a quali categorie di veicoli alimentati a gasolio è necessario estendere il divieto alla circolazione all'interno dell'area milanese (Comune di Milano) al fine di rientrare nel valore limite relativo alla concentrazione media annuale (40 µg/m^3)?*

Mediante l'utilizzo di tale abaco è stato stimato che limitando la circolazione a tutti i veicoli pre-Euro 4, pre-Euro 5 e pre-Euro 6, si otterrebbe un aumento della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite dal 25% (situazione attuale) rispettivamente a circa il 35%, 46% e 95%.

1. Introduzione e scopo del lavoro

Nei motori diesel la miscela aria-carburante ha sempre una dosatura magra e anche nel funzionamento a pieno carico, cioè con l'acceleratore premuto a fondo, c'è sempre una notevole quantità di aria (e quindi di ossigeno) in eccesso. La formazione di una considerevole quantità di ossidi di azoto è pertanto inevitabile. L'abbattimento di questi inquinanti è tutt'altro che agevole e richiede soluzioni particolarmente sofisticate, a differenza di quanto accade nei motori a ciclo Otto, nei quali in genere è sufficiente l'impiego di un efficace catalizzatore riducente.[1] Per tale motivo, negli ultimi anni sono stati introdotti divieti alla circolazione di veicoli alimentati a gasolio nelle aree urbane al fine di ridurre i livelli di NO_2 e migliorare la qualità dell'aria. Ad esempio la corte federale di Lipsia ha stabilito, lo scorso febbraio 2018, che le città tedesche possono ricorrere alla misura del divieto di circolazione delle auto a gasolio e più recentemente, lo scorso 2 agosto 2018, la Giunta del Comune di Milano ha approvato il provvedimento che istituisce l'Area B, una zona vasta quasi quanto i confini della città (ovvero il 72 per cento dell'intero territorio comunale), all'interno della quale dal 21 gennaio 2019 sarà vietato l'ingresso ai veicoli benzina Euro 0 e diesel Euro 0, 1, 2, 3 e progressivamente, per step successivi fino al 2030, a tutti i veicoli diesel. Il biossido di azoto è un inquinante a prevalente componente secondaria, in quanto è il prodotto dell'ossidazione del monossido di azoto (NO) in atmosfera; solo in proporzione minore viene emesso direttamente in atmosfera. La principale fonte di emissione degli ossidi di azoto ($NOx=NO+NO_2$) in area urbana è il traffico veicolare; altre fonti sono gli impianti di riscaldamento civili e industriali, le centrali per la produzione di energia e un ampio spettro di processi industriali[2]. Con la emanazione del D.Lgs. 13/08/2010 n. 155, il legislatore ha recepito la Direttiva Europea 2008/50/CE (Relativa alla qualità dell'aria Ambiente e per un'aria più pulita in Europa), operando a livello nazionale la stessa riorganizzazione e semplificazione delle norme esistenti a tutela della qualità dell'aria, realizzate nella normativa europea di settore. Relativamente al biossido di azoto, il D.Lgs. 155 ha fissato a 40 $\mu g/m^3$ il limite di legge relativo alla concentrazione media annuale. Al fine di stimare l'impatto di tali divieti, l'Associazione Cittadini per l'aria ha richiesto ad ARIANET l'effettuazione di simulazioni volte a stimare l'impatto delle emissioni di veicoli alimentati a gasolio circolanti nell'area urbana milanese sulle concentrazioni medie annuali di NO_2.L'Associazione ha svolto e svolge diverse azioni di scienza partecipata tra le quali la campagna "NO_2, NO grazie", effettuata dai cittadini dall'11 febbraio all'11 marzo 2017 a Milano ed in altri comuni dell'area metropolitana (Paderno Dugnano, Gallarate, Novedrate, Desio, Caponago, Carugate, Cernusco sul Naviglio, San Donato Milanese, Pregnana, San Giuliano Milanese, Monza), nel corso della quale sono stati dislocati 219 campionatori passivi di NO_2 davanti a casa, o a scuola, o al luogo di lavoro, su un palo ad un'altezza di 2.5/3 metri. La disponibilità di tali informazioni sperimentali unitamente a quelle fornite dalla rete di monitoraggio gestite da ARPA Lombardia ha suggerito di considerare il periodo di campionamento della campagna come periodo di riferimento per le simulazioni modellistiche richieste. La valutazione del contributo dei veicoli alimentati a gasolio sulle concentrazioni di NO_2 nell'area urbana milanese, altrimenti detta "Analisi di Source Apportionment", è stata effettuata mediante l'utilizzo del modello di chimica dell'atmosfera **FARM** con tecniche di "zero-out modelling". Tale approccio si basa sull'analisi degli effetti di perturbazioni delle emissioni sui livelli di un determinato inquinante e nel caso in esame fornisce risposte alle seguenti domande:

[1] https://www.automoto.it/news/motori-e-inquinamento-gli-ossidi-di-azoto.html

[2] http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_paginaRelazione_1438_listaFile_itemName_4_file.pdf

- *quali sarebbero i livelli di NO2 nell'area milanese (Comune di Milano) in assenza di emissioni derivanti da veicoli alimentati a gasolio all'interno della stessa area?*
- *A quali categorie di veicoli alimentati a gasolio è necessario estendere il divieto alla circolazione all'interno dell'area milanese (Comune di Milano) al fine di rientrare nel valore limite relativo alla concentrazione media annuale?*

2. Descrizione dominio di calcolo e del modello utilizzato

Le simulazioni modellistiche sono state effettuate considerando un dominio di calcolo che include il Comune di Milano e si estende su una superficie di 35x35 km^2.

La griglia di calcolo utilizzata per la simulazione meteorologica e di dispersione ha le seguenti caratteristiche:

- 70 celle nella direzione x;
- 70 celle nella direzione y;
- 500 m di risoluzione orizzontale;
- coordinate UTM fuso 32 (WGS84) del vertice Sud Ovest del dominio pari a 499.5 km Est, 5021.5 km Nord.

La scelta di tale dominio risponde alle necessità di considerare le emissioni prodotte sia dalla città di Milano sia delle aree urbane circostanti che influenzano i livelli di NO_2 rilevati a Milano a seguito di processi di trasporto e dispersione atmosferica. Poiché la valutazione dell'impatto derivante dalla limitazione della circolazione delle auto a gasolio viene effettuata relativamente al biossido di azoto, inquinante prevalentemente secondario, è raccomandato l'utilizzo di un modello di chimica dell'atmosfera in grado di considerare i processi chimico-fisici che danno luogo alla formazione di tali inquinanti. A tal fine, nello studio è stato applicato il modello **FARM**, alla base del sistema modellistico nazionale MINNI (www.minni.org) ed in uso presso diverse ARPA (tra le quali ARPA Lombardia), al suddetto dominio di calcolo ed al periodo durante il quale si è svolta la campagna "NO2 – NO grazie" (11/02/2017-11/03/2017).

Per rispondere alle domande di cui all'introduzione, sono state effettuate due simulazioni corrispondenti:

1. alla situazione di riferimento nella quale sono presenti TUTTE le sorgenti di emissione e sono considerate le limitazioni vigenti al periodo di riferimento (scenario "ex-ante");
2. alla situazione nella quale vengono annullate all'interno del Comune di Milano le emissioni derivanti da TUTTI i veicoli alimentati a gasolio ad eccezione dei bus di pubblica utilità (scenario "zero-out modelling" / "NO Diesel").

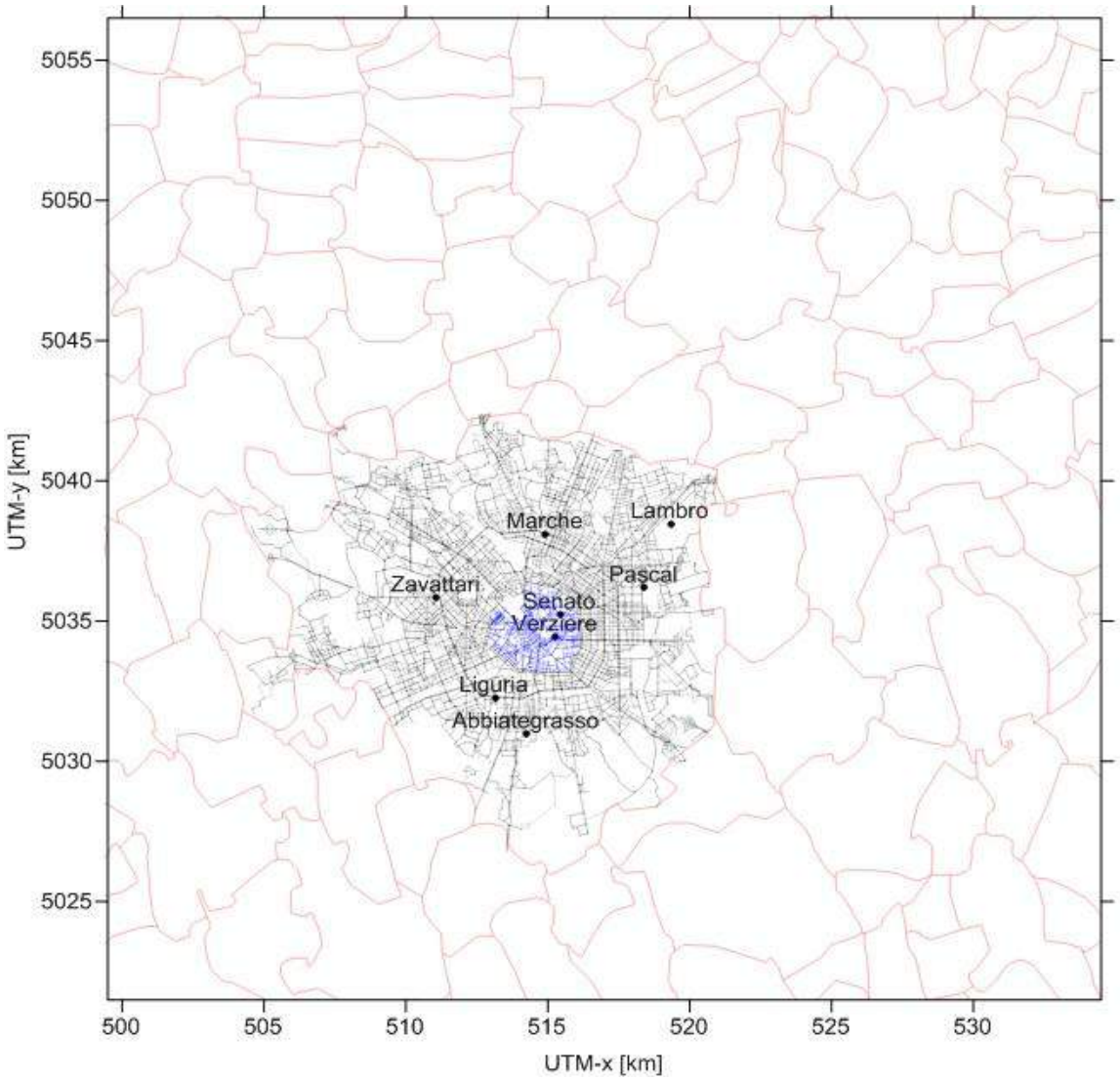


Figura 1. Dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni modellistiche. Sono riportati i limiti dei comuni inclusi nel dominio (in rosso), il reticolo stradale utilizzato per la stima delle emissioni stradali nel Comune di Milano (colore blu: interno ad area C, colore nero: ed esterno ad area C) e le stazioni di misura ARPA utilizzate nello studio.

3. Emissioni

La stima delle emissioni che insistono sull'area di studio relativamente al periodo di riferimento (11/02/2017-11/03/2017) è stata effettuata a partire:

- dall'inventario delle emissioni in atmosfera INEMAR (INventario EMissioni ARia) realizzato da ARPA Lombardia per conto di Regione Lombardia, con riferimento all'anno 2014; su base comunale al fine di caratterizzare al meglio l'area di studio;
- dalle informazioni relative al traffico veicolare che insiste nell'area urbana milanese, fornite all'Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) del Comune di Milano (grafi di rete integrati, caratteristiche geometriche e strutturali della rete stradale, flussi di traffico), e dallla metodologia ufficiale Europea COPERT 5 (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Traffic), che costituisce la versione più aggiornate del programma di calcolo delle emissioni da traffico realizzato dalla EEA (European Environment Agency) nell'ambito del programma CORINAIR.

3.1 *Inventario INEMAR*

INEMAR (INventario EMissioni ARia), è un database progettato per realizzare l'inventario delle emissioni in atmosfera, ovvero stimare le emissioni a livello comunale dei diversi inquinanti, per ogni attività della classificazione europea CORINAIR e tipo di combustibile. Le informazioni raccolte nel sistema INEMAR sono le variabili necessarie per la stima delle emissioni: indicatori di attività (consumo di combustibili, consumo di vernici, quantità incenerita, ed in generale qualsiasi parametro che traccia l'attività responsabile dell'emissione), fattori di emissione, dati statistici necessari per la disaggregazione spaziale e temporale delle emissioni.

I dati contenuti nell'inventario sono suddivisi nelle categorie SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution), con attività antropiche e naturali organizzate secondo una struttura gerarchica che comprende 11 macrosettori, 56 settori e 360 categorie (attività).

I macrosettori sono i seguenti:

1. Produzione pubblica di elettricità, impianti di cogenerazione e di teleriscaldamento
2. Impianti di combustione commerciali, istituzionali e residenziali e combustione nell'agricoltura (es. caldaie per il riscaldamento degli edifici, stufe e camini, piccole caldaie per l'acqua a uso sanitario)
3. Impianti di combustione industriali (es. produzione di energia e calore nell'industria, forni siderurgici, cementifici, industria del vetro e della ceramica)
4. Processi produttivi (es. industria chimica, lavorazione dei metalli, industria del legno, della carta, alimentare, estrazione dei materiali da cava)
5. Estrazione e distribuzione dei combustibili fossili (es. reti di distribuzione dei combustibili, stazioni di rifornimento)
6. Uso dei solventi (es. verniciatura industriale e domestica, produzione di colle e vernici, industria tessile e conciaria, stampa)
7. Trasporto su strada (auto, moto, veicoli commerciali leggeri e pesanti su strade urbane, extraurbane ed autostrade; emissioni evaporative dai veicoli parcheggiati)
8. Altre sorgenti mobili (es. trasporto su ferro, marittimo ed aereo, veicoli agricoli)

9. Trattamento e smaltimento dei rifiuti
10. Agricoltura
11. Altro (es. vegetazione, combustione di tabacco, fuochi d'artificio, incendi)

In Figura 2 e in Tabella 1 si riporta la sintesi delle emissioni annuali dei principali inquinanti (CO, SO2, NOx, NMVOC – VOC non metanici, PM2.5 e PM10) relativa ai comuni che ricadono all'interno del dominio di calcolo, in modo da evidenziare le pressioni principali e le attività potenzialmente più critiche per i livelli di inquinamento. In particolare, in Figura 2 si mostra la distribuzione percentuale dei diversi macrosettori, mentre in Tabella 1 vengono mostrate le emissioni annuali totali per ogni macrosettore

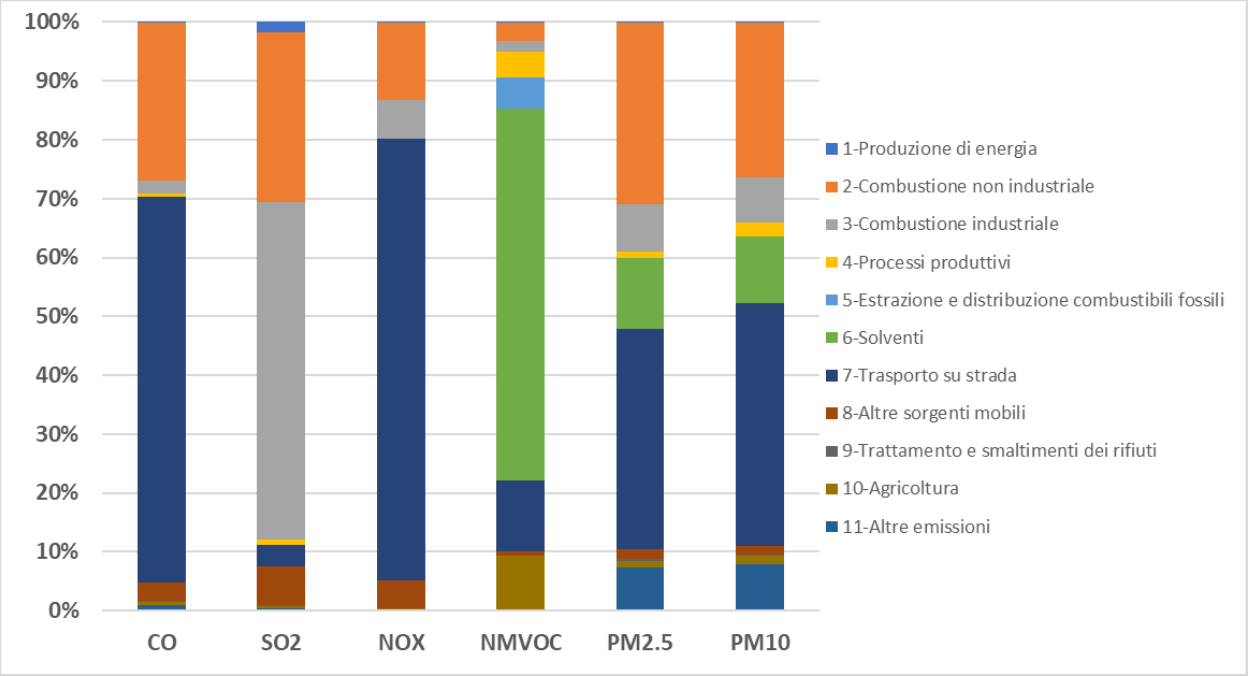


Figura 2. Distribuzione percentuale dei contributi dei diversi macrosettori per i comuni che ricadono nel dominio di calcolo

Tabella 1. Emissioni annuali [t/anno] dei principali inquinanti relative ai comuni che ricadono nel dominio di calcolo

	CO	SO2	NOX	NMVOC	PM2.5	PM10
1-Produzione di energia	32	14	32	5	1	1
2-Combustione non industriale	8353	233	3107	1368	807	826
3-Combustione industriale	700	461	1539	716	208	240
4-Processi produttivi	121	8	13	1850	30	75
5-Estrazione e distribuzione combustibili fossili	0	0	0	2277	0	0
6-Solventi	0	0	0	26714	311	356
7-Trasporto su strada	20405	30	17664	5087	976	1299
8-Altre sorgenti mobili	983	52	1138	302	44	44
9-Trattamento e smaltimenti dei rifiuti	24	1	17	2	7	7
10-Agricoltura	208	4	62	3809	29	43
11-Altre emissioni	270	2	9	107	192	249
Totale complessivo	31095	806	23580	42238	2604	3141

Per quanto riguarda il particolato, CO e NOx l'attività con il maggior peso è sicuramente il trasporto su strada; per gli ossidi di azoto questa attività contribuisce per un valore superiore al 70% rispetto alle altre attività che insistono sul territorio, ed equivale a 17664 t/anno. Concentrandosi sul particolato, sia PM2.5 che PM10, il contributo percentuale del traffico diminuisce fino al 40% mentre quello della combustione residenziale e commerciale cresce fino ad arrivare al 30% per il particolato fine. In termini di emissioni assolute, il traffico stradale produce 976 t/anno di PM2.5 e 1299 t/anno di PM10, mentre il macrosettore 2 genera 807 t/anno di PM2.5 e 826 t/anno di PM10. Per quanto riguarda l'SO2, la combustione industriale contribuisce per circa il 60% mentre quella residenziale/commerciale per il 30% del totale emissivo. Per i VOC non metanici, il macrosettore 6 (solventi) è quello predominante rispetto agli altri, con una percentuale superiore al 60%.

Al fine di valutare al meglio il regime emissivo del comune di Milano, si propone in Figura 3 e in Tabella 2 la stessa analisi.

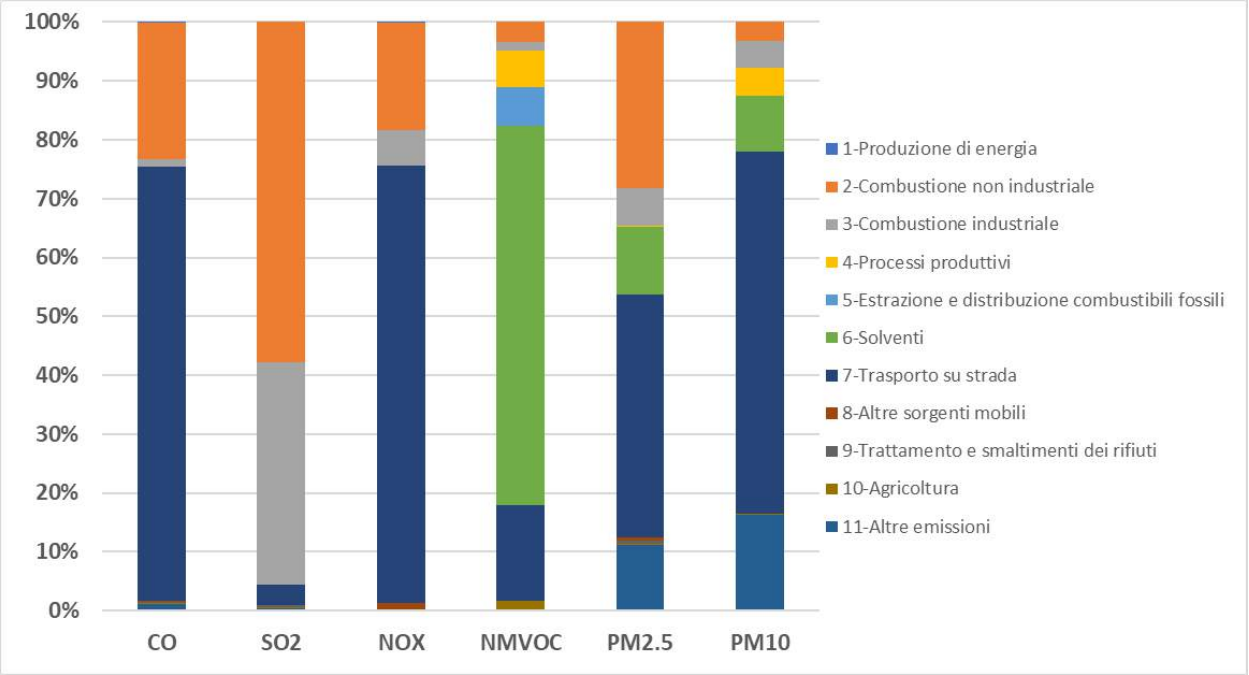


Figura 3. Distribuzione percentuale dei contributi dei diversi macrosettori per il comune di Milano

Tabella 2. Emissioni annuali [t/anno] dei principali inquinanti relativa al comune di Milano

	CO	SO2	NOX	NMVOC	PM2.5	PM10
1-Produzione di energia	0	0	1	0	0	0
2-Combustione non industriale	1979	138	1107	370	177	181
3-Combustione industriale	121	90	369	155	40	46
4-Processi produttivi	0	0	0	677	1	7
5-Estrazione e distribuzione combustibili fossili	0	0	0	715	0	0
6-Solventi	0	0	0	6970	71	83
7-Trasporto su strada	6277	8	4514	1755	259	336
8-Altre sorgenti mobili	28	0	59	8	4	4
9-Trattamento e smaltimenti dei rifiuti	6	1	8	0	3	3
10-Agricoltura	16	0	3	158	2	2
11-Altre emissioni	97	1	3	16	70	90
Totale complessivo	8524	239	6064	10821	626	751

Il trasporto su strada continua ad essere l'attività più importante a livello emissivo per diversi inquinanti (CO, NOx, PM2.5 e PM10). In particolare, l'emissione totale annuale di ossidi di azoto è di 6064 t/anno mentre quella dovuta al traffico stradale è di 4514 t/anno (74%). Per quanto riguarda l'SO2, la combustione residenziale e commerciale risulta essere il processo maggiormente impattante sul comune di Milano. Concentrandosi invece sui NMVOC l'attività principale continua ad essere l'uso dei solventi, come per l'intero dominio di calcolo.

In conclusione, su Milano si concentra il 26% delle emissioni totali di NOx che interessano l'intero dominio di calcolo, sottolineando l'importanza della città rispetto al resto dei comuni limitrofi dell'hinterland.

3.2 *STIMA DELLE EMISSIONI INQUINANTI IN ATMOSFERA DAL TRAFFICO STRADALE NEL COMUNE DI MILANO*

Rete e traffico

La stima effettuata è relativa alle emissioni in atmosfera del traffico stradale che percorre la rete di Milano, inclusi i tratti di tangenziali e autostrade comprese tra i confini comunali. Questa rete di traffico, rappresentata nella figura seguente, è il risultato di una simulazione realizzata da AMAT e relativa all'ora di punta del mattino.

I flussi di traffico sono rappresentati sinteticamente in figura come veicoli equivalenti (n° veicoli equivalenti/ora), in realtà la rete include i flussi veicolari distinti per 5 macrocategorie: auto, moto, commerciali leggeri (ovvero veicoli merci di lunghezza < di 7,5 m), commerciali medi (lunghezza compresa tra 7,5 e 12,5 m) e commerciali pesanti (lunghezza superiore a 12,5 m).

Figura 4. Grafo stradale considerato per la stima delle emissioni veicolari a scala urbana. Il flusso di traffico del tratto di tangenziale ovest a sud dello svincolo di Settimo Milanese è indicato come riferimento.

Per la stima delle emissioni i dati dall'output del modello di traffico effettivamente utilizzati sono i seguenti:

- Flussi dell'ora di punta del mattino (dalle ore 8 alle 9), distinti in moto, auto, commerciali leggeri, commerciali medi + pesanti;
- Velocità medie di deflusso;

- Tipologia di strada (urbana o autostrada);

Composizione del parco circolante 2017 e proiezioni al futuro

Per ripartire i veicoli circolanti sulla rete stradale esaminata a seconda di alimentazione, capacità, motorizzazione, categoria Euro, è stato costruito un parco dei veicoli circolanti sulla base dei più recenti dati ACI (2017) dei veicoli immatricolati in Provincia di Milano, successivamente pesati per i valori di percorrenze medie annuali per età di fonte ENEA/Ministero dell'Ambiente (http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/dati-trasporto-stradale-1990-2016/view). La figura seguente illustra la diversa ripartizione utilizzata delle percorrenze tra auto nuove e auto meno recenti.

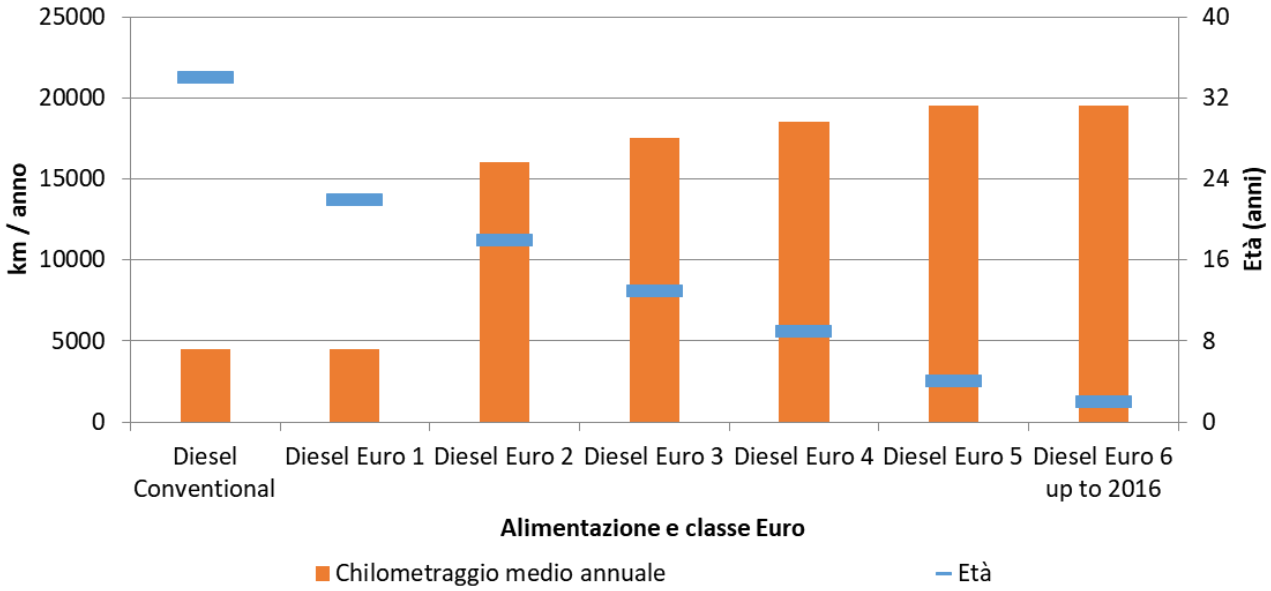


Figura 5. Percorrenze annuali ed età medie di autovetture appartenenti a diverse categorie EURO (SINAnet - ISPRA).

Nei grafici sottostanti si riportano, a titolo esemplificativo, due visuali del parco veicoli circolanti ottenuto, le auto diesel rappresentano il 45% dei veicoli circolanti in Provincia di Milano, quelle a benzina il 33%; le diesel Euro 5 ed Euro 4 rappresentano rispettivamente il 17% e il 15% delle auto circolanti.

Poiché l'Area C di Milano contempla regole di accesso più limitanti rispetto al resto del territorio comunale, per le strade appartenenti a questa zona a traffico limitato è stato considerato un corrispondente parco da cui sono state escluse:

- le autovetture e i veicoli commerciali leggeri benzina di categoria Euro 0 e Diesel di categoria fino a Euro 3;
- tutti i veicoli commerciali pesanti.

Nonostante che nelle ore di punta del mattino (tra le ore 8 e le 10) i veicoli destinati al trasporto cose siano interdetti, i veicoli commerciali leggeri a cui è consentito l'accesso secondo l'alimentazione e la classe Euro non sono stati esclusi.

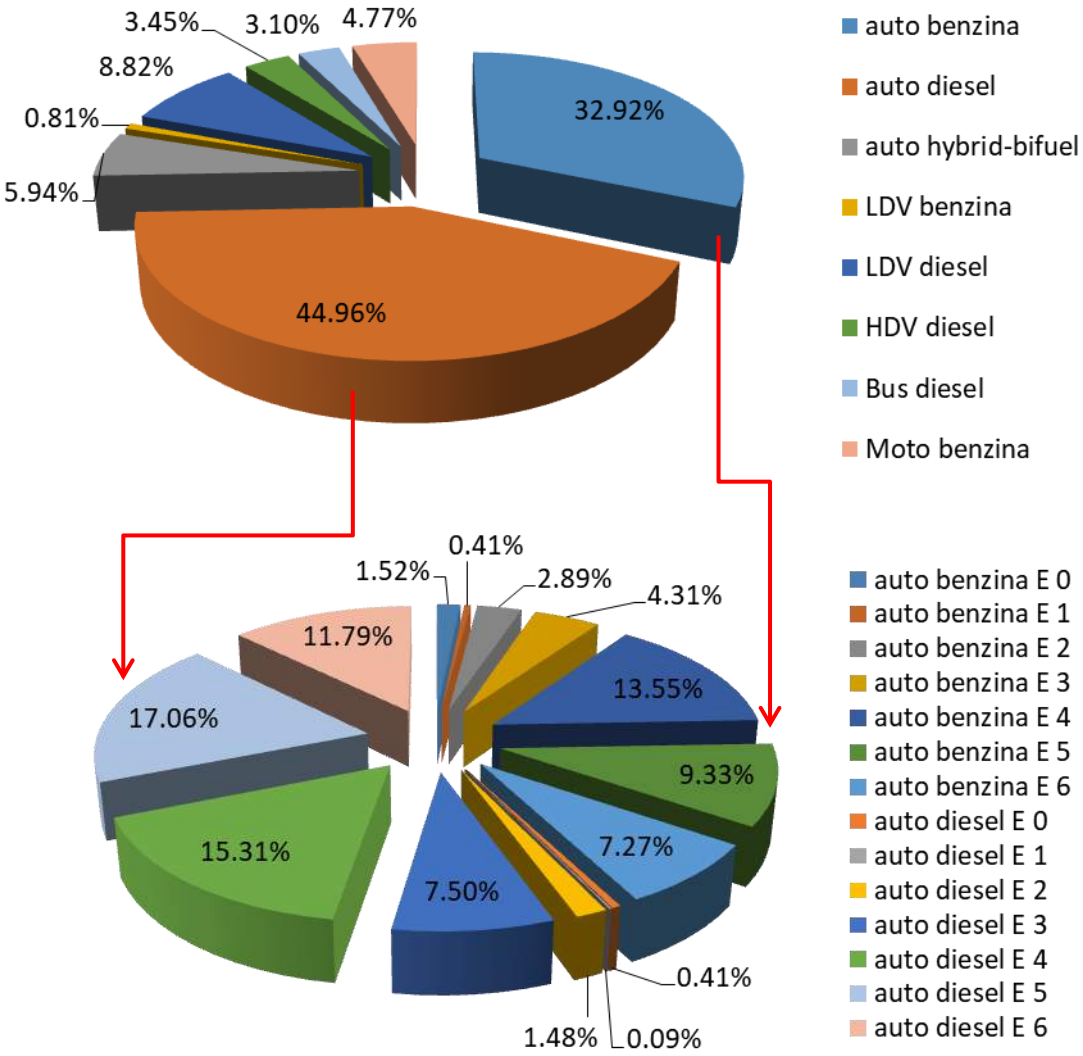


Figura 6. Composizione del parco veicoli circolanti in Provincia di Milano, anno 2017. Sopra: veicoli per macrocategorie e alimentazione; sotto: auto per alimentazione (ibride escluse) e categoria Euro.

Modello di stima delle emissioni da traffico stradale

La stima delle emissioni inquinanti da traffico stradale è stata condotta applicando il modello TREFIC, sviluppato da ARIANET in conformità alla metodologia ufficiale Europea COPERT 5. Questa metodologia è pubblicata e scientificamente revisionata da esperti della convenzione UNECE LRTAP (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) e adottata in tutta Europa tranne che in Austria, Germania, Svezia e Svizzera; essa raccoglie e mantiene aggiornato il database dei fattori d'emissione (F.E., emissioni in termini di massa di inquinante per unità di percorrenza [g/km]), relativi ai singoli veicoli appartenenti a categorie codificate.

I F.E.per ogni inquinante sono caratterizzati da una determinata velocità media e da un profilo di velocità, relativo ad una particolare condizione di traffico (urbana congestionata, urbana non congestionata, extraurbana, autostradale).

Le emissioni su una rete stradale, aggregate per tratto, sono state calcolate caratterizzando gli archi della rete per lunghezza, situazione di traffico, velocità media di percorrenza e un flusso veicolare distinto per macro-categorie.

La metodologia COPERT 5 consente infatti di calcolare i F.E. , per molti degli inquinanti atmosferici tipici del traffico (quelli considerati in questo studio sono: NO_X, SO_2, VOC, CO_2, particolato, distinto per classi granulometriche), selezionando il F.E. corrispondente alle specifiche tipologie veicolari che transitano sul tratto in esame sulla base di:

- tipo di carburante (benzina con o senza piombo, gasolio, gpl);
- cilindrata del motore per i veicoli passeggeri e dalla portata nel caso di veicoli commerciali;
- età del veicolo, o più precisamente anno di immatricolazione e chilometraggio complessivo.

L'età del veicolo permette di risalire alla tecnologia costruttiva, normata dalle varie direttive che in ambito europeo hanno nel tempo regolamentato le massime emissioni dei nuovi motori prodotti. Tale informazione consente anche di legare il fattore d'emissione allo stato di efficienza e di manutenzione del veicolo stesso.

In Italia le informazioni sui veicoli circolanti e la loro distribuzione nelle classi considerate dal modello sono raccolte e pubblicate da ACI (maggiori dettagli nel capitolo COMPOSIZIONE DEL PARCO) in accordo con la classificazione COPERT.

Lo studio non è affetto dalle incoerenze rilevate sistematicamente tra limiti di emissione definiti negli standard emissivi e certificati al momento dell'omologazione ed emissioni reali verificate in test a banco o su strada in quanto le misure COPERT sono effettuate facendo seguire ai veicoli stradali cicli guida (cioè profili di velocità nel tempo) vicini a quelli reali.

Anzi, è la normativa EURO che si è evoluta costringendo le case automobilistiche a sottostare agli stessi limiti alle emissioni EURO 6 ma seguendo cicli di omologazione (i cicli guida che i nuovi veicoli stradali devono seguire durante la misura delle loro emissioni all'atto dell'omologazione) gradualmente più vicini a quelli reali.

Stima delle emissioni inquinanti

Per stimare le emissioni inquinanti in atmosfera sono stati utilizzati la rete di traffico del Comune di Milano, realizzata da AMAT, e la composizione del parco circolanti al 2017.

A partire dal grafo delle emissioni per l'anno 2017 sono stati valutati i contributi di singole categorie di veicoli, distinguendo in particolare quelli dei veicoli diesel omologati secondo i diversi standard Euro, tramite simulazione reiterata della medesima rete di traffico escludendo una categoria alla volta.

Le emissioni per l'ora di punta del mattino sono rappresentate graficamente in figura seguente.

Figura 7. Emissioni di NOx per l'ora di punta (kg/h/km) per la rete di traffico del Comune di Milano.

Si osservi che la mappa delle emissioni differisce da quella dei flussi di traffico perché strada per strada può cambiare la velocità media di percorrenza e la ripartizione tra le macrocategorie.

Come risultato di questa fase di calcolo delle emissioni è stato sviluppato un bilancio emissivo di confronto dei vari scenari.

Bilancio emissivo

La tabella successiva riporta le emissioni stimate nelle due aree di Milano, l'Area C e il resto delle strade urbane. L'Area C risulta contribuire per circa il 2% alle emissioni di NOx delle strade milanesi e il 4% alle emissioni di PM10.

Tabella 3. Emissioni veicolari nell'ora di punta aggregate per area [kg/ora] del Comune di Milano

Area urbana	NO_X	PM10
no Area C	**1 276**	**128**
Area C	**27**	**5**
Totale complessivo	**1 304**	**133**

La figura successiva mette a confronto i contributi percentuali alle emissioni di NOx dei vari segmenti di parco veicoli esaminati per il Comune di Milano. Questa analisi è stata limitata alle

sole strade urbane, escludendo le tangenziali e le autostrade, in quanto su queste ultime, seppur appartenenti al confine comunale, sarebbe molto difficile far applicare politiche di limitazione di circolazione dei veicoli più inquinanti.

La maggior parte delle emissioni di NOx sulle strade urbane di Milano deriva dai mezzi pesanti pre Euro 4 (HDV – Heavy Duty Vehicles – 18%), dalle autovetture diesel Euro 5 (15%) e dalle diesel Euro 4 (13%); il contributo delle autovetture diesel pre-Euro 4 è viceversa piuttosto marginale (4%). Il contributo complessivo di tutte le altre categorie non analizzate, dunque auto benzina e ibride e bus, è inferiore ai precedenti citati.

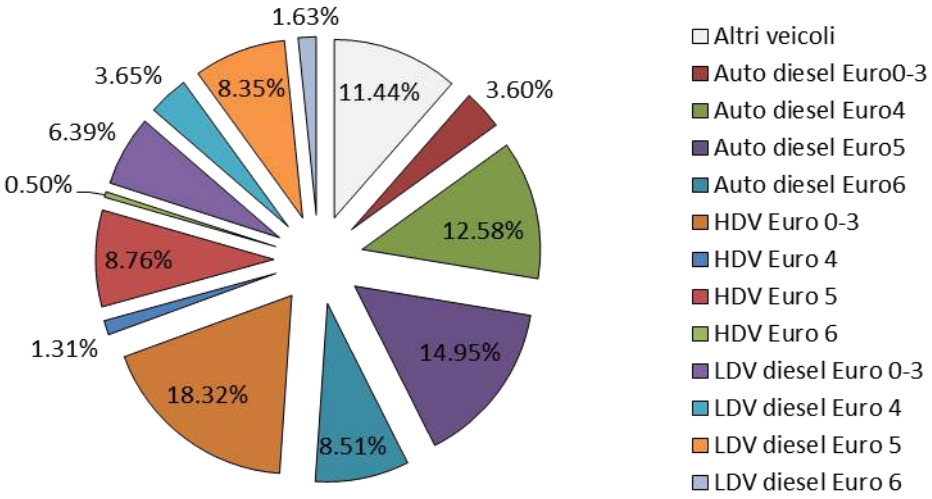


Figura 8. Confronto percentuale delle emissioni di NOx dei vari segmenti di parco veicoli analizzati. Solo strade urbane (no autostrade e tangenziali). In "altri veicoli" sono comprese anche le autovetture ad alimentazione a benzina e ibrida, e i bus.

Emissioni stimate

In Tabella 4 vengono mostrati i risultati del modello di traffico, scalati sull'intero anno, e confrontati con quelli derivanti dall'inventario INEMAR.

Tabella 4. Confronto fra le emissioni del macrosettore 7 (trasporto su strada) stimate da TREFIC e INEMAR per il Comune di Milano

[t/anno]	CO	NOx	NH3	SO2	N2O	PM25	PM10	NMVOC
TREFIC	11065	4759	42	38	48	337	486	2011
INEMAR	6277	4514	50	8	44	259	336	1755

Benché i due approcci siano differenti, le emissioni stimate dal modello di traffico risultano simili a quelle contenute nell'inventario INEMAR, soprattutto per quanto riguarda gli ossidi di azoto. Per il particolato (PM2.5 e PM10) le differenze sono trascurabili, così come per i VOC non metanici e l'N_2O. Le differenze significative si rilevano relativamente al monossido di carbonio ed all'anidride solforosa, associabili al fatto che il modello di traffico evidenzia maggiormente situazioni di congestione, che portano ad un consumo di combustibile maggiore rispetto ad una situazione di

marcia costante e di conseguenza ad una maggiore emissione di CO e SO_2, soprattutto per i diesel. L'aspetto più vantaggioso che deriva dall'utilizzo del modello di traffico è avere una spazializzazione delle emissioni sul territorio più specifica e dettagliata.

In

Tabella 5 si mostrano le emissioni stimate dal modello di traffico per lo scenario "NO Diesel" (annullati sulle strade urbane tutti i veicoli diesel: auto, veicoli commerciali leggeri e veicoli commericali medi+pesanti. Esclusi autobus pubblici ed escluse autostrade e tangenziali) e la riduzione percentuale rispetto allo scenario base per ogni inquinante per il Comune di Milano.

Tabella 5. Emissioni del macrosettore 7 (trasporto su strada) nello scenario "NO Diesel" per il Comune di Milano

[t/anno]	**CO**	**NOx**	**NH3**	**SO2**	**N2O**	**PM25**	**PM10**	**NMVOC**
TREFIC [NO Diesel]	10318	1644	34	19	14	145	222	1890
Riduzione [%]	7%	65%	18%	49%	71%	57%	54%	6%

Come si può notare, le emissioni di ossidi di azoto e di N_2O si riducono drasticamente con una percentuale, rispettivamente del 65% e del 73%. Il particolato fine si riduce del 57% mentre il PM10 del 54%.

Modulazioni temporali

I cicli giornalieri, settimanali e mensili per la modulazione temporale delle emissioni sono stati definiti al fine di fornire al modello di dispersione emissioni su base oraria distinte sia per tipologia veicolare (automobili, veicoli leggeri, ecc) che per percorrenza (urbana, extraurbana o autostradale). A titolo esemplificativo, nella figura successiva si riportano i 3 cicli temporali per le sole automobili che viaggiano sulla rete urbana. Modulazioni analoghe sono state utilizzate per le diverse attività considerate nello studio.

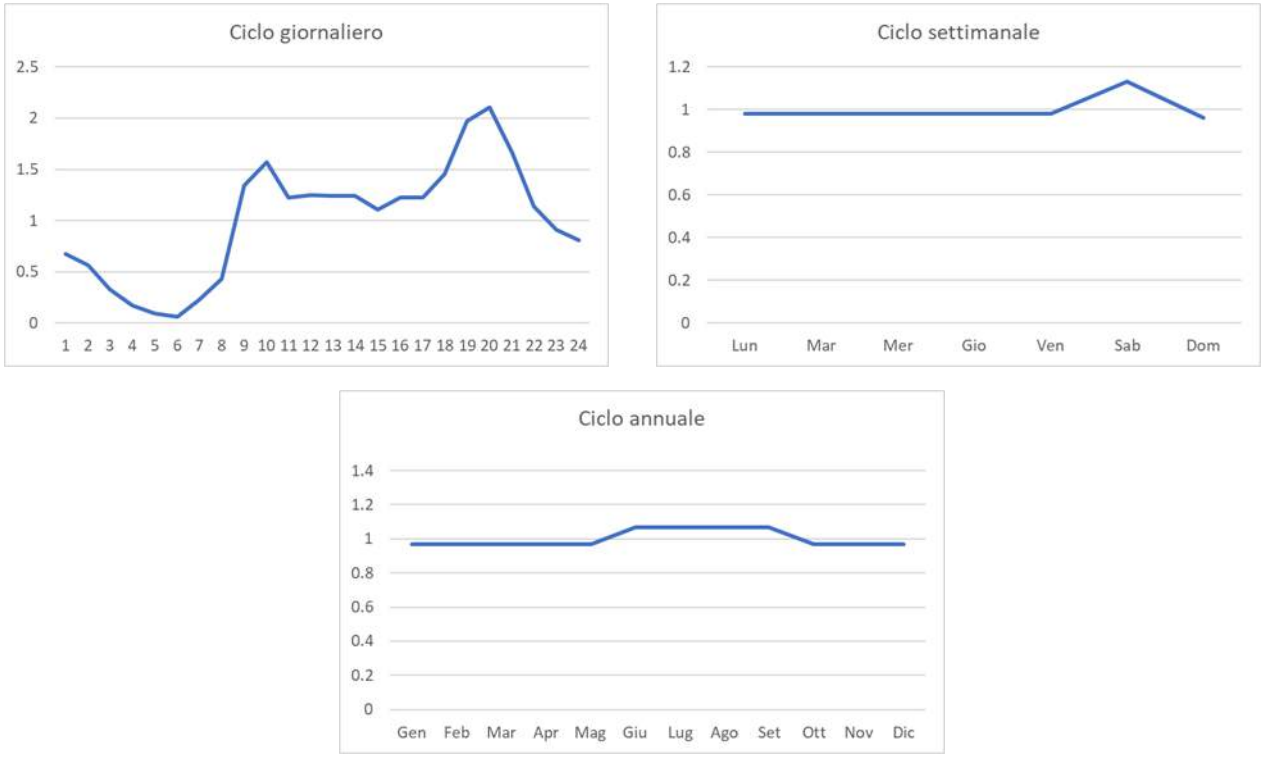


Figura 9. Andamento giornaliero, settimanale e mensile delle emissioni delle automobili sulla rete urbana di Milano

Il ciclo giornaliero mantiene la sua forma standard con la crescita del volume di traffico verso le 6/7 del mattino e con due picchi, uno al mattino e l'altro al pomeriggio in corrispondenza dell'inizio e della fine delle attività lavorative. Il ciclo settimanale non vede variazioni durante i giorni feriali, mentre si nota una crescita durante il fine sabato e un successivo ritorno a valori medi la domenica. Infine, il ciclo mensile si mantiene anch'esso praticamente costante durante tutti i mesi dell'anno.

4. Risultati delle simulazioni

Per la realizzazione delle simulazioni è stato utilizzato un sistema modellistico basato sul il modello di chimica dell'atmosfera **FARM** che include i seguenti componenti:

1. modello **WRF** per la ricostruzione tridimensionale dei campi meteorologici;
2. modulo per la preparazione dell'input emissivo al modello FARM a partire dai dati contenuti nell'inventario delle emissioni INEMAR e prodotti dal modello TREFIC sulla base delle informazioni fornite da AMAT;
3. condizioni al contorno, ovvero concentrazioni ai bordi del dominio di calcolo al fine di considerare i flussi di inquinanti provenienti dalle aree esterne al dominio di calcolo.

In Appendice (A.1) viene fornita una breve descrizione del sistema modellistico utilizzato che è stato quindi applicato al dominio di calcolo riportato in Figura 1 relativamente al periodo 11/02/2017-11/03/2017. Effettuata la calibrazione del suddetto sistema, mediante la procedura descritta in A.2, sono state effettuate quindi simulazioni modellistiche considerando lo scenario emissivo corrispondenti alla situazione **ex-ante**, nella quale sono considerate le limitazioni vigenti all' anno 2017. I campi di concentrazione calcolati durante il mese di riferimento sono stati quindi opportunamente elaborati, utilizzando la metodologia riportata in Appendice (A.3), al fine di produrre una mappa relativa alle concentrazioni medie annuali di NO_2. La Figura 10 riporta la mappa delle concentrazioni medie annuali al suolo del biossido di azoto considerando il complesso delle sorgenti che insistono nell'area di studio. Dall'esame di tale figura risulta che l'area urbana milanese presenta concentrazioni medie annuali superiori al valore limite e che i valori più elevati delle concentrazioni, compreso il massimo assoluto di circa a 60 $\mu g/m^3$, si rilevano lungo le circonvallazioni a Nord del centro cittadino. Tali stime trovano conferme sia nei valori rilevati dalla stazione "Milano - viale Marche", che riporta per l'anno 2017 una concentrazione media annua pari a 64.4 $\mu g/m^3$ (

Tabella 6) sia nella figura successiva (Figura 11), nella quale viene riportato il confronto tra gli andamenti delle concentrazioni medie annuali di NO_2 rilevati dalle stazioni di misura dislocate nel territorio della Regione e nella città metropolitana di Milano (media provinciale). Tali andamenti, pur evidenziando una diminuzione dal 1990 al 2016, evidenziano livelli superiori al valore limite nella città metropolitana di Milano.

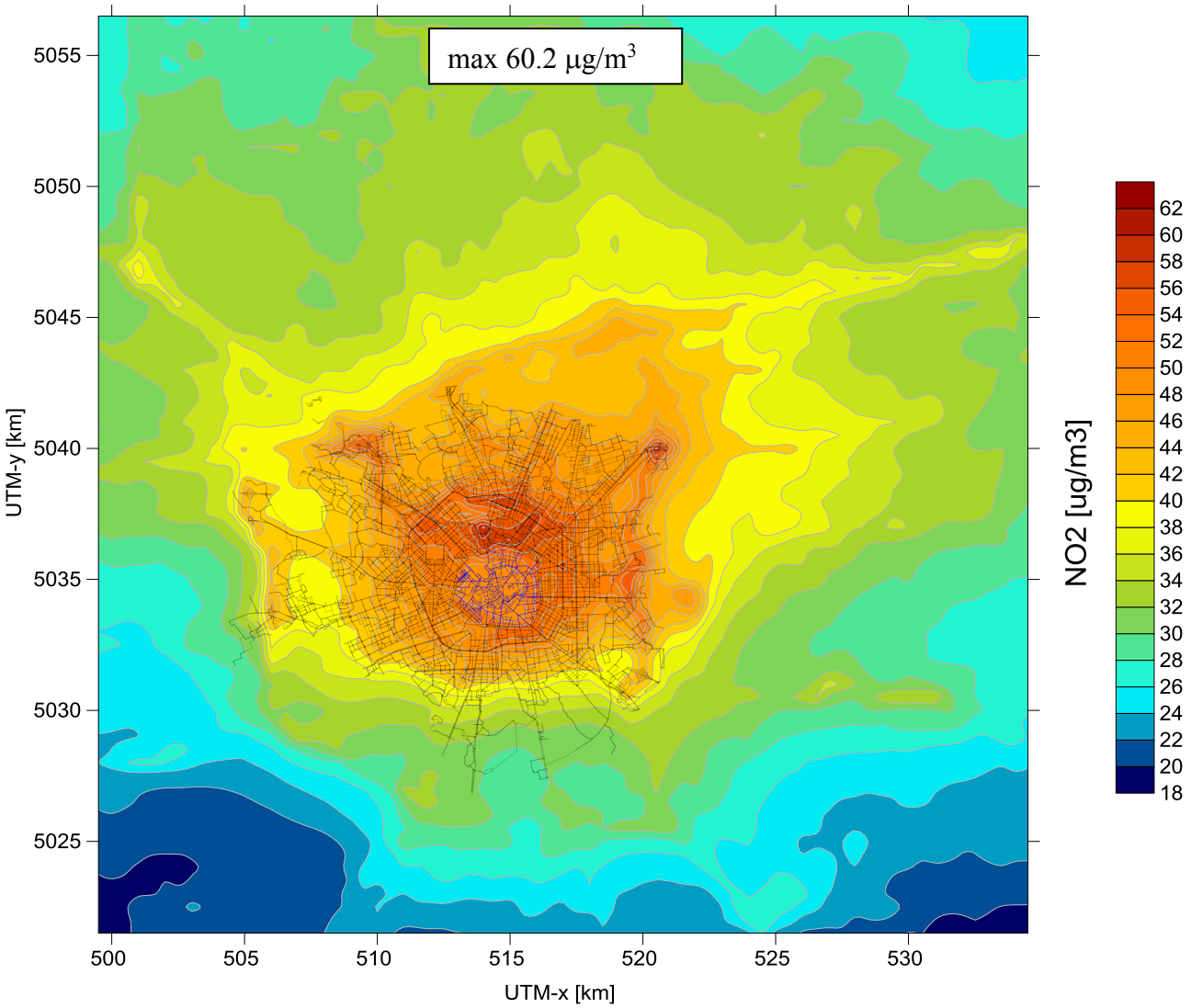


Figura 10. Concentrazioni medie annuali al suolo di NO_2 corrispondenti allo scenario ex-ante 2017. Valori espressi in µg/m³ secondo la scala a destra. La figura riporta il reticolo stradale interno ad area C (colore blu) ed esterno (colore nero).

Tabella 6 Concentrazioni medie annuali di NO_2 rilevate nel 2017 dalle stazioni ARPA dislocate nella città di Milano. Valori espressi in µg/m³ (in rosso valori superiori al valore limite).

Marche	Liguria	Parco Lambro	P.zza Abbiategrasso	P.zza Zavattari	Verziere	Senato	Pascal Città Studi
64.4	55.9	35.1	35.0	50.5	48.1	54.1	44.5

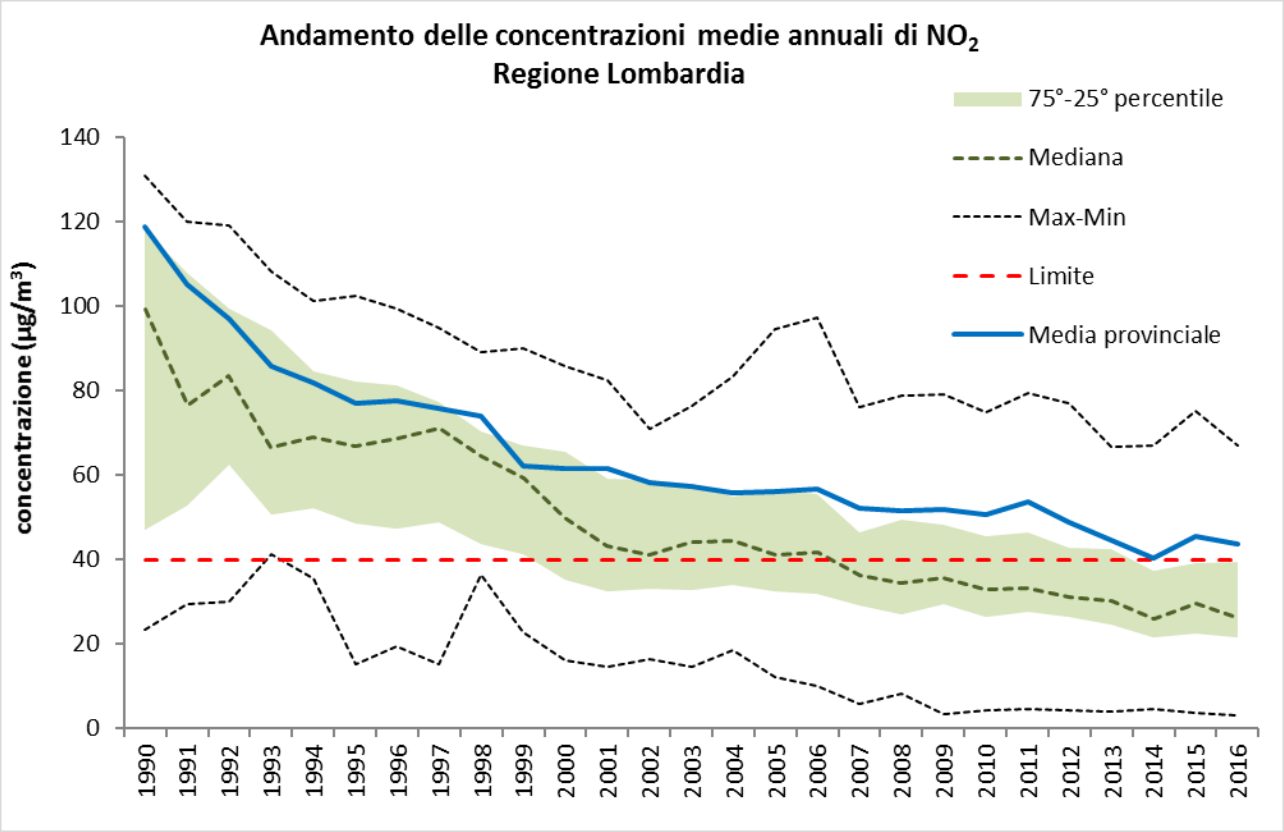


Figura 11. Andamento delle concentrazioni medie annuali di NO2 della Regione confrontato con il trend della città metropolitana di Milano (stazioni del programma di valutazione). Fonte ARPA Lombardia, Rapporto Annuale sulla Qualità dell'Aria – Anno 2016.

La figura seguente (Figura 12) riporta la corrispondente mappa relativa allo scenario cosiddetto "NO Diesel" nel quale sono state annullate le emissioni derivanti da TUTTI i veicoli alimentati a gasolio ad eccezione dei bus di pubblica utilità (zero-out modelling). Come anticipato nell'introduzione, tale mappa fornisce una risposta alla domanda: *quali sarebbero i livelli di NO2 nell'area milanese in assenza di emissioni derivanti da veicoli alimentati a gasolio?*

Dall'esame di tale figura risulta evidente l'effetto delle emissioni prodotte da tali veicoli sui livelli medi annui di biossido di azoto. Valori superiori al valore limite si stimano solo lungo le tangenziali ad Est ed a Nord. È qui opportuno sottolineare che tale simulazione non corrisponde ad uno scenario realistico, poiché non è stata effettuata alcuna ipotesi circa la sostituzione dei veicoli a gasolio con altra tipologia di veicoli e/o ipotesi alternative di mobilità urbana.

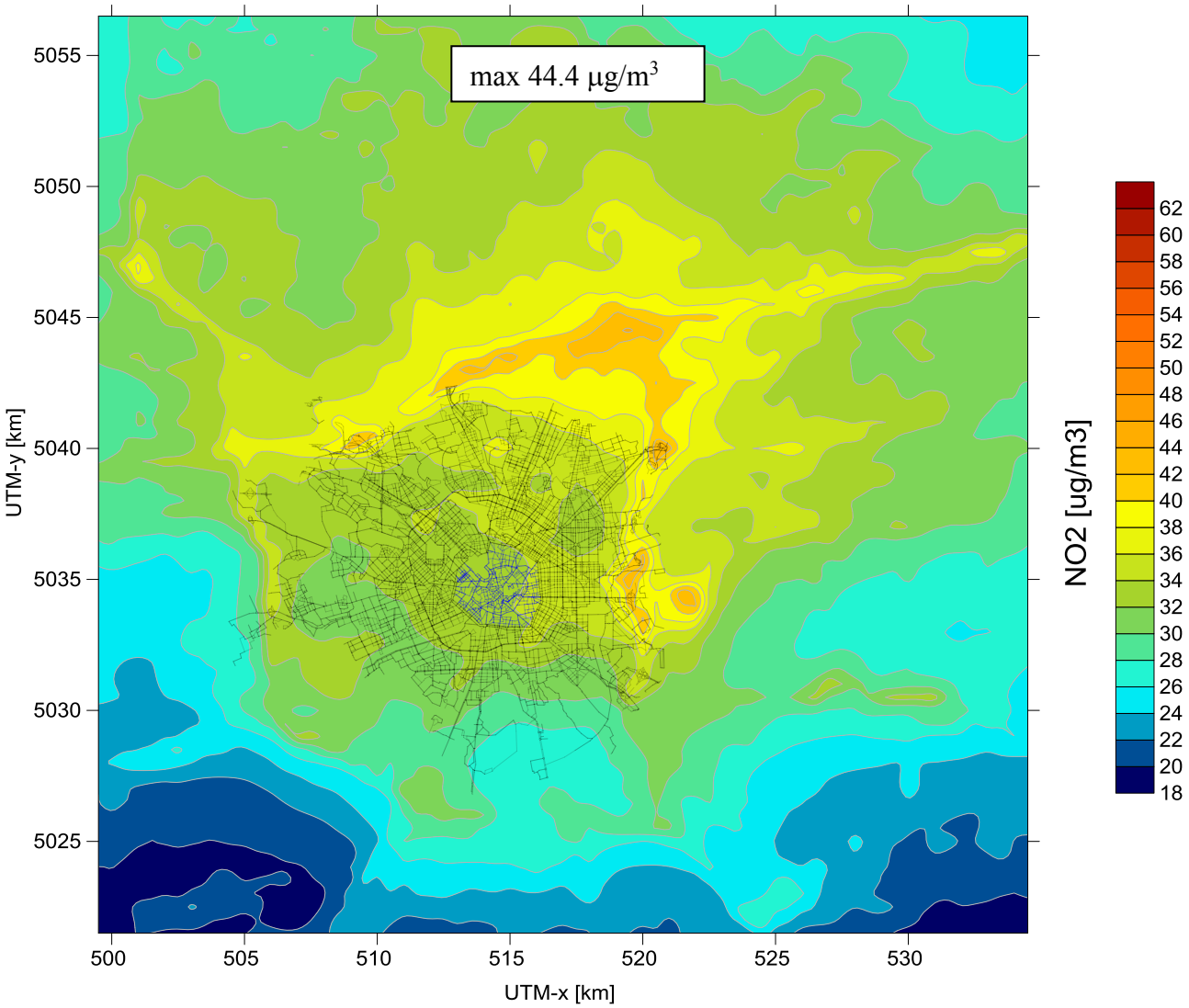


Figura 12. Concentrazioni medie annuali al suolo di NO_2 simulate dal modello FARM nello scenario "NO Diesel" (zero-out modelling). Valori espressi in µg/m³ secondo la scala a destra.

La figura seguente (Figura 13) mostra il contributo delle emissioni dei veicoli diesel circolanti a Milano alle concentrazioni medie annuali di NO_2. Tale mappa è stata ottenuta come differenza tra le due mappe precedenti ("Scenario ex-ante" - "Scenario NO Diesel"). Dall'esame di tale figura risultano, come atteso, differenze maggiori lungo gli assi viari (circonvallazioni) interessati dai maggiori carichi di traffico; i valori più elevati, pari a 26 µg/m³, si stimano lungo le circonvallazioni a Nord del centro cittadino. In Figura 14 è stato stimato il contributo, in termini percentuali, dei veicoli diesel circolanti a Milano alle concentrazioni di NO2 misurate dai campionatori passivi durante il periodo della campagna di misura. Dall'esame di tale figura si stimano contributi massimi compresi tra il 36 e il 41%.

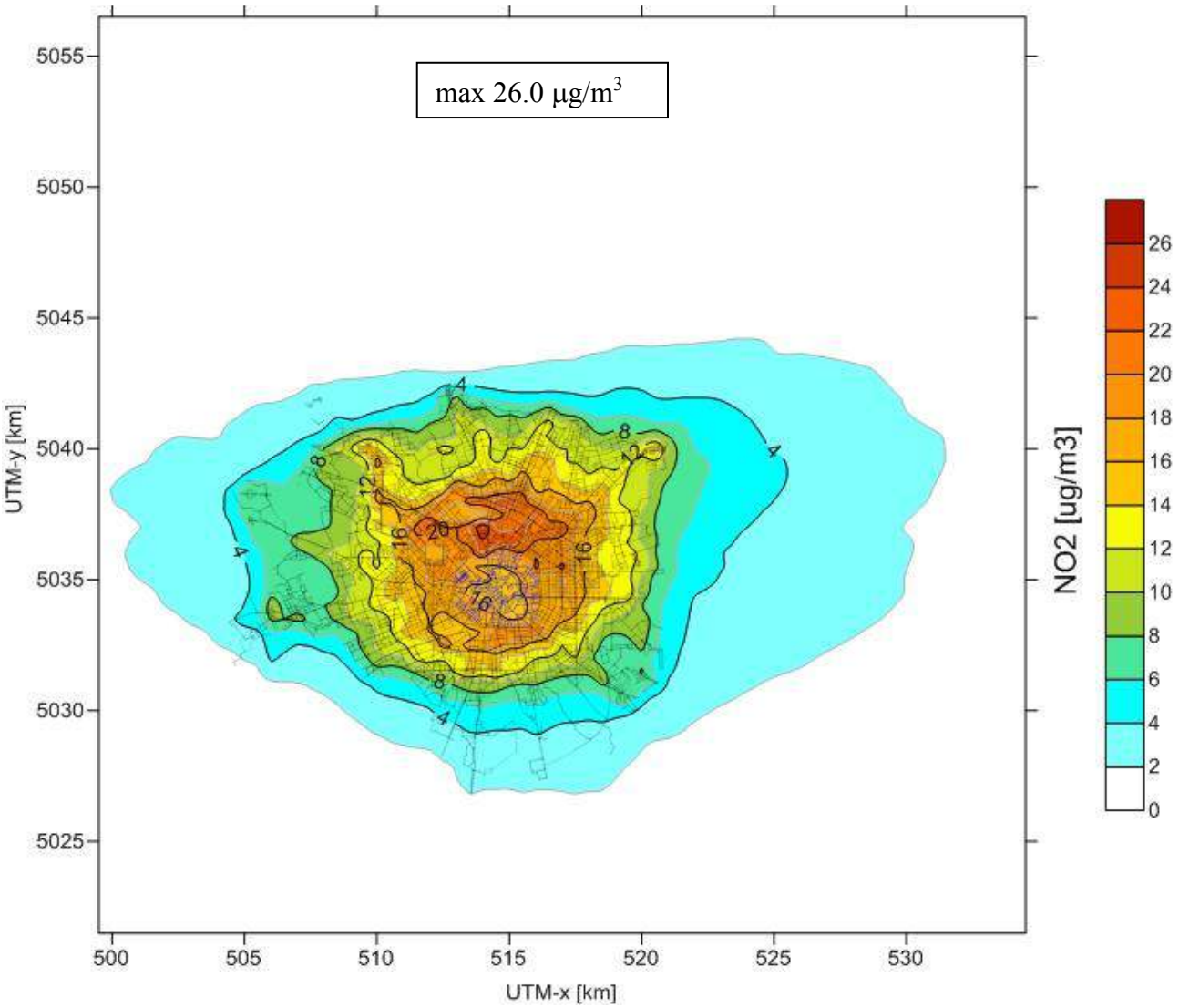


Figura 13. Contributo delle emissioni dei veicoli diesel circolanti a Milano alle concentrazioni medie annuali di NO2. Valori espressi in μg/m³ secondo la scala a destra.

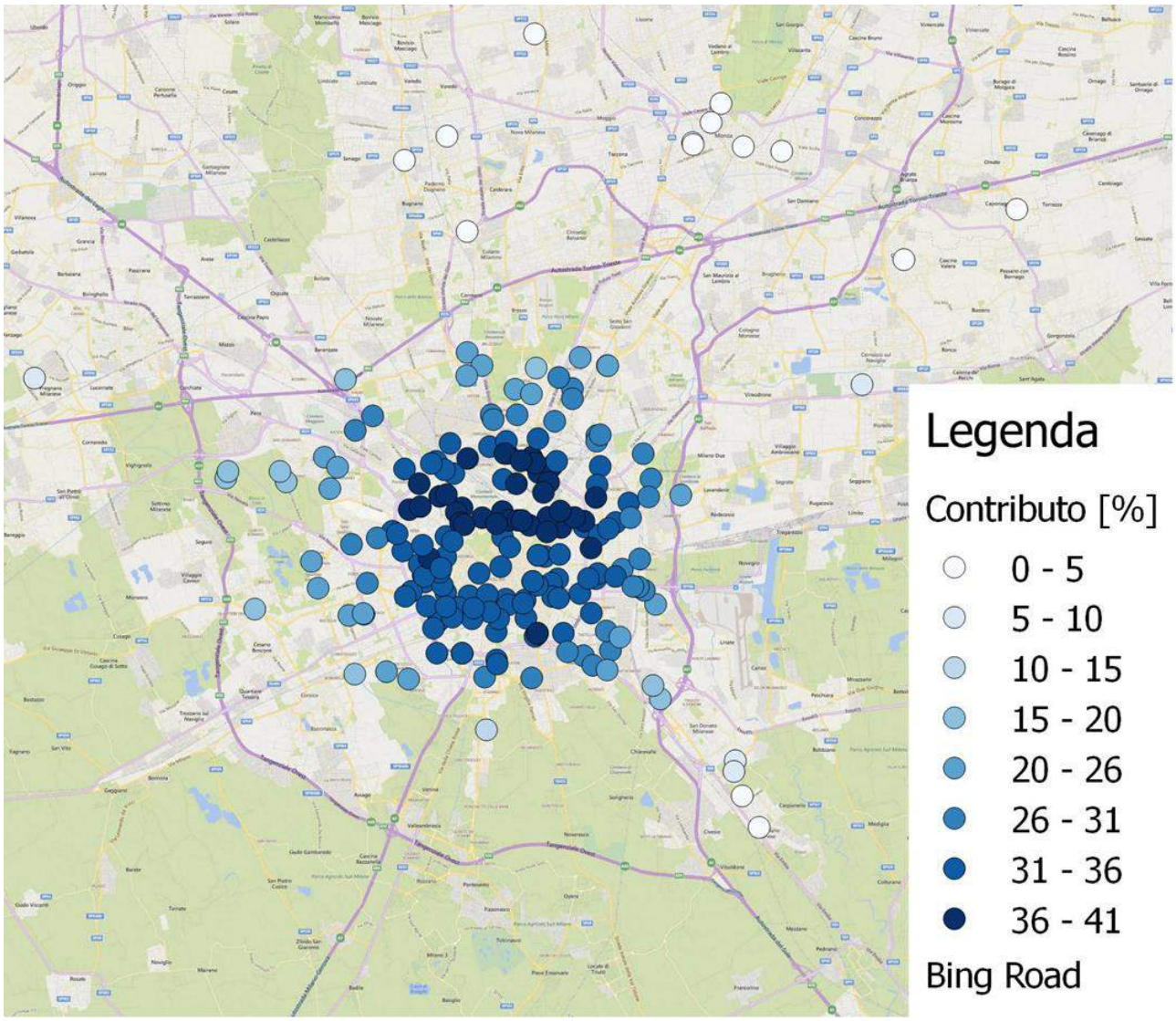


Figura 14. Contributo, in termini percentuali, dei veicoli diesel circolanti a Milano alle concentrazioni di NO_2 misurate dai campionatori passivi durante il periodo della campagna di misura. Valori espressi in μg/m³ secondo la scala a destra.

La differenza tra le mappe di concentrazione di NO_2 calcolate per i due scenari emissivi è stata successivamente utilizzata come base per effettuare una stima della riduzione delle emissioni necessaria a raggiungere l'obiettivo di rispettare il limite di legge sulle medie annuali (40 μg/m³) su tutto il territorio milanese. In prima approssimazione è stata assunta una dipendenza lineare tra la riduzione complessiva delle emissioni su tutta l'area e le concentrazioni medie in ogni punto, espressa dalla proporzione:

$$\Delta E_{100\%diesel} : (C_{ex\text{-}ante} - C_{NO\ Diesel}) = \Delta E_{x\%} : (C_{ex\text{-}ante} - 40)$$

dove:

- $\Delta E_{100\%diesel}$ è la variazione delle emissioni legata al complesso dei veicoli diesel;
- $(C_{ex\text{-}ante} - C_{NO\ Diesel})$ è la corrispondente riduzione di concentrazioni che si ottiene in un dato punto per lo scenario "NO Diesel" rispetto a quello "ex-ante";
- $(C_{ex\text{-}ante} - 40)$ la riduzione di concentrazioni cui si mira, e
- $\Delta E_{x\%}$ la variazione complessiva delle emissioni necessaria a conseguirla,

da cui si ricava la variazione delle emissioni necessaria al rispetto del limite in un dato punto:

$$\Delta E_{x\%} = \Delta E_{100\%diesel} \bullet (C_{ex\text{-}ante} - 40) / (C_{ex\text{-}ante} - C_{NO\ Diesel})$$

Ciascun punto dell'area milanese richiederà dunque una riduzione più consistente delle emissioni quanto più sarà grande lo scostamento del livello attuale di concentrazione rispetto al valore limite.

La variazione emissiva che consente di rispettare il valore limite su tutta l'area corrisponderà al valore più elevato delle variazioni calcolate per tutti i punti. A fronte di riduzioni inferiori invece, il limite verrà rispettato su porzioni più ridotte dell'area milanese.

Può risultare a questo punto di interesse la stima della porzione di area urbana per la quale è possibile il rientro nel limite anche a fronte di livelli intermedi di riduzione. Ciò è espresso dal grafico seguente, ottenuto a partire dalla relazione di cui sopra calcolando per variazioni emissive $\Delta E_{x\%}$ progressive la percentuale di area urbana che via via giunge a rispettare il limite.

La situazione dello scenario "ex-ante" è rappresentata dal punto in basso a sinistra, mentre l'estremo in alto a destra della curva rappresenta la situazione in cui il limite è rispettato dappertutto. I punti intermedi danno una stima della percentuale di area urbana che rispetta il limite a fronte di una data riduzione delle emissioni (espressa in percentuale rispetto al complesso delle emissioni dei veicoli diesel) o, di converso, la riduzione necessaria al conseguimento del rispetto del limite su una data percentuale di area urbana.

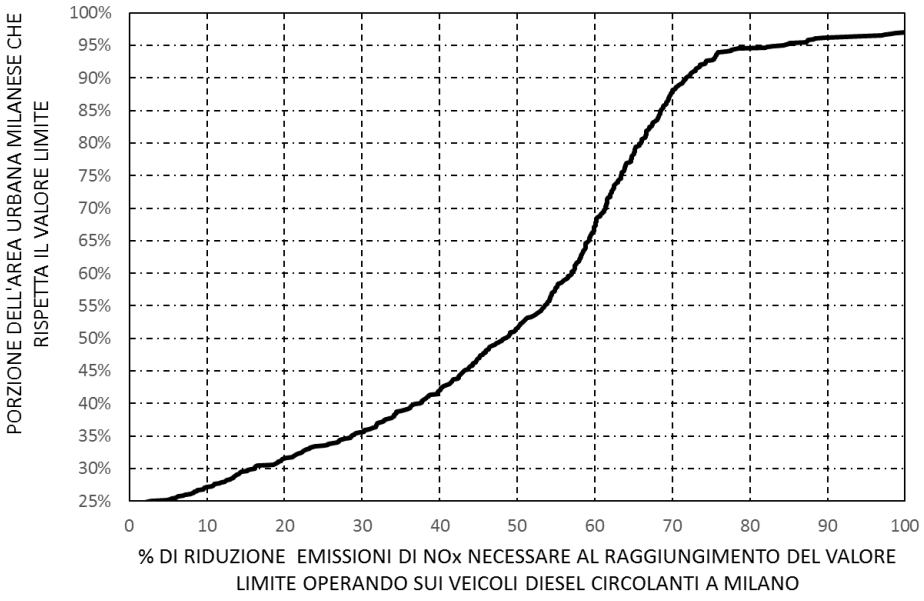


Figura 15. – Stima della riduzione delle emissioni necessaria a raggiungere l'obiettivo di rispettare il limite di legge sulle medie annuali (40 µg/m3) su tutto il territorio milanese (Comune di Milano).

Nella situazione dello scenario "ex-ante", in una porzione elevata (75%) del territorio del Comune di Milano è superato il limite della concentrazione media annue di NO_2 di 40 ug/m^3.

La porzione di territorio (circa il 3%) che risulta non rispettare il limite anche a fronte di una riduzione del 100% delle emissioni dei veicoli diesel corrisponde alle aree in prossimità delle tangenziali, come mostrato nei risultati relativi allo scenario "NO Diesel".

Sulla base dei dati relativi alle stime emissive ed alle simulazioni di qualità dell'aria effettuate risulta che la variazione emissiva che consentirebbe di rispettare il valore limite su tutta l'area è superiore alle emissioni complessive di tutti i veicoli diesel attualmente circolanti. Anche dunque immaginando di eliminare tutti i veicoli diesel nel Comune di Milano (scenario ipotetico senza

prendere in considerazione ipotesi di sostituzione degli spostamenti corrispondenti, e dunque immaginando per estremi spostamenti ad "emissioni zero") non è possibile raggiungere il valore limite dappertutto. Sono dunque necessarie riduzioni superiori, che interessano sia provvedimenti per il settore traffico estesi al di fuori del Comune di Milano, sia altri settori ed attività nel Comune di Milano ed altri comuni/aree.

I punti intermedi della curva possono essere utilizzati per ipotizzare scenari intermedi, nei quali non circolano determinate categorie di veicoli.

A titolo di esempio nella tabella seguente sono riportati i contributi percentuali alle emissioni di NOx dei vari segmenti di parco veicoli, raggruppati per classe Euro (si veda **Figura 8**), al fine di utilizzare il grafico riportato in Figura 15 per stimare le porzioni di territorio che potranno rispettare il limite a fronte di limitazioni alle circolazione per classi Euro. Ad esempio, ipotizzando la limitazione della circolazione per tutti i veicoli (auto, LDV e HDV) appartenenti alle seguenti classi Euro risulterebbe:

- **pre-Euro 4**: riduzione delle emissioni di NOx pari a circa il **28%** → aumento al **35%** della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite;
- **pre-Euro 5**: riduzione delle emissioni di NOx pari a circa il **46%** → aumento a circa il **50%** della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite;
- **pre-Euro 6**: riduzione delle emissioni di NOx pari a circa il **78%** → aumento a circa il **95%** della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite

Tabella 7. Contributi percentuali alle emissioni di NOx dei vari segmenti di parco veicoli raggruppati per classe Euro diesel.

Altri veicoli (benzina, ibridi + bus pubblici)	11.44%
Euro 0-3 diesel	28.30%
Euro 4 diesel	17.55%
Euro 5 diesel	32.07%
Euro 6 diesel	10.64%
	100.00%

Nella figura seguente è mostrato un esempio di utilizzo del grafico per stimare le porzioni del territorio del Comune di Milano che rispetteranno il valore limite per il biossido di azoto a fronte dell'eliminazione di differenti categorie di veicoli diesel.

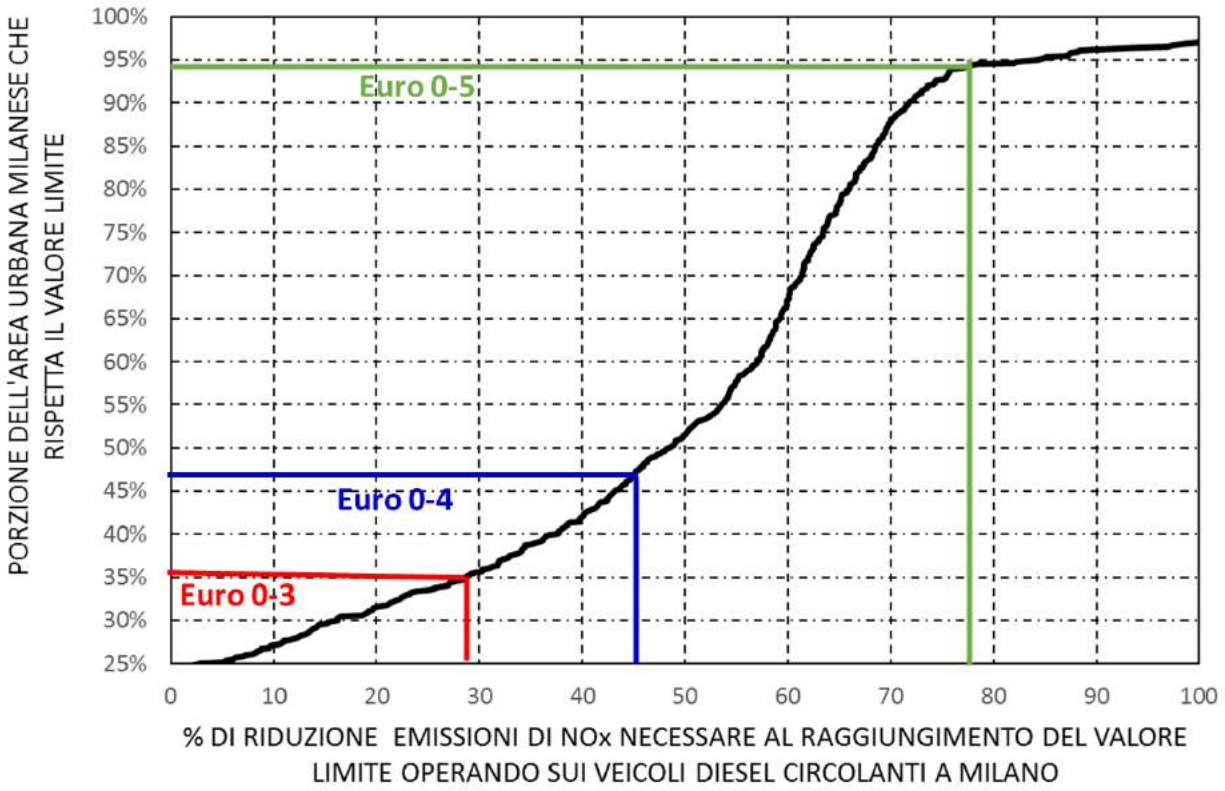


Figura 16. – Stima delle porzioni del territorio del Comune di Milano che rispetteranno il valore limite per il biossido di azoto a fronte dell'eliminazione di differenti categorie di veicoli diesel..

5. Conclusioni

Nel presente rapporto sono riportati i risultati di simulazioni modellistiche volte a stimare l'impatto delle emissioni di veicoli alimentati a gasolio circolanti nel Comune di Milano sulle concentrazioni medie annuali di NO_2. Le simulazioni modellistiche sono state effettuate considerando un dominio di calcolo che include il comune di Milano e si estende su una superficie di 35x35 km^2 alla risoluzione di 500 m. La stima delle emissioni che insistono sull'area di studio è stata effettuata a partire dall'inventario delle emissioni in atmosfera INEMAR (INventario EMissioni ARia), realizzato da ARPA Lombardia per conto di Regione Lombardia e, relativamente al traffico veicolare che insiste nell'area urbana milanese, alle informazioni fornite all'Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) del Comune di Milano (grafi di rete integrati, caratteristiche geometriche e strutturali della rete stradale, flussi di traffico). I risultati delle simulazioni modellistiche hanno permesso di produrre mappe di concentrazioni medie annuali di NO_2 considerando uno scenario "ex-ante", corrispondente alla situazione riferita all'anno 2017 (durante il quale si è svolta la campagna "NO2 NO grazie") ed uno scenario "NO Diesel", corrispondente ad uno scenario emissivo nel quale vengono annullate le emissioni derivanti da TUTTI i veicoli (auto, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali medi+pesanti) alimentati a gasolio. I risultati relativi allo scenario "ex-ante" evidenziano che l'area urbana milanese presenta concentrazioni medie annuali superiori al valore limite e che i valori più elevati delle concentrazioni, compreso il massimo assoluto pari a circa a 60 $\mu g/m^3$, si rilevano lungo le circonvallazioni a Nord del centro cittadino. Tali stime trovano conferme dalle elaborazioni prodotte da ARPA Lombardia che evidenziano livelli di NO_2 superiori al valore limite nella città metropolitana di Milano. Nello scenario "ex-ante" il 75% del territorio milanese non rispetta il limite della concentrazione media annua di NO_2 di 40 $\mu g/m^3$. I risultati relativi allo scenario "NO Diesel" evidenziano valori di NO_2 superiori al valore limite solo lungo le tangenziali ad Est ed a Nord dell'area urbana. È qui opportuno sottolineare che tale scenario non corrisponde ad uno scenario realistico, poiché non è stata effettuata alcuna ipotesi circa la sostituzione dei veicoli a gasolio con altra tipologia di veicoli e/o ipotesi alternative di mobilità urbana. A partire dai risultati di tali simulazioni è stato costruito un abaco mediante il quale è possibile valutare la riduzione delle emissioni necessaria a raggiungere l'obiettivo di rispettare il limite di legge sulle medie annuali (40 $\mu g/m^3$) su tutto il territorio milanese. Mediante l'utilizzo di tale abaco è stato stimato l'aumento percentuale della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite a fronte di limitazioni della circolazione per tutti i veicoli (auto, LDV e HDV) alimentati a gasolio distinti per categoria Euro. Ad esempio, limitando la circolazione a tutti i veicoli pre-Euro 4, pre-Euro 5 e pre-Euro 6, si otterrebbe un aumento della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite rispettivamente pari a circa il 35%, 46% e 95%.

Bibliografia

ACI (2018). Anzianità parco veicoli.

ACI (2018). Autoritratto 2017.

ACI (2014). AUTO – TREND Anni 2000-2011.

Ntziachristos L., Samaras Z. (2018). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv - Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles. https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016.

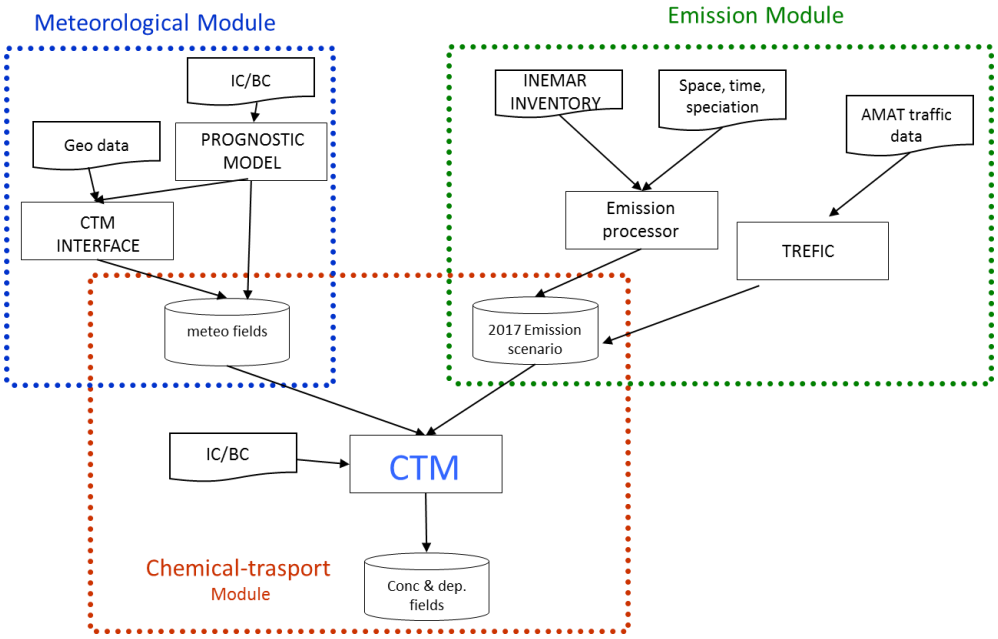
ISPRA (2016), Inventario nazionale delle emissioni in atmosfera 1990-2014. Informative Inventory Report 2016.

Appendice A – Il Sistema Modellistico utilizzato

A.1. Componenti del sistema modellistico

Il sistema modellistico utilizzato nello studio si articola in una serie di pre- e post-processori e di modelli, opportunamente integrati tra di loro, per la simulazione dei diversi processi che concorrono a determinare la qualità dell'aria in una determinata area geografica: caratteristiche del sito, variabili meteorologiche, emissioni, dispersione, deposizione e chimica dell'atmosfera. Tale sistema consente di simulare tali processi dalla scala regionale a quella locale considerando periodi sia di breve che di lunga durata (studio di episodi critici/valutazione degli standard di qualità dell'aria). Il sistema include modelli di trasporto tridimensionali ed è quindi in grado di tener conto della complessità del territorio (orografia e uso del suolo) e di situazioni meteo-diffusive evolutive nel tempo e non omogenee nello spazio.

Nella figura seguente viene mostrato uno schema delle componenti del sistema modellistico e del flusso dati.



Sistema modellistico utilizzato nello studio

Il sistema utilizzato in questo studio è basato sul modello **FARM** di trasporto e chimica dell'atmosfera (CTM acronimo di Chemical Transport Model) che considera i processi di trasporto/diffusione e chimico-fisici che coinvolgono gli inquinanti aerodispersi. Il sistema include i seguenti due moduli che provvedono alla preparazione dei dati in ingresso a tale modello:

1. Modulo meteorologico basato sul modello prognostico **WRF,** per la ricostruzione tridimensionale dei campi meteorologici (vento, pressione, temperatura, umidità), e su un modulo di interfaccia tra il modello meteorologico ed il CTM per il calcolo di ulteriori parametri necessari a quest'ultimo (es. diffusività verticali e orizzontali, velocità di deposizione secca, emissioni naturali, etc.);

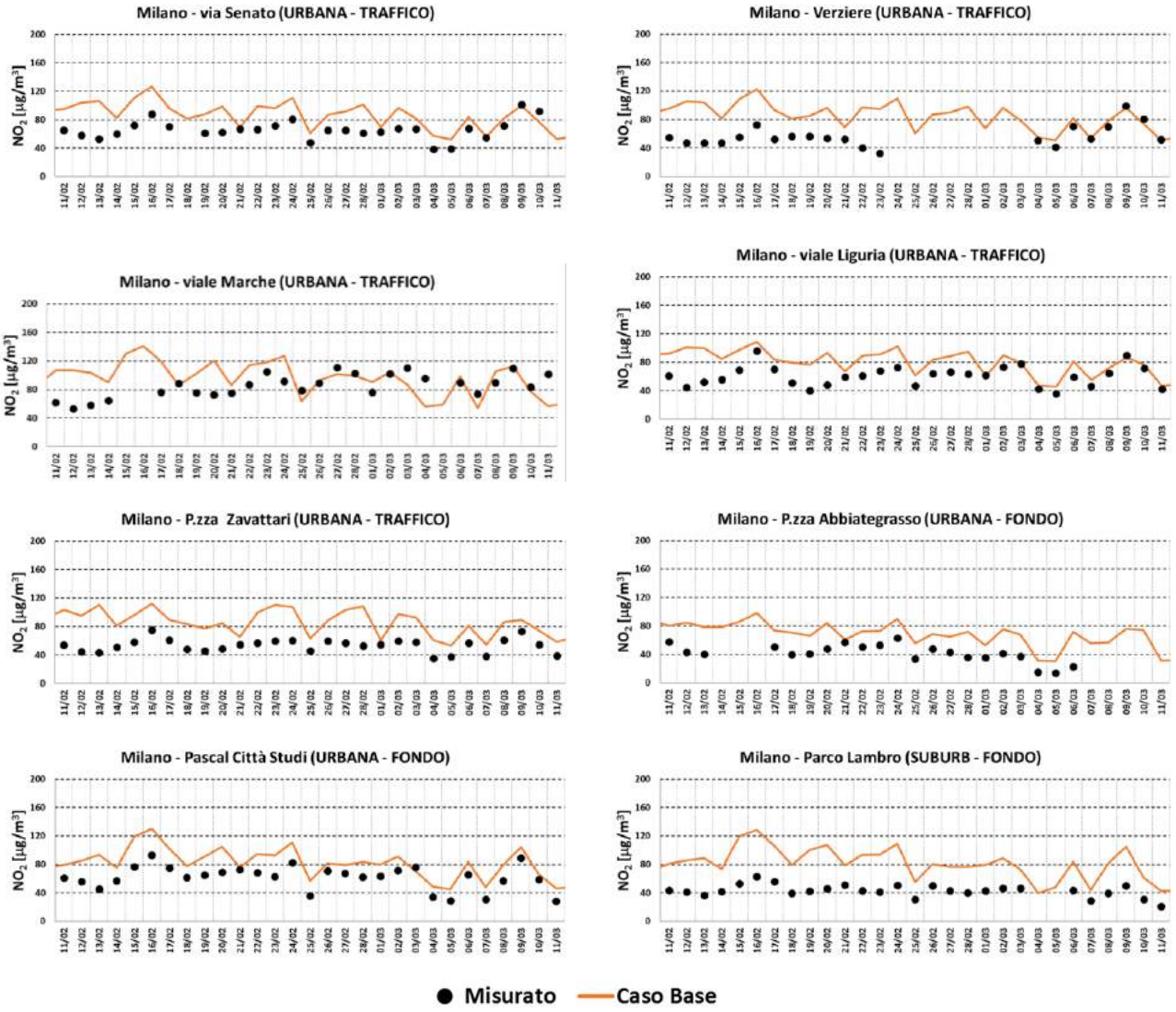
2. Modulo che provvede alla preparazione dell'input emissivo a partire dai dati contenuti nell'inventario delle emissioni INEMAR e prodotti dal modello TREFIC sulla base delle informazioni fornite da AMAT.

Il modello FARM necessita inoltre delle concentrazioni ai bordi del dominio di calcolo al fine di considerare i flussi di inquinanti provenienti dalle aree esterne ad esso (condizioni al contorno). A tale scopo sono stati utilizzati i campi di concentrazione prodotti dal sistema modellistico QualeAria (http://www.qualearia.it), attivo dal 2009, che produce quotidianamente previsioni meteorologiche e di qualità dell'aria per cinque giorni in avanti sia a scala europea sia a scala nazionale.

A.2. Calibrazione del modello di dispersione

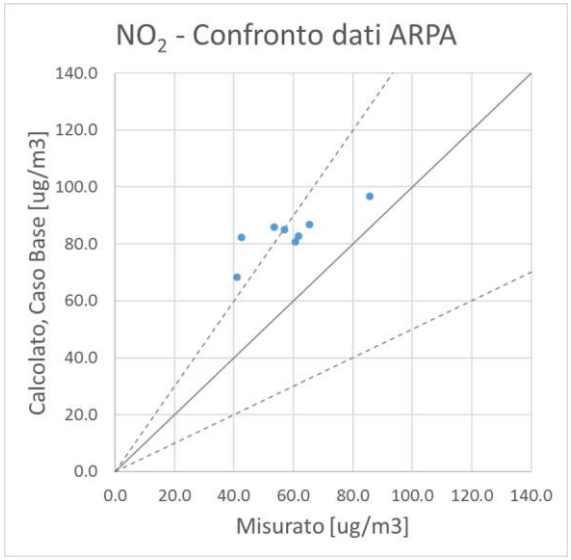
La calibrazione del modello di dispersione, analogamente a quanto viene svolto per gli strumenti di misura, è una operazione essenziale mediante la quale vengono definiti i parametri utilizzati dal modello al fine di migliorarne l'accuratezza. Tale operazione richiede il confronto dei risultati prodotti dal modello con misure di riferimento, prodotte ad esempio dalle rilevazioni fornite dalle reti di monitoraggio di qualità dell'aria (nell'ipotesi che quest'ultime siano a loro volta sufficientemente accurate). Vengono quindi ripetute le simulazioni, modificando opportunamente i diversi parametri del modello entro intervalli ragionevoli, fino a quando si raggiunge un buon accordo tra le concentrazioni simulate e rilevate dalle misure di riferimento. È qui opportuno sottolineare che un modello non è un doppione della realtà ma una sua rappresentazione parziale e pertanto affetta da incertezze legate sia ai dati in ingresso (emissioni, meteorologia, stato iniziale) sia alle ipotesi esemplificative introdotte nel modello stesso (selezione tra ciò che rimane dentro il modello, che ne farà parte integrante, e ciò che invece verrà coscientemente escluso).

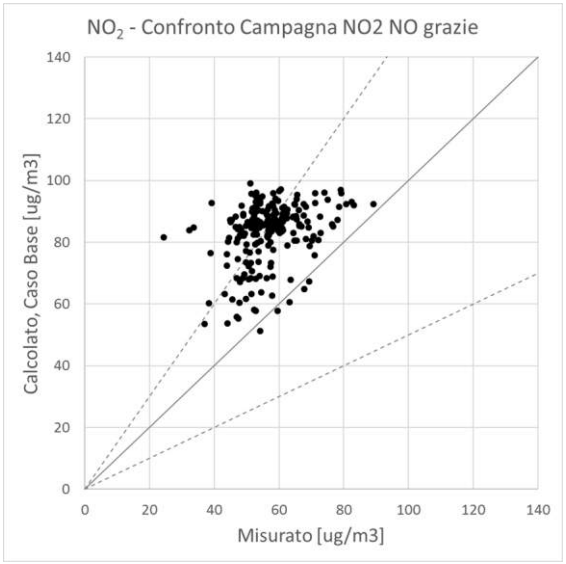
A tal fine sono state utilizzate le informazioni sperimentali fornite dalle stazioni della rete di monitoraggio di qualità dell'aria, gestite da ARPA Lombardia, presenti nell'area urbana milanese. Si è operata tale selezione perché obiettivo dello studio è la valutazione del contributo delle emissioni dei veicoli alimentati a gasolio nella città di Milano. Nella figura seguente viene mostrato il confronto tra le concentrazioni di NO_2 misurate in tali stazioni e calcolate dal suddetto sistema modellistico durante il periodo 11/2-11/3/2017. L'esame di tale figura evidenzia la capacità del modello di riprodurre le concentrazioni osservate con una sovrastima durante il primo periodo di simulazione attribuibile ad una sovrastima del contributo derivante dal riscaldamento domestico.



Confronto tra le concentrazioni di NO2 misurate e calcolate durante il periodo 11/2-11/3/2017

Nella figura successiva sono riportati i “grafici a dispersione” nei quali vengono riportati i confronti tra le concentrazioni medie mensili misurate e calcolate in corrispondenza rispettivamente delle stazioni ARPA e dei punti di campionamento della campagna “NO2 – NO grazie”. I dati sono visualizzati tramite una collezione di punti ove la posizione sugli assi orizzontale e verticale è determinata rispettivamente dalle misure e dalle stime modellistiche. Tale rappresentazione è utile per visualizzare il grado di correlazione (cioè di dipendenza lineare) tra le due variabili. Se i punti si dispongono lungo la retta y=x si ha correlazione pari a 1 ovvero correlazione diretta e assoluta. Dall’esame di tali figure risulta che i punti tendono a disporsi lungo tale retta ed al di sopra di essa indicando quindi una sovrastima dei valori calcolati rispetto ai valori misurati.



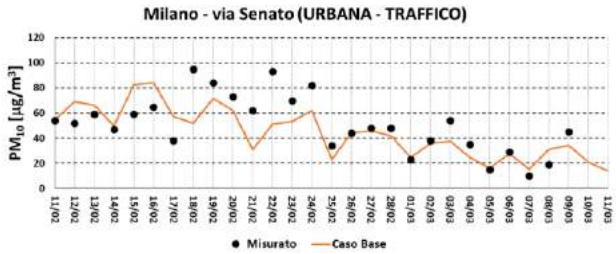


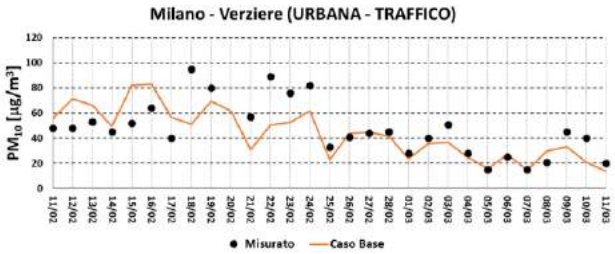
Confronti tra le concentrazioni medie mensili misurate e calcolate in corrispondenza rispettivamente delle stazioni ARPA e dei punti di campionamento della campagna "NO2 – NO grazie"

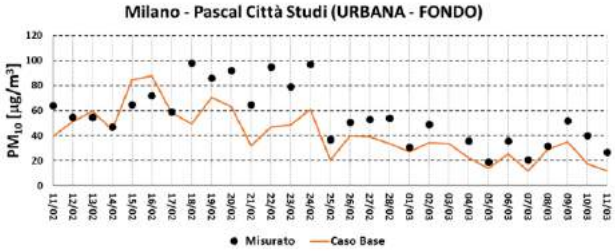
Poiché il modello di dispersione è in grado di considerare anche altri inquinanti nelle figure seguenti sono mostrati i confronti tra le concentrazioni di PM10, PM2.5 e "Black Carbon" misurate nelle stazioni ARPA e calcolate. Dall'esame di tali figure risulta un ottimo accordo tra le concentrazioni misurate e calcolate e relativamente al PM10 ed al PM2.5 una diminuzione dei livelli a partire dalla fine del mese di febbraio attribuibile al minor contributo degli impianti di riscaldamento. Tale diminuzione non si rileva per il "Black Carbon" che in ambito urbano può essere assunto quale tracciante delle emissioni dei motori a combustione interna e della vasta gamma di specie chimiche (e di varia tossicità) da esso trasportate, compresi i composti organici quali gli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici)[3].

[3] http://www.arpalombardia.it/sites/QAria/_layouts/15/QAria/Inquinanti.aspx?page=O3&title=Ozono%20troposferico

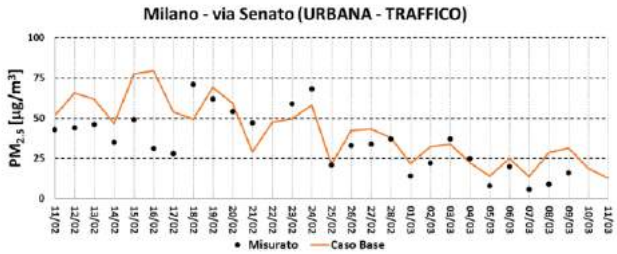
PM10

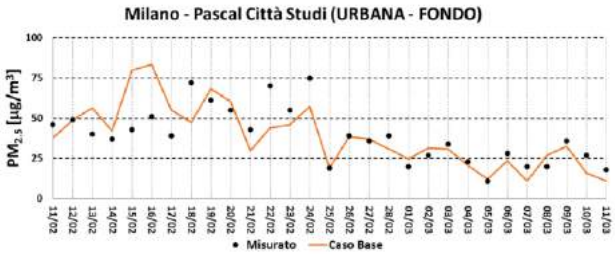




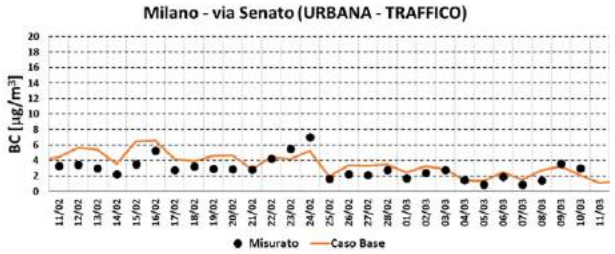


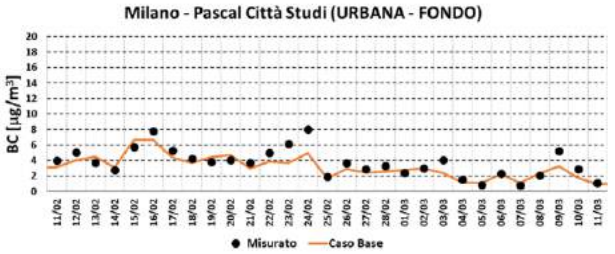
PM2.5





Black Carbon





Misurato — Caso Base

Confronto tra le concentrazioni di PM10, PM2.5 e Black Carbon misurate e calcolate durante il periodo 11/2-11/3/2017

A.3. Stima delle concentrazioni medie annuali

Il modello di dispersione produce, per ciascun punto del dominio di calcolo, una stima delle concentrazioni medie orarie relativamente al periodo 11/02/2017-11/03/2017. È necessario quindi:

- passare alla concentrazione media annuale, al fine di stimare le riduzioni necessarie al rientro nel limite di legge per l'NO_2 (media annuale pari a 40 $\mu g\ m^{-3}$).;
- correggere il campo di concentrazione così ottenuto al fine al fine di tener conto delle sovrastime prodotte dal modello di dispersione (incertezze indotte dalle informazioni in ingresso: emissioni e meteorologia e relative al modello stesso).

A tal fine sono stati utilizzati i dati nella tabella seguente nella quale sono riportate, relativamente alle stazioni ARPA, le concentrazioni medie misurate rispettivamente durante il periodo di simulazione (11/02/2017-11/03/2017, $mis_{11/2\text{-}11/3}$) e l'anno 2017 (mis_{2017}) e le concentrazioni calcolate durante il periodo di simulazione ($calc_{11/2\text{-}11/3}$).

Concentrazioni medie misurate e calcolate di NO_2 rilevate nel 2017 dalle stazioni ARPA dislocate nella città di Milano.

	Marche	Liguria	Parco Lambro	P.zza Abbiategrasso	P.zza Zavattari	Verziere	Senato	Pascal Città Studi
$mis_{11/2\text{-}11/3}$	85.8	60.6	42.5	41.1	53.5	57.0	65.5	61.7
mis_{2017}	64.4	55.9	35.1	35.0	50.5	48.1	54.1	44.5
$calc_{11/2\text{-}11/3}$	96.8	80.6	82.3	68.3	85.9	85.0	86.8	82.8
$mis_{11/2\text{-}11/3}$ / mis_{2017}	0.75	0.92	0.83	0.85	0.94	0.84	0.83	0.72
$mis_{11/2\text{-}11/3}$ / $calc_{11/2\text{-}11/3}$	0.89	0.75	0.52	0.60	0.62	0.67	0.75	0.75

A partire da tali dati sono stati quindi calcolati:

- la media del rapporto tra le concentrazioni medie rilevate durante il periodo di simulazione ($mis_{11/2\text{-}11/3}$) e l'intero anno (mis_{2017}) che è risultata pari a **0.84**;
- la media del rapporto tra le concentrazioni medie rilevate durante il periodo di simulazione ($mis_{11/2\text{-}11/3}$) e calcolate dal modello in corrispondenza delle stazioni di misura ($calc_{11/2\text{-}11/3}$) che è risultata pari a **0.69**.

Moltiplicando quindi, per ciascun punto del dominio di calcolo, le concentrazioni medie di NO_2 calcolate dal modello di dispersione ($calc_{11/2\text{-}11/3}$) per il prodotto di tali parametri (ovvero =0.84*0.69) si ottiene una stima realistica delle concentrazioni medie annuali relative a tale inquinante.