

MILANO SENZA DIESEL: QUANTO MIGLIOREREBBE LA QUALITÀ DELL'ARIA?

Camillo Silibello^{1,*}, Alessandro Nanni¹, Nicola Pepe¹, Giuseppe Calori¹, Giuseppe Brusasca¹

¹Arianet S.R.L.

Sommario – Il settore “Trasporto su strada” rappresenta il 74% delle emissioni di ossidi di azoto che insistono sul Comune di Milano e il 93% di tali emissioni è prodotto dai veicoli alimentati a gasolio. Al fine di stimare l’impatto delle emissioni di tali veicoli circolanti nell’area urbana milanese sono state condotte simulazioni mediante l’utilizzo di un 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 stradale sono state stimate mediante l’utilizzo della metodologia europea COPERT 5 e dei dati di traffico forniti dall’Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) di Milano. Sono state quindi condotte due simulazioni corrispondenti al quadro emissivo “ex-ante” del 2017 ed escludendo da esso le emissioni derivanti da tutti i veicoli alimentati a gasolio circolanti sulla rete urbana del Comune di Milano (scenario “NO Diesel”). In tale scenario i mezzi pubblici ed i veicoli circolanti sulle autostrade e tangenziali sono stati mantenuti invariati. La simulazione dello scenario “ex-ante” mostra concentrazioni medie annuali di NO₂ superiori al valore limite annuale (40 µg m⁻³) in larga parte del territorio comunale (circa il 75%) e valori più elevati lungo le circonvallazioni a nord del centro cittadino. Nello scenario “NO Diesel” permangono valori di NO₂ superiori al valore limite solo lungo le tangenziali a est e a nord dell’area urbana. A partire da tali risultati è stato infine stimato l’aumento percentuale della porzione di territorio milanese in cui è rispettato il limite di legge per il biossido di azoto sulle medie annuali a fronte di limitazioni della circolazione per i veicoli alimentati a gasolio distinti per categoria Euro.

Parole chiave: emissioni in atmosfera, traffico stradale, veicoli alimentati a gasolio, modelli di dispersione, scenari emissivi.

MILAN WITHOUT DIESEL: HOW WOULD THE AIR QUALITY IMPROVE?

Abstract – The “Road transport” sector represents 74% of the nitrogen oxides emissions in the Municipality of Milan, with 93% of these emissions produced by diesel-powered vehicles. To estimate the impact of the emissions from these vehicles circulating in the urban area, simulations were conducted using a complex modelling system that takes into account the dispersion of the pollutants emitted and the chemical transformations which take place in the atmosphere according to meteorology. Road traffic

emissions over Milan urban area were estimated by using the official European COPERT 5 methodology and the traffic data provided by the Environment and Territory Mobility Agency (AMAT) of the Municipality of Milan. Two simulations were therefore carried out corresponding to the 2017 “ex-ante” emission framework and then excluding from it the emissions deriving from all diesel-powered vehicles circulating on the municipal road network of Milan (scenario “NO Diesel”). In this scenario, emissions from public transport and vehicles circulating on motorways and ring roads remained unchanged. The results from the “ex-ante” scenario show average annual NO₂ concentrations above the annual limit value (40 µg m⁻³) in a major part of the urban area (about 75%) and higher values along the ring roads north of the city centre. In the “NO Diesel” scenario, NO₂ concentrations above the limit value remain only along the ring roads to the east and north of the urban area. Starting from these results, the percentage increase in the portion of the Milan territory that would respect the limit values was also estimated for traffic restrictions progressively involving increasing categories of diesel-powered vehicles.

Keywords: emissions inventory, vehicular traffic, diesel fuelled vehicles, dispersion models, emission scenarios.

Ricevuto il 19-3-2020. Correzioni richieste il 13-4-2020. Accettazione il 14-5-2020.

1. INTRODUZIONE

Nei motori diesel la miscela aria-carburante ha sempre una dosatura magra, ovvero presenta una quantità di aria (e quindi di ossigeno e azoto) in eccesso, che determina la formazione di considerevoli quantità di ossidi di azoto. Per tale ragione, i veicoli alimentati a gasolio sono ritenuti i maggiori responsabili degli elevati livelli di NO₂ all’interno delle aree urbane e, conseguentemente, sono stati introdotti divieti alla loro circolazione. Ad esempio la corte federale di Lipsia ha stabilito, nel febbraio 2018, che le città tedesche possono ricorrere alla misura del divieto di circolazione delle auto a gasolio e, il 2 agosto 2018, la Giunta del Comune di Milano ha approvato il provvedimento che istituisce l’Area B, una zona che si estende sino quasi ai confini della città, ovvero il 72% dell’intero territorio comunale, che include misure specifiche per i veicoli diesel. Dal 21 gennaio

* Per contatti: Via Gian Giacomo Gilino, 9 – 20128 Milano. Tel +39-022700725513 / 0227080920; fax 02 25708084. c.silibello@aria-net.it.

2019, è infatti vietato l'ingresso in tale area 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 (fino all'Euro 6d).

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. La principale fonte di emissione degli ossidi di azoto ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) 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.

Con l'emanazione del D.Lgs 13/08/2010 n. 155, il legislatore ha recepito la Direttiva Europea relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa (2008/50/CE) che fissa a $40 \mu\text{g m}^{-3}$ il limite di legge relativo alla concentrazione media annuale di NO_2 . Poiché tale limite viene superato in diverse zone della città di Milano, l'associazione "Cittadini per l'aria" ha promosso uno studio modellistico volto 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 svolge diverse azioni di scienza partecipata tra le quali la campagna "NO₂, No grazie!"¹ effettuata dai cittadini dall'11 febbraio all'11 marzo 2017 a Milano e in altri comuni dell'area metropolitana. Nel corso di tale campagna sono stati dislocate 219 fiale assorbenti, per il campionamento così detto passivo, a Milano e in altri comuni dell'area metropolitana (Paderno Dugnano, Gallarate, Novedrate, Desio, Caponago, Carugate, Cernusco sul Naviglio, San Donato Milanese, Pregnana, San Giuliano Milanese, Monza). Il campionamento passivo è una tecnica di monitoraggio così definita perché la cattura dell'inquinante (in questo caso del gas NO_2) avviene per diffusione molecolare della sostanza attraverso il campionatore e non richiede quindi l'impiego di un dispositivo (es. di una pompa) per l'aspirazione dell'aria². Le fiale sono state poste davanti a casa, o a scuola, o al luogo di lavoro, su un palo a un'altezza di 2.5/3 metri, e sono state esposte all'aria per 1 mese (12 Febbraio-12 Marzo 2017) in diversi punti dell'area metropolitana di Milano. Il risultato del

campionamento è pertanto una misura integrata della concentrazione media di NO_2 nell'aria relativa a tutto il periodo nei diversi punti di misura. 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.

La valutazione del contributo dei veicoli alimentati a gasolio sulle concentrazioni di NO_2 nell'area urbana milanese è stata effettuata mediante l'utilizzo del modello di chimica dell'atmosfera FARM e la tecnica 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:

- quali sarebbero i livelli di NO_2 nell'area milanese 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 al fine di rientrare nel valore limite relativo alla concentrazione media annuale?

2. MATERIALI E METODI

2.1. Area di studio

Le simulazioni modellistiche sono state effettuate considerando un dominio di calcolo che include il Comune di Milano e si estende su una superficie di $35 \times 35 \text{ km}^2$ (Figura 1). La griglia di calcolo utilizzata per la simulazione meteorologica e di dispersione è suddivisa in 70×70 celle, lungo le direzioni est-ovest e sud-nord, aventi una risoluzione orizzontale di 500 m. La scelta di tale dominio risponde alle necessità di considerare le emissioni prodotte sia dalla città di Milano sia delle aree urbane circostanti, maggiormente presenti a nord e a est, che influenzano i livelli di NO_2 rilevati a Milano a seguito di processi di trasporto e dispersione atmosferica.

2.2. Emissioni

Le emissioni derivanti dal traffico veicolare nell'area urbana milanese sono state stimate secondo la metodologia di riferimento europea a partire da dati di traffico di dettaglio forniti dall'Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) del Comune di Mi-

¹ <https://www.cittadiniperlaria.org/nasce-la-prima-mappa-dell'inquinamento-da-no2-dell'aria-di-milano-creata-dai-cittadini-per-i-cittadini-2-2/>

² <https://www.cittadiniperlaria.org/campagna-no2-no-grazie-un-approfondimento-scientifico/>

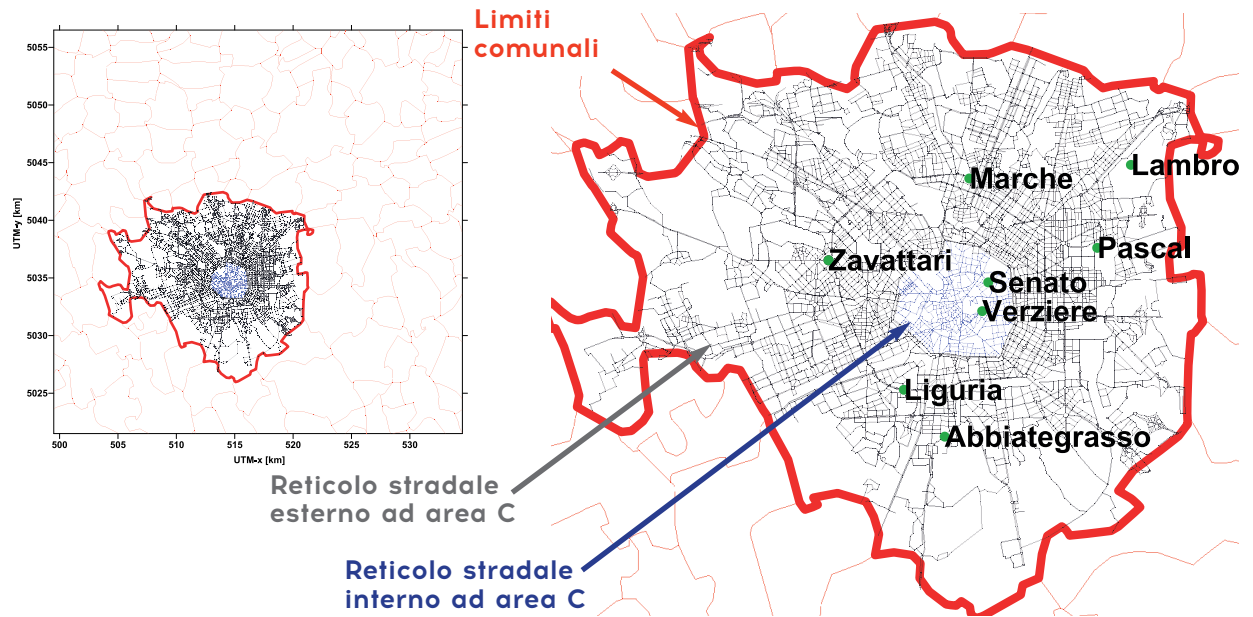


Figura 1 – Dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni modellistiche (proiezione UTM fuso 32). Sono riportati i limiti dei comuni inclusi nel dominio (in rosso), il reticolo stradale utilizzato per la stima delle emissioni stradali nel Comune di Milano (colore blu: interno ad area C, colore nero: esterno ad area C) e le stazioni di misura ARPA utilizzate nello studio (colore verde)

lano. Le emissioni relative a tutte le altre tipologie di sorgenti ed al resto dell'area di studio utilizzate in input alle simulazioni sono state predisposte a partire dall'inventario delle emissioni in atmosfera INEMAR (INventario EMissioni ARia) realizzato da ARPA Lombardia per conto di Regione Lombardia, riferito all'anno 2014 (<http://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/Inemar/HomeLombardia>).

2.2.1. Inventario regionale INEMAR

INEMAR è uno strumento progettato per stimare le emissioni degli inquinanti aeriformi prodotte da diverse attività e tipo di combustibile. Le

informazioni di base sono costituite da indicatori di attività (consumo di combustibile, consumo di vernici, quantità incenerita, e in generale qualsiasi parametro che traccia l'attività responsabile dell'emissione), fattori di emissione (rapporto tra l'emissione di un inquinante da una data sorgente emissiva e l'unità di indicatore della sorgente stessa) e dati statistici necessari per la disaggregazione spaziale e temporale delle emissioni. I dati contenuti nell'inventario sono suddivisi secondo una struttura gerarchica che comprende 11 macrosettori, 56 settori e 360 categorie (attività). In Figura 2 si riporta, per i comuni

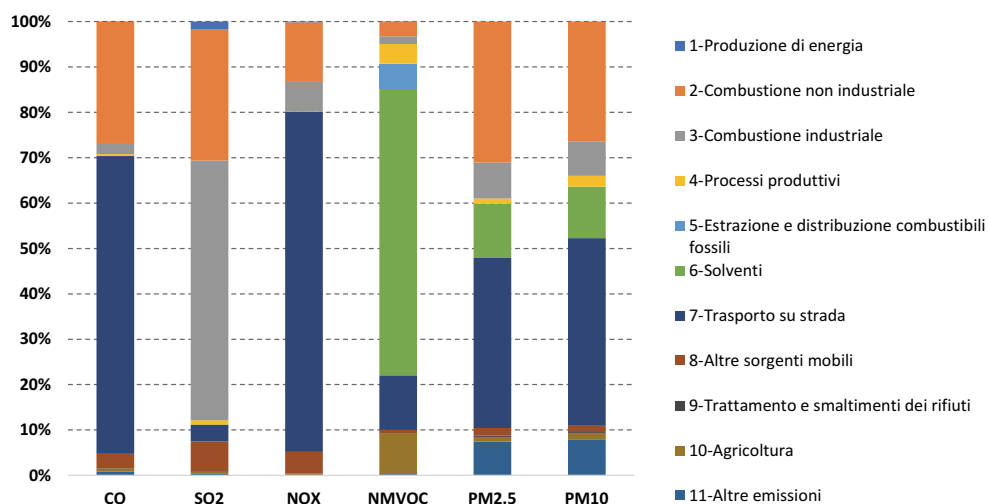


Figura 2 – Distribuzione percentuale dei contributi dei diversi macrosettori per i comuni che ricadono nel dominio di calcolo

che ricadono nel dominio di calcolo definito in Figura 1, la distribuzione percentuale dei contributi degli 11 macrosettori relativi ai principali inquinanti: CO, SO₂, NO_x, NMVOC (Composti Organici Volatili Non Metanici), PM_{2,5} e PM₁₀ (le componenti primarie di tali inquinanti). Tale figura evidenzia le attività potenzialmente più critiche per i diversi inquinanti. Per quanto riguarda particolato, CO e NO_x 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. Concentrandosi sul particolato (PM_{2,5} e 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. Per quanto riguarda il biossido di zolfo (SO₂), la combustione industriale contribuisce per circa il 60% mentre quella residenziale/commerciale per il 30% del totale emissivo. Per quanto riguarda i NMVOC, il macrosettore solventi è quello predominante con un contributo percentuale superiore al 60%. Una descrizione dettagliata delle emissioni di NO_x nella città di Milano, stimate nell'inventario delle emissioni INEMAR, è riportata nel Materiale Supplementare (1).

2.2.2. Modello di stima delle emissioni da traffico stradale nel Comune di Milano

La stima delle emissioni inquinanti da traffico stradale nel Comune di Milano è stata effettuata mediante il modello TREFIC (road TRaffic Emission Factors Improved Calculator), sviluppato da ARIANET (Nanni *et al.*, 2004) sulla base della metodologia ufficiale Europea COPERT 5 (*copert.emisia.com*, Mellios e Ntziachristos, 2016; Ntziachristos e Boulter, 2016; Ntziachristos e Samaras, 2018) che raccoglie e mantiene aggiornato il database dei fattori d'emissione (valori di emissione per unità di percorrenza), relativi ai singoli veicoli suddivisi per categorie codificate. TREFIC effettua il calcolo delle emissioni sui diversi tratti di una complessa rete stradale sulla base delle seguenti informazioni: lunghezza degli archi, situazione di traffico (urbana congestionata, urbana non congestionata, extraurbana, autostradale), velocità media di percorrenza e flusso veicolare distinti per macrocategorie e carburante. Il modello permette di distinguere le emissioni allo scarico, evaporative, derivanti dall'usura di pneumatici e freni e prodotte dal transito dei veicoli (abrasione della strada e risollevarimento di polveri). TREFIC è stato quindi applicato al traffico stradale che percorre la rete di Milano, inclusi i tratti di tangenziali e autostrade comprese tra i confini comunali. Nella Figura 3 sono mostrati i flussi di traffico, espressi in ter-



Figura 3 – 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 ed è espresso come veicoli equivalenti nell'ora di punta del mattino

mini di veicoli equivalenti, simulati da AMAT per l'ora di punta del mattino (dalle ore 8 alle 9) di un giorno ferialo. Il modello utilizzato da AMAT fornisce in particolare le seguenti informazioni:

- flussi veicolari distinti per 4 macrocategorie: auto, moto, commerciali leggeri (LDV – Light-duty Vehicles –, ovvero veicoli merci di lunghezza < di 7,5 m), commerciali pesanti (HDV – Heavy-duty Vehicles –, con lunghezza > 7,5 m);
- velocità medie di deflusso;
- tipologia di strada (urbana o autostrada).

Il modello del traffico di AMAT è basato su misure reali presso alcune sezioni di conteggio della rete stradale e rispecchia dunque anche le limitazioni già esistenti alla circolazione dei HDV.

La ripartizione dei veicoli circolanti sulla rete stradale, distinti per tipologia di alimentazione, motorizzazione e categoria Euro, è stata effettuata sulla base dei dati ACI relativi all'anno 2017 dei veicoli immatricolati nella Provincia di Milano e dei valori di percorrenze medie annuali distinti per categoria Euro (Figura 4). Grazie anche a una percorrenza media annuale superiore mediamente di oltre il 70% rispetto a quella delle autovetture a benzina, le autovetture alimentate a gasolio incidono in modo molto considerevole sulla distribuzione complessiva delle percorrenze nell'area urbana.

Mediante TREFIC è stato quindi possibile stimare le emissioni dei diversi inquinanti che insistono sulla rete stradale del Comune di Milano. Per una verifica di consistenza, tali stime sulla rete sono state confrontate con quelle complessive relative al Comune di Milano contenute nell'inventario INEMAR (Tabella 1). Benché le due metodologie di stima siano differenti, le emissioni stimate da TREFIC e INEMAR risultano paragonabili per gli inquinanti di maggior interesse e attenzione (NO_x e PM). Ciò è dovuto al fatto che entrambe le stime derivano da fattori di emissione COPERT che sono basati su misure effettuate in situazioni di traffico reali, ben più complesse rispetto a quelle standard utilizzate per il controllo all'atto dell'omologazione dei veicoli. Ciò ne garantisce la veridicità anche relativamente allo scandalo "Dieselgate" che ha riguardato la scoperta della manomissione del software dei motori a gasolio in modo da ridurre le emissioni di NO_x in sede di omologazione.

In tale tabella sono mostrate inoltre le emissioni stimate da TREFIC relativamente alla situazione nella quale vengono annullate le emissioni derivanti da tutti i veicoli alimentati a gasolio a eccezione dei bus pubblici (scenario "NO Diesel") e le corrispondenti riduzioni percentuali rispetto allo scenario base. Dall'esame di tale tabella risultano significative riduzioni di emissioni di os-

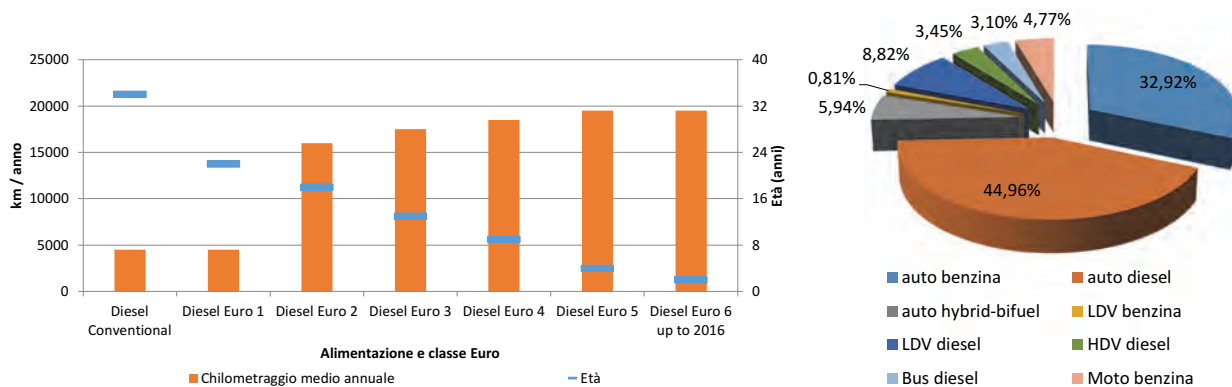


Figura 4 – Sinistra: percorrenze annuali ed età medie di autovetture appartenenti a diverse categorie EURO. Destra: Distribuzione percentuale dei veicoli circolanti a Milano nell'anno 2017

Tabella 1 – Confronto fra le emissioni (t anno⁻¹) del macrosettore 7 (trasporto su strada) relative al Comune di Milano in INEMAR e stimate da TREFIC relative alla situazione 2017 (ex-ante) e allo scenario "NO Diesel"

Modello	CO	NO _x	NH ₃	SO ₂	NMVOC	PM _{2.5}	PM ₁₀
INEMAR	6277	4516	50	8	1755	259	336
TREFIC [ex ante]	9405	4045	35	32	1710	286	413
TREFIC [NO Diesel]	8770(-7%)	1398(-65%)	29(-17%)	17(-47%)	1606(-6%)	124(-57%)	188(-54%)

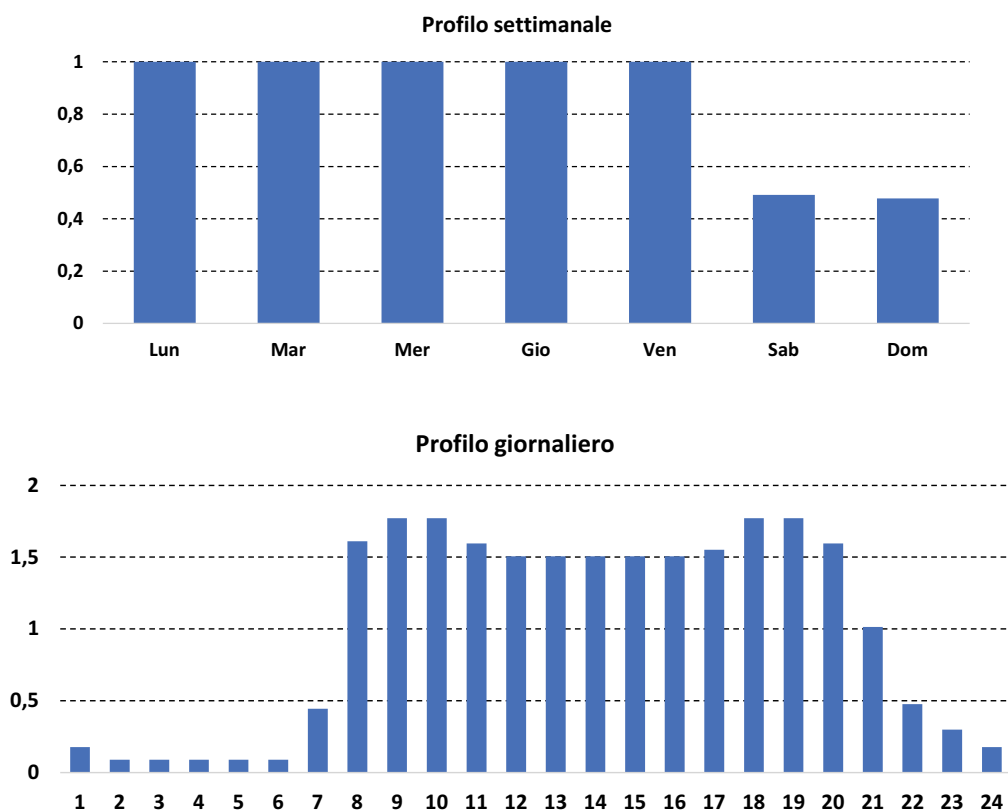


Figura 5 – Profilo settimanale e giornaliero per il traffico del Comune di Milano riferiti al giorno feriale e all'ora di punta

sidi di azoto (pari al 65%), $PM_{2.5}$ (57%) e PM_{10} (54%).

Le emissioni stimate da TREFIC, medie o relative all'ora di punta, analogamente a quelle relative agli altri macrosettori, vengono quindi modulate nel tempo sulla base di profili giornalieri e settimanali al fine di fornire al modello di dispersione emissioni su base oraria. In Figura 5 si riportano i profili utilizzati per il traffico del Comune di Milano. Considerata l'estrema e difficilmente riproducibile eterogeneità delle situazioni di traffico reale sulla rete stradale esaminata, sono stati scelti, in base all'esperienza in studi di settore pregressi, gli stessi profili urbani standard per tutte le strade. In particolare, il profilo settimanale presenta una modulazione uguale per i giorni feriali mentre durante il fine settimana le emissioni da traffico si dimezzano; per quanto riguarda quello giornaliero, i picchi del mattino e del pomeriggio, che scandiscono l'inizio e la fine dell'attività lavorativa, sono identici (pendolarismo perfetto).

La riduzione percentuale delle emissioni di NO_x ottenuta per lo scenario "NO Diesel" (65%) è diversa dal contributo complessivo dei veicoli Diesel sul totale INEMAR delle emissioni (93%). Questa differenza è dovuta a diverse caratteristi-

che delle due basi dati, tra cui: l'anno di riferimento dei due inventari, che porta a una differente vetustà del parco dei circolanti; la frazione di emissioni dei veicoli diesel circolanti sulle autostrade e tangenziali (percorse tra l'altro da una percentuale superiore di veicoli pesanti) che non è stata azzerata nello scenario "NO Diesel"; l'aver considerato nel calcolo qui presentato velocità di percorrenza medie reali (in caso di basse velocità, ovvero flusso interrotto o congestionato, l'emissione di NO_x è notoriamente inferiore rispetto a velocità più vicine a quelle del flusso libero, mentre quelle di CO, per esempio, aumentano).

2.3. Sistema modellistico

La realizzazione delle simulazioni è stata effettuata mediante un sistema modellistico che combina pre/post-processor e modelli, opportunamente integrati tra di loro, per simulare i diversi processi che concorrono a determinare la qualità dell'aria: la distribuzione nello spazio e nel tempo delle emissioni di inquinanti primari (gas e particolato), la loro successiva dispersione in atmosfera da parte del vento e delle condizioni di turbolenza (giorno/notte), le trasformazioni chimiche

che coinvolgono gli inquinanti presenti in atmosfera e che danno luogo alla formazione di inquinanti secondari (es. NO₂, O₃ e particolato secondario) ed i processi di rimozione dovuti alle deposizioni al suolo secche ed umide. Il sistema è basato su modelli tridimensionali in grado di tener conto di tale complessità alle diverse scale spaziali, dalla regionale a quella urbana, considerando periodi sia di breve che di lunga durata (studio di episodi critici/valutazione degli standard di qualità dell'aria).

In particolare, include:

- il modello meteorologico prognostico WRF (Skamarock *et al.*, 2008) per la ricostruzione tridimensionale dei campi meteorologici;
- un modulo per la preparazione dell'input emissivo al modello di dispersione a partire dai dati contenuti nell'inventario delle emissioni INEMAR e prodotti da TREFIC sulla base delle informazioni fornite da AMAT;
- il modello di dispersione e chimica dell'atmosfera FARM (www.farm-model.org, Gariazzo *et al.*, 2007; Silibello *et al.*, 2008; Bessagnet *et al.*, 2016);
- un modulo per la predisposizione delle condizioni iniziali e al contorno (concentrazioni degli inquinanti ai bordi del dominio) a partire dai campi prodotti dal sistema di previsione QualeAria, sviluppato da ARIANET, che produce quotidianamente previsioni di qualità dell'aria a scala europea e nazionale (www.qualearia.it).

3. RISULTATI

Il periodo di riferimento è coinciso con quello durante il quale si è svolta l'azione di scienza partecipata "NO₂, No grazie!", promossa dall'Associazione "Cittadini per l'aria", ovvero dal 11/02/2017 al 11/03/2017. Sono state effettuate quindi simulazioni modellistiche considerando due scenari emissivi:

- Scenario "ex ante", corrispondente alla situazione nella quale sono considerate le limitazioni vigenti all'anno 2017;
- Scenario "NO Diesel", sempre con anno di riferimento il 2017 ma ipotizzando il blocco di tutti i veicoli diesel circolanti nell'area urbana di Milano, ad eccezione delle autostrade mantenute inalterate. Per completezza, questo blocco ha compreso anche i LDV nonostante, allo stato attuale, sul mercato siano poco praticabili alternative all'alimentazione a gasolio per questi veicoli.

Poiché uno degli obiettivi dello studio è individuare le categorie di veicoli alimentati a gasolio a cui estendere il divieto alla circolazione all'interno dell'area milanese al fine di rientrare nel valore limite relativo alla concentrazione media annuale, occorre estendere i risultati relativi al periodo di riferimento della simulazione all'intero anno. A tale scopo sono state utilizzate le concentrazioni medie misurate, sia durante il periodo di simulazione (11/02/2017-11/03/2017, $mis_{11/2-11/3}$) sia durante l'intero anno (mis_{2017}), dalle otto stazioni di monitoraggio ARPA presenti nel Comune di Milano e le concentrazioni calcolate durante il periodo di simulazione ($calc_{11/2-11/3}$) nello Scenario "ex ante" (Tabella 2). A partire dai dati mostrati in Tabella 2 tabella sono state calcolate:

- la media del rapporto tra le concentrazioni medie rilevate durante l'intero anno (mis_{2017}) e il periodo di simulazione ($mis_{11/2-11/3}$) che è risultata pari a 0.84;
- la media del rapporto tra le concentrazioni medie rilevate e calcolate dal modello in corrispondenza delle stazioni di misura ($calc_{11/2-11/3}$) che è risultata pari a 0.69. Tale valore indica una sovrastima del modello che tuttavia non risulta essere uniforme per le diverse stazioni di misura.

Moltiplicando quindi, per ciascun punto del dominio di calcolo, le concentrazioni medie di NO₂ calcolate dal modello di dispersione ($calc_{11/2-11/3}$), re-

Tabella 2 – Concentrazioni medie misurate e calcolate di NO₂ in diversi periodi del 2017 in corrispondenza delle stazioni ARPA dislocate nella città di Milano

	Marche	Liguria	Parco Lambro	P.zza Abbiategrasso	P.zza Zavattari	Verziere	Senato	Pascal Città Studi
$mis_{11/2-11/3}$	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
$calc_{11/2-11/3}$	96.8	80.6	82.3	68.3	85.9	85.0	86.8	82.8
$\frac{mis_{2017}}{mis_{11/2-11/3}}$	0.75	0.92	0.83	0.85	0.94	0.84	0.83	0.72
$\frac{mis_{11/2-11/3}}{calc_{11/2-11/3}}$	0.89	0.75	0.52	0.60	0.62	0.67	0.75	0.75

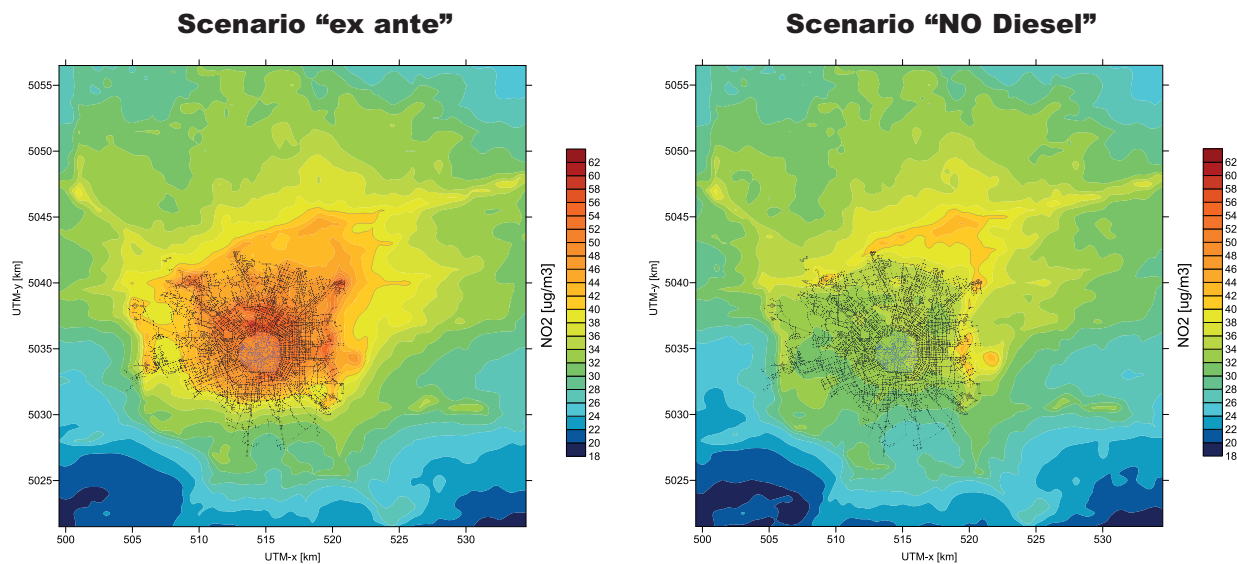


Figura 6 – Concentrazioni medie annuali al suolo di NO_2 corrispondenti agli scenari “ex-ante” e “NO Diesel”

lativamente ai due scenari emissivi, per il prodotto di tali parametri (ovvero per $0.58=0.84 \cdot 0.69$) si ottiene una stima realistica delle concentrazioni medie annuali relative a tale inquinante nei due scenari emissivi. In Figura 6 sono riportate le mappe relative alle concentrazioni medie annuali di NO_2 nei due scenari emissivi.

L'esame della mappa relativa allo scenario “ex ante” evidenzia che la maggior parte dell'area urbana milanese presenta concentrazioni medie annuali di NO_2 superiori al valore limite e che i valori più elevati delle concentrazioni, compreso il massimo assoluto di circa $60 \mu\text{g m}^{-3}$, si stimano lungo le circonvallazioni a nord del centro cittadino. Tali stime trovano conferme nei valori rilevati dalla stazione “Milano – viale Marche” che riporta, per l'anno 2017, una concentrazione media annua pari a $64.4 \mu\text{g m}^{-3}$ (Tabella 2). Una valutazione più completa delle prestazioni del modello di dispersione è riportata nel Materiale Supplementare (2).

La mappa relativa allo scenario “NO Diesel” evidenzia il rilevante contributo dei veicoli diesel ai livelli di NO_2 ; il blocco di tali veicoli consentirebbe infatti il rispetto del valore limite in ampie aree del territorio comunale ad esclusione di zone lungo le tangenziali a est e a nord, sulle quali la circolazione dei veicoli diesel non è stata bloccata. A partire dai risultati dei due scenari è stato possibile stimare il contributo percentuale dei veicoli diesel circolanti a Milano alle concentrazioni di NO_2 misurate dai campionatori passivi durante il periodo della campagna di misura. Dall'esame di Figura 7 ri-

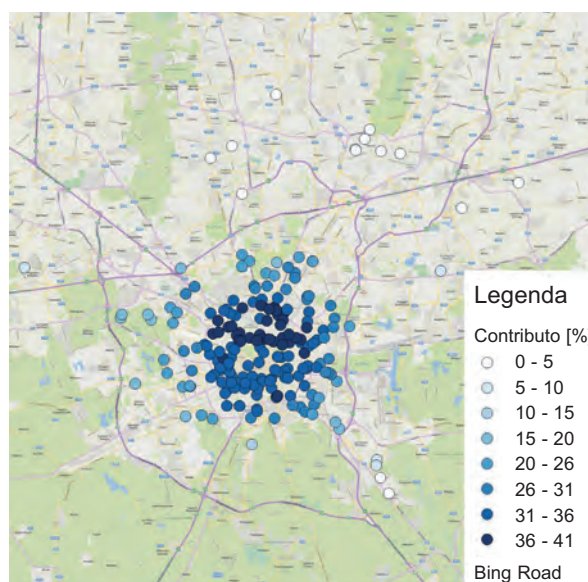


Figura 7 – Contributo, in termini percentuali, dei veicoli diesel circolanti a Milano alle concentrazioni di NO_2 misurate dai campionatori passivi durante il periodo della campagna di misura

sultano contributi significativi con valori massimi compresi tra il 36% e il 41%.

4. DISCUSSIONE

La differenza tra le mappe di concentrazione di NO_2 calcolate per i due scenari emissivi è stata successivamente utilizzata come base per stimare la riduzione delle emissioni necessaria a raggiungere l'obiettivo di rispettare il limite di legge sulle me-

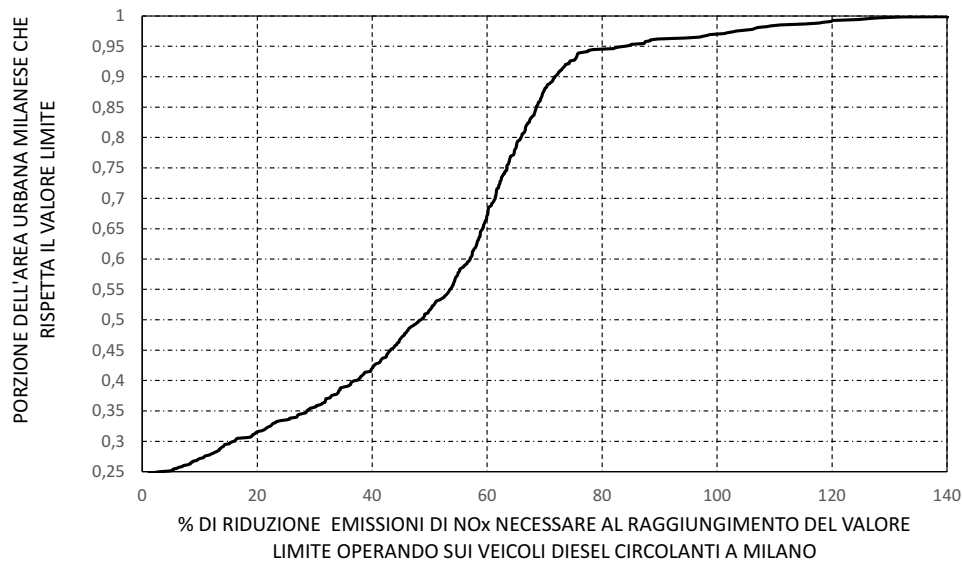


Figura 8 – Stima della riduzione delle emissioni necessaria a rispettare il limite di legge sulle medie annuali di NO_2 ($40 \mu\text{g m}^{-3}$) su tutto il territorio milanese

die annuali ($40 \mu\text{g m}^{-3}$) 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 la corrispondente variazione delle concentrazioni medie in ogni cella del dominio di calcolo, espressa dalla proporzione:

$$\Delta E_{100\%diesel} : \Delta C_{ex-ante-NO Diesel} = \Delta E_x : \Delta C_{ex-ante-obiettivo}$$

dove:

- $\Delta E_{100\%diesel}$ è la variazione delle emissioni legata al complesso dei veicoli diesel;
- $\Delta C_{ex-ante-NO Diesel}$ è la riduzione delle concentrazioni di NO_2 per lo scenario “NO Diesel” rispetto a quello “ex-ante”;
- $\Delta C_{ex-ante-obiettivo}$ la riduzione di concentrazione necessaria per raggiungere il valore limite;
- ΔE_x è la variazione delle emissioni necessarie a conseguire il valore limite. Si osservi che in talune aree anche la riduzione del 100% delle emissioni dai veicoli diesel non è sufficiente al raggiungimento del valore limite. In tali aree ΔE_x assume quindi valori superiori al 100%.

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 in-

teresse 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 riportato in Figura 8, ottenuto a partire dalla relazione di cui sopra calcolando per variazioni emissive ΔE_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 (solo il 25% del territorio milanese è al di sotto del limite di legge), mentre l'estremo in alto a destra della curva rappresenta la situazione in cui si suppone di eliminare del tutto i veicoli diesel. 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. Sulla base dei dati relativi alle stime emissive e 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 nel Comune. Anche dunque immaginando di eliminare tutti i veicoli diesel non è possibile raggiungere il valore limite dappertutto. Sono dunque necessarie riduzioni superiori, che coinvolgono altri settori e attività, per esempio, restando nell'ambito del traffico, riducendo le emissioni sulle autostrade a Nord di Milano a seguito di un parco

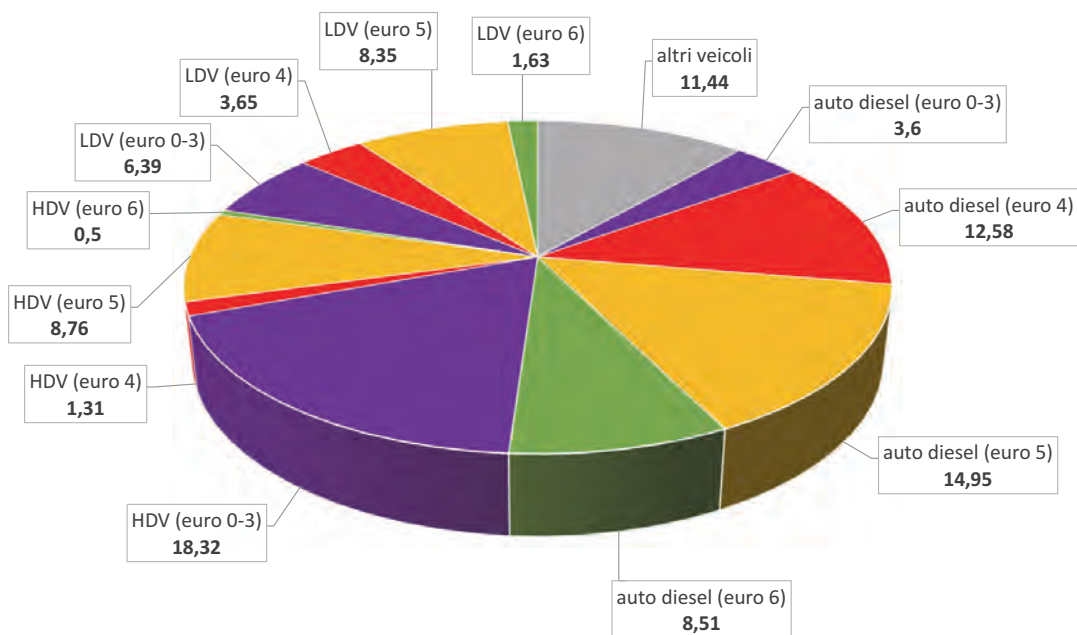


Figura 9 – Contributi percentuali dei vari segmenti di parco veicoli analizzati alle emissioni di NO_x da traffico veicolare lungo le strade urbane (escluse autostrade e tangenziali). LDV = veicoli commerciali leggeri; HDV = veicoli commerciali pesanti; in “altri veicoli” sono comprese le autovetture benzina e ibride e i bus

circolante meno inquinante. I punti posti sulla curva possono essere utilizzati per ipotizzare scenari intermedi ovvero le conseguenze di possibili divieti di circolazione per determinate categorie di veicoli. In Figura 9 sono riportati i contributi percentuali alle emissioni di NO_x dei vari segmenti del parco veicoli circolante, aggregati per classe Euro, che unitamente alla curva di riduzione emissioni-concentrazioni (Figura 8) possono essere utilizzati per stimare le porzioni di territorio che rispetterebbero il limite, a fronte di limitazioni alla circolazione per diverse classi Euro. Le stime che ne risultano possono essere riassunte a titolo esemplificativo come segue indicando la data in cui sarà vietato l’ingresso in area B delle categorie di veicoli diesel considerati:

- con una limitazione alla circolazione per tutti i veicoli diesel *pre-Euro 4* (automobili, veicoli commerciali leggeri e pesanti, divieto di ingresso in Area B dal 25 febbraio 2019) si otterrebbe una riduzione delle emissioni complessive di NO_x pari a circa il 28% di tutte le emissioni da traffico veicolare, con un aumento al 35% della porzione del territorio milanese che rispetterebbe il valore limite per la concentrazione in aria del biossido di azoto;
- con una limitazione estesa a tutte le classi *pre-Euro 5* (divieto di ingresso in Area B dal 1° ottobre 2019) la riduzione delle emissioni risulterebbe

be pari a circa il 46%, con un corrispondente aumento a circa il 50% del territorio che rispetterebbe il limite;

- una limitazione estesa a tutte le classi *pre-Euro 6* (divieto di ingresso in Area B dal 1° ottobre 2022) porterebbe ad una riduzione delle emissioni di NO_x pari a circa il 78% con la quasi totalità, circa il 95%, del territorio milanese che rispetterebbe il limite.

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono riportati i risultati di simulazioni modellistiche volte a stimare l’impatto sulle concentrazioni medie annuali di NO₂ delle emissioni di veicoli alimentati a gasolio circolanti nell’area urbana milanese. A tale scopo è stato applicato un sistema modellistico su un dominio di calcolo che comprende la città di Milano e si estende su una superficie di 35x35 km² alla risoluzione spaziale di 500 m. La stima delle emissioni è stata effettuata a partire dall’inventario delle emissioni in atmosfera INEMAR (ARPA Lombardia) e, relativamente al traffico veicolare sulla rete stradale urbana milanese, dalle informazioni di dettaglio fornite all’Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) del Comune di Milano. I risultati delle simulazioni modellistiche hanno permesso di produrre mappe di concentrazioni medie

annuali di NO₂ considerando uno scenario “ex-ante”, corrispondente alla situazione riferita all’anno 2017 (durante il quale si è svolta la campagna “NO₂, No grazie!”) e uno scenario “NO Diesel”, corrispondente a un ipotetico scenario emissivo nel quale vengono annullate le emissioni derivanti da tutti i veicoli alimentati a gasolio circolanti nel Comune di Milano. 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 di circa 60 µg m⁻³, si rilevano lungo le circonvallazioni a nord del centro cittadino. Tali stime trovano conferme dai rilevamenti effettuati da ARPA Lombardia che misura livelli di NO₂ superiori al valore limite nella città metropolitana di Milano. I risultati relativi allo scenario “NO Diesel” evidenziano valori di NO₂ superiori al valore limite solo lungo le tangenziali a est e a nord dell’area urbana, ove non sono state apportate modifiche al parco circolante. A partire dai risultati di tali simulazioni è stato possibile stimare la variazione percentuale della porzione di territorio milanese che rispetterebbe il valore limite a fronte di limitazioni della circolazione per tutti i veicoli (automobili, LDV e HDV) alimentati a gasolio e distinti per categoria Euro. 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%, 50% e 95%. Tali stime evidenziano il contributo sostanziale al miglioramento della qualità dell’aria nelle aree urbane derivante da misure di controllo della circolazione di veicoli diesel.

Lo studio risponde infine alle due domande poste nell’introduzione e mostra le potenzialità di sistemi modellistici completi relativamente sia alla simulazione di complesse situazioni meteorologiche, emissive e diffusive sia alla valutazione dell’apporto delle diverse sorgenti emissive alla qualità dell’aria.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bessagnet B., Pirovano G., Mircea M., Cuvelier C., Aulinger A., Calori G., Ciarelli G., Manders A., Stern R., Tsyro S., García Vivanco M., Thunis P., Pay M.-T., Colette A., Couvidat F., Meleux F., Rouil L., Ung A., Aksoyoglu S., Baldasano J. M., Bieser J., Briganti G., Cappelletti A., D’Isidoro M., Finardi S., Kranenburg R., Silibello C., Carnevale C., Aas W., Dupont J.-C., Fagerli H., 25 Gonzalez L., Menut L., Prévôt A.S.H., Roberts P., White L. (2016) Presentation of the EURODELTA III intercomparison exercise – evaluation of the chemistry transport models’ performance on criteria pollutants and joint analysis with meteorology. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 12667-12701.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-12667-2016>
- Gariazzo C., Silibello C., Finardi S., Radice P., Piersanti A., Calori G., Cecinato A., Perrino C., Nussio F., Cagnoli M., Pelliccioni A., Gobbi G.P., Di Filippo P. (2007) A gas/aerosol air pollutants study over the urban area of Rome using a comprehensive chemical transport model. *Atmos. Environ.*, 41, 7286-7303.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.018>
- Mellios G., Ntziachristos L. (2016) Methodology for the calculation of fuel evaporation – SNAP 070600, NFR 1A3bv. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.
- Nanni A., Brusasca G., Calori G., Finardi S.C., Tinarelli G., Zublena M., Agnesod G., Pession G. (2004) Integrated assessment of traffic impact in an Alpine region. *Science of the Total Environment*, 334-335, 465-471.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.050>
- Ntziachristos L., Boulter P. (2016) Methodology for the calculation of non-exhaust PM emissions – SNAP 070700-070800, NFR 1A3bvi-vii. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.
- Ntziachristos L., Samaras Z. (2018) Methodology for the calculation of exhaust emissions – SNAPs 070100-070500, NFRs 1A3bi-iv. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., and Powers J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR.
<https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Silibello C., Calori G., Brusasca G., Giudici A., Angelino E., Fossati G., Peroni E., Buganza E. (2008) Modelling of PM10 concentrations over Milano urban area using two aerosol modules. *Environmental Modelling and Software*, 3, 333-343.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.04.002>

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l’Associazione Cittadini per l’Aria e l’Organizzazione Benefica ClientHearth per aver finanziato lo studio e l’Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) del Comune di Milano per aver messo a disposizione i dati di traffico relativi alla città di Milano.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all’indirizzo www.ingegneriadellambiente.net



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2020 è sostenuta da:



better together



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 2/2020

