



ALLEGATO 3

**Valutazione modellistica
della qualità dell'aria
attraverso tecniche
di source-apportionment**



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

*Valutazione modellistica dello stato
della qualità dell'aria nel territorio
bresciano attraverso tecniche di
source-apportionment*

C. Carnevale, S. De Nardi, G. Piccoli, S. Raccagni
Università degli Studi di Brescia
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale
D2M – Deterministic and data-driven modelling for control

Obiettivo

Il presente lavoro ha come obiettivo quello di approfondire le conoscenze relative alle fonti di inquinamento atmosferico, analizzando le dinamiche attuali e fornendo una base scientifica solida per la definizione di strategie di intervento efficaci e sostenibili. Il progetto si inserisce nel contesto del Piano Aria e Clima del Comune di Brescia (PAC), uno strumento strategico volto a migliorare la qualità dell'aria e a contrastare i cambiamenti climatici, con l'obiettivo di garantire un ambiente più sano e sostenibile per la comunità, contribuendo al benessere collettivo e al raggiungimento di obiettivi condivisi.

Il lavoro si presenta come un aggiornamento del precedente studio "Valutazione integrata dell'inquinamento atmosferico nel bacino padano e nel territorio bresciano"¹ dell'Università degli Studi di Brescia, che ha prodotto risultati significativi, basandosi sullo studio di *source apportionment*, ovvero l'analisi delle fonti di inquinamento atmosferico nel territorio bresciano, e sulla definizione di scenari di riduzione delle emissioni. Le informazioni emissive utilizzate nello studio originale risalgono tuttavia al 2012, rendendo necessario un aggiornamento che rifletta le condizioni ambientali e le dinamiche attuali. Il progetto di ricerca si propone quindi di:

- analizzare le fonti di inquinamento atmosferico con dati aggiornati, al fine di identificare con precisione le principali cause dell'inquinamento e le loro variazioni nel tempo;
- supportare il processo di partecipazione degli stakeholder locali, coinvolgendo attivamente il tessuto industriale, le istituzioni e la cittadinanza nella redazione del PAC.

Questa iniziativa rappresenta un'opportunità preziosa per consolidare il dialogo tra istituzioni, imprese e cittadini, contribuendo a raggiungere obiettivi condivisi per il bene comune e per un futuro più sostenibile.

L'inquinamento atmosferico rappresenta infatti uno dei principali problemi ambientali della Pianura Padana, un'area caratterizzata da condizioni meteorologiche e orografiche che favoriscono l'accumulo degli inquinanti in atmosfera. La combinazione di intense attività antropiche, insieme a frequenti episodi di stagnazione e ridotta ventilazione, contribuisce alla formazione e al persistere di elevati livelli di concentrazione di inquinanti primari e secondari. In questo contesto, risulta necessario analizzare in modo integrato tutte le sorgenti emissive presenti, così da poterne descrivere in maniera accurata sia la situazione generale, sia gli ambiti territoriali più specifici.

L'obiettivo del presente lavoro è stato lo sviluppo di una metodologia integrata in grado di:

1. **Valutare il contributo delle principali sorgenti emissive** alle emissioni atmosferiche di inquinanti quali PM₁₀, NO_x, includendo tutti i comparti rilevanti — traffico veicolare, attività industriali, agricoltura e zootecnia, impianti di produzione energetica, riscaldamento domestico, gestione dei rifiuti e altre fonti diffuse;

¹ <https://www.comune.brescia.it/aree-tematiche/ambiente/osservatori-e-relazione-sullo-stato-dellambiente/osservatorio-aria-bene-comune-e-clima>

2. **Fornire una rappresentazione aggiornata dello stato della qualità dell'aria**, con particolare riferimento alle concentrazioni medie giornaliere di biossido di azoto (NO₂) e particolato atmosferico (PM₁₀ e PM_{2.5}), sia nell'intero territorio regionale sia nell'area bresciana;
3. **Quantificare il ruolo delle diverse attività emissive nei processi di formazione degli inquinanti secondari**, in particolare NO₂, PM₁₀ e PM_{2.5}, attraverso l'utilizzo di modelli fotochimici avanzati e tecniche di Source Apportionment.

Al fine di raggiungere l'obiettivo, grande attenzione è stata rivolta alla selezione delle informazioni utilizzate per la realizzazione delle simulazioni modellistiche, focalizzandosi in particolare sulle seguenti direttrici:

1. utilizzo dei dati emissivi condivisi e validati dalle istituzioni regionali e comunali più recenti disponibili;
2. utilizzo di dati rappresentativi della condizione attuale della regione Lombardia e in particolare, della provincia e del Comune di Brescia;
3. utilizzo di dati coerenti in termini di intervallo temporale considerato, in modo da favorire una valutazione adeguata delle prestazioni degli strumenti modellistici considerati.

In particolare, il lavoro è stato svolto utilizzando dati emissivi, meteorologici e di concentrazione relativi all'anno 2021, anno di riferimento dell'ultimo inventario emissivo regionale (INEMAR). Si evidenzia inoltre che la scelta dell'anno 2021 quale periodo di riferimento per la valutazione modellistica è maturata a seguito delle analisi condivise nell'ambito del Tavolo Tecnico "Mitigazione" dell'Osservatorio Aria Bene Comune e Clima del Comune di Brescia.

Sommario

Obiettivo	3
Sommario.....	5
1 Introduzione	6
2 Catena modellistica utilizzata e setup della simulazione di Bacino	7
2.1 Il modello CAMx	8
2.1.1 Modulo OSAT (<i>Ozone Source Apportionment Technology</i>).....	10
2.1.2 Modulo PSAT (<i>Particulate Source Apportionment Technology</i>).....	10
2.2 Il modello meteorologico WRF.....	11
2.3 Pre-processing delle emissioni	12
3 Simulazione modellistica della concentrazione di macroinquinanti - Validazione	13
3.1 Meteorologia.....	13
3.2 Emissioni	14
3.3 Condizioni al contorno	22
3.4 Validazione delle simulazioni	26
3.4.1 <i>Biossido di Azoto - NO₂</i>	26
3.4.2 <i>Particolato Atmosferico - PM₁₀</i>	27
3.4.3 <i>Particolato Atmosferico – PM_{2.5}</i>	28
4 Simulazione Modellistica della concentrazione di macroinquinanti – Analisi di Source Apportionment.....	30
4.1 Biossido di azoto – NO ₂	31
4.1.1 <i>Focus su Comune di Brescia</i>	37
4.2 Particolato Atmosferico - PM ₁₀ , PM _{2.5}	40
4.2.1 <i>Focus su Comune di Brescia</i>	51
5 CONCLUSIONI	55
6 Bibliografia	57

1 Introduzione

La formazione di inquinanti atmosferici quali biossido di azoto (NO_2) e particolato atmosferico (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$), è il risultato di una combinazione di processi meteorologici e chimico-fisici complessi. Le sostanze emesse dalle diverse sorgenti vengono trasportate, trasformate e rimosse attraverso reazioni fotochimiche, fenomeni di condensazione ed evaporazione, deposizione e mescolamento turbolento. Tali processi sono fortemente non lineari e dipendono in modo critico dalle condizioni meteorologiche, con la conseguente necessità di utilizzare modelli tridimensionali avanzati capaci di descrivere, in modo accoppiato, l'evoluzione temporale e spaziale dei campi di concentrazione.

L'impiego di un modello fotochimico di trasporto ha permesso di simulare e valutare, sul dominio regionale lombardo e sull'area del territorio bresciano, il contributo delle principali sorgenti emissive agli inquinanti primari, considerando l'insieme dei comparti rilevanti (traffico veicolare, attività industriali, agricoltura e zootecnia, produzione di energia, riscaldamento domestico, gestione dei rifiuti, ecc.). Ciò ha reso possibile descrivere in modo quantitativo il loro ruolo nei meccanismi di formazione degli inquinanti secondari, quali polveri sottili e biossido di azoto.

2 Catena modellistica utilizzata e setup della simulazione di Bacino

La catena modellistica utilizzata in questo studio è costituita da due moduli principali: il modello fotochimico euleriano open-source CAMx sviluppato da ENVIRON e il modello meteorologico ad area limitata WRF (Weather Research and Forecasting model) sviluppato da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e da NCEP (National Centers for Environmental Prediction), che ha fornito l'input meteorologico necessario a CAMx per le simulazioni di qualità dell'aria.

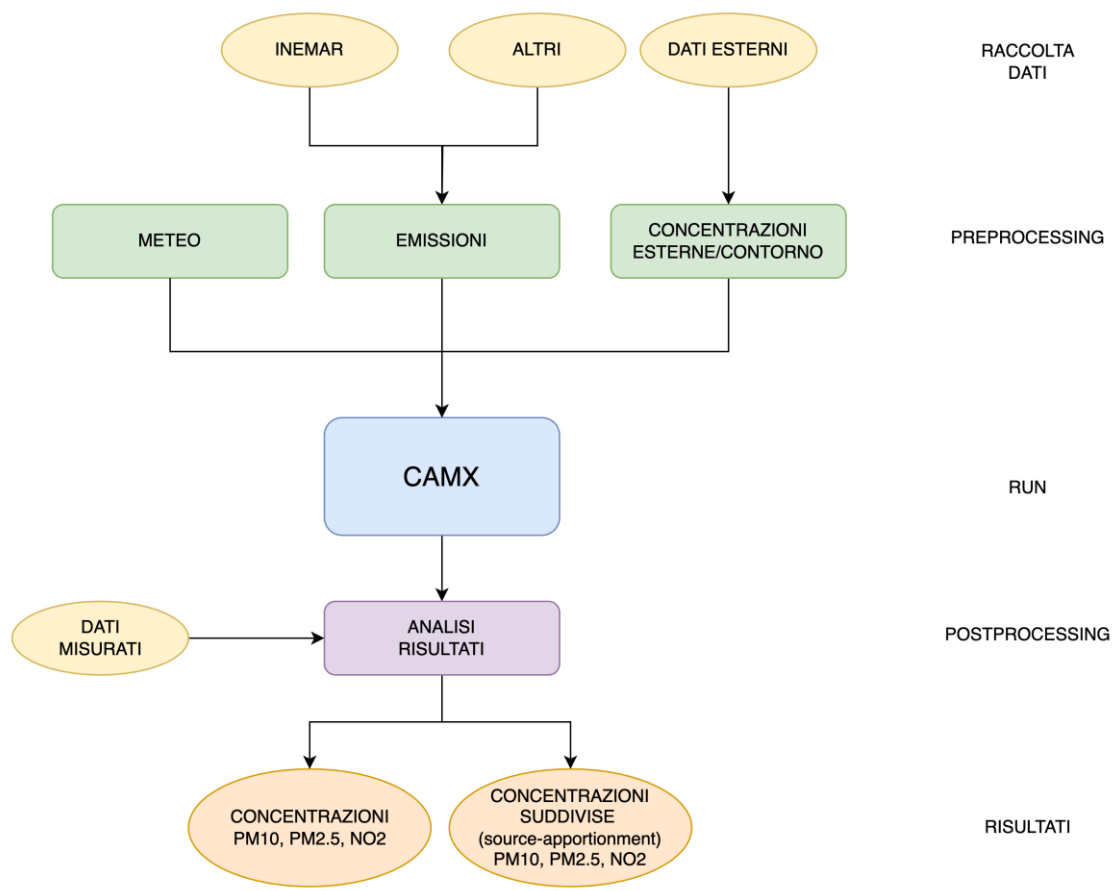


Figura 2.1: Catena modellistica utilizzata per la simulazione.

Il dominio di simulazione considerato nella prima fase del lavoro (dominio “Regione Lombardia”) ha una dimensione di 288x276 km² e una risoluzione di 6x6 km². Tale dominio, a causa dei forti insediamenti urbani ed industriali e di condizioni meteo-climatiche particolarmente svantaggiose (caratterizzate da numerosi episodi di calma di vento e di poca dispersione verticale) è spesso soggetto ad elevate concentrazioni di ozono, ossidi di azoto e particolato atmosferico. Nella seconda fase del lavoro è stato effettuato uno zoom su un dominio ridotto, di dimensione 94x144 km², che include tutta la provincia di Brescia (dominio “provincia Brescia”) discretizzato con celle ad una risoluzione di 1x1 km². Le simulazioni sono state realizzate con la tecnica *one-way nesting*, a partire dai risultati della

simulazione su scala maggiore che forniscono quindi parte degli input per la simulazione nel dominio di zoom. In Figura 2.2 sono mostrati entrambi i domini.

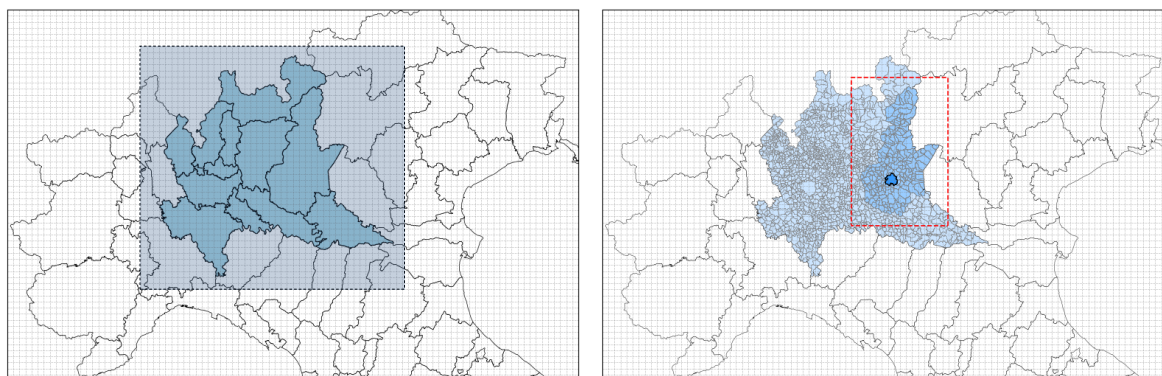


Figura 2.2: Domini di simulazione considerati nello studio (sx: “Regione Lombardia”, dx: “Provincia Brescia”).

2.1 Il modello CAMx

Il modello open-source CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions), (Emery et al., 2024) il cui codice sorgente è disponibile sul sito ufficiale <http://www.camx.com>, è un modello euleriano tridimensionale per la chimica e il trasporto atmosferico, ampiamente utilizzato (Emery et al., 2024, Belis et al., 2021) per la simulazione di inquinanti primari e secondari in domini multi-scala. Il modello supporta diversi sistemi di proiezione cartografica e consente una definizione indipendente e flessibile della struttura verticale della griglia, con livelli la cui altezza può variare nello spazio e nel tempo. Tale caratteristica permette di adattare il sistema modellistico ai campi meteorologici prodotti da modelli numerici esterni, come WRF utilizzato in questo studio.

CAMx consente l'utilizzo di domini annidati con tecniche di one-way e two-way nesting, permettendo di risolvere in maniera coerente processi locali mantenendo il collegamento con le condizioni su scala più ampia. Il modello gestisce sia emissioni areali sia puntuali, con la possibilità di rappresentare queste ultime anche mediante un modulo lagrangiano semplificato.

Per la fase gassosa CAMx impiega il meccanismo chimico Carbon Bond CB05 (Yarwood et al., 2005b), che include 156 reazioni e 51 specie chimiche (38 gassose e 13 radicali), risolte tramite il metodo numerico EBI – Euler Backward Iterative (Hertel et al., 1993). La rappresentazione del particolato deriva dalla trattazione introdotta nel modello RADM – Regional Acid Deposition Model (Chang et al., 1987), includendo la chimica in fase acquosa e i processi di conversione gas-particella.

La formazione degli aerosol organici secondari è simulata attraverso il modulo SOAP (Strader et al., 1998), mentre l'equilibrio termodinamico dei principali costituenti inorganici (solfati, nitrati, ammonio) è trattato mediante il modulo ISORROPIA (Nenes et al., 1999). Il modello assume che tutte le specie secondarie (solfato, nitrato, ammonio e aerosol organico secondario) e le componenti carboniose primarie ricadano interamente nella frazione fine del particolato (PM_{2.5}).

I ratei di fotolisi sono stimati attraverso il modello TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible Radiation Model), adattato per CAMx e distribuito con il pacchetto ufficiale. Il calcolo tiene conto dell'albedo superficiale e della colonna totale di ozono e applica attenuazioni dovute alla presenza di nubi, con aumenti dei tassi di fotolisi al di sopra di esse per effetto della riflessione della radiazione solare.

Dal punto di vista della modellizzazione dei fenomeni fotochimici e dell'aerosol, CAMx è pienamente allineato ai principali modelli euleriani di riferimento presenti in letteratura. Un elemento distintivo del sistema è la possibilità di attribuire quantitativamente il contributo delle diverse sorgenti emissive alle concentrazioni degli inquinanti attraverso gli algoritmi di Source Apportionment OSAT e PSAT (Yarwood et al., 2004, Emery et al., 2024, Belis et al., 2021). Questi moduli consentono di distinguere, in maniera mass-conservativa, l'apporto dei singoli settori emissivi e delle aree geografiche alla formazione di ozono, NO₂ e particolato atmosferico, rendendo CAMx particolarmente adatto a studi di supporto alle politiche di qualità dell'aria.

Il modello CAMx utilizzato nell'ambito di questo studio è aggiornato alla versione 7.2, che rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alla precedente versione 6.5 adottata in studi precedenti. CAMx 7.2 è un modello euleriano tridimensionale per la chimica e il trasporto atmosferico, progettato per simulare inquinanti primari e secondari su domini multi-scala, con capacità avanzate di Source Apportionment.

La versione 7.2 introduce diversi aggiornamenti di rilievo:

- **Miglioramenti alla meccanica chimica**, con compatibilità estesa ai meccanismi Carbon Bond CB6r3 e aggiornamenti ai tassi di fotolisi, che consentono una rappresentazione più accurata della formazione di ozono e aerosol secondario;
- **Aggiornamenti ai moduli aerosol**, tra cui una versione rivista del modulo SOAP per gli organici secondari e l'integrazione con ISORROPIA II, che migliora la descrizione dell'equilibrio termodinamico dei nitrati e dei solfati;
- **Nuovi schemi numerici** per l'advezione e il trasporto verticale, con riduzione degli errori numerici e miglior rappresentazione dei gradienti vicino al suolo;
- **Migliorie al calcolo parallelo OpenMP**, grazie a un uso più efficiente della memoria condivisa; tali ottimizzazioni comportano riduzioni dei tempi di simulazione fino al 25–30% a parità di configurazione;
- **Revisione dei moduli OSAT e PSAT**, con una più robusta conservazione di massa e tracciamento più stabile nelle celle a basse concentrazioni, migliorando l'affidabilità dell'analisi di Source Apportionment.

Gli aggiornamenti introdotti possono determinare differenze nelle prestazioni modellistiche rispetto agli studi che utilizzavano le precedenti versioni, in particolare per il comportamento dei precursori

dell'ozono e la formazione del particolato secondario, soprattutto in zone a bassa concentrazione. Tali differenze risultano coerenti con il miglioramento della descrizione dei processi fisico-chimici all'interno del modello.

2.1.1 Modulo OSAT (Ozone Source Apportionment Technology)

Il modulo OSAT, integrato in CAMx 7.2, è stato ulteriormente ottimizzato rispetto alle versioni 6.5 per migliorare la capacità di attribuire le concentrazioni di ozono e dei suoi precursori alle diverse sorgenti emissive e aree geografiche (Emery et al., 2024, Belis et al., 2021). OSAT consente di rappresentare, all'interno di una singola esecuzione modellistica, il contributo dei gruppi emissivi (source groups) e delle sotto-aree del dominio alla formazione di ozono troposferico. Il modulo utilizza traccianti dedicati che seguono separatamente:

- emissioni e trasformazioni dei composti organici volatili (VOC);
- emissioni e trasformazioni degli NO_x;
- formazione netta di ozono associata alle reazioni fotochimiche tra i precursori;
- trasporto orizzontale e verticale;
- deposizione e perdita chimica.

Nella versione 7.2 sono stati introdotti miglioramenti riguardanti:

- tracciamento più stabile nelle condizioni a basse concentrazioni, grazie alla ridefinizione della soglia minimale dei traccianti e alla gestione numerica degli indicatori di net-ozone production;
- migliore coerenza tra produzione e distruzione di ozono, con una formulazione più robusta delle reazioni $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2$ e del ciclo NO_x-VOC;
- riduzione degli errori di integrazione chimica-transporto, soprattutto nelle regioni del dominio con forte variabilità oraria delle emissioni (traffico) o in condizioni di stratificazione notturna.

Il risultato è un modulo di source apportionment più conservativo e numericamente stabile, particolarmente utile per analisi di policy, valutazione dei contributi transfrontalieri e studi sulla sensibilità del sistema chimico.

2.1.2 Modulo PSAT (Particulate Source Apportionment Technology)

Il modulo PSAT di CAMx 7.2 rappresenta uno degli strumenti più avanzati per la valutazione del contributo delle sorgenti emissive alla formazione del particolato atmosferico, distinguendo fra PM primario e PM secondario. Rispetto alle versioni 6.5 il modulo ha beneficiato di miglioramenti

significativi, in particolare nel tracciamento dei processi di formazione degli aerosol secondari inorganici e organici (Emery et al., 2024; Belis et al., 2021).

PSAT attribuisce le concentrazioni delle principali specie che compongono il particolato ai diversi gruppi emissivi, attraverso traccianti specifici dedicati a:

- **SO₄²⁻ (solfato)**, derivante principalmente dall'ossidazione del SO₂;
- **NO₃⁻ (nitrato)**, legato alla disponibilità di NO_x e ammoniaca;
- **NH₄⁺ (ammonio)**, parte integrante dell'equilibrio termodinamico inorganico;
- **SOA (aerosol organici secondari)**, formati dall'ossidazione dei composti organici volatili (VOC) di origine biogenica e antropogenica;
- **sei categorie di PM primario:**
 - carbonio elementare (EC),
 - aerosol organico primario (POA),
 - polveri fini di origine crostale e industriale,
 - frazione fine "altra",
 - polveri coarse crostali,
 - altra frazione coarse.

Gli aggiornamenti del modulo nella versione 7.2 includono:

- **miglioramento dell'integrazione con ISORROPIA II**, che consente una rappresentazione più accurata del comparto nitrato–ammonio–solfato, riducendo gli errori di attribuzione nelle condizioni invernali tipiche della Pianura Padana;
- **maggiore stabilità numerica dei traccianti**, che riduce la perdita numerica nelle celle con forti gradienti verticali;
- **metodologie avanzate di "sparse chemistry tracking"**, che migliorano l'efficienza computazionale nelle zone del dominio con basse concentrazioni di aerosol;
- **una miglior gestione della volatilità degli organici** nel modulo SOAP aggiornato, con impatto sull'attribuzione dei contributi SOA.

Il risultato è un modulo PSAT più accurato nella rappresentazione del contributo delle sorgenti alla formazione del PM secondario, specialmente nelle condizioni tipiche della Pianura Padana, dove ammoniaca e NO_x interagiscono in modo non lineare nella formazione del particolato inorganico.

2.2 Il modello meteorologico WRF

Il modello WRF è un sistema di simulazione atmosferica creato per la ricerca e per la previsione meteorologica, ed è considerato tra i modelli atmosferici più avanzati attualmente esistenti (Powers et al., 2017). E' disponibile gratuitamente e si presta ad una vasta gamma di applicazioni a diversa scala, dalla descrizione dei fenomeni di micro-scala (risoluzione di qualche metro) fino alla rappresentazione dei quadri sinottici (risoluzione dell'ordine di migliaia di chilometri).

La scelta di utilizzo di WRF in questo studio è giustificata dalla capacità del modello di soddisfare pienamente i requisiti dello studio e dall'affidabilità che esso può garantire. WRF è inoltre ben integrato con il modello di qualità dell'aria CAMx.

2.3 Pre-processing delle emissioni

La stima delle emissioni sulla griglia modellistica utilizzata è stata condotta utilizzando, per le regioni coperte dall'inventario INEMAR, una variabile (*proxy*) di tipo cartografico-vettoriale (i.e. uso del suolo, densità di popolazione). Per ciascun indicatore, ogni comune e ogni cella, è stata associata la frazione di emissione comunale che partecipa al totale emissivo della cella secondo la formula:

$$E_{cell_{i,a,p}} = \sum_m E_{mun_{m,a,p}} \cdot \left(\frac{ind_{m,i}}{ind_m} \right)$$

dove:

i = cella

a = attività emissiva

m = comune

p = inquinante

E_{cell} = emissione dell'inquinante p (in tonnellate) e dell'attività a nella cella i

E_{mun} = emissione dell'inquinante p (in tonnellate) e dell'attività a nel comune m

ind = indicatore spaziale

Per ciascuna delle attività emissive presenti nel dominio sono stati utilizzati specifici profili di modulazione temporale mensile, giornaliera e oraria specifici per inquinante, macrosettore emissivo, stagione dell'anno e tipo di giorno (feriale, prefestivo, festivo). Per la caratterizzazione chimica dei VOC e chimico-fisica del PM sono stati utilizzati profili di speciazione chimico-granulometrica, anch'essi dipendenti dall'attività emissiva.

Le emissioni di inquinanti sono trattate da CAMx in due modalità:

- al suolo (emissioni su griglia), ovvero rilasciate nel primo livello verticale (10 m) del modello. Confluiscono nelle emissioni su griglia tutte le categorie di emissioni provenienti da: sorgenti non industriali localizzate o commerciali (serbatoi, officine, aziende artigiane, ecc), fonti mobili (traffico, veicoli non stradali); fonti residenziali (riscaldamento); sorgenti biogeniche e agricole. La distribuzione spaziale di ciascuna sorgente separata all'interno di queste categorie è definita preventivamente usando, come *proxy* della distribuzione su griglia, informazioni quali la distribuzione della popolazione, la densità abitativa, il grafo stradale, la copertura del suolo;
- elevate (puntuali), relative a specifiche emissioni di camini industriali. È necessario conoscere tutte le caratteristiche geometriche e di emissione (portata, temperatura, diametro e quota) di ciascun camino oltre alla posizione geografica all'interno del dominio (latitudine e longitudine).

3 Simulazione modellistica della concentrazione di macroinquinanti

In questo capitolo vengono introdotte le informazioni e le ipotesi utilizzate per la stima dei dati di input al modello e la validazione delle simulazioni sui due domini di indagine. Il data-set completo necessario alla realizzazione di una simulazione con la catena modellistica considerata è costituito da tre input principali: i campi meteorologici, il data-set emissivo e le condizioni al contorno (concentrazioni ai bordi del dominio).

3.1 Meteorologia

I campi meteorologici necessari a CAMx sono stati prodotti mediante il modello WRF per l'anno 2021, selezionato come anno di riferimento per la presente analisi. La scelta contempla un periodo caratterizzato da condizioni meteorologiche rappresentative per la pianura padana, comprendente sia eventi di stagnazione invernale, con frequenti inversioni termiche, sia episodi estivi favorevoli alla formazione di ozono.

WRF è stato configurato con un sistema di domini annidati su tre livelli, coerente con le configurazioni utilizzate nei principali studi regionali di qualità dell'aria. Il dominio più esteso copre l'Europa centro-meridionale, mentre il dominio a risoluzione intermedia copre il Bacino padano; il dominio più fine, a risoluzione di $1 \times 1 \text{ km}^2$, è centrato sulla Lombardia. Tutti i campi sono stati estratti con cadenza oraria e comprendono: temperatura al suolo, vento tridimensionale, pressione, umidità specifica, parametri di stabilità atmosferica, contenuto di acqua e ghiaccio nelle nubi, precipitazioni e variabili necessarie alla parametrizzazione della radiazione.

Dal punto di vista meteorologico, l'anno 2021, selezionato coerentemente con l'ultima versione pubblicata dell'inventario INEMAR, si presenta come un anno con comportamenti relativamente in linea con gli anni precedenti e successivi, non mostrando macroscopiche differenze in termini di andamenti totali e stagionali delle principali variabili di interesse (Figura 3.1).

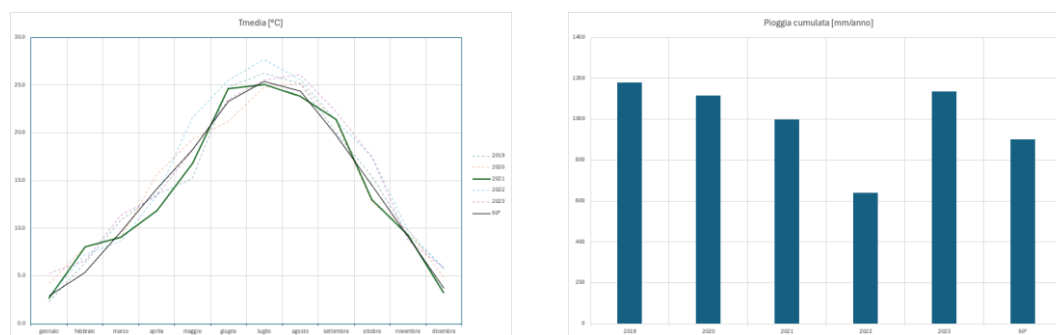


Figura 3.1: Confronto in termini di temperatura media mensile e valore cumulato della pioggia in Lombardia negli anni 2019-2023.

3.2 Emissioni

Il data-set emissivo è costituito dalle emissioni annuali di VOC, CO, NO_x, NH₃, SO₂, PM₁₀ e PM_{2.5} per ciascuna cella dei due domini riportati in Figura 2.2, dai profili di disaggregazione temporale delle emissioni e dai profili di speciazione chimica e distribuzione granulometrica dei VOC e del PM₁₀.

Le emissioni su cella sono state ottenute disaggregando le emissioni dell'inventario annuale INEMAR² a livello comunale e quelle dell'inventario CAMS-REG-AP 2021, disponibile su grigliato a 0.1° × 0.1°, entrambi aggregati per macrosettore e ricondotti alla risoluzione delle due simulazioni eseguite con il modello CAMx. I due inventari si riferiscono all'anno 2021, il più recente aggiornamento disponibile all'avvio del progetto per l'inventario regionale INEMAR.

Le Tabelle 3.1 - 3.2 riportano i dati annuali di emissione INEMAR per la Lombardia e per la Provincia di Brescia, aree di interesse prioritario per le analisi condotte sui due domini di simulazione, suddivisi per macrosettore CORINAIR (European Environment Agency, 2016).

Tabella 3.1: Emissioni totali annuali (ton/anno) in Regione Lombardia per macrosettore, anno 2021.

Macrosettore CORINAIR	VOC	NH ₃	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	755	10	8444	165	2046
Combustione non industriale	7312	863	10857	6636	572
Combustione nell'industria	2783	489	15955	996	3431
Processi produttivi	8905	49	1609	720	2175
Estrazione e distribuzione di combustibili	7082	0	0	0	0
Uso di solventi	77469	20	255	726	1
Trasporto su strada	13178	740	42874	3344	37
Altre sorgenti mobili	1138	2	11559	562	140
Trattamento e smaltimento di rifiuti	304	733	2276	10	417
Agricoltura	58681	88699	701	715	0
Altre sorgenti e assorbimenti	60019	1276	292	969	22
TOTALE	237626	92883	94822	14842	8840

Tabella 3.2: Emissioni totali annuali (ton/anno) nella Provincia di Brescia per macrosettore, anno 2021.

Macrosettore CORINAIR	VOC	NH ₃	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	28	2	203	15	18
Combustione non industriale	1336	173	1542	1390	90
Combustione nell'industria	425	36	3710	200	961
Processi produttivi	2006	4	1002	146	898
Estrazione e distribuzione di combustibili	799	0	0	0	0
Uso di solventi	10345	0	7	95	0
Trasporto su strada	1644	107	6202	465	5
Altre sorgenti mobili	224	0	2239	119	15

² INEMAR - ARPA Lombardia (2023), INEMAR, Inventario Emissioni in Atmosfera: emissioni in regione Lombardia nell'anno 2021.

Trattamento e smaltimento di rifiuti	5	46	257	1	8
Agricoltura	10544	23693	46	236	0
Altre sorgenti e assorbimenti	15880	162	43	128	4
TOTALE	43236	24224	15252	2795	1999

La distribuzione delle emissioni per inquinante in Lombardia e nella Provincia di Brescia mostra come, per gli ossidi di azoto, il trasporto e le sorgenti mobili in generale rappresentino oltre il 50% delle emissioni complessive, mentre risulta più contenuto il contributo della combustione (industriale e non), che si attesta attorno al 30%.

Per i composti organici volatili, circa il 30% delle emissioni in Lombardia è attribuibile al ciclo di utilizzo e smaltimento dei solventi, rispetto a circa il 20% nella Provincia di Brescia. Una differenza rilevante tra le due aree riguarda anche le emissioni da sorgenti naturali, pari al 30% nella provincia di Brescia e al 22% in Lombardia, evidenziando il ruolo dell'attività agricola nell'area meridionale della provincia e nei territori limitrofi. Le differenze tra le due aree sono meno marcate per PM₁₀, per il quale combustione non industriale e traffico veicolare contribuiscono complessivamente a oltre il 70% delle emissioni, con una quota lievemente superiore di emissioni agricole nella provincia di Brescia. Per entrambi i domini, l'agricoltura è invece il comparto dominante per l'ammoniaca, inquinante chiave nella formazione di nitrato e solfato d'ammonio nel particolato fine, contribuendo per almeno il 97% delle emissioni totali.

Contestualmente alla produzione di questa relazione, ARPA ha rilasciato l'inventario INEMAR 2023, che, sebbene non sia stato possibile utilizzare per la realizzazione delle simulazioni in quanto non disponibile all'inizio del progetto, ha permesso una valutazione delle scelte progettuali effettuate.

Le Tabelle 3.3 e 3.4 presentano i dati annuali rispettivamente per Regione Lombardia e Provincia di Brescia, per l'anno 2023. Il confronto tra le due coppie di tabelle mostra come le differenze tra i due inventari emissivi siano limitate sia dal punto di vista dei valori complessivi sia dal punto di vista della ripartizione delle emissioni nei diversi macrosettori, come si può apprezzare anche dalle Figure 3.2 e 3.3, che mostrano differenze percentuali visibili solo per il PM10 da traffico autoveicolare, dovute probabilmente a una nuova metodologia di calcolo delle emissioni da risospensione che ha portato a un leggero incremento delle emissioni stimate nei dati 2023 (Marongiu et al., 2025).

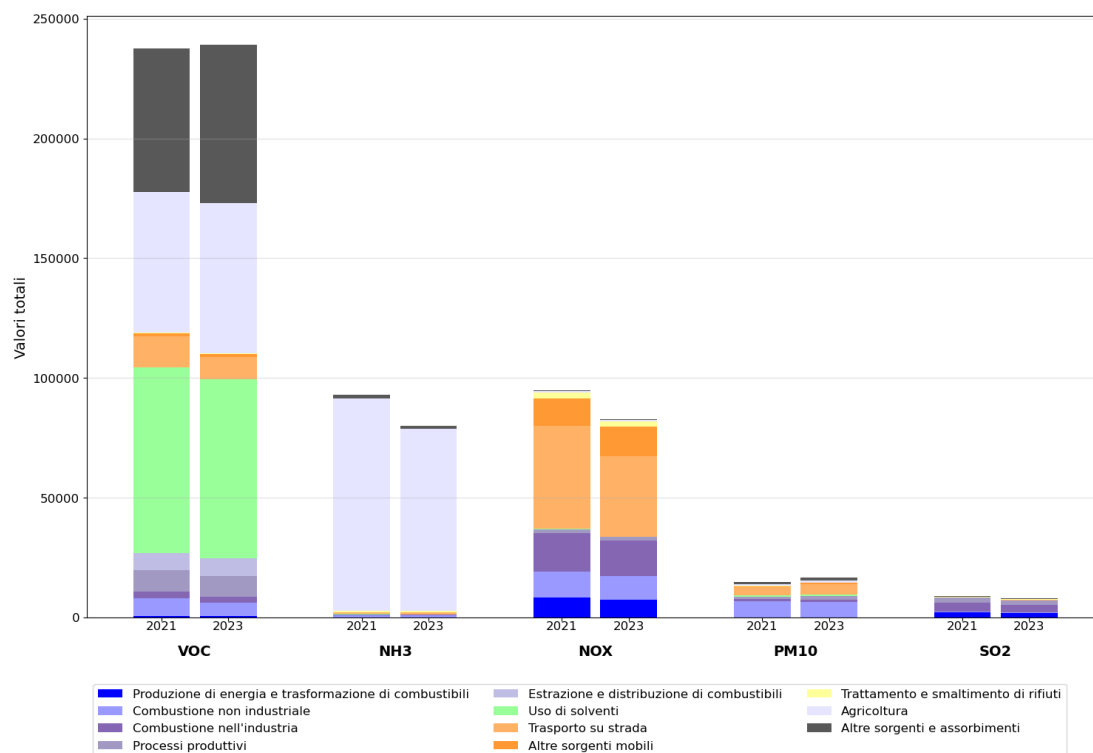
Tabella 3.3: Emissioni totali annuali (ton/anno) in Regione Lombardia per macrosettore, anno 2023.

Macrosettore CORINAIR	VOC	NH₃	NO_x	PM₁₀	SO₂
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	661	11	7298	171	1744
Combustione non industriale	5584	912	10066	6424	588
Combustione nell'industria	2496	382	14820	888	2966
Processi produttivi	8596	50	1489	1404	1975
Estrazione e distribuzione di combustibili	7546				
Uso di solventi	74635	26	170	743	1
Trasporto su strada	9174	702	33419	4390	35
Altre sorgenti mobili	1201	2	12414	560	183

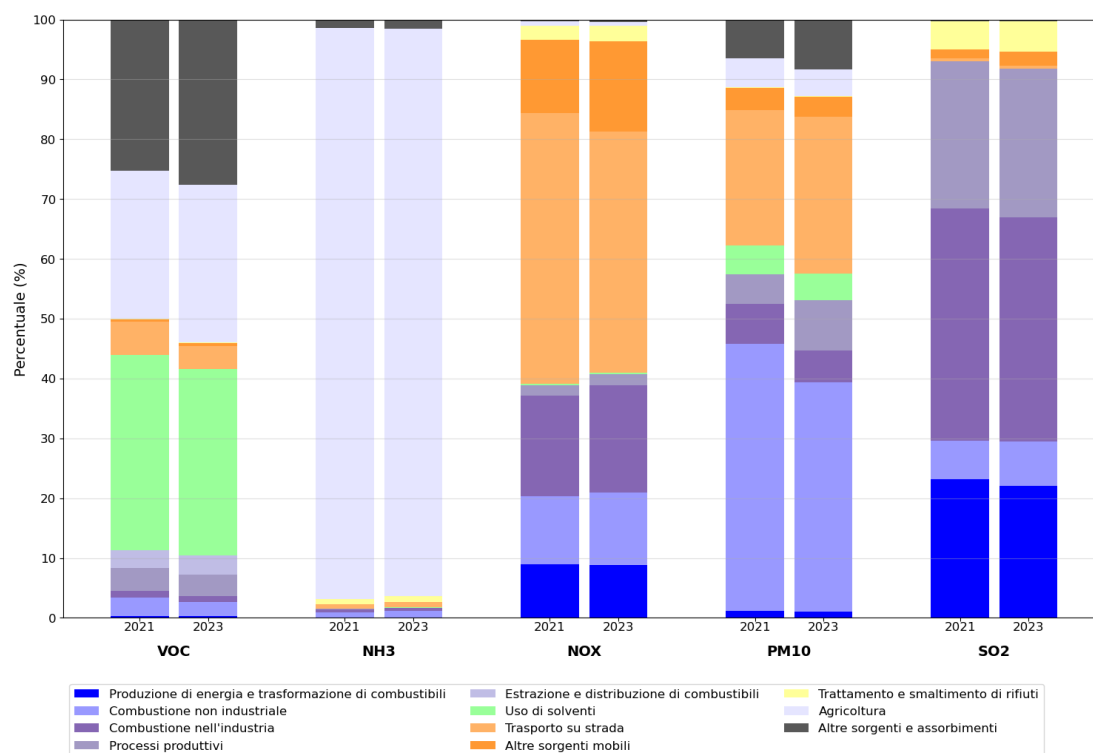
Trattamento e smaltimento di rifiuti	296	854	2198	10	405
Agricoltura	62810	75874	506	752	
Altre sorgenti e assorbimenti	66044	1277	319	1393	24
TOTALE	239043	80090	82700	16735	7920

Tabella 3.4: Emissioni totali annuali (ton/anno) nella Provincia di Brescia per macrosettore, anno 2023.

Macrosettore CORINAIR	VOC	NH₃	NO_x	PM₁₀	SO₂
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	24	2	179	13	18
Combustione non industriale	1131	183	1473	1389	95
Combustione nell'industria	385	44	3557	177	758
Processi produttivi	1958	4	939	275	755
Estrazione e distribuzione di combustibili	929				
Uso di solventi	9701	0	8	99	0
Trasporto su strada	1154	103	4939	643	5
Altre sorgenti mobili	230	1	2305	123	13
Trattamento e smaltimento di rifiuti	5	42	222	1	6
Agricoltura	11274	19974	27	244	
Altre sorgenti e assorbimenti	17438	160	35	167	2
TOTALE	44229	20511	13684	3131	1651

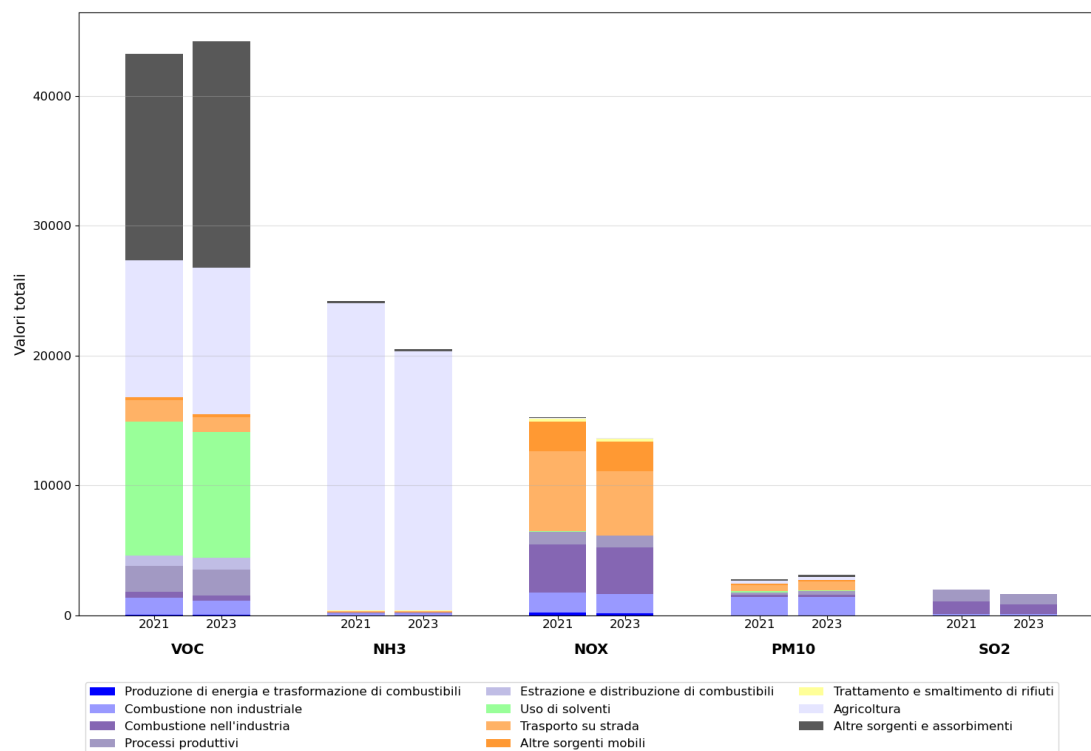


(a)

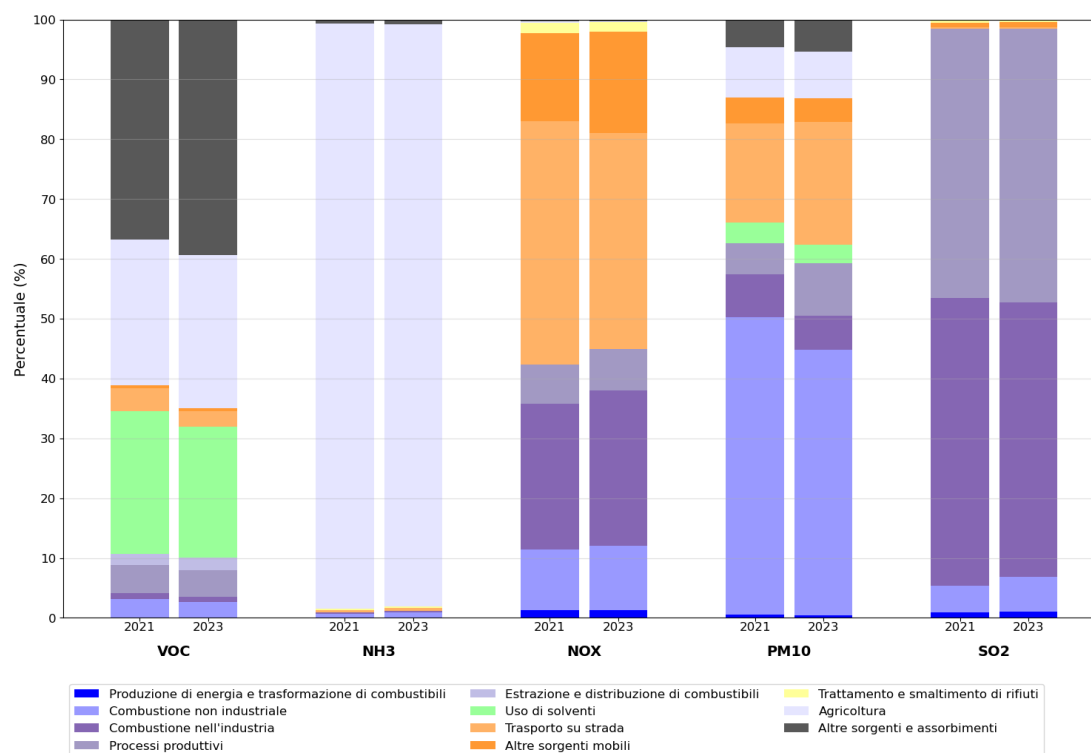


(b)

Figura 3.2: Confronto tra la ripartizione delle emissioni nei diversi macrosettori (a: ton/anno, b: percentuali) tra gli inventari 2021 e 2023 in Regione Lombardia.



(a)



(b)

Figura 3.3: Confronto tra la ripartizione delle emissioni nei diversi macrosettori (a: ton/anno, b: percentuali) tra gli inventari 2021 e 2023 in provincia di Brescia.

Le Figure 3.4 - 3.8 presentano le emissioni annuali sui due domini per i principali inquinanti emessi nei domini stessi (ossidi di azoto, composti organici, ammoniaca, particolato atmosferico). Le mappe

di distribuzione spaziale delle emissioni di ossidi di azoto, composti organici e particolato (PM_{10} e $PM_{2.5}$) evidenziano le zone urbane delle maggiori città presenti nel dominio (in particolare Milano) mentre i principali tratti autostradali sono ben riconoscibili in quelle relative a ossidi di azoto e particolato. Infine, la mappa di emissione di ammoniaca mostra le elevate emissioni areali dovute alle attività agricole presenti soprattutto nella fascia centrale della regione Lombardia, sulla direttrice Milano - Cremona. In tutti i casi si può notare l'effetto dell'aumento della risoluzione nel dominio di zoom sul dettaglio del dato emissivo che permette di rappresentare con maggiore precisione le zone urbane e quelle relative alle principali arterie stradali.

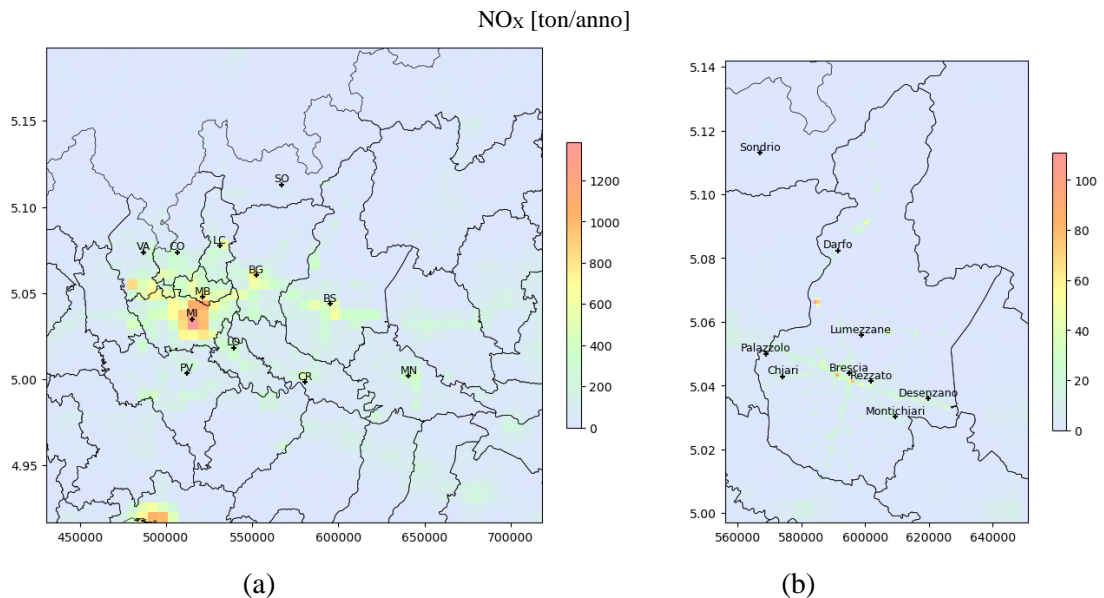


Figura 3.4: Emissioni annuali di NO_x (ton/anno) sui due domini (a: Lombardia, b: Brescia).

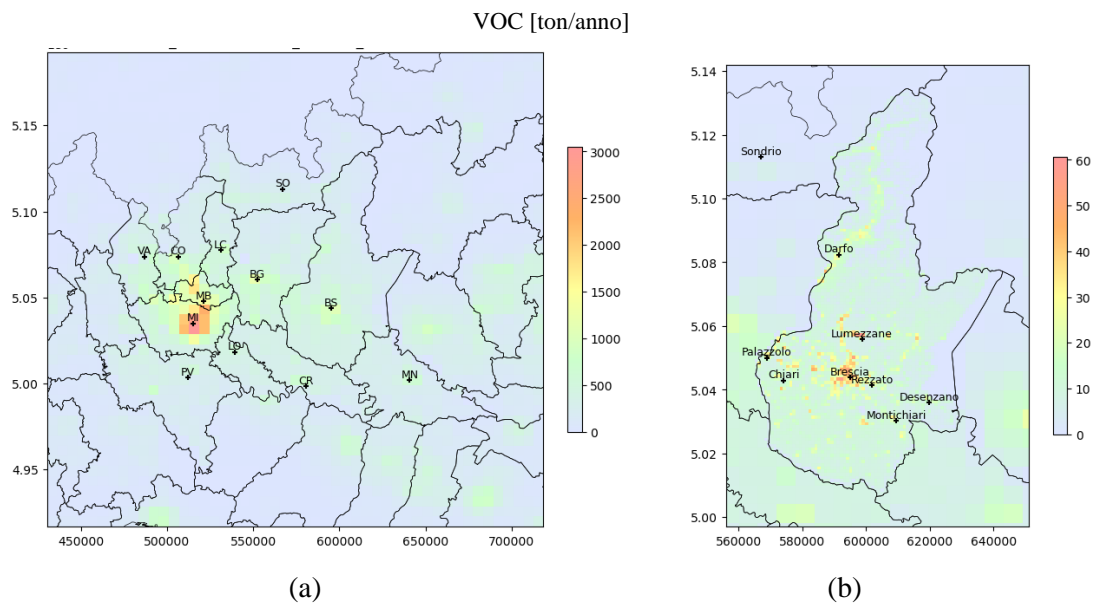


Figura 3.5: Emissioni annuali di VOC (ton/anno) sui due domini (a: Lombardia, b: Brescia).

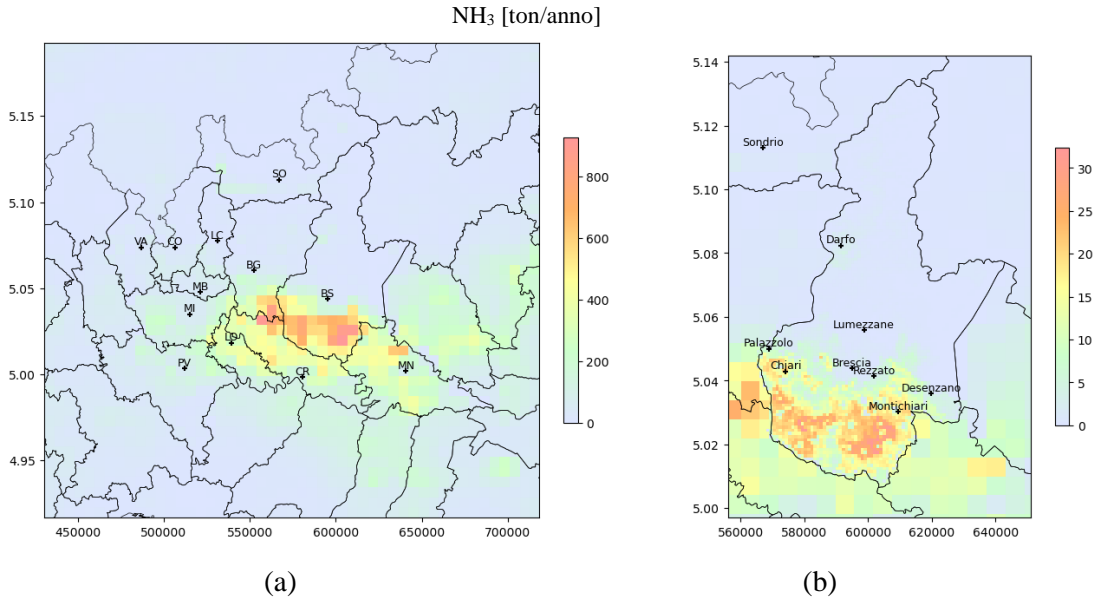


Figura 3.6: Emissioni annuali di NH₃ (ton/anno) sui due domini (a: Lombardia, b: Brescia).

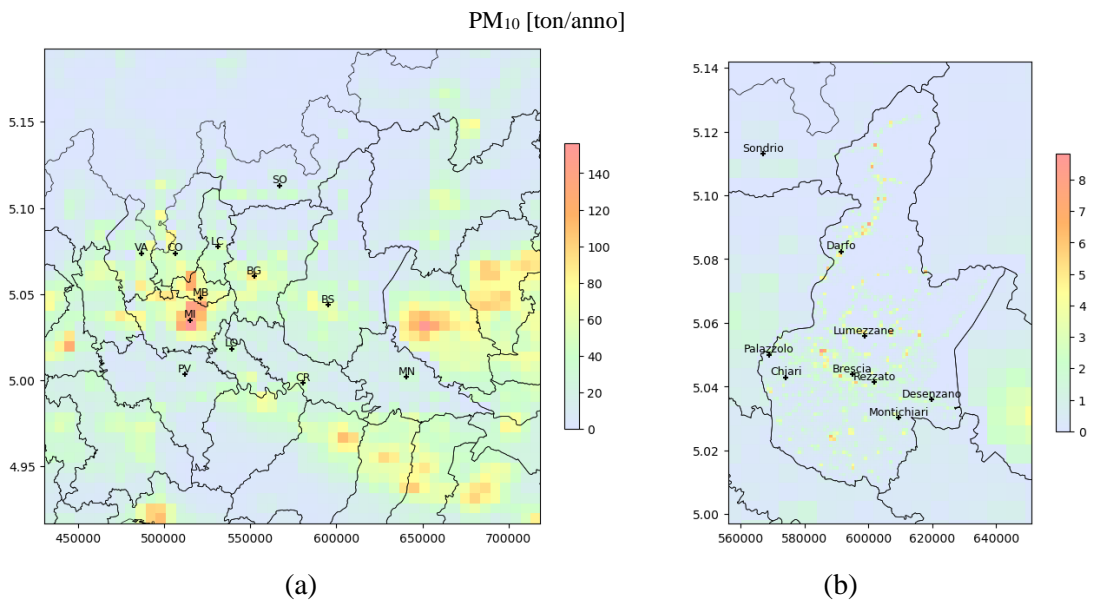


Figura 3.7: Emissioni annuali di PM₁₀ (ton/anno) sui due domini (a: Lombardia, b: Brescia).

PM_{2.5} [ton/anno]

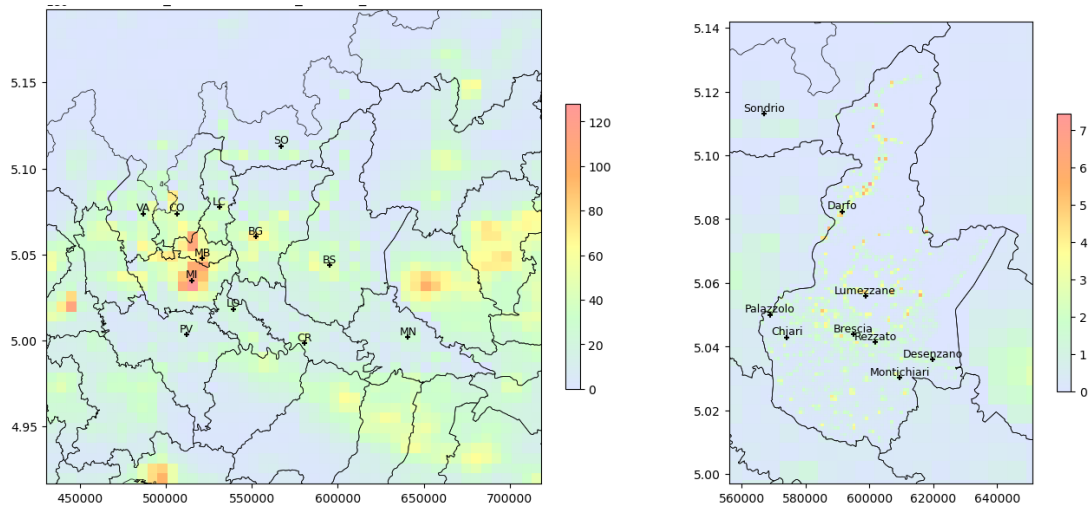


Figura 3.8: Emissioni annuali di PM_{2.5} (ton/anno) sui due domini (a: Lombardia, b: Brescia).

3.3 Concentrazioni Misurate

I dati osservati utilizzati nella fase di valutazione delle prestazioni provengono dal data-set di ARPA Lombardia per l'area interna alla regione e dal portale della European Environmental Agency per le aree esterne. Il numero di stazioni considerate nella validazione e la loro distribuzione sui due domini sono riportati nella Tabella 3.3 e illustrati nella Figura 3.9.

Nella selezione delle postazioni di confronto si è tenuto conto della necessità di disporre, per ogni sito, di serie temporali sufficientemente complete e affidabili per l'anno di riferimento, oltre che di una copertura spaziale adeguata rispetto alla risoluzione del dominio modellistico, così da garantire un campionamento rappresentativo delle diverse condizioni emissive e meteorologiche.

Tabella 3.5: Numero delle postazioni utilizzate per la validazione delle simulazioni sui due domini.

Dominio	NO₂	PM₁₀	PM_{2.5}
Dominio Regione Lombardia	192	156	85
Dominio Provincia Brescia	26	20	12

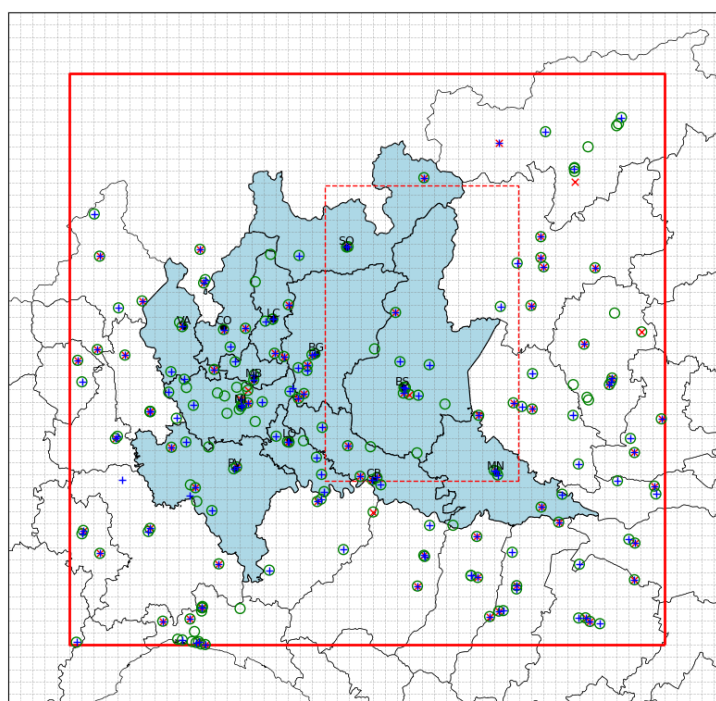
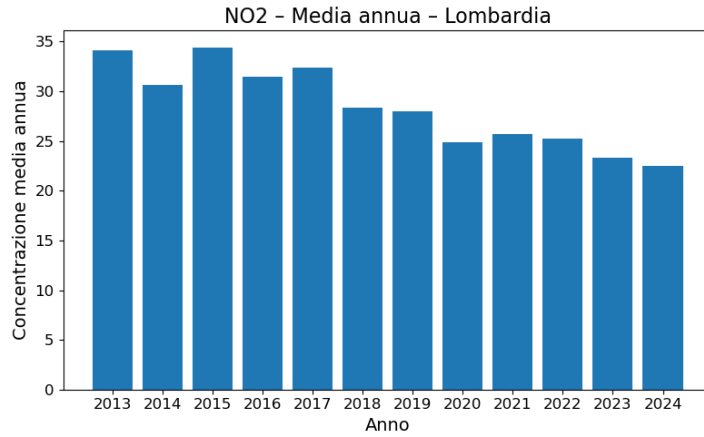
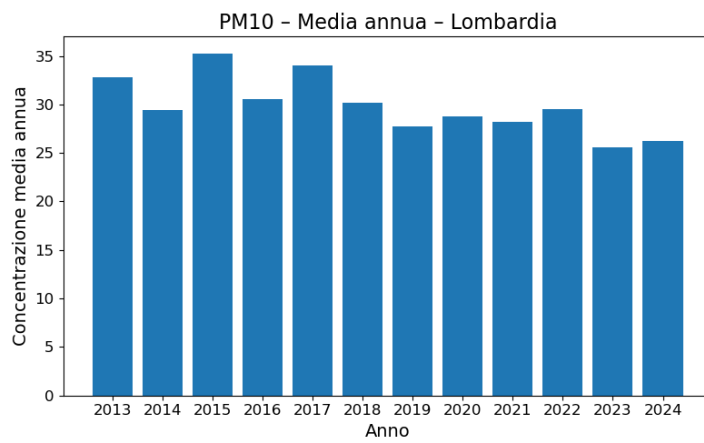


Figura 3.9: Dominio di simulazione con postazioni di monitoraggio (NO₂: o, PM₁₀: +, PM_{2.5}: x).

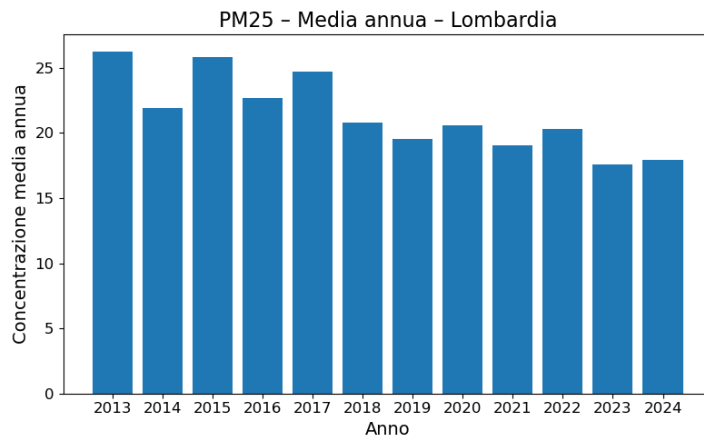
Le Figure 3.10-3.12 presentano la media annuale delle concentrazioni misurate nelle postazioni ARPA rispettivamente della Regione Lombardia, della Provincia di Brescia e del Comune di Brescia. I dati sono calcolati come media delle concentrazioni delle postazioni presenti nelle 3 aree. Le Figure mostrano come, a livello medio, il 2021 risulti un anno completamente in linea con il trend delle concentrazioni degli ultimi anni.



(a)

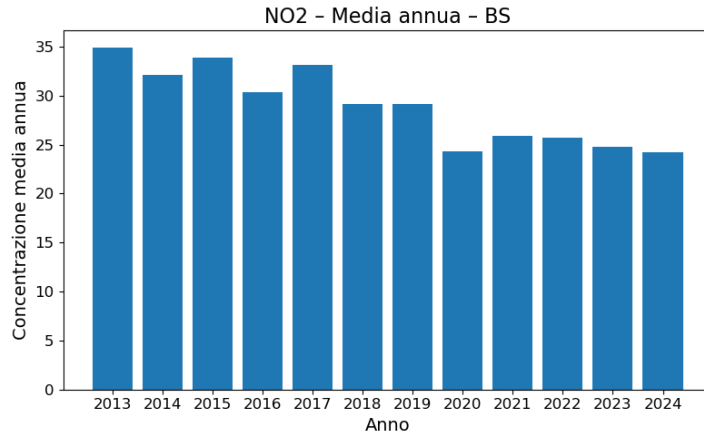


(b)

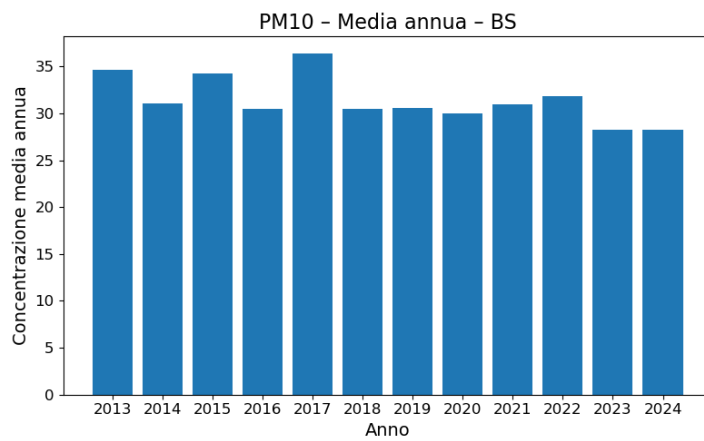


(c)

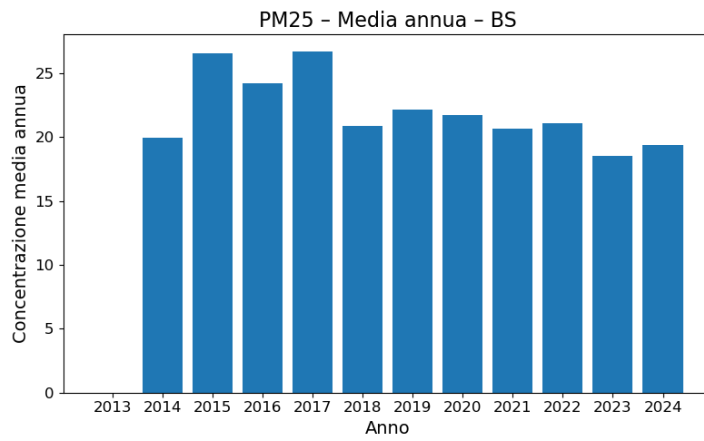
Figura 3.10: Concentrazioni medie annuali nelle postazioni della Regione Lombardia per NO₂ (a), PM₁₀ (b) e PM_{2.5} (c) [μg/m³]



(a)

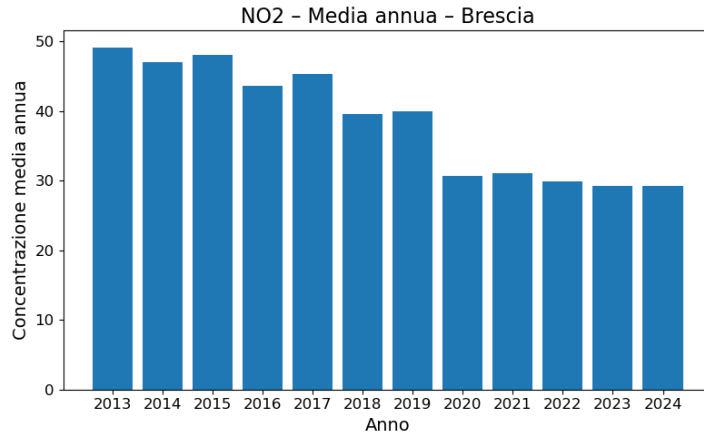


(b)

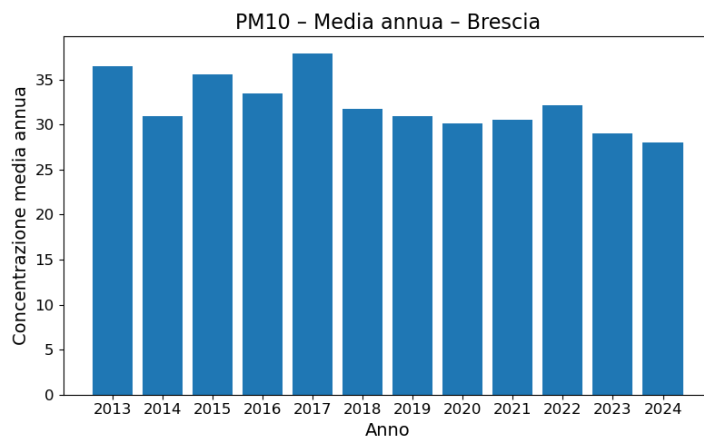


(c)

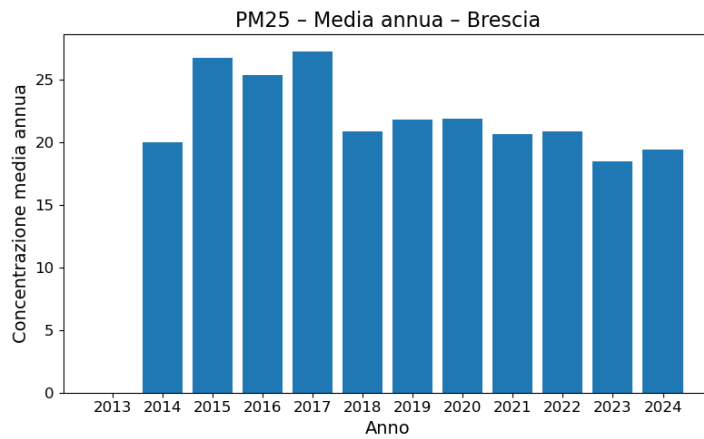
Figura 3.11: Concentrazioni medie annuali nelle postazioni della Provincia di Brescia per NO₂ (a), PM₁₀ (b) e PM_{2.5} (c) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12: Concentrazioni medie annuali nelle postazioni del Comune di Brescia per NO₂ (a), PM₁₀ (b) e PM_{2.5} (c) [µg/m³]

3.4 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno per la simulazione regionale sul dominio “Lombardia” sono state ottenute dal modello globale GEOS-Chem per l’anno 2021 e che fornisce campi di concentrazione tridimensionali per specie gassose e aerosol, basati su un più recente meccanismo chimico.

Gli output delle simulazioni includono:

- concentrazioni orarie di O₃, NO_x, CO, SO₂, VOC, ammoniaca e aerosol primari/secondari;
- specie inorganiche (solfato, nitrato, ammonio), black carbon, carbonio organico;
- precursori degli aerosol organici secondari.

I campi originali sono stati interpolati sulla griglia 6×6 km² del dominio regionale. Per la simulazione sul dominio “Provincia Brescia, le condizioni al contorno derivano direttamente dalla simulazione del dominio “Regione Lombardia”, mantenendo coerenza chimica e numerica tra i due domini.

Questo approccio ha il vantaggio di permettere di effettuare l’interpolazione di dati con elevate prestazioni e di ottenere un dettaglio spaziale maggiore rispetto al dato fornito da GEOS-CHEM senza necessitare di adattamento chimico-fisico tra le specie.

3.5 Validazione delle simulazioni

La valutazione dell’affidabilità dei risultati e l’analisi della situazione attuale si è basata su un confronto quantitativo tra le concentrazioni simulate sui due domini di indagine e quelle misurate dalle postazioni di monitoraggio della qualità dell’aria. Per ciascuna stazione, i valori modellistici sono stati estratti dalla cella di griglia corrispondente alle sue coordinate geografiche.

3.5.1 Biossido di Azoto - NO₂

Le Figure 3.13 e 3.14 mostrano rispettivamente le mappe delle concentrazioni medie annuali di biossido di azoto stimate dal modello per le due simulazioni e le prestazioni del modello nelle postazioni presenti nei relativi domini di simulazione.

Le prestazioni modellistiche, sia in termini di valore medio annuale sia rispetto agli indicatori statistici, risultano complessivamente molto soddisfacenti. Tale risultato è particolarmente significativo se si considera la natura fortemente locale del biossido di azoto, la cui distribuzione spaziale è strettamente legata alla qualità della stima delle emissioni e alla presenza di sorgenti lineari e puntuali concentrate. L’aumento di dettaglio fornito dalla simulazione a risoluzione più fine consente inoltre di caratterizzare con maggiore precisione le variazioni locali del campo di concentrazione. In particolare, emerge con chiarezza l’influenza dei principali assi autostradali presenti nell’area, quali l’A4 e il nuovo tratto Bre-Be-Mi: la loro configurazione determina un incremento delle concentrazioni nella zona di Chiari, situata in posizione intermedia tra le due infrastrutture, evidenziando l’impatto combinato del traffico veicolare sull’assetto emissivo e, di conseguenza, sulle concentrazioni simulate.

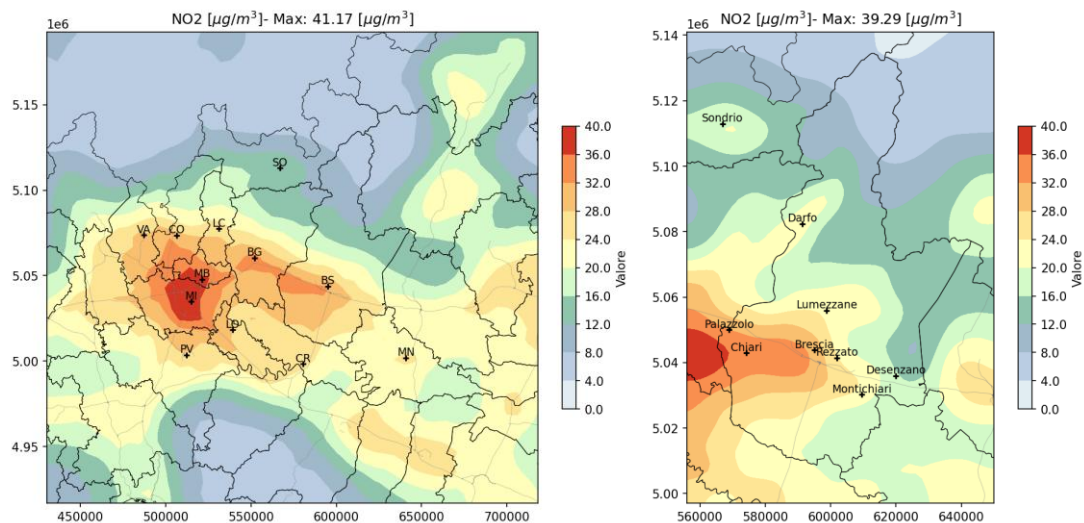


Figura 3.13: Media annuale delle concentrazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di NO_2 nel periodo 01/01/2021-31/12/2021 (sx: simulazione dominio “Regione Lombardia”, dx: simulazione “Provincia Brescia”).

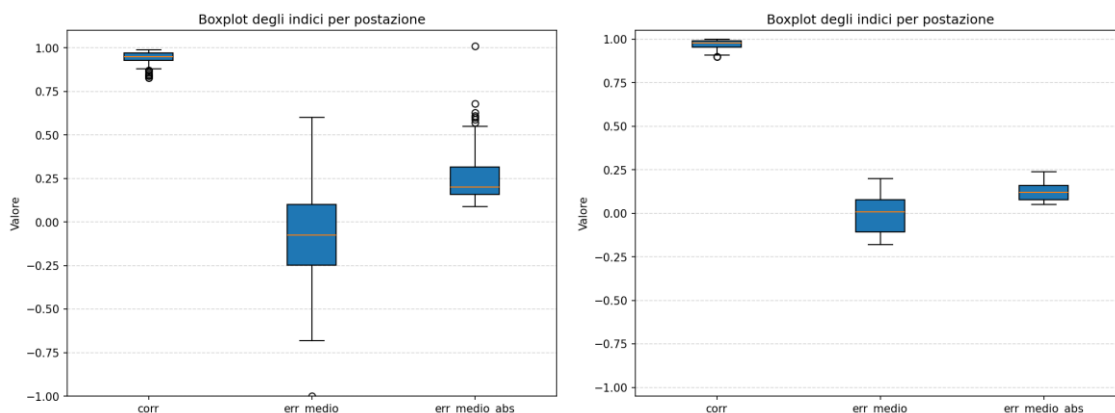


Figura 3.14: Indici di prestazione per la concentrazione media giornaliera di NO_2 (sx: simulazione dominio “Regione Lombardia”, dx: simulazione “Provincia Brescia”).

3.5.2 Particolato Atmosferico - PM_{10}

I risultati della validazione per il PM_{10} sono riportati nelle Figure 3.15 e 3.16. L’aspetto più significativo riguarda la capacità del modello di riprodurre accuratamente anche le concentrazioni elevate di questo inquinante, consentendo l’individuazione delle aree maggiormente critiche del dominio, quali la parte centrale della Pianura Padana e i principali centri urbani. La simulazione sul dominio “Provincia Brescia” evidenzia inoltre concentrazioni medie annuali di PM_{10} elevate (superiori ai $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) anche in corrispondenza delle principali zone rurali, coerentemente con la presenza di sorgenti diffuse e con le specifiche condizioni emissive del territorio. In generale, come auspicabile e osservato anche per gli altri inquinanti considerati, le prestazioni risultano leggermente migliori nella simulazione ad alta risoluzione ($1 \times 1 \text{ km}^2$), pur mantenendosi in entrambi i casi su livelli complessivamente molto soddisfacenti.

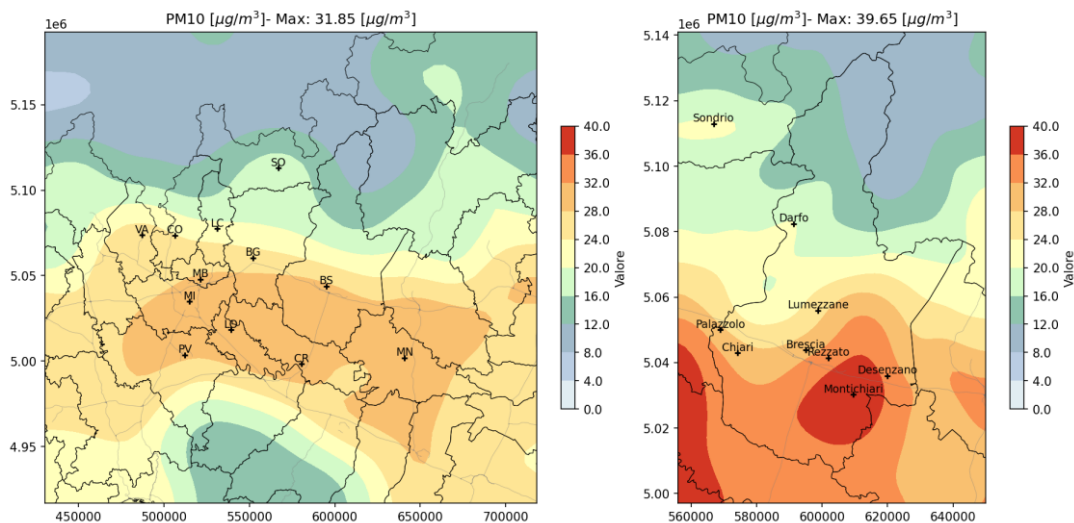


Figura 3.15: Media annuale delle concentrazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di PM_{10} nel periodo 01/01/2021-31/12/2021 (sx: simulazione dominio “Regione Lombardia”, dx: simulazione “Provincia Brescia”).

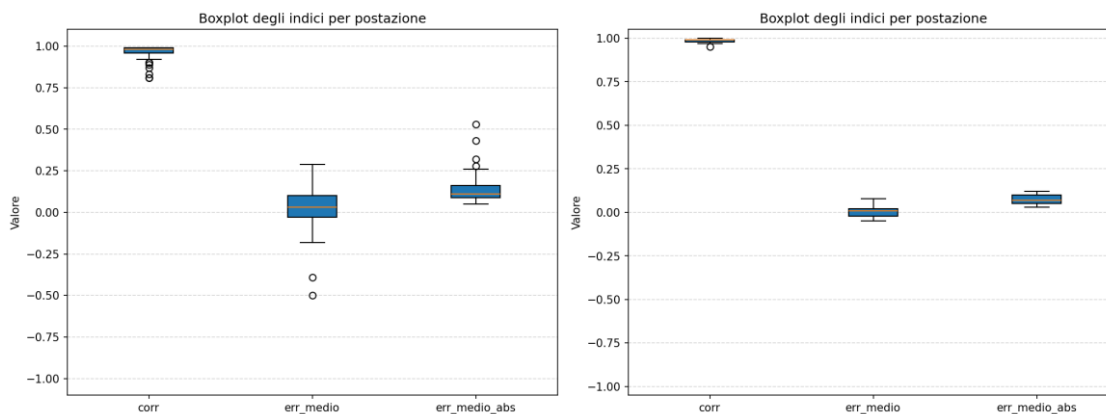


Figura 3.16: Indici di prestazione per la concentrazione media giornaliera di PM_{10} (sx: simulazione dominio “Regione Lombardia”, dx: simulazione “Provincia Brescia”).

3.5.3 Particolato Atmosferico – $\text{PM}_{2.5}$

Il $\text{PM}_{2.5}$ mostra, sia in termini di prestazioni modellistiche sia per quanto riguarda la distribuzione spaziale, un comportamento analogo a quello osservato per il PM_{10} . Le concentrazioni più elevate si registrano nelle zone rurali e nella fascia centrale della Pianura Padana, dove la combinazione tra attività antropiche, elevata densità abitativa e una rilevante componente emissiva di ammoniaca, attribuibile principalmente al comparto agricolo, svolge un ruolo determinante nei processi di formazione e accumulo del particolato fine (Figure 3.17 e 3.18).

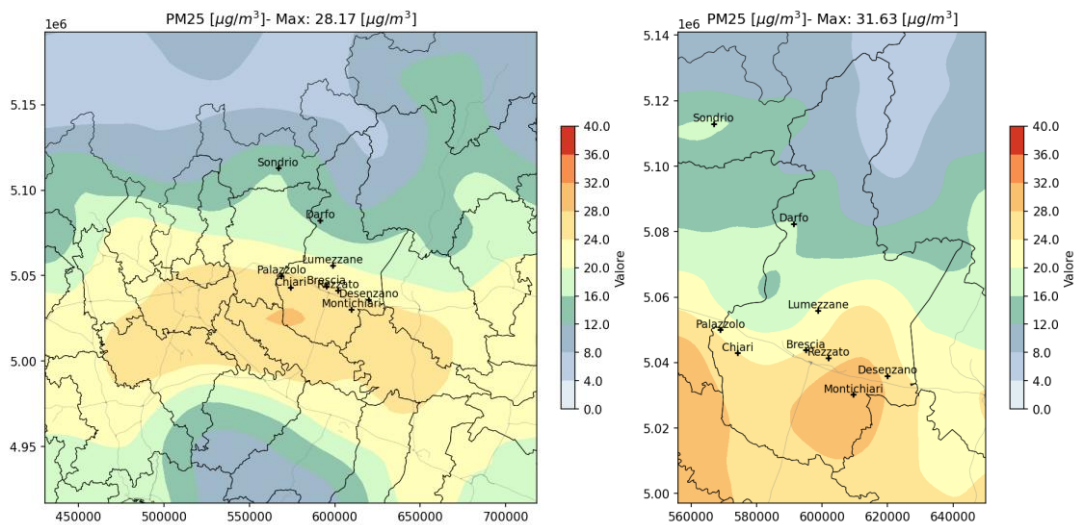


Figura 3.17: Media annuale delle concentrazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di $\text{PM}_{2.5}$ nel periodo 01/01/2021-31/12/2021 (sx: simulazione dominio “Regione Lombardia”, dx: simulazione “Provincia Brescia”).

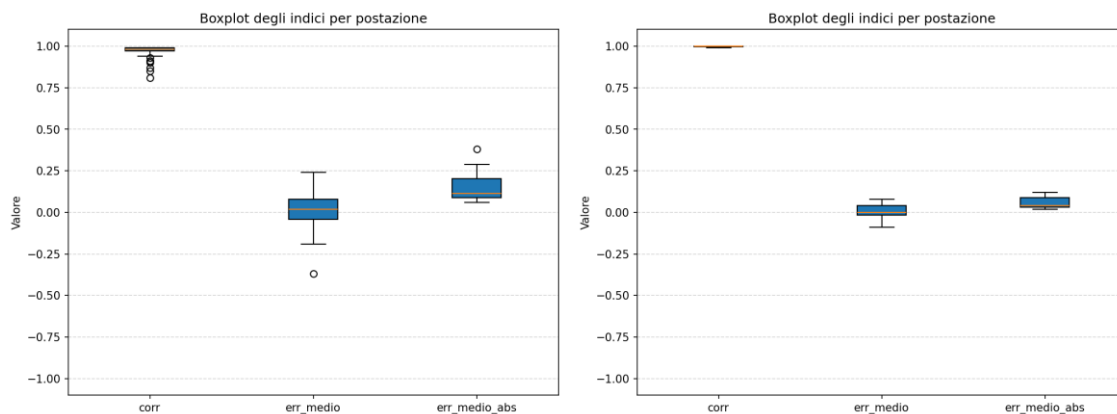


Figura 3.18: Indici di prestazione per la concentrazione media giornaliera di $\text{PM}_{2.5}$ (sx: simulazione dominio “Regione Lombardia”, dx: simulazione “Provincia Brescia”).

4 Analisi di Source Apportionment

L'analisi di Source Apportionment (SA) rappresenta uno strumento fondamentale per comprendere i processi che determinano la qualità dell'aria e costituisce un supporto essenziale per il decisore pubblico nella definizione di politiche di risanamento mirate ed efficaci. A differenza delle sole simulazioni di concentrazione, il SA permette di attribuire in modo esplicito le concentrazioni degli inquinanti alle diverse sorgenti emissive, considerando tanto i processi chimico-fisici quanto i fenomeni di trasporto che caratterizzano l'atmosfera.

L'obiettivo dell'analisi di SA condotta in questo studio è duplice:

1. **Valutare il contributo dei principali macrosettori emissivi alle concentrazioni degli inquinanti**, distinguendo tra comparti responsabili della formazione di inquinanti primari e secondari. Questo consente di identificare non solo quali sorgenti determinano gli incrementi più significativi, ma anche quali processi atmosferici amplificano o attenuano il loro impatto;
2. **Valutare l'impatto delle emissioni provenienti da diverse scale territoriali sulle concentrazioni nel comune di Brescia**. Tale analisi permette di quantificare la quota di inquinamento locale attribuibile alle emissioni interne al comune e quella imputabile a contributi esterni, fornendo così una base realistica per valutare l'efficacia potenziale degli interventi locali rispetto a quelli sovralocali.

In questo lavoro, le emissioni vengono raggruppate secondo le principali categorie emissive definite dalla classificazione INEMAR (Tabella 4.1), approccio che consente di individuare con chiarezza i settori su cui interventi regolatori o tecnologici possono produrre i maggiori benefici ambientali.

Parallelamente, le emissioni sono analizzate anche in funzione della loro **provenienza territoriale**, così da valutare l'impatto delle diverse aree del dominio di simulazione su un punto di ricaduta specifico. A tal fine, sono state definite le seguenti suddivisioni:

- **Dominio “Regione Lombardia”**
 - Provincia di Brescia
 - Resto della Regione Lombardia
 - Altro (aree esterne alla Lombardia)
- **Dominio “Provincia Brescia”**
 - Comune di Brescia
 - Agglomerato di Brescia
 - Provincia di Brescia
 - Altro (aree esterne alla provincia di Brescia)

Questa doppia articolazione — per settore emissivo e per area territoriale — consente un'analisi integrata delle sorgenti, capace di individuare con precisione quali comparti e quali porzioni del territorio influenzano maggiormente la qualità dell'aria nel comune di Brescia.

È importante sottolineare che i due domini utilizzati presentano condizioni al contorno differenti, sia per estensione geografica sia per risoluzione spaziale. Ciò rende non immediato il confronto diretto tra i contributi ai bordi dei due domini e richiede un'interpretazione attenta dei risultati.

Per tutti i macroinquinanti considerati nel seguito, l'impatto delle sorgenti emissive è valutato in termini di **concentrazioni medie annuali**, parametro particolarmente adatto per l'analisi delle politiche strutturali di qualità dell'aria, sul dominio di indagine e nel dettaglio nel Comune di Brescia.

Tabella 4.1: Associazione tra gruppi utilizzati nell'analisi di S-A e macrosettori INEMAR.

Gruppo S-A	Associazione INEMAR	Descrizione
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	Macrosettore 1	Impatto delle emissioni derivanti dalla produzione di energia
Combustione non industriale	Macrosettore 2	Impatto delle emissioni da riscaldamento domestico <i>autonomo</i> (no termovalorizzatori)
Industria	Macrosettori 3, 4, 5	Impatto delle emissioni derivanti da qualsiasi attività industriale
Uso di solventi	Macrosettore 6	Impatto delle emissioni da produzione e utilizzo di solventi
Trasporto su strada	Macrosettori 7	Impatto delle emissioni derivanti da trasporto su strada
Altre sorgenti mobili	Macrosettore 8	Impatto delle emissioni derivanti da altre tipologie di trasporto (ex. ambito agricolo)
Trattamento e smaltimento di rifiuti	Macrosettore 9	Impatto delle emissioni da trattamento e smaltimento rifiuti
Agricoltura	Macrosettore 10	Impatto delle emissioni derivanti dalle attività agricole
Altro	Macrosettore 11 e Condizioni al contorno	Impatto delle emissioni di altre fonti non precedentemente considerate (ex. biogeniche) e delle condizioni al contorno

4.1 Biossido di azoto – NO₂

Le Figure 4.1–4.9 mostrano la distribuzione spaziale degli impatti dei gruppi emissivi riportati nella Tabella 4.1 per i due domini di simulazione.

Si osserva come il contributo predominante sia quello del comparto del trasporto su strada (Figura 4.5), che raggiunge valori dell'ordine di 18–20 µg/m³ nell'area metropolitana di Milano e lungo le principali arterie autostradali. Risultano significativi anche l'impatto del riscaldamento domestico (Figura 4.2) e quello del comparto produttivo (Figura 4.3), particolarmente nelle zone a maggiore densità industriale della regione.

Gli altri gruppi emissivi mostrano contributi più contenuti (generalmente inferiori a 1 µg/m³), mentre l'impatto del gruppo *Altre fonti* risulta concentrato lungo il bordo dei domini ed è riconducibile principalmente al trasporto di inquinanti provenienti dalle aree esterne ai domini stessi.

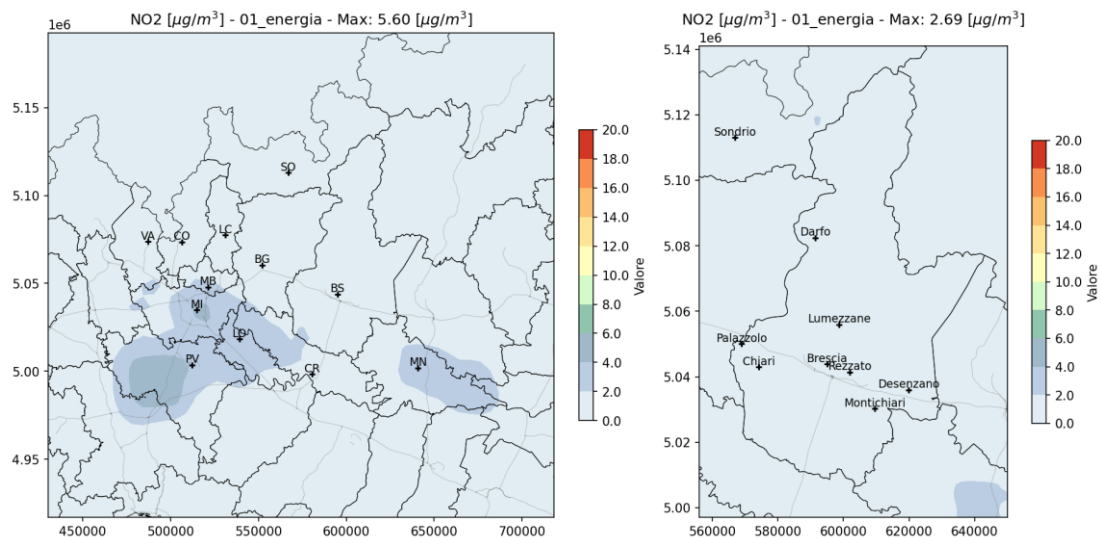


Figura 4.1: Impatto del gruppo S-A "Produzione di energia e trasformazione di combustibili" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

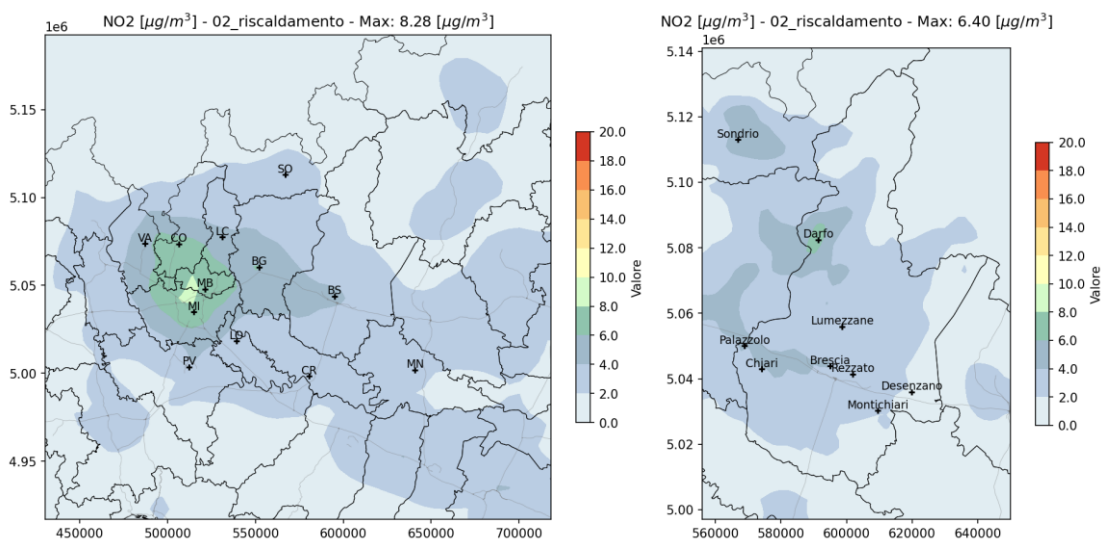


Figura 4.2: Impatto del gruppo S-A "Combustione non industriale" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

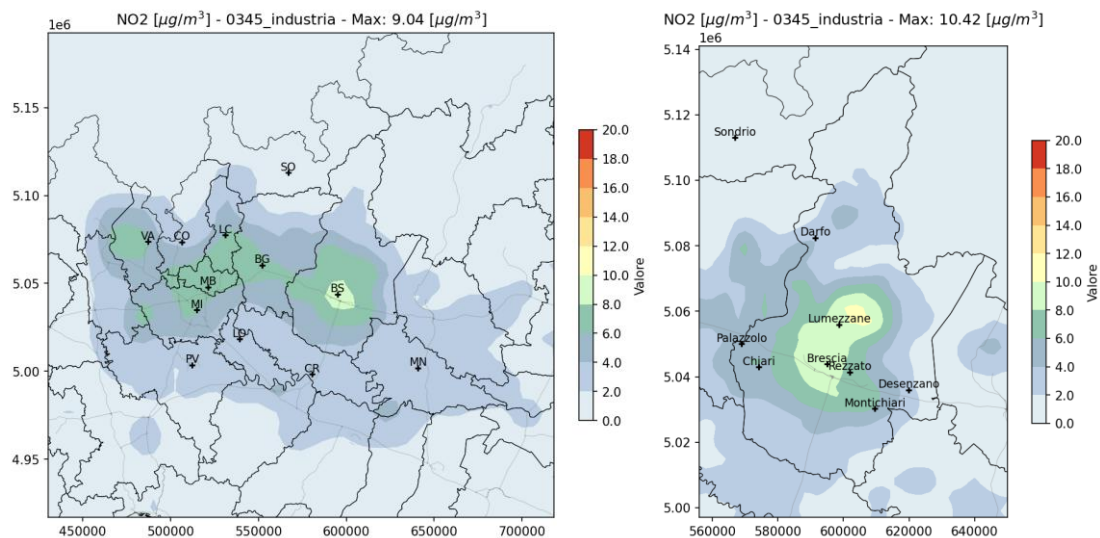


Figura 4.3: Impatto del gruppo S-A "Industria" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

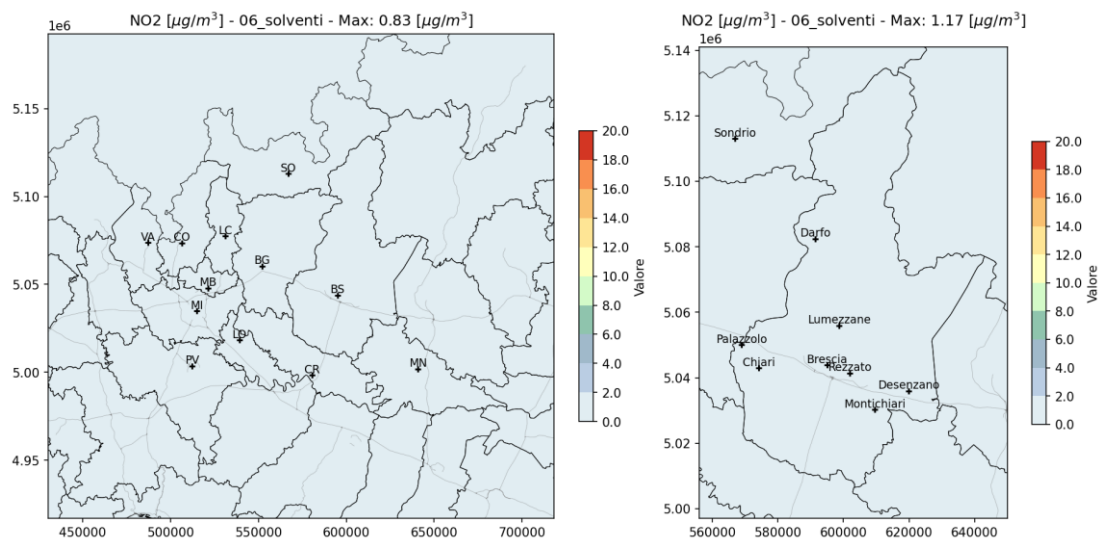


Figura 4.4: Impatto del gruppo S-A "Uso di solventi" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

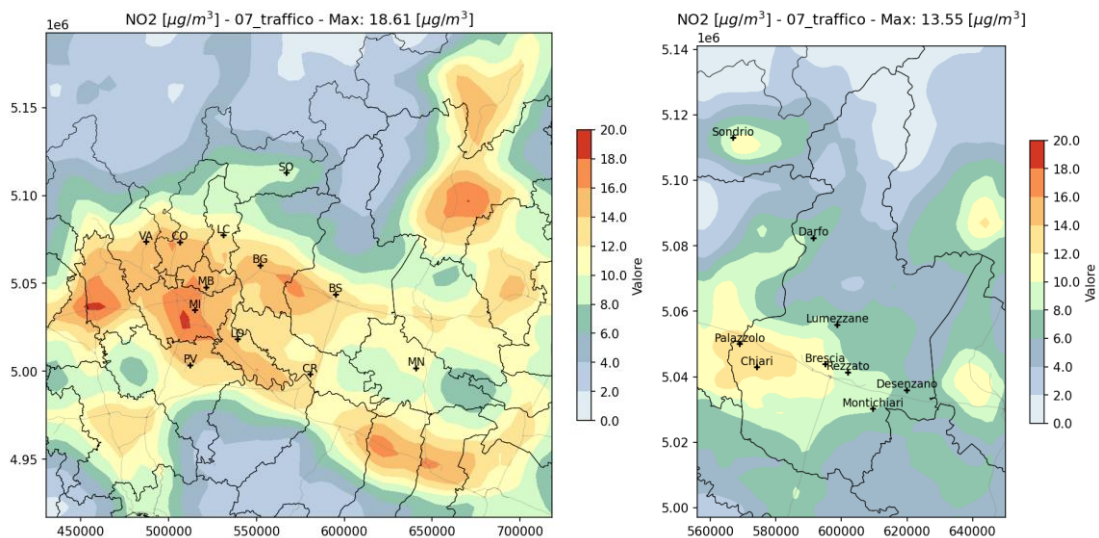


Figura 4.5: Impatto del gruppo S-A "Trasporto su strada" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

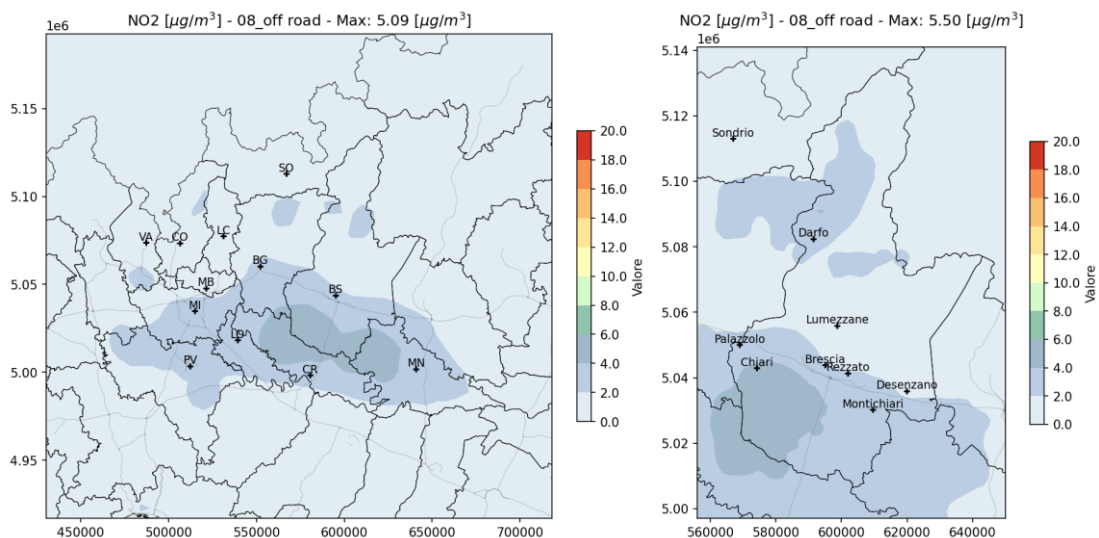


Figura 4.6: Impatto del gruppo S-A "Altre sorgenti mobili" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

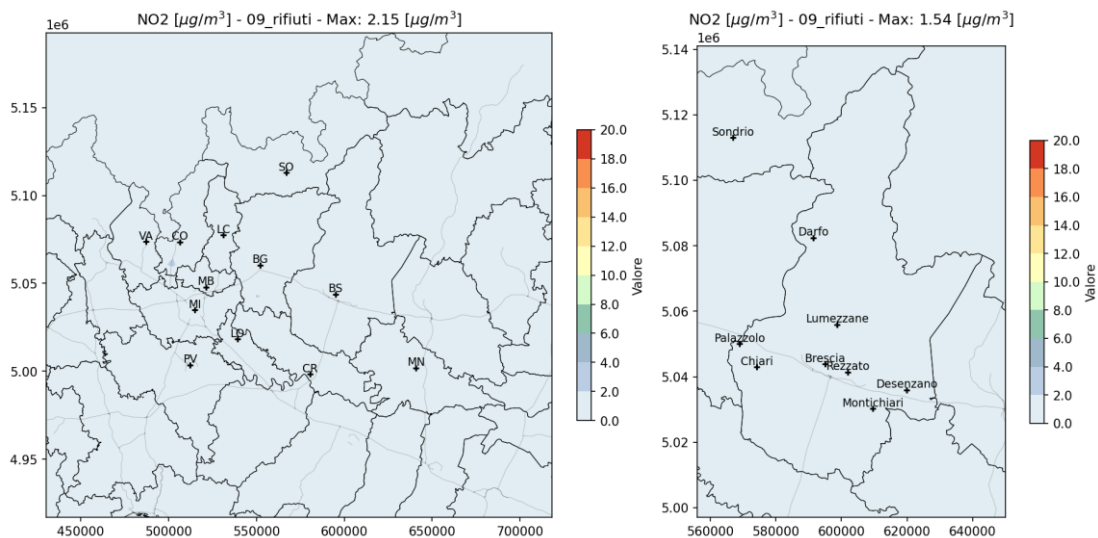


Figura 4.7: Impatto del gruppo S-A "Trattamento e smaltimento di rifiuti" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

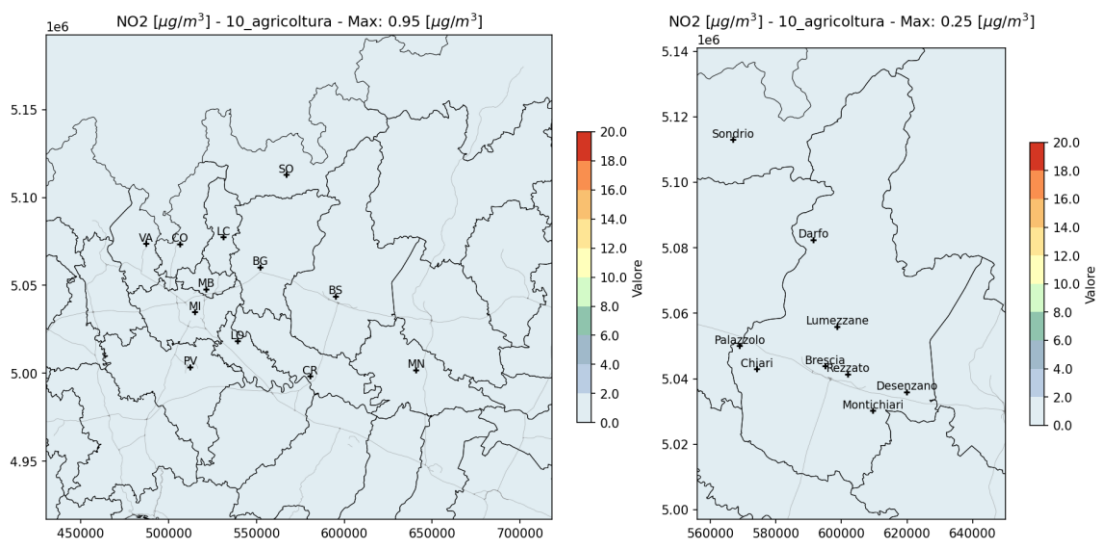


Figura 4.8: Impatto del gruppo S-A "Agricoltura" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

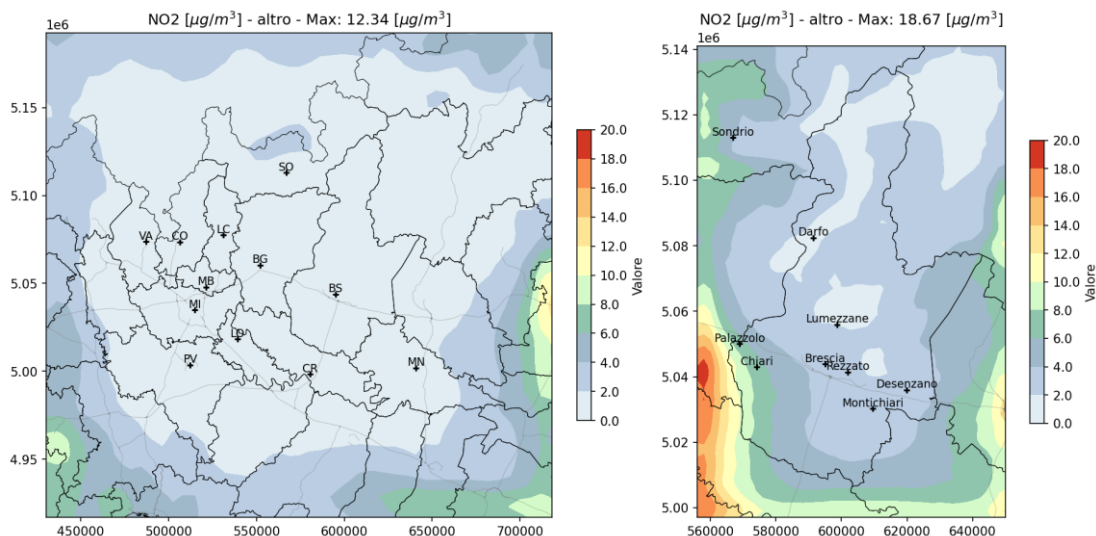
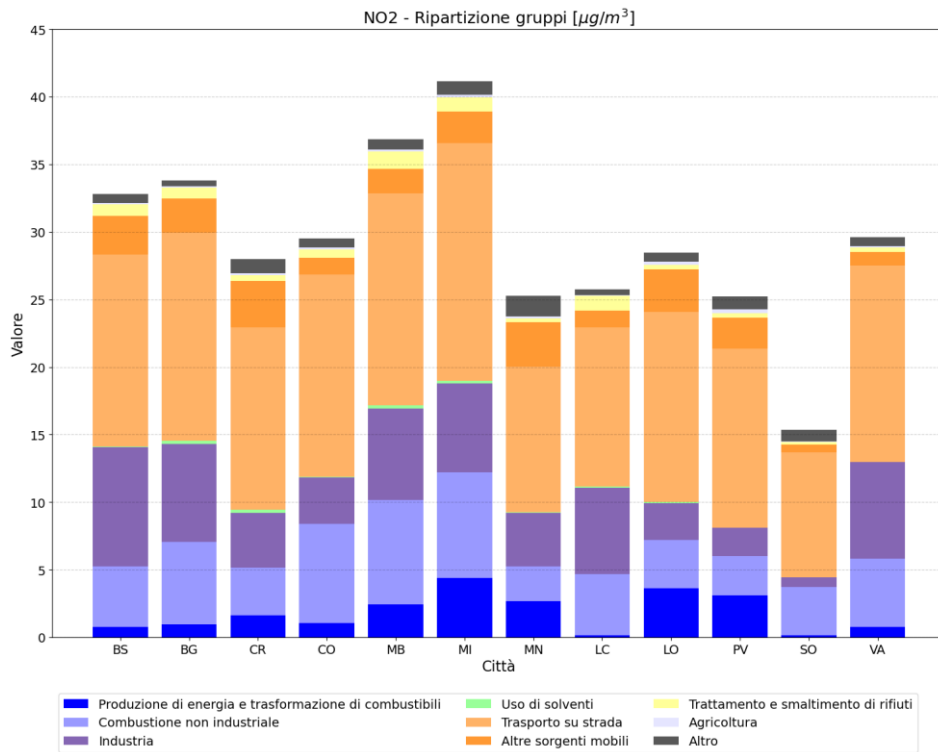


Figura 4.9: Impatto del gruppo S-A "Altro" sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

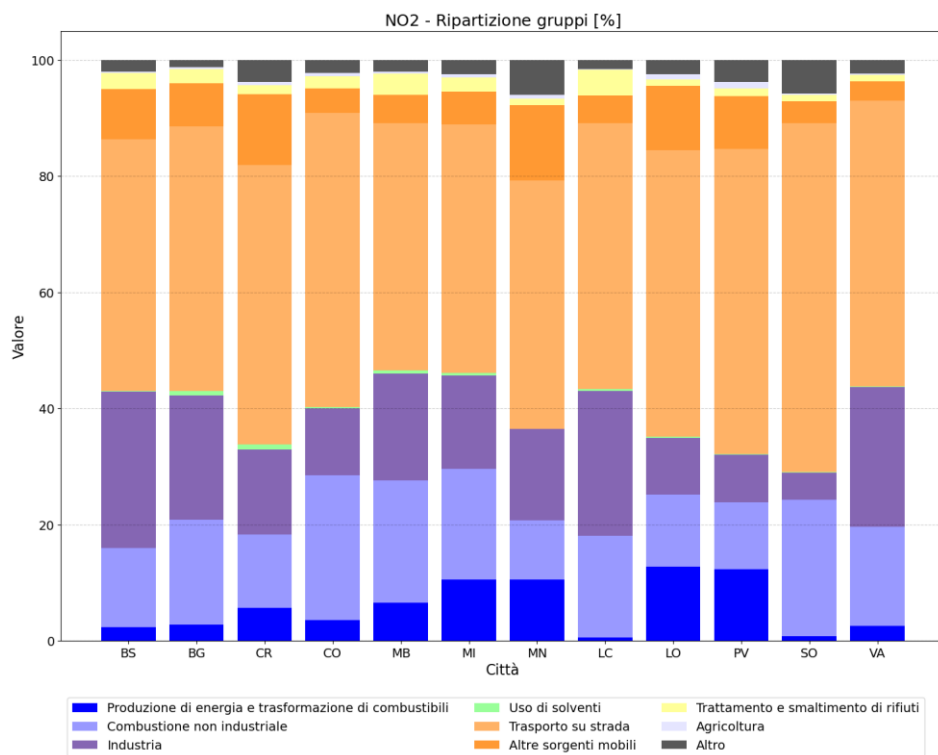
La Figura 4.10 mostra la distribuzione, in termini sia di concentrazioni medie annuali sia di contributi percentuali, dei diversi gruppi emissivi nei capoluoghi della regione Lombardia. Tale analisi è stata possibile grazie ai risultati della simulazione sul dominio “regione Lombardia”, che include l’intera area regionale.

Si osserva come, nelle principali aree urbane, l’impatto del traffico risulti predominante, con valori che superano il 40% delle concentrazioni medie annuali di ossidi di azoto.

È interessante notare che, nel comune di Brescia, l’impatto del riscaldamento domestico risulta inferiore, sia in termini assoluti sia percentuali, rispetto a città e hinterland con un numero di abitanti più contenuto, come ad esempio Bergamo. Tale evidenza può suggerire una maggiore efficienza della rete di riscaldamento presente nel territorio comunale.



(a)



(b)

Figura 4.10: Impatto totale (a) e percentuale (b) dei diversi gruppi S-A nei capoluoghi lombardi sulla concentrazione media di NO₂.

4.1.1 Focus su Comune di Brescia

Sebbene l'analisi riportata in Figura 4.10 mostri gli impatti dei diversi comparti emissivi nel comune di Brescia, la simulazione effettuata sul dominio "Regione Lombardia" non consente, per motivi di risoluzione spaziale, di distinguere quale quota di tali impatti sia attribuibile alle emissioni comunali e quale invece a sorgenti esterne. Per ottenere questa informazione è stato quindi necessario realizzare una simulazione di dettaglio sul dominio "Provincia Brescia", che permette di analizzare gli impatti delle diverse sorgenti emissive in tre aree di particolare interesse per il decisore: il comune di Brescia, l'agglomerato di Brescia e la provincia di Brescia.

La Figura 4.11 presenta la distribuzione dell'impatto delle sole sorgenti presenti sul territorio comunale sulla concentrazione media annuale calcolata nel comune (circa $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$), fornendo una prima stima della quota di concentrazione dovuta alle emissioni locali. Il grafico evidenzia che, sebbene il biossido di azoto sia un inquinante di carattere fortemente locale, meno del 40% delle concentrazioni nel comune (38%) è attribuibile direttamente alle emissioni generate all'interno dei confini comunali, mentre circa il 60% deriva da emissioni provenienti dall'esterno.

È importante sottolineare che, a causa delle non-linearità e della complessità dei processi chimico-fisici coinvolti, tale informazione non fornisce una stima quantitativa diretta della riduzione attesa delle concentrazioni nel comune intervenendo esclusivamente sulle emissioni locali. Essa rappresenta, tuttavia, un utile primo elemento conoscitivo a supporto del processo decisionale.

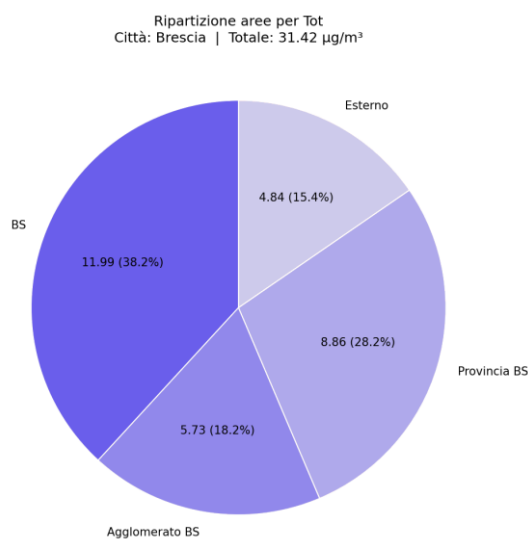


Figura 4.11: Ripartizione degli impatti su NO_2 nel comune di Brescia suddivisi per area.

La Figura 4.12 mostra la distribuzione degli impatti delle emissioni nelle tre aree considerate (e nell'area esterna alla provincia) per i gruppi emissivi maggiormente impattanti, ovvero il trasporto su strada, l'industria e la combustione non industriale che insieme sommano per $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ circa sui $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ delle concentrazioni simulate sul comune. Si osserva come il contributo proveniente dalle aree esterne al comune risulti sempre superiore al 45%.

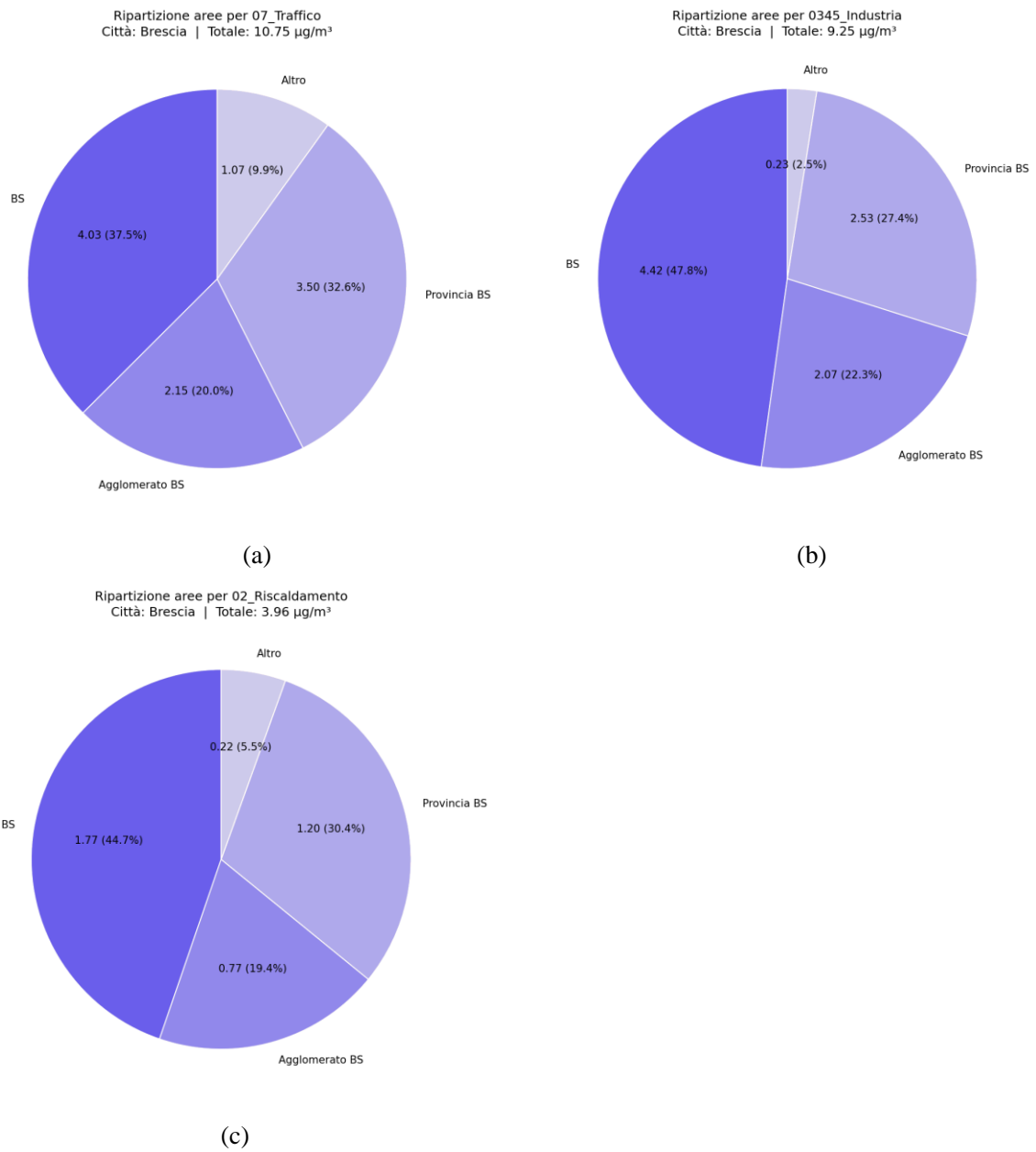


Figura 4.12: Ripartizione in aree degli impatti dei principali gruppi emissivi nel Comune di Brescia.

4.2 Particolato Atmosferico - PM₁₀, PM_{2.5}

L'analisi di Source Apportionment relativa alle principali componenti del particolato atmosferico (PM₁₀ e PM_{2.5}) evidenzia pattern spaziali fortemente coerenti tra loro (Figure 4.13–4.30). Le distribuzioni simulate mostrano come il particolato, a differenza del biossido di azoto, sia caratterizzato da una minore localizzazione spaziale: ciò è particolarmente evidente dall'elevato contributo della classe "Altro", soprattutto nel dominio "provincia Brescia".

In entrambi i domini modellati, i settori della combustione non industriale, del traffico e dell'agricoltura risultano i principali responsabili delle concentrazioni medie annue di PM, ai quali si aggiunge un contributo non trascurabile del comparto industriale, più marcato nella fascia centrale del dominio regionale e nell'area limitrofa al comune di Brescia.

Un risultato di particolare rilievo emerge dalla simulazione ad alta risoluzione sull'area bresciana, che mostra come il massimo contributo del riscaldamento domestico alle concentrazioni non si collochi direttamente sul comune di Brescia, bensì nella zona a nord dello stesso. Tale evidenza suggerisce una maggiore efficienza del sistema di riscaldamento del capoluogo, coerentemente con quanto riportato nelle Figure 4.14 e 4.23.

Nel complesso, i risultati ottenuti sui due domini mostrano una buona consistenza. L'unica differenza visibile riguarda il contributo del settore agricolo, per il quale la simulazione di dettaglio prevede impatti leggermente più elevati, in particolare nell'area sud-orientale della provincia (zona Montichiari–Ghedi). Tale differenza può essere attribuita a una maggiore sensibilità alle emissioni di ammoniaca nel processo di formazione del particolato inorganico secondario alla più alta risoluzione spaziale.

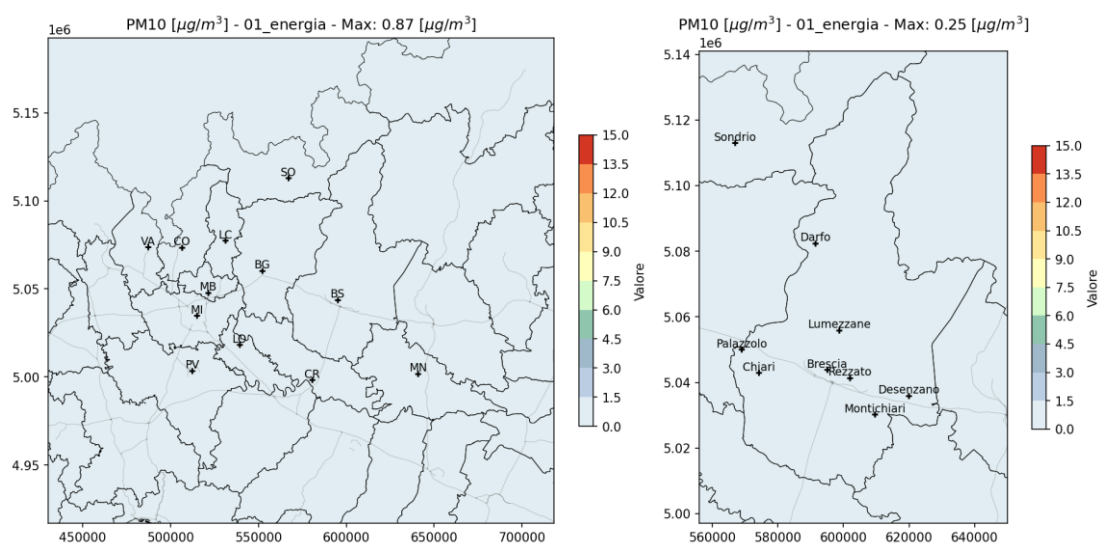


Figura 4.13: Impatto del gruppo S-A " Produzione di energia e trasformazione di combustibili" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ (µg/m³).

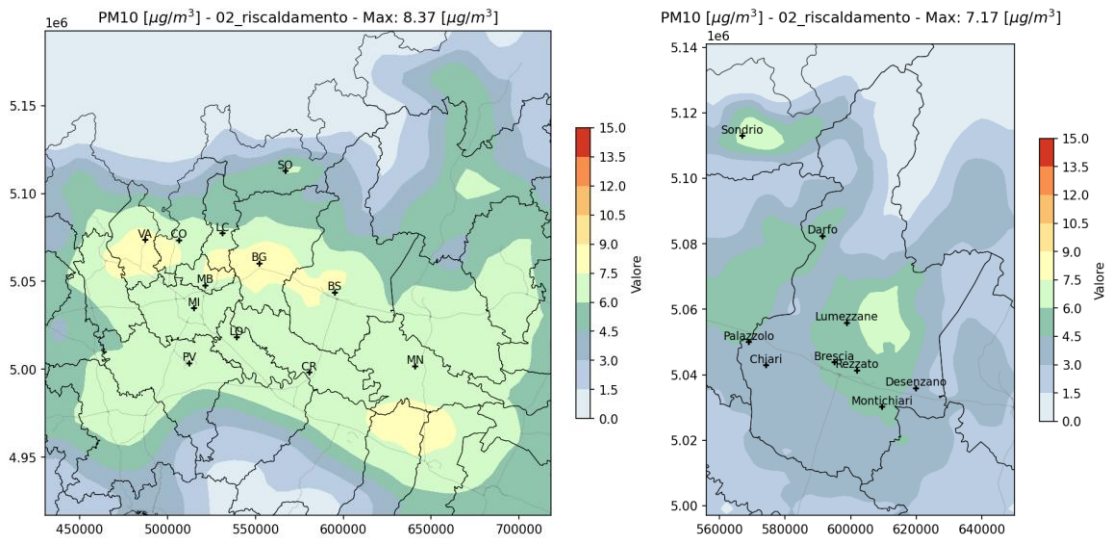


Figura 4.14: Impatto del gruppo S-A "Combustione non industriale" sulla concentrazione media annuale di PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

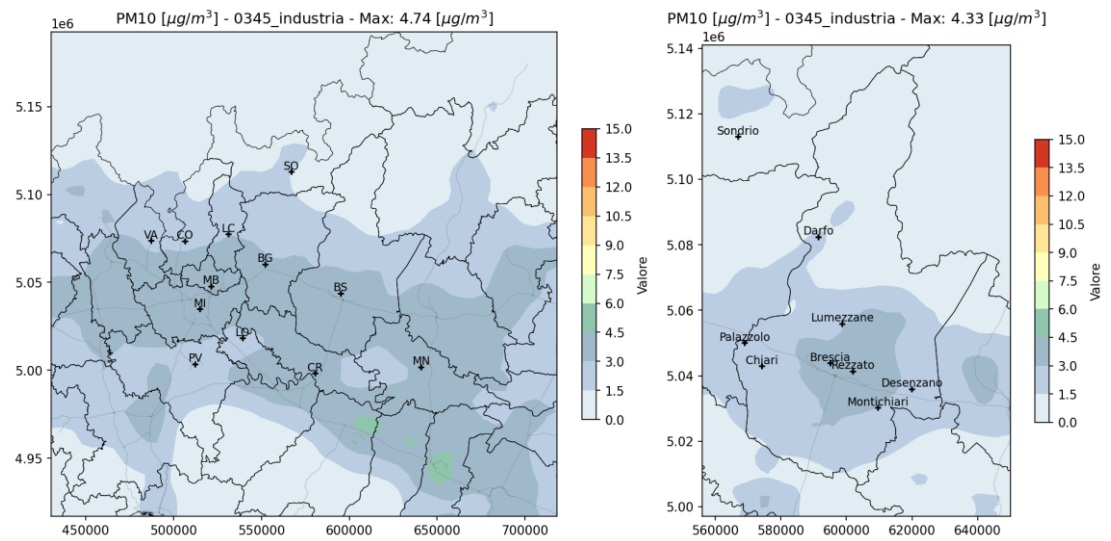


Figura 4.15: Impatto del gruppo S-A "Industria" sulla concentrazione media annuale di PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

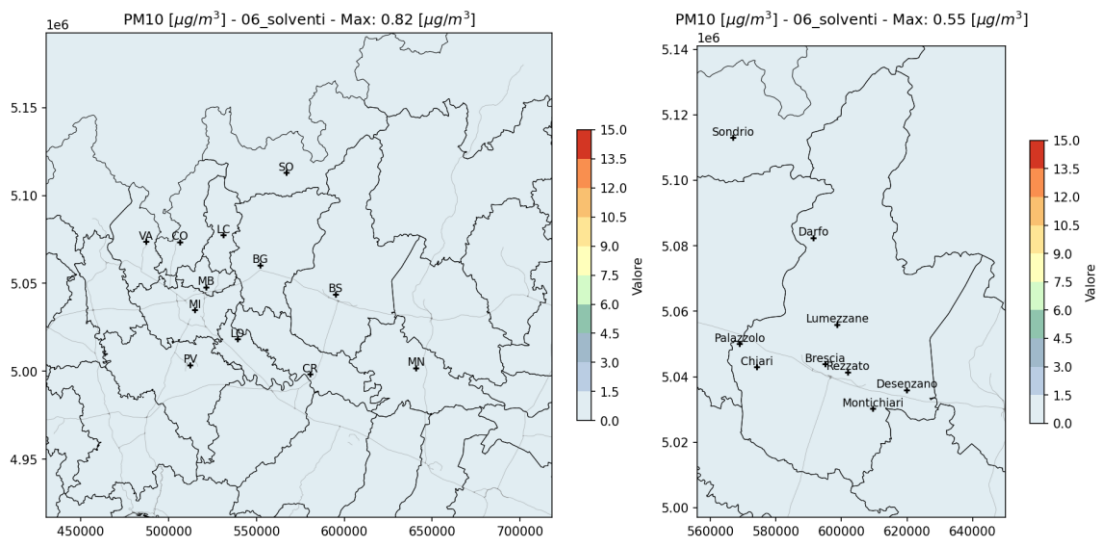


Figura 4.16: Impatto del gruppo S-A "Uso dei solventi" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

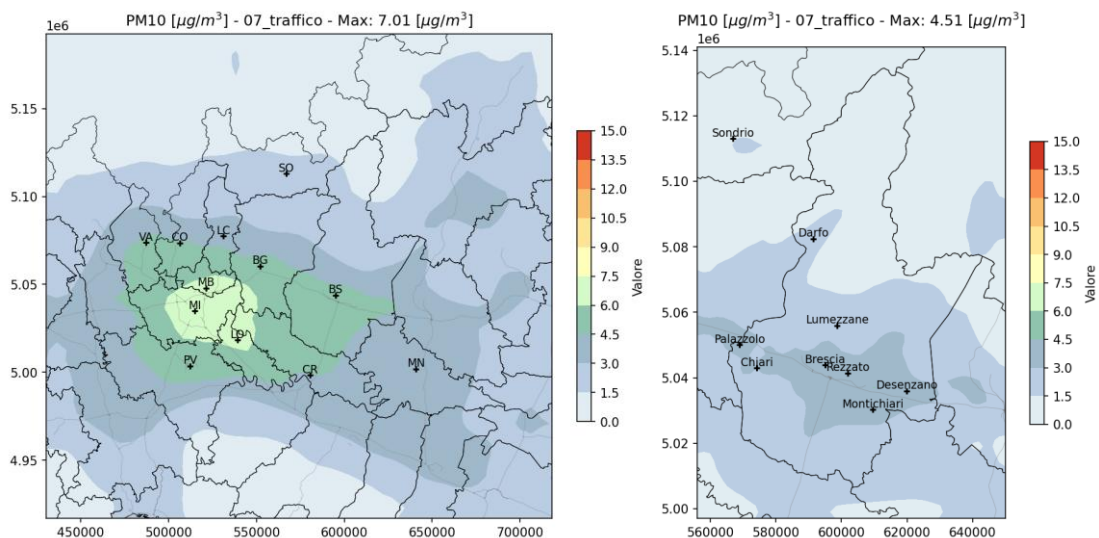


Figura 4.17: Impatto del gruppo S-A "Trasporto su strada" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

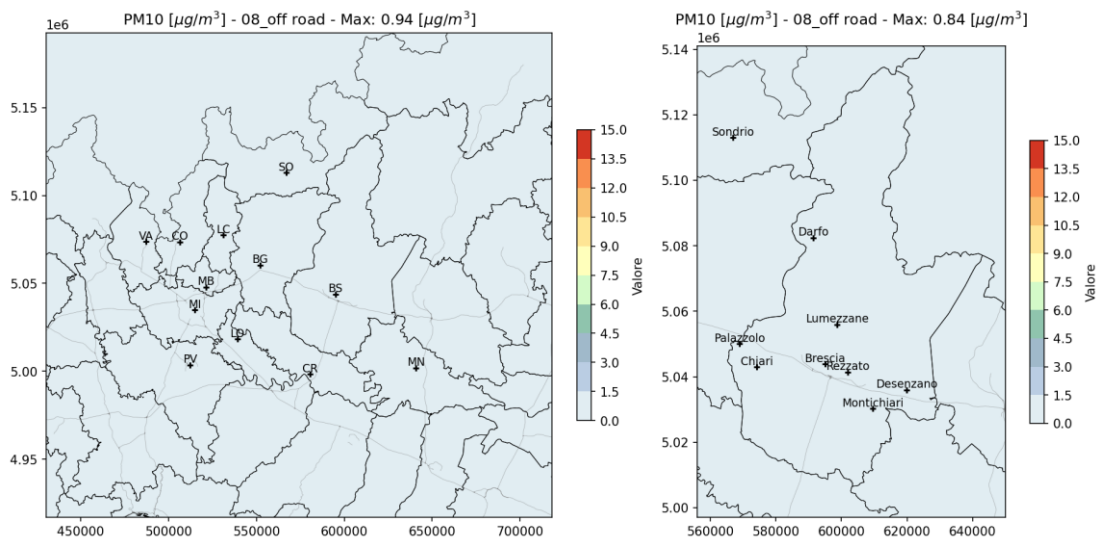


Figura 4.18: Impatto del gruppo S-A "Altre sorgenti mobili" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ (µg/m³).

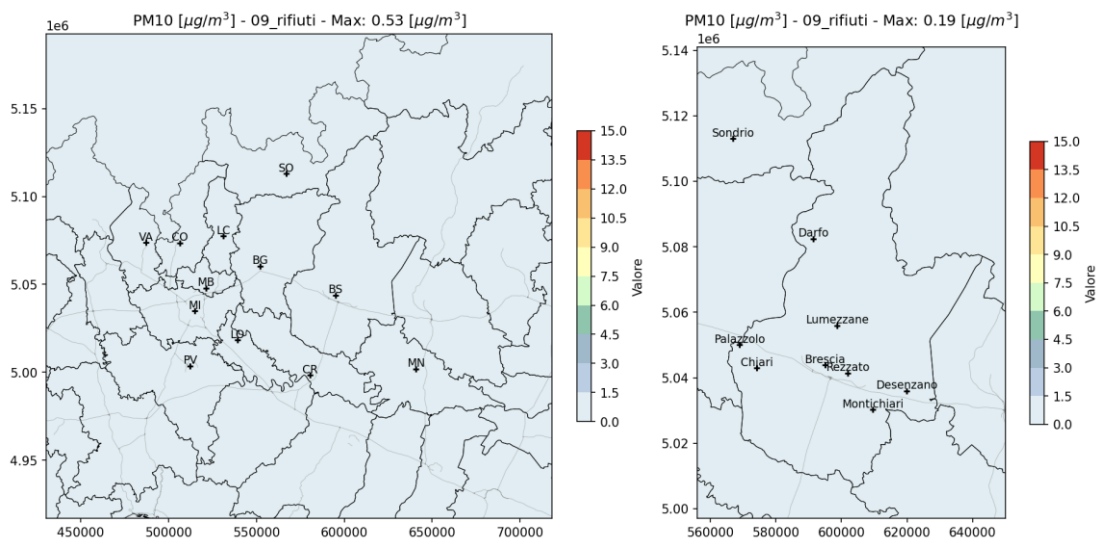


Figura 4.19: Impatto del gruppo S-A "Trattamento e smaltimento di rifiuti" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ (µg/m³).

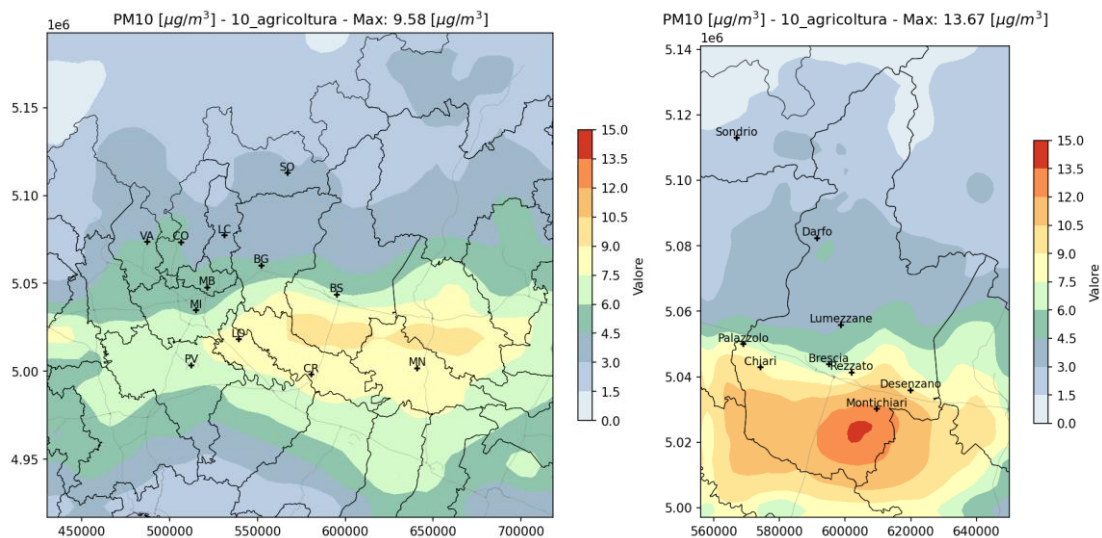


Figura 4.20: Impatto del gruppo S-A "Agricoltura" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

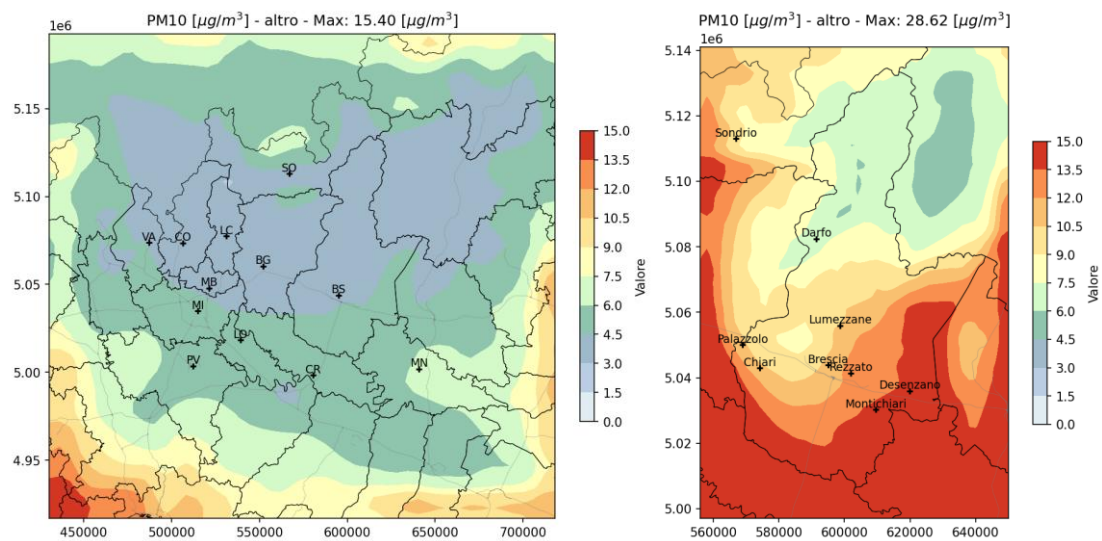


Figura 4.21: Impatto del gruppo S-A "Altro" sulla concentrazione media annuale di PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

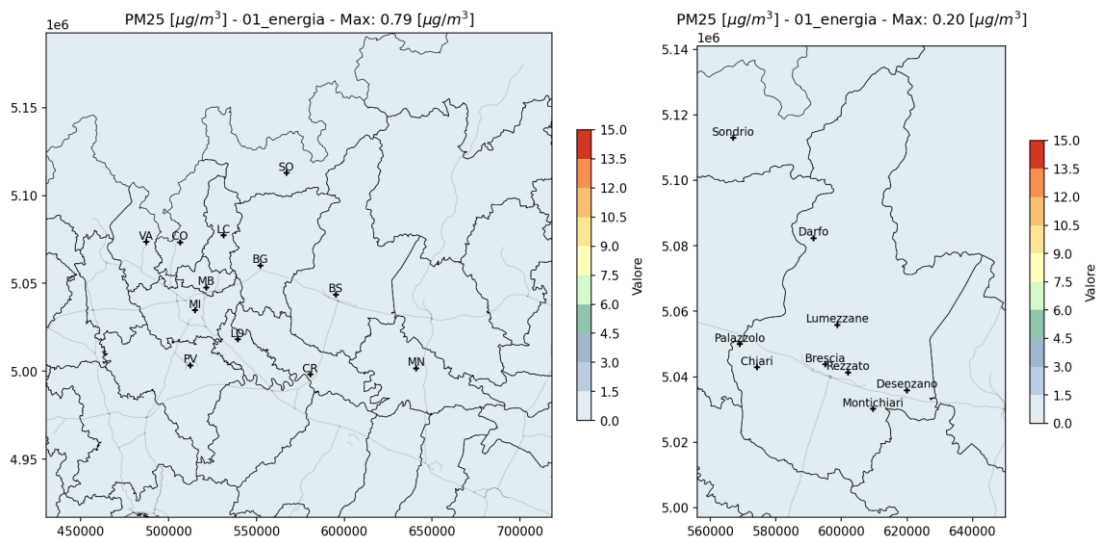


Figura 4.22: Impatto del gruppo S-A "Produzione di energia e trasformazione di combustibili" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} (µg/m³).

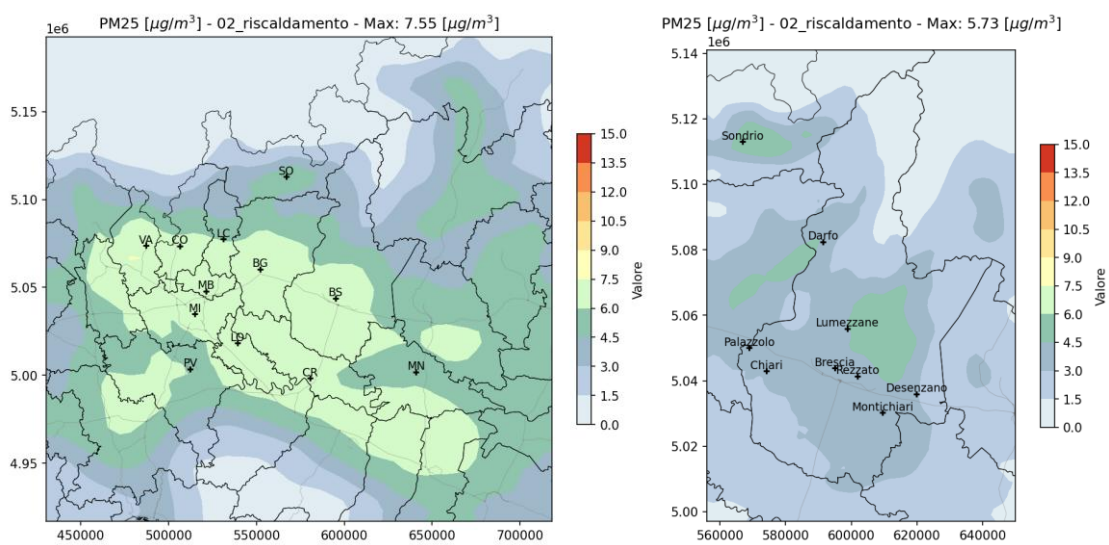


Figura 4.23: Impatto del gruppo S-A "Combustione non industriale" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} (µg/m³).

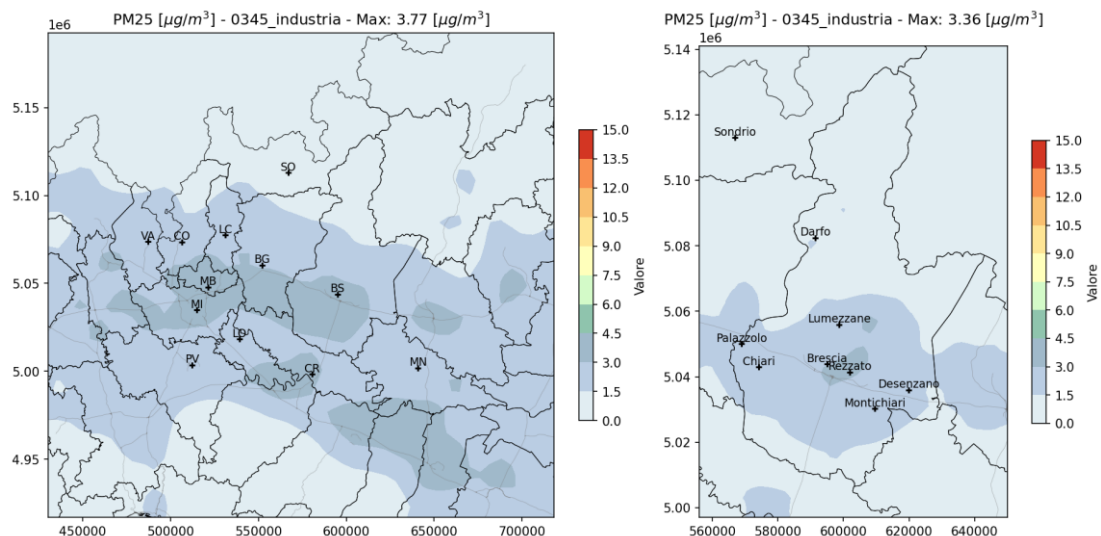


Figura 4.24: Impatto del gruppo S-A "Industria" sulla concentrazione media annuale di $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

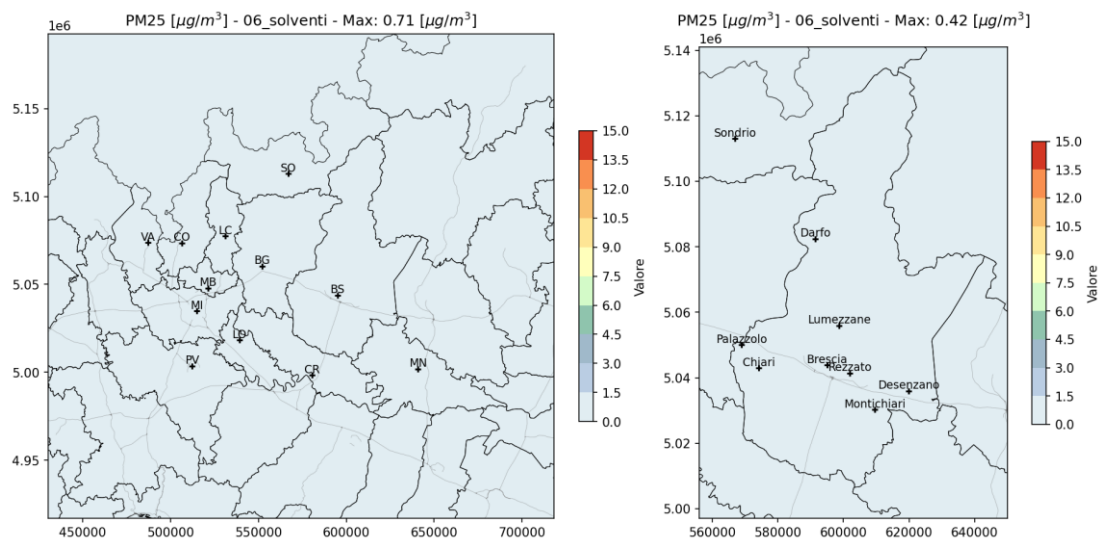


Figura 4.25: Impatto del gruppo S-A "Uso di solventi" sulla concentrazione media annuale di $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

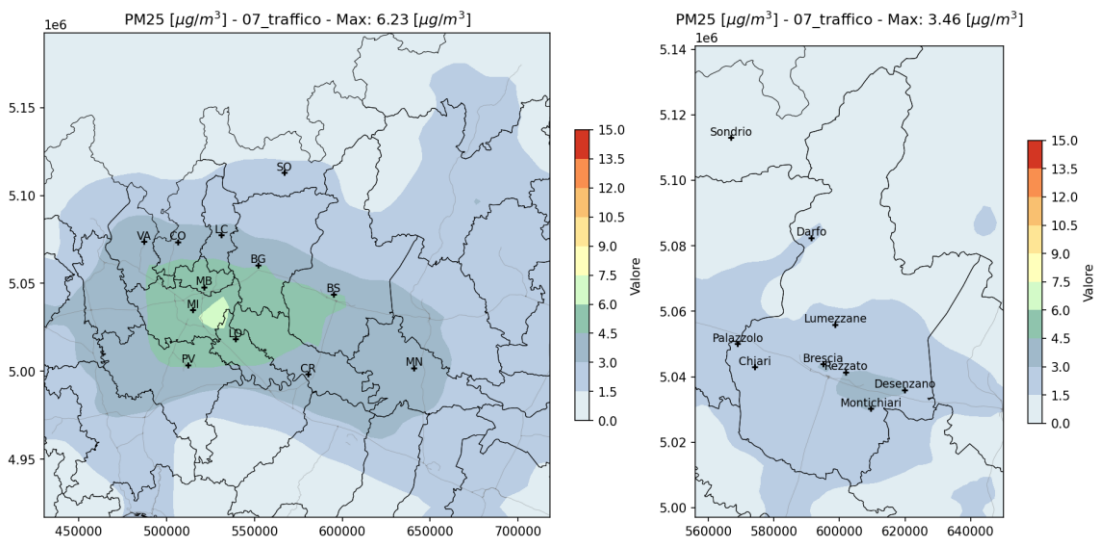


Figura 4.26: Impatto del gruppo S-A "Trasporto su strada" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} (µg/m³).

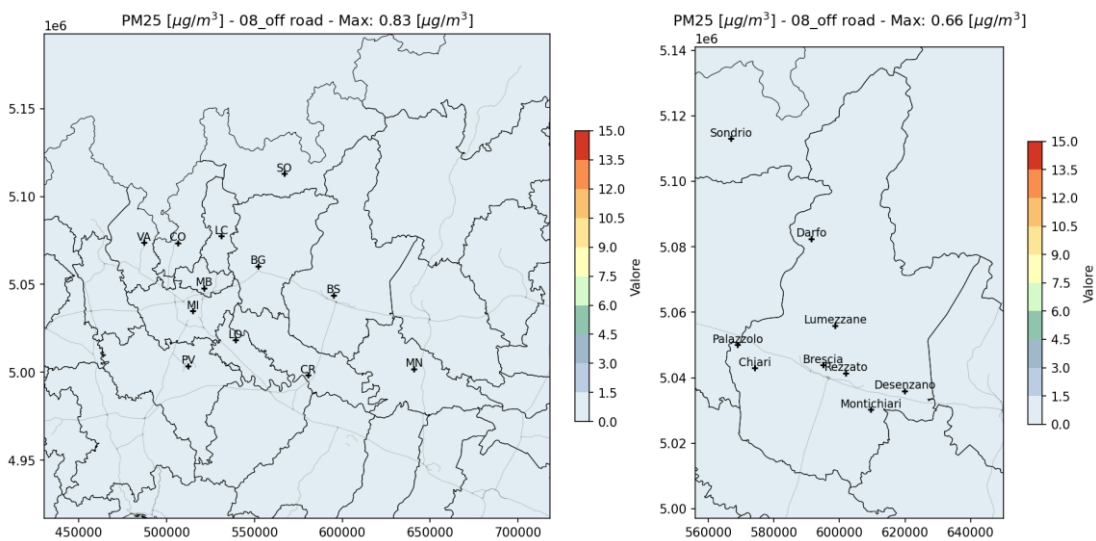


Figura 4.27: Impatto del gruppo S-A "Altre sorgenti mobili" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} (µg/m³).

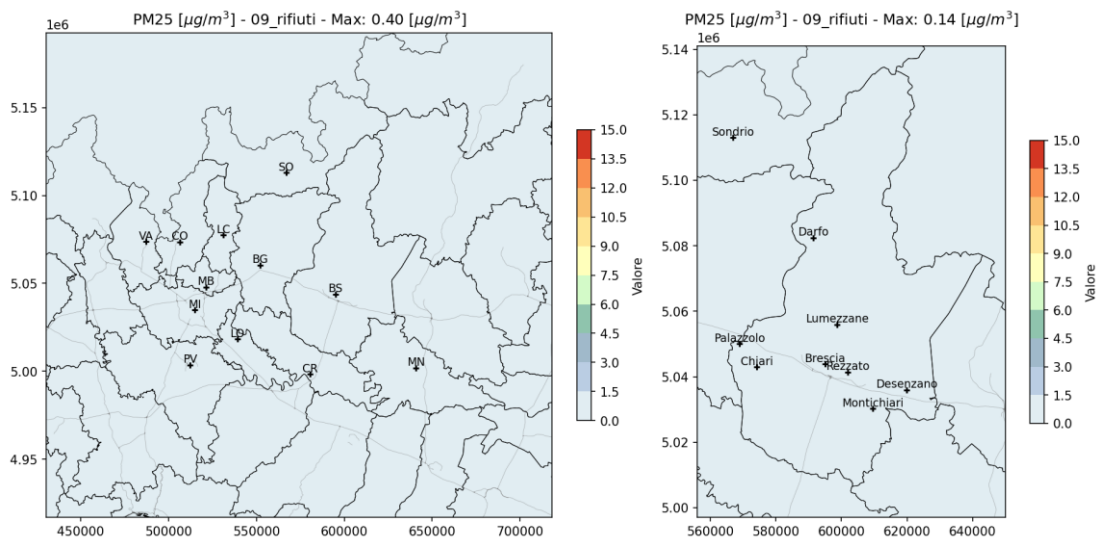


Figura 4.28: Impatto del gruppo S-A "Trattamento e smaltimento di rifiuti" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

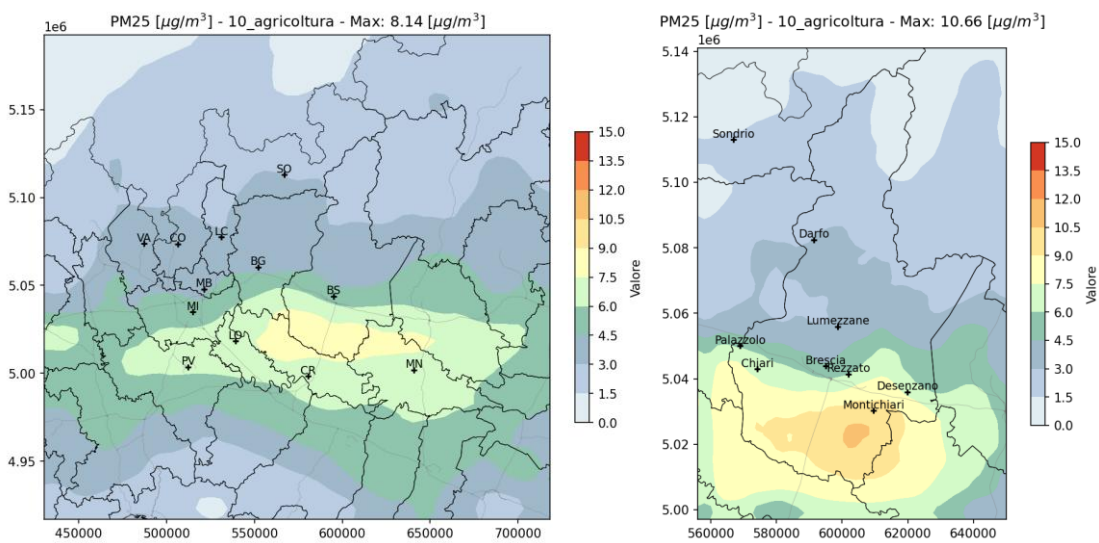


Figura 4.29: Impatto del gruppo S-A "Agricoltura" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

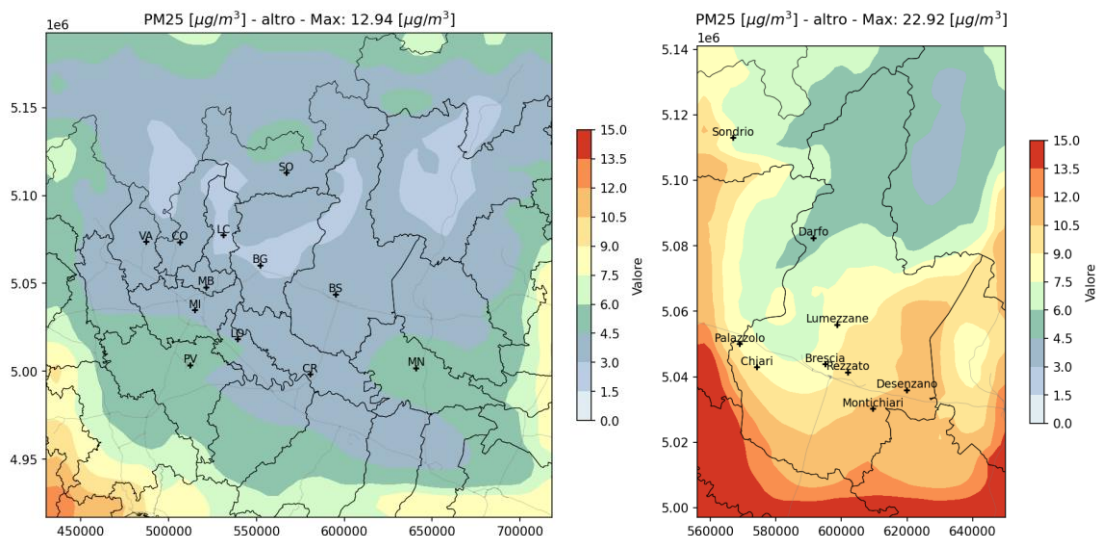
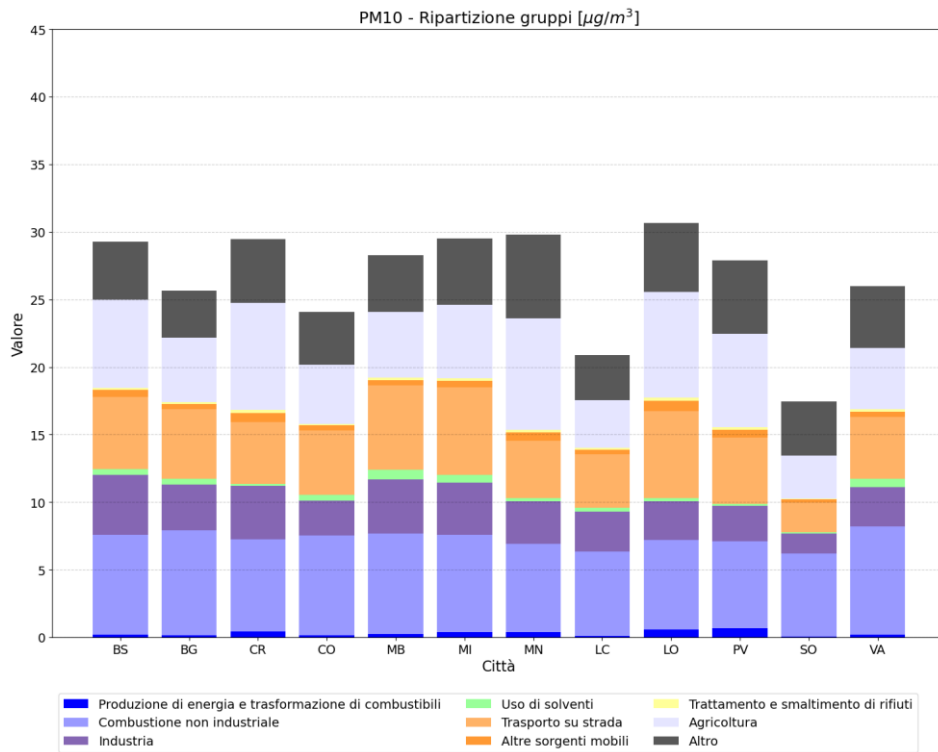


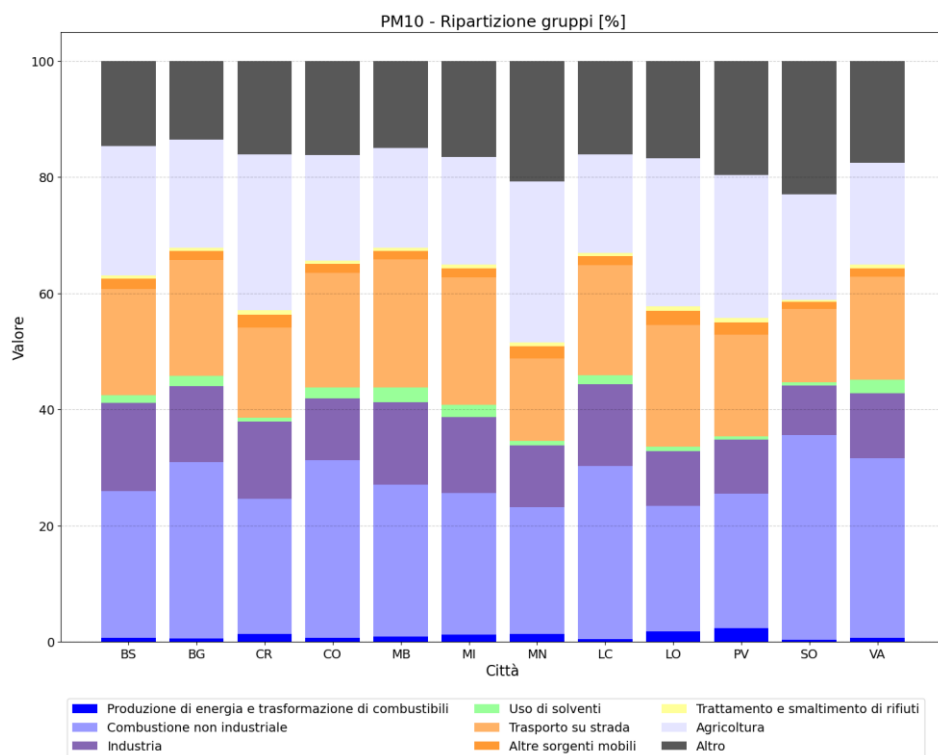
Figura 4.30: Impatto del gruppo S-A "Altro" sulla concentrazione media annuale di PM_{2.5} (µg/m³).

Le Figure 4.31–4.32 riportano la distribuzione dell’impatto dei diversi gruppi emissivi nei capoluoghi della Regione Lombardia. A differenza di quanto osservato per il biossido di azoto, per il particolato atmosferico non emerge un comparto emissivo nettamente predominante: traffico, riscaldamento domestico e agricoltura contribuiscono congiuntamente a oltre il 65% delle concentrazioni medie annuali, senza che uno di essi prevalga in maniera marcata sugli altri.

Nel complesso, la distribuzione degli impatti nei vari capoluoghi risulta relativamente uniforme, evidenziando la natura del particolato atmosferico, ovvero quella di un inquinante meno influenzato dalle emissioni locali dei propri precursori e maggiormente determinato da processi di formazione e trasporto su scala territoriale ampia.

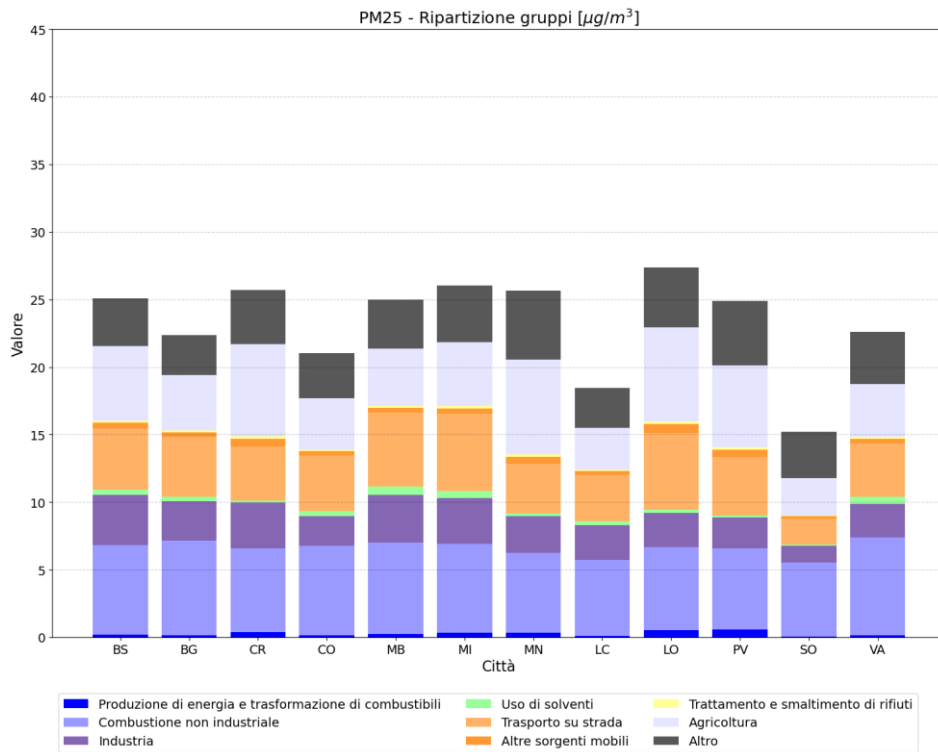


(a)

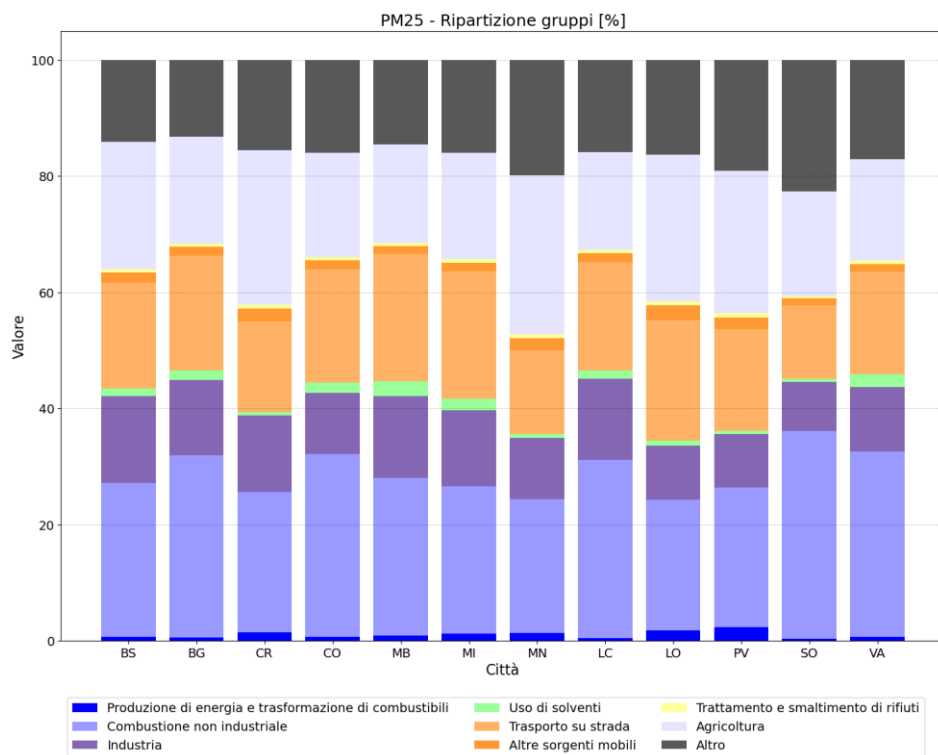


(b)

Figura 4.31: Impatto totale (a) e percentuale (b) dei diversi gruppi S-A nei capoluoghi lombardi sulla concentrazione media di PM₁₀.



(a)



(b)

Figura 4.32: Impatto totale e percentuale dei diversi gruppi S-A nei capoluoghi lombardi sulla concentrazione media di $\text{PM}_{2.5}$.

4.2.1 Focus su Comune di Brescia

Un'analisi della distribuzione spaziale degli impatti dei comparti emissivi è stata realizzata anche per il particolato atmosferico. La Figura 4.33 presenta la distribuzione dell'impatto delle sole sorgenti presenti sul territorio comunale sulla concentrazione media annuale di particolato atmosferico, calcolata nel comune di Brescia. Come si può notare, per il particolato atmosferico la quota di impatto attribuibile alle emissioni comunali è di circa il 16%, con una percentuale del 40% di impatti che deriva da emissioni fuori dalla provincia. Questi risultati mostrano quindi quanto limitata sia la capacità del comune di impattare sulle concentrazioni di particolato con politiche esclusivamente locali, evidenziando come politiche di ampio respiro, che coinvolgono non solo i comuni, ma le provincie vicine, risultano necessarie.

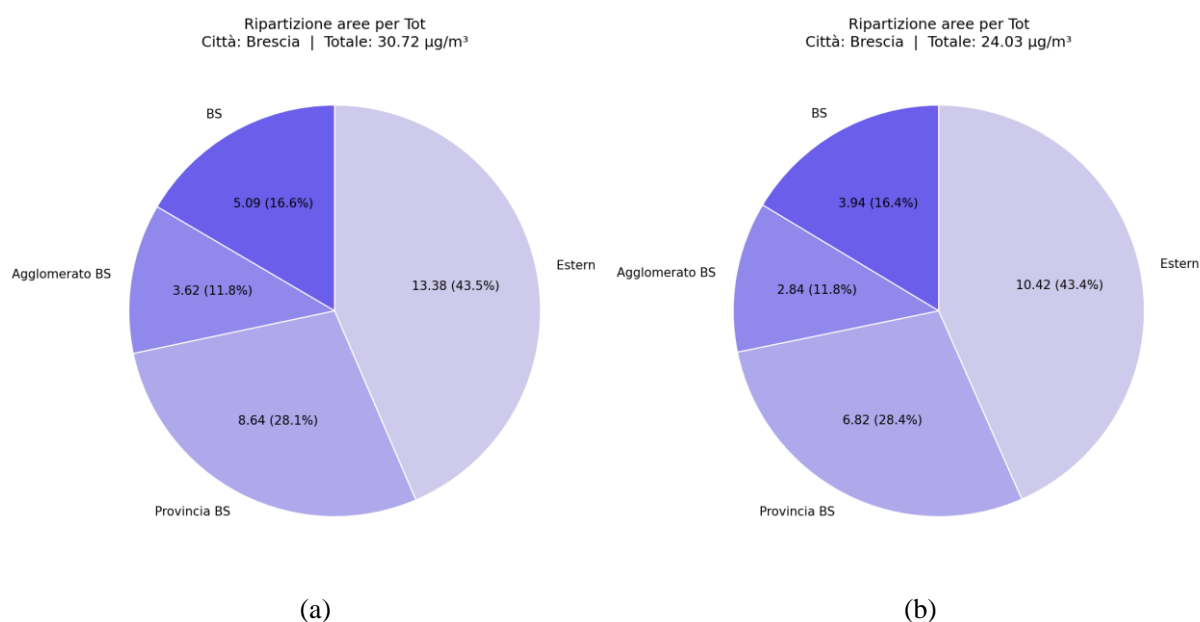
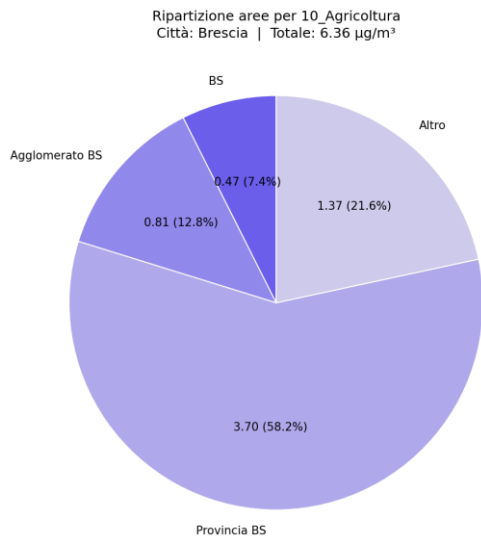
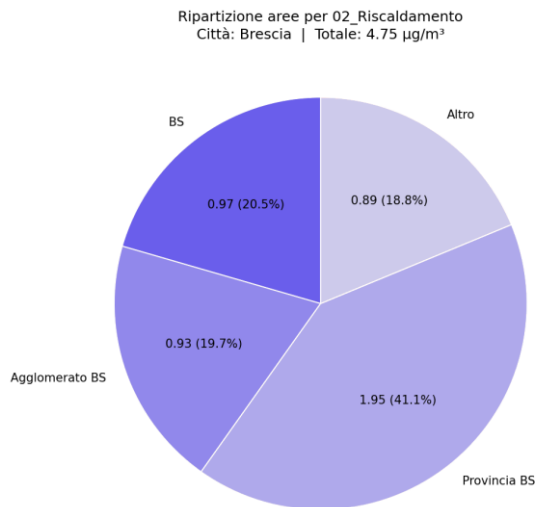


Figura 4.33: Ripartizione degli impatti su particolato atmosferico nel comune di Brescia suddivisi per area (a: PM₁₀, b: PM_{2.5}).

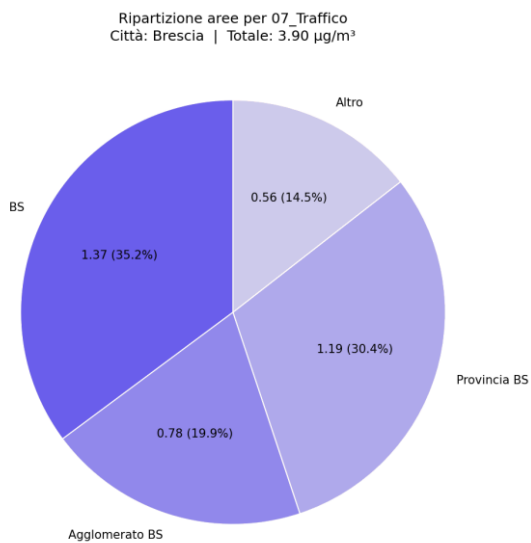
Le Figure 4.34 e 4-35 mostrano la distribuzione degli impatti in termini di concentrazioni medie annuali di PM₁₀ e PM_{2.5} delle emissioni nelle tre aree considerate (e nell'area esterna alla provincia) per i principali gruppi emissivi, che per questi inquinanti comprendono oltre a combustione non industriale, industria e trasporto su strada anche le attività agricole. Queste 4 attività causano infatti circa il 90% delle concentrazioni sul comune per i due inquinanti in esame. Si osserva come il contributo proveniente dalle aree esterne al comune risulti sempre superiore al 60% (PM₁₀: 30 µg/m³; PM_{2.5}: 24 µg/m³).



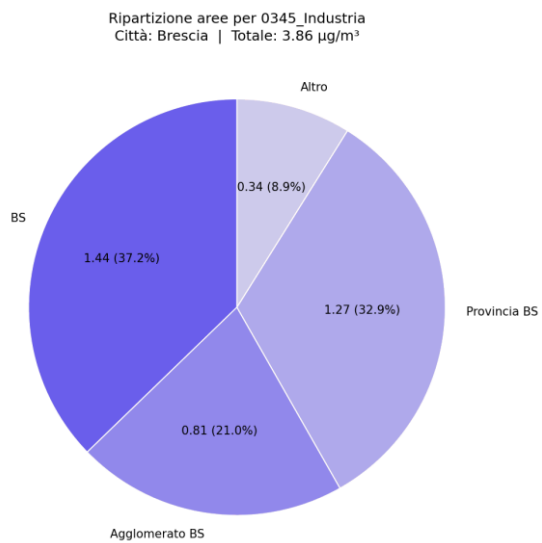
(a)



(b)

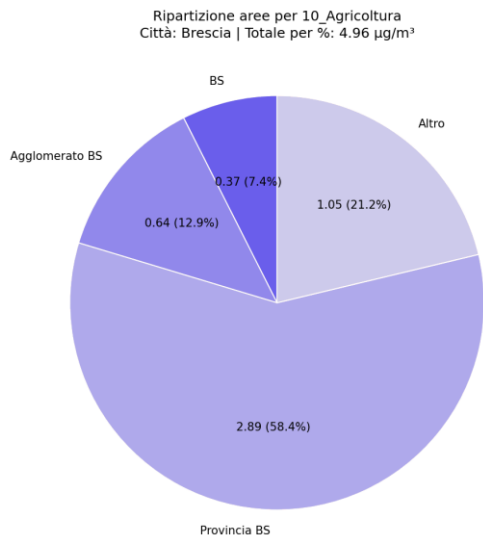


(c)

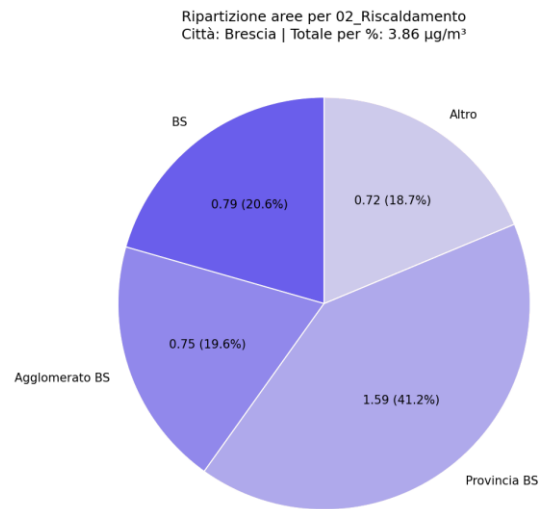


(d)

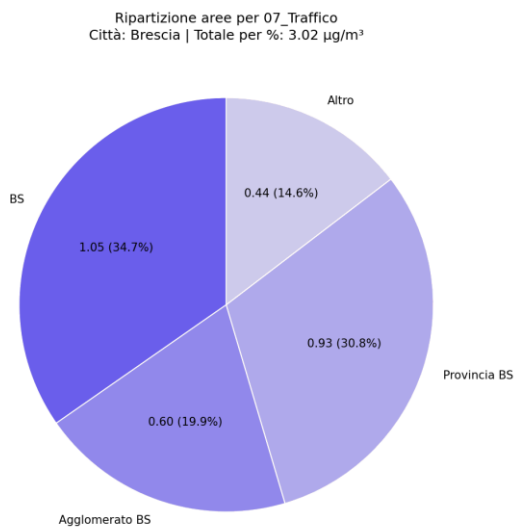
Figura 4.34: Ripartizione in aree degli impatti sul PM_{10} dei diversi gruppi emissivi nel comune di Brescia.



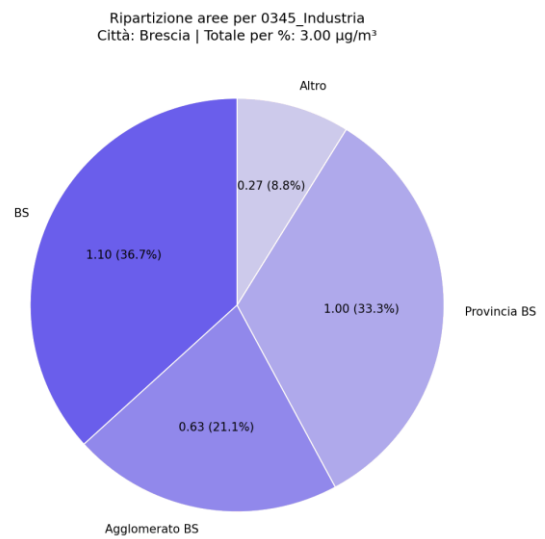
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.35: Ripartizione in aree degli impatti sul PM_{2.5} dei diversi gruppi emissivi nel comune di Brescia.

5 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo quello di approfondire le conoscenze relative alle fonti di inquinamento atmosferico, analizzando le dinamiche attuali e fornendo una base scientifica solida per la definizione di strategie di intervento efficaci e sostenibili. Il progetto si inserisce nel contesto del PAC, uno strumento strategico volto a migliorare la qualità dell'aria e a contrastare i cambiamenti climatici, con l'obiettivo di garantire un ambiente più sano e sostenibile per la comunità, contribuendo al benessere collettivo e al raggiungimento di obiettivi condivisi.

Il presente studio rappresenta un avanzamento significativo rispetto alle analisi precedentemente condotte sul territorio bresciano, in particolare rispetto allo studio conclusosi nel 2019, sia per l'aggiornamento della base dati sia per l'evoluzione metodologica introdotta nella catena modellistica. L'adozione dell'anno 2021 come riferimento per l'intero sistema di simulazione ha permesso di integrare l'ultima versione disponibile dell'inventario emissivo regionale INEMAR e condizioni meteorologiche recenti e rappresentative, garantendo una descrizione aggiornata e coerente del contesto emissivo e atmosferico della Pianura Padana. Dal punto di vista modellistico, l'utilizzo della versione più recente del modello fotochimico CAMx ha consentito una rappresentazione più accurata dei processi di formazione degli inquinanti secondari e un'analisi di source apportionment più robusta e conservativa rispetto agli studi precedenti. Pur mantenendo un approccio concettualmente analogo al lavoro del 2011, la nuova configurazione offre maggiori capacità di tracciamento delle sorgenti e una migliore risoluzione spaziale, elemento fondamentale per la valutazione degli impatti nel comune di Brescia. I risultati delle simulazioni mostrano, per tutti gli inquinanti considerati, una buona coerenza con le misure delle stazioni di monitoraggio, confermando l'affidabilità del sistema modellistico. L'analisi delle concentrazioni medie annuali evidenzia pattern spaziali noti per la Pianura Padana, con valori più elevati nelle aree urbane e industriali e nelle zone soggette a condizioni di stagnazione atmosferica.

L'analisi di source apportionment ha fornito indicazioni di particolare rilevanza per il decisore pubblico. Per il biossido di azoto, il settore del traffico conferma il proprio ruolo predominante nelle aree urbane, pur in presenza di contributi significativi di altri settori emissivi. L'impatto attribuibile alle sole emissioni del comune di Brescia, pur non trascurabile per le componenti maggiormente locali come NO_2 , non è tuttavia predominante: il 38% delle concentrazioni è attribuibile a emissioni interne al comune, mentre una quota altrettanto significativa deriva dalle aree circostanti.

Per il particolato atmosferico (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$) emerge un quadro ancora più marcatamente sovralocale. Il contributo attribuibile alle emissioni del comune rappresenta solo il 16% circa delle concentrazioni annuali, mentre oltre il 40% del particolato deriva da territori esterni alla provincia di Brescia. Tale risultato riflette la natura prevalentemente secondaria del particolato fine e il ruolo centrale delle emissioni di ammoniaca nel processo di formazione degli aerosol inorganici secondari.

Riscaldamento domestico, traffico e agricoltura risultano i comparti maggiormente rilevanti, senza che uno di essi emerga come unico responsabile delle criticità osservate.

Nel complesso, i risultati ottenuti indicano con chiarezza che le politiche esclusivamente locali possono produrre benefici limitati, soprattutto per quanto riguarda il particolato fine, per il quale i processi di formazione e trasporto dominano sugli effetti delle emissioni di prossimità. Per il biossido di azoto, interventi mirati alle sorgenti locali — in particolare sulla mobilità e sul riscaldamento domestico — possono risultare efficaci, ma solo se accompagnati da strategie di scala più ampia, in grado di coinvolgere l'intero territorio provinciale e regionale.

Il quadro modellistico aggiornato fornito da questo studio rappresenta quindi uno strumento operativo per la pianificazione delle politiche di qualità dell'aria, utile a definire interventi strutturali coerenti con la natura dei fenomeni osservati e con la scala territoriale dei processi che governano la formazione degli inquinanti in atmosfera.

6 Bibliografia

- Belis, C. A., Pirovano, G., Villani, M. G., Calori, G., Pepe, N., and Putaud, J. P. (2021) Comparison of source apportionment approaches and analysis of non-linearity in a real case model application. *Geoscientific Model Development*, 14, 4731–4750.
- Chang, J.S., R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell, and C.J. Walcek. (1987) A Three-dimensional Eulerian Acid Deposition Model: Physical Concepts and Formulation. *J. Geophys. Res.*, 92, 14, 681-14, 700.
- Emery, C., Baker, K., Wilson, G., & Yarwood, G. (2024). Comprehensive Air Quality Model with Extensions: Formulation and Evaluation for Ozone and Particulate Matter over the US. *Atmosphere*, 15(10), 1158.
- Emmons, L. K., Walters, S., Hess, P. G., Lamarque, J.-F., Pfister, G.G., Fillmore, D., Granier, C., Guenther, A., Kinnison, D., Laepple, T., Orlando, J., Tie, X., Tyndall, G., Wiedinmyer, C., Baughcum, S., L., and Kloster, S. (2010) Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4), *Geosci. Model Dev.*, 3, 43-67, doi:10.5194/gmd-3-43-2010.
- ENVIRON (2014) User's Guide: Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) – Version 6.1. (www.camx.com)
- European Environment Agency (2016) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016, tech. report 21/2016.
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., and Geron, C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181–3210.
- Hertel O., R. Berkowics, J. Christensen and O. Hov. (1993) Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models. *Atmos. Env.*, 27, 2591-2611.
- Marongiu A., Fossati G., Moretti M. (2026) Aggiornamento inventario delle emission INEMAR 2023 - Dati dell'inventario regionale delle emissioni della Lombardia, principali risultati e serie storica delle emissioni con approfondimenti su emissioni da riscaldamento a legna e traffico su strada. Report ARPA Lombardia (available from: https://www.arpalombardia.it/media/sxido4he/report_inventario_2023.pdf).
- Murray, L. T., Leibensperger, E. M., Orbe, C., Mickley, L. J., and Sulprizio, M. (2021) GCAP 2.0: a global 3-D chemical-transport model framework for past, present, and future climate scenarios. *Geoscientific Model Development*, 14(9), 5789–5823.
- Nenes, A, C. Pilinis, and S.N. Pandis. (1999) Continued Development and Testing of a New Thermodynamic Aerosol Module for Urban and Regional Air Quality Models. *Atmos. Environ.* 33, 1553-1560.

- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., GoChis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., DiMego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., Liu, Z., Snyder, C., Chen, F., Barlage, M. J., Yu, W., Duda, M. G. (2017) The Weather Research and Forecasting (WRF) Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737.
- Rasch, P. J., Mahowald, N. M., and Eaton, B. E. (1997) Representations of transport, convection, and the hydrologic cycle in chemical transport models: Implications for the modeling of short-lived and soluble species, *J. Geophys. Res.*, 102, 28127–28138.
- Skamarock, W. C. and Klemp, J. B. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *J. Comput. Phys.*, 227, 3465–3485.
- Strader, R., C. Gurciullo, S.N. Pandis, N. Kumar, and F.W. Lurmann. (1998) Development of gas-phase chemistry, secondary organic aerosol and aqueous-phase chemistry modules for PM modeling. Final report for CRC Project A21-1 prepared for the Coordinating Research Council, Atlanta, GA by Sonoma Technology, Inc., Petaluma, CA, STI-97510-1822-FR, October.
- Yarwood, G., R.E. Morris, G.M. Wilson. (2004) Particulate Matter Source Apportionment Technology (PSAT) in the CAMx Photochemical Grid Model. Proceedings of the 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Application. Springer Verlag (Available from http://camx.com/publ/pdfs/yarwood_itm_paper.pdf).
- Yarwood. G., S. Rao, M. Yocke, and G.Z. Whitten. (2005b) Updates to the Carbon Bond chemical mechanism: CB05. Final Report prepared for US EPA. Available at http://www.camx.com/publ/pdfs/CB05_Final_Report_120805.pdf.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, (2002) Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2088–2097.