



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

**G. Finzi, C. Carnevale,
E. De Angelis, A. Pederzoli,
E. Turrini, M. Volta**

Dipartimento Ingegneria
Meccanica e Industriale (DIMI)
Sistemi di Controllo

VALUTAZIONE INTEGRATA DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

NEL BACINO PADANO
E NEL TERRITORIO
BRESCIANO

Parte prima

VALUTAZIONE
DELL'INQUINAMENTO
PRIMARIO E
SECONDARIO IN

ATMO SFERA

A2A e l'Università degli Studi di Brescia hanno siglato nel 2015 una Convenzione Quadro per la collaborazione scientifica finalizzata allo studio della salute e alla promozione del benessere delle persone e dell'ambiente, inquadrata nel contesto del progetto strategico di Ateneo Health & Wealth, allo scopo di incentivare la convergenza di competenze multidisciplinari sulle questioni ambiente e salute.

Nell'ambito di tale convenzione è stato concordato lo studio (della durata di due anni) oggetto di queste relazioni al fine di valutare in modo integrato l'inquinamento atmosferico e il suo impatto sulla salute nel bacino padano con un focus particolare sul territorio bresciano.

L'inquinamento atmosferico è infatti uno dei maggiori problemi ambientali in queste aree, dove la cattiva qualità dell'aria è prodotta da avverse condizioni meteorologiche e da processi di rilascio, formazione, trasporto ed accumulo degli inquinanti. Ne deriva quindi la necessità di considerare tutte le fonti presenti sul nord Italia (bacino padano), per poter successivamente caratterizzare ambiti specifici in modo completo e preciso.

L'obiettivo del lavoro è stato la messa a punto di una metodologia integrata in grado di:

1. valutare sul territorio il peso delle emissioni atmosferiche di inquinanti quali PM₁₀, NO_x e NH₃, prendendo in considerazione tutte le fonti presenti (traffico veicolare, industrie, attività agricole e zootecniche, impianti di produzione di energia, fonti domestiche, processi di trattamento dei rifiuti, ecc.);
2. quantificare il loro coinvolgimento nei processi di formazione di inquinanti secondari (O₃, PM₁₀, NO₂);
3. identificare emissioni e ricadute sul territorio dei principali microinquinanti quali PCD-D/F, PCB e PCB-DL;
4. valutare l'efficacia di azioni di risanamento della qualità dell'aria, in particolare volte al contenimento delle concentrazioni medie di PM₁₀;
5. inquadrare dal punto di vista sanitario i contaminanti considerati individuando in particolare i parametri utili alla stima del rischio di esposizione della popolazione.

Il lavoro consta di tre parti. La prima è stata dedicata alla analisi della attuale situazione (punti 1-3), la seconda alla identificazione e descrizione di scenari futuri (punto 4) e la terza alla valutazione degli effetti sulla salute umana (punto 5).

Premessa	3
Sommario	5
1 Introduzione	7
2 Catena modellistica utilizzata e setup della simulazione di bacino	8
2.1 Il modello CAMx	9
2.1.1 Modulo OSAT (Ozone Source Apportionment Technology)	10
2.1.2 Modulo PSAT (Particulate Source Apportionment Technology)	11
2.2 Il modello meteorologico WRF	12
2.3 Pre-processing delle emissioni	12
3 Simulazione modellistica della concentrazione di macroinquinanti - Validazione	14
3.1 Meteorologia	14
3.2 Emissioni	15
3.3 Condizioni al contorno	23
3.4 Validazione delle simulazioni	24
3.4.1 Ozono – O ₃	25
3.4.2 Biossido di Azoto - NO ₂	28
3.4.3 Particolato Atmosferico - PM10	30
4 Simulazione Modellistica della concentrazione di macroinquinanti – Analisi di Source Apportionment	31
4.1 Ozono – O ₃	32
4.2 Biossido di Azoto - NO ₂	36
4.3 Particolato Atmosferico - PM10	42
5 Simulazione modellistica della concentrazione di microinquinanti in atmosfera	47
5.1 Inventario Emissivo	47
5.2 Risultati della simulazione modellistica	53
5.2.1 Diossine e furani (PCDD/F)	53
5.2.2 PCB Dioxin Like (PCB-DL)	55
5.2.3 PCB Totali (PCB-TOT)	57
5.3 Integrazione con altre fonti di informazione	59
6 Conclusioni	61
7 Bibliografia	64

1 Introduzione

La formazione di inquinanti in atmosfera quali Ozono, Polveri sottili e Biossido di azoto (O_3 , PM_{10} , NO_2) è frutto di complessi fenomeni meteorologici e chimici che determinano il trasporto delle sostanze emesse dalle diverse sorgenti e la loro trasformazione in ulteriori inquinanti secondari con diversa caratterizzazione fisica e chimica. I processi in gioco sono significativamente non lineari e richiedono una modellizzazione alquanto complessa per la necessità di includere reazioni chimiche, trasformazioni fisiche e condizioni meteorologiche che interessano un dominio spaziale 3D al trascorrere del tempo.

L'utilizzo di un modello foto-chimico di trasporto ha consentito la simulazione e la valutazione sul bacino padano e su un'area di maggior dettaglio del territorio bresciano del peso delle emissioni atmosferiche di inquinanti primari, prendendo in considerazione le diverse fonti emissive (traffico veicolare, industrie, attività agricole e zootecniche, impianti di produzione di energia, fonti domestiche, processi di trattamento dei rifiuti, ecc.). E' stato dunque possibile quantificare il loro coinvolgimento nei processi di formazione di inquinanti secondari quali Ozono, Polveri sottili e Biossido di azoto (O_3 , PM_{10} , NO_2).

Analoghe simulazioni modellistiche hanno consentito di approfondire le tematiche relative ai microinquinanti, in ragione delle problematiche caratteristiche del territorio bresciano.

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.

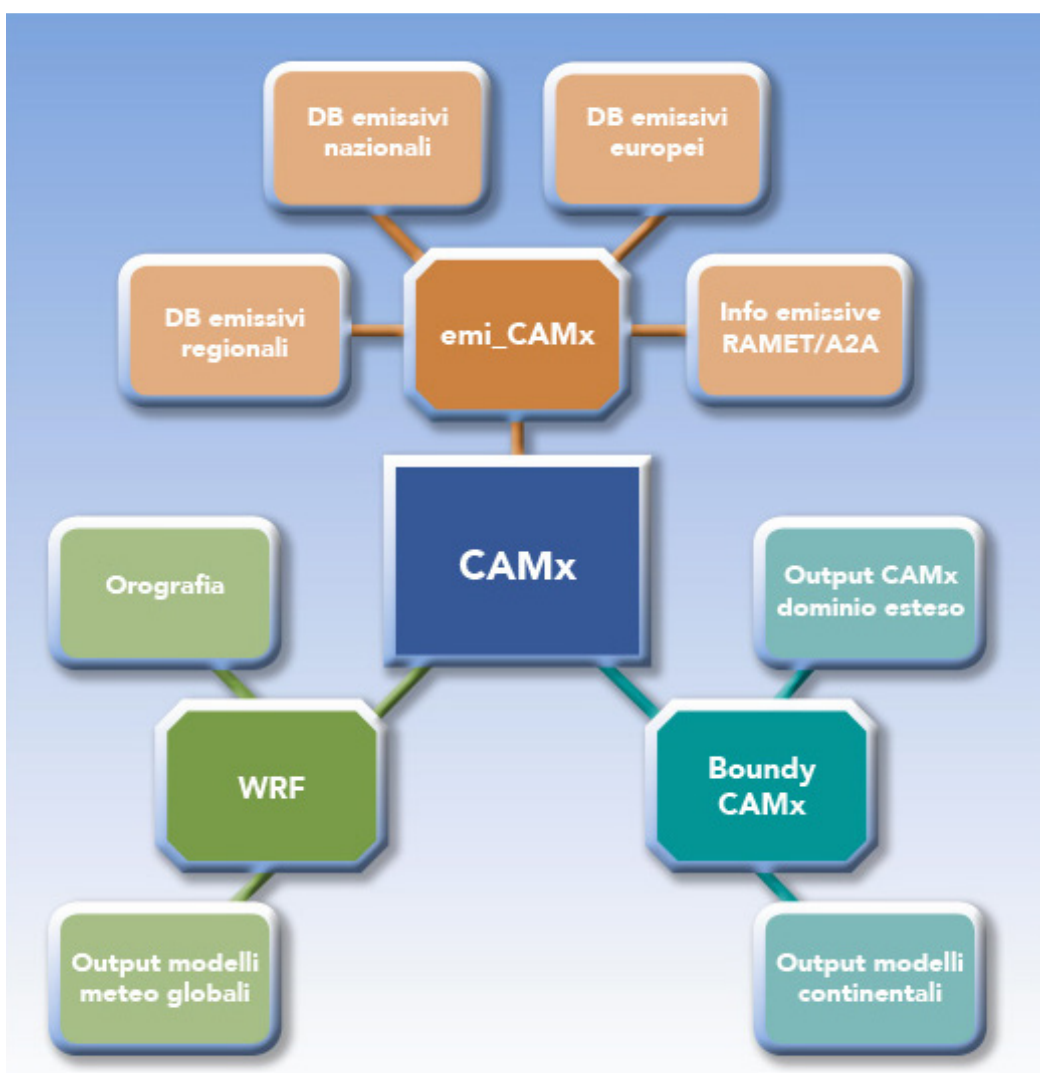


Figura 2.1: Catena modellistica utilizzata per la simulazione.

Il dominio di simulazione considerato nella prima fase del lavoro ("Bacino Padano") si estende su un'area di 540x360 km² con 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 parte del dominio ("Area Brescia") avente un'estensione di 108x132 km² 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.

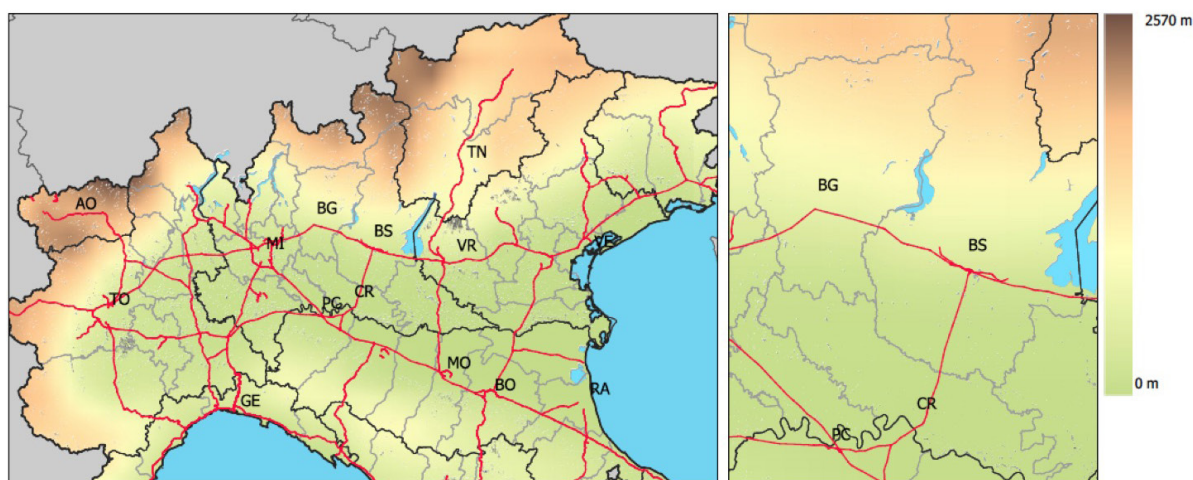


Figura 2.2: Domini di simulazione considerati nello studio (sx: "Bacino Padano", dx: "Area Brescia").

2.1 Il modello CAM_x

Il modello open source CAM_x, il cui codice sorgente è scaricabile dal sito <http://www.camx.com>, è un modello euleriano di chimica e trasporto adatto alla simulazione di inquinanti primari e secondari a multi-scala. In particolare, il modello è in grado di eseguire simulazioni su tre tipi di proiezioni cartografiche cartesiane: UTM (utilizzata in questo lavoro), stereografica polare, e lambertiana conica conforme. La struttura della griglia verticale è definita separatamente, in modo che le altezze delle interfacce dei livelli possano essere specificate in funzione di spazio e di tempo. Questa flessibilità nella definizione della struttura verticale e orizzontale permette di adattare il sistema a diversi modelli meteorologici (WRF, in questo caso).

CAM_x consente l'utilizzo della tecnica di nesting (griglie innestate) di tipo one-way e two-ways, e permette il trattamento di emissioni areali e puntuali. Consente inoltre il trattamento semplificato di queste ultime mediante l'utilizzo di un modulo lagrangiano.

Dal punto di vista chimico, CAM_x utilizza per la fase gassosa il meccanismo Carbon Bond CB05 (Yarwood et al., 2005b) per un totale di 156 reazioni e 51 specie chimiche (38 gas, 13 radicali), associato al risolutore chimico EBI (Euler Backward method, Hertel et al. 1993).

La chimica e fisica del particolato in CAM_x deriva dalla trattazione implementata nel modello RADM (Regional Acid Deposition Model) da cui prende il nome il modulo in CAM_x per la trattazione della chimica in fase acquosa (Chang et al. 1987). La partizione tra gas condensabili organici in aerosol secondari organici viene gestita dal modulo SOAP (Strader et al, 1998) mentre la partizione di costituenti inorganici (solfati, nitrati, ammonio) tra fase gassosa e particellare utilizza il modulo termodinamico ISORROPIA (Nenes et al. 1999). Il modello ipotizza che tutte le specie secondarie (solfato, nitrato, ammonio, organico secondario) e le particelle carboniose abbiano solo frazione fine (inferiore a 2,5 μm). I tassi di fotolisi a cielo sereno (privo di nubi e precipitazione) vengono calcolati dal modello TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible Radiation Model) adattato per CAM_x e distribuito con il pacchetto del modello. Per tale calcolo CAM_x richiede in ingresso i dati di albedo e concentrazione di

ozono integrato verticalmente. I tassi di fotolisi sono ridotti al di sotto delle nuvole a causa dell'estinzione dei raggi solari ed incrementati al di sopra le nuvole a causa della riflessione degli stessi.

Dal punto di vista della modellizzazione dei fenomeni che coinvolgono i principali inquinanti gassosi e in fase aerosol, il modello si presenta in linea con altri modelli ad elevato dettaglio presentati in letteratura; il punto di forza del sistema CAMx è la possibilità di valutare il contributo di diverse sorgenti emmissive alle concentrazioni di particolato atmosferico, biossido di azoto e ozono. Nello specifico, il modello implementa gli algoritmi di Source Apportionment PSAT/OSAT (Particulate and Ozone Source Apportionment Technology (Yarwood et al., 2004)), che consente di distinguere e quantificare il contributo dei diversi settori e aree emmissive alle concentrazioni di PM simulate.

Dal punto di vista implementativo, il codice sorgente del modello e dei suoi pre-processor è scritto in linguaggio Fortran90 e offre l'opportunità agli utenti di utilizzare il calcolo parallelo attraverso la distribuzione delle operazioni di calcolo in più core per computer con memoria condivisa (parallel processing - OpenMP) al fine di ottimizzare le risorse di calcolo e ridurre i tempi di simulazione.

2.1.1 Modulo OSAT (Ozone Source Apportionment Technology)

Tradizionalmente, lo sviluppo di una strategia di controllo per ozono (O_3) e biossido di azoto (NO_2) comporta la simulazione di molti scenari. Il modulo di Source Apportionment per l'ozono del modello CAMx (OSAT – Ozone Source Apportionment Technology) fornisce un metodo per valutare, in un'unica esecuzione del modello, i contributi alle concentrazioni di inquinante delle diverse sorgenti emmissive, solitamente raggruppate in un numero limitato di gruppi, ed aree del dominio. L'esecuzione del modulo prevede quindi una fase preliminare che consiste nella definizione da parte dell'utente dei gruppi emissivi in cui raggruppare le diverse sorgenti e delle aree in cui suddividere il dominio.

Il modulo si basa sull'utilizzo di diversi traccianti per monitorare l'andamento delle emissioni dei precursori dell'ozono (VOC e NO_x) e la formazione di ozono e NO_2 originata da queste emissioni nelle diverse celle del dominio di indagine. Il modulo utilizza i traccianti per valutare gli effetti delle reazioni chimiche, del trasporto, della diffusione, delle emissioni e della deposizione all'interno di CAMx. Condizioni al contorno e condizioni iniziali sono sempre monitorate come gruppi ad hoc. La metodologia progettata è mass-conservative, ovvero la concentrazione totale di O_3 e NO_2 calcolata ad ogni istante di tempo e in ogni cella del dominio viene assegnata ad una ben precisa coppia gruppo emissivo/area.

2.1.2 Modulo PSAT (Particulate Source Apportionment Technology)

La varietà e complessità dei fenomeni chimico-fisici che portano alla formazione, all'accumulo e alla rimozione del particolato in atmosfera, nonché la differente natura e provenienza delle diverse specie chimiche che compongono gli aerosol rendono particolarmente complessa la definizione di opportune strategie di controllo emissivo per il PM. Il modulo PSAT è stato sviluppato per il modello CAMx con l'obiettivo di estendere al particolato atmosferico la metodologia di Source Apportionment già sviluppata per ozono e ossidi di azoto. Si può notare come il Source Apportionment per la sola frazione primaria del PM è relativamente semplice da ottenere modellisticamente, poiché le relazioni tra fonte e recettore sono essenzialmente lineari. L'utilizzo diffuso di modelli stazionari gaussiani e di modelli lagrangiani per modellizzare l'inquinamento del particolato primario ad opera di fonti specifiche costituisce di fatto una forma diretta di Source Apportionment. Gli approcci gaussiano e lagrangiano sono basati sull'ipotesi che emissioni da fonti distinte di PM primario non interagiscano in atmosfera: questa assunzione non può però essere estesa alla frazione secondaria (che comprende ad esempio solfati, nitrati, ammonio e aerosol organici secondari), che rappresentano in alcune aree una frazione molto importante (anche oltre la metà) del PM in atmosfera. I modelli euleriani a griglia sono più adatti alla modellizzazione degli inquinanti secondari perché tengono in considerazione le interazioni chimiche tra le diverse fonti, ma non forniscono normalmente informazioni sul Source Apportionment poiché l'impatto di tutte le fonti viene combinato con relazioni non lineari nella concentrazione totale degli inquinanti. PSAT è stato sviluppato per aggiungere al vantaggio di utilizzare un modello a griglia per descrivere la chimica della formazione secondaria del PM quello di fornire anche informazioni riguardanti il Source Apportionment. La formulazione e l'implementazione di questo modulo ricalcano le idee alla base di OSAT (2.1.1), associando tuttavia i traccianti alle singole specie chimiche che compongono il particolato atmosferico, tenendo in considerazione i legami chimici che coinvolgono alcune di loro (ex: nitrati, solfati, ammonio). In particolare, PSAT è progettato per eseguire il Source Apportionment delle specie seguenti che compongono il particolato:

- Solfato SO_4 ;
- Nitrato di particolato NO_3 ;
- Ammonio NH_4 ;
- Aerosol organici secondari SOA;
- Sei categorie di particolato primario:
 - Carbonio elementare CE;
 - Aerosol organico primario POA;
 - Crostali fini FCRS;
 - Altri particolati fini FPRM;
 - Crostali "coarse" CCRS;
 - Altri particolati "coarse" CPRM.

In generale, è sufficiente un singolo tracciante per le specie primarie, mentre le specie secondarie ne richiedono diversi per monitorare la relazione tra i precursori gassosi e il PM risultante. L' NO_3 e gli organici secondari sono le specie più complesse per il Source Apportionment, poiché i gas precursori emessi (NO_x e VOC) intervengono anche nel ciclo di formazione e rimozione di ozono e ossidi di azoto.

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; è disponibile gratuitamente ed è efficiente per il calcolo parallelo. Il modello si presta ad una vasta gamma di applicazioni a diversa scala, dai fenomeni di micro-scala (risoluzione di qualche metro) fino a quelli sinottici (risoluzione dell'ordine di migliaia di chilometri). Si tratta di un modello fluidodinamico completamente comprimibile e non idrostatico in cui vengono conservate le variabili scalari e sono applicati gli schemi di integrazione di Runge-Kutta del terzo ordine (Wicker and Skamarock, 2002). La griglia utilizzata è del tipo Arakawa C-grid, in cui gli scalari e i vettori delle velocità sono calcolati in punti di griglia sfalsati e le coordinate verticali sono coordinate di massa (coordinate η). Queste seguono il profilo del terreno e sono definite in funzione della pressione idrostatica. Contiene inoltre schemi di parametrizzazione per tenere conto delle scale spaziali non risolte: formazione delle nubi e della precipitazione, convezione a piccola scala, radiazione, diffusione turbolenta, strato atmosferico superficiale, suolo e interazione suolo-atmosfera.

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. In particolare poi WRF è in grado di simulare gli eventi atmosferici anche ad alta risoluzione e su orografia complessa come quella del bacino Padano.

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. E' 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).

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 parametri meteorologici che CAMx richiede in ingresso, calcolati tramite il modello WRF, sono: velocità orizzontale del vento, temperatura al suolo, pressione, umidità specifica, diffusività verticale, contenuto di acqua e ghiaccio nelle nubi, precipitazione e spessore ottico dell'atmosfera dovuto alle nubi ed alla precipitazione. Tutte le grandezze devono essere fornite per le tre dimensioni spaziali e con cadenza temporale oraria. I campi meteorologici per CAMx sono ricavati da quelli prodotti dal modello WRF per tutto l'anno 2011 attraverso il *nesting* di 3 domini di simulazione. Il primo dominio, avente una risoluzione di 36 km² ed estensione continentale, è stato utilizzato per la definizione delle condizioni al contorno del dominio "Bacino Padano". Analogamente, il dominio di bacino viene utilizzato per ricavare le informazioni al contorno per il terzo dominio a risoluzione più fine che include la regione Lombardia, simulato con una risoluzione di 1x1 km² (Figura 3.1). L'anno 2011 è stato selezionato a causa della sua limitata piovosità rispetto agli anni successivi, in modo da consentire l'analisi in condizioni di meteorologia da una parte il più simile possibile alle condizioni medie dell'area in esame, dall'altra particolarmente favorevole alla formazione e accumulo di inquinanti in atmosfera.

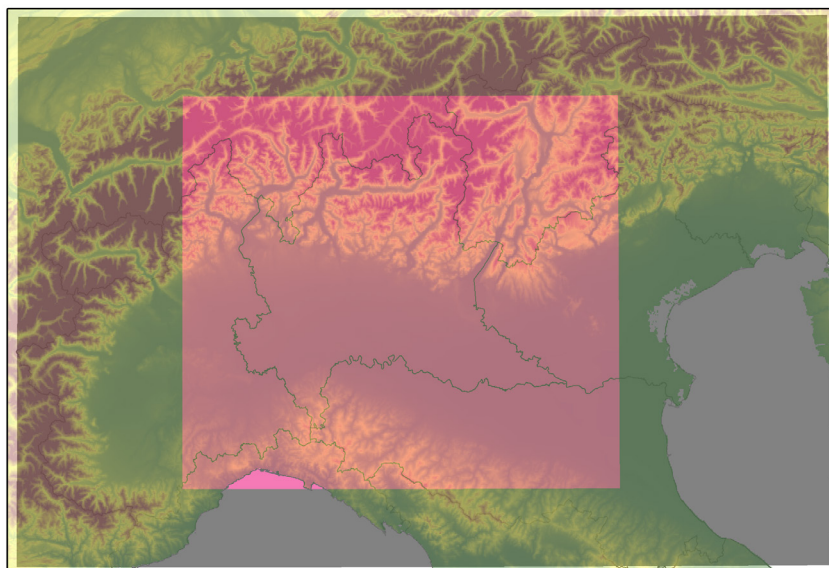


Figura 3.1: Dominio di bacino e dominio lombardo per la simulazione meteorologica.

3.2 Emissioni

Il data-set emissivo è costituito dalle emissioni annuali di VOC, CO, NO_x, NH₃, SO₂, PM10 e PM2.5 per ogni cella dei due domini di 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 presenti nell'inventario annuale INEMAR a livello comunale e le emissioni EMEP disponibili su grigliato a 0.1° x 0.1 ° raggruppate per macrosettore alla stessa risoluzione delle due simulazioni eseguite con il modello CAMx. Entrambi gli inventari sono relativi all'anno 2012 (il più recente aggiornamento disponibile all'inizio del progetto).

Le tabelle 3.1 e 3.2 presentano i dati di emissione annuali per i domini di indagine, suddivisi per macrosettore CORINAIR (European Environment Agency, 2016). La ripartizione percentuale delle emissioni per inquinante mostra come, per gli ossidi di azoto, trasporto e sorgenti mobili in generale siano responsabili per più del 60% delle emissioni complessive sui domini, mentre risulta più limitato l'impatto delle emissioni di NO_x da combustione (industriale e non), che si attesta attorno al 20% (Figure 3.3 - 3.4). Per quanto riguarda i composti organici (Figure 3.4 - 3.5), si può evidenziare come quasi il 30% di emissioni sia dovuto al ciclo di utilizzo e smaltimento dei solventi. In questo caso, si notano sostanziali differenze tra i due domini nella percentuale di emissioni dovute all'agricoltura (18% per il dominio di Bacino e 35% per il dominio di zoom) e alle sorgenti naturali (25% per il dominio di Bacino e 18% per il dominio di zoom) a sottolineare l'importanza dell'industria agricola nell'area sud della provincia di Brescia e delle province limitrofe. Una piccola differenza (2% circa su PM10 e VOC) si può riscontrare anche nella percentuale di emissioni che provengono da combustione non industriale, che include le emissioni da riscaldamento domestico, a testimonianza dell'efficienza del sistema di trasferimento di calore/energia che serve una parte consistente del comune di Brescia e delle zone limitrofe (teleriscaldamento). Per entrambi i domini, l'agricoltura è invece il comparto dominante per l'ammoniaca (Figure 3.6 - 3.7), pesando per almeno il 97% delle emissioni complessive. Si può notare a questo proposito come il ruolo dell'ammoniaca sia fondamentale nella formazione di particolato secondario, essendo questo composto la base per la formazione di nitrato e solfato di ammonio. Infine per il particolato atmosferico (Figure 3.8 - 3.9) sono molto evidenti i contributi della combustione non industriale (dovuta tra l'altro al riscaldamento domestico) e quella del traffico veicolare, che insieme causano il 65% delle emissioni complessive di PM10.

Tabella 3.1: Emissioni totali annuali (ton/anno) sul dominio di bacino per macrosettore, anno 2012.

Macrosettore CORINAIR	VOC	NH₃	NO_x	PM10	PM_{2.5}	SO₂
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	3015	59	33595	942	826	9641
Combustione non industriale	73197	1090	46267	44064	43248	622
Combustione nell'industria	8233	778	72022	4934	3435	29730
Processi produttivi	40056	1212	12950	4425	2408	16440
Estrazione e distribuzione di combustibili	28187	0	358	82	74	1257
Uso di solventi	232831	103	680	1072	853	13
Trasporto su strada	68706	4831	260829	21930	16479	644
Altre sorgenti mobili	15329	15	65095	6297	5004	4446
Trattamento e smaltimento di rifiuti	3376	2708	6348	1153	1057	1185
Agricoltura	153400	304835	6513	7521	2957	222
Altre sorgenti e assorbimenti	205606	42	12798	10142	6173	234
TOTALE	831936	315673	517455	102562	82514	64434

Tabella 3.2: Emissioni totali annuali (ton/anno) sul dominio zoom di Brescia per macrosettore, anno 2012.

Macrosettore CORINAIR	VOC	NH₃	NO_x	PM10	PM_{2.5}	SO₂
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	739	1	3275	88	83	429
Combustione non industriale	7258	121	5831	5155	5074	410
Combustione nell'industria	1478	198	10341	443	362	5044
Processi produttivi	5606	26	1875	667	310	1502
Estrazione e distribuzione di combustibili	2969	0	0	0	0	0
Uso di solventi	33738	5	30	311	277	1
Trasporto su strada	7483	605	34353	2569	1933	72
Altre sorgenti mobili	1006	2	8364	504	497	79
Trattamento e smaltimento di rifiuti	728	124	1815	18	17	438
Agricoltura	46615	80773	383	745	299	5
Altre sorgenti e assorbimenti	23555	6	891	980	694	8
TOTALE	131175	81861	67158	11480	9546	7988

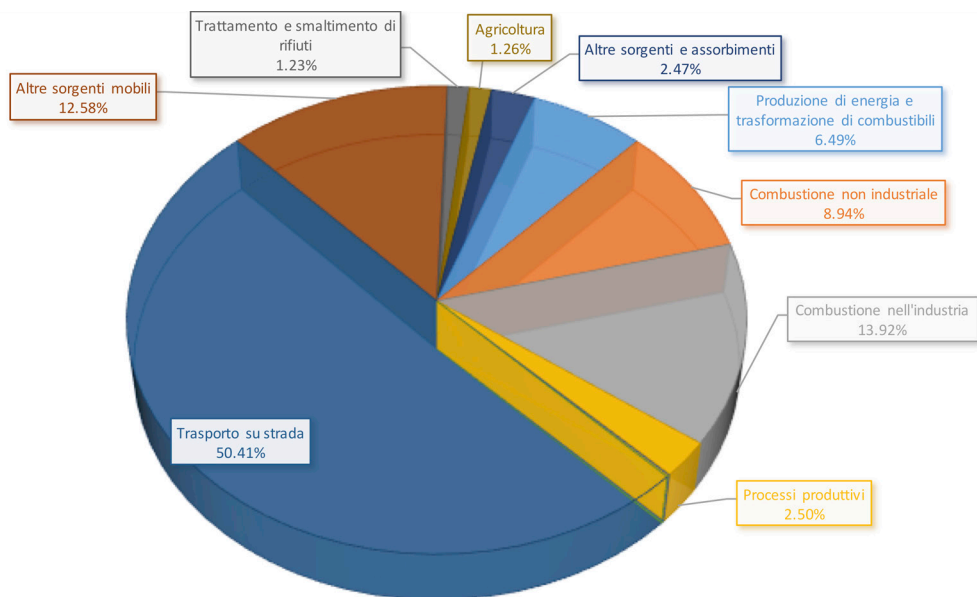


Figura 3.2: Ripartizione percentuale delle emissioni di NO_x in macrosettori sul dominio di bacino.

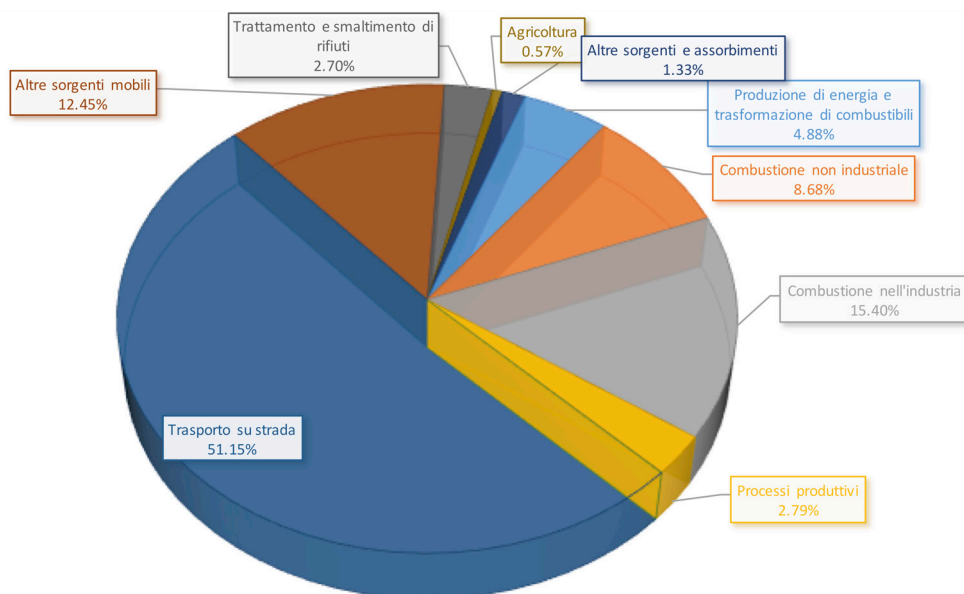


Figura 3.3: Ripartizione percentuale delle emissioni di NO_x in macrosettori per lo zoom sul dominio di Brescia.

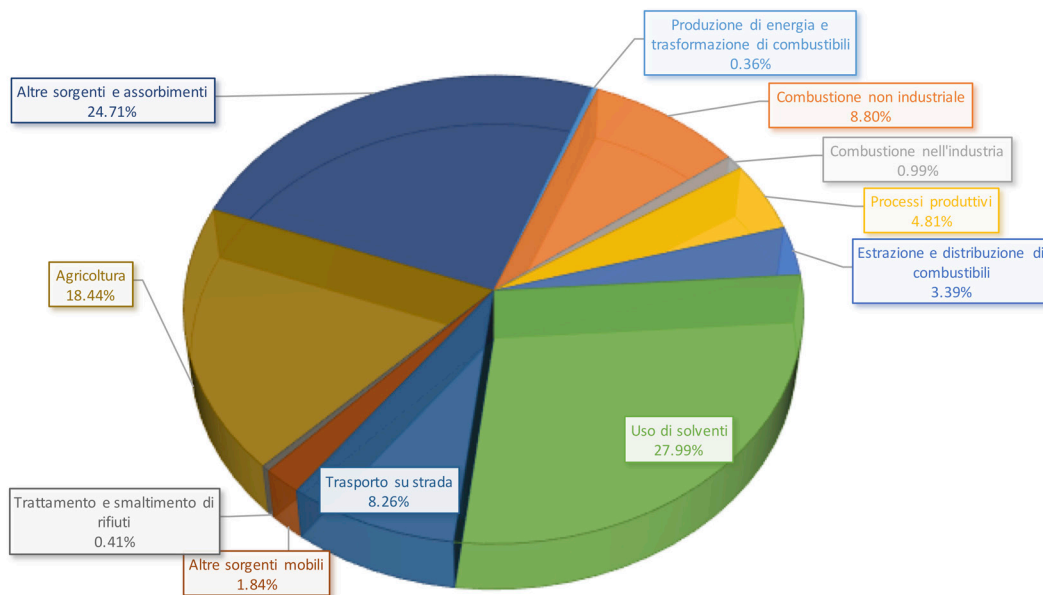


Figura 3.4: Ripartizione percentuale delle emissioni di VOC in macrosettori sul dominio di bacino.

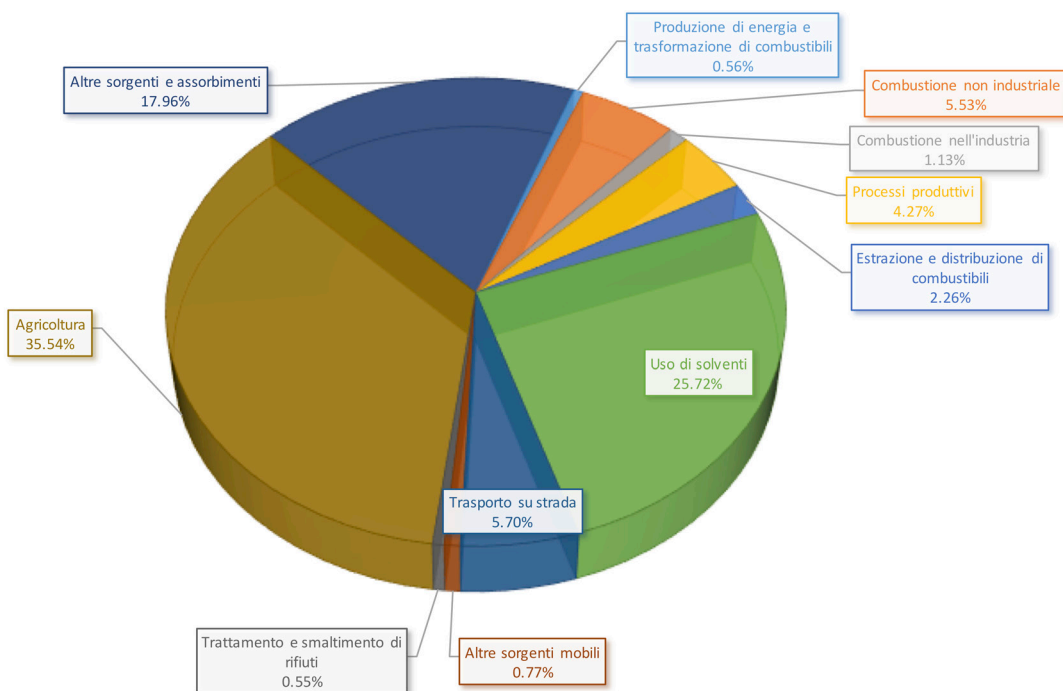


Figura 3.5: Ripartizione percentuale delle emissioni di VOC in macrosettori per lo zoom sul dominio di Brescia.

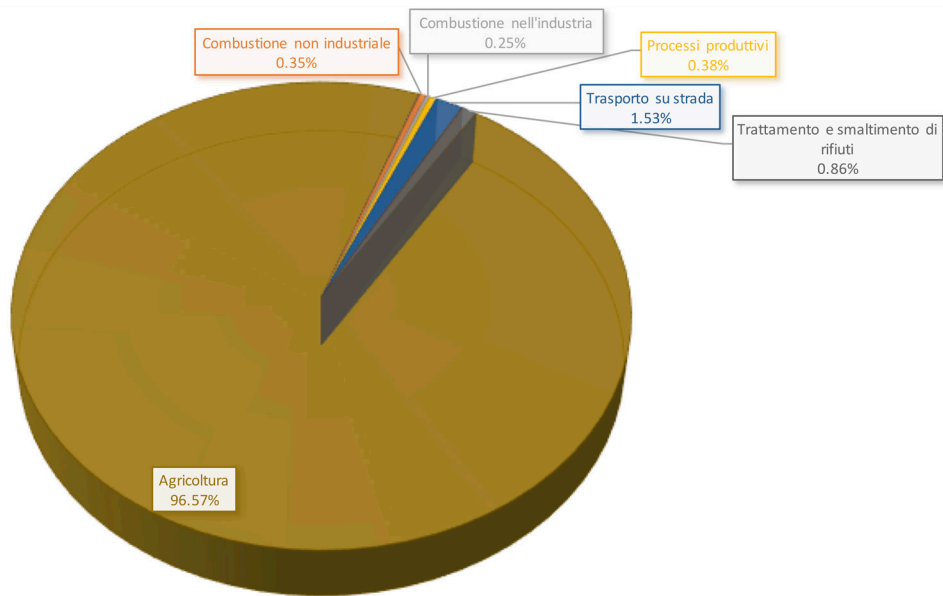


Figura 3.6: Ripartizione percentuale delle emissioni di NH₃ in macrosettori sul dominio di bacino.

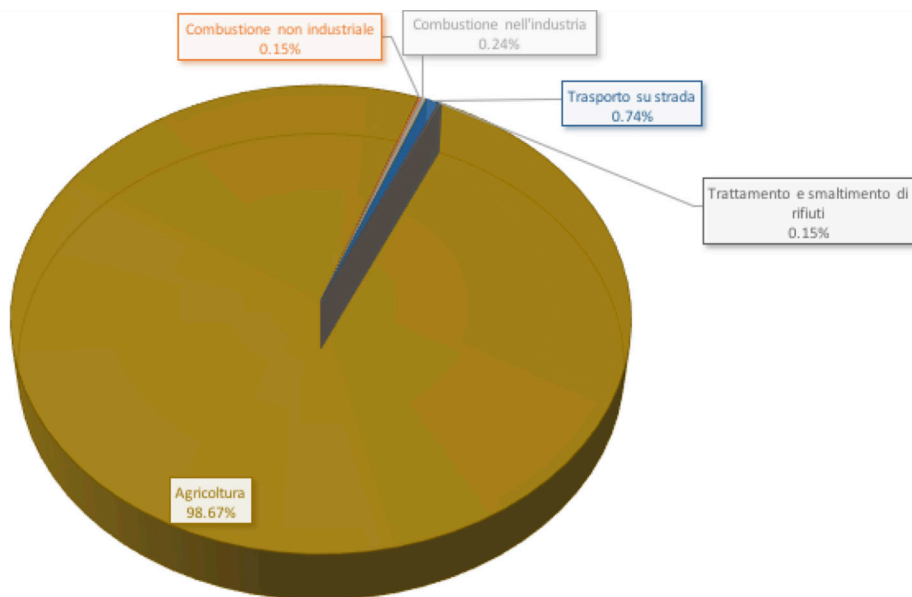


Figura 3.7: Ripartizione percentuale delle emissioni di NH₃ in macrosettori per lo zoom sul dominio di Brescia

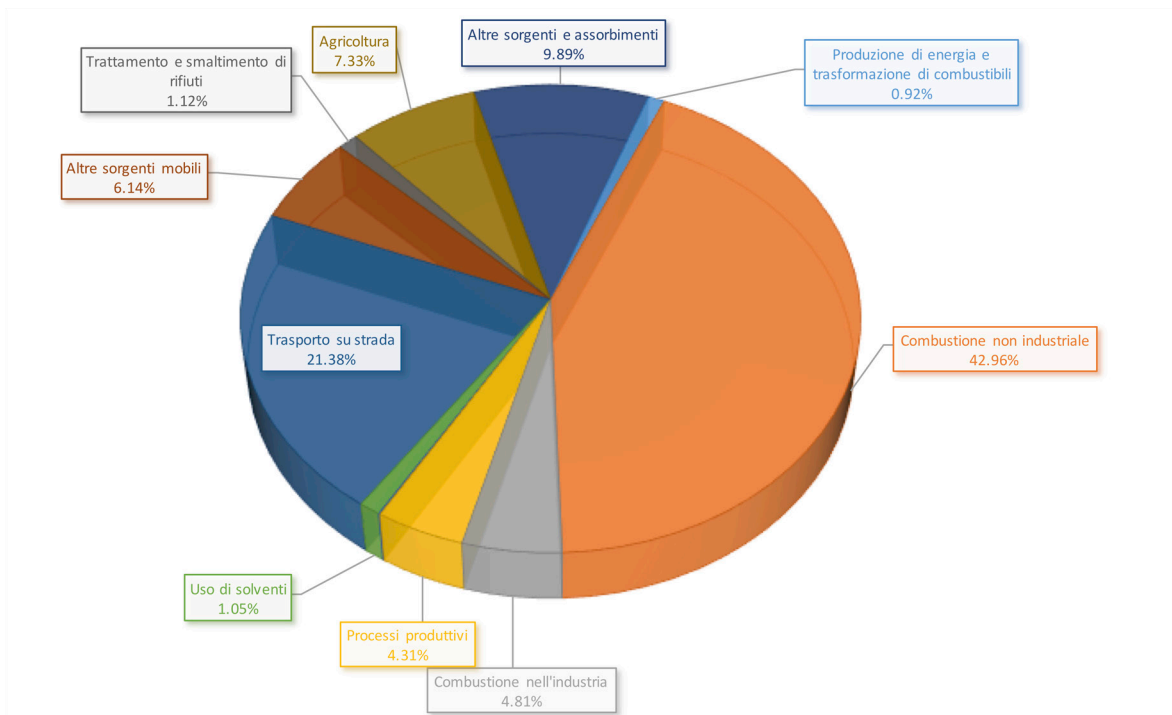


Figura 3.8: Ripartizione percentuale delle emissioni di PM10 in macrosettori sul dominio di bacino.

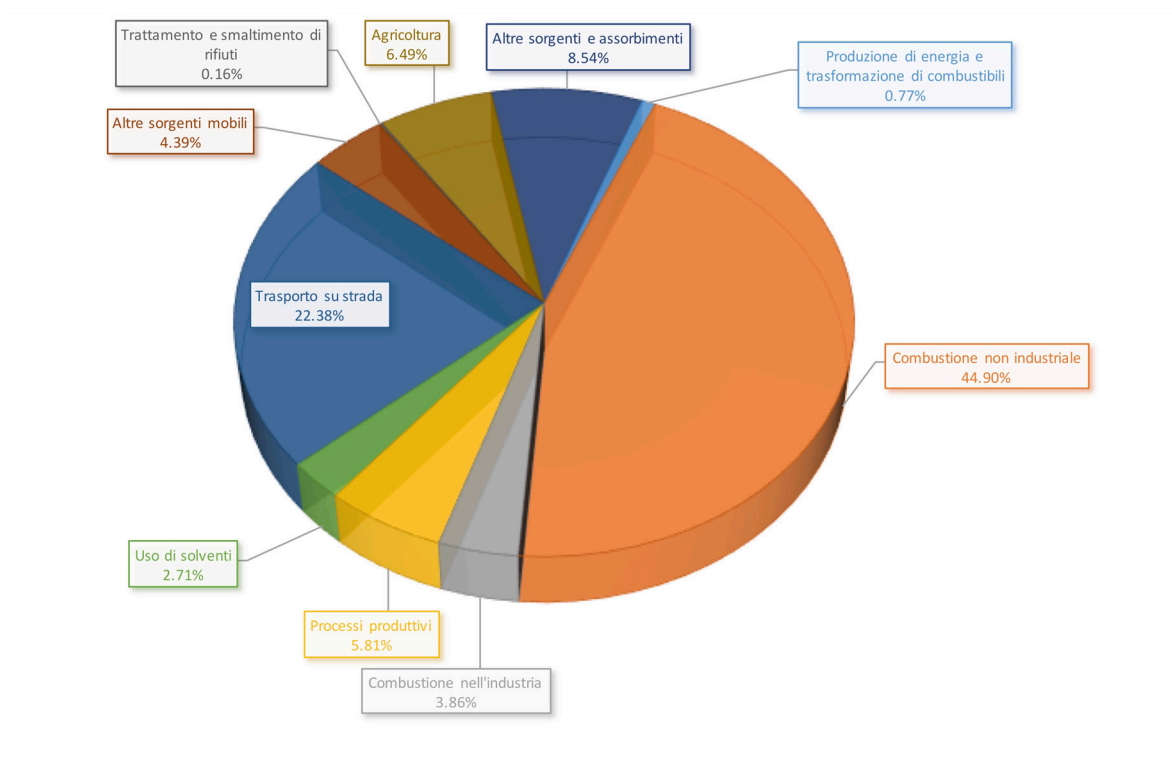


Figura 3.9: Ripartizione percentuale delle emissioni di PM10 in macrosettori per lo zoom sul dominio di Brescia

Le Figure 3.10 - 3.13 presentano le emissioni annuali sui due domini sia areali grigliate che puntuali 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 PM10 evidenziano le zone urbane delle maggiori città presenti nel dominio (in particolare Milano e Torino), mentre i principali tratti autostradali sono ben riconoscibili in quelle relative a ossidi di azoto e PM10. 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.

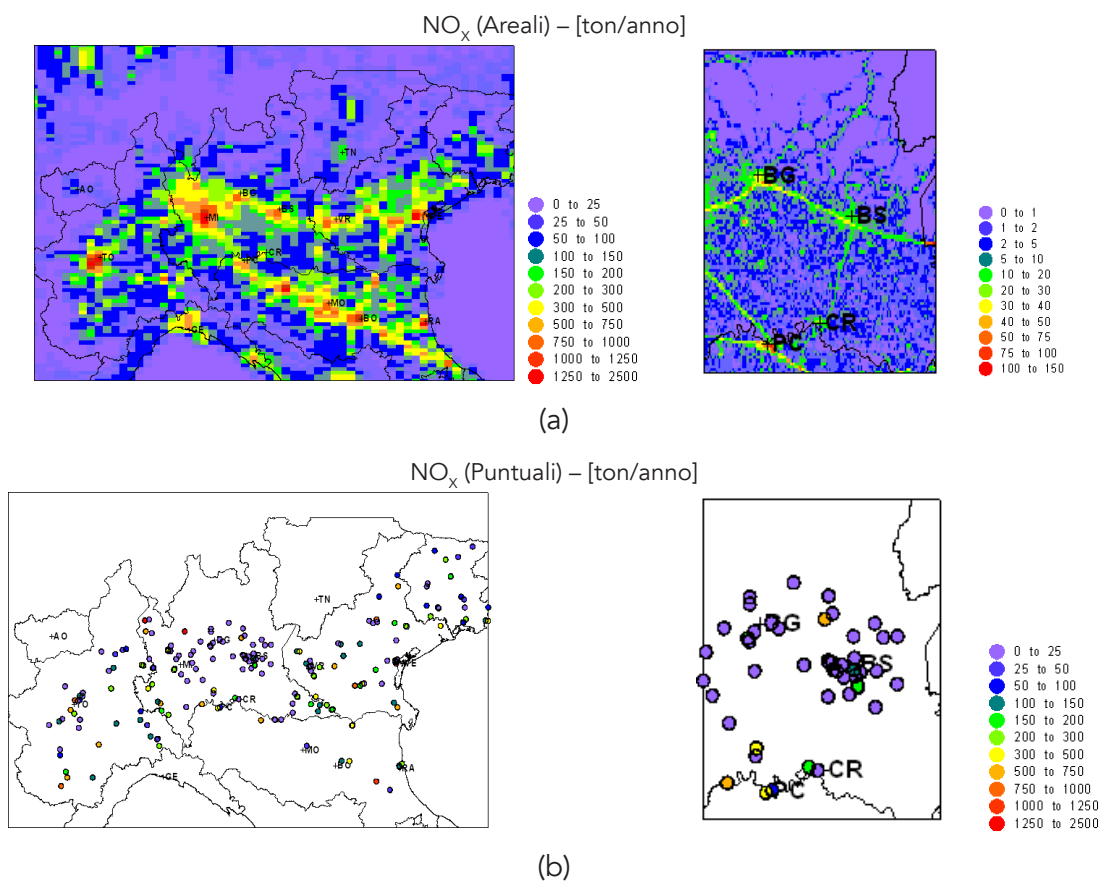


Figura 3.10: Emissioni annuali di NO_x (ton/anno) sui due domini (a: Areali, b: Puntuali).

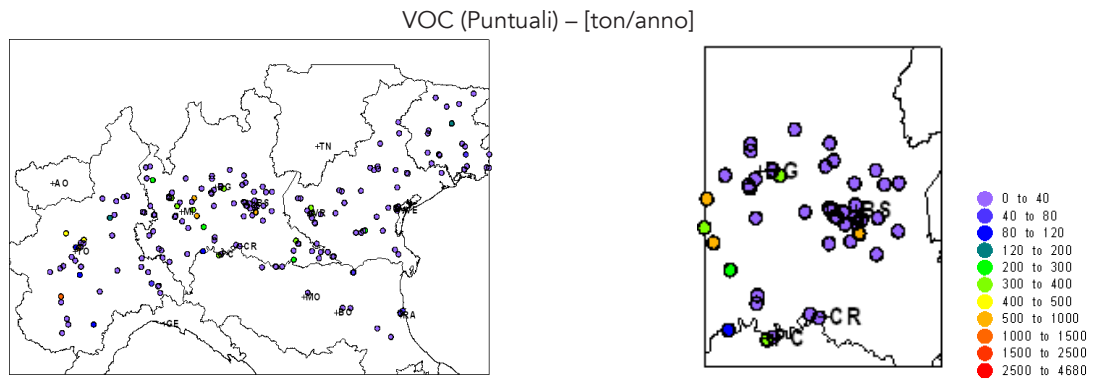
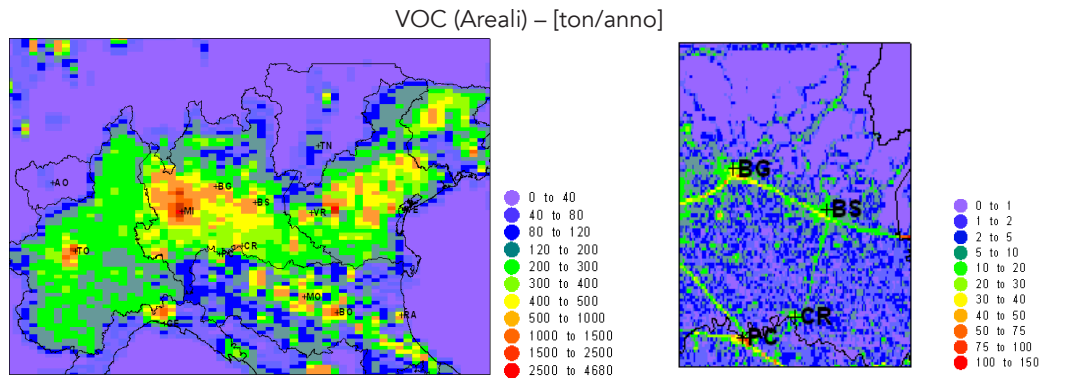


Figura 3.11: Emissioni annuali di VOC (ton/anno) sui due domini (a: Areali, b: Puntuali).

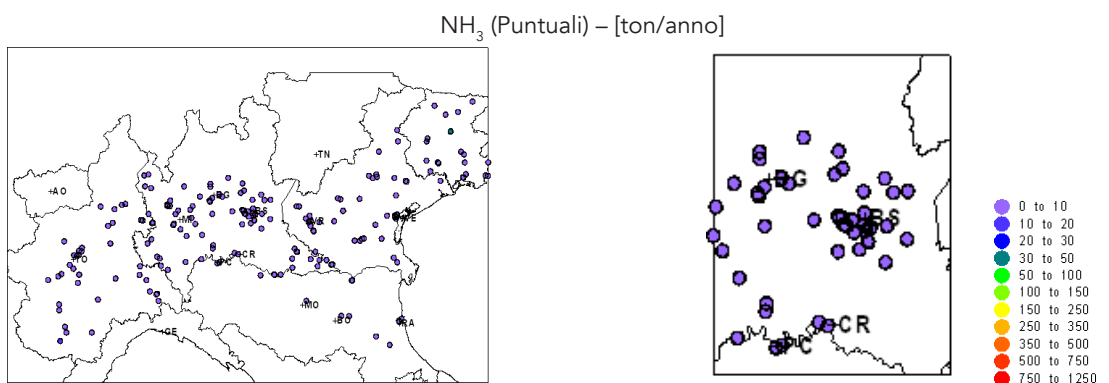
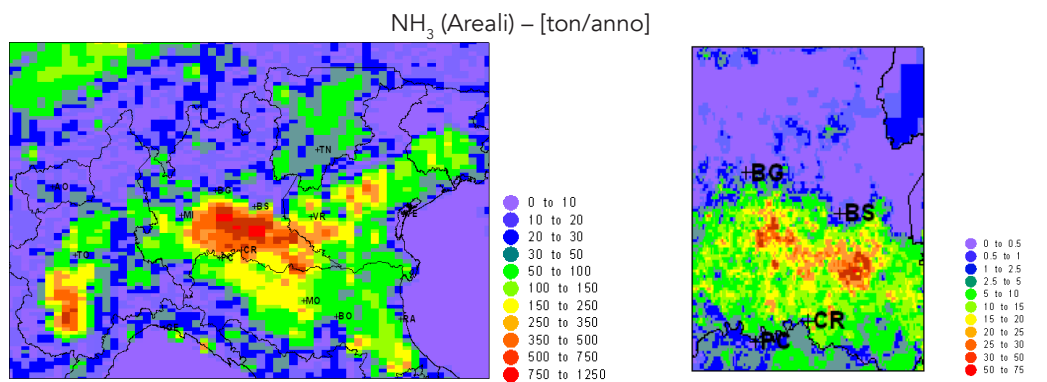


Figura 3.12: Emissioni annuali di NH₃ (ton/anno) sui due domini (a: Areali, b: Puntuali).

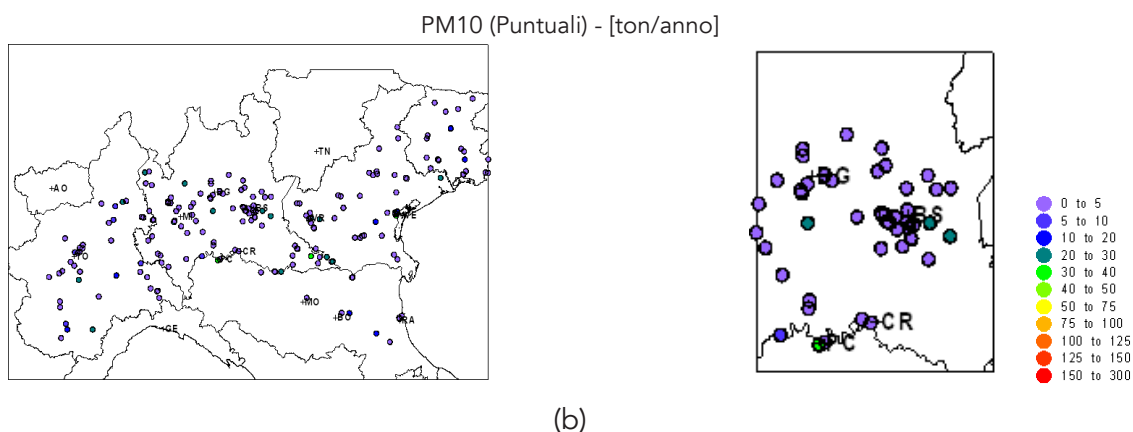
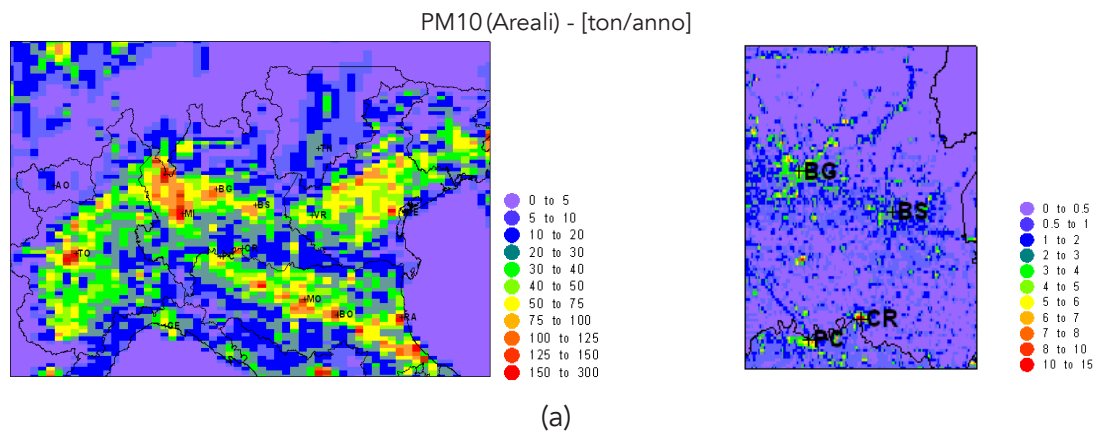


Figura 3.13: Emissioni annuali di PM10 (ton/anno) sui due domini (a: Areali, b: Puntuali).

3.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state calcolate con modalità diverse per le due simulazioni. Per la simulazione di bacino, le concentrazioni delle specie in fase gassosa e aerosol sono state estratte dai campi di concentrazione forniti dal modello a scala globale MOZART-4 (Model for Ozone and Related Chemical Tracers). Tali campi sono scaricabili gratuitamente (<http://www.acom.ucar.edu/wrf-chem/mozart.shtml>) e coprono l'intero periodo temporale di simulazione (anno 2011). MOZART-4 è un modello globale di chimica e trasporto sviluppato nell'ambito del progetto MATCH (Model of Atmospheric Transport and Chemistry, Rasch et al., 1997), in grado di simulare i principali processi atmosferici tra cui convezione, diffusione verticale, advezione, nonché deposizione umida e secca. Il meccanismo chimico standard utilizzato in MOZART-4 include 85 specie in fase gassosa, 12 in fase aerosol e 157 reazioni chimiche. La trattazione degli aerosol include il calcolo delle concentrazioni di solfato, black carbon, organici secondari (SOA), nitrato di ammonio e sale marino. Nel modello è inserito anche il modulo MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature, Guenther et al., 2006) per la trattazione delle emissioni biogeniche (isoprene e monoterpeni). Dato che la massima risoluzione spaziale di MOZART-4 è attualmente di $0.7^\circ \times 0.7^\circ$, si è resa necessaria una interpolazione per adattare le concentrazioni alla risoluzione di $6 \times 6 \text{ km}^2$.

Per quanto riguarda la simulazione sul dominio "Area Brescia", le condizioni al contorno sono state fornite direttamente dai risultati della simulazione sul "Dominio di Bacino". Questo approccio ha il vantaggio di permettere di effettuare l'interpolazione di dati con elevate

prestazioni (paragrafo 3.2) e di ottenere un dettaglio spaziale maggiore rispetto al dato fornito da MOZART-4 senza necessitare di adattamento chimico-fisico tra le specie.

3.4 Validazione delle simulazioni

Sono state effettuate simulazioni modellistiche dell'impatto sulla qualità dell'aria in entrambi i domini per i macroinquinanti: Ozono (O_3), Biossido di azoto (NO_2), Particolato fine con diametro uguale o inferiore a $10 \mu m$ (PM10). La valutazione dell'affidabilità dei risultati delle simulazioni si basa sul confronto quantitativo tra i dati di concentrazione misurati dalle postazioni di monitoraggio di qualità dell'aria e i dati simulati per la cella della griglia di calcolo in corrispondenza delle coordinate delle stazioni, sul confronto grafico tra i campi di concentrazione al suolo ottenuti per i diversi inquinanti, sull'analisi della distribuzione temporale e spaziale delle concentrazioni misurate e calcolate.

I dati di qualità dell'aria utilizzati per il confronto provengono dalla banca dati BRACE Sinanet (www.brace.sinanet.apat.it/) unitamente ai dati forniti da ARPA LOMBARDIA (http://www2.arpalombardia.it/sites/qaria/_layouts/15/qaria/ricercaidati.aspx). Il numero di postazioni utilizzate per la validazione delle simulazioni e la loro distribuzione sui domini sono presentati nella Tabella 3.3 e nella Figura 3.14. Nella definizione dei criteri per la scelta delle stazioni del data-set di confronto si è tenuto conto della necessità di avere, per ogni sito, un'elevata disponibilità di dati affidabili ripartiti nel periodo di riferimento e di avere un'adeguata rappresentatività spaziale in rapporto alle dimensioni del grigliato di calcolo (individuazione di un numero significativo di siti di misura).

Tabella 3.3: Numero delle postazioni utilizzate per la validazione delle simulazioni sui due domini.

Dominio	NO_2	O_3	PM10
Bacino Padano	104	114	101
Area Brescia	41	32	40

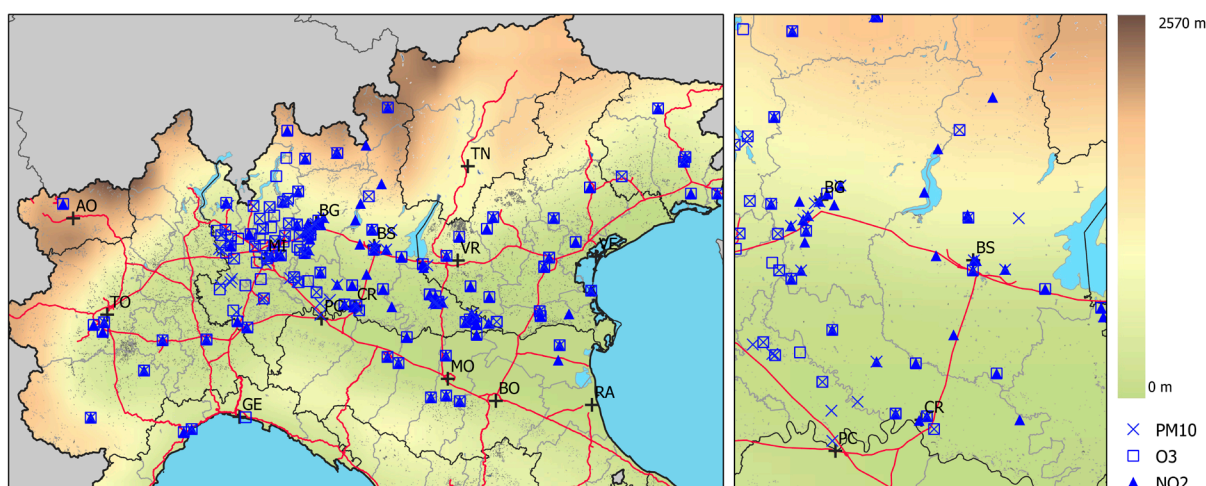


Figura 3.14: Dominio di simulazione con postazioni di monitoraggio (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area Brescia).

3.4.1 Ozono – O₃

La Figura 3.15 presenta le mappe di concentrazione media annuale di ozono per i due domini. Ad ogni mappa (così come nelle successive mappe per NO₂ e PM10) sono sovrapposti i valori delle concentrazioni misurate dalle postazioni di monitoraggio considerate per la validazione (tramite la stessa scala di colori delle mappe). Come si può notare il modello è in grado di ricostruire con elevata precisione il valore misurato dalle postazioni già nella simulazione di Bacino, evidenziando le zone urbane spesso caratterizzate da elevate emissioni di ossidi di azoto e quindi da relativamente basse concentrazioni di ozono. Tuttavia la mappa calcolata con la simulazione di zoom presenta un dettaglio maggiore nella ricostruzione del campo medio di concentrazione soprattutto nella zona prealpina a nord del dominio, grazie alla maggiore risoluzione dei campi meteorologici e di vento. Quantitativamente le prestazioni del modello (Figura 3.16), qui presentate tramite box-plot per la serie storica delle concentrazioni medie giornaliere, in termini di correlazione vero-previsto, errore medio normalizzato e errore medio assoluto normalizzato, sono più che soddisfacenti, con correlazioni prossime a 1 ed errori, in particolare per la simulazione di zoom, prossimi a zero. Si ricorda che i box-plot permettono di rappresentare in forma compatta l'intervallo di distribuzione di una serie di valori. In questo caso le serie comprendono l'indice statistico calcolato per ogni singola postazione di monitoraggio. La linea rossa rappresenta la mediana di questa serie, il box in blu i valori compresi tra il primo e il terzo quartile, le linee orizzontali (baffi del box-plot) il secondo e il novantottesimo percentile e gli asterischi (se presenti) i valori *outlier*.

Le prestazioni per l'ozono sono state calcolate anche per l'indicatore di legge che è definito come il massimo giornaliero della media mobile delle concentrazioni su 8 ore. Le prestazioni sia in termini di media (Figura 3.17) che di indici statistici (Figura 3.18) confermano l'elevata capacità del modello di ricostruire la dinamica spaziale e temporale anche di questo indicatore.

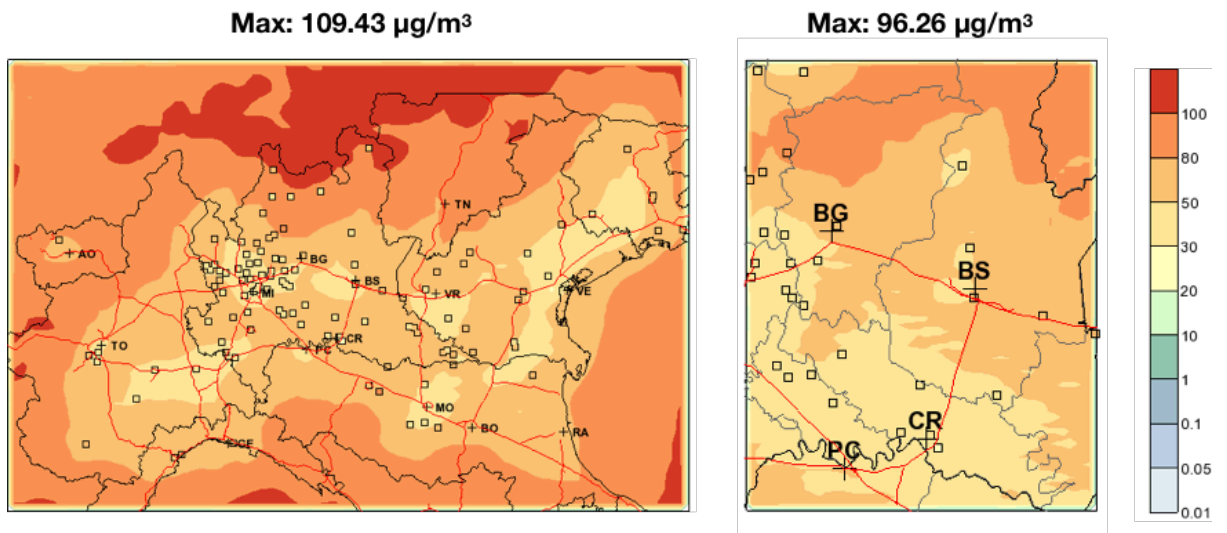


Figura 3.15: Media annuale delle concentrazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di O_3 nel periodo 1/1/2011-31/12/2011 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

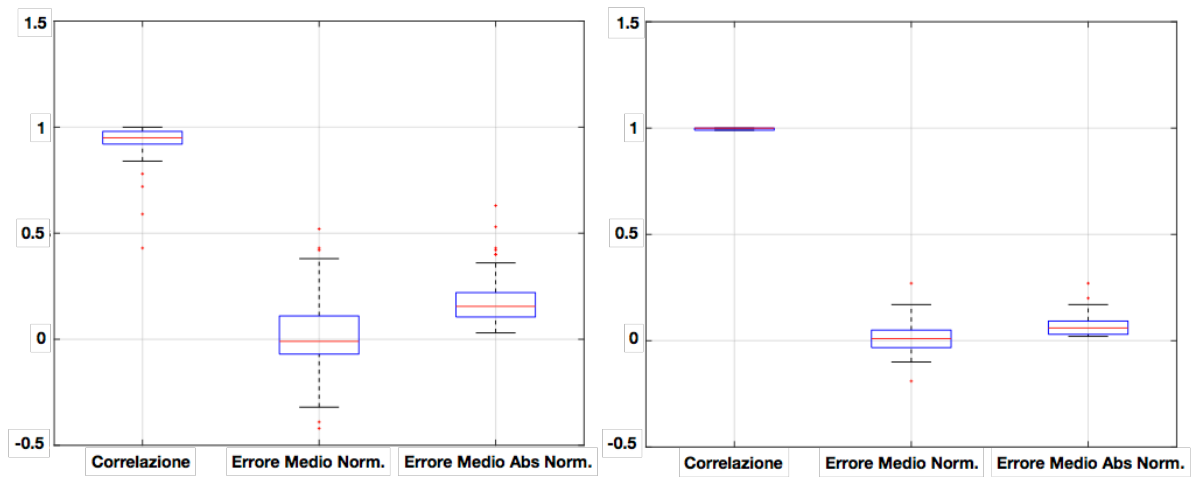


Figura 3.16: Indici di prestazione per la concentrazione media giornaliera di O_3 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

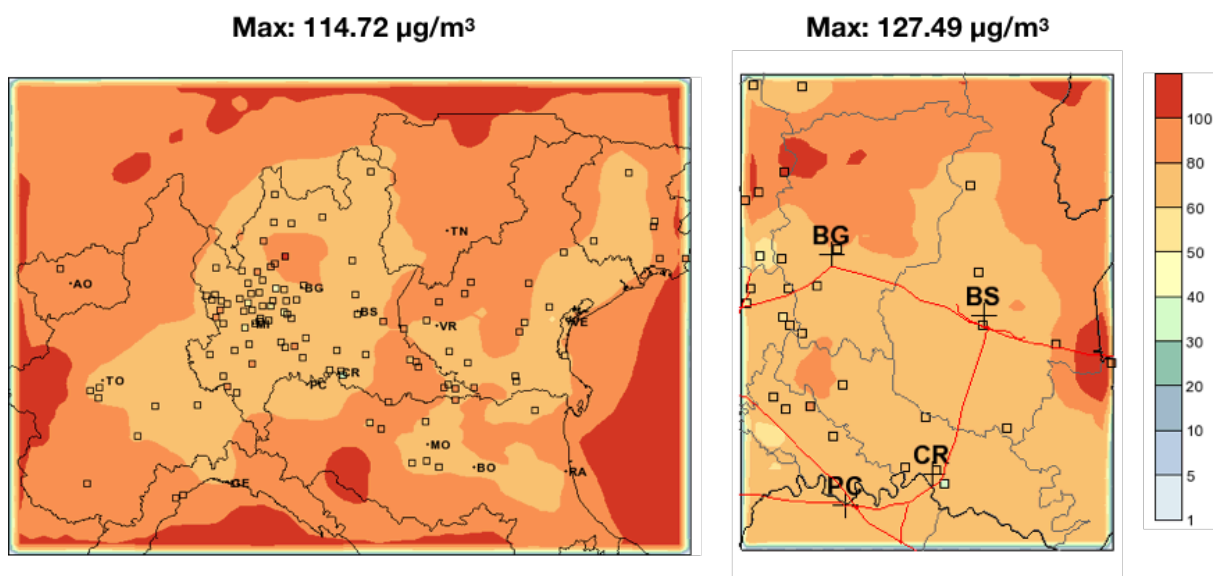


Figura 3.17: Media del massimo giornaliero della concentrazione media su 8 ore ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di O_3 nel periodo 1/1/2011-31/12/2011 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

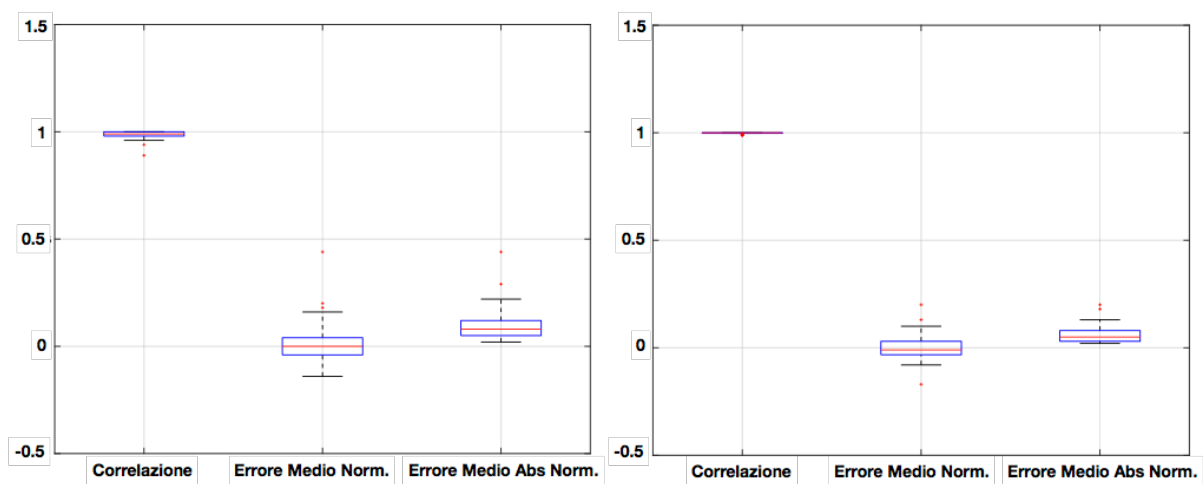


Figura 3.18: Indici di prestazione per il massimo giornaliero della concentrazione media su 8 ore di O_3 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

3.4.2 Biossido di Azoto - NO₂

Seguendo una procedura analoga a quella presentata per la validazione delle simulazioni di ozono, la valutazione delle prestazioni per le simulazioni dell'inquinante NO₂ è stata effettuata sia per le concentrazioni medie giornaliere (Figure 3.19 – 3.20), sia per le concentrazioni massime giornaliere (Figura 3.21 – 3.22). Anche in questo caso le prestazioni sia in termini di media annuale sia in termini di indici statistici sono da considerarsi molto soddisfacenti, anche in virtù della natura fortemente locale (e quindi molto dipendente dalla stima delle emissioni) di questo inquinante. Il dettaglio locale permette di valutare al meglio questo aspetto, evidenziando significative differenze di concentrazione tra le aree urbane (soprattutto di Brescia e Bergamo, maggiori centri urbani inclusi nel dominio di zoom) e quelle suburbane/rurali del dominio.

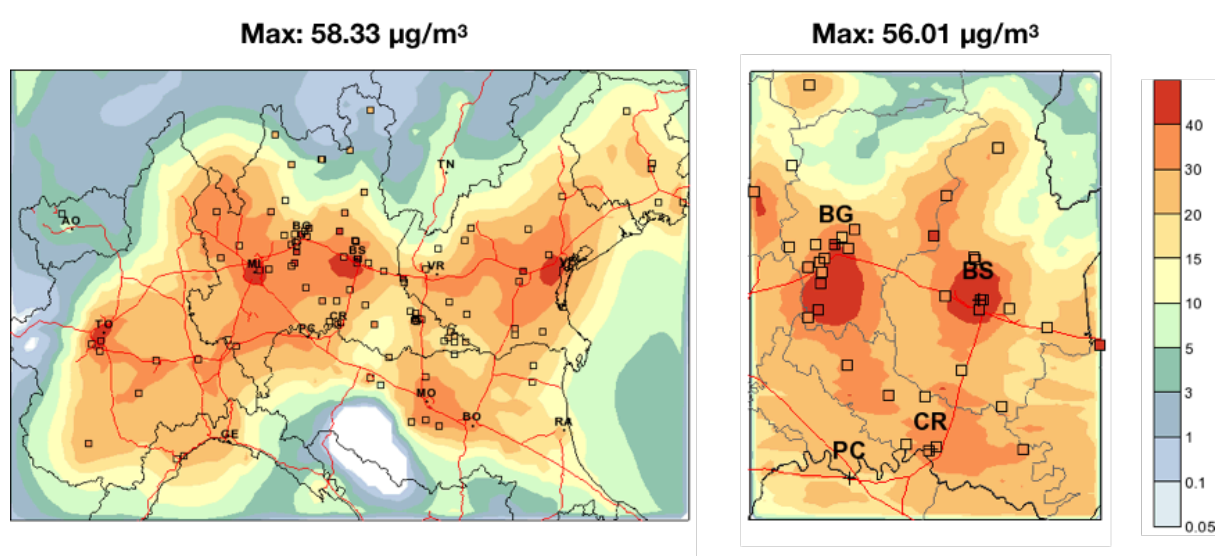


Figura 3.19: Media annuale delle concentrazioni (µg/m³) di NO₂ nel periodo 1/1/2011-31/12/2011 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

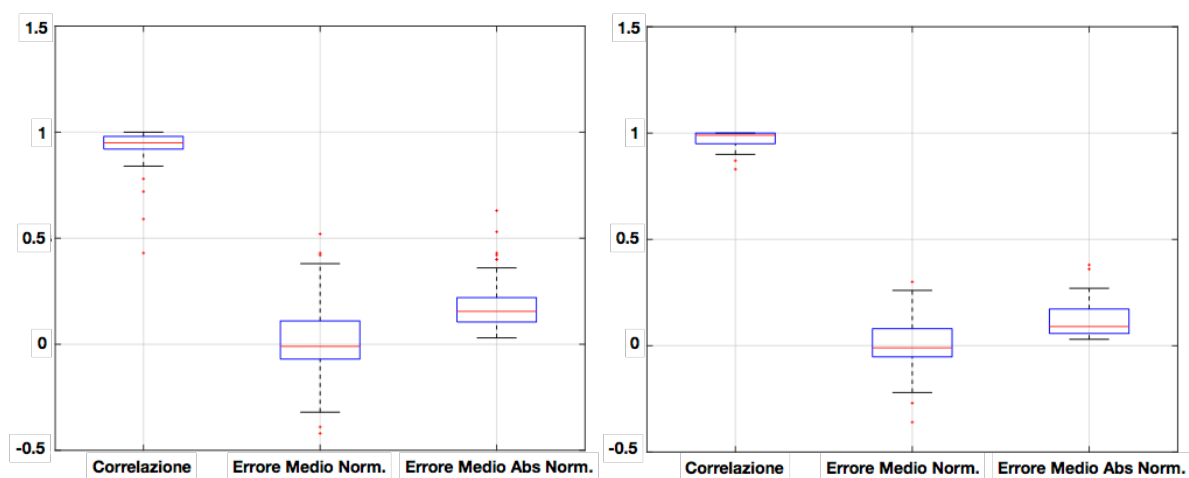


Figura 3.20: Indici di prestazione per la concentrazione media giornaliera di NO₂ (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

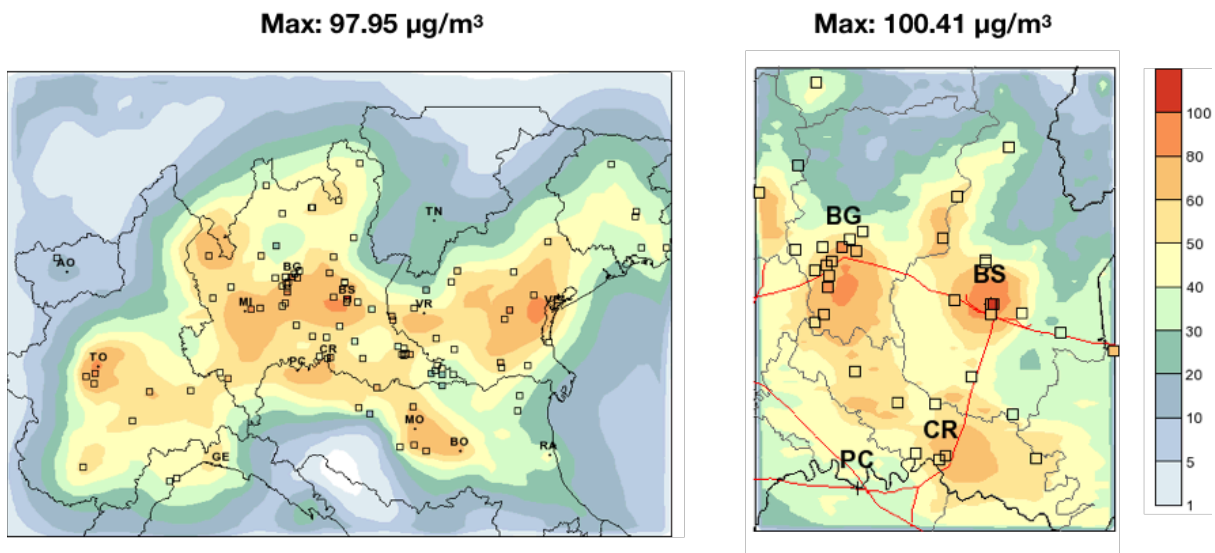


Figura 3.21: Media delle concentrazioni massime giornaliere ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di biossido di azoto nel periodo 1/1/2011-31/12/2011 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

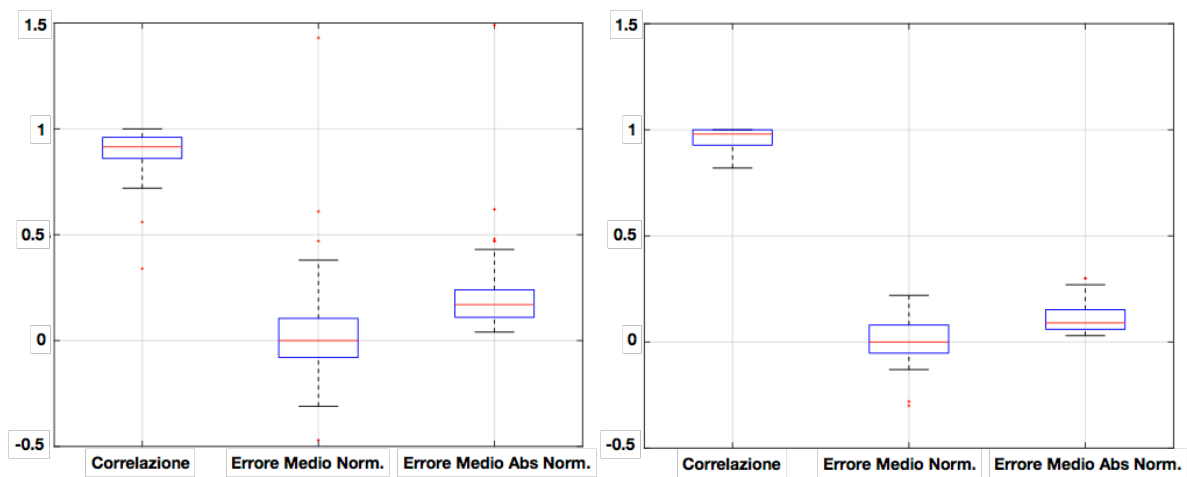


Figura 3.22: Indici di prestazione per la concentrazione massima giornaliera di NO_2 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

3.4.3 Particolato Atmosferico - PM10

I risultati della validazione in termini di PM_{10} sono presentati nelle Figure 3.23 e 3.24. La considerazione più importante riguarda la capacità del modello di simulare anche elevate concentrazioni di questo inquinante permettendo quindi di individuare le zone particolarmente critiche del dominio, quali la parte centrale della Pianura padana e i principali centri urbani. La simulazione sul dominio "Area Brescia" evidenzia inoltre concentrazioni medie annuali di PM_{10} elevate (oltre i $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) anche in corrispondenza ai principali tratti stradali. In generale, come per gli altri inquinanti valutati, le prestazioni sono leggermente migliori per la simulazione a risoluzione $1 \times 1 \text{km}^2$, pur attestandosi in entrambi i casi su livelli molto soddisfacenti.

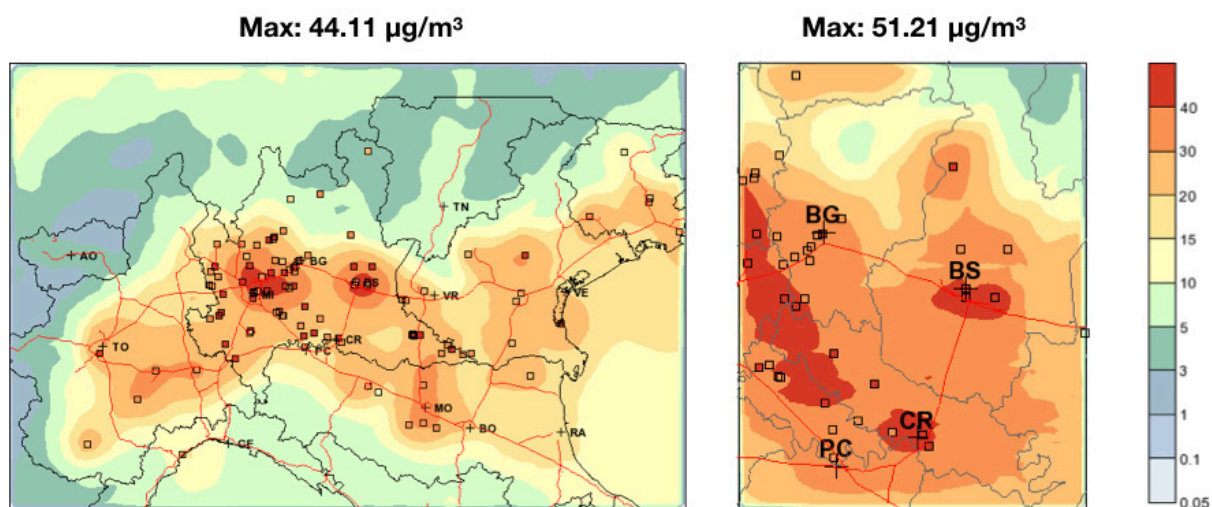


Figura 3.23: Media annuale delle concentrazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di PM_{10} nel periodo 1/1/2011-31/12/2011 (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

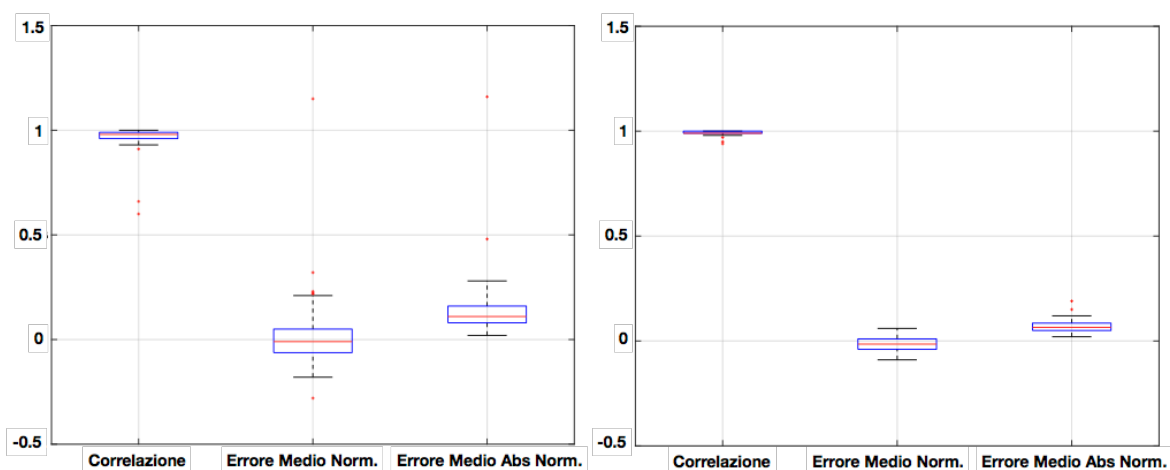


Figura 3.24: Indici di prestazione per la concentrazione media giornaliera di PM_{10} (sx: simulazione di bacino, dx: zoom su area bresciana).

4 Simulazione Modellistica della concentrazione di macroinquinanti

Analisi di Source Apportionment

Contestualmente alle simulazioni è stata realizzata l'analisi di *Source Apportionment* (S-A) per i tre macroinquinanti. A tal fine sono stati definiti i gruppi emissivi indicati in Tabella 4.1. In aggiunta ai gruppi definiti nella precedente Tabella 3.1, sono stati presi in considerazione due gruppi aggiuntivi allo scopo di valutare esplicitamente il contributo delle condizioni iniziali e al contorno. I valori delle emissioni di ciascun gruppo sono stati calcolati a partire dai dati dell'inventario INEMAR 2012, garantendo la consistenza con le simulazioni validate nel capitolo 3. I gruppi considerati sono associati a uno o più macrosettori CORINAIR e a due gruppi che rappresentano emissioni specifiche del territorio bresciano. Il gruppo "Impianti Teleriscaldamento Brescia" include le emissioni (ricavate dall'inventario INEMAR 2012) del Termoutilizzatore di Brescia, della Centrale Lamarmora e della Centrale Nord. Il gruppo emissivo RAMET include le emissioni delle aziende aderenti al consorzio RAMET. RAMET è la Società Consortile per le Ricerche Ambientali per la Metallurgia (<http://www.consorziogramet.it/>), fondata nel 2005 dall'Associazione Industriale Bresciana (AIB) e costituita dalle principali realtà produttive della sider-metallurgia del territorio bresciano (siderurgie, metallurgie dell'alluminio e cupro-leghe, fonderie di ghisa), che hanno deciso di fare sistema per affrontare gli aspetti ambientali relativi ai propri settori attraverso iniziative di studio, ricerca e comunicazione ambientale.

Inoltre, è importante evidenziare il fatto che per i due domini considerati le condizioni al contorno sono profondamente differenti (sia per le aree geografiche interessate che per la risoluzione spaziale delle due griglie), rendendo quindi il confronto dei loro impatti non immediato.

Si sottolinea infine che per tutti i macroinquinanti considerati nel seguito è stato valutato l'impatto in termini di concentrazioni medie annuali.

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

Gruppo S-A	Associazione INEMAR/CORINAIR
Impianti Teleriscaldamento Brescia	Emissioni A2A (tutti macrosettori)
RAMET	Emissioni aziende RAMET (tutti i macrosettori)
Produzione energia	Macrosettore 1
Riscaldamento domestico	Macrosettore 2
Industria	Macrosettori 3, 4, 5
Solventi	Macrosettore 6
Trasporti	Macrosettori 7 e 8
Rifiuti	Macrosettore 9
Agricoltura	Macrosettore 10
Altre fonti	Macrosettore 11

4.1 Ozono – O₃

La valutazione dell'impatto delle diverse sorgenti emissive presentate in Tabella 4.1 risulta polarizzato dalla natura fortemente non lineare ed esclusivamente secondaria di tale inquinante. Inoltre la persistenza in atmosfera relativamente elevata dell'ozono comporta fenomeni di trasporto anche a lungo raggio delle sue concentrazioni formatesi in presenza di emissioni di precursori. La Tabella 4.2 presenta l'impatto in termini di concentrazione media annuale dei diversi gruppi di Source Apportionment considerati nella cella in cui tale impatto è massimo. Come si può notare, le condizioni al contorno sono decisamente i primi contributori di questo inquinante. Questo è dovuto per la simulazione di bacino alle forti concentrazioni di ozono e di NO₂ presenti al contorno est del dominio sul mar Adriatico che si inseriscono in pianura ed iniziano a contribuire ai fenomeni di formazione e accumulo di ozono in regioni caratterizzate da frequenti condizioni di calma di vento e da brezze monte valle; ne consegue il trasporto e l'accumulo dell'inquinante che si è formato verso zone del dominio aventi basse emissioni di NO e NO₂. Le Figure 4.1 - 4.4 presentano le distribuzioni spaziali dei principali (in termini di impatto) gruppi di S-A, evidenziati nella Tabella 4.1 in grassetto. Come si può notare le sorgenti puntuali del gruppo Impianti Teleriscaldamento Brescia e del gruppo RAMET contribuiscono in modo molto limitato alla concentrazione media annuale di ozono, anche in zone immediatamente limitrofe al punto di emissione. L'unico contributo degno di nota, pur attestandosi su concentrazioni non particolarmente elevate (10 µg/m³), è quello del traffico, soprattutto nella parte centrale del dominio maggiormente urbanizzata. I risultati dell'analisi di Source Apportionment sulla simulazione di bacino permettono di effettuare anche il confronto tra le percentuali di impatto dei diversi gruppi S-A sulle concentrazioni medie calcolate per le celle appartenenti ai differenti comuni capoluoghi di provincia della regione Lombardia (Figura 4.5 A). Tale confronto non evidenzia significative differenze in termini dei gruppi che contribuiscono maggiormente alle concentrazioni. E' importante notare come la somma degli impatti dovuti alle emissioni naturali, alle condizioni al contorno e a quelle iniziali sia ben superiore al 50% delle concentrazioni totali, evidenziando la relativa impossibilità di intervenire per limitare le concentrazioni di ozono in modo significativo attraverso provvedimenti esclusivamente regionali; emerge quindi la necessità di strategie che coinvolgano almeno gruppi di regioni, ma più probabilmente l'intera nazione e/o i territori confinanti.

Tabella 4.2: Impatto massimo dei diversi gruppi S-A sulla concentrazione media annuale di O₃ (µg/m³).

Gruppo S-A	Impatto max O ₃ (µg/m ³) (Simulazione Bacino)	Impatto max O ₃ (µg/m ³) (Simulazione area Brescia)
Condizioni Iniziali	3.76	1.43
Condizioni al contorno	105.64	95.41
Impianti Teleriscaldamento Brescia	0.03	<0.01
RAMET	0.26	0.03
Prod. Energia	1.47	0.2
Riscaldamento	1.17	0.65
Processi Industriali	3.81	0.45
Solventi	2.5	0.74
Trasporto	11.28	2.02
Gestione Rifiuti	0.3	0.2
Agricoltura	2.93	0.68
Altro	5.87	2.89

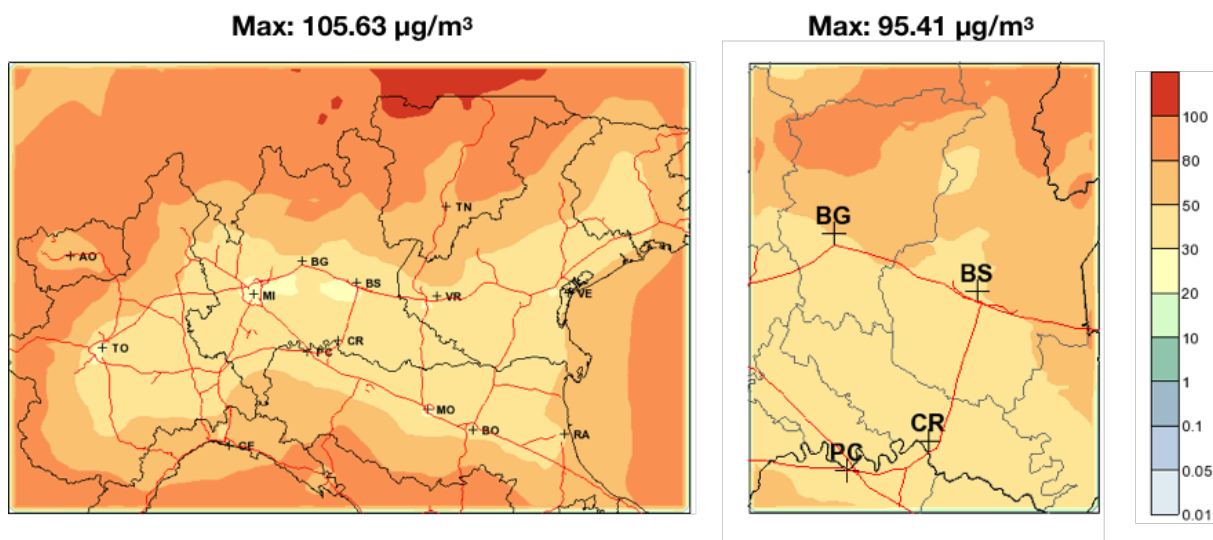


Figura 4.1: Impatto del gruppo S-A "Condizioni al contorno" sulla concentrazione media annuale di O₃ (µg/m³)

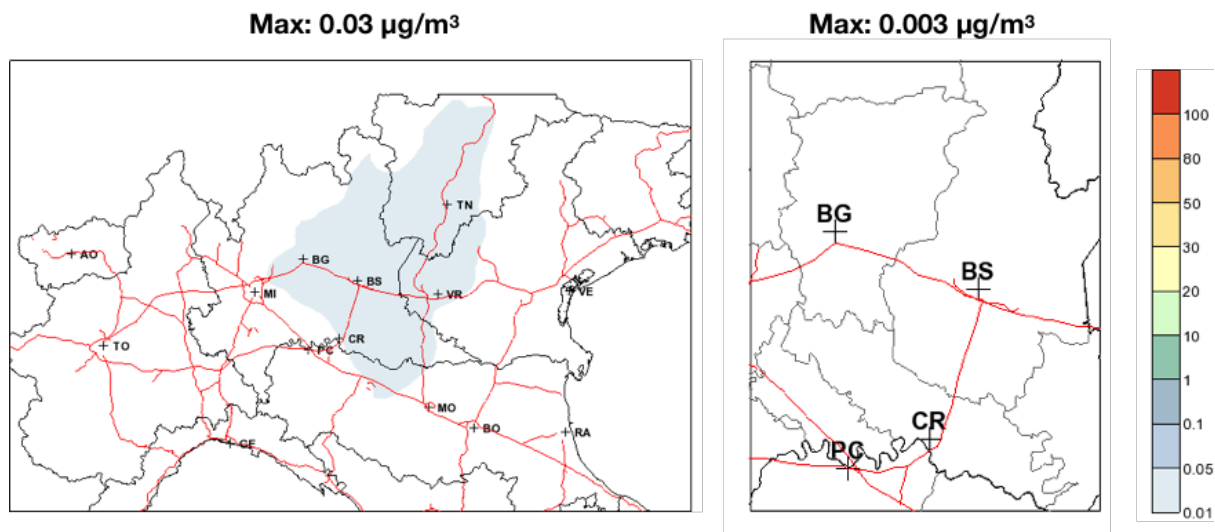


Figura 4.2: Impatto del gruppo S-A "Impianti Teleriscaldamento Brescia" sulla concentrazione media annuale di O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

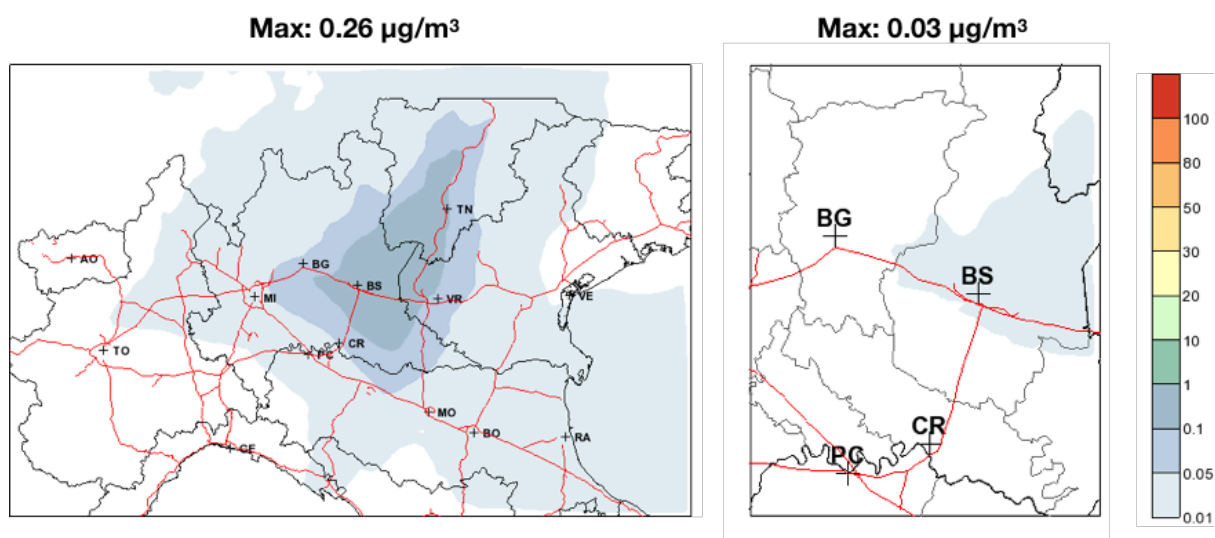


Figura 4.3: Impatto del gruppo S-A "RAMET" sulla concentrazione media annuale di O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

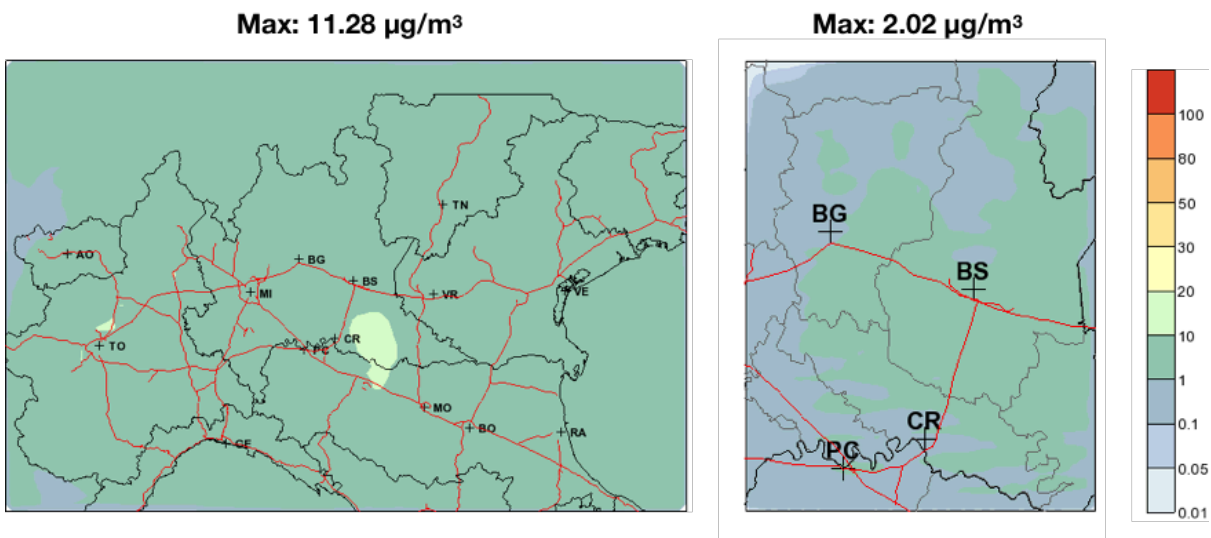


Figura 4.4: Impatto del gruppo S-A "Trasporto" sulla concentrazione media annuale di O₃ (µg/m³).

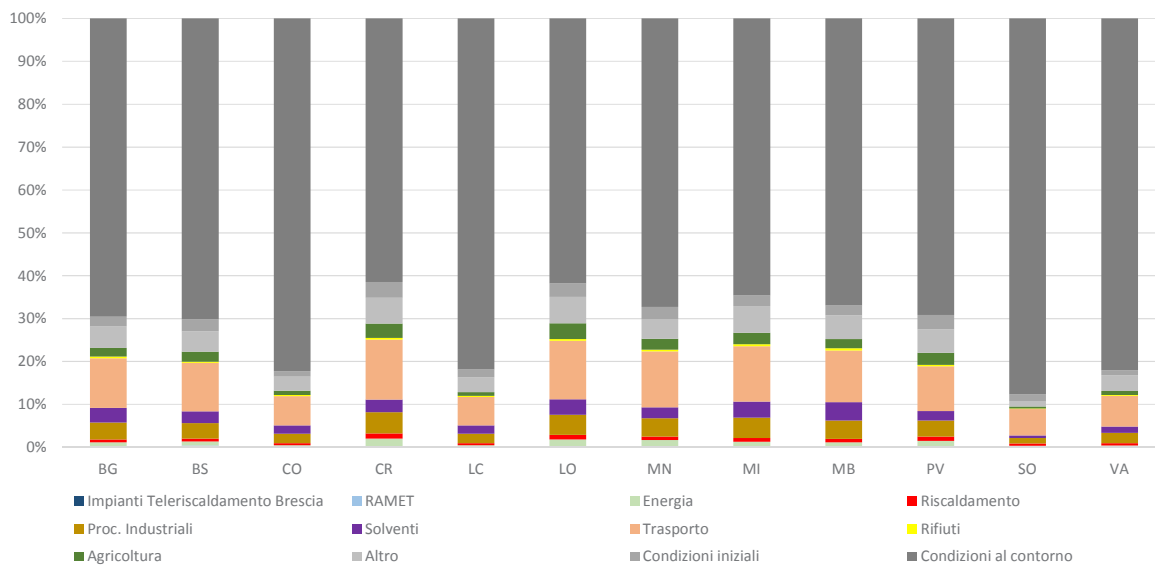


Figura 4.5 A : Impatto percentuale dei diversi gruppi S-A nei capoluoghi lombardi sulla concentrazione media di O₃ (Simulazione di Bacino).

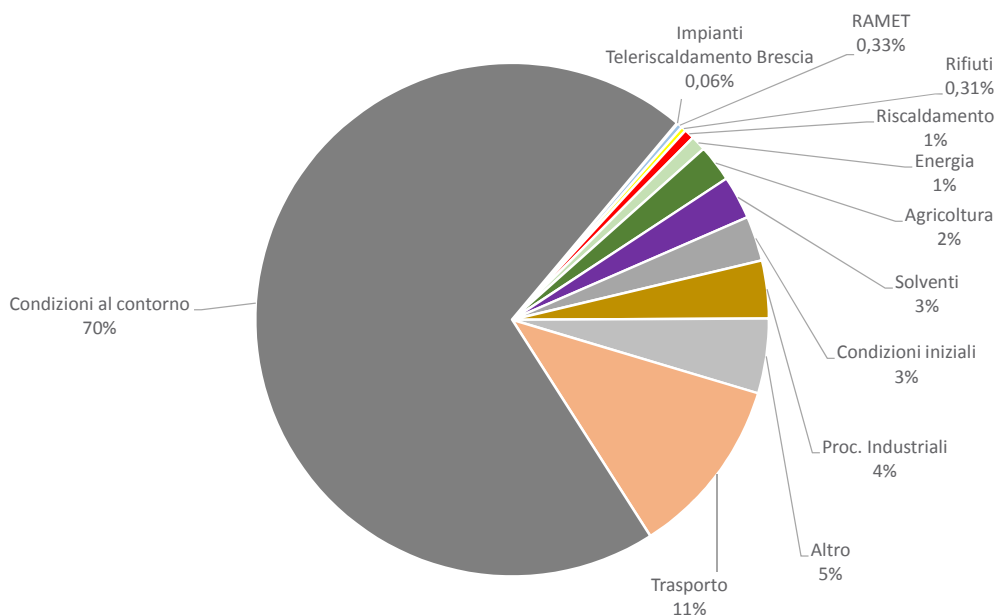


Fig. 4.5 B: Impatto percentuale dei diversi gruppi S-A nella città di Brescia sulla concentrazione media di O₃

4.2 Biossido di Azoto - NO₂

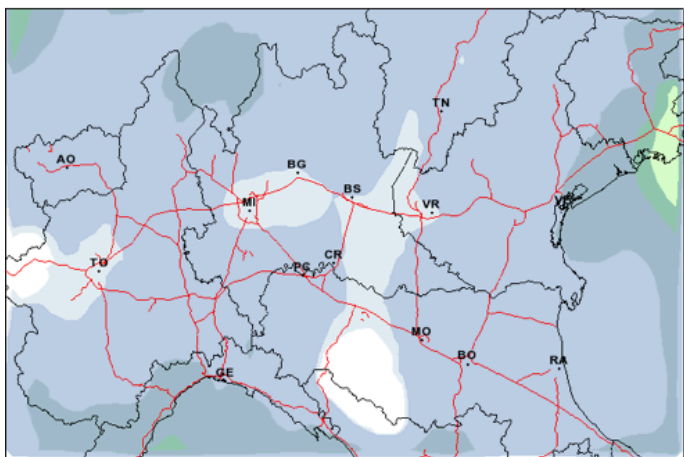
La tabella 4.3 presenta l'impatto dei diversi gruppi di S-A sulla concentrazione media annua di NO₂ nelle celle in cui tale impatto è massimo. Come si può notare in questo caso il gruppo "Trasporto" contribuisce in modo predominante alle concentrazioni dell'inquinante. Rispetto a quanto accadeva per l'ozono, si può notare un più ampio spettro di gruppi (Produzione di Energia, Riscaldamento, Processi Industriali in particolare) coinvolti in modo significativo nei fenomeni di formazione e accumulo di NO₂. Anche in questo caso l'impatto dei camini facenti capo al gruppo Impianti Teleriscaldamento Brescia o ad aziende RAMET ha un ruolo rispettivamente trascurabile o molto limitato, con valori pressoché identici nelle simulazioni sui due domini. Si può notare a questo proposito come il valore massimo di impatto di RAMET sia leggermente inferiore nel dominio di zoom, probabilmente a causa di una dispersione maggiore dovuta all'aumento di risoluzione nella simulazione meteorologica.

Le Figure 4.6 - 4.13 riportano le mappe di impatto per i gruppi maggiormente significativi. Tali mappe evidenziano l'impatto delle fonti emissive di ossido di azoto soprattutto nella fascia centrale del dominio. Il forte impatto delle emissioni di trasporto è evidenziato in modo esplicito nell'analisi riguardante i capoluoghi in Figura 4.14 A, sebbene anche l'apporto dei gruppi Riscaldamento e Processi Industriali risulti significativo. Diversamente da quanto si poteva concludere per l'ozono, in questo caso è particolarmente significativo (circa 90% del totale) il contributo delle emissioni sulle quali è possibile intervenire internamente al territorio considerato.

Tabella 4.3: Impatto massimo dei diversi gruppi S-A sulla concentrazione media annuale di NO₂ (µg/m³).

Gruppo S-A	Impatto max NO ₂ (µg/m ³) Simulazione Bacino	Impatto max NO ₂ (µg/m ³) Simulazione area Brescia
Condizioni Iniziali	0.37	0.43
Condizioni al contorno	8.52	31.59
Impianti Teleriscaldamento Brescia	0.1	0.09
RAMET	1.73	1.14
Prod. Energia	12.21	2.71
Riscaldamento	11.81	12.12
Processi Industriali	15.69	19.94
Solventi	1.02	0.02
Trasporto	39.53	28.24
Gestione Rifiuti	5.96	4.18
Agricoltura	0.54	0.17
Altro	3.23	2.94

Max: 8.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Max: 31.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

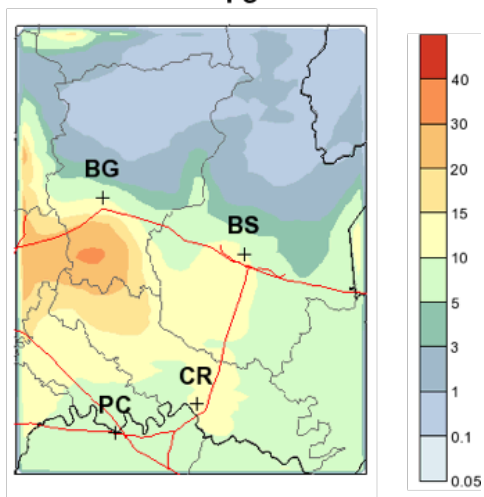
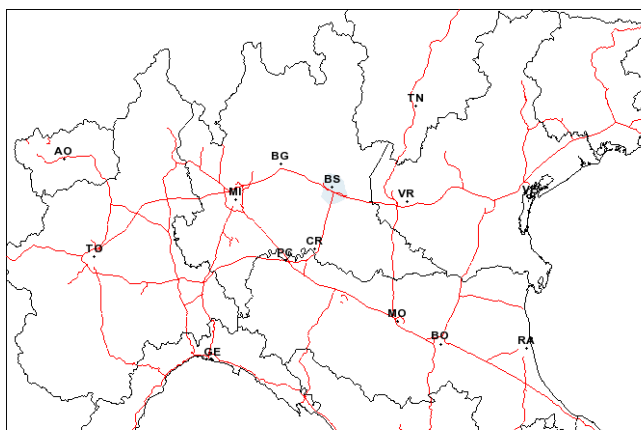


Figura 4.6: Impatto del gruppo S-A "Condizioni al contorno" sulla concentrazione media annuale di NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Max: 0.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Max: 0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

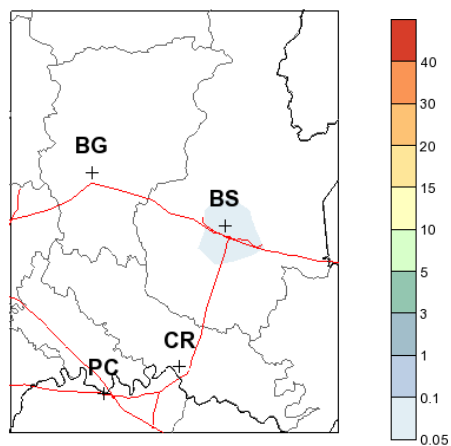


Figura 4.7: Impatto del gruppo S-A "Impianti Teleriscaldamento Brescia" sulla concentrazione media annuale di NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

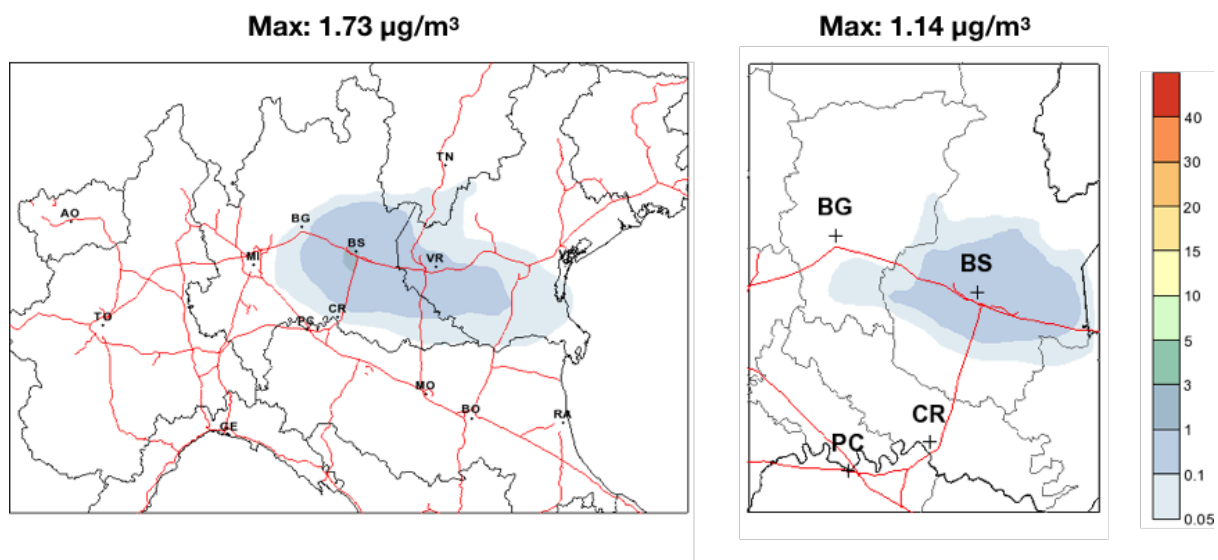


Figura 4.8: Impatto del gruppo S-A "RAMET" sulla concentrazione media annuale di NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

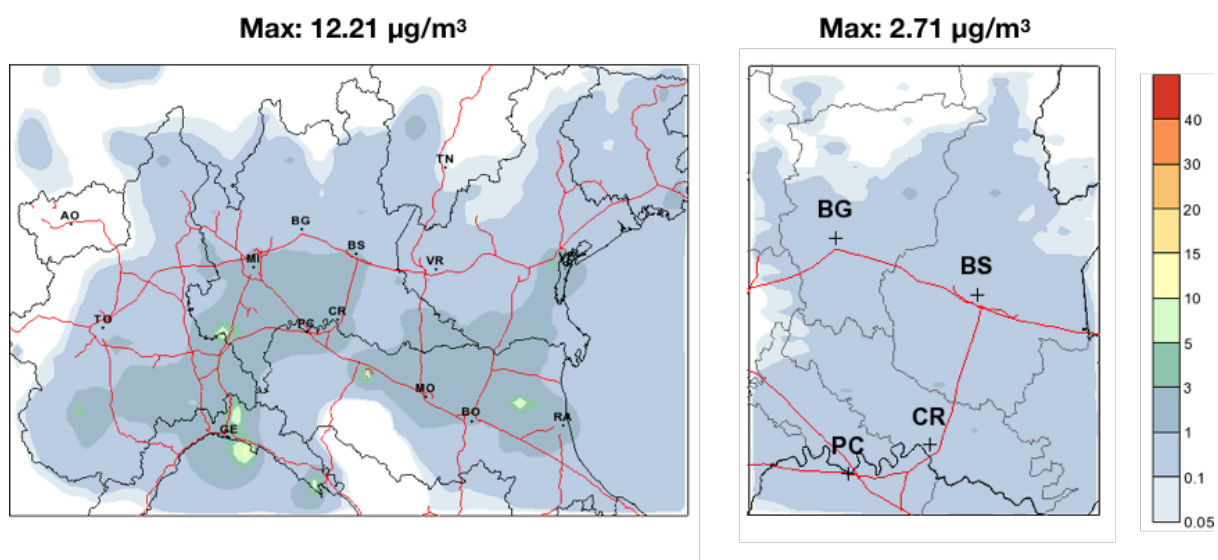


Figura 4.9: Impatto del gruppo S-A "Produzione di Energia" sulla concentrazione media annuale di NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

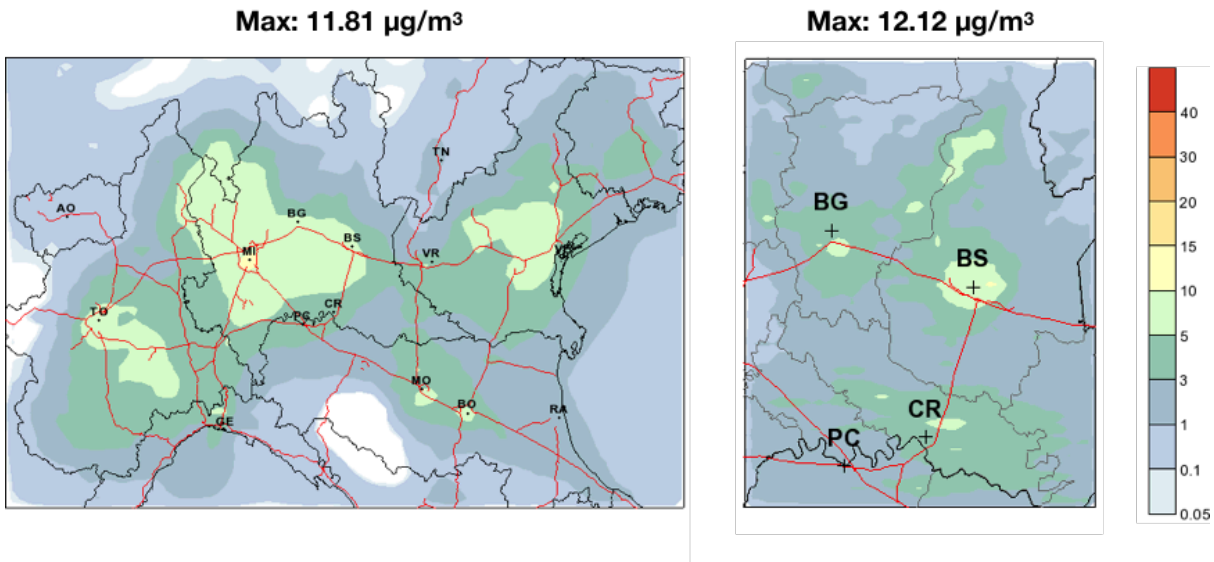


Figura 4.10: Impatto del gruppo S-A "Riscaldamento" sulla concentrazione media annuale di NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

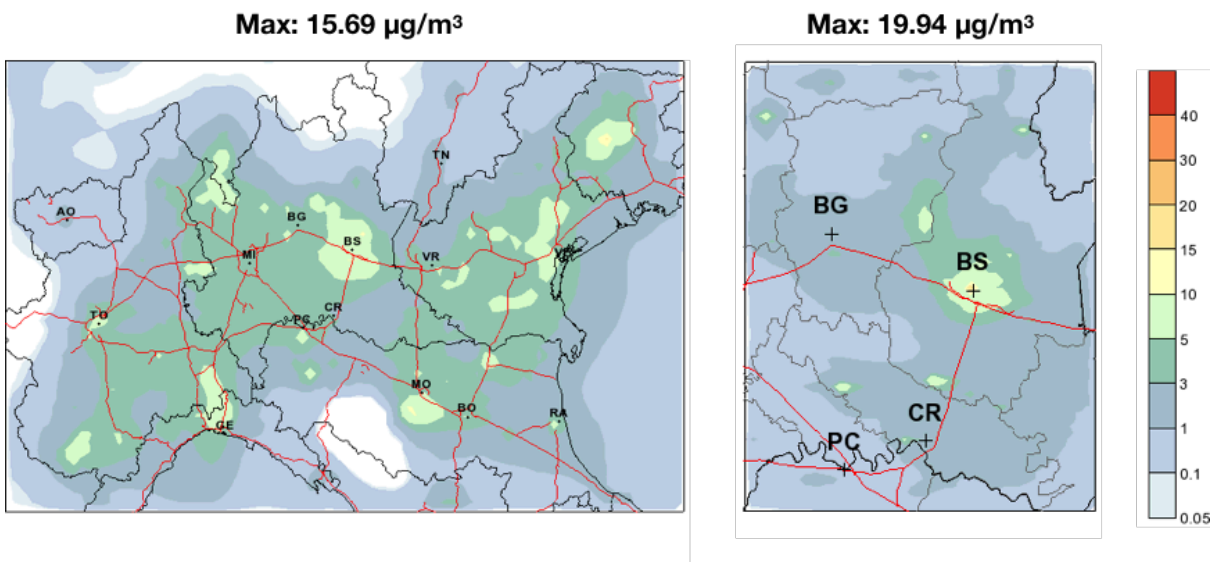


Figura 4.11: Impatto del gruppo S-A "Processi Industriali" sulla concentrazione media annuale di NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

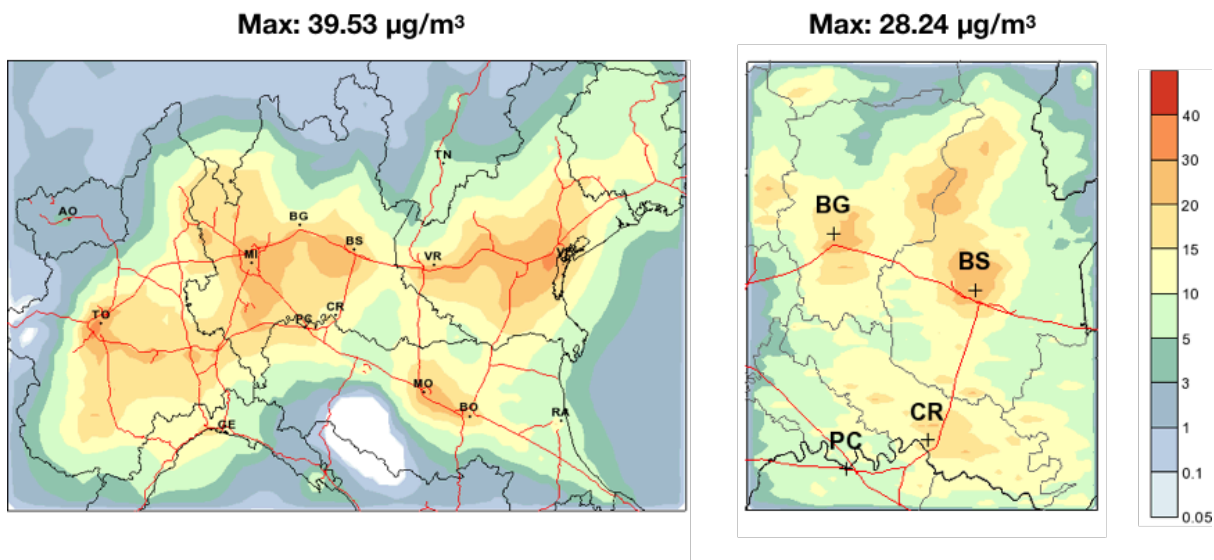


Figura 4.12: Impatto del gruppo S-A "Trasporti" sulla concentrazione media annuale di NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

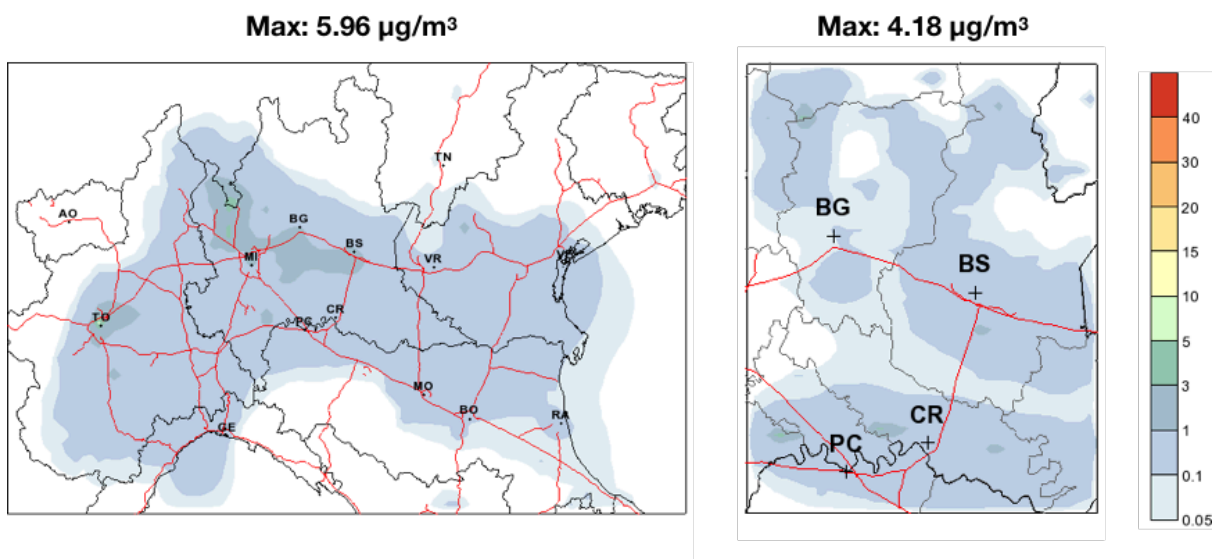


Figura 4.13: Impatto del gruppo S-A "Rifiuti" sulla concentrazione media annuale di NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

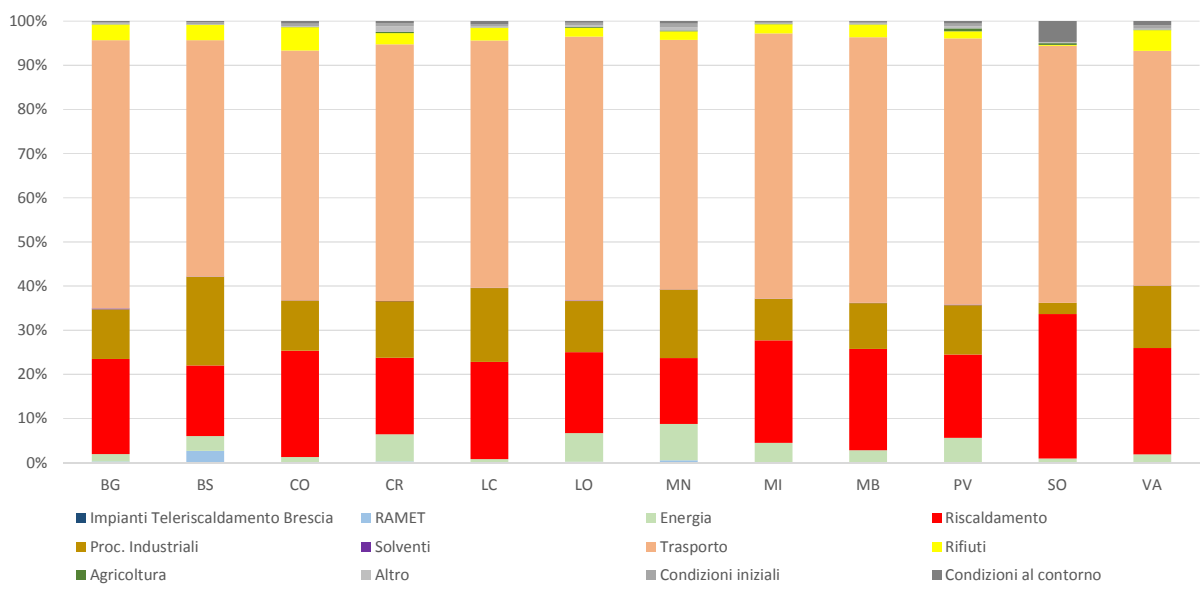


Figura 4.14 A: Impatto percentuale dei diversi gruppi S-A nei capoluoghi lombardi sulla concentrazione media di NO₂.

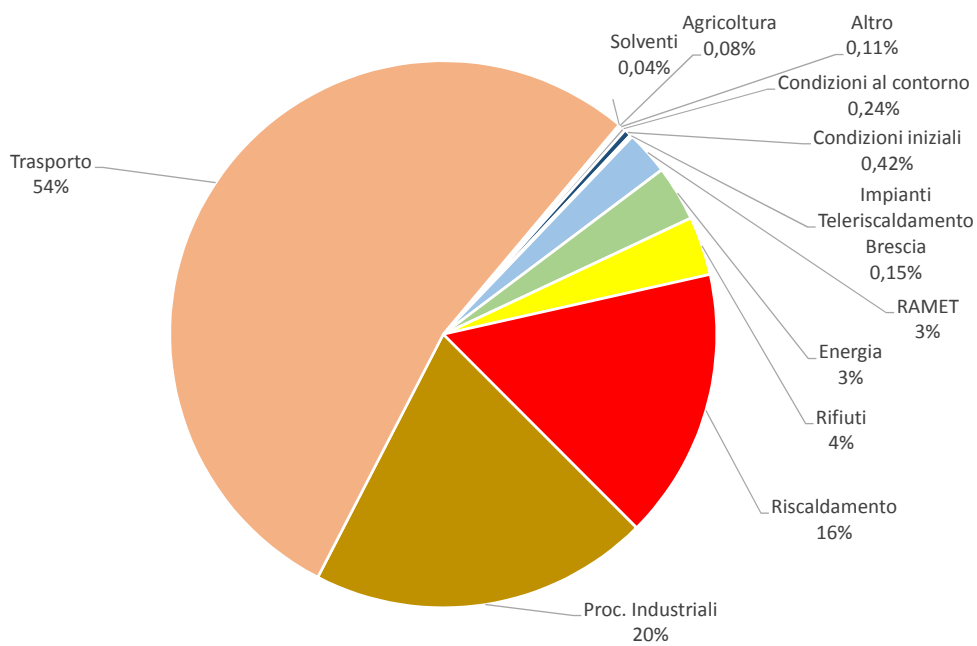


Fig. 4.14 B: Impatto percentuale dei diversi gruppi S-A nella città di Brescia sulla concentrazione media di NO₂

4.3 Particolato Atmosferico - PM10

I risultati dell'analisi di Source Apportionment per quanto riguarda il PM10 (Tabella 4.4, Figure 4.15 - 4.21) evidenziano un significativo e confrontabile impatto del riscaldamento domestico, del traffico e dell'agricoltura; quest'ultima, a causa delle elevate emissioni di ammoniaca, governa la formazione di nitrato e solfato d'ammonio e quindi dà un contributo molto elevato alla formazione di aerosol secondario. Inoltre, pur essendo il contributo delle aziende del consorzio RAMET limitato ($<2\mu\text{g}/\text{m}^3$), l'impatto della restante parte di processi industriali risulta significativo, con punte anche di $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ come media annuale. Si può inoltre notare come la simulazione di zoom permetta di evidenziare l'impatto dei diversi gruppi (in particolare riscaldamento e traffico) nella zona a nord del comune di Brescia, che risulta invece più "appiattito" nella simulazione di Bacino. L'analisi dell'impatto sui diversi capoluoghi (Figura 4.22 A) evidenzia il fatto che il contributo delle emissioni sulle quali è possibile intervenire è elevato (circa l'80%) e distribuito tra riscaldamento al nord della regione, e impianti industriali, traffico e agricoltura al centro/sud.

Tabella 4.4: Impatto massimo dei diversi gruppi S-A sulla concentrazione media di PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gruppo S-A	Impatto max PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Simulazione Bacino	Impatto max PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Simulazione Area Brescia
Condizioni iniziali	3.62	2.54
Condizioni al contorno	8.93	29.52
Impianti	0.11	0.08
Teleriscaldamento Brescia		
RAMET	1.77	1.91
Prod. Energia	1.99	1.39
Riscaldamento	13.82	10.99
Processi Industriali	10.76	8.35
Solventi	0.34	0.19
Trasporto	16.47	8.24
Gestione Rifiuti	2.28	0.95
Agricoltura	9.08	7.42
Altro	3.4	1.5

Max: 8.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Max: 29.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

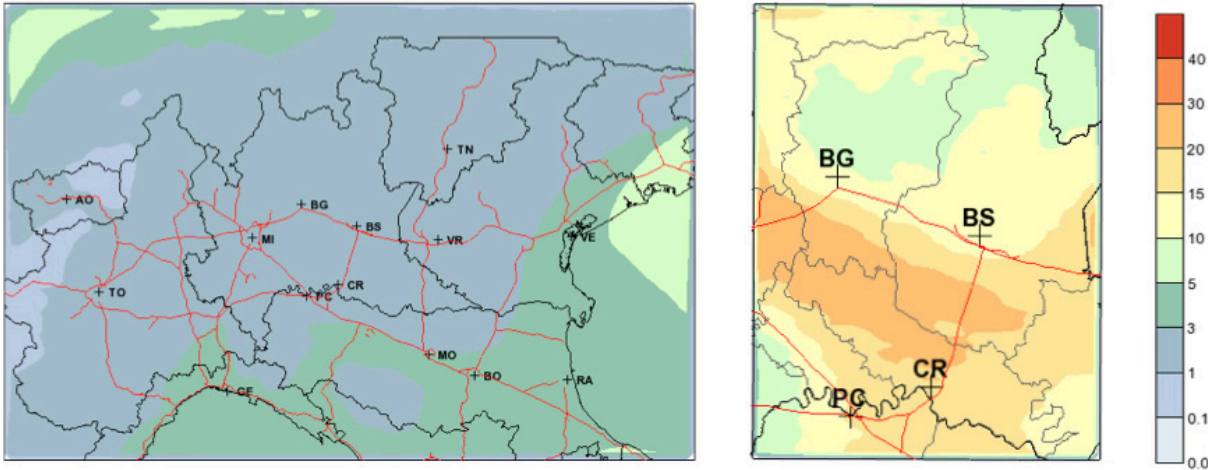


Figura 4.15: Impatto del gruppo S-A "Condizioni al contorno" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Max: 0.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Max: 0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

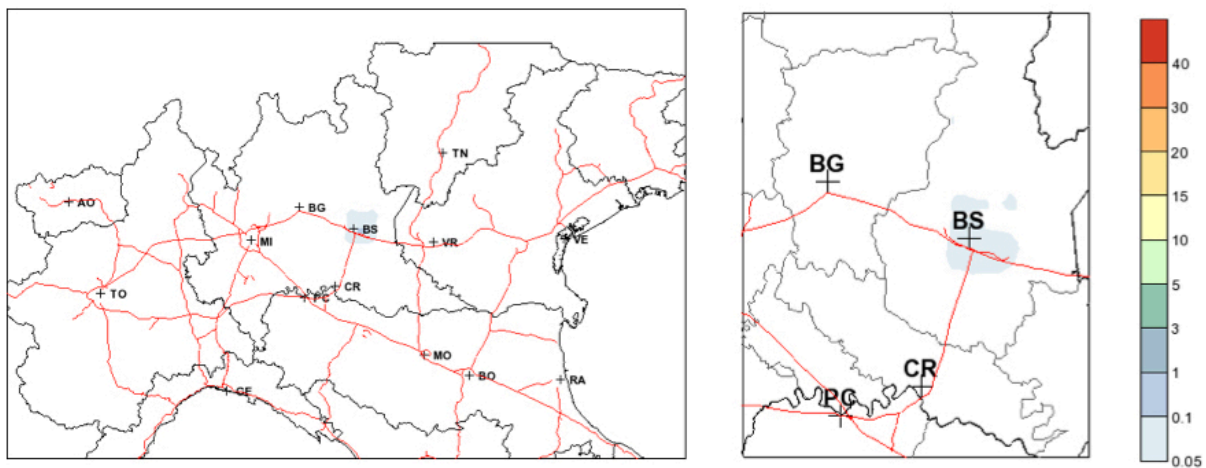


Figura 4.16: Impatto del gruppo S-A "Impianti Teleriscaldamento Brescia" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

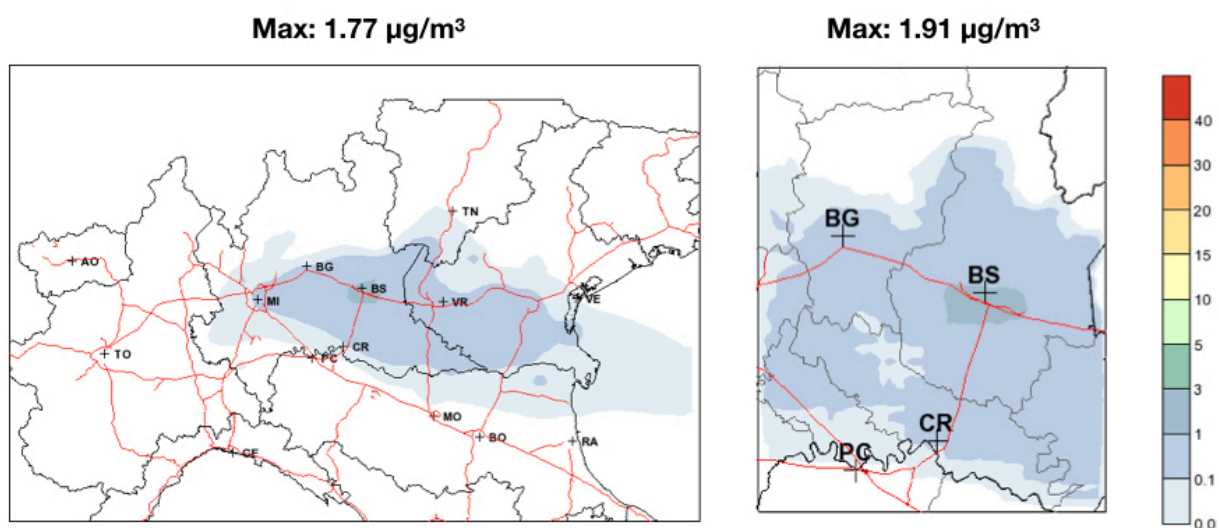


Figura 4.17: Impatto del gruppo S-A "RAMET" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

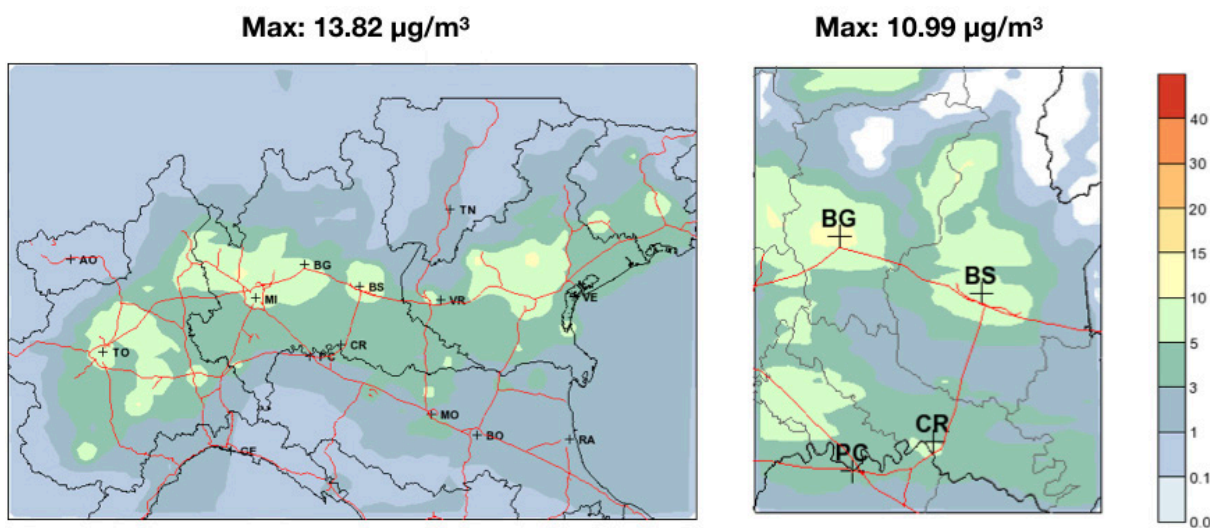
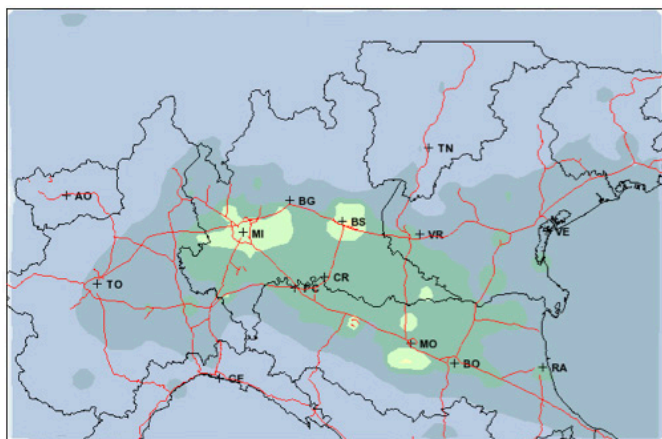


Figura 4.18: Impatto del gruppo S-A "Riscaldamento" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Max: 10.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Max: 8.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

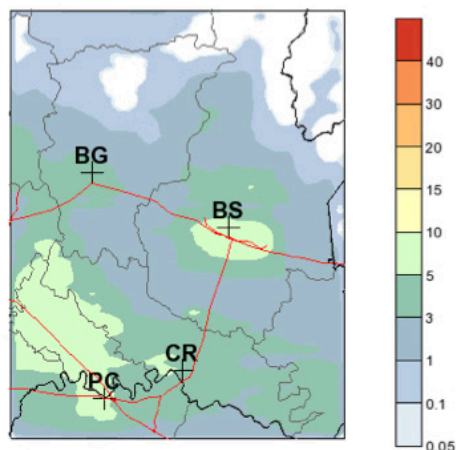
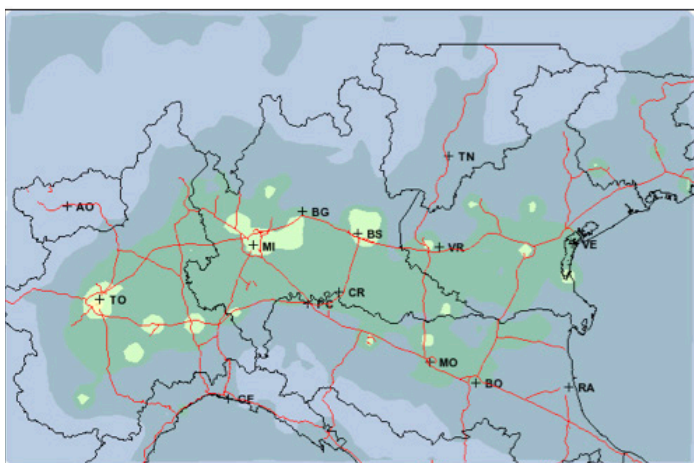


Figura 4.19: Impatto del gruppo S-A "Processi Industriali" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Max: 16.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Max: 8.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

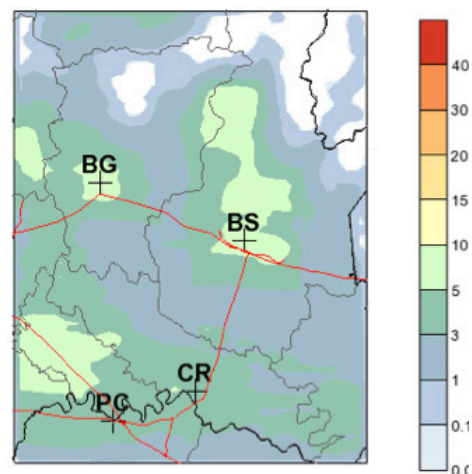
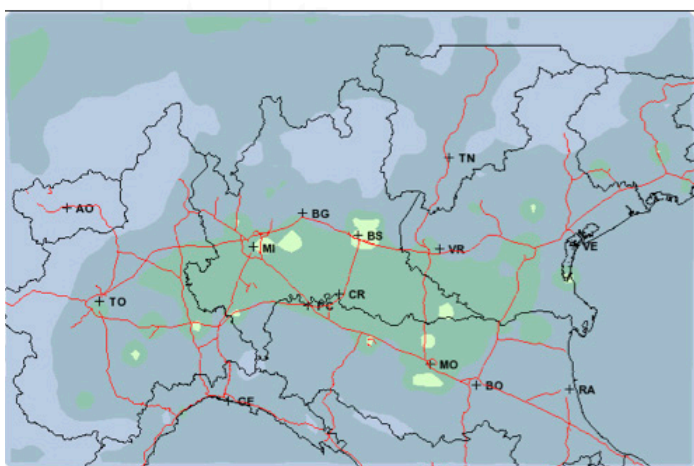


Figura 4.20: Impatto del gruppo S-A "Trasporto" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Max: 9.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Max: 7.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

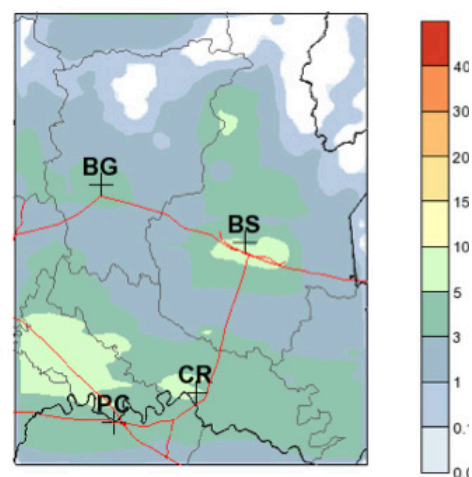


Figura 4.21: Impatto del gruppo S-A "Agricoltura" sulla concentrazione media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

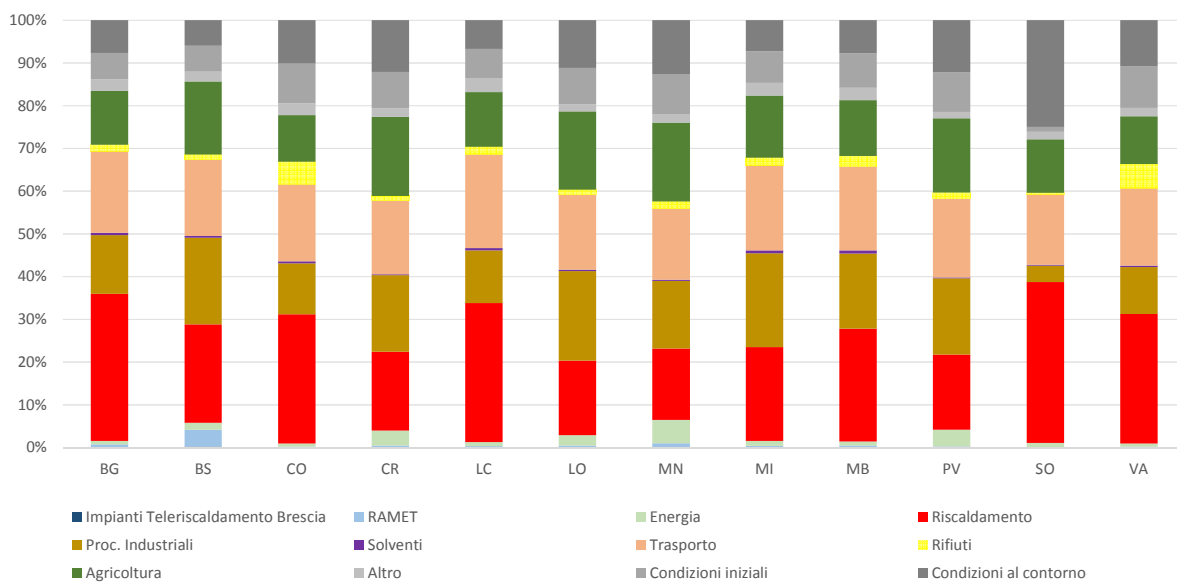


Figura 4.22 A: Impatto percentuale dei diversi gruppi S-A nei capoluoghi lombardi sulla concentrazione media di PM10.

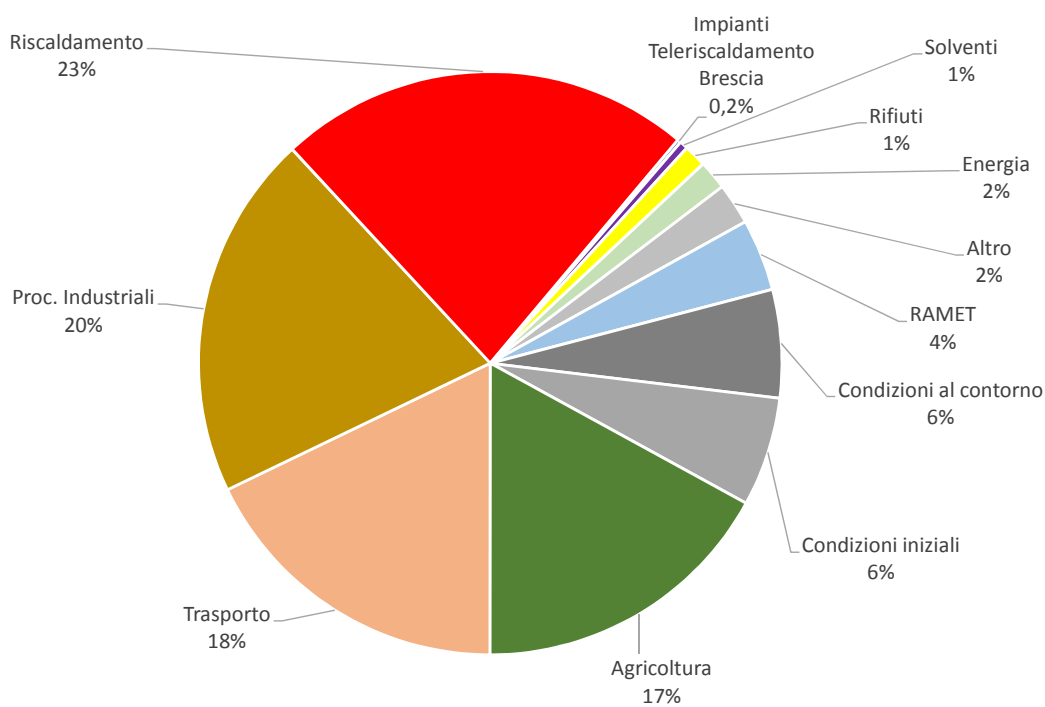


Fig. 4.22 B: Impatto percentuale dei diversi gruppi S-A nella città di Brescia sulla concentrazione media di PM10

5 Simulazione modellistica della concentrazione di microinquinanti in atmosfera

In questo capitolo sono presentati il setup e i risultati della simulazione modellistica della dispersione di microinquinanti in atmosfera relativamente al dominio di zoom sull'area bresciana.

Le simulazioni riguardano le concentrazioni di diossine/furani (PCDD/F), PCB dioxin like e PCB totali.

5.1 Inventario Emissivo

Per la simulazione modellistica della concentrazione di microinquinanti sull'area bresciana è stato utilizzato un inventario costituito ad hoc per il progetto, sfruttando le seguenti fonti informative:

- Inventario ISPRA, contenente le emissioni annuali provinciali di PCDD/F (g TEQ/anno) e PCB totali (kg/anno) relative all'anno 2010 per i diversi settori indicati nella metodologia CORINAIR.
- Dati forniti da A2A, relativi alle emissioni mensili di PCDD/F (g TEQ/mese), ed annuali di PCB totali (kg/anno) e PCB dioxin like (g TEQ/anno) degli ultimi 5 anni del Termoutilizzatore e della centrale Lamarmora.
- Dati forniti da RAMET relativi alle emissioni delle aziende industriali del territorio bresciano, congruenti ai settori industriali individuati dell'Inventario Nazionale ISPRA. Tali dati sono stati aggiornati con i dati di esercizio delle aziende presenti sul territorio, secondo i criteri di seguito descritti:
 - I dati di PCDD/F (g TEQ/anno) sono riferiti al valore medio del triennio 2013-2015 e sono relativi alle misure previste dai piani di monitoraggio delle Autorizzazioni Integrate Ambientali (AIA).
 - I dati dei PCB dioxin like (g TEQ/anno) sono riferiti alle misure previste dai piani di monitoraggio aziendale estese ai PCB dioxin like per il 2016, anno ritenuto maggiormente rappresentativo della situazione produttiva attuale, anche in ragione di una migliorata precisione analitica e della effettiva disponibilità delle misure.
 - Le emissioni dei PCB totali (kg/anno) sono riferite alle analisi 2016, se presenti, ovvero stimate con un rapporto sperimentale rispetto ai quantitativi dei PCB dioxin like in massa, analogamente a quanto già effettuato da ARPA Lombardia in altri lavori (rapporto utilizzato PCB dioxin like in massa / PCB totali = 3%).

L'integrazione delle diverse fonti emissive ha comportato la trattazione di una serie di problematiche quali:

- Individuazione della porzione di emissioni indicate nell'inventario ISPRA già considerate nelle emissioni puntuali fornite da A2A e RAMET. Per quanto riguarda le emissioni di microinquinanti fornite da A2A, tali emissioni si riferiscono al macrosettore del trattamento e smaltimento dei rifiuti, che è stato considerato completamente coperto dai dati forniti da A2A. Per quanto riguarda le aziende relative

al comparto acciaio, tutti i dati relativi al macrosettore 4, settore acciaio sono stati sostituiti con quelli maggiormente aggiornati forniti da RAMET. Lievemente diversa la situazione per le emissioni dovute alla produzione di alluminio (pressoché interamente assegnate nell'inventario ISPRA al Macrosettore 3, settore alluminio secondario). Infatti, non essendo i dati RAMET comprensivi di tutte le aziende del territorio, si è resa necessaria un'analisi relativa alla frazione di emissione considerata da tali dati. L'analisi, realizzata sulla base dell'attuale livello produttivo delle aziende considerate e dei fattori di emissione utilizzati per il calcolo del totale emissivo nell'ambito dell'inventario ISPRA, ha confermato che il dato di emissione fornito da RAMET può essere considerato rappresentativo della situazione attuale di questo settore.

- Spazializzazione su griglia del dato ISPRA. Il modello CAMx necessita per la gestione delle emissioni areali di un dato grigliato sul dominio di calcolo. Il dato provinciale ISPRA per i macrosettori relativi alle emissioni areali (riscaldamento, traffico, emissioni naturali) e alle emissioni puntuali (per le quali però non si può desumere dall'inventario il camino di appartenenza) sono stati ripartiti prima sui diversi comuni del territorio e poi su griglia, utilizzando come variabile proxy la emissione dei metalli o degli IPA presente nell'inventario INEMAR per la provincia di Brescia e per quelle limitrofe. A partire dalle emissioni comunali la grigliatura è stata realizzata come indicato nel paragrafo 2.3.
- Calcolo dei PCB dioxin like per l'inventario ISPRA. L'inventario nazionale presenta solo il dato relativo alle emissioni di PCB totali; quindi si sono rese necessarie delle approssimazioni per il calcolo della frazione di PCB dioxin like, definita in termini di tossicità equivalente, per i macrosettori relativi alla produzione di energia e al riscaldamento domestico. Il fattore di conversione è stato ricavato dai dati misurati di PCB totali e PCB dioxin like forniti da A2A per il Termoutilizzatore.

La Tabella 5.1 presenta la stima delle emissioni utilizzate per le simulazioni sul dominio di indagine, calcolate sulla base delle assunzioni precedenti. Le emissioni relative alle aziende del consorzio RAMET sono state considerate separatamente da quelle delle aziende non appartenenti al consorzio, che sono state inserite nel gruppo "Altra Industria". Analogamente a quanto riportato nel capitolo 4 il gruppo emissivo "Impianti Teleriscaldamento Brescia" include le emissioni del Termoutilizzatore, della centrale Lamarmora e della centrale Nord.

Nella prima e seconda colonna della tabella sono riportati rispettivamente i gruppi emissivi e i corrispondenti settori CORINAIR presi in considerazione (nel caso di emissioni non nulle) per l'analisi di Source Apportionment dei microinquinanti.

Tabella 5.1: Emissioni totali annuali di diossine e furani (g TEQ/anno), PCB dioxin like (g TEQ/anno) e PCB totali (kg/anno) sul dominio di simulazione distribuite per gruppo emissivo.

GRUPPI EMISSIVI	Macrosettori CORINAIR	PCDD/F [g TEQ/anno]	PCB-DL [g TEQ/anno]	PCB-TOT [kg/a]
Impianti Teleriscaldamento Brescia	1,9	0.021	0.002	0.004
RAMET	3,4	1.384	0.255	6.369
Altra Industria	3,4	0.039	0.046	1.743
Traffico	7,8	0.432	-	-
Riscaldamento	2	4.433	2.097	3.898
Produzione di Energia	1	0.066	0.230	0.428
Altre sorgenti e assorbimenti	11	0.010	-	-
TOTALE		6.385	2.63	12.442

La ripartizione delle emissioni nei diversi gruppi emissivi (Figure 5.1 – 5.3) vede una prevalenza delle emissioni dovute al riscaldamento domestico e alle attività industriali per tutti e tre gli inquinanti considerati. La distribuzione spaziale delle emissioni (Figure 5.4-5.6) mostra come i valori stimati siano particolarmente significativi nei dintorni dei maggiori centri urbani del dominio (come intuibile dal significativo contributo del riscaldamento domestico).

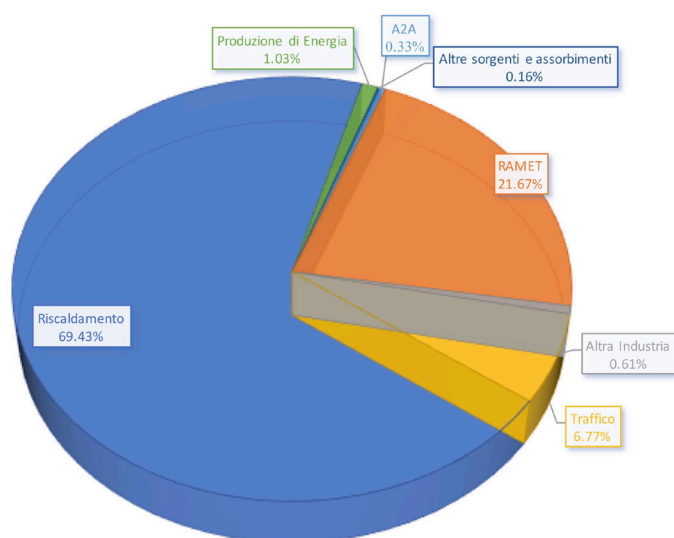


Figura 5.1: Ripartizione percentuale delle emissioni di PCDD/F nei diversi gruppi emissivi.

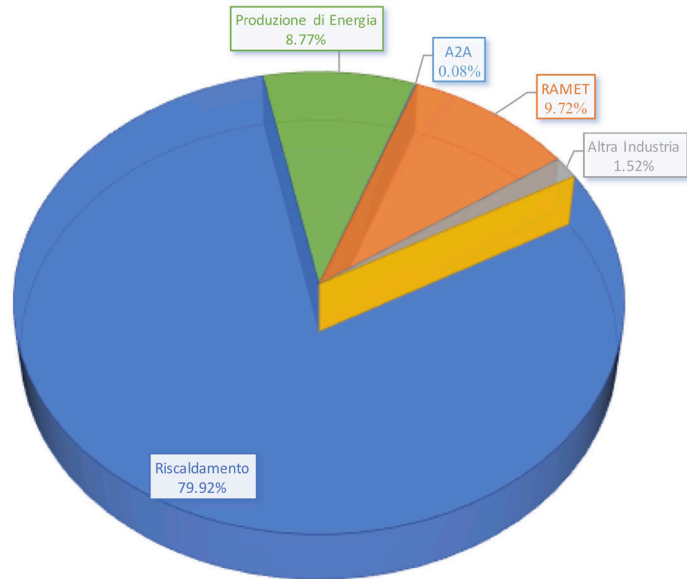


Figura 5.2: Ripartizione percentuale delle emissioni di PCB-DL nei diversi gruppi emissivi.

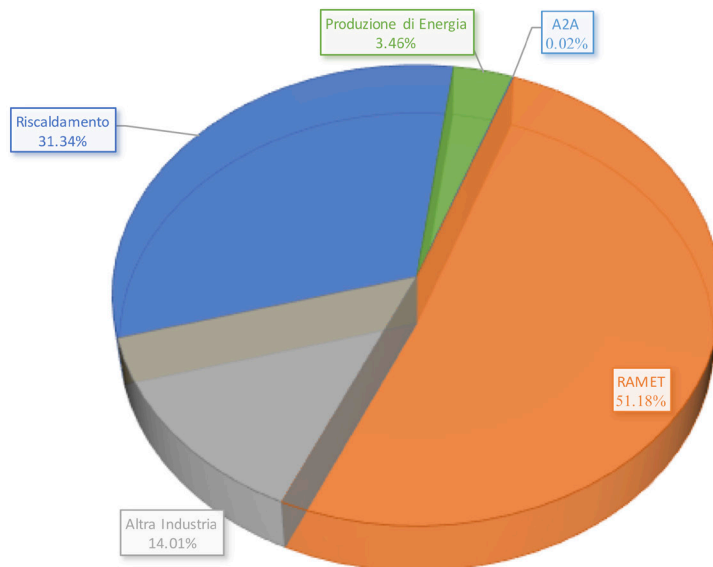


Figura 5.3: Ripartizione percentuale delle emissioni di PCB-TOT nei diversi gruppi emissivi.

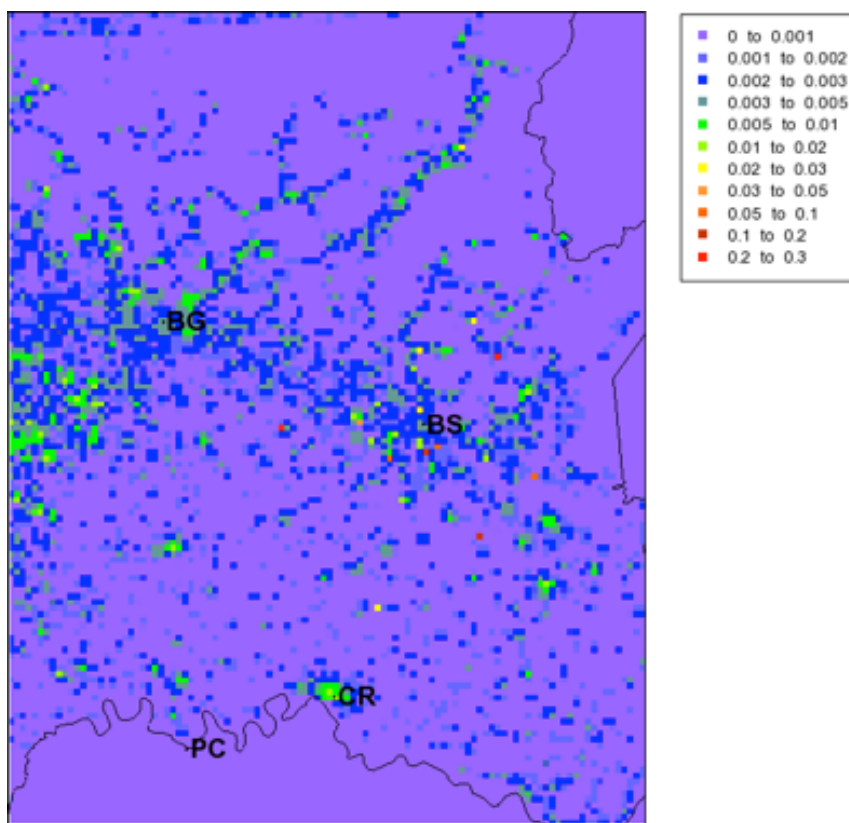


Figura 5.4: Emissioni complessive di PCDD/F sul dominio in esame (g TEQ/anno).

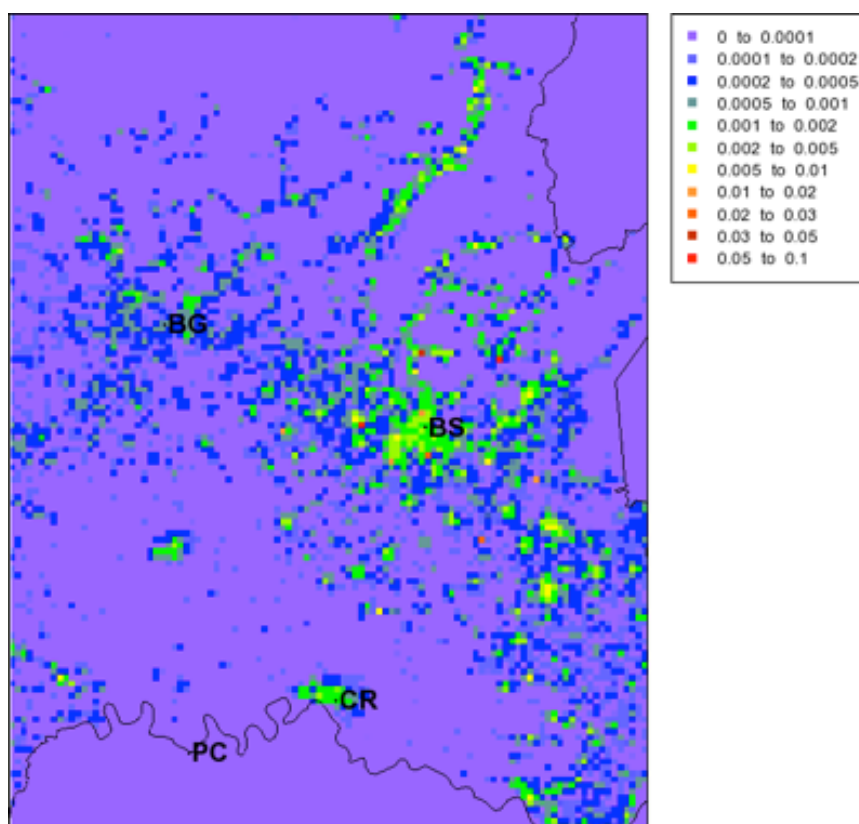


Figura 5.5: Emissioni complessive di PCB-DL sul dominio in esame (g TEQ/anno).

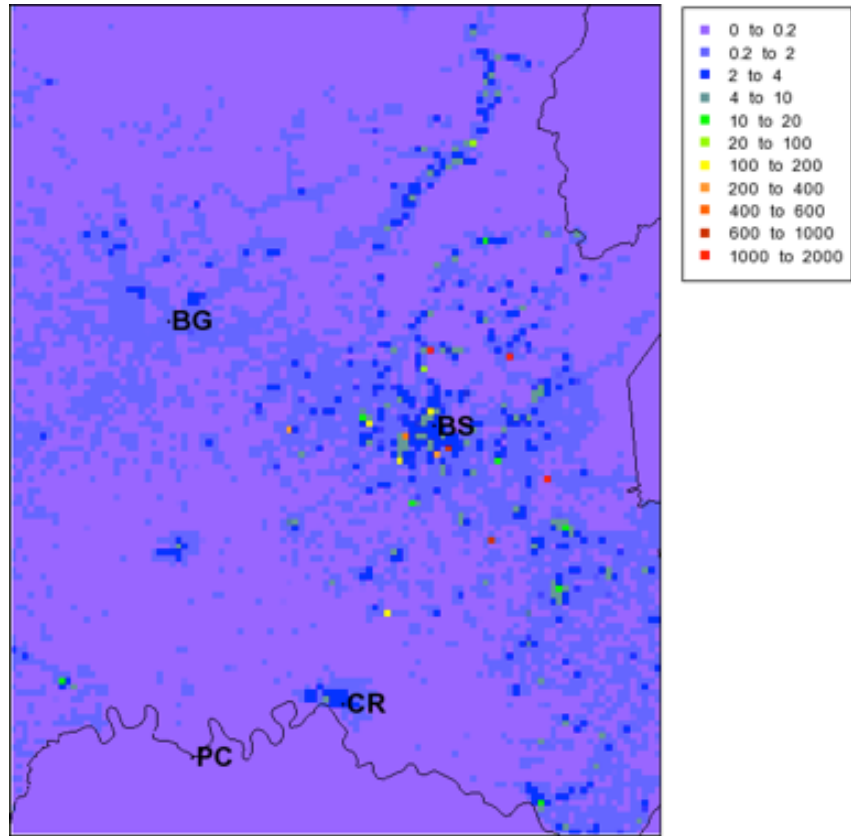


Figura 5.6: Emissioni complessive di PCB-TOT sul dominio in esame (g/anno).

5.2 Risultati della simulazione modellistica

5.2.1 Diossine e furani (PCDD/F)

La Figura 5.7 presenta la mappa della media annuale delle concentrazioni di PCDD/F (fg TEQ/m³) simulate dal modello CAMx. Come si può notare, i valori sono molto inferiori alla soglia di riferimento fissata dal World Health Organization (WHO) a 300 fg TEQ/m³ e risultano maggiori di 1 fg TEQ/m³ esclusivamente nella fascia centrale del dominio, nella zona tra i comuni di Brescia e Bergamo e in una banda a nord (Valle Camonica).

La Figura 5.8 mostra come i contributi predominanti siano quello del riscaldamento domestico, avente un valore massimo di 6.26 fg TEQ/m³, e quello delle attività industriali che raggiunge un valore complessivo massimo di circa 5 fg TEQ/m³. Trascurabile l'impatto delle emissioni relative al gruppo "Impianti di Teleriscaldamento Brescia", che presentano un valore massimo inferiore ad 1 fg TEQ/m³.

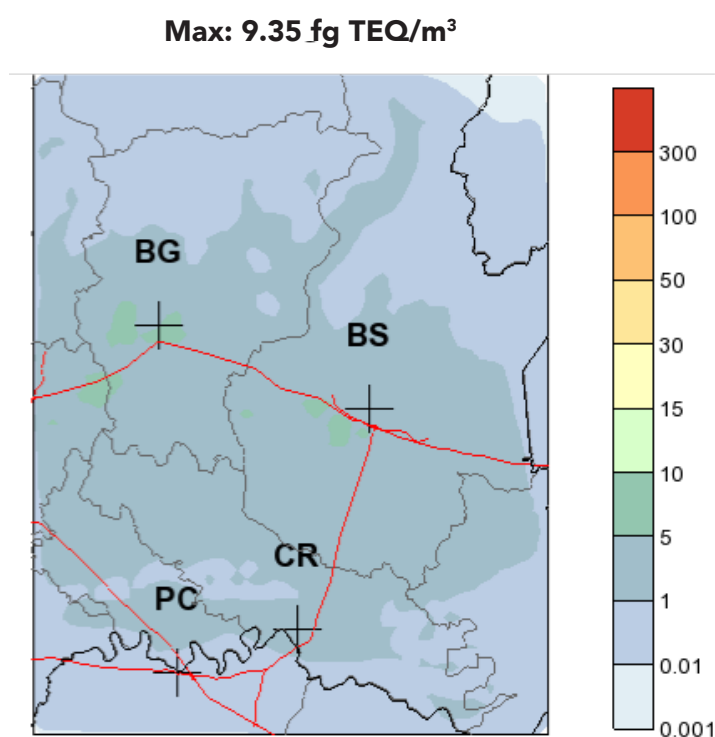


Figura 5.7: Concentrazione media annuale di PCDD/F (fg TEQ/m³).

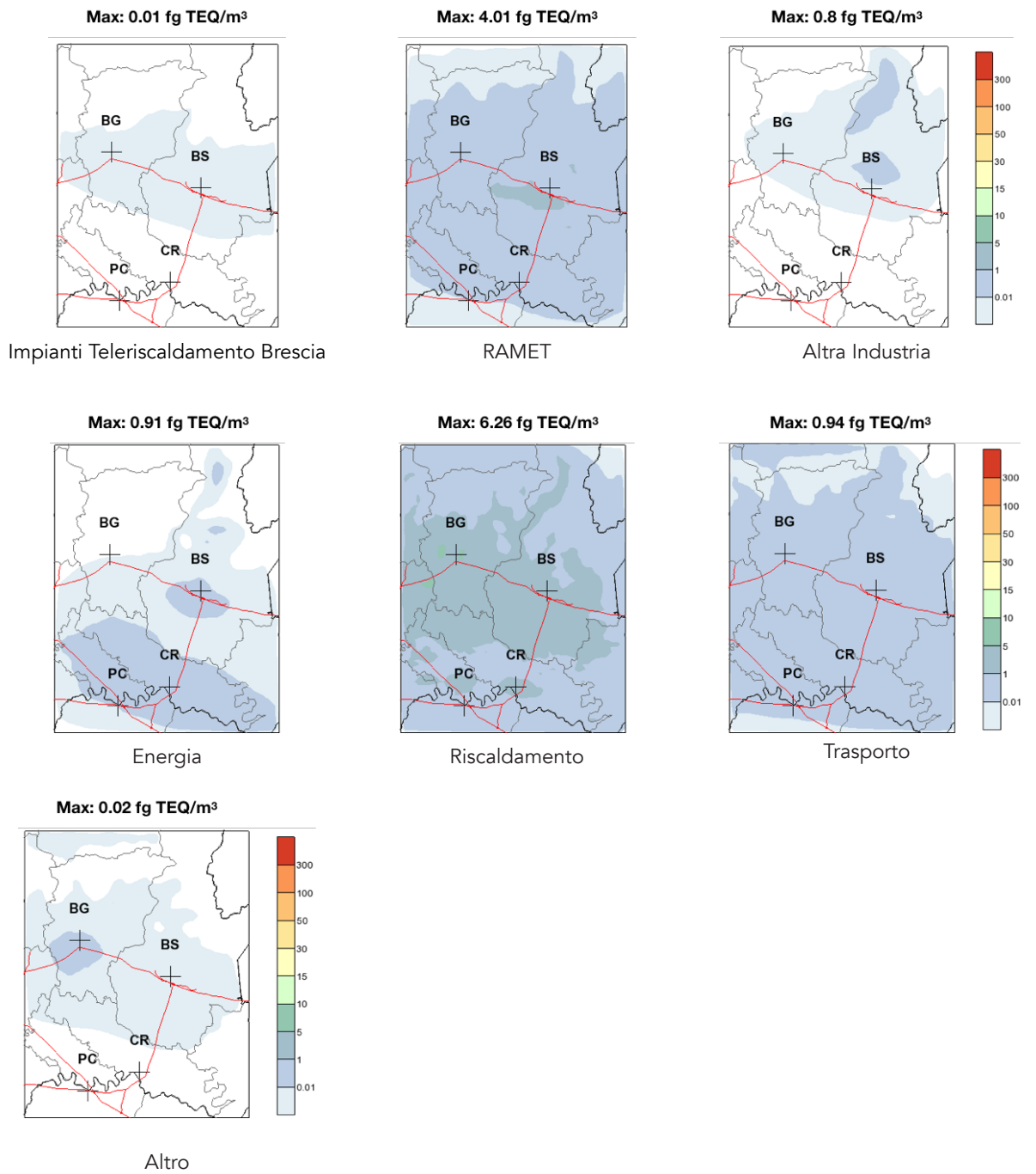


Figura 5.8: Impatto sulla concentrazione media annuale di PCDD/F per i diversi gruppi emissivi (fg TEQ/m³).

5.2.2 PCB Dioxin Like (PCB-DL)

I valori di media annuale calcolati per i PCB-DL (fg TEQ /m³) sono inferiori (circa il 50%) rispetto a quelli stimati per i PCDD/F (Figura 5.9). Come si può notare anche in questo caso quello del riscaldamento domestico (Figura 5.10) rappresenta il maggior contributo alla concentrazione media annua con valori di fatto confrontabili con quelli della concentrazione media annua. Minore risulta l'impatto dell'industria metallurgica (gruppo RAMET) e della produzione di energia che raggiungono valori di concentrazione comunque inferiori a 2 fg TEQ/m³.

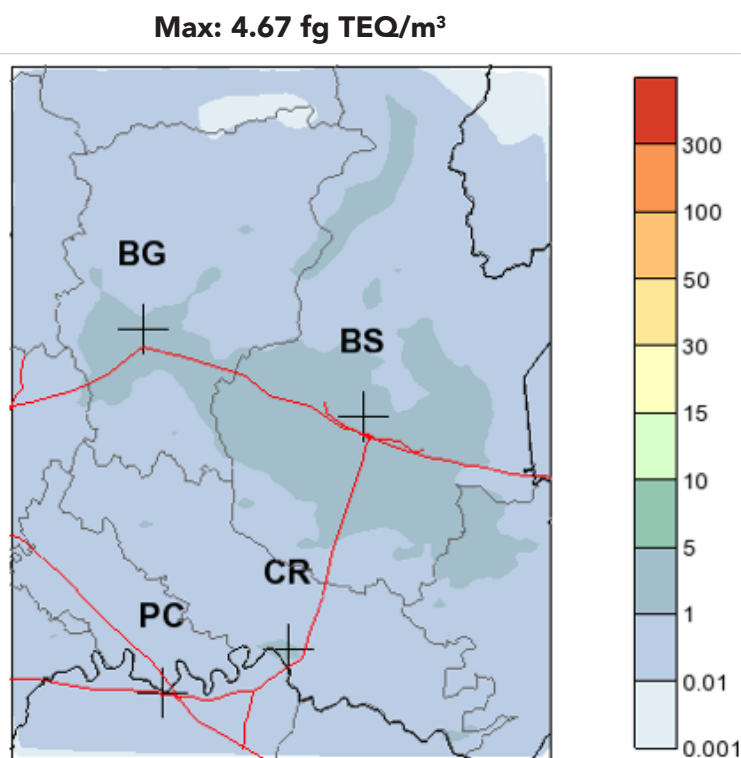


Figura 5.9: Concentrazione media annuale di PCB-DL (fg TEQ /m³).

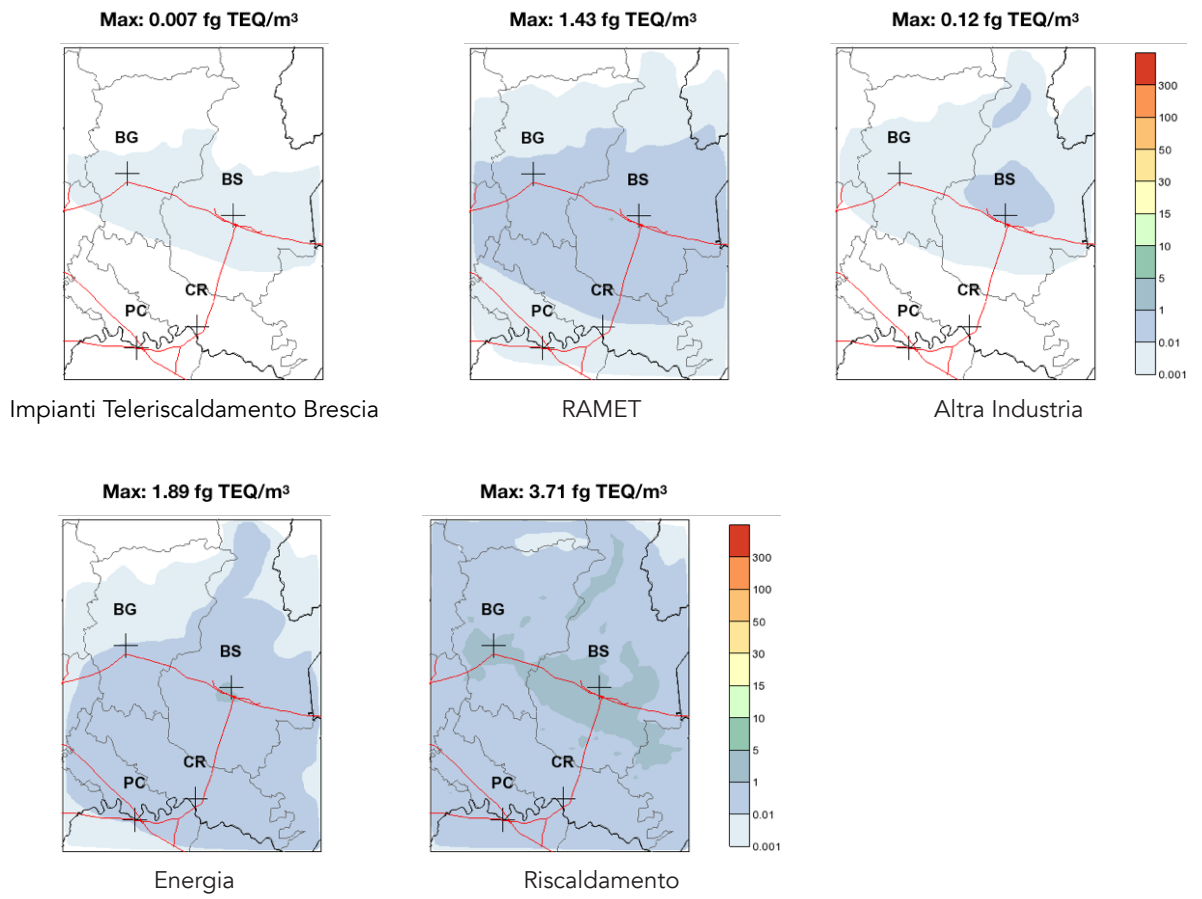


Figura 5.10: Impatto sulla concentrazione media annuale di PCB-DL per i diversi gruppi emissivi (fg TEQ/m³).

5.2.3 PCB Totali (PCB-TOT)

La distribuzione spaziale della media annuale delle concentrazioni di PCB-TOT (pg/m^3), mostrata nelle Figure 5.11 e 5.12, risulta molto simile a quella dei PCB-DL, data la forte correlazione esistente tra le due specie, amplificata peraltro dalle approssimazioni assunte per la stima del dato dei PCB-DL a partire da quello ISPRA di PCB-TOT.

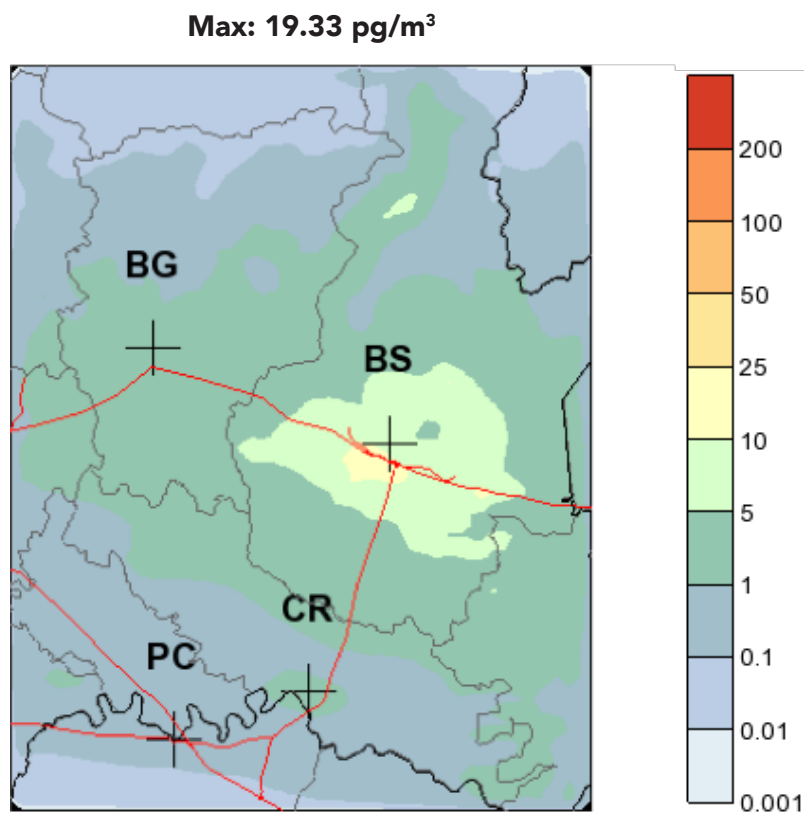


Figura 5.11: Concentrazione media annuale di PCB-TOT (pg/m^3).

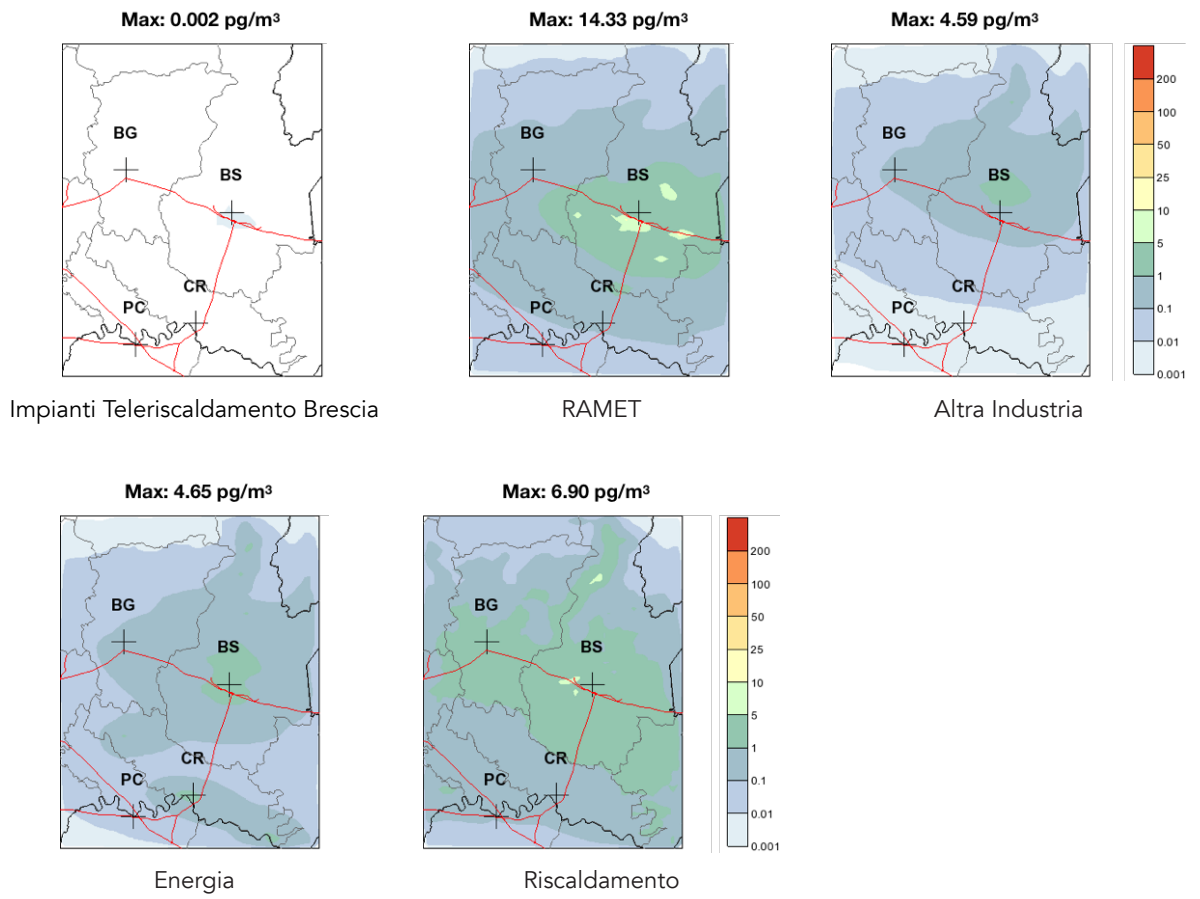


Figura 5.12: Impatto sulla concentrazione media annuale di PCB-TOT per i diversi gruppi emissivi (pg/m³).

5.3 Integrazione con altre fonti di informazione

Nel dominio è presente un solo punto di misura delle concentrazioni di microinquinanti in atmosfera. Tale postazione è installata sul tetto della sede di RAMET (Via Cefalonia, Brescia) e fornisce rilevazioni di microinquinanti a partire dall'anno 2015. Tale ristrettezza di dati e il fatto che essi facciano riferimento ad un anno differente dall'anno meteorologico utilizzato (2011) rende la valutazione delle prestazioni del modello di difficile realizzazione e interpretazione. Da un confronto tra le medie annuali simulate dal modello in corrispondenza al punto in cui si trova la postazione e i dati misurati nell'anno 2016 (unico anno intero di dati a disposizione) si evidenzia una aderenza soddisfacente per PCDD/F (modello: 9.1 fg TEQ /m³, misure: 18.9 fg TEQ /m³) e PCB-DL (modello: 2.9 fg TEQ /m³, misure: 3.4 fg TEQ /m³). Il dato simulato di PCB-TOT risulta invece sottostimato rispetto alle misure in aria ambiente (modello: 19 pg/m³, misure 200 pg/m³), aspetto che merita di essere ulteriormente approfondito.

Al fine di fornire come input all'analisi degli impatti sulla salute (Parte III) un dato maggiormente conservativo e indicativo della situazione sul territorio, le mappe di concentrazione media annuale (Figure 5.7, 5.9 e 5.11) sono state rianalizzate attraverso una tecnica di *bias correction*. Come evidenziato dalle Figure 5.13-5.15, l'utilizzo di questa tecnica permette di ottenere risultati su Brescia più vicini al dato misurato.

I risultati evidenziano tuttavia come la scarsità di dati misurati e il limitato aggiornamento degli inventari di emissione attualmente disponibili per i microinquinanti considerati, in particolare per i PCB-TOT, siano i maggiori limiti alla realizzazione di simulazioni le cui prestazioni possano essere validate.

Max: 20.12 fg TEQ/m³

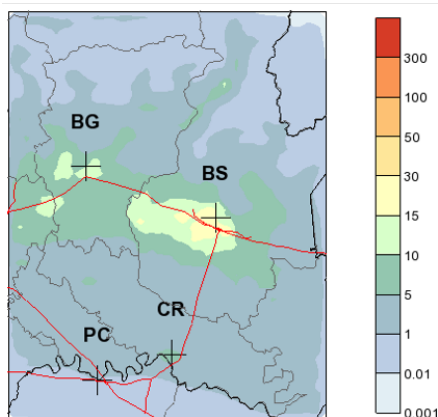


Figura 5.13: Concentrazione media annuale rianalizzata di PCDD/F (fg TEQ /m³).

Max: 5.61 fg TEQ/m³

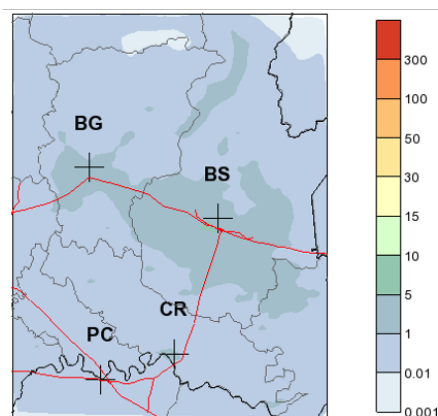


Figura 5.14: Concentrazione media annuale rianalizzata di PCB-DL (fg TEQ /m³).

Max: 211.01 pg/m³

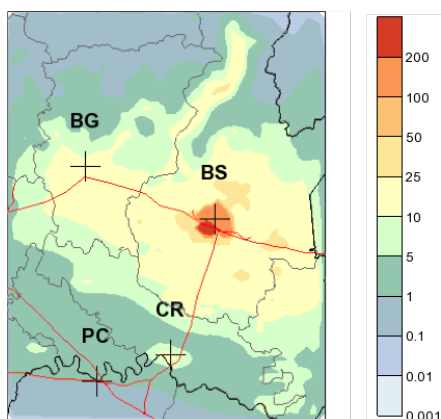


Figura 5.15: Concentrazione media annuale rianalizzata di PCB-TOT (pg /m³).

6 Conclusioni

Questo studio segue altri precedenti, il primo del 2004 con successivi aggiornamenti fino al 2011, già effettuati sul territorio bresciano, ma presenta importanti novità soprattutto relativamente all'approccio metodologico che integra competenze modellistiche complesse per la valutazione dell'impatto delle diverse sorgenti inquinanti, dei costi di riduzione delle emissioni e dei danni alla salute dei cittadini. In particolare sono stati presi in considerazione, oltre agli inquinanti primari, emessi alla sorgente, anche quell'ampia categoria di inquinanti secondari, quali il particolato fine, il biossido d'azoto e l'ozono, che sono in toto o in parte significativa frutto di complessi meccanismi di trasformazione chimico fisica che avvengono in atmosfera nella fase di trasporto, con forte influenza delle caratteristiche meteorologiche presenti.

Data la complessità del processo di formazione degli inquinanti secondari, l'area oggetto dello studio è stata inizialmente estesa al bacino padano, che presenta una conformazione orografica e condizioni meteorologiche che favoriscono la formazione e l'accumulo degli inquinanti stessi. Si è poi ristretto il focus sulla provincia bresciana al fine di ottenere risultati di maggior dettaglio e interesse per il territorio.

Il sistema modellistico utilizzato è costituito da moduli di ampio uso a livello nazionale e internazionale, disponibili con licenza open source. Il cuore del sistema è il modello euleriano CAMx, che consente di simulare la dispersione degli inquinanti a diverse scale, trattare composti sia inerti che reattivi e ricostruire l'origine dei composti stessi senza trascurare le complesse relazioni non lineari che caratterizzano il fenomeno.

Il dataset emissivo in input al modello è stato messo a punto partendo dalle emissioni annuali di VOC, CO, NO_x, NH₃, SO₂, PM10 e PM2.5 disaggregate per ogni cella dei due domini (bacino padano e area bresciana), dai profili temporali delle emissioni e dai profili di speciazione chimica e distribuzione granulometrica dei VOC e del PM10.

Sono state effettuate simulazioni modellistiche dell'impatto medio annuale sulla qualità dell'aria in entrambi i domini per i macroinquinanti: ozono (O₃), biossido di azoto (NO₂), particolato fine con diametro uguale o inferiore a 10 µm (PM10). Tali simulazioni sono state validate sulla base del confronto quantitativo, grafico e statistico con i dati di concentrazione dei diversi inquinanti misurati dalle postazioni di monitoraggio di qualità dell'aria. Il modello ha mostrato capacità di individuare le zone particolarmente critiche nel dominio padano, quali la parte centrale della Pianura Padana e i principali centri urbani. Relativamente all'area di Brescia sono state ben evidenziate le criticità derivanti dalla presenza di orografia complessa a nord e dalla vicinanza ad importanti direttrici autostradali.

Contestualmente alle simulazioni è stata realizzata una analisi di Source Apportionment per i tre macroinquinanti considerati.

Per quanto riguarda l'ozono (O₃), l'impatto delle diverse sorgenti emissive risulta dominato dalla natura fortemente non lineare ed esclusivamente secondaria di tale inquinante. Inoltre la persistenza in atmosfera relativamente elevata dell'ozono comporta fenomeni di trasporto anche a lungo raggio delle sue concentrazioni formatesi in presenza di emissioni di precursori. Ne consegue una scarsa possibilità di intervenire per limitare le concentrazioni di ozono in modo significativo attraverso provvedimenti esclusivamente regionali; emerge quindi la necessità di strategie che coinvolgano almeno gruppi di regioni, ma più verosimilmente

l'intera nazione e/o i territori confinanti.

Per quanto riguarda il biossido di azoto (NO_2), il settore emissivo del trasporto su strada contribuisce in modo predominante alle concentrazioni dell'inquinante, unitamente ad un più ampio spettro di gruppi emissivi (in particolare: produzione di energia, riscaldamento, processi industriali) coinvolti in modo significativo nei fenomeni di formazione e accumulo di NO_2 . Risulta dunque particolarmente significativo (circa 70% del totale) il contributo delle emissioni sulle quali è possibile intervenire, in particolare internamente al territorio considerato.

Per quanto riguarda il particolato fine (PM_{10}), i risultati dell'analisi di Source Apportionment evidenziano un significativo e confrontabile impatto del riscaldamento domestico, del traffico e dell'agricoltura; quest'ultima, a causa delle elevate emissioni di ammoniaca (dovute tipicamente ad uno spandimento non controllato dei liquami), governa la formazione di nitrato e solfato d'ammonio e quindi fornisce un contributo molto elevato alla formazione di aerosol secondario. L'analisi ha messo in risalto in particolare la difficile situazione di città come Milano e Brescia, per le quali ad importanti contributi dovuti alla presenza di consistenti aree urbane e industriali si somma anche il significativo contributo dovuto alla vicinanza con aree agricole a forti emissioni di ammoniaca.

E' stata infine effettuata la simulazione modellistica della dispersione di microinquinanti in atmosfera relativamente al solo dominio di zoom sull'area bresciana. Le simulazioni hanno riguardato le concentrazioni di diossine/furani (PCDD/F), PCB dioxin like e PCB totali.

Ne è risultato che i valori delle concentrazioni di PCDD/F ($\text{fg TEQ}/\text{m}^3$) medi annuali risultano molto inferiori alla soglia di riferimento fissata dal World Health Organization (WHO) a $300 \text{ fg TEQ}/\text{m}^3$ e risultano maggiori di $1 \text{ fg TEQ}/\text{m}^3$ esclusivamente nella fascia centrale del dominio, nella zona tra i comuni di Brescia e Bergamo e in una banda a nord (Valle Camonica). Appaiono percentualmente predominanti i contributi del riscaldamento domestico e quello delle attività industriali, mentre trascurabile è l'impatto delle emissioni relative al gruppo "Impianti di Teleriscaldamento Brescia".

I valori di media annuale calcolati per i PCB-DL ($\text{fg TEQ}/\text{m}^3$) sono inferiori (circa il 50%) rispetto a quelli stimati per i PCDD/F. Anche in questo caso quello del riscaldamento domestico rappresenta il maggior contributo alla concentrazione media annua, mentre minore risulta l'impatto dell'industria metallurgica e della produzione di energia.

Infine la distribuzione spaziale della media annuale delle concentrazioni di PCB-TOT (pg/m^3) risulta molto simile a quella dei PCB-DL, data la forte correlazione esistente tra le due specie.

7 Bibliografia

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.

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.

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.

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.

