



# STUDIO MODELLISTICO SULLA QUALITÀ DELL'ARIA DEL TERRITORIO AFFERENTE AL DISTRETTO DI CREMONA

*Relazione Tecnica*

*Novembre 2022*

*Fabrizio Ferrari, Giuseppe Maffeis [g.maffeis@terraria.com](mailto:g.maffeis@terraria.com) 02/87085651*

 **TerrAria** s.r.l.

# Indice

INDICE.....	2
1. INTRODUZIONE.....	3
2. METODOLOGIA UTILIZZATA .....	4
2.1 Il Modello UTAQ.....	4
2.2 Disaggregazione spaziale delle emissioni.....	8
2.3 Disaggregazione temporale.....	20
2.4 Variabili meteo .....	22
2.5 Aggregazione delle emissioni .....	24
3. RISULTATI OTTENUTI (ANNO 2019).....	25
3.1 Concentrazioni di PM10 .....	25
3.2 Concentrazioni di PM2.5 .....	30
3.3 Concentrazioni di NO2.....	33
4. VALIDAZIONE DEI RISULTATI (ANNO 2019).....	38
4.1 Confronto con i valori osservati .....	38

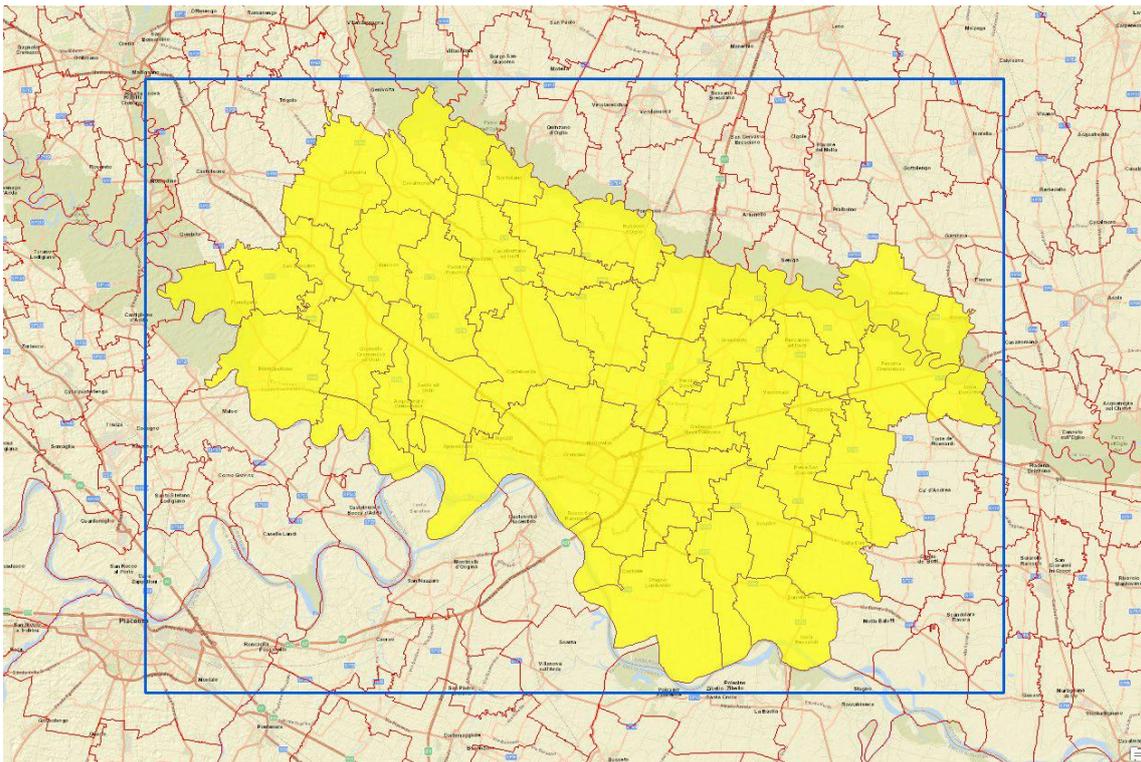
# 1. INTRODUZIONE

Il presente documento descrive il processo di costruzione dei dati di input e i principali risultati ottenuti a seguito dell'applicazione di un modello di dispersione degli inquinanti ad alta risoluzione nella porzione di territorio nell'intorno del distretto socio-sanitario di Cremona.

Gli esiti delle simulazioni, ovvero le concentrazioni degli inquinanti analizzati, saranno successivamente utilizzate dall'ATS della Val Padana (ATS Val Padana) per condurre uno studio di epidemiologia ambientale per valutare l'esposizione agli inquinanti della popolazione residente a Cremona e nei comuni limitrofi nonché l'impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute dei cittadini.

Il dominio di simulazione, con una risoluzione di celle di 50m x 50m e un'estensione di 51km x 37km, è rappresentato nella figura seguente ed è stato costruito per comprendere tutti i 47 comuni del distretto socio-sanitario di Cremona (evidenziati in giallo).

Il periodo temporale considerato sono gli anni compresi tra il 2007 e il 2019.



*Figura 1: Dominio di simulazione*

Nel capitolo successivo sono descritti nel dettaglio il modello di dispersione utilizzato e i passaggi adottati per la disaggregazione spaziale e temporale delle emissioni comunali per tutti gli anni simulati.

Infine, negli ultimi capitoli vengono mostrati la validazione del modello (capitolo 4) e i risultati ottenuti per il PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> e l'NO<sub>2</sub> (capitolo 3).

## 2. METODOLOGIA UTILIZZATA

### 2.1 Il Modello UTAQ

Per la valutazione delle ricadute in termini di qualità dell'aria è stato utilizzato l'innovativo strumento modellistico UTAQ<sup>1</sup>.

Il tool UTAQ (Urban Tool for Air Quality) è uno strumento sviluppato da TerrAria nell'ambito dell'omonimo progetto europeo finanziato dal CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) dell'ECMWF<sup>2</sup> (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) che ha previsto lo sviluppo di un applicativo Web per la previsione della qualità dell'aria a scala urbana ad alta risoluzione.

L'obiettivo del progetto è stato quello di creare uno strumento modellistico in grado di consentire da un lato ai cittadini, funzionari tecnici ed epidemiologi di conoscere e quindi limitare l'esposizione agli inquinanti atmosferici sulla base della propria posizione (via GPS) e dall'altra ai pianificatori territoriali e ai decisori di valutare preventivamente l'effetto sul rientro del superamento dei limiti normativi di qualità dell'aria, delle limitazioni sul traffico e sui veicoli (ad es. riduzione del traffico, limitazione dei veicoli pesanti, costituzione di aree *Low Emission Zone*, etc.).

Lo strumento è stato creato per fornire mappe di qualità dell'aria ad alta risoluzione, sia in modalità diagnostica (analisi dello stato di fatto e di scenario) sia prognostica, per le previsioni fino a 4 giorni.

Per la valutazione delle ricadute all'interno del distretto socio-sanitario di Cremona il tool UTAQ è stato utilizzato nella modalità diagnostica in una modalità "evoluta", infatti le simulazioni non si sono limitate allo studio della sola componente locale del traffico (modalità per cui è stata definita la prima versione del tool), ma a tutte le componenti emissive presenti nel territorio in esame.

Di seguito viene presentata una descrizione dettagliata delle configurazioni adottate. Invece per una descrizione esaustiva del modello di calcolo si rimanda agli articoli scientifici del progetto pubblicati dalla rivista *Ingegneria Ambientale*<sup>3</sup> e dall'*Environmental Engineering and Management Journal*<sup>4</sup>.

#### 2.1.1 L'architettura di UTAQ

UTAQ, nella versione originale del tool, sposando l'approccio "semplificato" che vede l'inquinamento atmosferico cittadino composto da tre componenti (Harrison, 2018) come rappresentato schematicamente nella figura successiva, integra pertanto 3 contributi (si faccia riferimento agli articoli scientifici nelle note 3 e 4 per i dettagli metodologici):

1. le concentrazioni del background regionale (parte in verde) attraverso le stime del modello a scala europea ENSEMBLE del Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)– European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) che mette a disposizione quotidianamente 4 giorni di previsioni orarie di vari inquinanti, tra cui in particolare il biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) ed il particolato sottile (PM10 e PM2,5);

<sup>1</sup> Sito di progetto: <https://www.utaq.eu>

<sup>2</sup> <https://www.ecmwf.int/>

<sup>3</sup> <https://www.ingegneriadellambiente.net/ojs/index.php/ida/article/view/231>

<sup>4</sup> [http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol19/no10/Full/29\\_112\\_Ferrari\\_20.pdf](http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol19/no10/Full/29_112_Ferrari_20.pdf)

2. il contributo cittadino (parte in azzurro-lilla) attraverso i dati di una o più stazioni di qualità dell'aria attraverso cui tener conto dell'accumulo cittadino degli inquinanti;
3. il contributo a livello stradale (parte rosso-gialla), in termini di media giornaliera di PM10 e PM2,5 e della concentrazione oraria di NO<sub>2</sub>, calcolato dalle emissioni locali di traffico attraverso specifiche funzioni orarie sorgente-recettore (kernel orari), in modo da rendere il calcolo veloce e affidabile anche ad alta risoluzione.

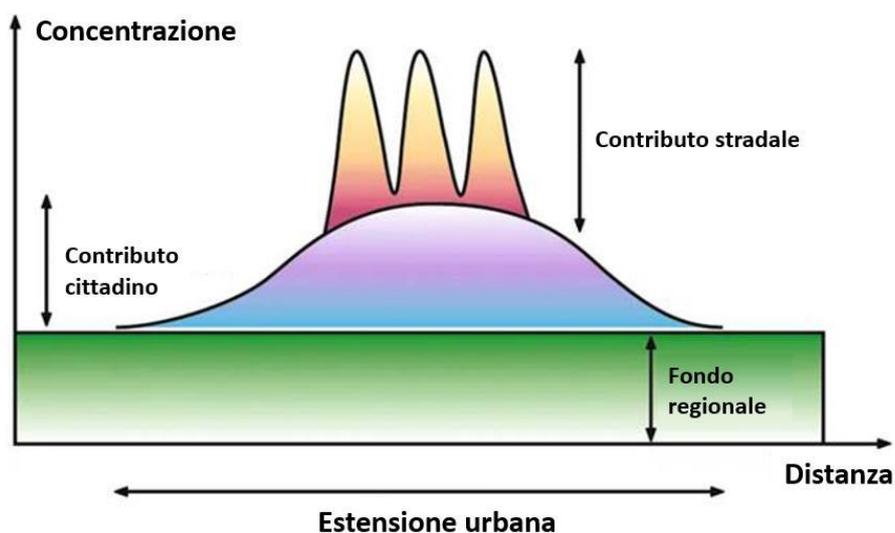


Figura 2: Profilo dell'inquinamento generato dalle emissioni locali in una città (Harrison, 2018)

Nella versione "evoluta" utilizzata per le simulazioni descritte all'interno del presente report sono state effettuate alcune modifiche al tool in modo da rendere ancora più precisa la stima degli inquinanti e venire incontro alle richieste di ATS ValPadana.

Si elencano di seguito alcune modifiche apportate:

- 1) per le concentrazioni di background sono stati utilizzate le concentrazioni stimate dal modello europeo dell'*European Monitoring and Evaluation Programme* (EMEP) in quanto mette a disposizione una serie storica di dati molto ampia (dal 2000 al 2019) rispetto al modello CAMS ENSEMBLE disponibile solo per gli ultimi 3 anni;
- 2) il contributo locale è stato stimato non solo attraverso le concentrazioni attribuibili al settore dei trasporti ma a tutti i principali settori emissivi presenti sul dominio di calcolo (trasporto, residenziale, industriale ed altre fonti);
- 3) per l'assunzione al punto precedente non è stato necessario integrare il risultato finale con il contributo cittadino stimato attraverso le stazioni di qualità dell'aria che sono state interamente utilizzate per la validazione dei risultati.

### 2.1.2 Il calcolo delle concentrazioni locali

La parte innovativa della metodologia UTAQ è rappresentata dall'impiego di funzioni sorgente-recettore gaussiane orarie denominate kernel per la stima delle concentrazioni locali di traffico.

A partire da una griglia di emissione in input i kernel permettono infatti di stimare la distribuzione delle concentrazioni locali degli inquinanti con tempi di calcolo ridotti. Ogni kernel, corrispondente ad una diversa condizione meteorologica, rappresenta la matrice gaussiana delle concentrazioni ottenute simulando la dispersione di 1 kg/h di un determinato inquinante con il modello gaussiano IFDM (Lefebvre et al., 2013<sup>5</sup>).

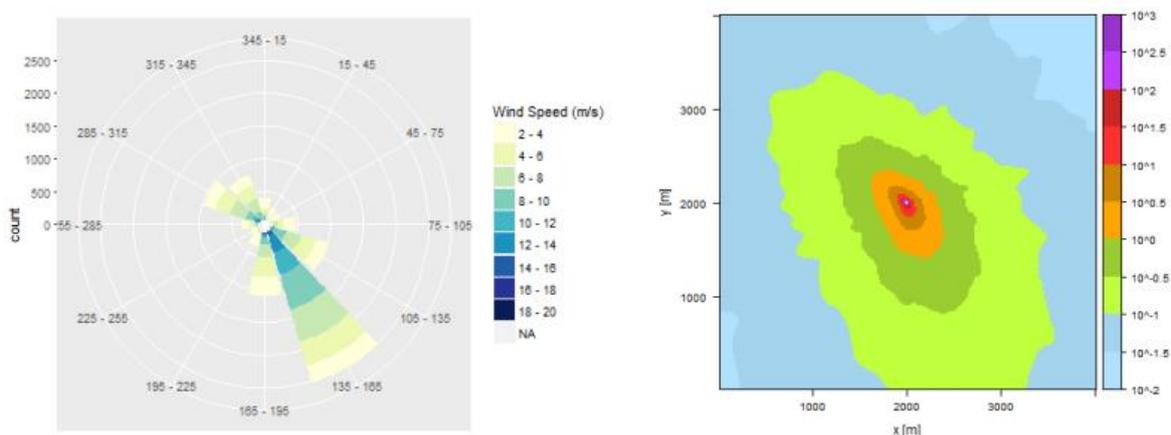


Figura 3: Esempio di campo di vento e relativo kernel associato (Degraeuwe et al. 20186)

Simulando differenti condizioni meteorologiche orarie è quindi possibile riprodurre l'andamento giornaliero delle concentrazioni di traffico a partire dalle emissioni orarie stimate secondo quanto descritto al paragrafo 2.2. Le variabili meteo richieste dal modello sono: direzione e velocità del vento, temperatura e radiazione solare incidente.

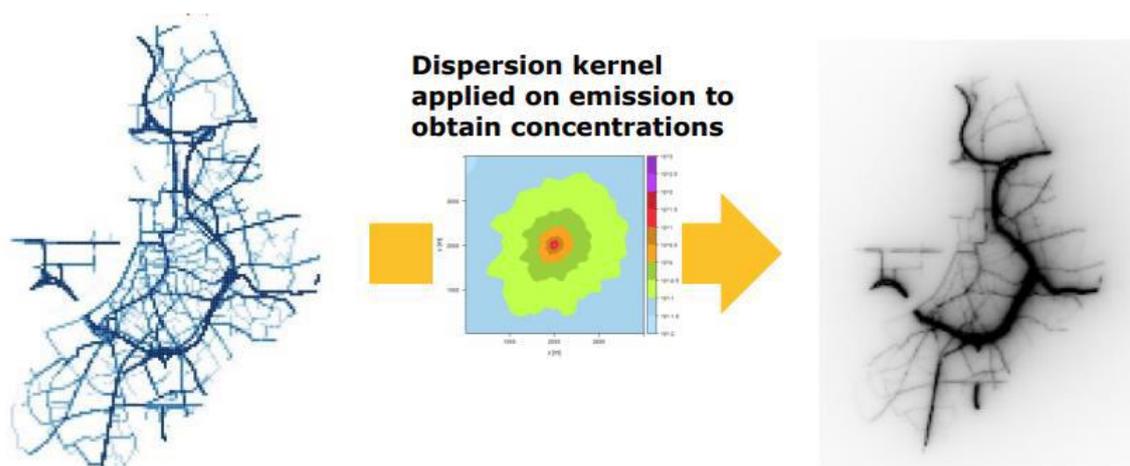


Figura 4: Applicazione del kernel alle emissioni grigliate (Degraeuwe et al. 2018)

<sup>5</sup> Lefebvre W., Van Poppel M., Maiheu B., Janssen S., Dons E. (2013) Evaluation of the RIO-IFDM-street canyon model chain. Atmospheric Environment. Volume 77, 2013. Pages 325-337

<sup>6</sup> Degraeuwe B., Peduzzi E., Pisoni E., Thunis P. (2018) SHERPA and SHERPA-city: screening tools for air quality modelling in Europe.

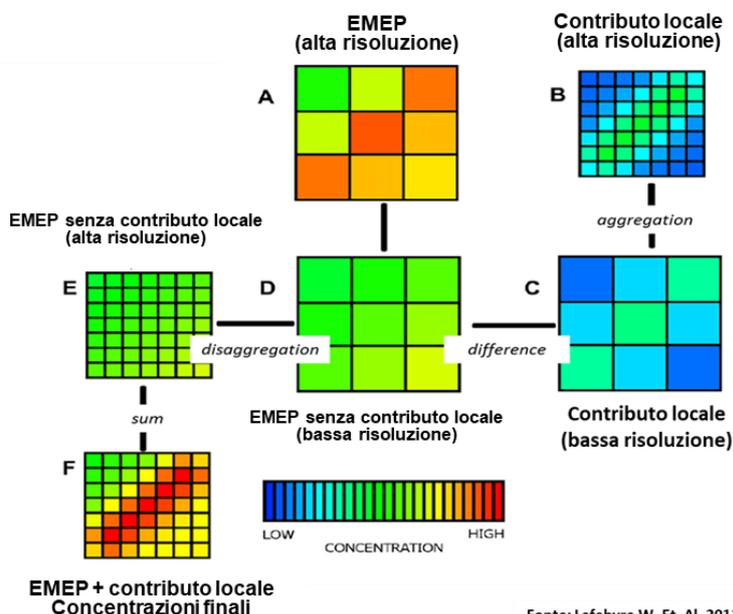
Per lo studio in esame, come già ricordato, per le emissioni si sono considerate tutte le principali fonti emissive, mentre per le variabili meteorologiche si sono utilizzate quelle misurate nelle diverse stazioni Arpa disponibili all'interno del territorio considerato.

### 2.1.3 Le concentrazioni di background regionale e l'integrazione con le concentrazioni locali

Come già specificato nei paragrafi precedenti per questo studio, come concentrazione di background regionale, sono state utilizzati i valori derivati dal modello previsionale a scala europea dell'*European Monitoring and Evaluation Programme* (EMEP). EMEP è un sistema modellistico realizzato dal CEIP (*Centre on Emission Inventories and Projections*) con la cooperazione degli stati europei (ai sensi della convenzione sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero, CLRTAP). EMEP è caratterizzato da macrosettori emissivi propri e da una risoluzione pari a  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , con una griglia costituita da circa 614'000 celle per un dominio spaziale che copre l'intera Europa.

L'integrazione delle concentrazioni di background con le concentrazioni locali (figura successiva) avviene attraverso i seguenti step:

1. aggregazione delle concentrazioni del contributo locale alla stessa risoluzione del modello EMEP (punto C in figura);
2. sottrazione al modello EMEP del contributo aggregato allo step precedente (punto D);
3. interpolazione del modello EMEP (senza le concentrazioni locali) calcolato allo step 2 alla stessa risoluzione del dominio di calcolo (punto E);
4. somma finale delle concentrazioni locali con il modello EMEP (punto F).



Fonte: Lefebvre W. Et. Al, 2011

Figura 5: Procedura adottata per l'integrazione delle concentrazioni locali con quelle derivanti dal modello EMEP (immagine riadattata da Lefebvre et al, 2011<sup>7</sup>).

<sup>7</sup> Lefebvre W. et al., Validation of the MIMOSA-AURORA-IFDM model chain for policy support: Modeling concentrations of elemental carbon in Flanders, Atmospheric Environment, Volume 45, Issue 37, 2011, Pages 6705-6713, ISSN 1352-2310

La procedura appena descritta permette quindi di aggregare contributi con risoluzioni spaziali differenti evitando un doppio conteggio delle emissioni già considerate all'interno del modello EMEP.

## 2.2 Disaggregazione spaziale delle emissioni

Le emissioni usate per le simulazioni per il calcolo delle concentrazioni locali negli anni dal 2016 al 2019 sono state ricavate dall'INventario delle Emissioni ARia (INEMAR<sup>8</sup>) delle regioni Lombardia e Emilia-Romagna, aggiornati all'anno 2017, che include le emissioni totali annuali con dettaglio comunale di macro e microinquinanti, disaggregate per attività emissiva in funzione della classificazione SNAP97 (Selected Nomenclature for Air Pollution). Per gli anni antecedenti, nei comuni interni alla regione Lombardia, sono state usate le emissioni provinciali dell'inventario aggiornate rispettivamente al 2014 per gli anni 2014 e 2015, 2012 per gli anni 2012 e 2013, 2010 per gli anni 2010 e 2011, e, infine, quelle aggiornate al 2008 per gli anni 2007, 2008 e 2009. Per i comuni appartenenti alla regione Emilia Romagna, invece, sono stati usati i dati, rispettivamente del 2015 e 2013 (unici anni disponibili).

Anno simulazione	INEMAR Lombardia	INEMAR Emilia Romagna
2007	2008	2013
2008	2008	2013
2009	2008	2013
2010	2010	2013
2011	2010	2013
2012	2012	2013
2013	2012	2013
2014	2014	2015
2015	2014	2015
2016	2017	2017
2017	2017	2017
2018	2017	2017
2019	2017	2017

Tabella 2.1: Suddivisione dei dati ottenuti da INEMAR per anno di simulazione

Le emissioni di INEMAR sono suddivise in 11 macrosettori:

1. Produzione energia e trasformazione combustibili
2. Combustione non industriale
3. Combustione nell'industria
4. Processi produttivi
5. Estrazione e distribuzione combustibili
6. Uso di solventi
7. Trasporto su strada
8. Altre sorgenti mobili e macchinari
9. Trattamento e smaltimento rifiuti

<sup>8</sup> <https://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/Inemar/HomeLombardia>

10. Agricoltura
11. Altre sorgenti e assorbimenti.

Queste, per poter procedere con una disaggregazione spaziale, le emissioni provinciali sono state ulteriormente suddivise sui comuni presenti nelle provincie del dominio. Per far ciò, per ogni anno esplicitato nella tabella precedente, è stata calcolata la variazione percentuale tra le emissioni provinciali per macrosettore dell'anno 2017 rispetto all'anno considerato. Moltiplicando, poi le emissioni comunali del 2017 per il rapporto percentuale, si sono ottenute le emissioni comunali per ogni anno di simulazione (Tabella 2.2).

Variazioni percentuali [%] delle emissioni rispetto all'anno 2017 per macrosettore emissivo												
Macrosettore	2014			2012			2010			2008		
	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
<b>1</b>	56.5	63.2	58.9	63.3	112.4	114.0	163.0	1252.6	1277.3	146.9	1509.9	1539.7
<b>2</b>	91.9	92.8	92.8	118.1	153.4	155.0	129.3	186.0	188.1	98.2	177.8	176.3
<b>3</b>	92.9	92.2	88.9	83.9	79.8	70.8	106.5	130.4	131.7	91.8	126.5	109.1
<b>4</b>	42.2	93.7	73.3	270.1	342.2	225.4	234.3	260.4	164.7	103.1	170.0	99.1
<b>5</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>6</b>	2.2	175.5	172.5	38.4	135.3	135.7	0.0	1.2	0.4	0.1	5.9	2.2
<b>7</b>	112.9	113.6	120.0	116.6	120.0	128.9	143.2	147.7	163.8	156.5	152.2	173.2
<b>8</b>	98.4	98.3	98.3	100.9	94.4	94.0	93.0	86.4	85.9	79.2	75.4	75.1
<b>9</b>	121.7	67.9	66.2	75.3	110.0	114.3	106.4	91.6	94.3	42.4	75.7	77.8
<b>10</b>	148.9	101.6	102.5	131.0	126.1	137.6	106.8	125.2	135.1	112.5	119.4	126.3
<b>11</b>	105.0	103.0	103.7	161.4	114.0	148.2	155.6	76.5	99.6	0.0	77.3	100.6

Tabella 2.2: Rapporto percentuale delle emissioni tra il 2017 e i diversi anni per la provincia di Cremona

Per la disaggregazione spaziale delle emissioni comunali sulle celle 50m x 50m utilizzate dal modello è stata adottata una procedura di grigliatura mediante l'utilizzo di variabili proxy cartografiche direttamente correlate con il fenomeno emissivo, quali i dati di copertura di suolo e la rete stradale.

I macrosettori emissivi (massimo dettaglio a cui sono messe a disposizione le emissioni a livello comunale) sono stati assegnati a 10 indicatori spaziali (variabili proxy) secondo lo schema presentato nella figura seguente.

Al macrosettore 5 relativo all'estrazione e distribuzione di combustibili non è stato assegnato alcun indicatore spaziale in quanto non sono presenti emissioni sul dominio di calcolo.

MS1	Produzione energia e trasform. combustibili	IND_1	} Indicatore poligonale Da: Uso del suolo DUSAF (anno 2018) + Uso del suolo EMR (anno 2017)
MS2	Combustione non industriale	URB	
MS3	Combustione nell'industria	IND_3	
MS4	Processi produttivi	IND_4	
MS5	Estrazione e distribuzione combustibili	N.D.	
MS6	Uso di solventi	IND_6	
MS8	Altre sorgenti mobili e macchinari	TRASP_ALTRI	
MS9	Trattamento e smaltimento rifiuti	RIF	
MS10	Agricoltura	AGR	
MS11	Altre sorgenti e assorbimenti	BIO	
MS7	Trasporto su strada	STRAD	

Figura 6: Indicatori spaziali utilizzati per la disaggregazione delle emissioni comunali.

I dati di copertura di suolo utilizzati sono stati estrapolati dalla banca dati del progetto DUSAF 6.0<sup>9</sup> (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali). Per le simulazioni degli anni dal 2016 al 2019 si è utilizzata la banca dati aggiornata al 2018 per i comuni della regione Lombardia e al 2017 (database uso del suolo) per quelli ricadenti all'interno della regione Emilia Romagna.

Per le simulazioni degli altri anni, invece, si sono utilizzati i dati delle banche dati del 2015, 2012 e 2009 (tranne per le provincie di Lodi e Mantova, per le quali si sono impiegati i dati del 2012, a causa dell'indisponibilità di informazioni) per i comuni della Lombardia e del 2014 e 2008 per i comuni dell'Emilia Romagna, suddivisi come riportato nella tabella seguente.

Anno simulazione	DUSAF Lombardia	Database uso del suolo Emilia Romagna
2007	2009	2008
2008	2009	2008
2009	2009	2008
2010	2012	2014
2011	2012	2014
2012	2012	2014
2013	2012	2014
2014	2015	2014
2015	2015	2014
2016	2018	2018
2017	2018	2018
2018	2018	2018
2019	2018	2018

Tabella 2.3: anni di riferimento utilizzati per le banche dati di uso del suolo

Per quanto riguarda il macrosettore 7, le emissioni sono state spalmate a partire dal grafo stradale e dai relativi flussi di traffico derivati da OpenTransportMaps (Jedlička et al., 2016) che fornisce la geolocalizzazione della rete stradale a cui sono associati i flussi di traffico

<sup>9</sup> <https://www.dati.lombardia.it/Territorio/Dusaf-6-0-Uso-del-suolo-2018/7rae-fng6>

attraverso il modello macroscopico OmniTRANS (2015). Le strade sono suddivise in 5 categorie: dalle autostrade alle strade di quartiere e per ogni arco stradale è indicato il flusso di traffico medio annuo giornaliero (AADT – Annual average daily traffic). La taratura del modello emissivo è stata effettuata assegnando alle strade di livello inferiore un flusso annuo medio giornaliero in modo che il bilancio emissivo sia coerente con l'inventario delle emissioni INEMAR (lombardo o emiliano a seconda del territorio considerato) ed in particolare delle emissioni da traffico.

Ad ogni variabile proxy spaziale (una per ogni macrosettore emissivo) sono state assegnate una o più classi di uso del suolo che definiscono la distribuzione spaziale del fenomeno emissivo in esame. Ad ogni classe di uso del suolo è stato inoltre assegnato un peso in modo da distribuire le emissioni proporzionalmente in funzione della densità della classe di uso del suolo. Ad esempio al tessuto residenziale discontinuo e mediamente denso è stato assegnato un peso pari a 0,4 rispetto al tessuto residenziale continuo e denso a cui è stato assegnato un peso pari a 1. I pesi prossimi a zero (pari a  $10^{-6}$ ) sono stati assegnati ad usi del suolo "secondari" in modo da garantire che non ci sia perdita di emissioni nel caso in cui le classi di uso del suolo "primarie" non siano presenti all'interno di un comune che ha un'emissione non nulla di quel macrosettore.

CODICE	DESCRIZIONE	INDICATORI SPAZIALI								
		IND_1	URB	IND_3	IND_4	IND_6	TRASP_ALTRI	RIF	AGR	BIO
1111	Tessuto residenziale compatto e denso	0	1	0	0	0.0001	0	0	0	1
1112	Tessuto residenziale urbano	0	1	0	0	0.0001	0	0	0	1
1121	Tessuto residenziale discontinuo	0	0.4	0	0	0.0001	0	0	0	0.4
1122	Strutture residenziali isolate	0	0.4	0	0	0.0001	0	0	0	0.4
11231	Cascine	0	0.1	0	0	0	0.5	0	0	0
1211	Insedimenti produttivi	1	0	1	1	1	0.1	1	0	0
12111	Insedimenti industriali, artigianali, commerciali	1	0	1	1	1	0.1	1	0	0
12112	Insedimenti produttivi agricoli	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	1	0	0
1212	Insedimenti agro-zootecnici	0	0.2	0	0	0	0	1	0	0
12121	Insedimenti ospedalieri	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
12122	Impianti di servizi pubblici e privati	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
12123	Impianti tecnologici	1	0	1	1	1	0	1	0	0
12125	Aree militari obliterate	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1213	Insedimenti commerciali	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
1214	Insedimenti di servizi	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
1215	Insedimenti ospedalieri	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
1216	Impianti tecnologici	1	0	1	1	1	0	1	0	0
1224	Reti ferroviarie	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1227	Reti per la distribuzione e produzione dell'energia	1	0	1	1	1	0	0	0	0
123	Aree portuali	0	0	0	0	0	1	0	0	0
124	Aeroporti ed eliporti	0	0	0	0	0	1	0	0	0
131	Cave	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1311	Aree estrattive attive	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1312	Aree estrattive inattive	0	0	0	1	0	0	0	0	0
132	Discariche	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1321	Discariche e depositi di cave, miniere e industrie	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1322	Discariche di rifiuti solidi urbani	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1323	Depositi di rottami	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1421	Impianti sportivi	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
1422	Campeggi e strutture turistiche e ricettive	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
1423	Parchi divertimento	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
1425	Ippodromi	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
1426	Autodromi	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
2111	Seminativi semplici	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2112	Seminativi arborati	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
21131	Colture orticole a pieno campo	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
21132	Colture orticole protette.	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
21141	Colture floro-vivaistiche a pieno campo	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
21142	Colture floro-vivaistiche protette	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2115	Orti familiari	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2121	Seminativi semplici irrigui	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2122	Vivai	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2123	Colture orticole	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2210	Vigneti	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2220	Frutteti	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
223	Oliveti	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2241	Pioppeti colturali	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2242	Altre colture da legno	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0
2410	Colture temporanee associate a colture permanenti	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2420	Sistemi colturali e particellari complessi	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2430	Aree con colture agricole e spazi naturali importanti	0	0	0	0	0	0	0	1	0
511	Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5111	Alvei di fiumi e torrenti con vegetazione scarsa	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5112	Alvei di fiumi e torrenti con vegetazione abbondante	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Figura 7: Associazione tra classi di uso del suolo e indicatori spaziali e relativi pesi associati.

I file vettoriali di copertura di suolo, dei confini amministrativi comunali e della griglia di simulazione sono stati intersecati tra loro, al fine di determinare la superficie per ciascun uso del suolo e quindi di per ciascuna variabile proxy per ogni combinazione di comune e cella del dominio. Allo stesso modo il file vettoriale della rete stradale è stato intersecato con i confini amministrativi comunali e la griglia di simulazione per determinare la lunghezza totale degli archi (urbani, autostradali ed extraurbani) per ogni cella e per ogni comune.

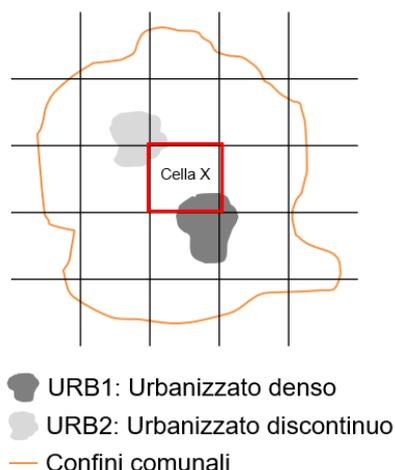
Il calcolo delle emissioni per ogni cella del dominio di simulazione è stato quindi effettuato secondo la seguente procedura (per semplicità di narrazione viene descritta solo la metodologia di disaggregazione delle emissioni legate agli indicatori spaziali areali, ma la procedura di calcolo è la medesima per le emissioni legate agli indicatori lineari):

- la superficie di intersezione di ogni classe di uso del suolo, confini amministrativi e cella della griglia di simulazione viene moltiplicata per il rispettivo peso;
- l'indicatore calcolato al punto precedente viene aggregato in termini di cella, comune e variabile proxy ( $IND_{Cella,Com,varProxy}$ );
- l'indicatore definito al punto precedente viene sommato su tutte le celle ( $IND_{Com,varProxy}$ );
- si effettua poi il rapporto tra  $IND_{Cella,Com,varProxy}$  e  $IND_{Com,varProxy}$ , calcolando così la frazione di indicatore di spalmatura che è presente in quella cella per quel Comune in modo da distribuire correttamente le emissioni di quel comune legate a quella variabile proxy;
- l'indicatore calcolato al punto precedente è quindi moltiplicato per le emissioni comunali di ogni attività emissiva legate a quella variabile proxy, ottenendo le emissioni per inquinante e attività emissiva disaggregate per cella e comune;
- infine, considerando che in una cella possono essere inclusi più comuni, l'emissione finale per inquinante e attività emissiva sarà ottenuta dall'aggregazione sulla cella dei diversi contributi comunali.

Tale procedura, eseguita per ciascun inquinante, è descritta dalla formula seguente.

$$Emissione_{Cella,Att} = \sum_{Com} Emissione_{Com,Att} * \left[ \frac{IND_{Cella,Com,varProxy}}{IND_{Com,varProxy}} \right]$$

Di seguito è proposto un esempio della metodologia di calcolo dell'indicatore e poi dell'emissione, considerando di dover distribuire le emissioni legate all'indicatore spaziale urbanizzato nelle celle in cui ricadono.



Calcolo degli indicatori proxy per ogni attività emissiva:

$$Ind_x^{URB} = \frac{p^{URB1} \cdot A_x^{URB1} + p^{URB2} \cdot A_x^{URB2}}{p^{URB1} A_c^{URB1} + p^{URB2} A_c^{URB2}}$$

$$E_x^{URB} = E_c^{URB} \cdot Ind_x^{URB}$$

Dove:

$A_x$ : Area indicatore nella cella  $x$

$A_c$ : Area indicatore nel comune

$p$ : peso associato all'indicatore

$E_c$ : emissione comunale

$E_x$ : emissione nella cella  $x$

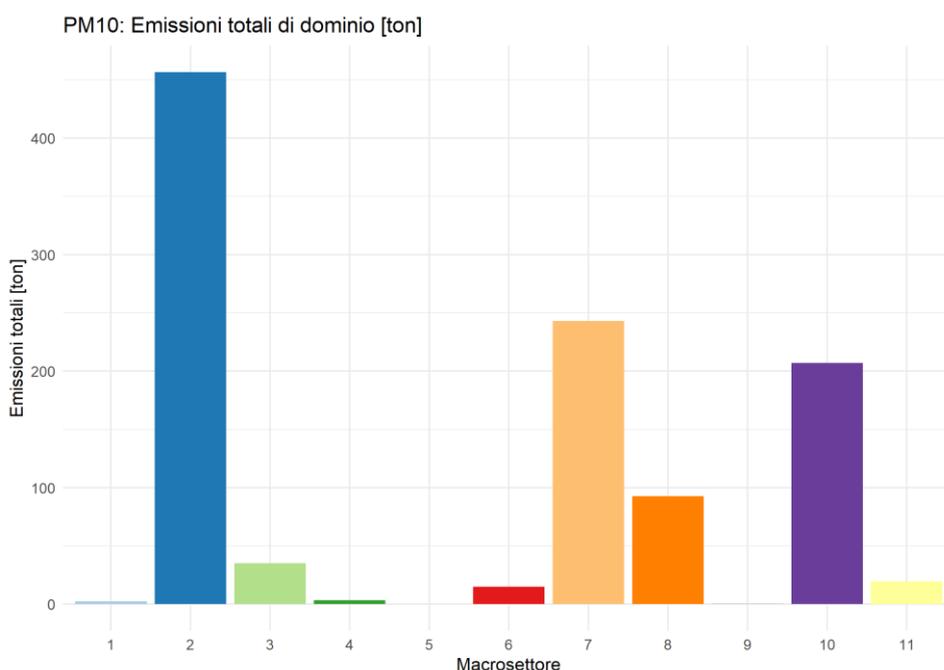
Figura 8: Esempio di calcolo delle emissioni legate all'indicatore spaziale urbanizzato per una cella del dominio di simulazione.

### 2.2.1 Emissioni grigliate

Le emissioni totali di dominio e la distribuzione percentuale dei macrosettori emissivi per l'anno 2019 sono presentate in Figura 9 e in Figura 10.

Dalle emissioni totali sono stati sottratte le emissioni dovute alle sorgenti puntuali, in quanto i kernel sono stati costruiti per valutare la dispersione degli inquinanti emessi da sorgenti lineari ed areali in prossimità del suolo e non sono quindi adatti a valutare le emissioni rilasciate da sorgenti puntuali.

Considerando che tale contributo in termini emissivi risulta molto limitato in quanto rappresenta il 14% degli ossidi di azoto, il 3% di PM10 e il 4% di PM2.5 e considerando inoltre che il rilascio avviene a quote elevate dove la dispersione degli inquinanti è maggiore, si ritiene che le ricadute in termini di concentrazioni al suolo siano limitate. Si evidenzia inoltre che tale contributo rientra nelle simulazioni EMEP e che quindi viene accorpato nelle concentrazioni di background.



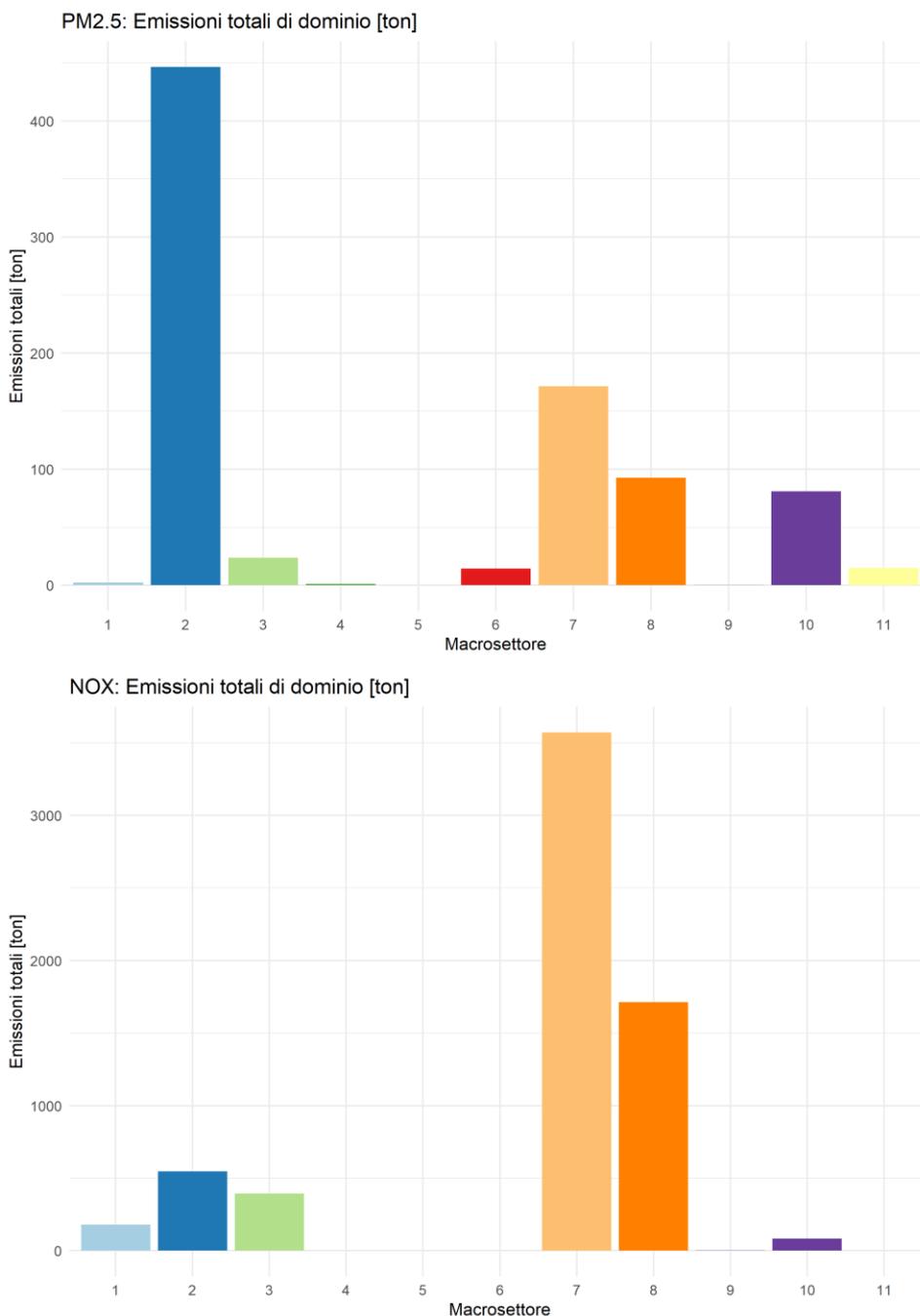


Figura 9: Emissioni totali di dominio per macrosettori emissivi rispettivamente per PM10, PM2.5 ed NOx.

Il contributo maggiore per le emissioni degli ossidi di azoto è dovuto al trasporto su strada e ad altre sorgenti mobili, mentre per le emissioni di particolato il settore residenziale (grazie alla combustione di biomasse legnose) risulta quello con il contributo maggiore. La percentuale inoltre aumenta (oltre il 50%) se si analizza il PM2.5.

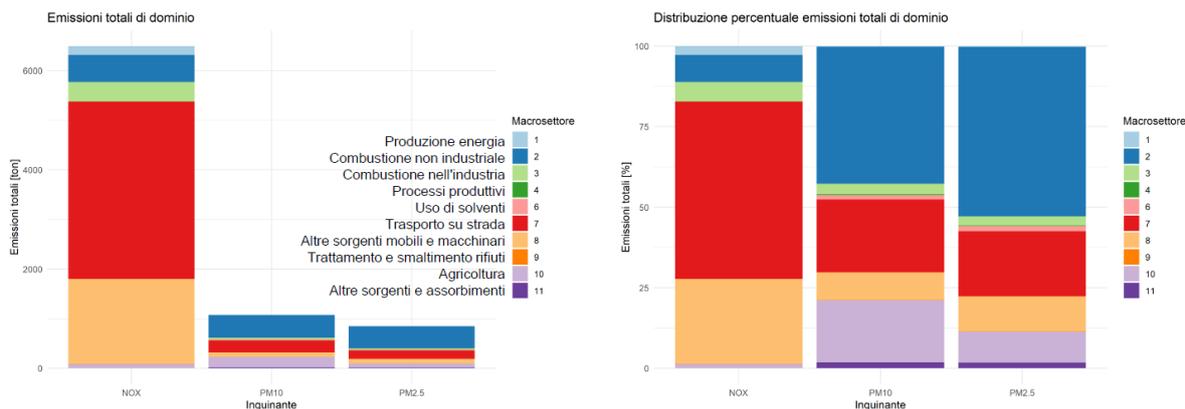


Figura 10: Emissioni totali di dominio e distribuzione percentuale dei macrosettori emissivi. Anno 2019.

Macrosettore	Emissioni Dominio NOx [ton]	Emissioni Dominio PM10 [ton]	Emissioni Dominio PM2.5 [ton]
1. Produzione energia e trasformazione combustibili	178.15	2.29	2.26
2. Combustione non industriale	545.21	456.54	446.40
3. Combustione nell'industria	394.21	35.21	23.83
4. Processi produttivi	0.00	3.26	1.13
5. Estrazione e distribuzione combustibili	0.00	0.00	0.00
6. Uso di solventi	0.00	14.87	14.36
7. Trasporto su strada	3571.15	242.97	171.34
8. Altre sorgenti mobili e macchinari	1713.39	92.73	92.66
9. Trattamento e smaltimento rifiuti	4.70	0.59	0.58
10. Agricoltura	82.97	206.92	80.80
11. Altre sorgenti e assorbimenti	0.68	19.63	15.09

Figura 11: Emissioni totali di dominio [ton]. Anno 2019.

Macrosettore	Emissioni Dominio NOx [%]	Emissioni Dominio PM10 [%]	Emissioni Dominio PM2.5 [%]
1. Produzione energia e trasformazione combustibili	2.74	0.21	0.27
2. Combustione non industriale	8.40	42.47	52.61
3. Combustione nell'industria	6.07	3.28	2.81
4. Processi produttivi	0.00	0.30	0.13
5. Estrazione e distribuzione combustibili	0.00	0.00	0.00
6. Uso di solventi	0.00	1.38	1.69
7. Trasporto su strada	55.02	22.60	20.19
8. Altre sorgenti mobili e macchinari	26.40	8.63	10.92
9. Trattamento e smaltimento rifiuti	0.07	0.05	0.07
10. Agricoltura	1.28	19.25	9.52
11. Altre sorgenti e assorbimenti	0.01	1.83	1.78

Figura 12: Emissioni totali di dominio [%]. Anno 2019.

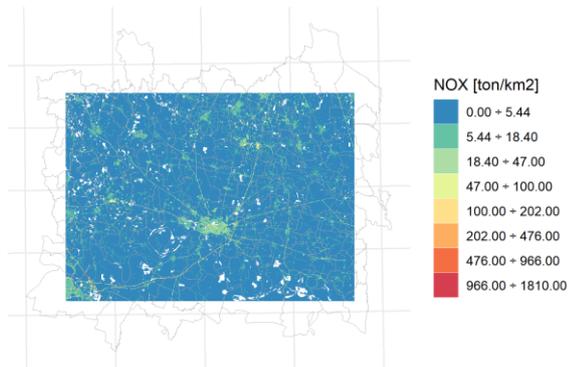
Nelle figure seguenti si riportano le mappe delle emissioni diffuse per cella per l'intero dominio di simulazione espresse in tonnellate/anno per gli inquinanti forniti in input al modello, esito finale della procedura illustrata nel precedente paragrafo.

La distribuzione delle emissioni areali rispetto alle celle della griglia di simulazione è fortemente condizionata dalle variabili proxy utilizzate per la disaggregazione.

Le emissioni degli ossidi di azoto sono fortemente correlate al reticolo stradale in cui si identificano chiaramente il tratto autostradale dell'A1 nell'angolo Sud-Ovest del dominio ed il tratto dell'A21 (Brescia – Piacenza – Torino) che attraversa centralmente il dominio da Nord a Sud.

La rete stradale e i centri abitati circostanti influenzano invece, le emissioni di particolato.

NOx: Emissioni disaggregate [ton/km2]



NOx: Emissioni totali per comune [ton/km2]

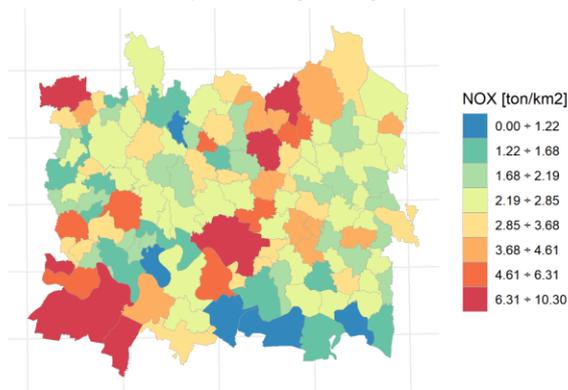
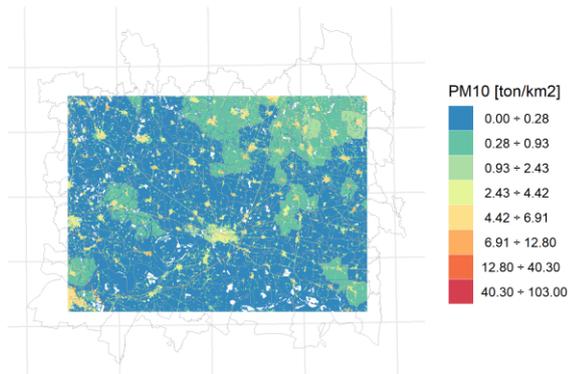


Figura 13: Emissioni degli ossidi di azoto (NOx) disaggregate sul dominio di simulazione e confronto con le emissioni comunali. Anno 2019.

PM10: Emissioni disaggregate [ton/km2]



PM10: Emissioni totali per comune [ton/km2]

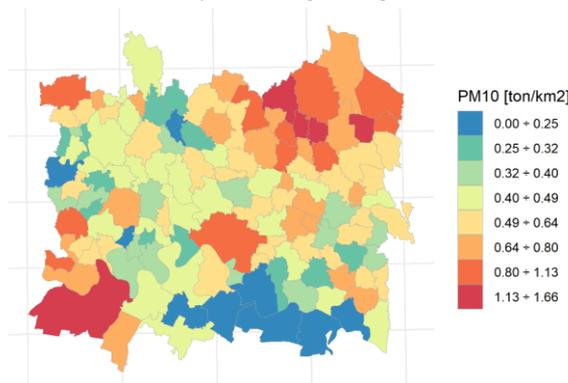
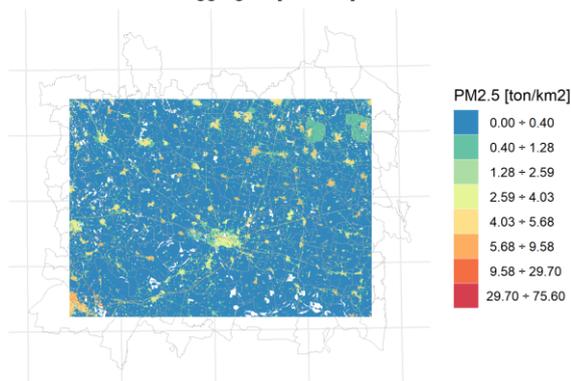


Figura 14: Emissioni di particolato (PM10) disaggregate sul dominio di simulazione e confronto con le emissioni comunali. Anno 2019.

PM2.5: Emissioni disaggregate [ton/km2]



PM2.5: Emissioni totali per comune [ton/km2]

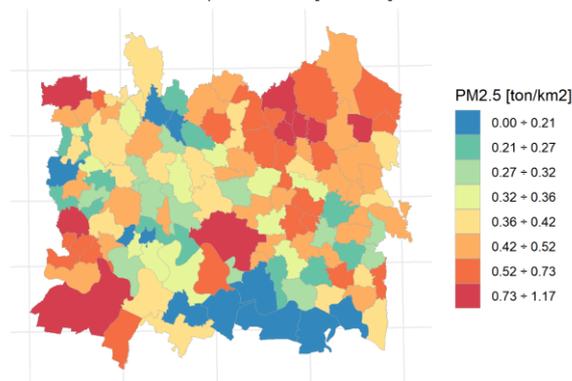


Figura 15: Emissioni di particolato (PM2.5) disaggregate sul dominio di simulazione e confronto con le emissioni comunali. Anno 2019.

Per quanto riguarda l'andamento temporale dal 2007 al 2019 delle emissioni sull'intero del dominio di calcolo, di seguito si riporta l'andamento delle emissioni di PM10 e NOx per i 13 anni considerati nelle simulazioni.

Si evidenzia per entrambi gli inquinanti una costante riduzione delle emissioni in particolare per le emissioni da traffico (M7) e le emissioni industriali (M3) e nel caso del particolato anche delle emissioni residenziali (M2).

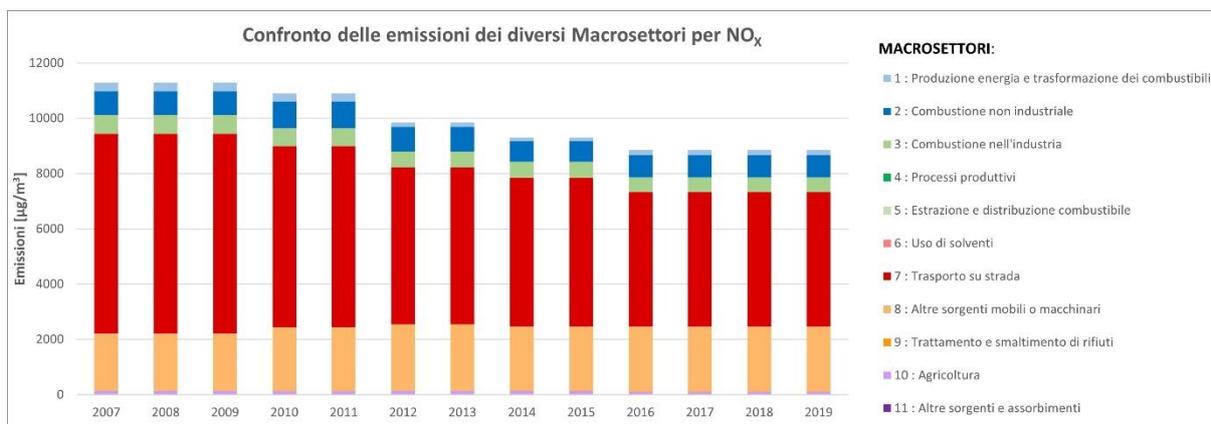


Figura 16: Andamento delle emissioni di NOx all'interno del dominio di calcolo dal 2007 al 2013.

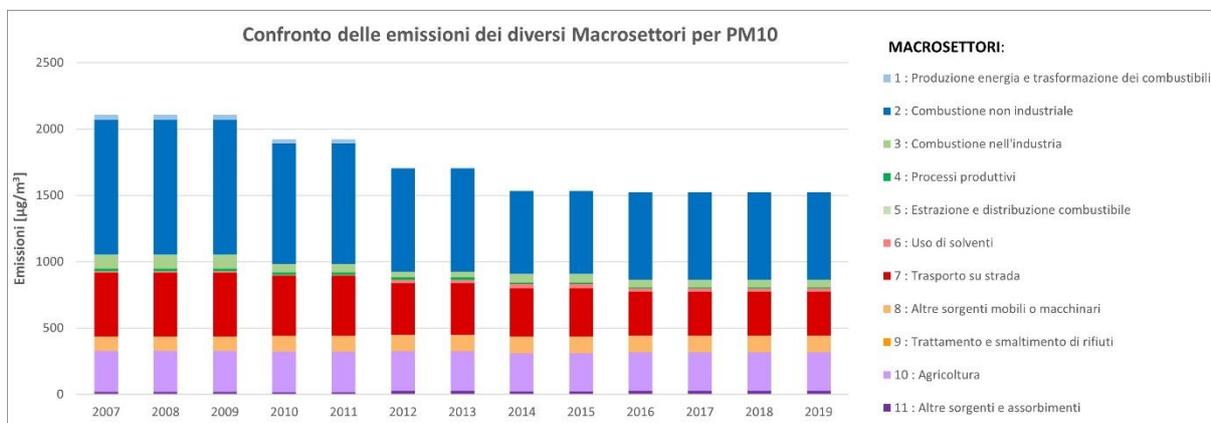


Figura 17: Andamento delle emissioni di PM10 all'interno del dominio di calcolo dal 2007 al 2013.

### 2.2.2 Conservazione della massa emissiva

Al termine del processo di disaggregazione spaziale, per ogni inquinante sono state effettuate delle verifiche di conservazione della massa emissiva per verificare che i totali emissivi dell'inventario comunale fornito da ARPA Lombardia e ARPA Emilia-Romagna fossero coerenti con i totali presenti sul dominio di simulazione.

Le verifiche sono state effettuate per ogni macrosettore emissivo sommando le emissioni disaggregate all'interno del dominio di simulazione con quelle presenti al di fuori del dominio nei comuni intersecanti il dominio stesso (Figura 18).

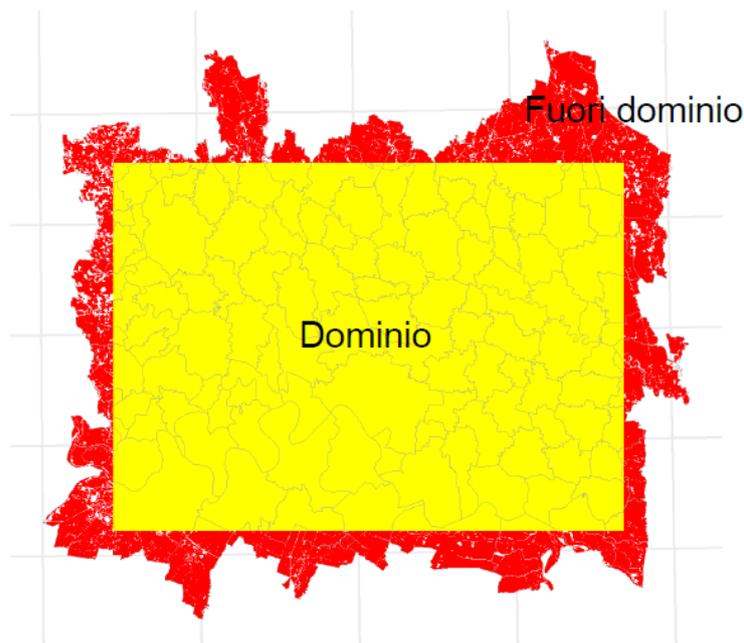


Figura 18: Rappresentazione spaziale delle aree comunali all'interno del dominio di simulazione (in giallo) e delle aree comunali esterne (in rosso).

Di seguito, a titolo di esempio, il controllo effettuato per le emissioni di PM10 per l'anno 2019.

MS	Emissioni Dominio [ton]	Emissioni fuori dominio [ton]	Emissioni Totali [ton]	Emissioni Comunali [ton]	Differenza [%]
1	2.29	0.70	2.99	2.99	0
2	456.54	201.63	658.17	658.17	0
3	35.21	24.69	59.90	59.90	0
4	3.26	3.26	6.52	6.52	0
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0
6	14.87	7.92	22.79	22.79	0
7	242.97	88.04	331.01	331.01	0
8	92.73	33.66	126.40	126.40	0
9	0.59	0.24	0.83	0.83	0
10	206.92	82.56	289.48	289.48	0
11	19.63	8.11	27.75	27.75	0
<b>Totale</b>	<b>1075.02</b>	<b>450.80</b>	<b>1525.82</b>	<b>1525.82</b>	<b>0</b>

Figura 19: Verifica di coerenza per le emissioni di particolato (PM10).

## 2.3 Disaggregazione temporale

La modulazione temporale delle emissioni permette di stimare l'andamento orario delle emissioni a partire dal dato annuo discusso nel precedente capitolo, passo necessario per fornire l'input emissivo al modello di dispersione delle emissioni locali che deve essere orario. Tale obiettivo viene raggiunto mediante l'utilizzo di profili temporali, associati a ciascuna attività emissiva (SNAP), caratterizzati da coefficienti orari in funzione dei seguenti parametri:

- classe climatica;
- inquinanti;
- mese;
- giorno tipo (feriale, prefestivo, festivo).

La formulazione generica per la stima della variazione temporale delle emissioni per attività emissiva è riportata di seguito:

$$E_{h,gt,m,i}^A = E_{y,i}^A \cdot f_{h,gt,m,i}^A$$

Dove:

$E_{h,gt,m,i}^A$  = emissione oraria dell'attività emissiva A, nella ora h, del giorno tipo gt, nel mese m, dell'inquinante i;

$E_{y,i}^A$  = emissione annua dell'attività emissiva A dell'inquinante i;

$f_{h,gt,m,i}^A$  = coefficiente orario dell'attività emissiva A, nella ora h, del giorno tipo gt, nel mese m, dell'inquinante i;

A partire dai profili temporali assegnati a ciascuna attività emissiva a livello provinciale, è stato elaborato un profilo temporale per ciascun macrosettore dell'inventario INEMAR come media pesata dei coefficienti di modulazione temporale sulla base del contributo emissivo della singola attività rispetto al totale del macrosettore, normalizzando poi sulle ore totali dell'anno considerato. I profili temporali per macrosettore sono stati poi utilizzati all'interno del preprocessore predisposto per la modulazione temporale delle emissioni.

La stima dei coefficienti di modulazione temporale è stata effettuata nell'ambito dei progetti IMPRESAERO, CITY DELTA, POMI<sup>10</sup>, grazie all'utilizzo di variabili proxy aventi dettaglio orario per attività emissiva.

Di seguito si riportano due esempi dell'andamento dei coefficienti di modulazione temporale per gli NOx per il macrosettore 7 (trasporto su strada) per ciascun giorno tipo per il mese di ottobre e la modulazione temporale per il PM10 per il macrosettore 2 (combustione residenziale) per ciascun giorno tipo per il mese di gennaio. Come si può osservare le emissioni degli ossidi di azoto associate al settore dei trasporti nei giorni feriali si concentrano in due fasce di punta al mattino e al pomeriggio, con valori intermedi nelle ore centrali della giornata e valori molto bassi nelle ore notturne. Le variazioni durante la giornata si riducono sensibilmente nei giorni festivi.

---

<sup>10</sup> J Dommen, A.S.H Prevot, N Baertsch-Ritter, G Maffeis, M.G Longoni, F.C Gruebler, A Thielmann, High-resolution emission inventory of the Lombardy region: development and comparison with measurements, Atmospheric Environment, Volume 37, Issue 29, 2003, Pages 4149-4161, ISSN 1352 - 2310, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00507-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00507-7)

Per quanto riguarda invece le emissioni di PM10 per il settore residenziale non si hanno variazioni nei giorni tipo e le emissioni si concentrano nella fascia mattutina e serale.

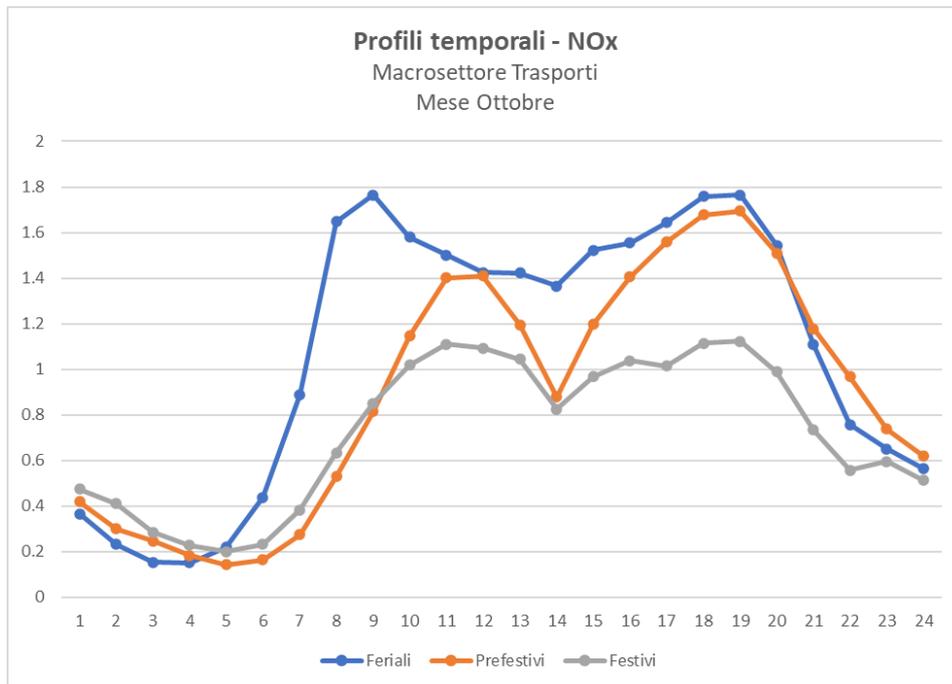


Figura 20: Profili temporali per il macrosettore trasporti nel mese di ottobre per le emissioni di ossidi di azoto (NOx).

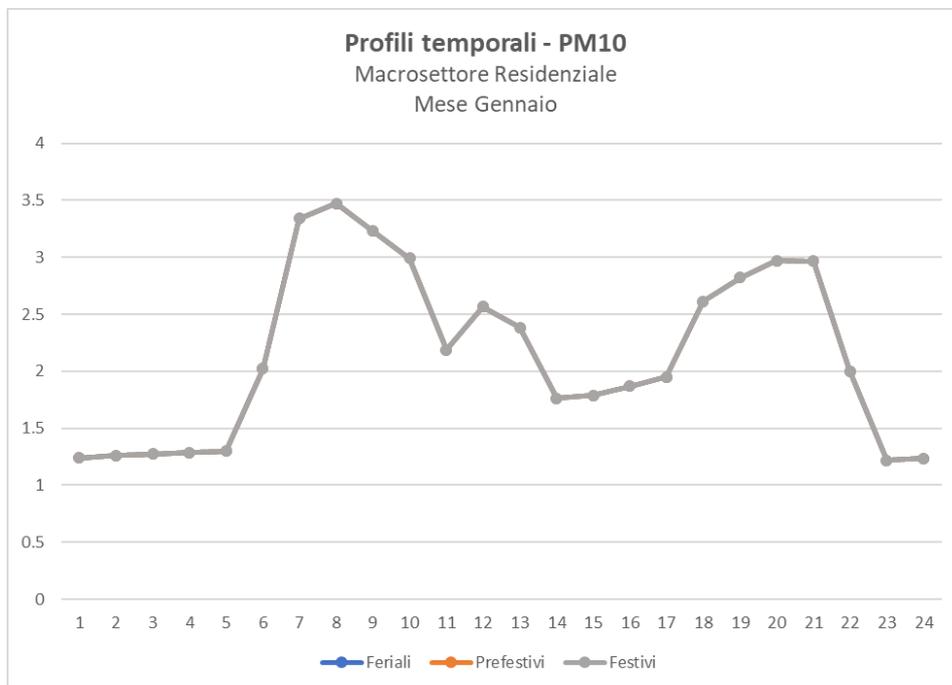


Figura 21: Profili temporali per il macrosettore residenziale nel mese di gennaio per le emissioni di particolato (PM10).

## 2.4 Variabili meteo

Di seguito vengono riportate le diverse completezze dei dati per ogni parametro registrato da ogni stazione di monitoraggio appartenente alla rete gestita da ARPA Lombardia dal 2013 al 2019.

Stazioni	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Casalbuttano	/	/	/	/	/	/	/
CR- via Fatebenefratelli	/	96.19%	99.67%	99.90%	98.07%	99.69%	99.43%
CR- via Gerre Borghi	/	82.18%	99.95%	95.28%	99.16%	97.55%	99.19%
Gambara	0.00%	88.44%	97.56%	84.65%	98.76%	98.85%	96.14%
Pieve San Giacomo	99.93%	99.81%	99.90%	99.26%	99.70%	99.36%	99.83%
Persico d' Osimo	100.00%	99.97%	99.63%	87.65%	100.00%	99.94%	99.93%
Spinadesco	/	/	99.97%	99.97%	99.98%	99.43%	99.94%

Tabella 2.4: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Velocità del vento"

Stazioni	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Casalbuttano	/	/	/	/	/	/	/
+	/	84.69%	99.69%	100.00%	98.01%	99.68%	99.43%
CR- via Gerre Borghi	/	82.18%	99.95%	67.08%	82.85%	97.53%	99.20%
Gambara	/	88.39%	97.60%	84.57%	98.76%	98.85%	96.19%
Pieve San Giacomo	/	53.63%	99.90%	99.26%	99.63%	99.36%	99.83%
Persico d' Osimo	99.89%	99.67%	99.63%	87.65%	99.91%	99.94%	99.93%
Spinadesco	/	/	99.98%	99.97%	99.97%	98.31%	99.92%

Tabella 2.5: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Direzione del vento"

Stazioni	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Casalbuttano	99.92%	100.00%	99.87%	92.51%	99.89%	99.76%	98.77%
CR- via Fatebenefratelli	99.20%	99.34%	99.62%	100.0%	97.99%	99.66%	99.41%
CR- via Gerre Borghi	99.38%	98.53%	99.95%	99.95%	99.16%	97.53%	99.18%
Gambara	97.25%	97.43%	97.53%	99.58%	98.72%	98.84%	96.21%
Pieve San Giacomo	99.01%	99.81%	99.83%	99.31%	98.90%	99.34%	99.83%
Persico d' Osimo	100.0%	99.97%	99.61%	87.69%	99.92%	99.92%	99.94%
Spinadesco	78.66%	99.67%	99.97%	99.95%	98.54%	99.41%	99.87%

Tabella 2.6: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Temperatura"

Stazioni	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Casalbuttano	/	/	/	/	/	/	/
CR- via Fatebenefratelli	99.18%	99.34%	99.63%	100.00%	98.07%	99.69%	99.43%
CR- via Gerre Borghi	99.35%	98.53%	99.97%	99.60%	98.96%	97.55%	99.19%
Gambara	/	/	/	/	/	/	/
Pieve San Giacomo	99.63%	99.81%	99.90%	99.92%	93.66%	99.36%	99.83%
Persico d' Osimo	100.00%	99.97%	99.63%	88.48%	100.00%	99.94%	99.93%
Spinadesco	/	/	/	/	/	/	/

Tabella 2.7: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Radiazione solare"

Per gli anni precedenti, ossia dal 2007 al 2012, a causa della mancanza di informazioni nelle stazioni precedentemente elencate, i dati sono stati raccolti dalle stazioni Arpa di Mantova Tridolino e Capralba, entrambe esterne al dominio di calcolo. La loro completezza per i diversi parametri viene riportata nelle tabelle sottostanti.

Stazioni	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MN - Tridolino	54.45%	98.84%	43.90%	97.64%	98.33%	99.49%
Capralba	99.50%	92.07%	91.12%	/	/	/

Tabella 2.8: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Velocità del vento" per le stazioni al di fuori del dominio di calcolo

Stazioni	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MN - Tridolino	54.45%	98.84%	43.88%	97.64%	98.33%	99.49%
Capralba	98.80%	90.36%	89.22%	/	/	/

Tabella 2.9: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Direzione del vento" per le stazioni al di fuori del dominio di calcolo

Stazioni	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MN - Tridolino	79.68%	98.85%	53.80%	97.08%	93.44%	99.48%
Capralba	99.50%	96.61%	95.92%	/	/	/

Tabella 2.10: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Temperatura" per le stazioni al di fuori del dominio di calcolo

Stazioni	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MN - Tridolino	80.05%	98.84%	55.07%	97.53%	98.30%	99.43%
Capralba	99.50%	96.61%	95.92%	/	/	/

Tabella 2.11: Tabella relativa alla completezza per il parametro "Radiazione solare" per le stazioni al di fuori del dominio di calcolo

Per ogni anno, si è quindi scelto di utilizzare i dati che presentavano la completezza maggiore per tutti e quattro i parametri, e nella Tabella 2.12 vengono riportate le stazioni usate per ogni anno simulato.

Anno simulazione	Stazione
2007	Capralba
2008	Capralba
2009	Capralba
2010	MN-Tridolino
2011	MN-Tridolino
2012	MN-Tridolino
2013	Persico
2014	Persico
2015	CR- via Gerre Borghi
2016	CR-via Fatebenefratelli
2017	Persico

Anno simulazione	Stazione
2018	Persico
2019	Persico

Tabella 2.12: stazioni utilizzate per ogni anno simulato

## 2.5 Aggregazione delle emissioni

Le emissioni finali ottenute a seguito dei processi di disaggregazione spaziale e temporale sono state aggregate in quattro categorie emissive e restituite in file orari in formato NetCDF. Le categorie emissive sono:

- TRA = Trasporto su strada (Macrosettore 7)
- REST = Riscaldamento domestico (Macrosettore 2)
- IND = Industria (Macrosettore 1, 3 e 4)
- OTH = Altre emissioni (Resto dei macrosettori non inclusi nelle precedenti categorie: 5, 6, 8, 9, 10, 11)

## 3. RISULTATI OTTENUTI (ANNO 2019)

### 3.1 Concentrazioni di PM10

Per quanto riguarda le polveri sottili ed in particolare il PM10, il modello, coerentemente con le misure delle stazioni Arpa, evidenzia quanto la gran parte del territorio cremonese sia soggetta a numerosi giorni di superamento del valore limite giornaliero per la protezione della salute umana pari a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  da non superare più di 35 volte per l'anno civile (indicato nel seguito come 90.4° percentile delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 in Figura 24). Così come le misure, il modello non evidenzia invece superamenti dei valori limiti annuali per la media annuale del PM10 pari a  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 22).

Per quanto riguarda la media annua di PM10 nelle figure seguenti (Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28) vengono rappresentati in mappa in contributi primari stimati delle concentrazioni per il settore residenziale, dei trasporti, industriale e delle altre sorgenti (si faccia attenzione alle differenti scale di valori). Allo stesso modo nelle figure successive sono riportati i contributi percentuali (Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32) dei quattro settori emissivi nelle singole celle del dominio: sono pari al massimo al 36% per il traffico, al 15% per il residenziale, al 12% per l'industriale ed infine al 5% per le altre sorgenti, ovviamente in celle differenti (le prime nei pressi degli assi stradali, le seconde nei centri abitati, le terze nelle aree industriali). Si vede infatti in Figura 23 come il massimo contributo locale (pari alla somma dei quattro settori) sia pari al 36% (evidentemente nelle celle di "traffico").

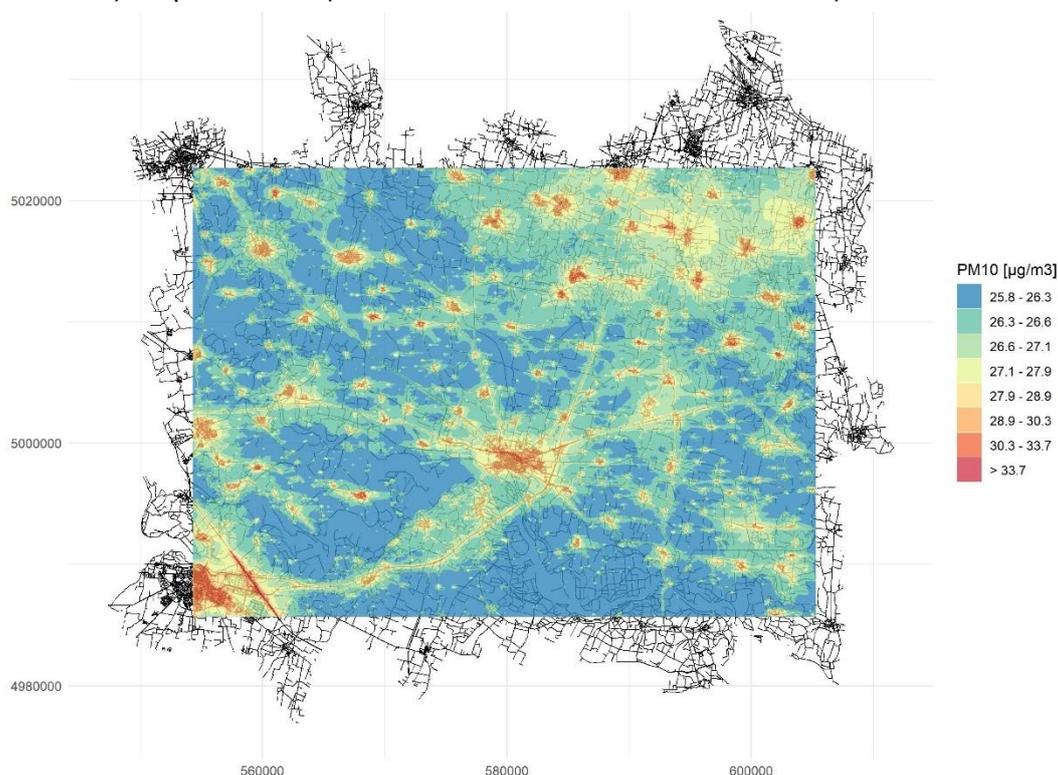


Figura 22: concentrazione media annua di PM10 per l'anno 2019.

È da evidenziare che il contributo dato dal “background regionale” proveniente dal modello europeo EMEP, oltre alle concentrazioni del fondo di Bacino Padano, contiene anche il contributo secondario delle sorgenti precedentemente elencate che per il PM10 è una quota preponderante della concentrazione ed inoltre il minor contributo dato dalle sorgenti puntuali.

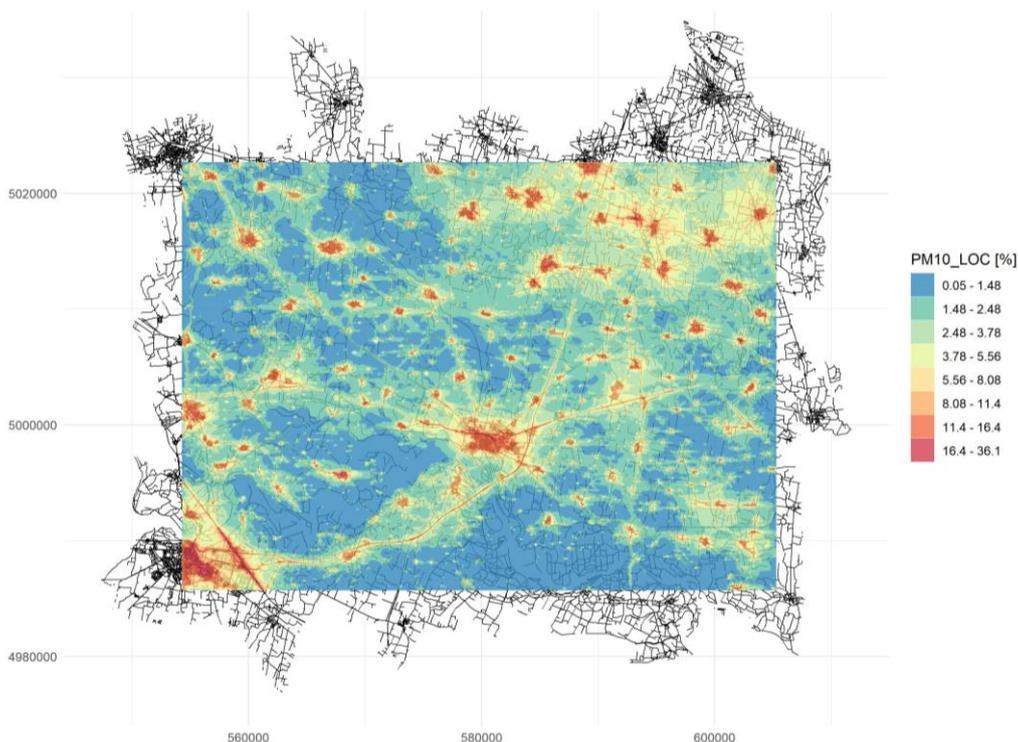


Figura 23: contributo locale alla concentrazione media annua di PM10 per l'anno 2019.

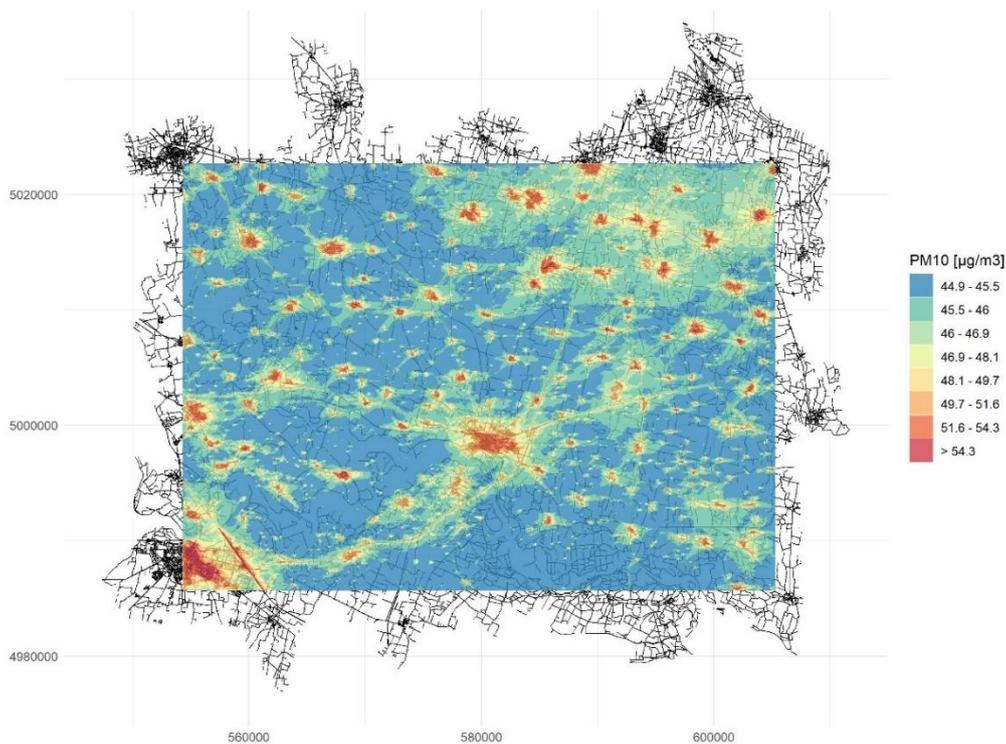


Figura 24: 90.4° percentile delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 per l'anno 2019.

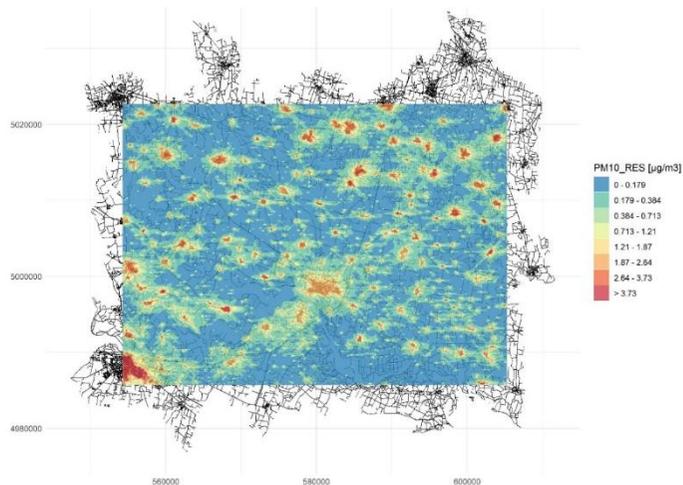


Figura 25: concentrazione media annua di PM10 per il settore residenziale per l'anno 2019.

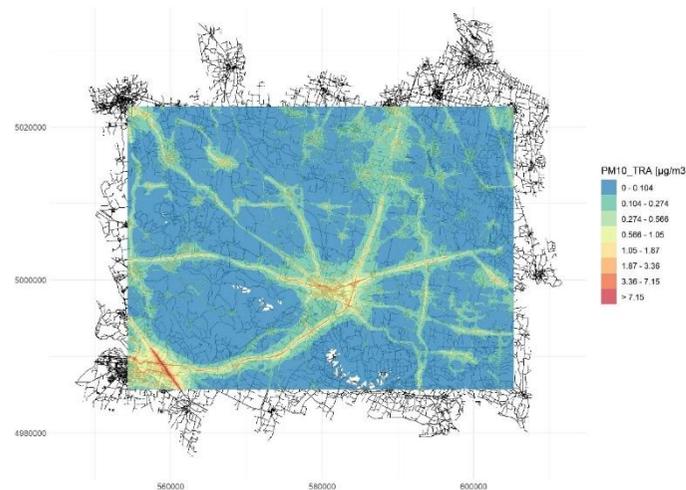


Figura 26: concentrazione media annua di PM10 per il settore trasporti per l'anno 2019.

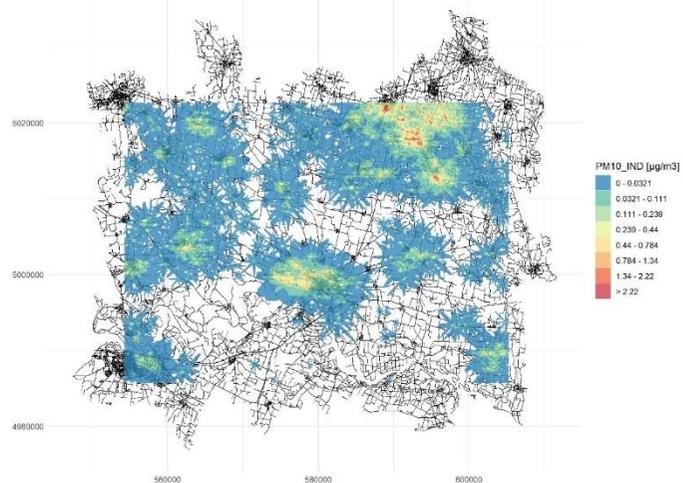


Figura 27: concentrazione media annua di PM10 per il settore industriale per l'anno 2019.

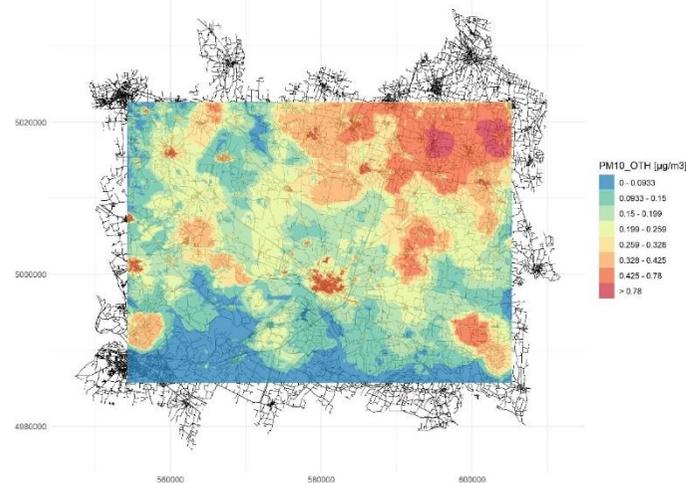


Figura 28: concentrazione media annua di PM10 per gli altri settori emissivi per l'anno 2019.

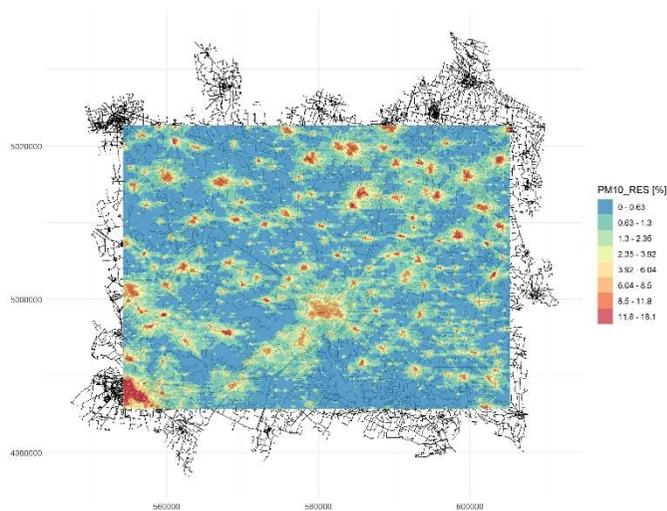


Figura 29: contributo percentuale alla media annua di PM10 per il settore residenziale per l'anno 2019.

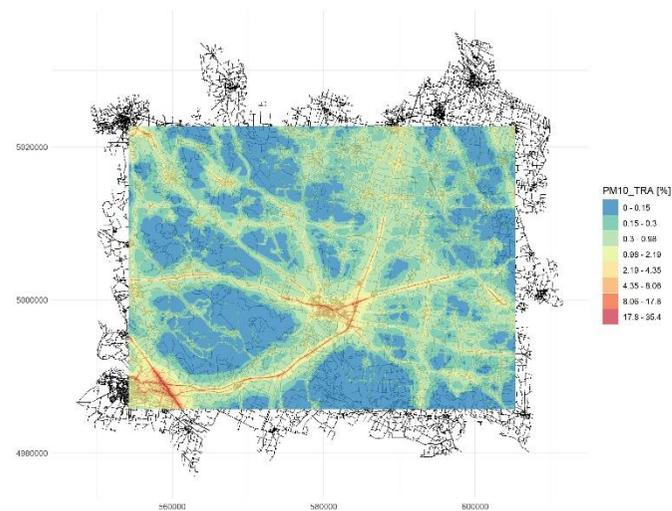


Figura 30: contributo percentuale alla media annua di PM10 per il settore trasporti per l'anno 2019.

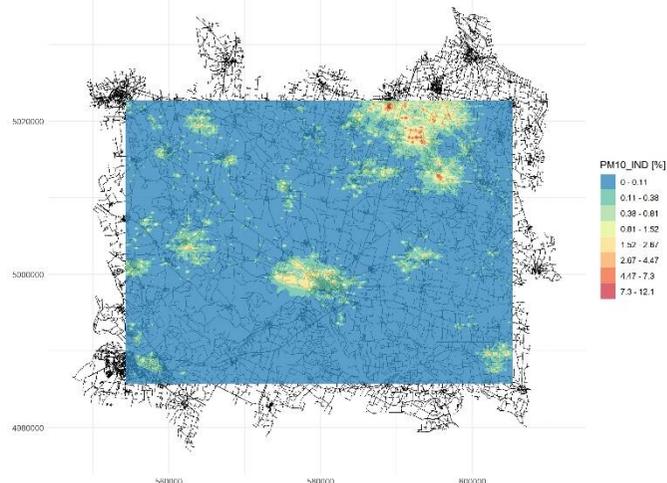


Figura 31: contributo percentuale alla media annua di PM10 per il settore industriale per l'anno 2019.

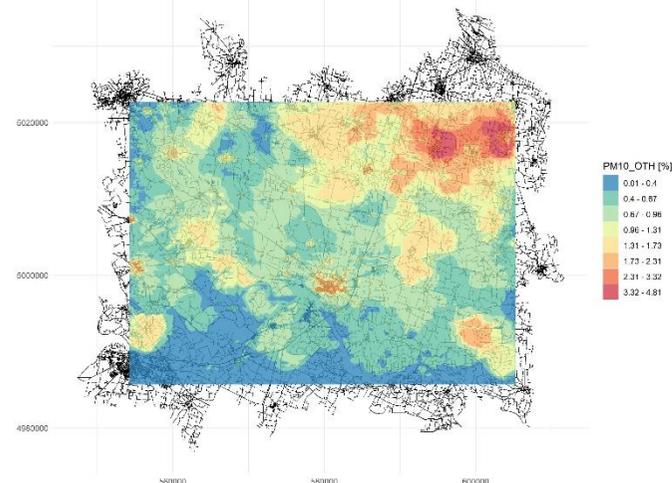


Figura 32: contributo percentuale alla media annua di PM10 per gli altri settori emissivi per l'anno 2019

Infine si riportano in allegato le schede riepilogative per ogni comune appartenente al distretto sanitario di Cremona. All'interno di ogni scheda sono stati estratti i valori di concentrazione media e del percentile giornaliero per tutti i punti di dominio ricadenti all'interno dei confini comunali. Allo stesso modo sono stati estratti i contributi dei diversi settori emissivi alle concentrazioni locali. Infine nel grafico a barre sono riportate i diversi contributi alle concentrazioni medie mensili delle aree abitate ricadenti all'interno del comune.

A titolo di esempio si riporta di seguito il grafico relativo al comune di Cremona. E' da notare come il contributo locale primario più importante sia quello legato alle emissioni del comparto residenziale (ovviamente più significativo nei mesi invernali). Per trovare un contributo significativo in termini percentuali delle altre sorgenti è necessario essere in celle nei pressi di importanti infrastrutture viabilistiche o di aree industriali.

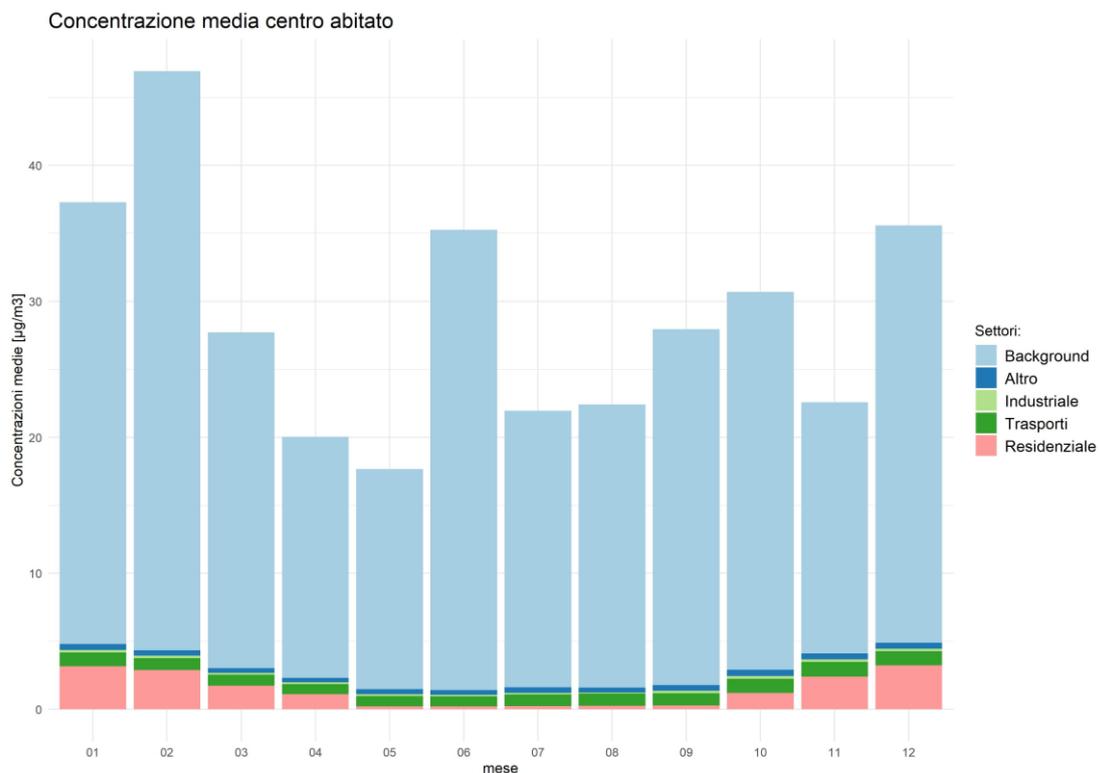


Figura 33: concentrazioni media mensili di PM10 delle aree abitate di Cremona per l'anno 2019.

### 3.2 Concentrazioni di PM2.5

Anche per il PM2.5, il modello, evidenzia, coerentemente con i dati osservati dalle diverse stazioni Arpa, quanto una parte del territorio cremonese sia soggetta al superamento del valore limite annuale per la protezione della salute umana pari a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , per tutti gli anni simulati.

Nelle figure seguenti (Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38) vengono rappresentati in mappa i contributi primari stimati delle concentrazioni per il settore residenziale, dei trasporti, industriale e delle altre sorgenti per l'anno 2019.

Nelle figure successive si riportano inoltre i contributi percentuali (Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42) dei diversi settori emissivi, che risultano essere pari al 26% per il traffico, al 20% per il residenziale, al 6% per l'industriale ed al 3% per le altre sorgenti, in celle differenti.

Anche in questo caso, il contributo del "background" regionale, proveniente dal modello EMEP, risulta essere molto importante.

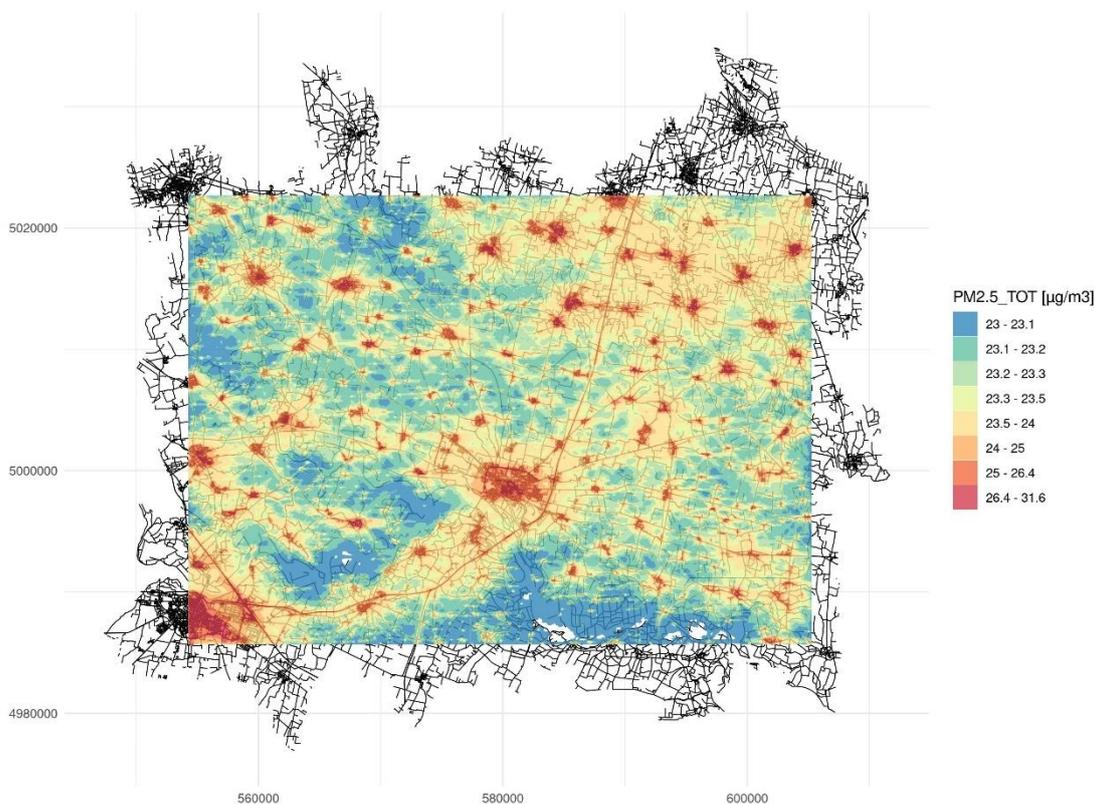


Figura 34: contributo locale alla concentrazione media annua di PM2.5 per l'anno 2019

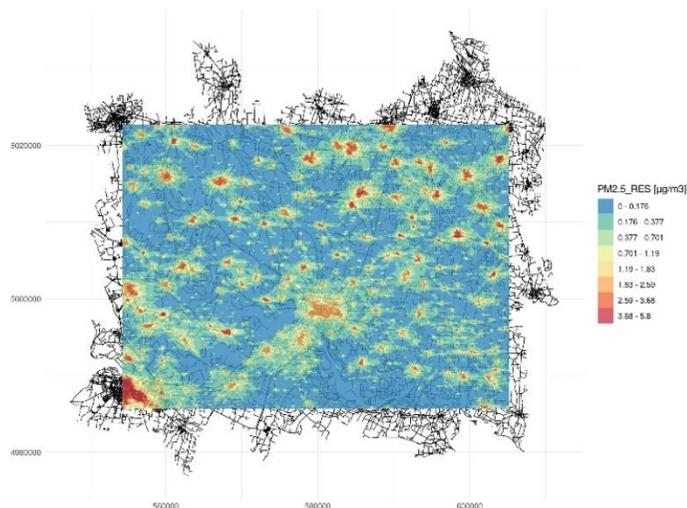


Figura 35: concentrazione media annua di PM2.5 per il settore residenziale per l'anno 2019.

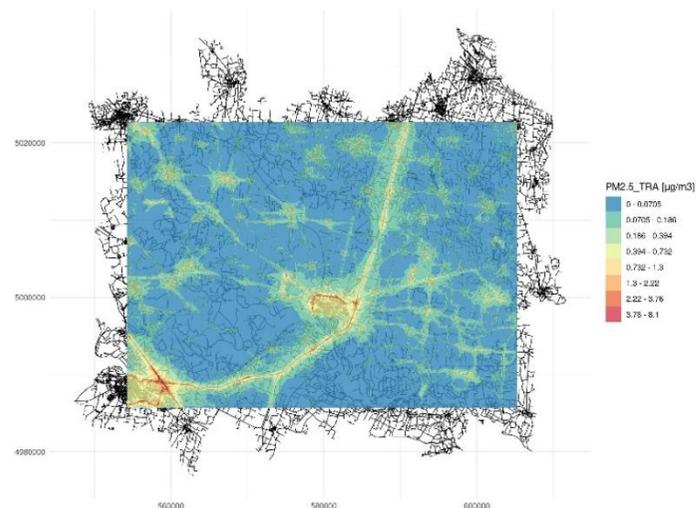


Figura 36: concentrazione media annua di PM2.5 per il settore trasporti per l'anno 2019.

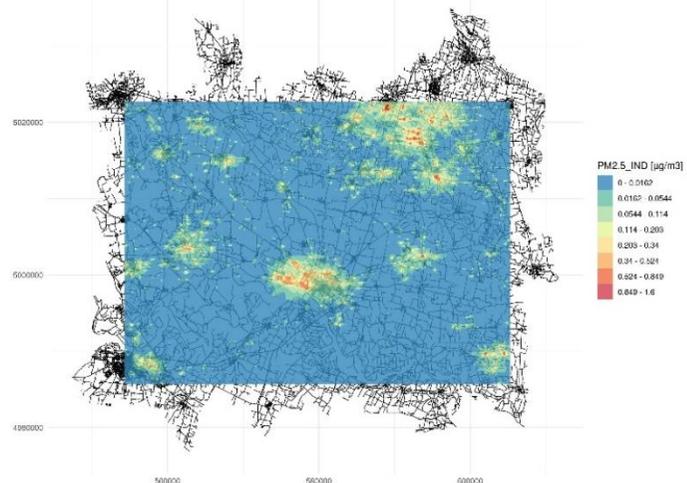


Figura 37: concentrazione media annua di PM2.5 per il settore industriale per l'anno 2019.

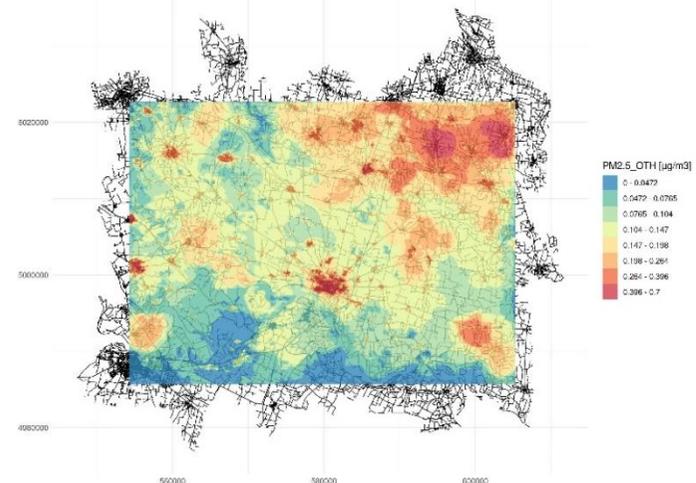


Figura 38: concentrazione media annua di PM2.5 per gli altri settori emissivi per l'anno 2019

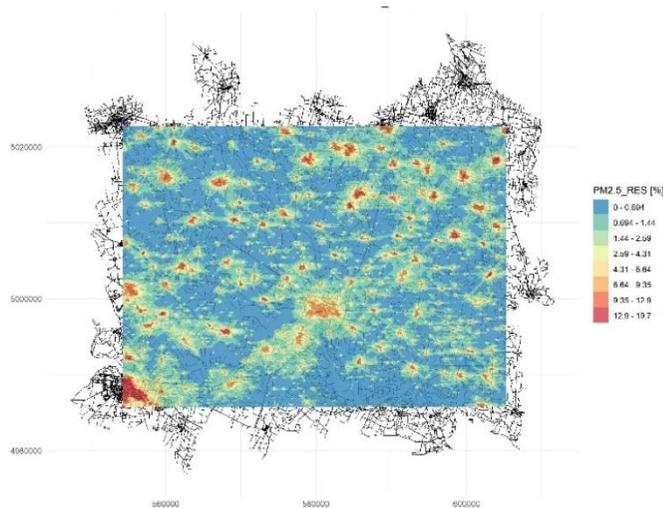


Figura 39: contributo percentuale alla media annua di PM2.5 per il settore residenziale per l'anno 2019.

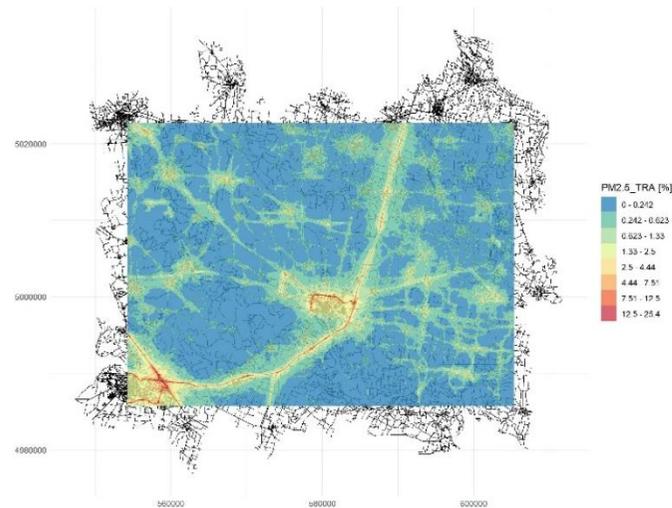


Figura 40: contributo percentuale alla media annua di PM2.5 per il settore trasporti per l'anno 2019.

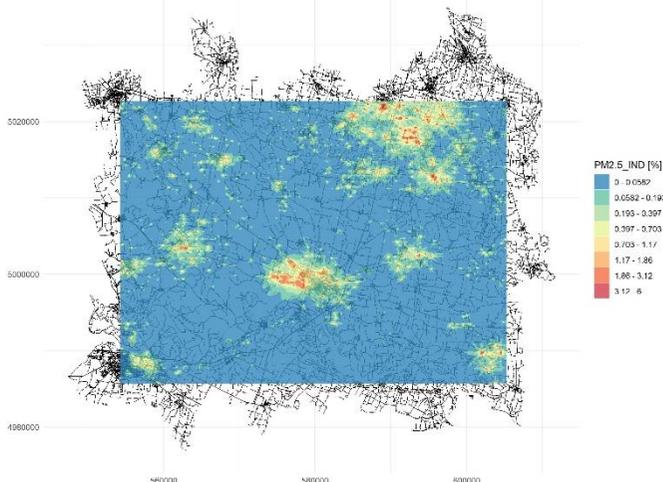


Figura 41: contributo percentuale alla media annua di PM2.5 per il settore industriale per l'anno 2019.

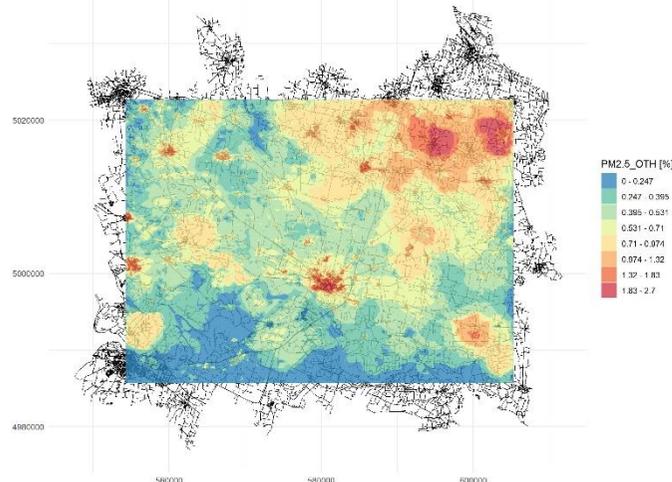


Figura 42: contributo percentuale alla media annua di PM2.5 per gli altri settori emissivi per l'anno 2019

Si riportano, poi, in allegato le schede riepilogative per ogni comune appartenente al distretto sanitario di Cremona. Allo stesso modo del paragrafo precedente, è stato costruito un grafico a barre, in cui sono riportati i diversi contributi alle concentrazioni medie mensili delle aree abitate ricadenti all'interno dei vari comuni.

A titolo di esempio si riporta di seguito il grafico relativo al comune di Cremona. Anche per il PM<sub>2,5</sub>, il contributo locale più importante è dato dal comparto residenziale. Allo stesso modo del PM<sub>10</sub>, per trovare un contributo significativo in termini percentuali delle altre sorgenti è necessario essere in celle nei pressi di importanti infrastrutture viabilistiche o di aree industriali.

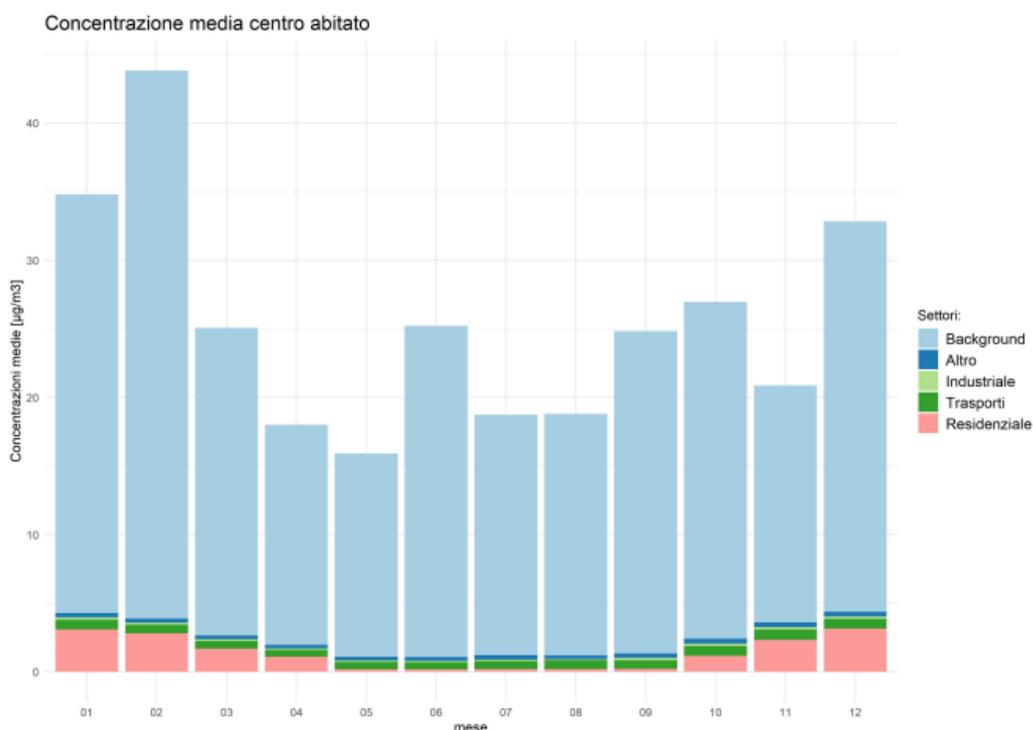


Figura 43: concentrazioni media mensili di PM<sub>2,5</sub> delle aree abitate di Cremona per l'anno 2019.

### 3.3 Concentrazioni di NO<sub>2</sub>

Per l'NO<sub>2</sub>, il modello evidenzia solo due casi in cui si predice un superamento del valore limite della media annua per la protezione della salute umana di 40 µg/m<sup>3</sup>, per tutti gli anni simulati, accompagnato da un riscontro nei dati osservati dalle diverse stazioni Arpa presenti all'interno del dominio di calcolo.

Anche in questo caso, nelle figure seguenti (Figura 45, Figura 46, Figura 47 e Figura 48) vengono rappresentati in mappa in contributi primari stimati delle concentrazioni per il settore residenziale, dei trasporti, industriale e delle altre sorgenti per l'anno 2019.

Nelle figure successive, in cui sono riportati i contributi percentuali (Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52) dei quattro settori emissivi nelle singole celle del dominio, si nota come il contributo maggiore sia dato da quello del traffico (82%) e industriale (34%). A differenza delle polveri sottili, in questo caso il settore residenziale e quello delle altre sorgenti occupano solo un ruolo secondario, avendo una percentuale, rispettivamente, del 10% e del 3%.

È da evidenziare che, in questo caso, il contributo dato dal “background regionale”, assume, a differenza dei precedenti casi, un ruolo più marginale.

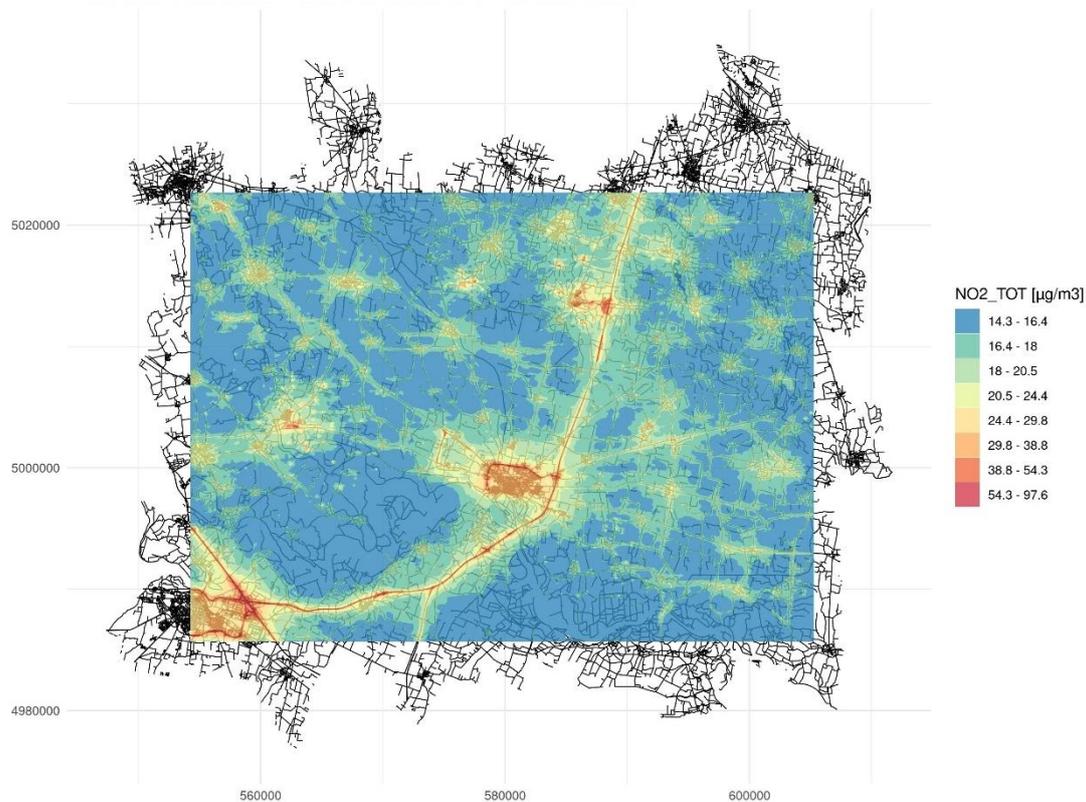


Figura 44: contributo locale alla concentrazione media annua di NO<sub>2</sub> per l'anno 2019.

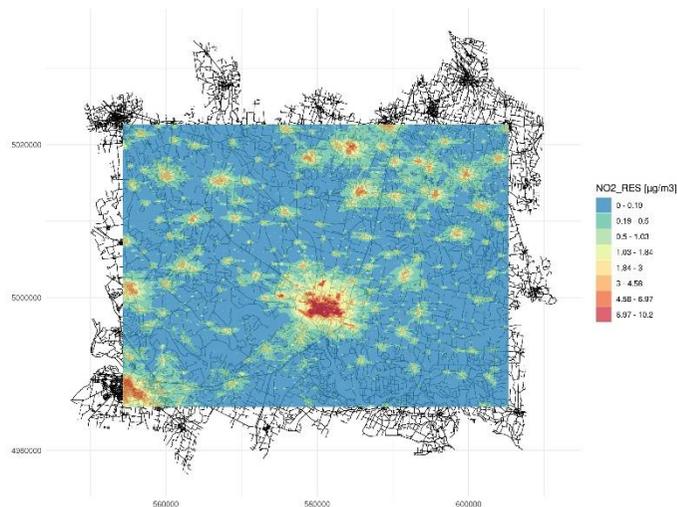


Figura 45: concentrazione media annua di NO<sub>2</sub> per il settore residenziale per l'anno 2019.

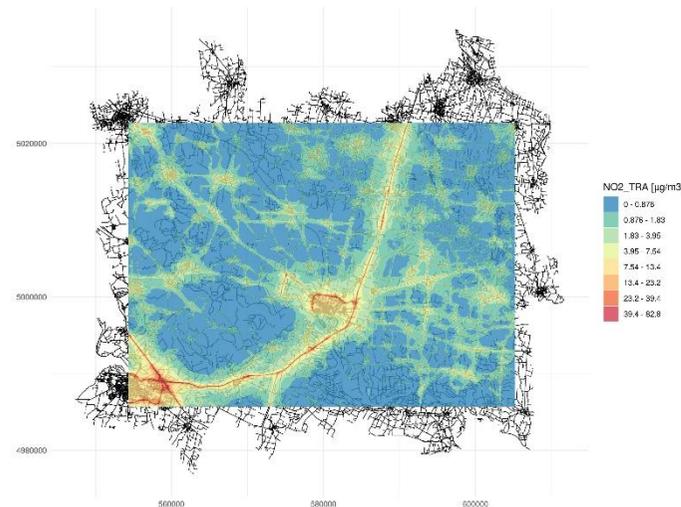


Figura 46: concentrazione media annua di NO<sub>2</sub> per il settore trasporti per l'anno 2019.

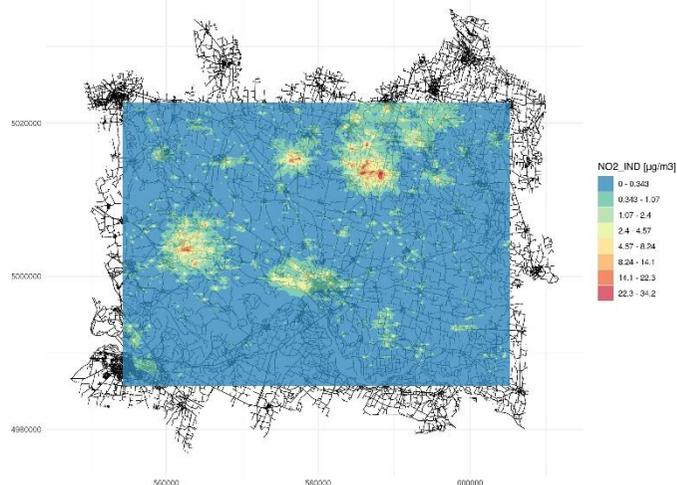


Figura 47: concentrazione media annua di NO<sub>2</sub> per il settore industriale per l'anno 2019.

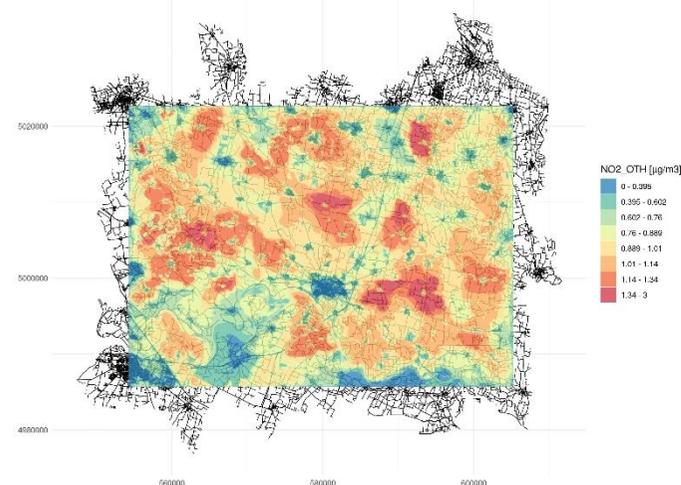


Figura 48: concentrazione media annua di NO<sub>2</sub> per gli altri settori emissivi per l'anno 2019.

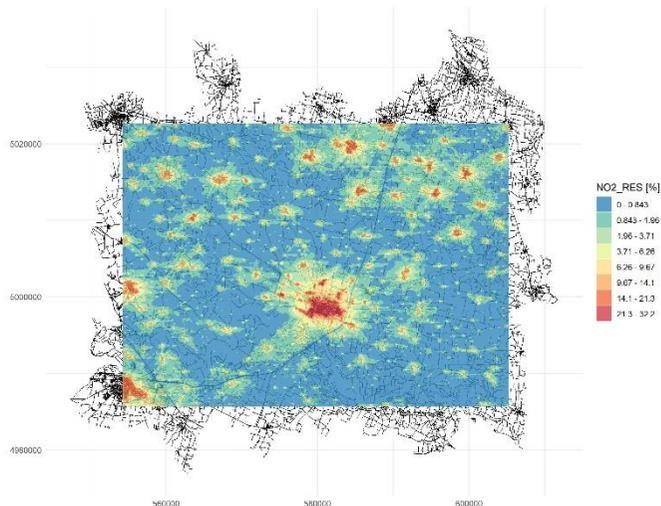


Figura 49: contributo percentuale alla media annua di NO<sub>2</sub> per il settore residenziale per l'anno 2019.

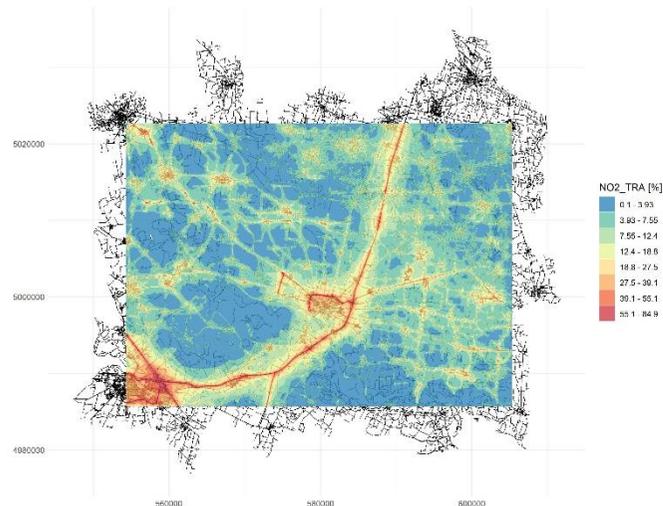


Figura 50: contributo percentuale alla media annua di NO<sub>2</sub> per il settore trasporti per l'anno 2019.

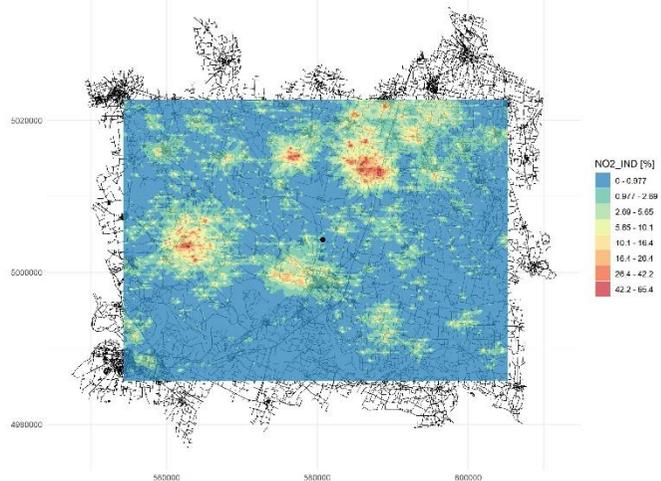


Figura 51: contributo percentuale alla media annua di NO<sub>2</sub> per il settore industriale per l'anno 2019.

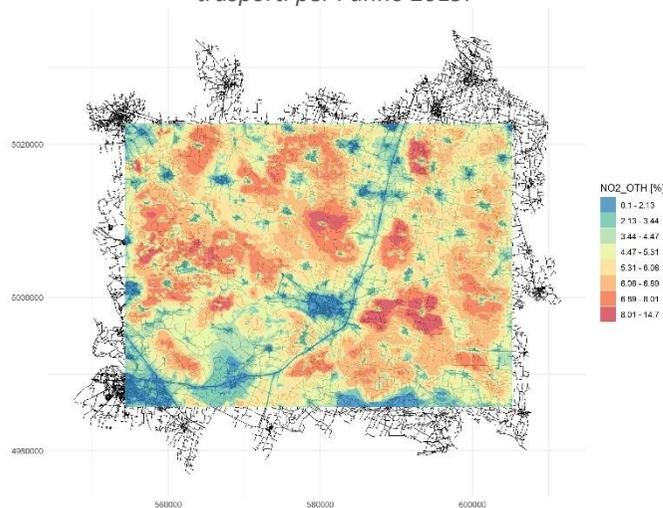


Figura 52: contributo percentuale alla media annua di NO<sub>2</sub> per gli altri settori emissivi per l'anno 2019

Si riportano, poi, in allegato le schede riepilogative per ogni comune appartenente al distretto sanitario di Cremona. Anche per questo inquinante, è stato costruito un grafico a barre come nei paragrafi precedenti. Si prende sempre a titolo di esempio, il grafico relativo al comune di Cremona. In questo caso il comparto emissivo residenziale non è più l'unico importante come nei casi precedenti, ed anzi viene ampiamente superato, in termini percentuali dal comparto dei trasporti nel periodo estivo.

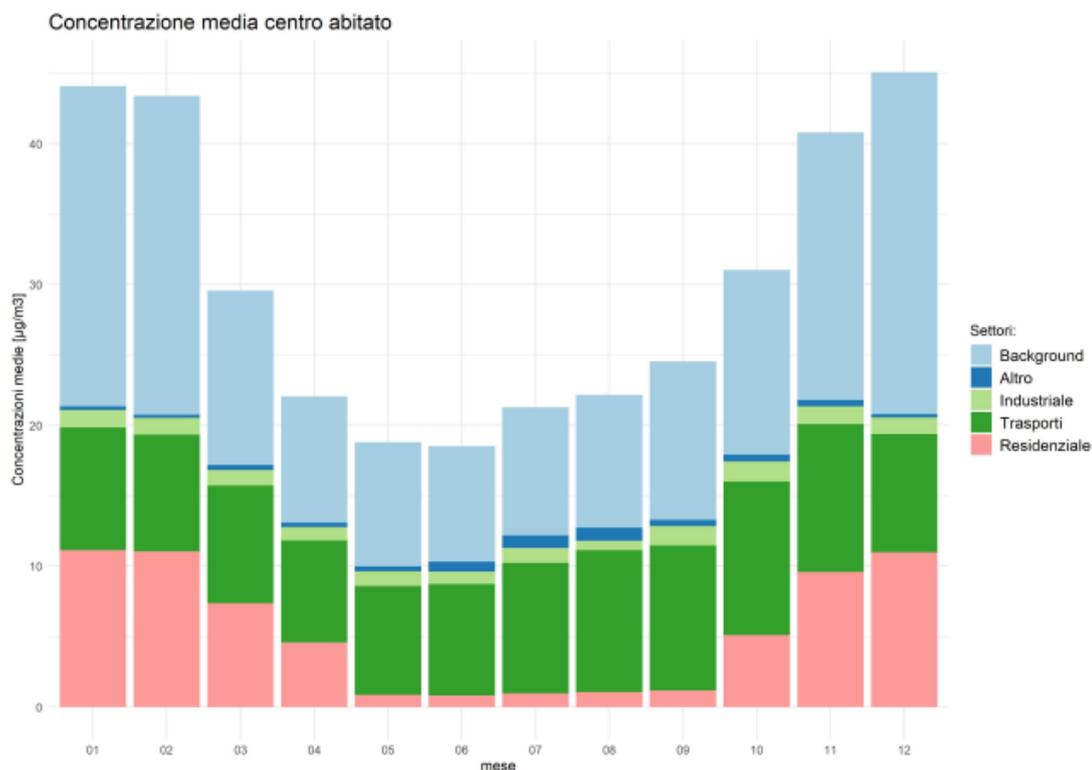


Figura 53: concentrazioni media mensili di NO<sub>2</sub> delle aree abitate di Cremona per l'anno 2019.

## 4. VALIDAZIONE DEI RISULTATI (ANNO 2019)

### 4.1 Confronto con i valori osservati

La validazione del modello è stata effettuata confrontando il risultato finale delle simulazioni con i valori osservati per i rispettivi anni delle stazioni appartenenti alla rete di monitoraggio della qualità dell'aria di Arpa Lombardia e Arpa Emilia-Romagna.

Per ogni stazione di qualità dell'aria sono stati creati dei report di validazione utili a valutare le prestazioni del modello attraverso grafici di confronto e scatter plot tra la media giornaliera del dato osservato e lo stesso parametro del dato calcolato. A titolo di esempio di seguito vengono presentati alcuni report di validazione.

I risultati della validazione sono soddisfacenti e garantiscono una buona affidabilità del risultato modellistico ottenuto.

La localizzazione delle stazioni è raffigurata nella figura seguente.

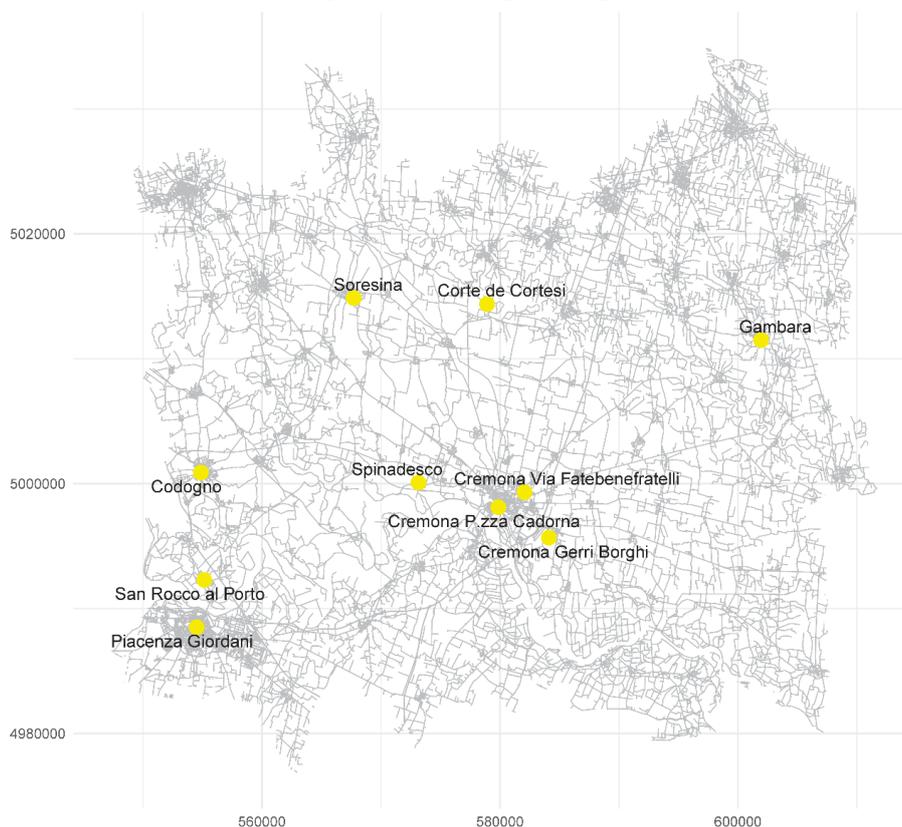
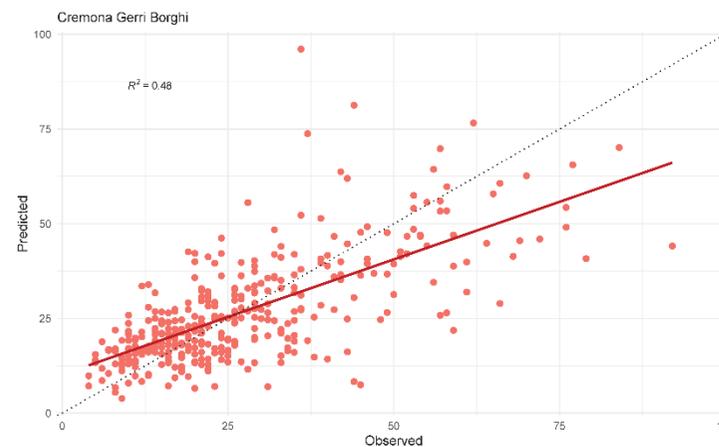
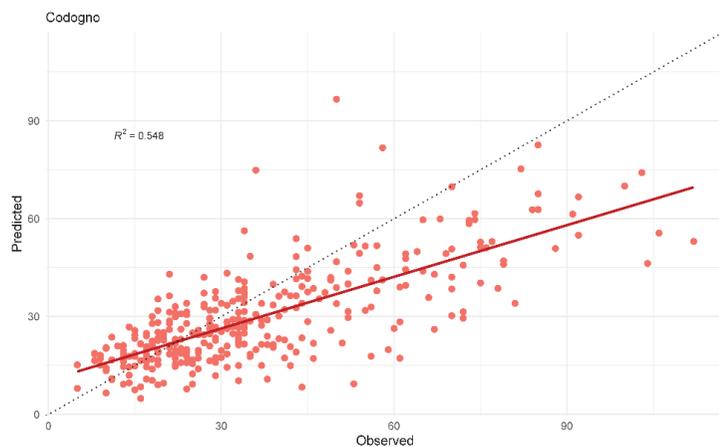
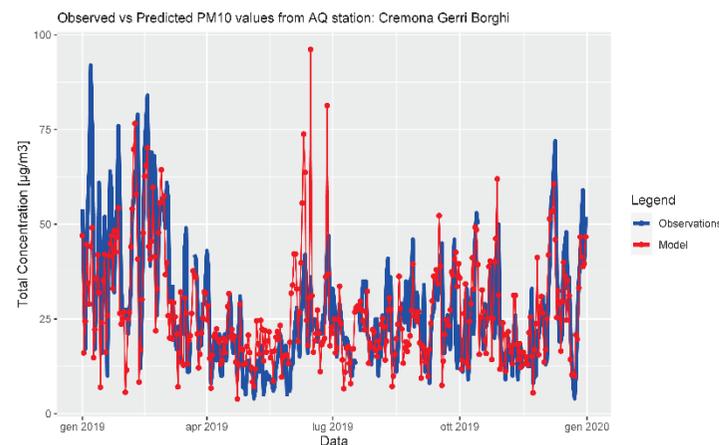
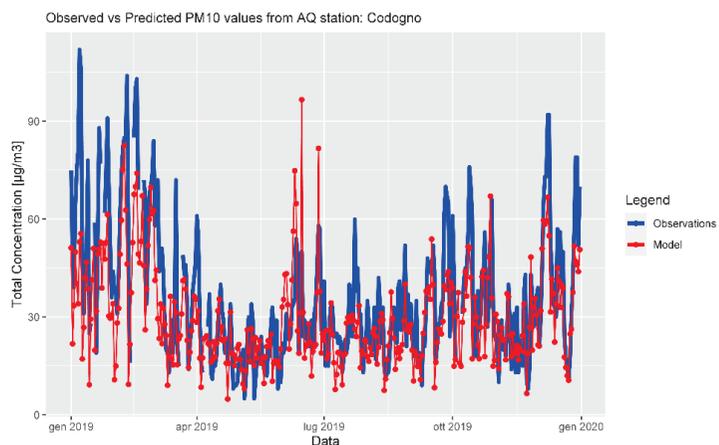


Figura 54: stazioni di qualità dell'aria presenti sul dominio di calcolo.

Stazione	UTMX	UTMY
Codogno	554872	5000892
Corte de Cortesi	578919	5014380
Cremona Gerri Borghi	584111	4995675
Cremona P.zza Cadorna	579872	4998110
Cremona Via Fatebenefratelli	582066	4999315
Gambara	601945	5011493
Piacenza Giordani	554514	4988504
San Rocco al Porto	555154	4992297
Soresina	567712	5014860
Spinadesco	573153	5000087

Figura 55: elenco delle stazioni di qualità dell'aria presenti sul dominio di calcolo.

Di seguito si riportano i report di validazione ottenuti per il PM10 e NO<sub>2</sub>.

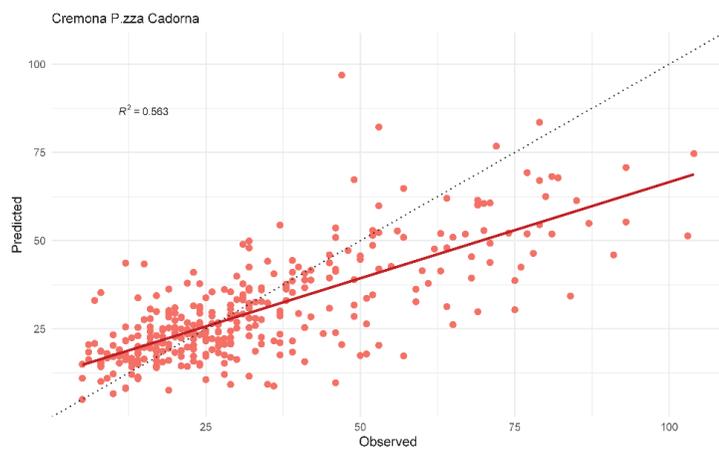
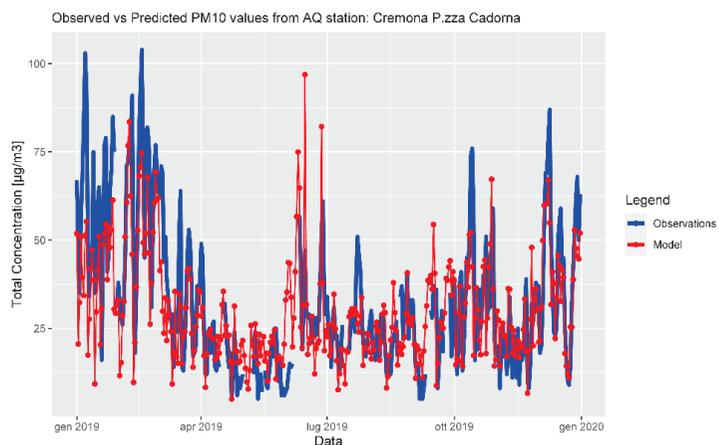


Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	35.9	70	0.548
Model	29.5	51	0.548

Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	27.6	53.0	0.48
Model	27.0	46.6	0.48

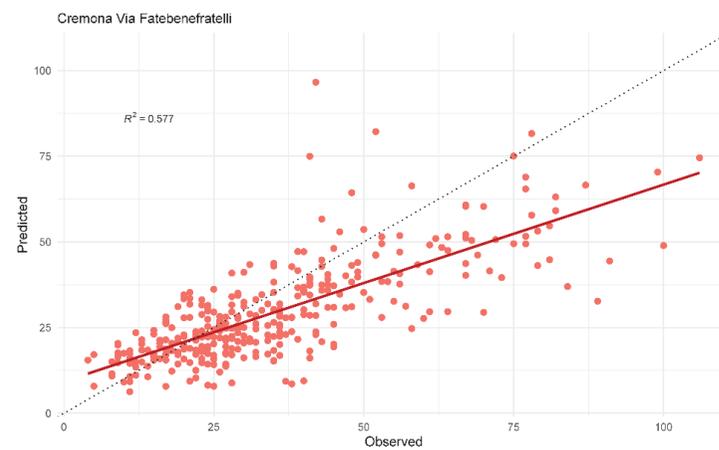
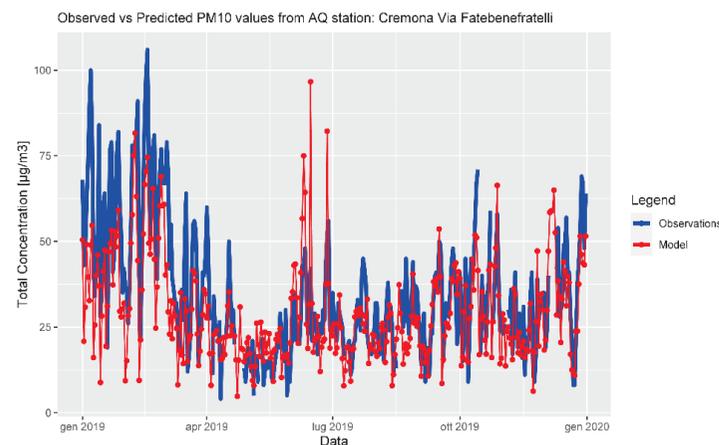
Figura 56: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Codogno

Figura 57: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Cremona Gerri Borghi



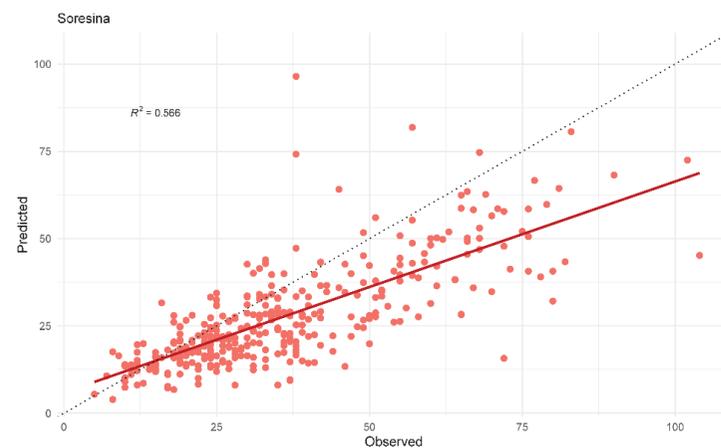
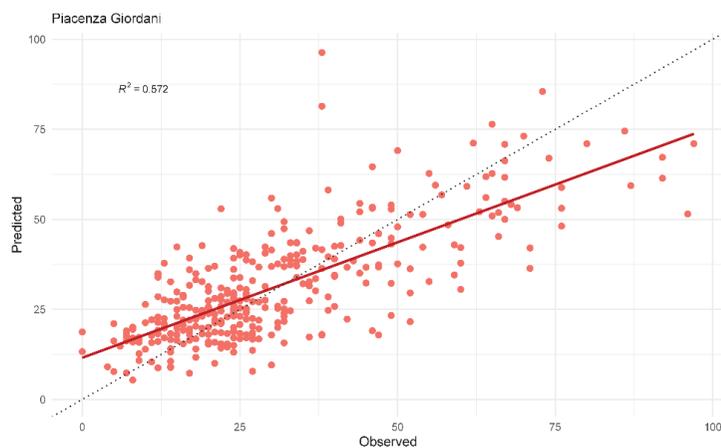
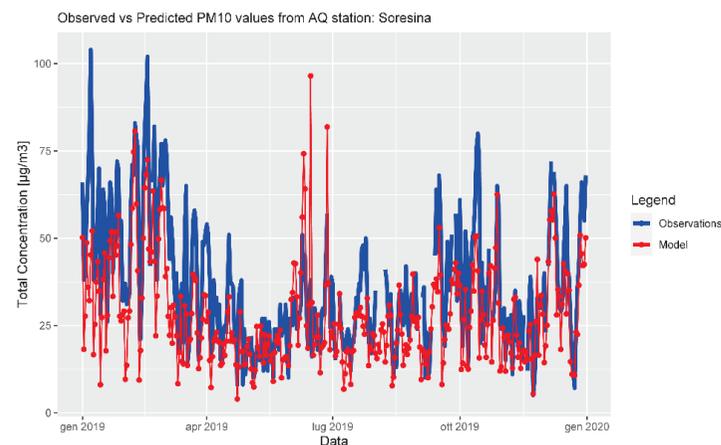
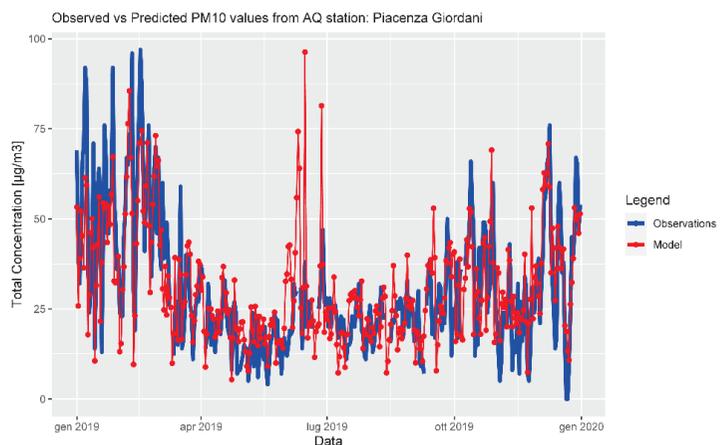
Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	33.0	68.0	0.563
Model	30.1	51.9	0.563

Figura 58: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Cremona P.zza Cadorna



Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	35.2	67.0	0.577
Model	29.5	49.5	0.577

Figura 59: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Cremona Via Fatebenefratelli



Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	30.5	60.0	0.572
Model	31.1	53.1	0.572

Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	36.5	66.0	0.566
Model	28.0	49.8	0.566

Figura 60: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Piacenza Giordani

Figura 61: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Soresina

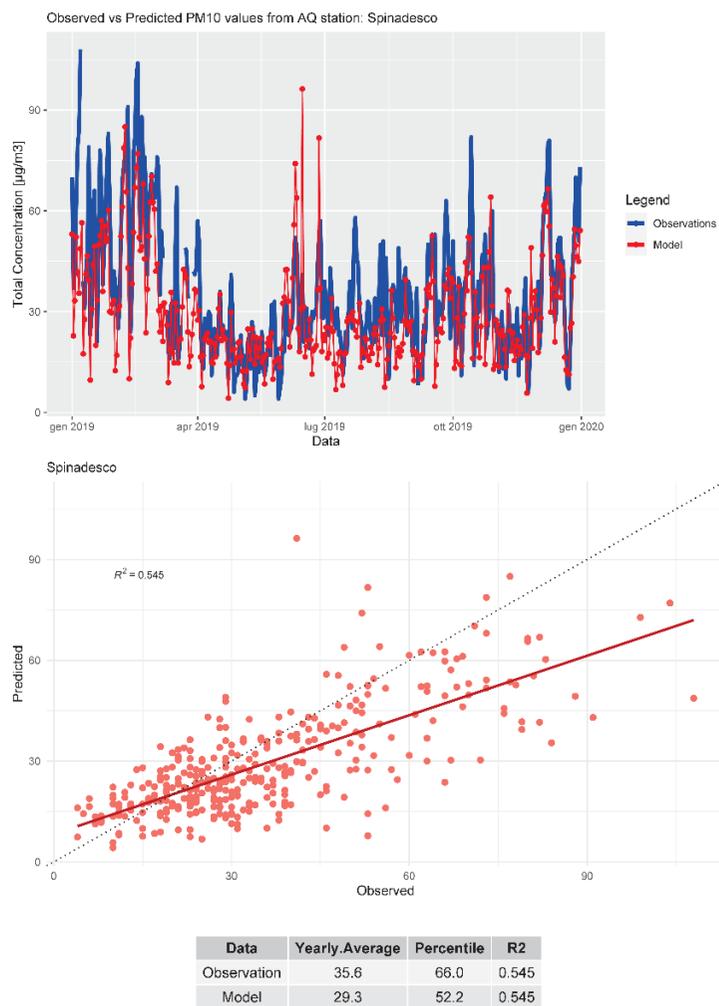
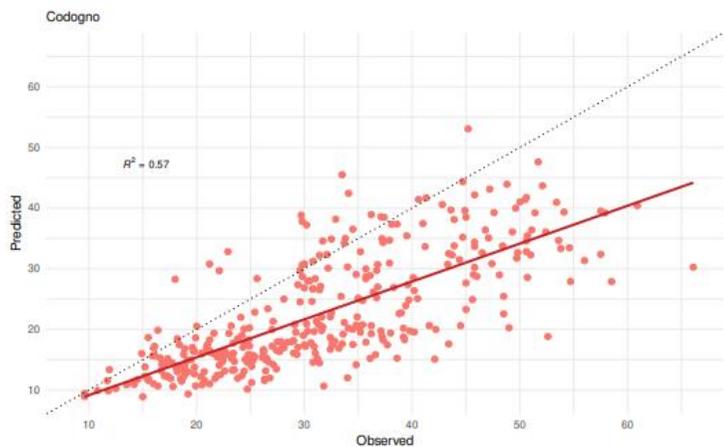
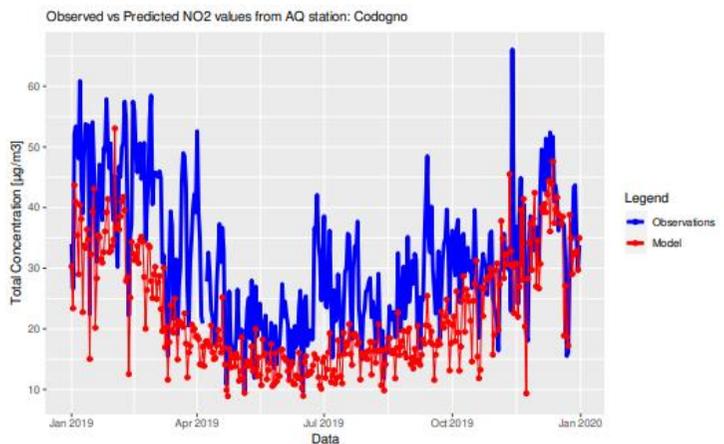
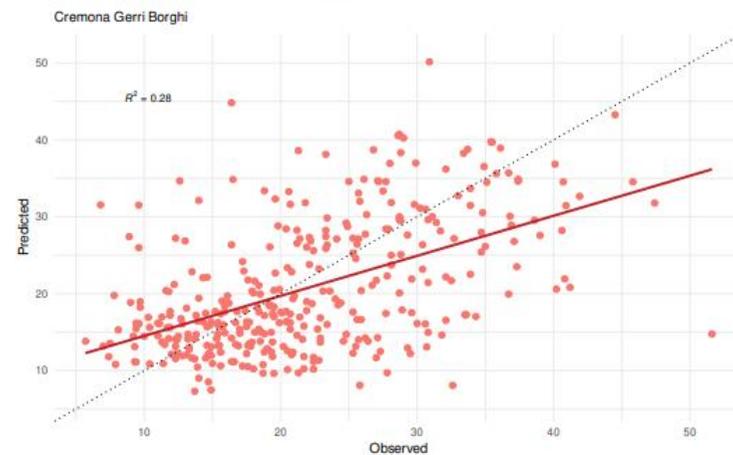
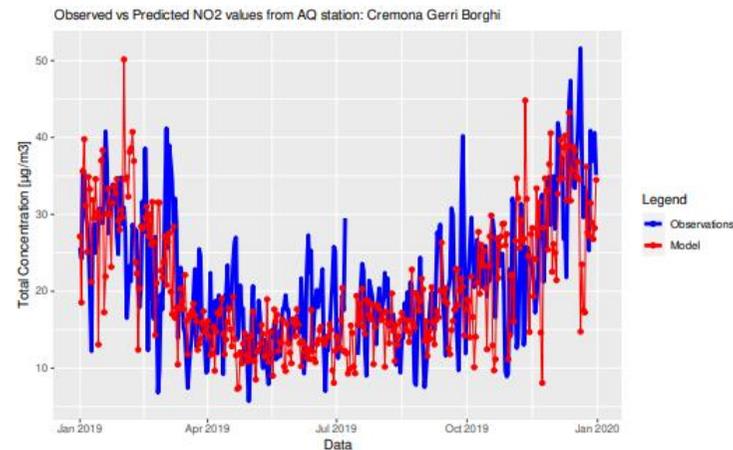


Figura 62: Report di validazione. Inquinante: PM10. Stazione di Validazione: Spinadesco



Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	31.1	62.3	0.57
Model	22.4	49.1	0.57

Figura 63: Report di validazione. Inquinante: NO<sub>2</sub>. Stazione di Validazione: Codogno



Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	21.7	48.6	0.28
Model	20.6	46.3	0.28

Figura 64: Report di validazione. Inquinante: NO<sub>2</sub>. Stazione di Validazione: Cremona Gerre Borghi

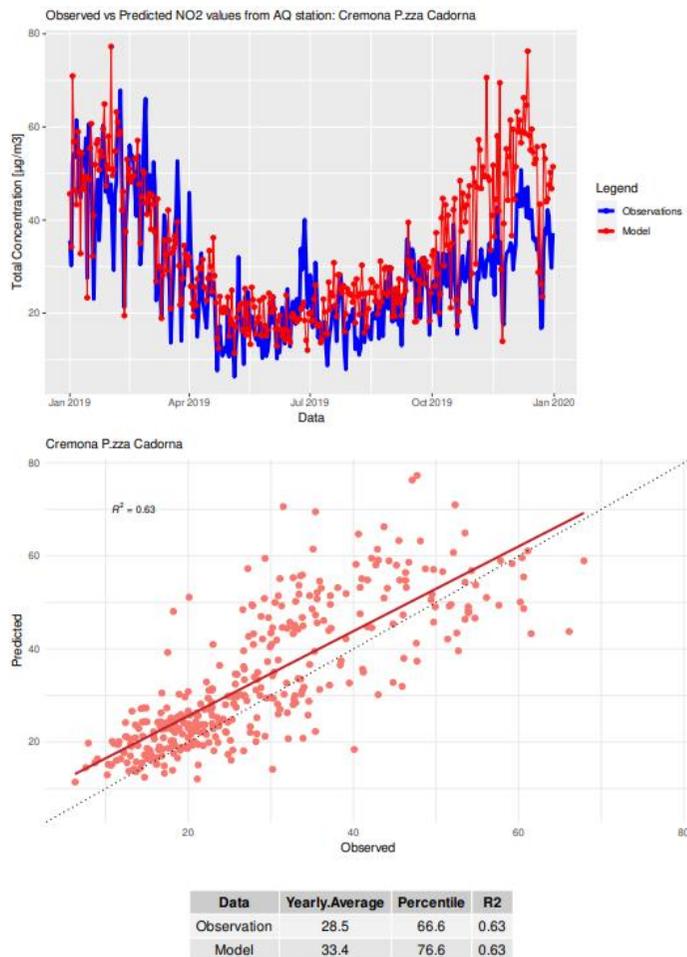


Figura 65: Report di validazione. Inquinante: NO<sub>2</sub>. Stazione di Validazione: Cremona P.zza Cadorna

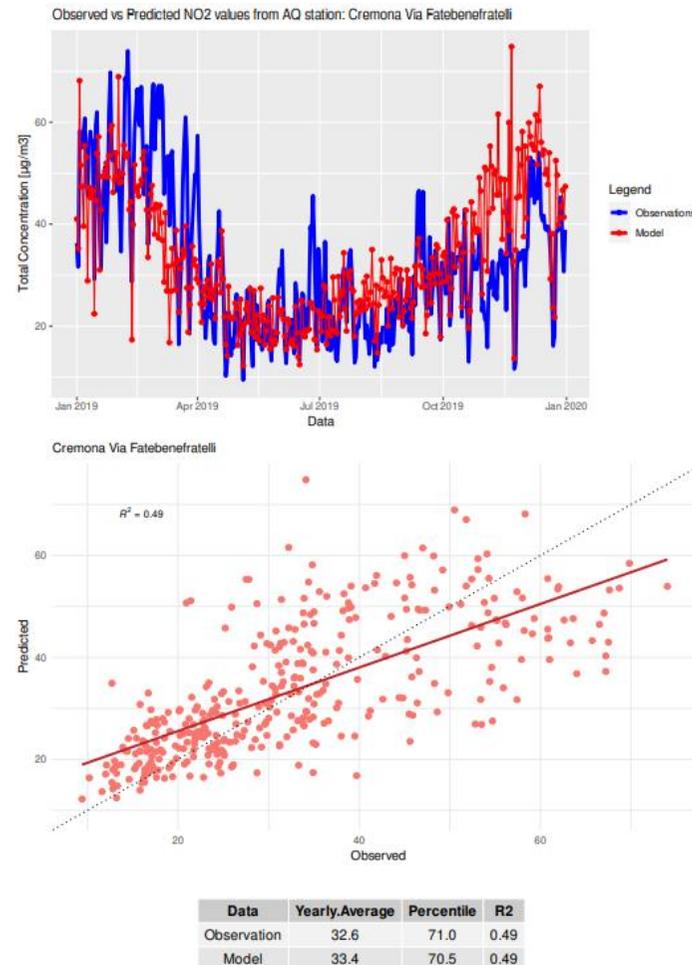
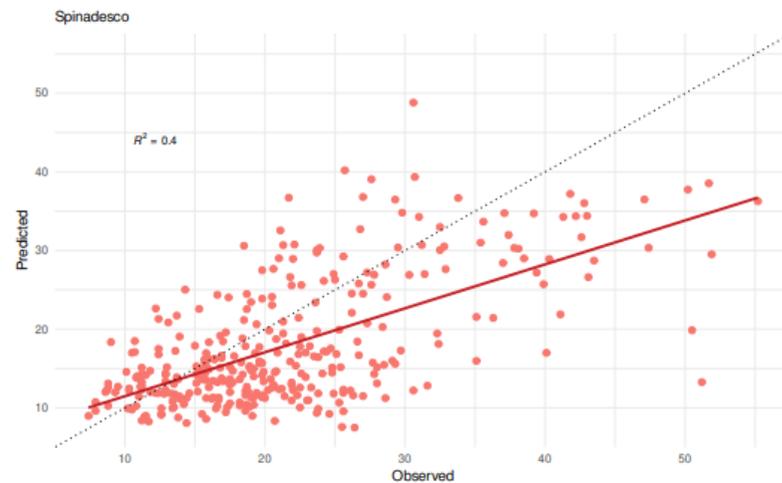
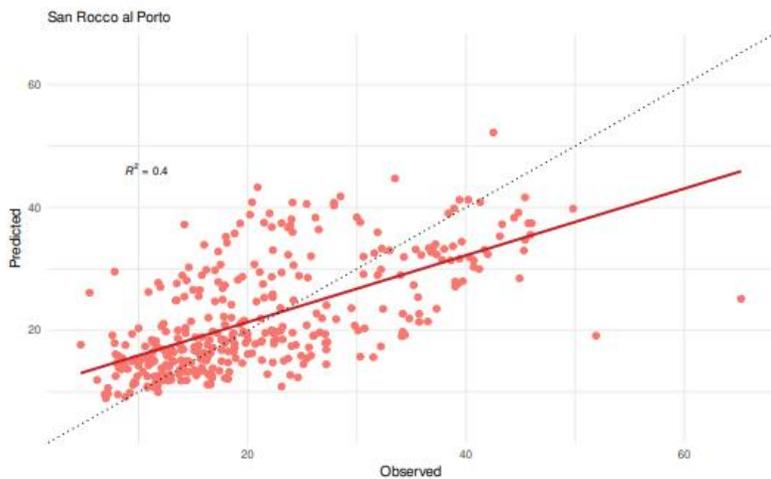
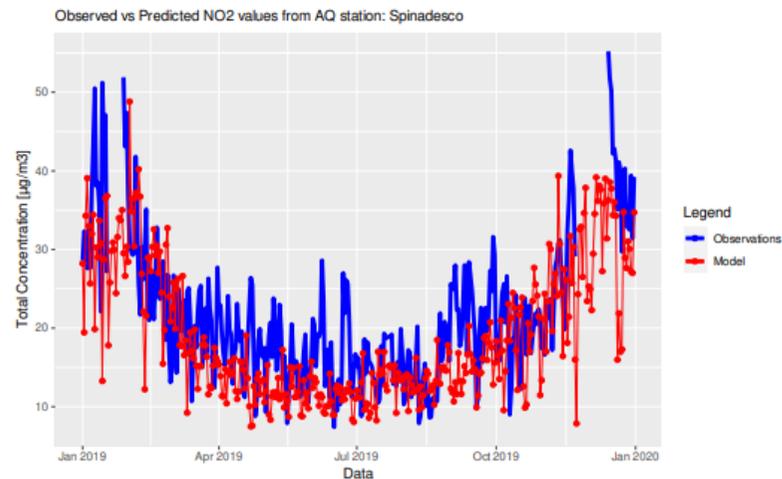
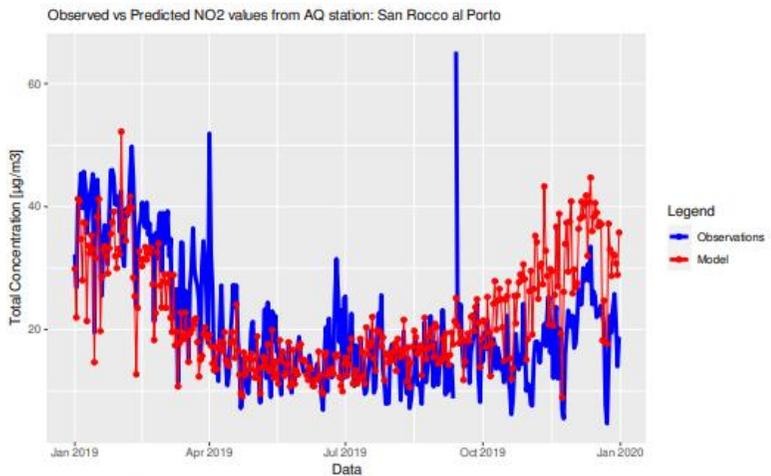


Figura 66: Report di validazione. Inquinante: NO<sub>2</sub>. Stazione di Validazione: Cremona Via Fatebenefratelli



Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	21.1	55.5	0.4
Model	21.9	46.8	0.4

Data	Yearly.Average	Percentile	R2
Observation	21.6	53.0	0.4
Model	17.9	43.1	0.4

Figura 68: Report di validazione. Inquinante: NO<sub>2</sub>. Stazione di Validazione: San Rocco al Porto

Figura 67: Report di validazione. Inquinante: NO<sub>2</sub>. Stazione di Validazione: Spinadesco

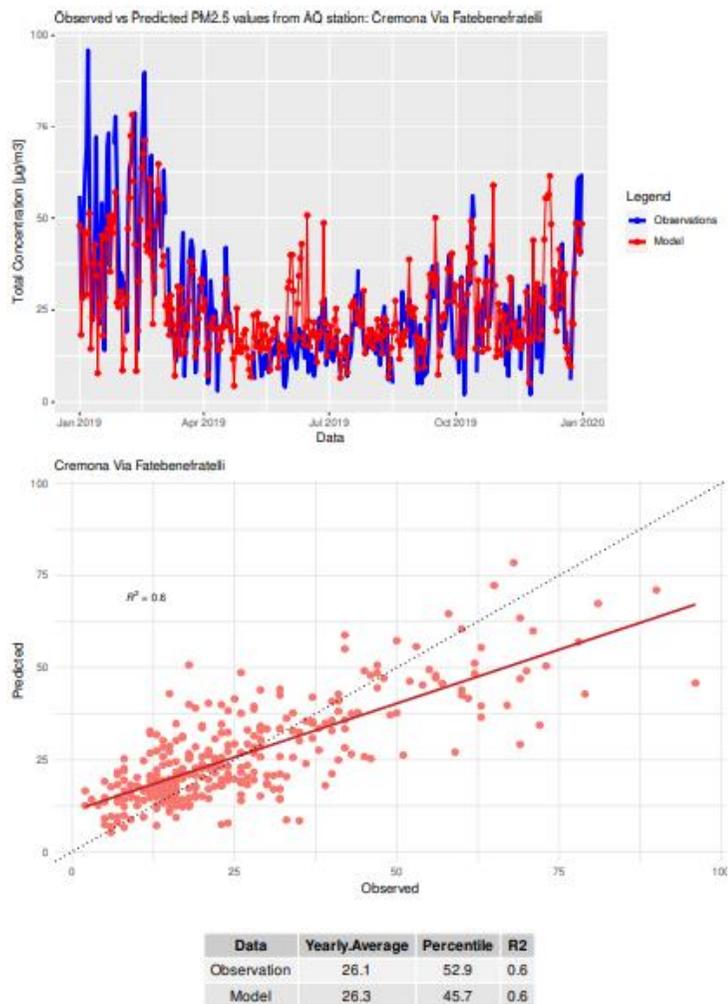


Figura 70: Report di validazione. Inquinante: PM2.5. Stazione di Validazione: Cremona Via Fatebenefratelli

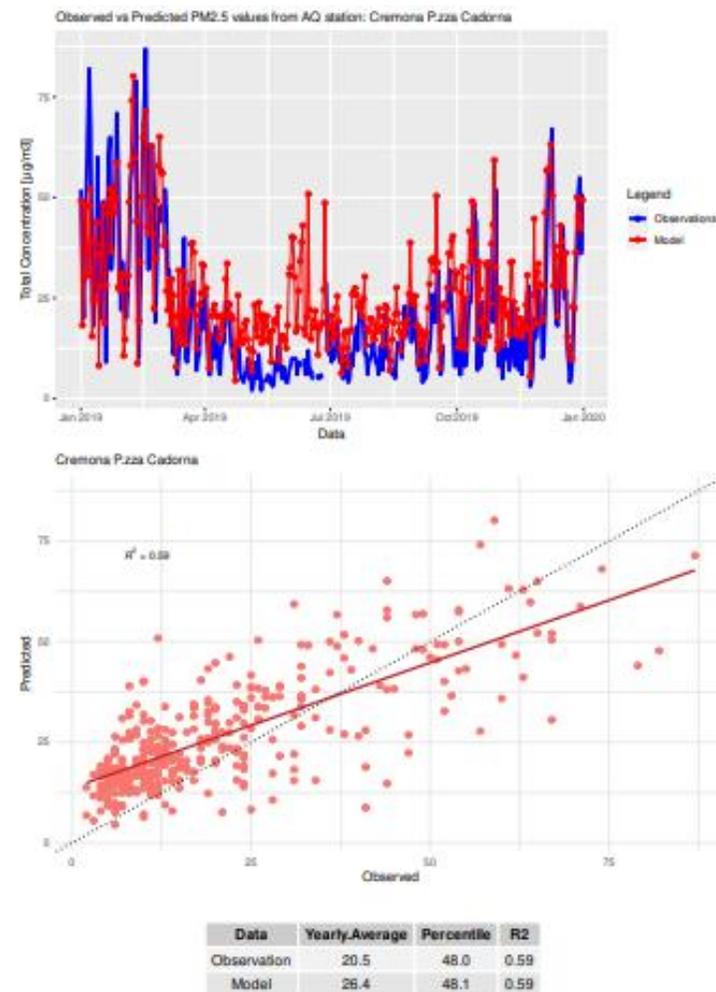


Figura 69: Report di validazione. Inquinante: PM2.5. Stazione di Validazione: Cremona P.zza Cadorna

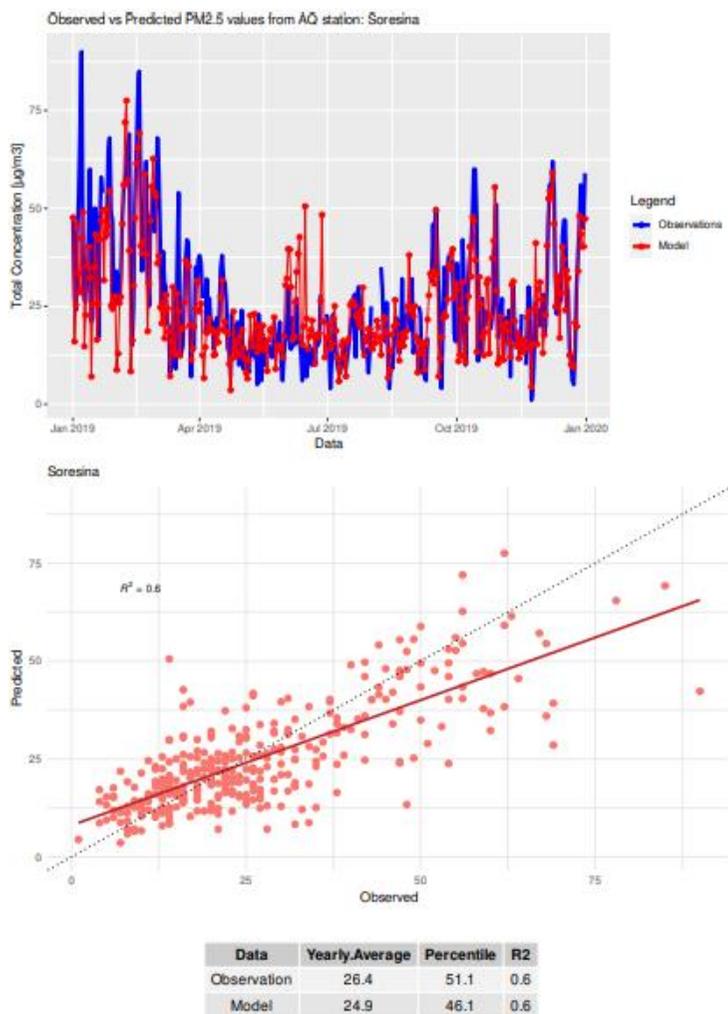


Figura 71: Report di validazione. Inquinante: PM2.5. Stazione di Validazione: Soresina

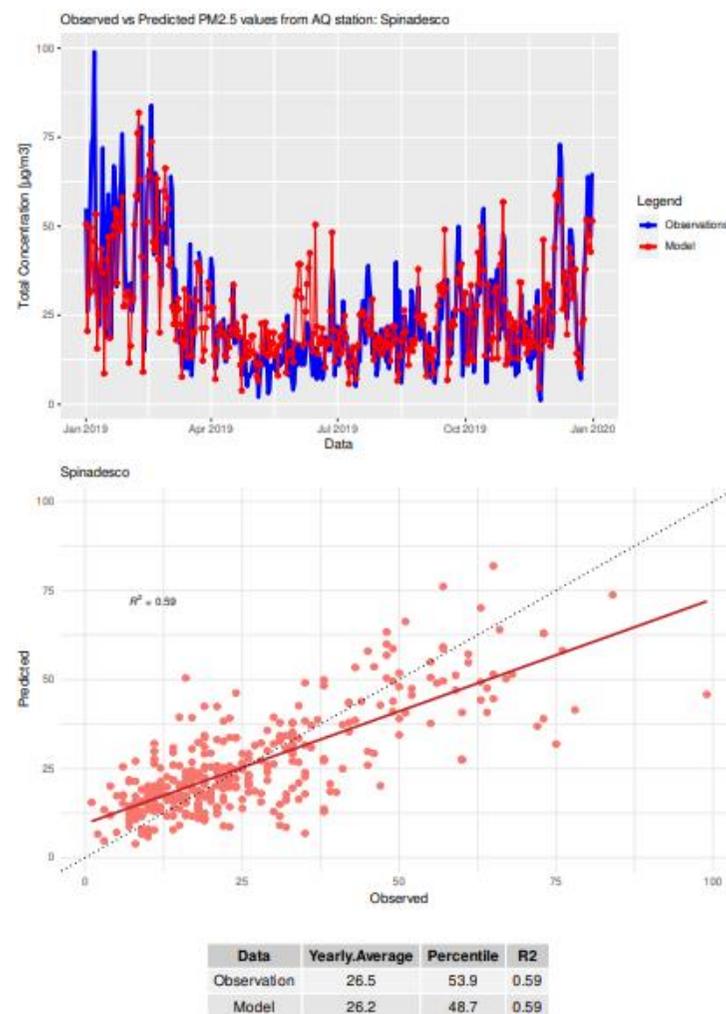


Figura 72: Report di validazione. Inquinante: PM2.5. Stazione di Validazione: Spinadesco