

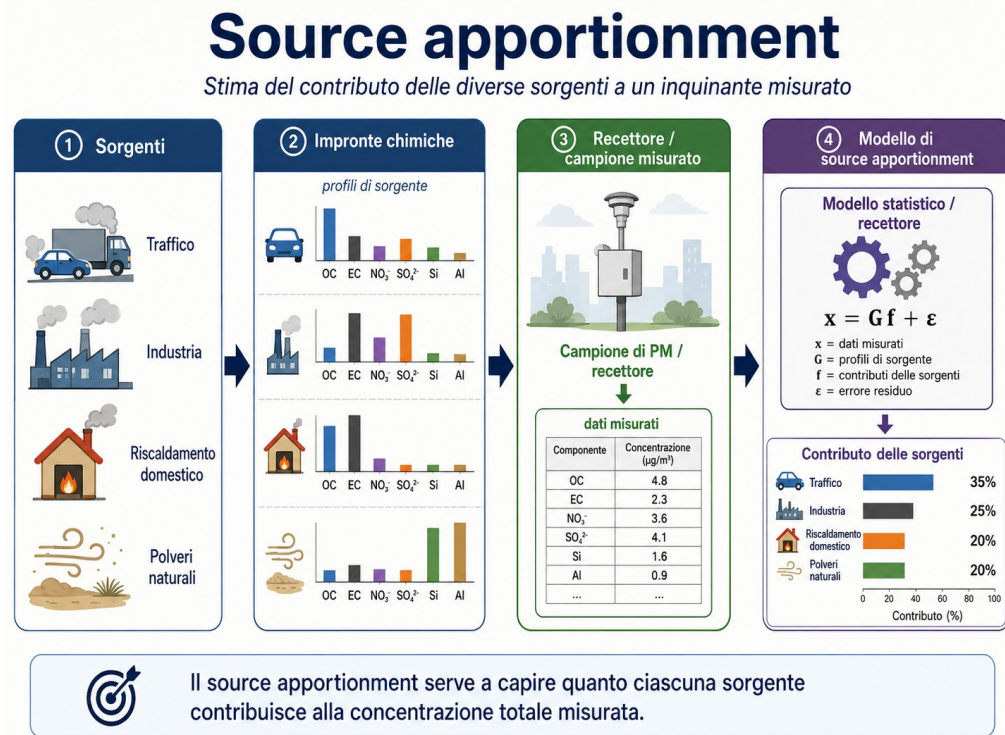
Analisi del contributo emissivo del settore riscaldamento alla qualità dell'aria in Toscana tramite source apportionment modellistico CAMx-PSAT

Caterina Busillo^{1}, Francesca Guarnieri¹, Bianca Patrizia Andreini², Chiara Collaveri², Dennis Dalle Mura², Fiammetta Dini², Roberto Fruzzetti², Enzo Piscitello³*

¹ Consorzio Lamma; ² ARPAT, ³ Techne Consulting srl

**busillo@lamma.toscana.it*

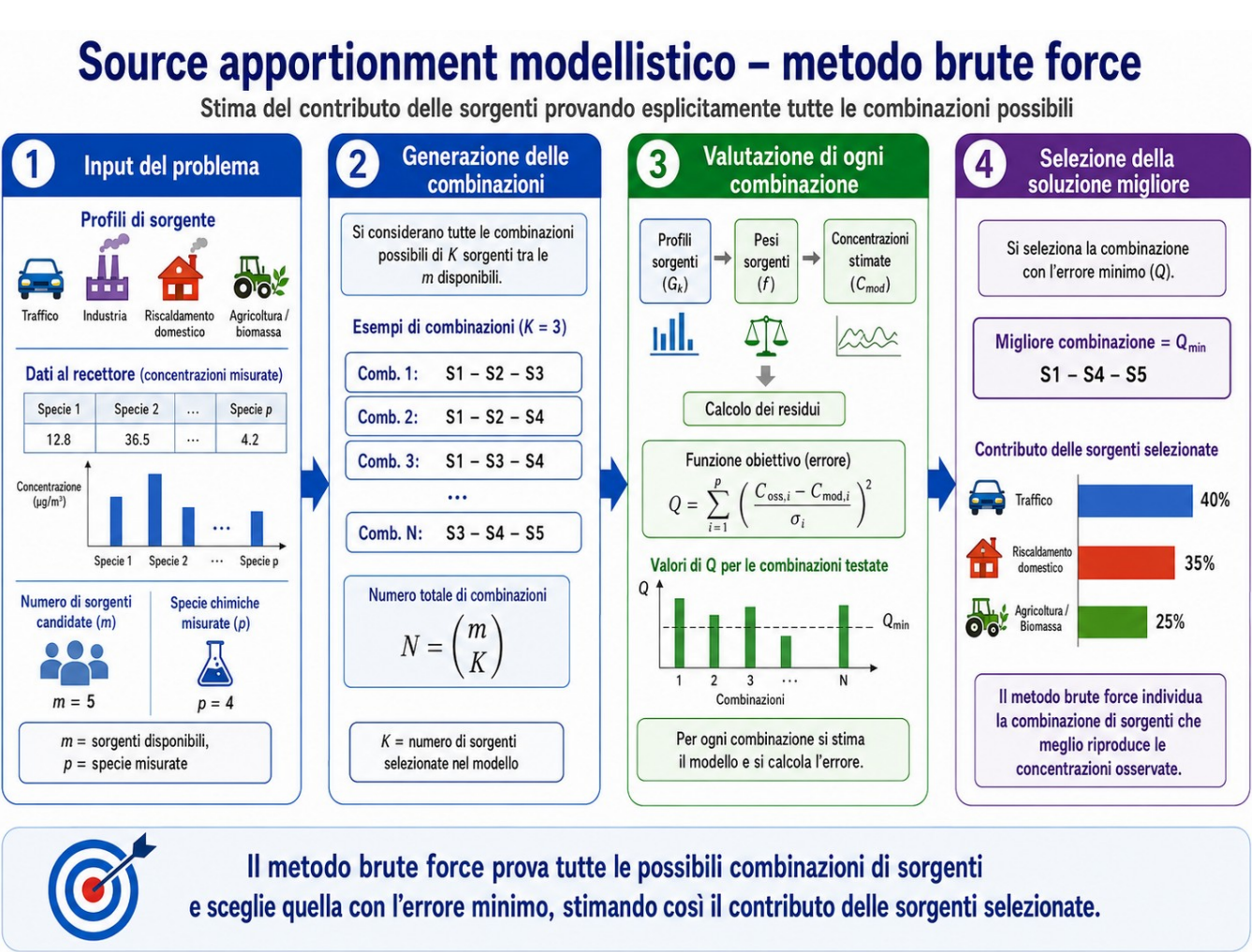
*Il **Source Apportionment** è una metodologia in grado di identificare e stimare quantitativamente il contributo alle concentrazioni degli inquinanti in aria ambiente da parte delle principali sorgenti emissive esistenti nell'area di studio. Consente di assegnare, alle diverse sorgenti individuate, la “responsabilità” non solo in termini di emissioni, ma anche in termini di concentrazioni*



Source Apportionment Analitico: approccio a “recettore” che consente di effettuare delle stime partendo dai dati di composizione chimica del particolato campionato in siti ritenuti significativi e per una durata idonea allo scopo, e applicando a tali dati specifiche tecniche statistiche. La PMF appartiene alla categoria dei modelli a recettore e rappresenta un approccio basato sull'applicazione di tecniche di analisi multivariata

Il metodo **Brute Force** è una tecnica di analisi di sensitività basata sul confronto tra una simulazione di riferimento, che include tutte le sorgenti emissive, e una o più simulazioni alternative in cui le emissioni delle sorgenti di interesse vengono modificate, ridotte o azzerate.

Il contributo della sorgente analizzata viene stimato dalla differenza tra le concentrazioni simulate nella configurazione di riferimento e quelle ottenute nella simulazione perturbata. Questo approccio consente di valutare l'effetto di una specifica categoria emissiva sulla qualità dell'aria, ma richiede l'esecuzione di più corse modellistiche.

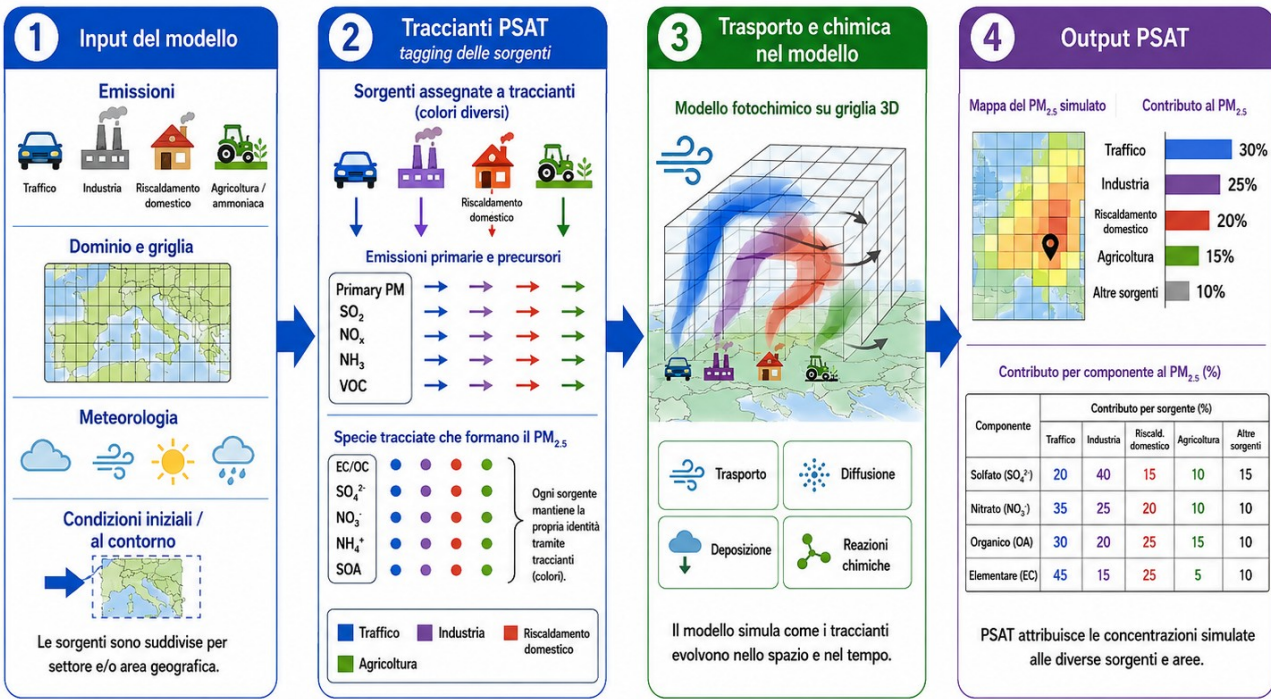


PSAT-Particulate Source Apportionment Technology

modulo integrato nel modello fotochimico di dispersione CAMx, Comprehensive Air Quality Model with Extensions, e consente di stimare il contributo delle diverse sorgenti emissive durante la stessa simulazione utilizzata per il calcolo delle concentrazioni totali. Il metodo si basa sull'impiego di traccianti reattivi, che evolvono in parallelo alle specie chimiche simulate dal modello, permettendo di attribuire le concentrazioni di particolato primario e secondario ai relativi precursori emissivi, settori sorgente o aree geografiche.

Source apportionment modellistico – PSAT

Stima del contributo delle sorgenti al PM tramite un modello fotochimico con traccianti



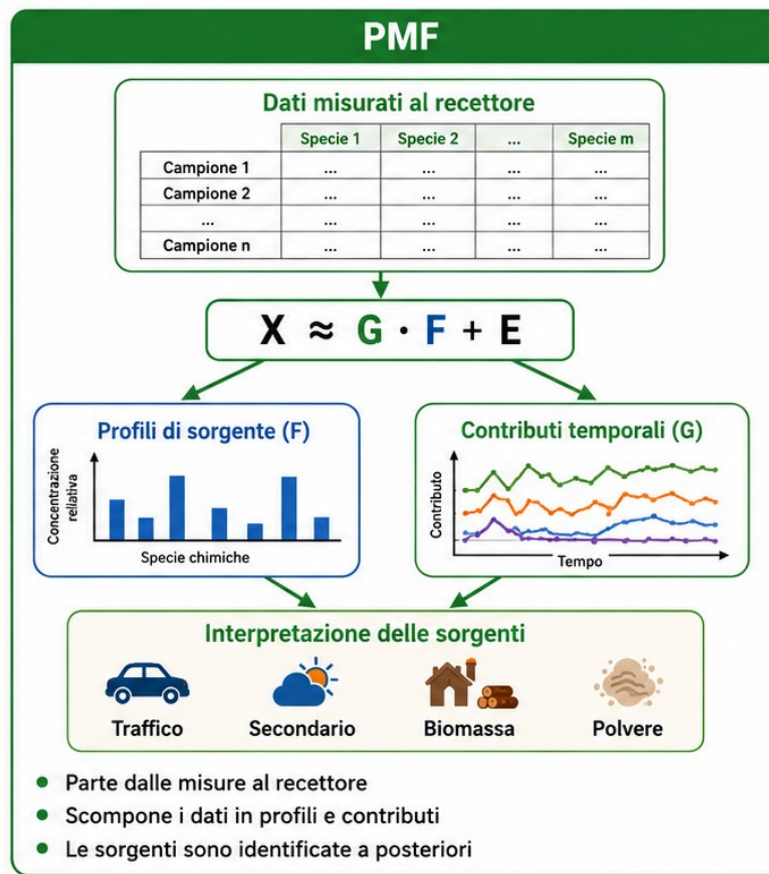
Il source apportionment modellistico PSAT serve a quantificare, nel modello, quanto ciascuna sorgente contribuisce al PM simulato in ogni area e istante.

PSAT vs Sensitivity (Brute Force)

PSAT determina chi contribuisce alla massa totale stimata, mentre la sensitivity analysis valuta come cambia il PM se una sorgente viene ridotta. Nel caso di sistemi chimici non lineari, come quelli che governano il PM secondario, il contributo di una sorgente non coincide necessariamente con l'effetto che avrebbe una sua riduzione.

PSAT risulta più efficiente dal punto di vista computazionale eseguendo il tracciamento all'interno di una singola simulazione, ha maggiore stabilità numerica, capacità di trattare sistemi chimici non lineari e riduzione significativa dei tempi di simulazione.

Source apportionment: Tagging modellistico e PMF



Approccio modellistico

VS

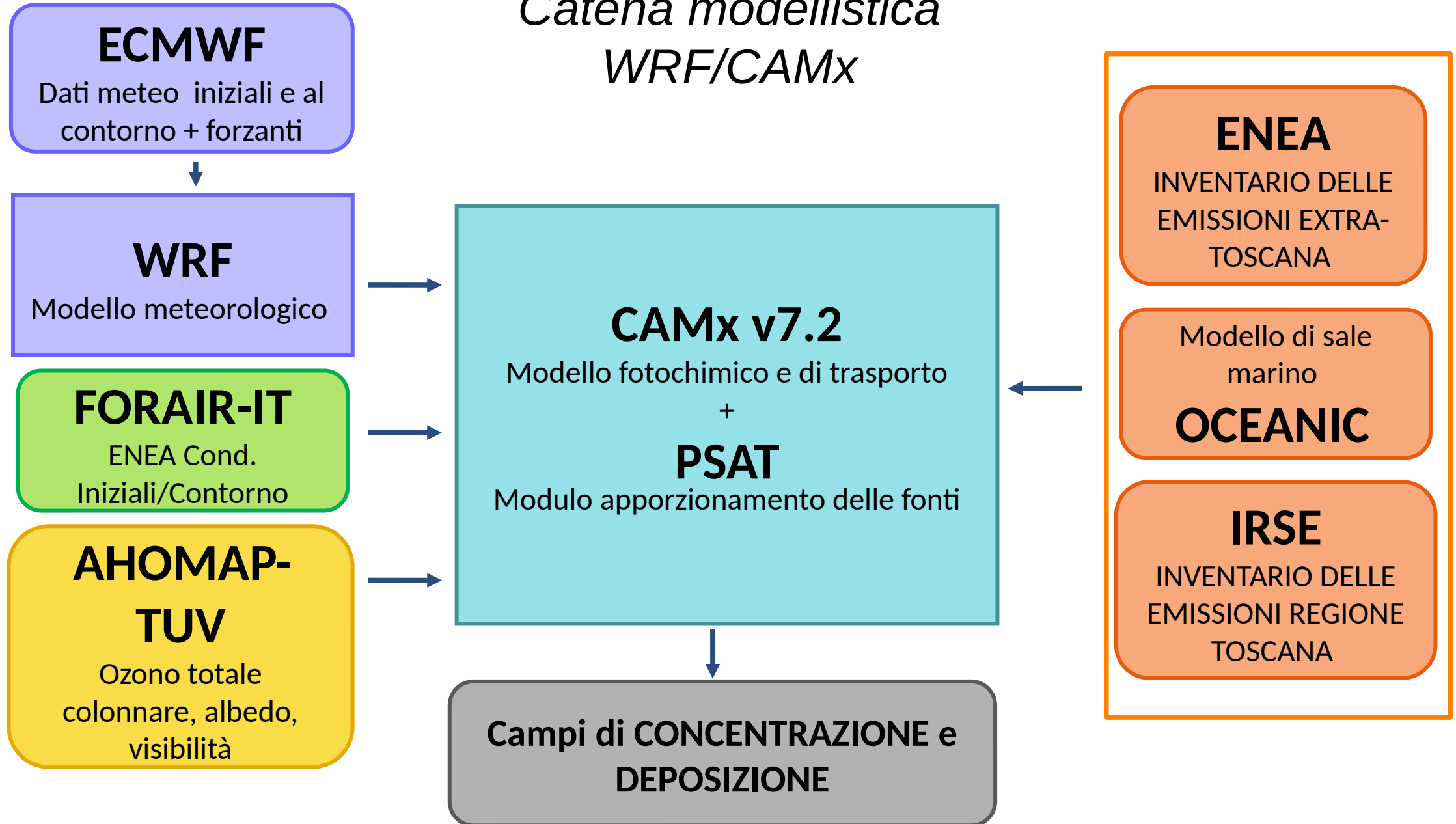


Approccio recettoriale

- Stimare il contributo del riscaldamento domestico (SNAP02) in relazione alla concentrazione totale PM2.5 in Toscana
- Confrontare:
- approccio modellistico di tagging in cui le sorgenti vengono definite a priori e il loro contributo è valutato in corsa tramite traccianti.
- approccio recettoriale e statistico (PMF) in cui le sorgenti vengono ricostruite a posteriori sulla base dei profili chimici e dell'andamento temporale dei contributi.

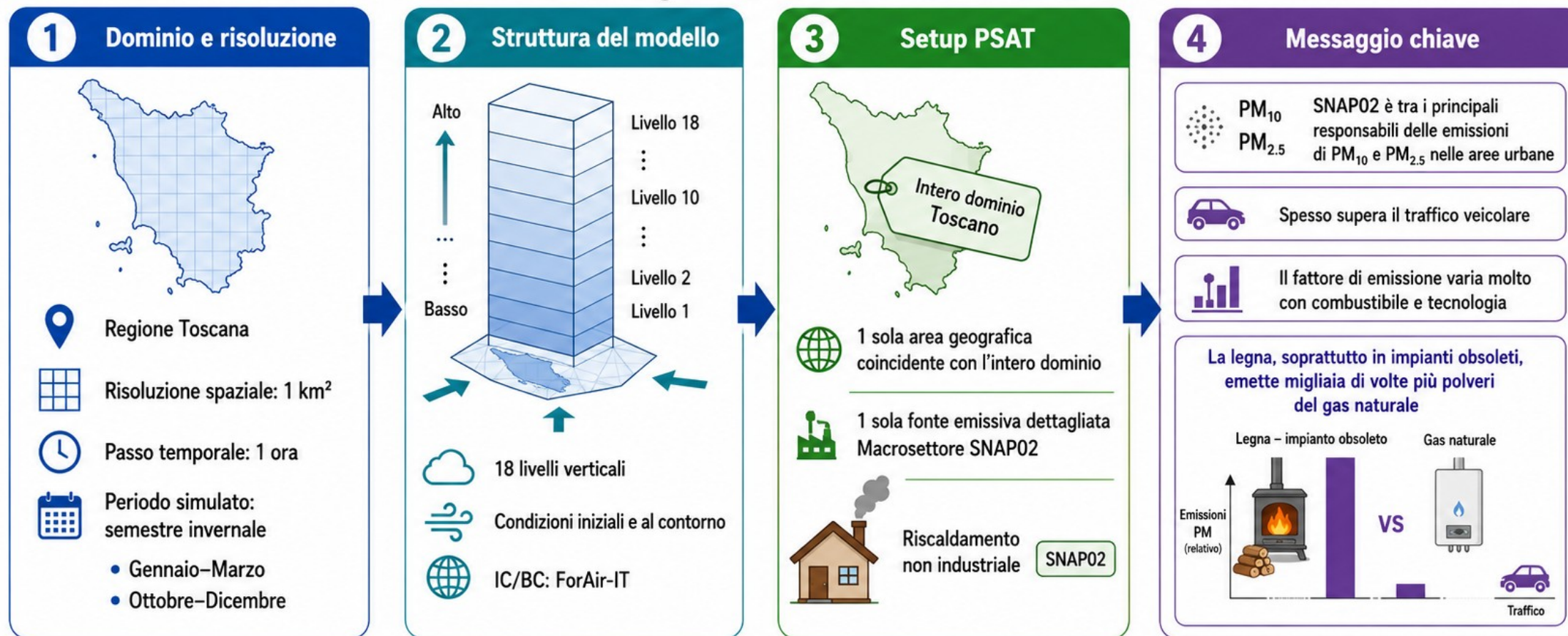
Poster: Speciazione e caratterizzazione chimica del PM2.5 strumenti di valutazione a confronto: inventario delle emissioni, modellistica e tecniche analitiche

Catena modellistica WRF/CAMx



Configurazione modellistica e setup PSAT

Dominio Regione Toscana – semestre invernale



Obiettivo: quantificare con PSAT il contributo del riscaldamento non industriale (SNAP02) al particolato simulato sull'intero dominio toscano.

Configurazione modellistica e setup delle run CAMx/PSAT

RUN 1 · CAMx anno 2024

- Simulazione **annuale** CAMx
- PSAT applicato al semestre invernale **gennaio-marzo / ottobre-dicembre**
- Risoluzione orizzontale: 2 km

RUN 2 · CAMx/PSAT inverno 2025

- Configurazione dedicata al semestre invernale (**ottobre-dicembre, gennaio-marzo**)
- Risoluzione orizzontale: 1 km

Validazione · Confronto osservativo

Confronto con i dati misurati dalle centraline di **Bassi e Capannori** per la valutazione del modello e dei contributi emissivi.

Input comuni e trattamento delle specie

Meteorologia

WRF -ARW 3km per entrambe le configurazioni modellistiche.

Emissioni

Inventario IRSE 2019 - Speciazione chimica secondo il meccanismo SAPRC07.
Emissioni Extra Toscana fornite da Enea

IC-BC

FORAIR-IT
Enea

Categorie emissive PSAT → IRSE 2019

Residenziale

Caldaie <20 MWth
Gas naturale

Residenziale

Caldaie <20 MWth
Combustibili vegetali

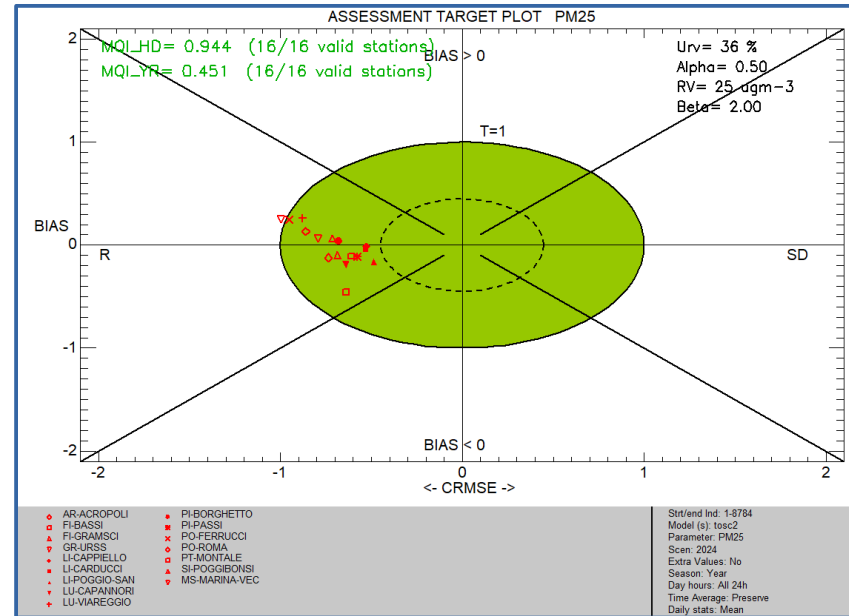
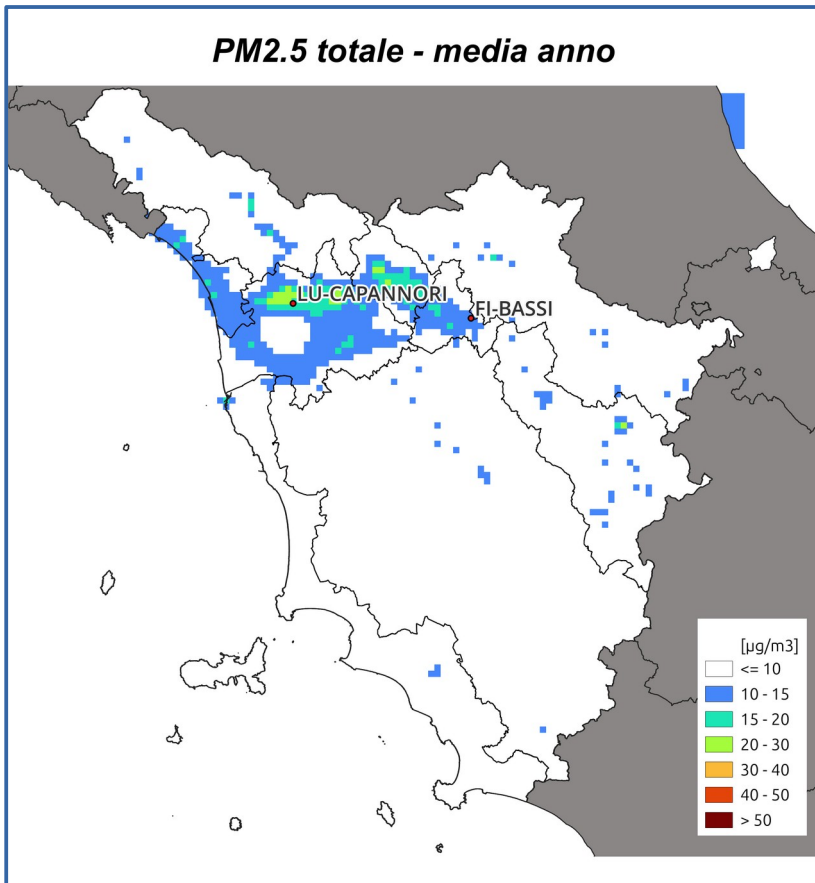
PM primario

Emesso direttamente: EC, POA, crustale fine <2.5 μm e grossolano 2.5-10 μm .

PM secondario

Formato in atmosfera da precursori gassosi: SO_2 , NO_x , NH_3 e VOC.

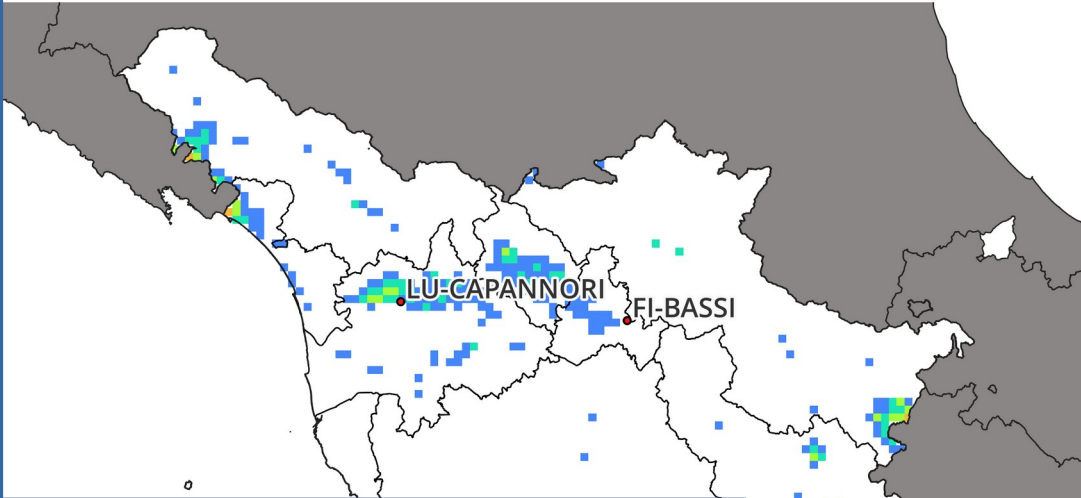
Simulazione CAMx Anno 2024



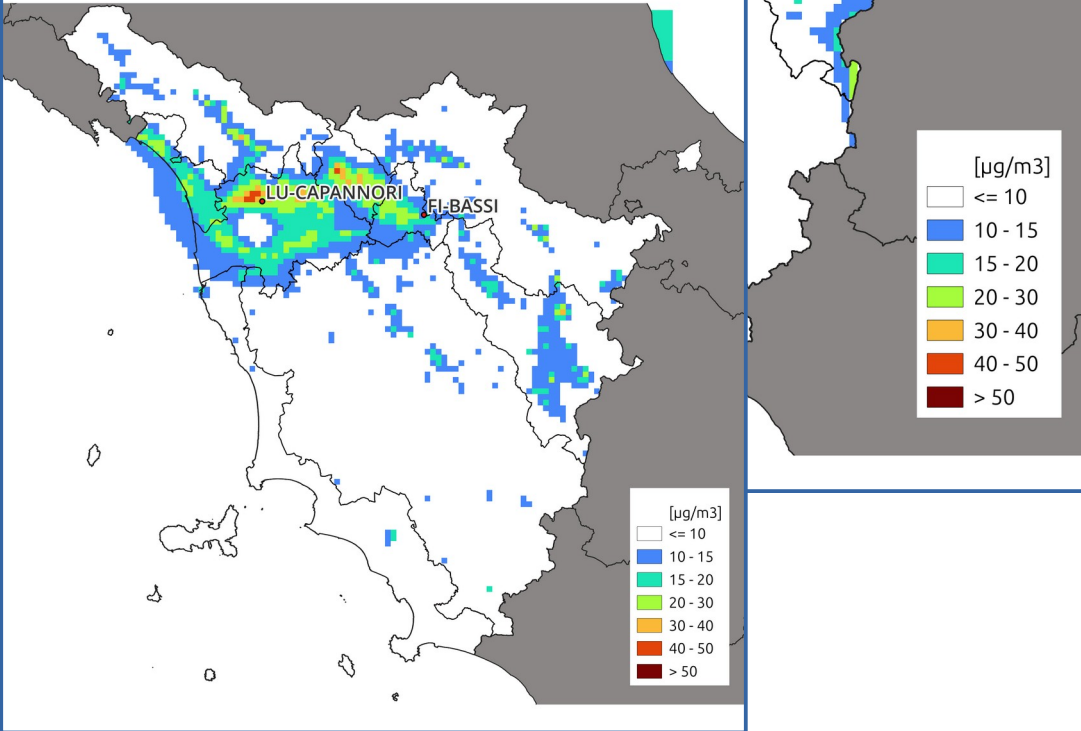
PM2.5 Media anno 2024	CAPANNORI	BASSI
CAMx [µg/m³]	15.75	10.36
Centralina [µg/m³]	18.7	11.36

Il target plot ottenuto con il DELTA Tool mostra le prestazioni del CAMx per il PM2.5 rispetto alle osservazioni delle stazioni disponibili. La maggior parte delle stazioni ricade all'interno dell'area verde → il modello rispetta i criteri di accettabilità previsti. La simulazione riproduce in modo complessivamente soddisfacente le concentrazioni medie di PM2.5. Molti punti sono leggermente spostati verso sinistra e sotto lo zero del bias, suggerendo una tendenza del modello a sottostimare le concentrazioni osservate.

PM2.5/PSAT - media inverno



PM2.5 totale - media inverno

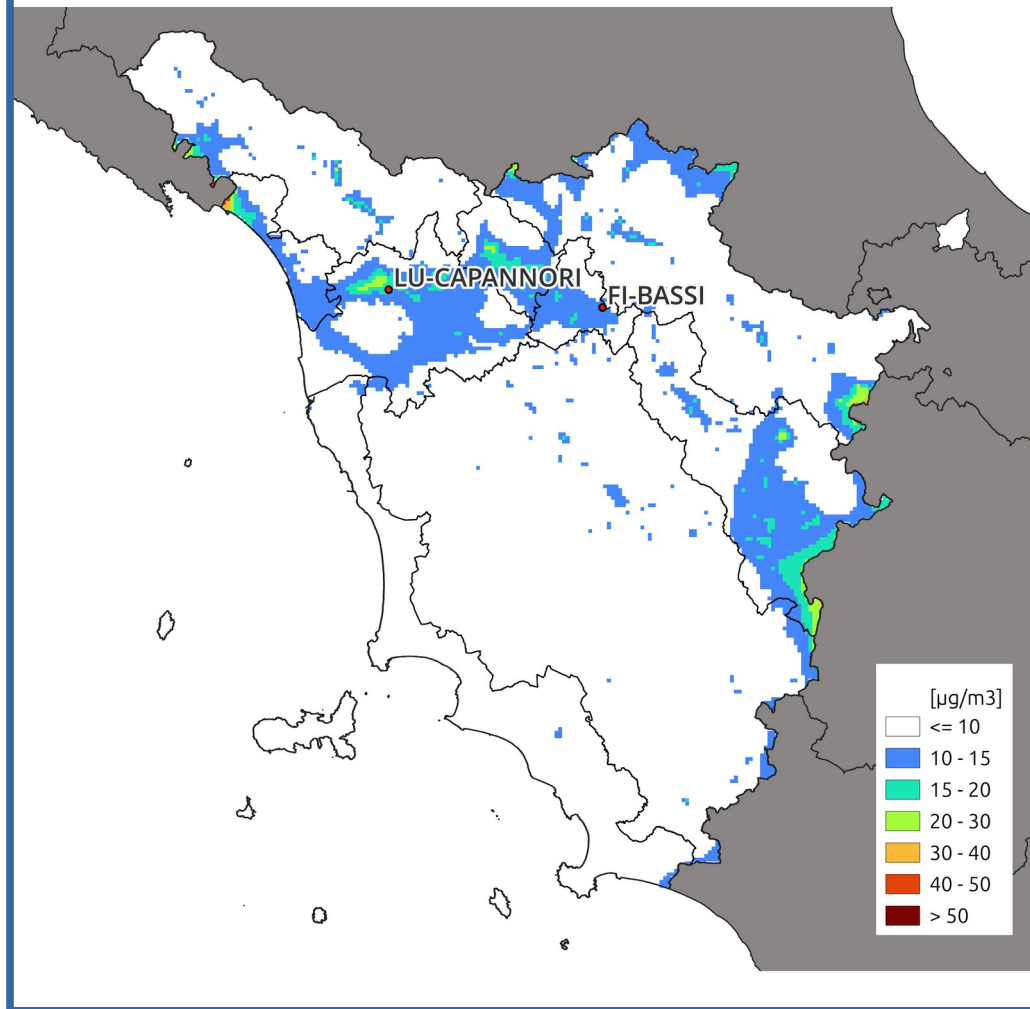


Simulazione CAMx/PSAT Inverno 2024

BASSI Media inverno	PM25	PEC	PNO3	PNH4	PSO4	POA
Centralina [µg/m3]	12.65	-	-	-	-	-
CAMx [µg/m3]	14.74	1.18	2.30	0.60	1.21	8.18
CAMx/PSAT [µg/m3]	8.53	0.69	0.77	0.52	0.4	5.2
PSAT/TOTALE [%]	57.9	58.39	33.53	86.62	32.76	63.58

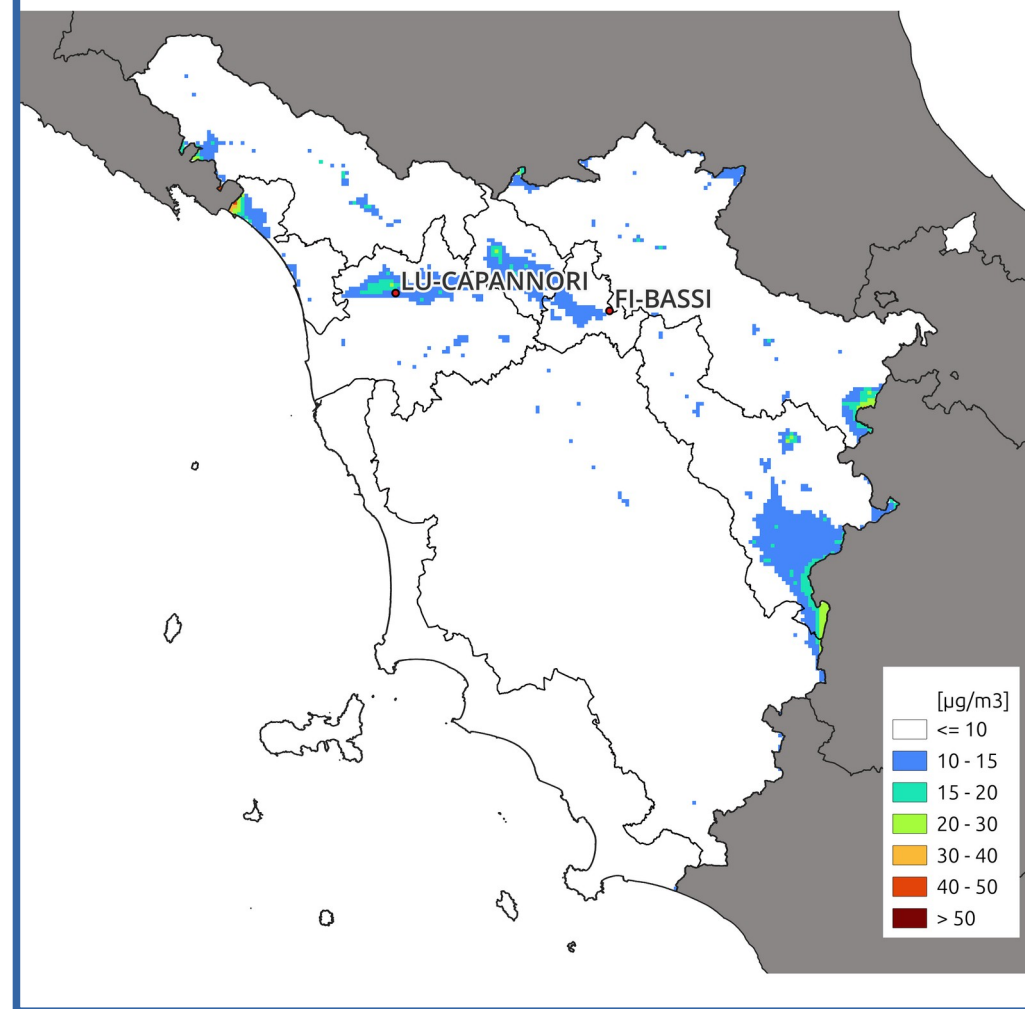
CAPANNORI Media inverno	PM25	PEC	PNO3	PNH4	PSO4	POA
Centralina [µg/m3]	25.51	-	-	-	-	-
CAMx [µg/m3]	24.81	1.56	3.55	1.02	1.45	15.61
CAMx/PSAT [µg/m3]	14.74	0.92	0.90	0.68	0.34	9.42
PSAT/TOTALE [%]	59.40	59.04	25.44	67.09	23.16	60.35

**Stima CAMx concentrazione media PM2.5 totale
inverno 2025**

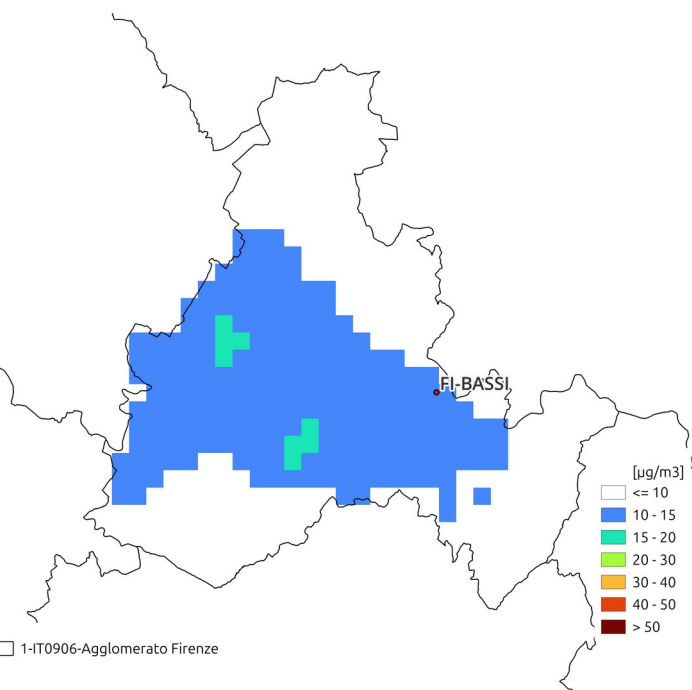


Simulazione CAMx/PSAT Inverno 2025

**Stima CAMx/PSAT concentrazione media PM2.5
inverno 2025**



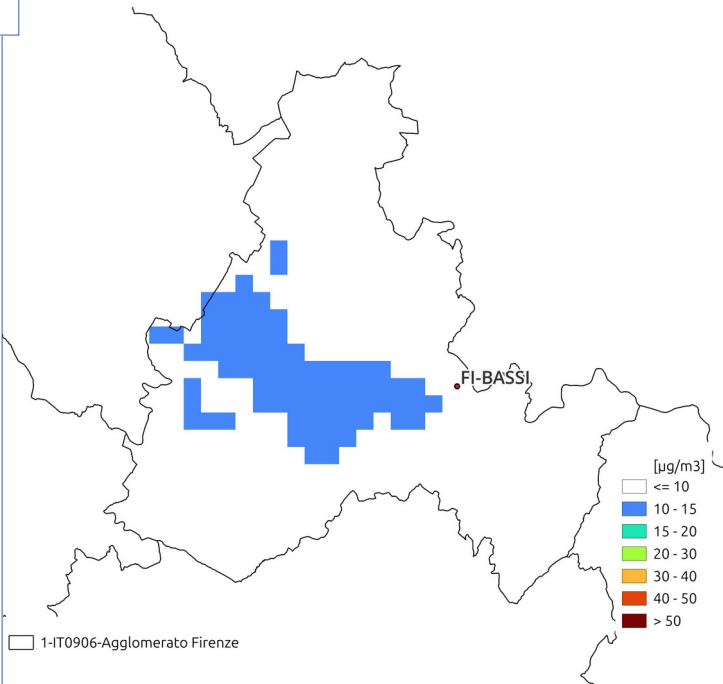
PM2.5 totale - concentrazione media inverno 2025



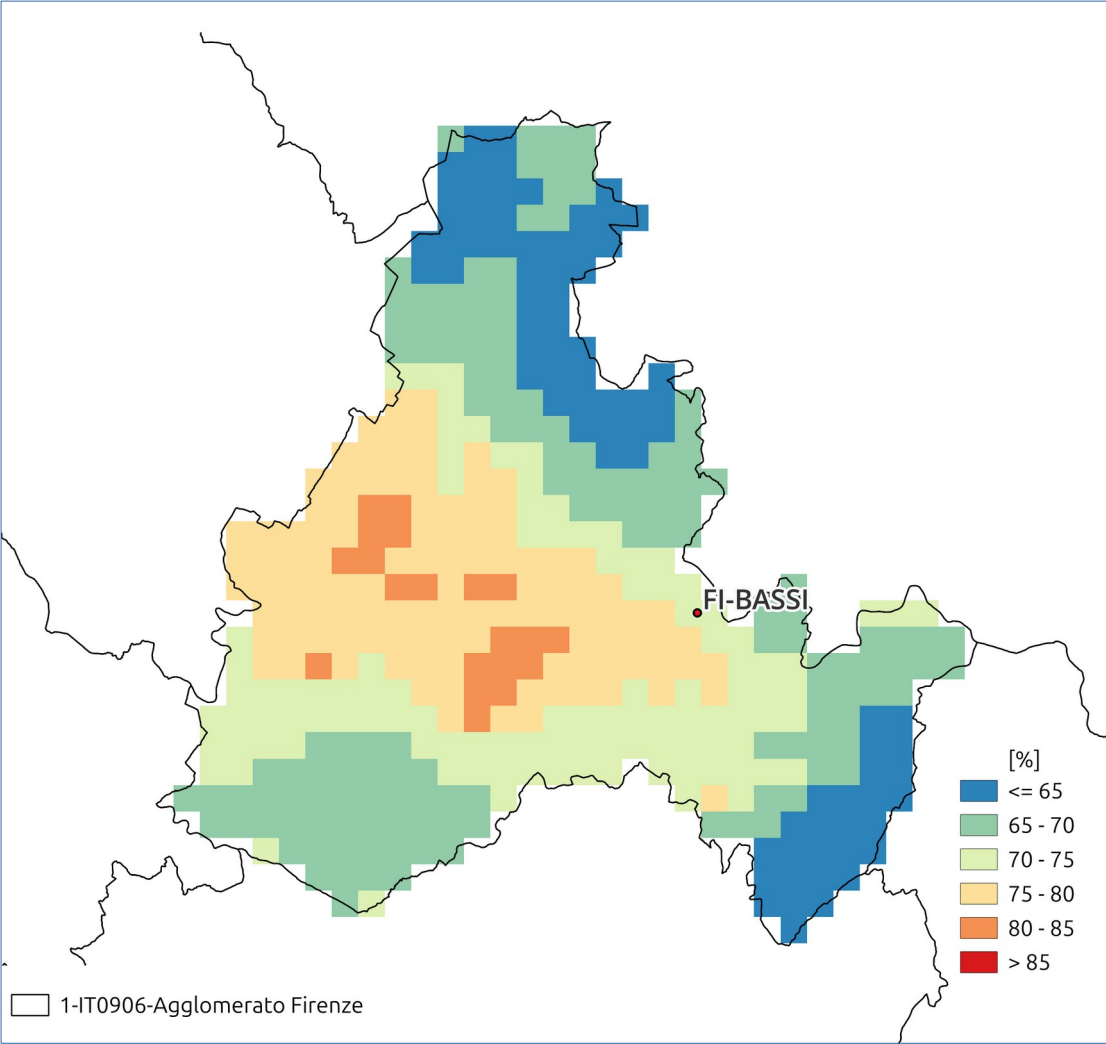
FI-BASSI

Rapporto tra il contributo alle PM_{2.5} da PSAT per il settore riscaldamento e le concentrazioni totali di PM_{2.5} simulate nella run con tutte le emissioni

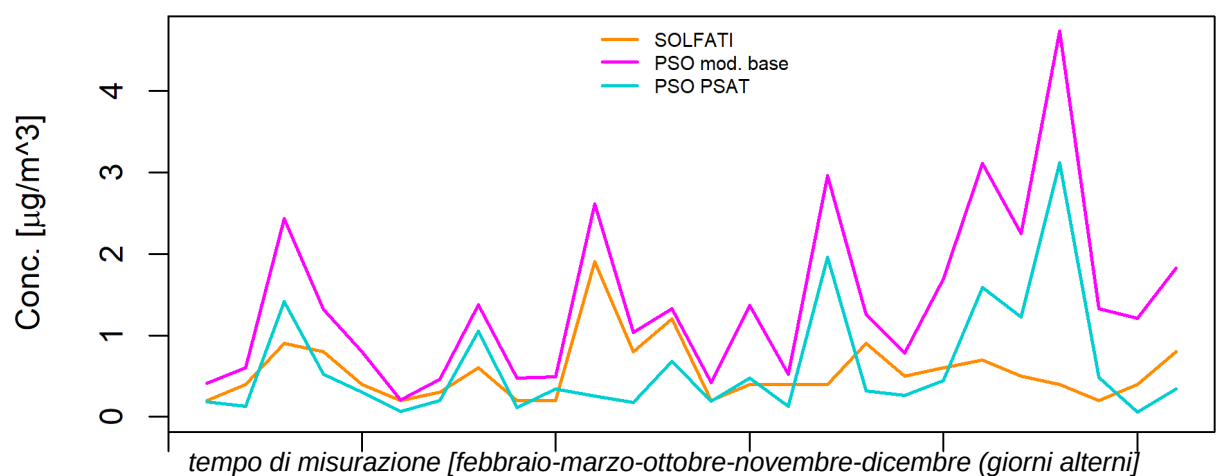
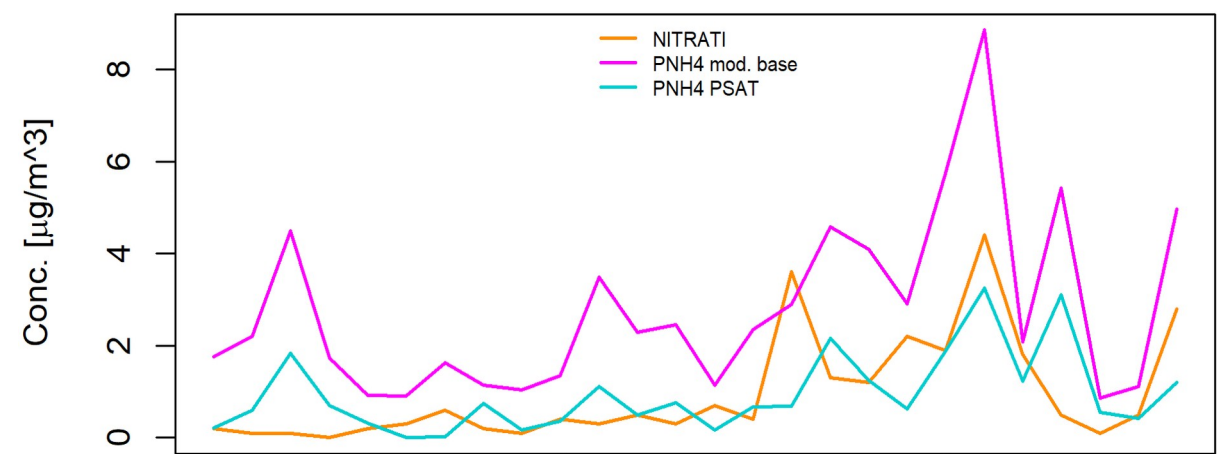
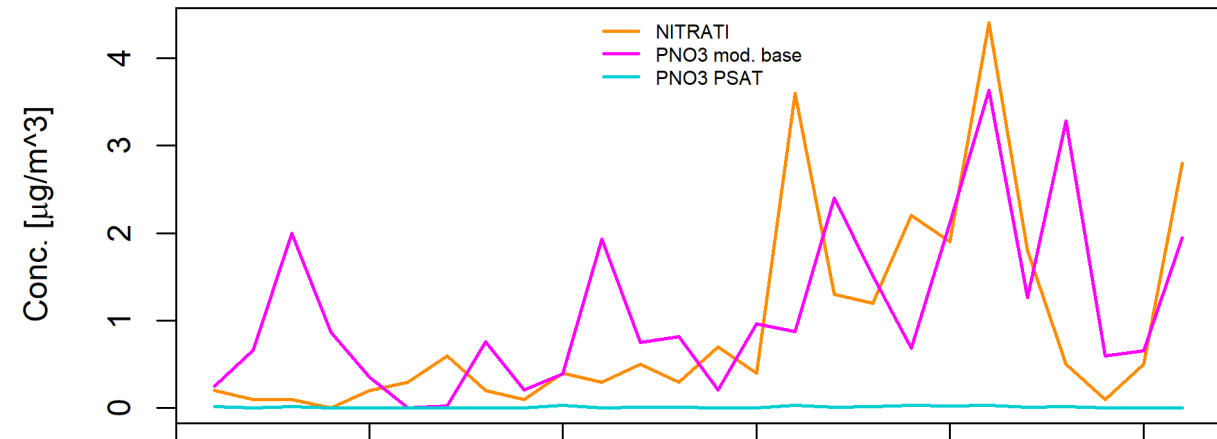
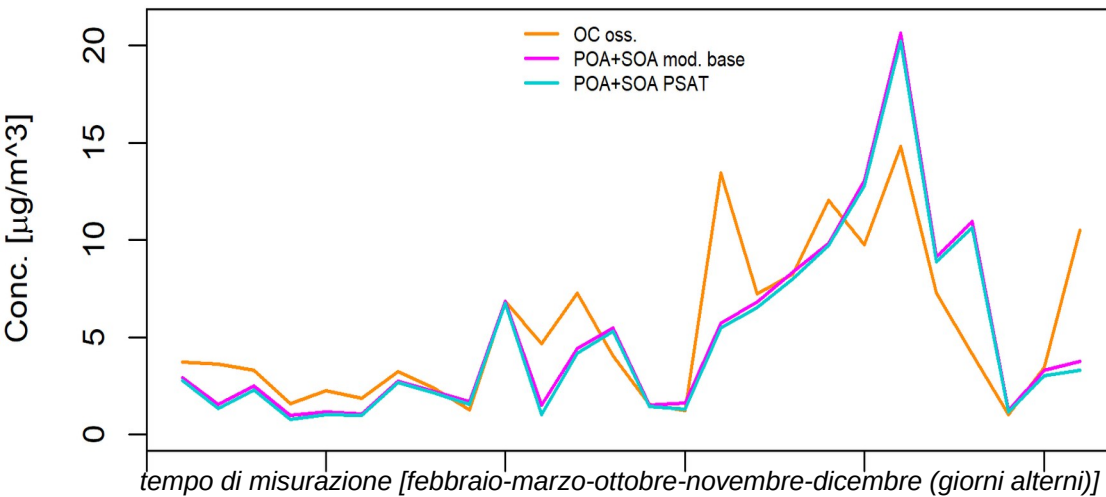
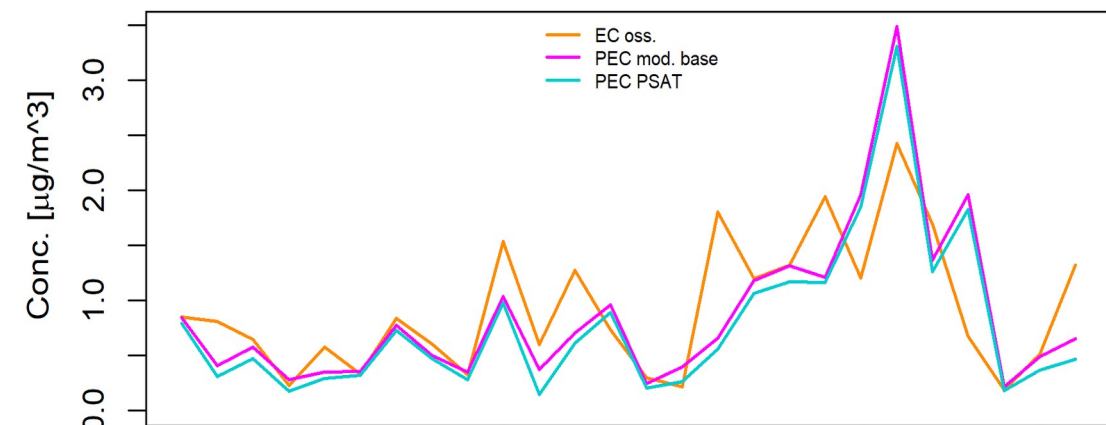
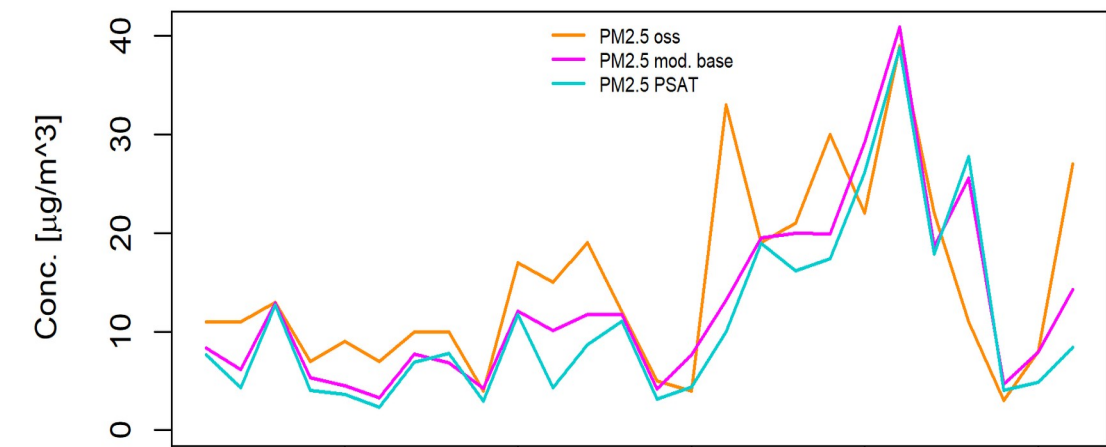
PM2.5 riscaldamento domestico concentrazione media inverno 2025



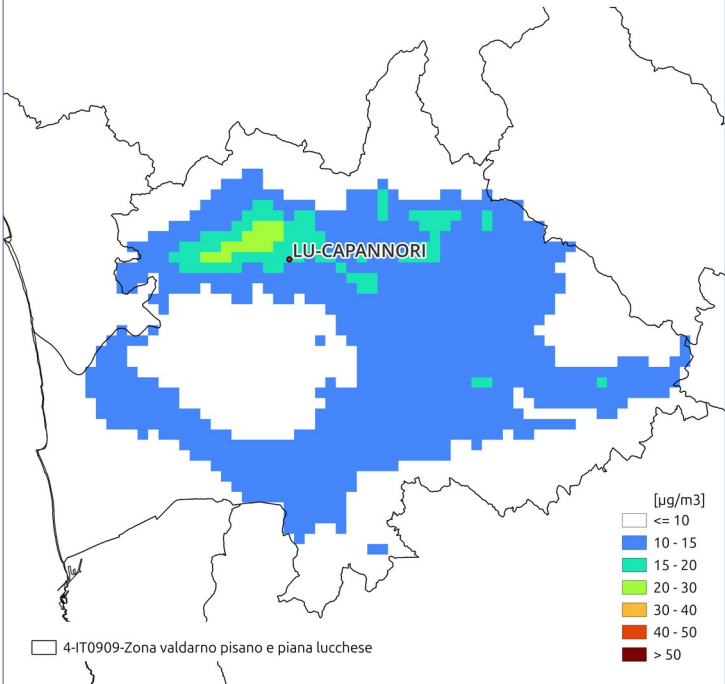
I valori rappresentano la quota relativa del riscaldamento sul PM₂₅ totale modellato.



BASSI [µg/m3] Media inverno	14.1
PM2.5/CAMx [µg/m3]	11.30
PM2.5/CAMx/PSAT [µg/m3]	8.48
PM2.5 – PSAT/CAMx [%]	75



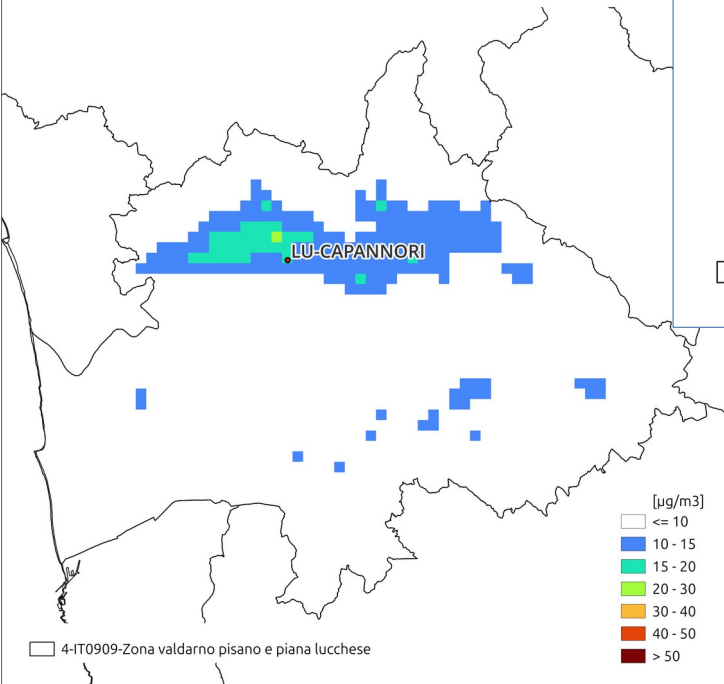
PM2.5 totale - concentrazione media inverno 2025



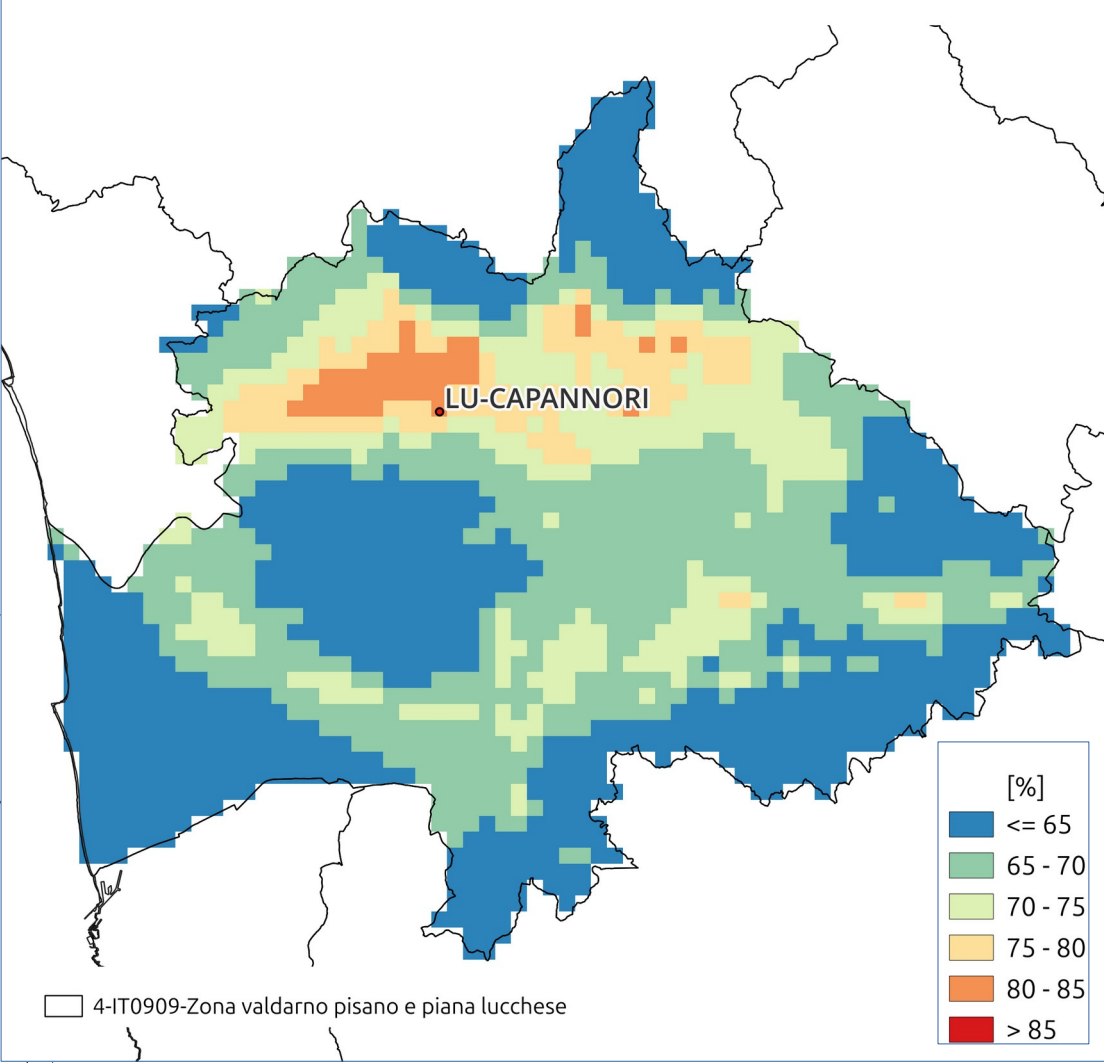
LU-CAPANNORI

Rapporto tra il contributo alle PM_{2.5} da PSAT per il settore riscaldamento e le concentrazioni totali di PM₂₅ simulate nella run con tutte le emissioni

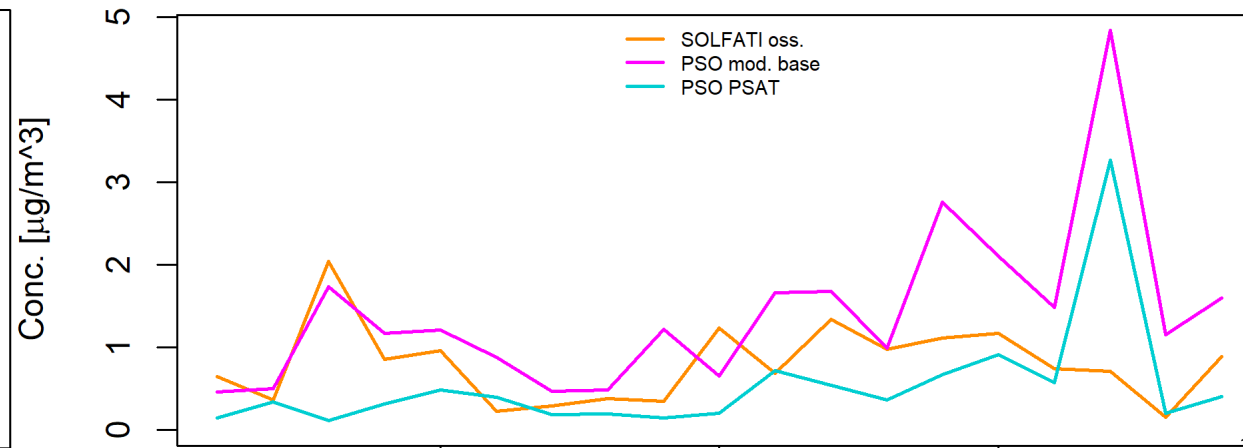
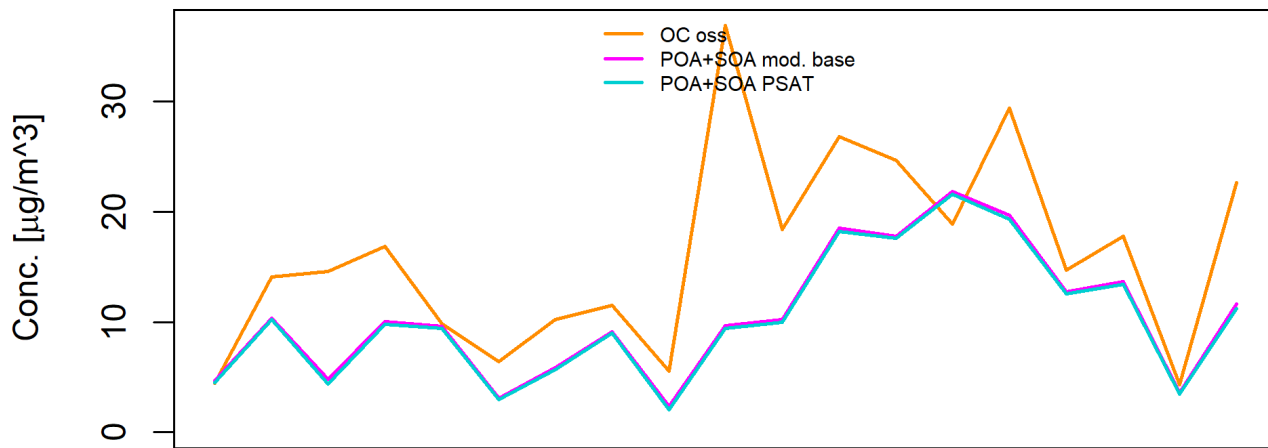
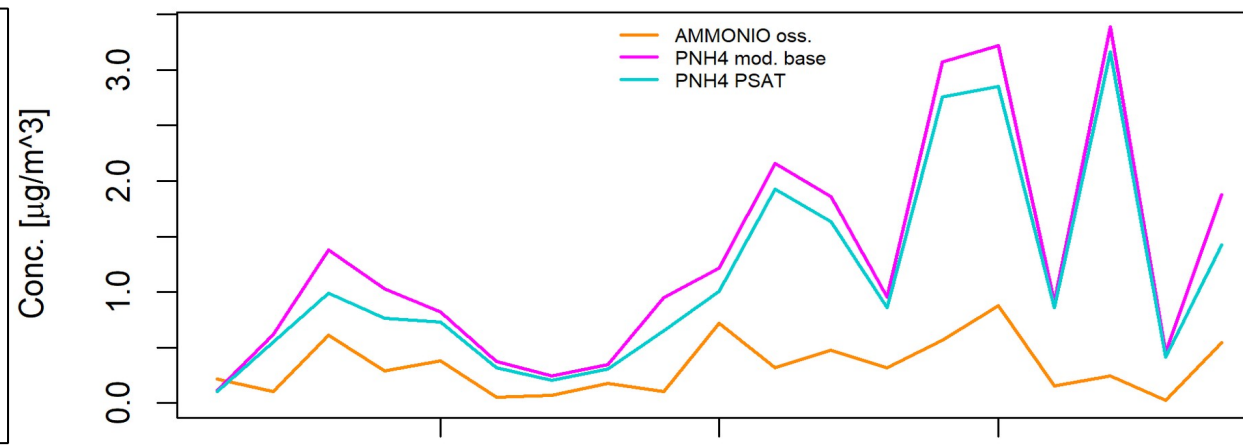
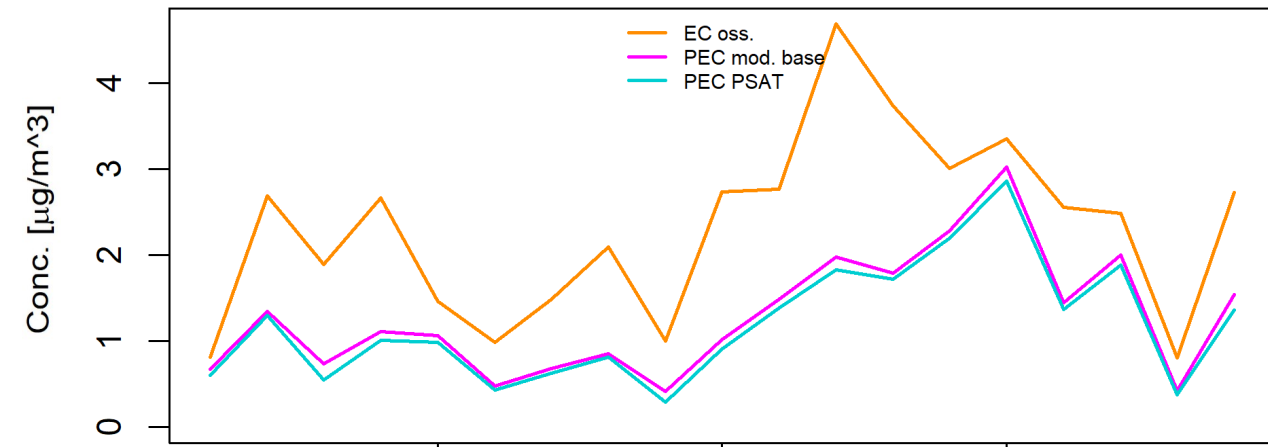
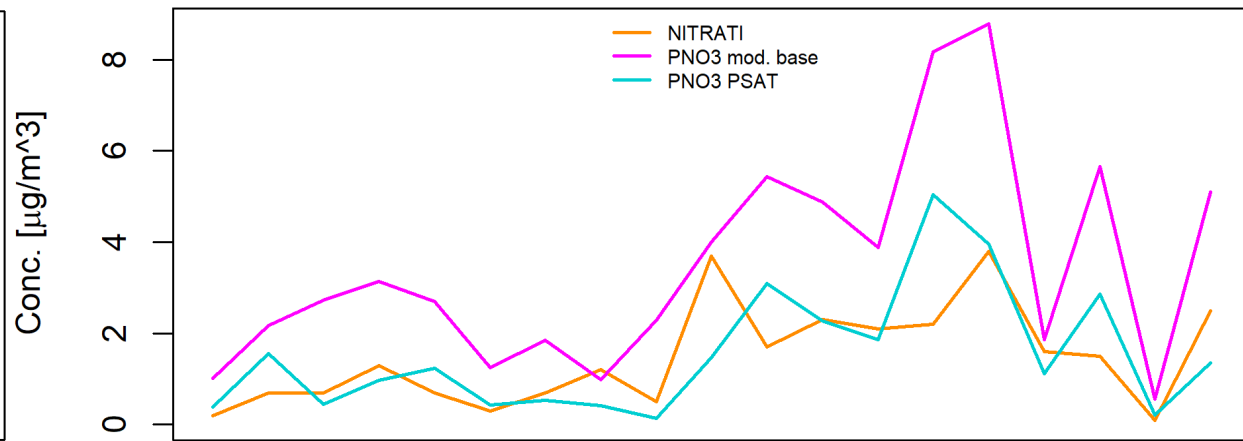
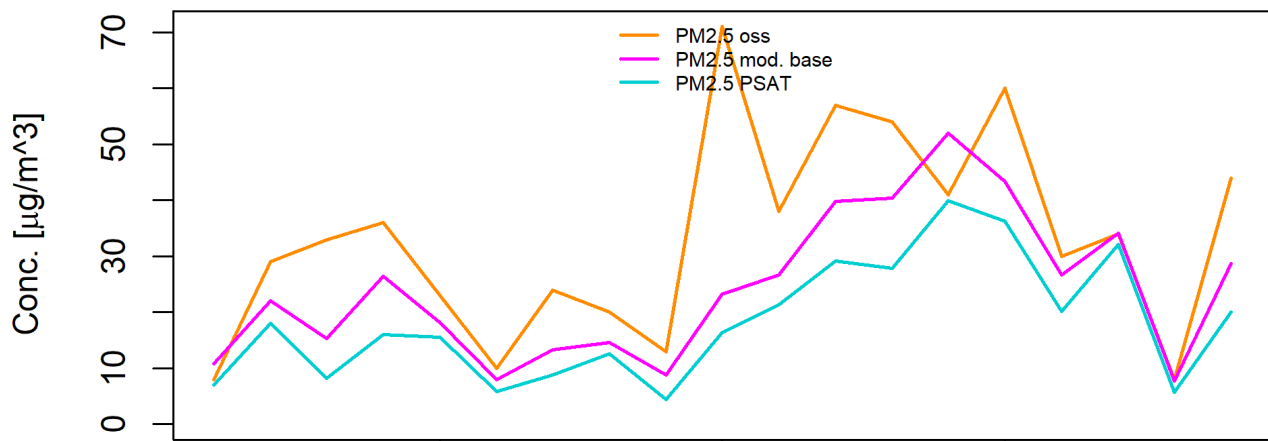
PM2.5 riscaldamento domestico concentrazione media inverno 2025



I valori rappresentano la quota relativa del riscaldamento sul PM_{2.5} totale modellato.



CAPANNORI [µg/m3] Media inverno	24.2
PM2.5/CAMx [µg/m3]	17.85
PM2.5/CAMx/PSAT [µg/m3]	11.93
PM2.5 – PSAT/CAMx [%]	81



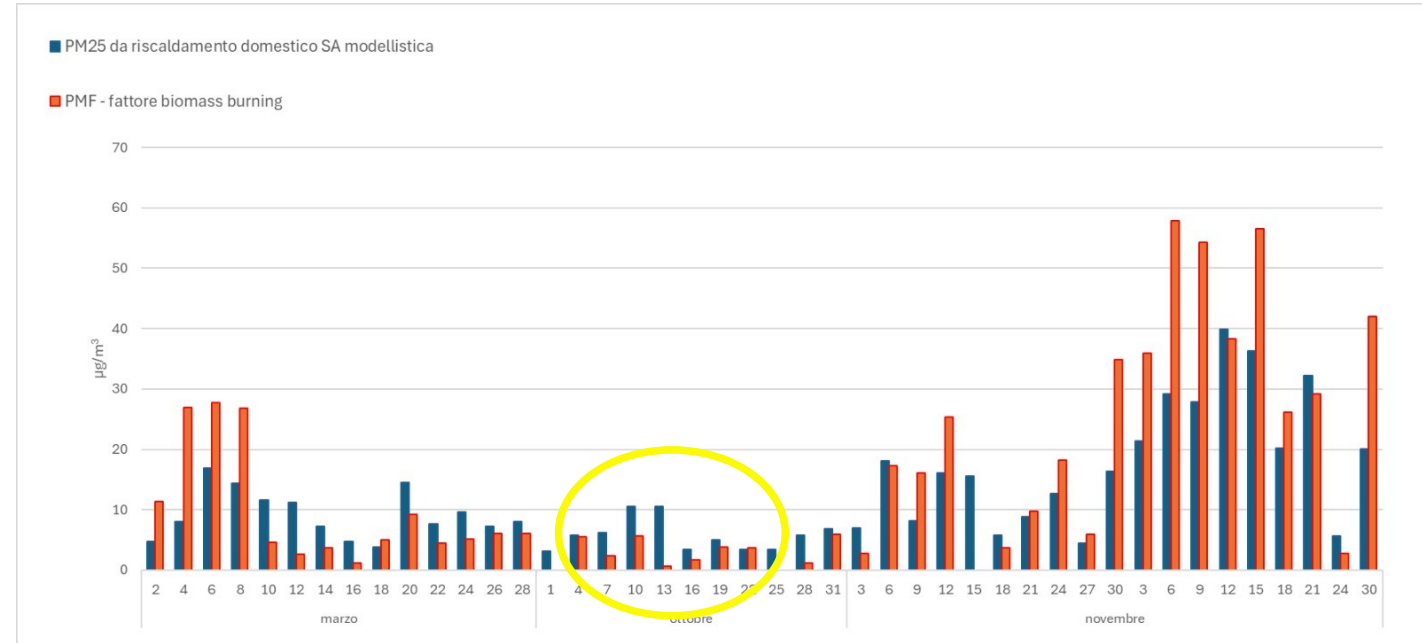
tempo di misurazione [febbraio-marzo-ottobre-novembre-dicembre]

tempo di misurazione [febbraio-marzo-ottobre-novembre-dicembre]

LU-CAPANNORI

CAPANNORI Media inverno	PEC	PNO3	PNH4	PSO4	POA
Centralina [µg/m3]	1.609	0.964	0.304	0.734	10.35
CAMx [µg/m3]	0.9658	2.7294	0.9753	1.1742	8.1311
CAMx/PSAT [µg/m3]	0.8531	1.1205	0.7964	0.3778	7.5724
PSAT/TOTALE [%]	88	41	82	32	93

BASSI Media inverno	PEC	PNO3	PNH4	PSO4	POA
Centralina [µg/m3]	0.80	0.7	-	0.63	4.19
CAMx [µg/m3]	0.69	2.53	0.99	1.30	4.16
CAMx/PSAT [µg/m3]	0.60	0.97	0.83	0.47	4.07
PSAT/TOTALE [%]	87	38	83	36	97



Il valore quantitativo associato al fattore BB [µg/m3] indica il contributo della biomassa alla concentrazione totale di particolato in ogni campione e in questo grafico è confrontato con la concentrazione di PM2.5 attribuibile al riscaldamento domestico. Si rileva una sovrastima tra marzo e ottobre che suggerisce una criticità nell'inventario o nella gestione temporale delle emissioni (accensione/spegnimento del riscaldamento domestico)

CONCLUSIONI

Poter valutare il peso relativo dei diversi comparti emissivi è strategico per supportare politiche di risanamento della qualità dell'aria mirate; per ottenere una diagnosi robusta è quindi opportuno integrare più approcci così da compensare i limiti specifici di ciascuna metodologia.

Nel source apportionment analitico, una criticità rilevante è la discrezionalità nell'associazione dei profili chimici alle sorgenti, soprattutto quando mancano traccianti specifici e univoci.

Nel source apportionment modellistico, tagging o brute force, i risultati dipendono fortemente dalla qualità degli Inventari delle Emissioni: eventuali incertezze o carenze nei dati emissivi si riflettono direttamente sulla distribuzione spaziale e temporale delle concentrazioni simulate.

Il punto chiave del confronto è che PSAT descrive come le emissioni si trasformano e si trasportano fino al recettore, mentre PMF ricostruisce le sorgenti a partire da ciò che viene effettivamente misurato al recettore

Per questo motivo i due metodi sono complementari: PSAT consente di valutare scenari emissivi e contributi settoriali definiti a priori, mentre PMF fornisce un controllo indipendente basato sulle osservazioni. Il confronto tra i due approcci permette quindi di verificare la coerenza tra modello e misure e di rafforzare l'interpretazione delle principali sorgenti responsabili del PM.