

# **SISTEMA MODELLISTICO SPARTA**

***SIMULAZIONE DELL'ANNO 2023***

*DICEMBRE 2024*

*Relazione finale:*

*Sistema modellistico SPARTA - simulazione dell'anno 2023*

***Autori:***

*Caterina Busillo*

*Francesca Calastrini*

*Francesca Guarnieri*

*Per la sintesi climatica:*

*Giulio Betti*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>1. Il sistema modellistico e dati utilizzati</b>	<b>6</b>
<b>2. Sintesi delle condizioni climatiche</b>	<b>9</b>
<b>TEMPERATURE</b>	9
<b>PRECIPITAZIONI</b>	13
<b>CIRCOLAZIONE ATMOSFERICA</b>	16
<b>EPISODI DI DUST SAHARIANO</b>	20
<b>3. Risultati</b>	<b>25</b>
3.1 PM10	28
3.1.1 Il contributo naturale al PM10	33
<b>POLVERE DESERTICA</b>	33
<b>Spray marino</b>	37
3.2 PM2.5	42
3.3 NO2	46
3.4 O3	56
<b>Conclusioni</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>62</b>



# Introduzione

La valutazione dei principali inquinanti atmosferici attraverso l'approccio modellistico è stata effettuata applicando il sistema integrato SPARTA - Sistema Integrato di Previsioni e Analisi della Qualità dell'Aria per la Regione Toscana - all'anno 2023.

Gli elaborati e le analisi presentati in questo rapporto possono costituire un supporto per la Regione Toscana nell'elaborazione annuale del Programma di Valutazione della Qualità dell'Aria.

Nel primo capitolo è riportata una breve descrizione delle caratteristiche del sistema SPARTA e della rete di monitoraggio regionale della qualità dell'aria, il secondo capitolo riguarda la caratterizzazione meteorologica dell'anno 2023, nel terzo capitolo sono analizzati e verificati i risultati ottenuti per PM10, PM2.5, NO2 e O3, con alcune osservazioni su polvere desertica e spray marino.

# 1. Il sistema modellistico e dati utilizzati

## 1.1 Il sistema modellistico integrato SPARTA

I modelli matematici che simulano il comportamento degli inquinanti in atmosfera sono strumenti molto complessi in quanto devono riprodurre i principali processi subiti dagli inquinanti in aria: emissione, diffusione, trasporto, reazioni chimiche.

Le principali caratteristiche del sistema di modelli SPARTA sono sintetizzate nello schema a blocchi riportato in Figura 1. Il sistema integrato, basato sul modello chimico CAMx e sul modello meteo WRF-ARW, consente di ottenere, attraverso le due modalità, analisi e previsione, le stime dei principali inquinanti atmosferici (NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>) e per le analisi anche polvere desertica e spray marino.

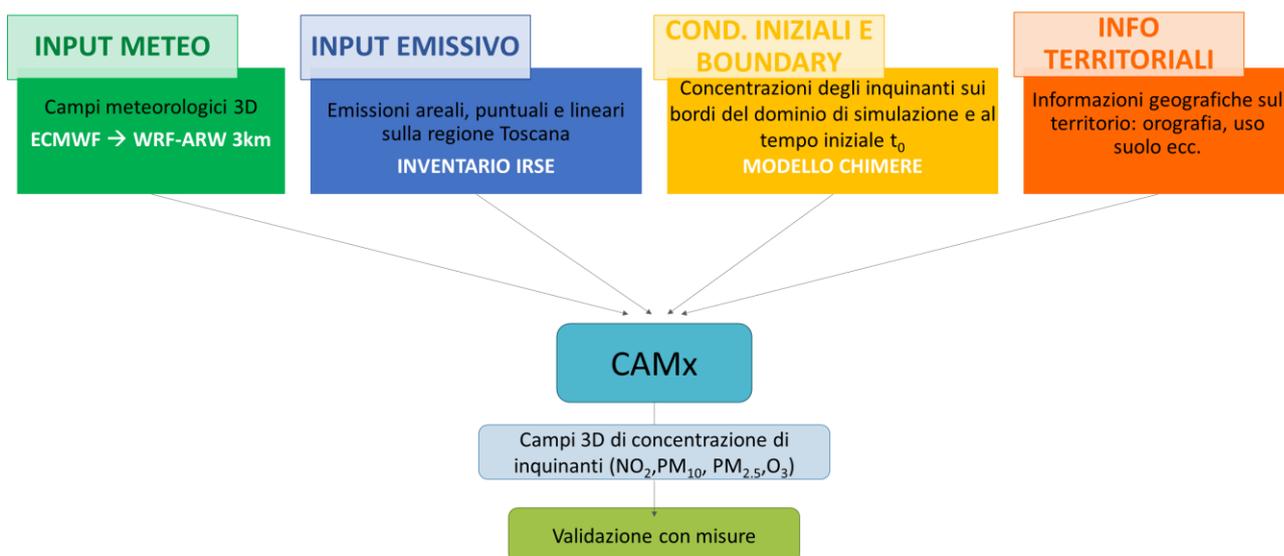


Figura 1. Schema a blocchi del sistema integrato SPARTA

SPARTA è un sistema modulare costituito da diversi codici di calcolo, integrati tra di loro, che gestiscono il pre-processing dei dati in ingresso elaborandoli in modo da produrre tutte le informazioni necessarie al modello di dispersione.

L'input meteorologico è fornito dal modello WRF-ARW a 3 Km di risoluzione ed è inizializzato da dati di analisi/previsione ECMWF. Le condizioni iniziali, che definiscono lo stato dell'atmosfera all'inizio di una simulazione, e le condizioni al contorno, che definiscono i flussi di inquinanti all'interno del dominio provenienti dai confini laterali e superiori, sono tipicamente costituiti dall'output di modelli globali e, nel caso in esame, sono costituiti dalle uscite del modello di analisi euleriano CHIMERE ad una risoluzione

orizzontale di circa 25 km e vengono scaricati quotidianamente dalla piattaforma PREV'AIR.

Il modulo delle emissioni utilizza come input l'ultimo aggiornamento disponibile, relativo al 2019, dei dati dell'inventario emissivo regionale IRSE (fornito da Techne Consulting). Tale modulo ricostruisce i campi bidimensionali orari dei ratei di emissione sulla griglia di calcolo del modello di qualità dell'aria CAMx. Coerentemente con il meccanismo chimico implementato nel modello di dispersione, la speciazione dei composti organici volatili emessi è effettuata secondo il medesimo meccanismo, SAPRC07, e quella delle polveri secondo il meccanismo AERO.

Così inizializzato, il modello CAMx produce in output mappe orarie di concentrazione tridimensionale, di deposizione secca e umida di inquinanti aeriformi ed aerosol, sul dominio di calcolo che copre il territorio toscano, con una risoluzione orizzontale di 1km e con livelli verticali che variano da 10 a 10500 metri. Per questa simulazione, il modello chimico CAMx è stato aggiornato, portando la risoluzione orizzontale dai 2 km, utilizzati fino ad ora, alla più fine risoluzione di 1km, su tutto il territorio regionale.

Questa scelta permette di migliorare le performance modellistiche, infatti, è possibile aderire meglio al dato emissivo IRSE che viene fornito alla stessa risoluzione di 1km, senza doverlo riaggregare e perdere di risoluzione; inoltre vengono dettagliate in modo più accurato sia le aree ad elevato inquinamento, sia quelle caratterizzate da un maggior variabilità meteorologica o legata all'orografia locale. Con l'attuale dotazione informatica a disposizione, il costo computazionale della run modellistica con questa risoluzione è molto più elevato ma comunque compatibile con le finalità richieste.

A valle delle simulazioni di dispersione, con un modulo di post-elaborazione si producono le mappe tematiche su griglia e si calcolano gli indicatori richiesti dalla normativa, necessari per procedere alla valutazione del territorio in relazione allo stato di qualità dell'aria. Viene inoltre effettuata una prima verifica delle prestazioni del sistema, con particolare riferimento agli obiettivi di qualità per la modellizzazione richiesti dalla normativa nazionale e comunitaria.

Maggiori dettagli sul sistema SPARTA sono forniti nel documento tecnico "Sistema modellistico SPARTA" [Simulazione dell'anno 2020 - Allegato 2 - Prot. 00000372 del 10-05-2021, Consorzio Lamma].

## 1.2 Il dataset di misure per validazione

I risultati ottenuti dal sistema modellistico vengono verificati e validati attraverso il confronto con i dati misurati dalle stazioni della rete regionale di monitoraggio di qualità dell'aria, gestita dal Centro regionale di Riferimento per il controllo e l'assicurazione di qualità dei dati (C.R.R.Q.A.) di ARPAT (<https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/aria/qualita-aria>). Vengono utilizzati i dati di tutte le centraline, di fondo, di traffico e industriali, con la percentuale di dati raccolti superiore al 75% nell'anno. Alle stazioni della rete regionale viene aggiunta LI-Poggio San Rocco, appartenente alla rete provinciale di Livorno.

Il data-set utilizzato nel 2023 è costituito dalle misure effettuate in 38 stazioni (Figura 2), di cui 27 di fondo, 10 di traffico, 1 industriale. In particolare: 37 stazioni misurano NO<sub>2</sub> (26 di fondo, 10 di traffico, 1 industriale), 34 stazioni misurano PM10 (23 di fondo, 10 di traffico, 1 industriale), 16 stazioni misurano PM2.5 (11 di fondo, 5 di traffico), 11 stazioni misurano O<sub>3</sub> (tutte di fondo).

Per le caratteristiche e l'analisi dei dati registrati dalle centraline è necessario riferirsi al report annuale pubblicato da ARPAT (<https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/aria/monitoraggio/report>).



Figura 2. Mappa delle centraline della rete regionale gestita dal Centro regionale di Riferimento per il controllo e l'assicurazione di qualità dei dati (C.R.R.Q.A.) di ARPAT.

## 2. Sintesi delle condizioni climatiche

### TEMPERATURE

In Toscana il 2023 è risultato il secondo anno più caldo dell'intera serie storica (iniziata nel 1955), con un'anomalia di +1,2 °C rispetto al trentennio di riferimento 1991-2020; se confrontato con l'anno più caldo in assoluto, il 2022, lo scarto è di appena 0.1 °C. Anche il 2023 conferma la tendenza al costante e marcato rialzo termico osservato sulla nostra regione negli ultimi 50 anni. La Figura 3 mostra la distribuzione delle anomalie di temperatura media nel 2023 in Toscana; valori più elevati della norma su tutto il territorio regionale, ma più marcati nelle zone interne orientali e sulla costa centro-meridionale. L'andamento climatico regionale rispecchia quello italiano ed europeo, infatti sia a livello nazionale che continentale l'anomalia termica complessiva del 2023 è risultata tra le più alte mai registrate. Nel dettaglio: secondo anno più caldo dal 1800 in Italia e in Europa con uno scarto di +1,11 °C rispetto alla climatologia di riferimento 1991-2020 (fonte ISAC-CNR e Copernicus). A livello globale si è trattato, invece, dell'anno più caldo mai osservato, con un'anomalia di +1.48 °C rispetto ai valori medi del periodo preindustriale (1850-1900) e di +0,6 °C sulla climatologia 1991-2020 (Figura 4). Per la prima volta tutti i giorni dell'anno hanno registrato uno scarto uguale o superiore ad +1 °C rispetto al periodo 1850-1900, nel mese di novembre sono stati osservati due giorni con anomalia maggiore di +2 °C.

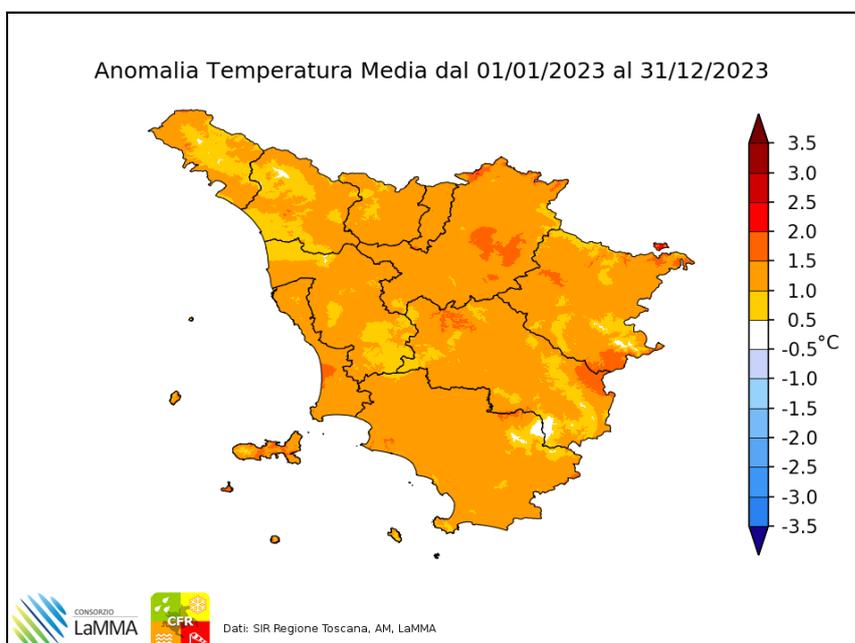
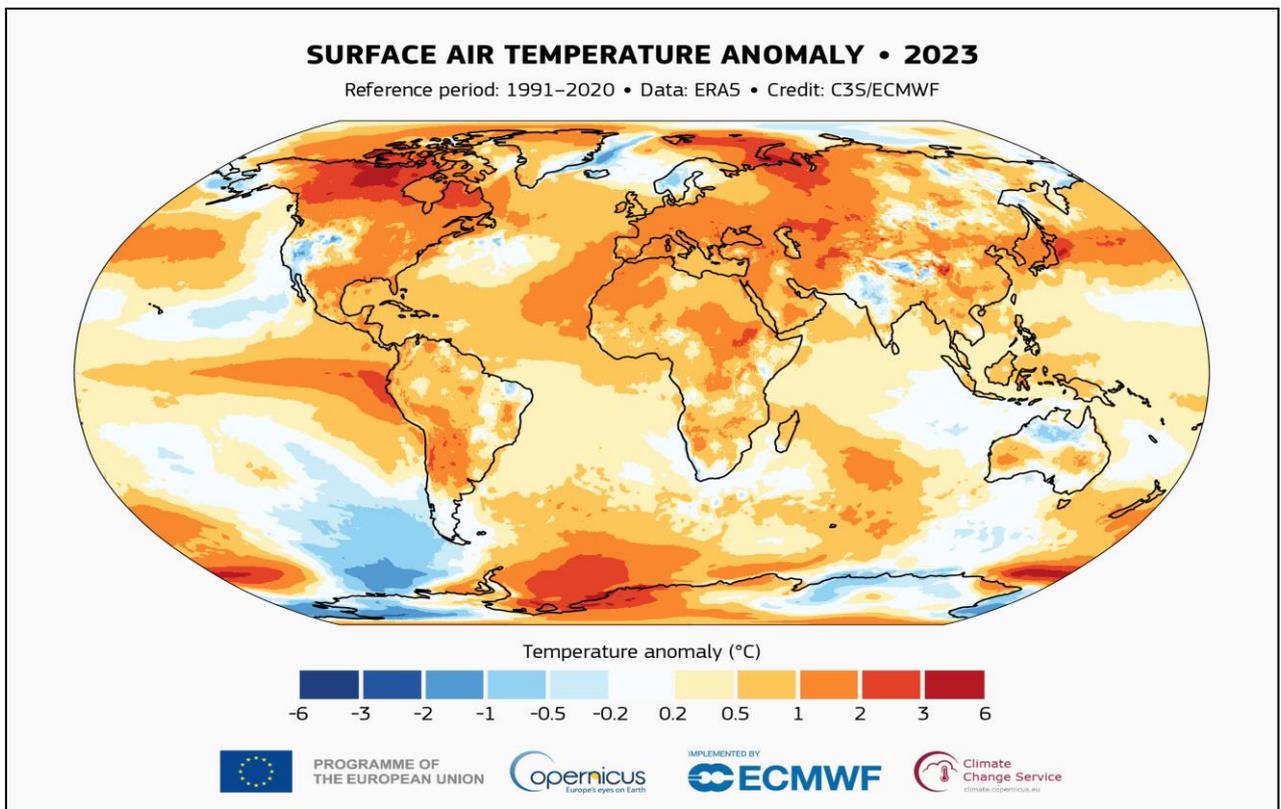


Figura 3: Distribuzione dell'anomalia della temperatura media in Toscana nel 2023, periodo di riferimento 1991-2020.



*Figura 4: Distribuzione delle anomalie termiche a livello globale ed europeo nel 2023 (fonte COPERNICUS/ECMWF).*

La distribuzione delle anomalie a livello regionale mostra un periodo particolarmente caldo, quello che va da luglio a dicembre durante il quale si sono registrati picchi termici anche eccezionali; una serie di record mensili e giornalieri in linea con quanto osservato anche a livello globale ed europeo. Gli unici due mesi caratterizzati da temperature inferiori o in media sono stati aprile, con uno scarto di  $-0,6$  °C, e maggio con un'anomalia di  $+0.1$  °C rispetto alla climatologia di riferimento. Nel dettaglio: su 12 mesi, 5 hanno registrato una temperatura media tra  $0.5$  °C e  $1.0$  °C superiore alla norma, 5 un'anomalia superiore al grado e soltanto 2 valori in linea, o inferiori (Figura 5). Il mese che ha mostrato l'anomalia più marcata è stato ottobre, con uno scarto eccezionale, pari a  $+3.5$  °C, seguito da settembre, dicembre e luglio, con anomalie, rispettivamente, di  $+2.3$ ,  $+1.9$  e  $+1.8$  °C. Scarti così marcati hanno coinciso con nuovi record storici sia mensili che giornalieri: ad agosto registrati 2 nuovi record assoluti di caldo a Pistoia ( $+40.9$  °C) e a Prato ( $+40.8$  °C), mentre a ottobre ben 8 capoluoghi di provincia su 10 hanno rilevato la temperatura più alta relativa al mese in oggetto, tra questi Firenze con  $+33.2$  °C, Prato con  $+32.3$  °C, Arezzo con  $+31.1$  °C e Pistoia con  $+32.4$  °C.

L'estate è risultata la sesta più calda dal 1955, mentre luglio è stato il quinto caldo dell'intera serie storica con uno scarto relativo alle temperature medie di +1,8 °C e di +2,1 °C per i valori minimi (registrate numerose "notti tropicali", cioè minime uguali o superiori ai 20 °C). Per quanto riguarda il trimestre settembre-novembre, si è trattato dell'autunno più caldo dall'inizio delle rilevazioni (1955) con un'anomalia positiva di ben 2.1 °C.

Anche nel 2023, così come nei due anni precedenti, la stagione con le temperature più prossime ai valori normali è stata la primavera, nonostante un marzo piuttosto mite (+1.2 °C sulla climatologia di riferimento).

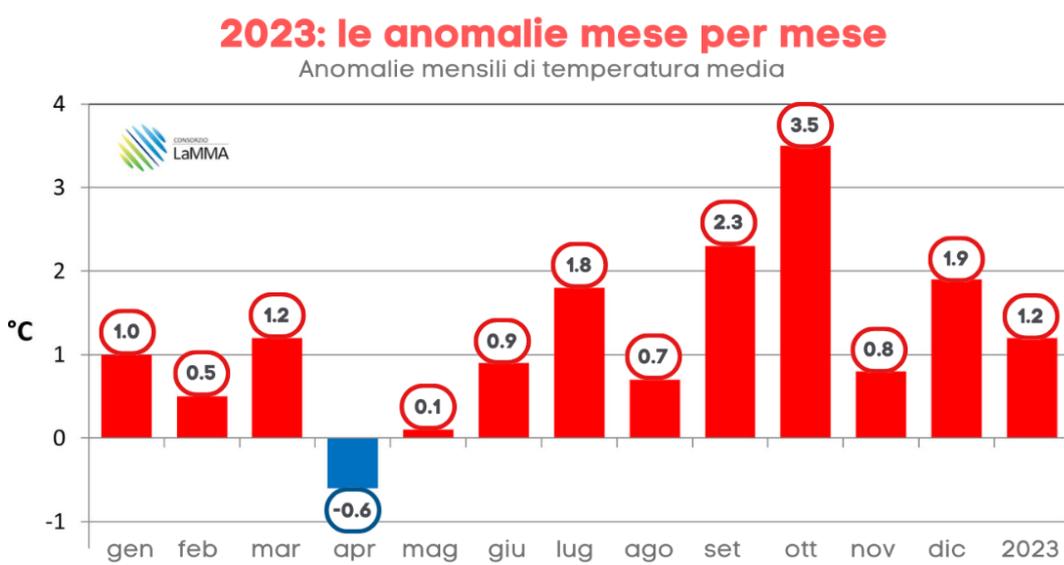


Figura 5: Anomalie mensili di temperatura media nel 2023 in Toscana, periodo di riferimento 1991-2020

Per quanto riguarda il bimestre settembre-ottobre e i mesi di marzo, luglio e parte di dicembre le anomalie osservate (Figura 6 e Figura 7) sono il risultato della presenza pressoché costante di aree di alta pressione di matrice subtropicale. Ad ottobre le temperature massime sono state quasi 4 °C più alte del normale (+3.9 °C).

Al contrario gli scarti positivi di gennaio (+1 °C) e di marzo (+1.2 °C) sono stati causati dall'influenza di correnti miti e perturbate di origine atlantica e tirrenica che hanno permesso un buon rimescolamento della colonna d'aria, riducendo così gli episodi di forte inquinamento. Per quanto riguarda giugno, nonostante le piogge superiori alla norma, l'anomalia termica si è comunque mantenuta su valori rilevanti (+0.9 °C), soprattutto le temperature minime (Figura 8).

Relativamente agli unici due mesi prossimi alle medie climatologiche, aprile e maggio (Figura 9), le temperature sono state contenute grazie all'azione di masse d'aria di matrice continentale e settentrionale (aprile) e da frequenti passaggi perturbati di origine nordatlantica (maggio).

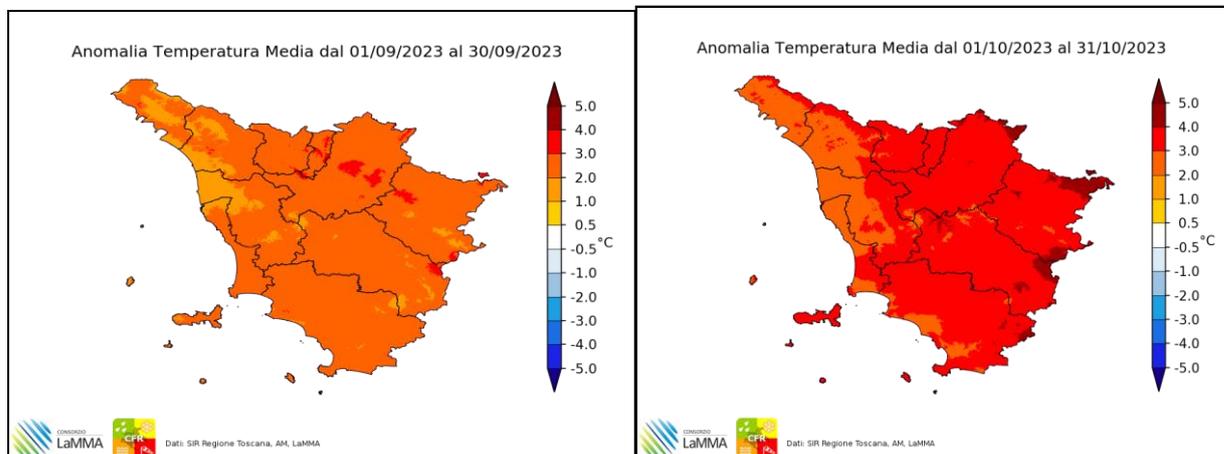


Figura 6: Anomalie termiche regionali nei mesi di settembre e ottobre (T MAX). Periodo di riferimento 1991-2020.

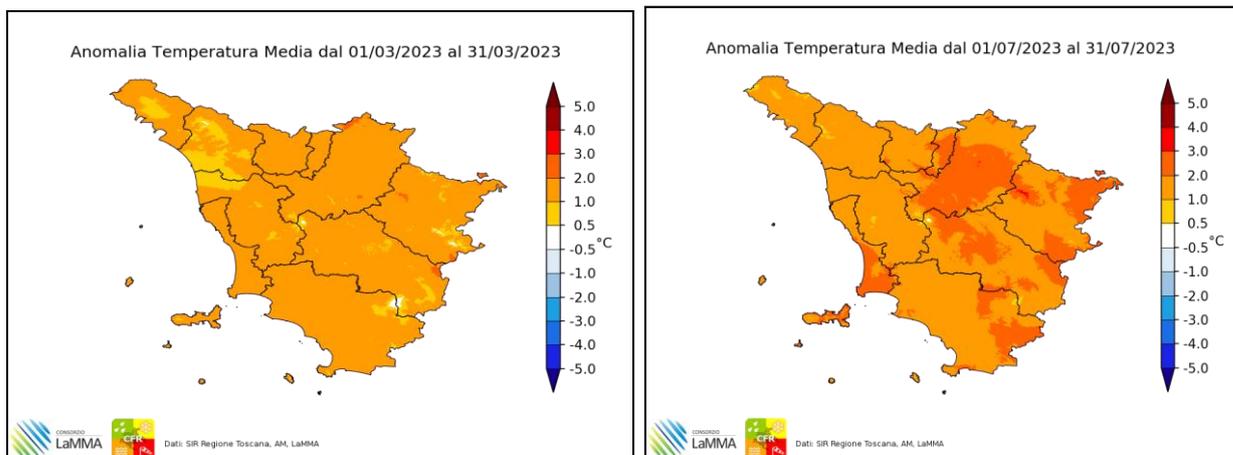


Figura 7: Anomalie termiche regionali nei mesi di marzo e luglio. Periodo di riferimento 1991-2020.

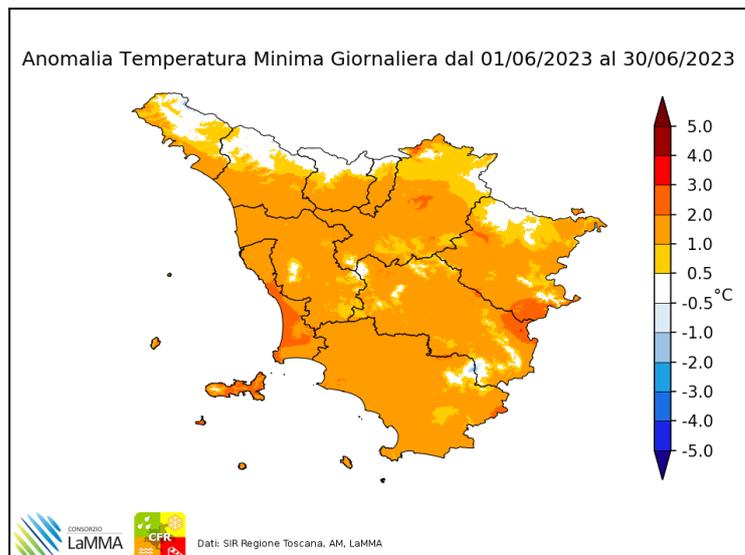


Figura 8: Anomalie termiche (temperatura minima) del mese di giugno. Periodo di riferimento 1991-2020.

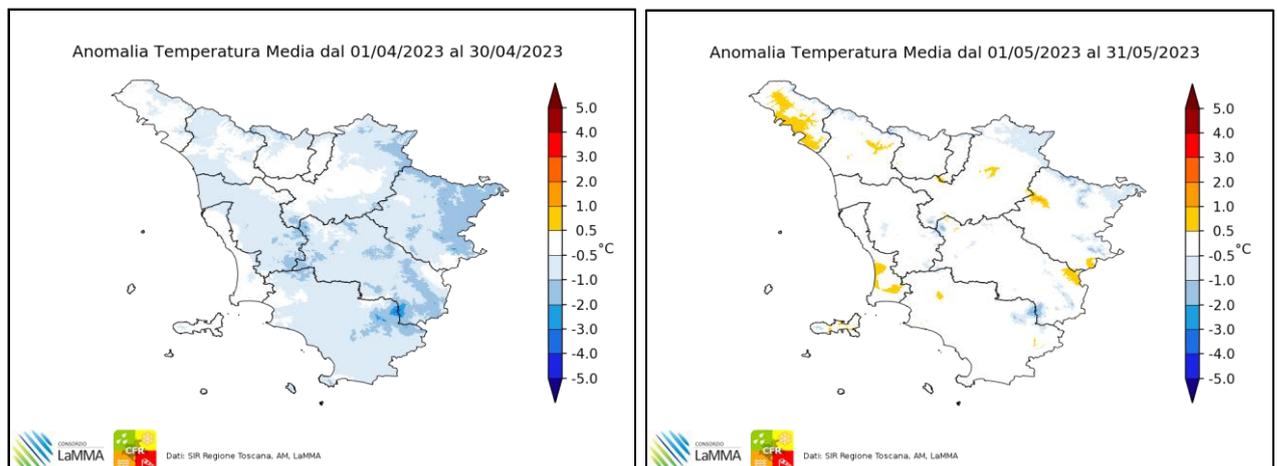


Figura 9: Anomalie termiche del bimestre aprile-maggio. Periodo di riferimento 1991-2020.

### PRECIPITAZIONI

Nel complesso il 2023, a livello regionale, ha registrato una quantità di precipitazioni perfettamente in linea con la media attesa (+2%), senza mostrare particolari differenze a livello territoriale (Figura 10). Tale distribuzione, tuttavia, non dà il metro dell'estrema variabilità che ha caratterizzato le precipitazioni sulla regione. La distribuzione molto irregolare delle piogge, soprattutto in termini mensili e stagionali, è una caratteristica che tende a presentarsi sempre più frequentemente e risulta in linea con le proiezioni dei principali modelli climatici.

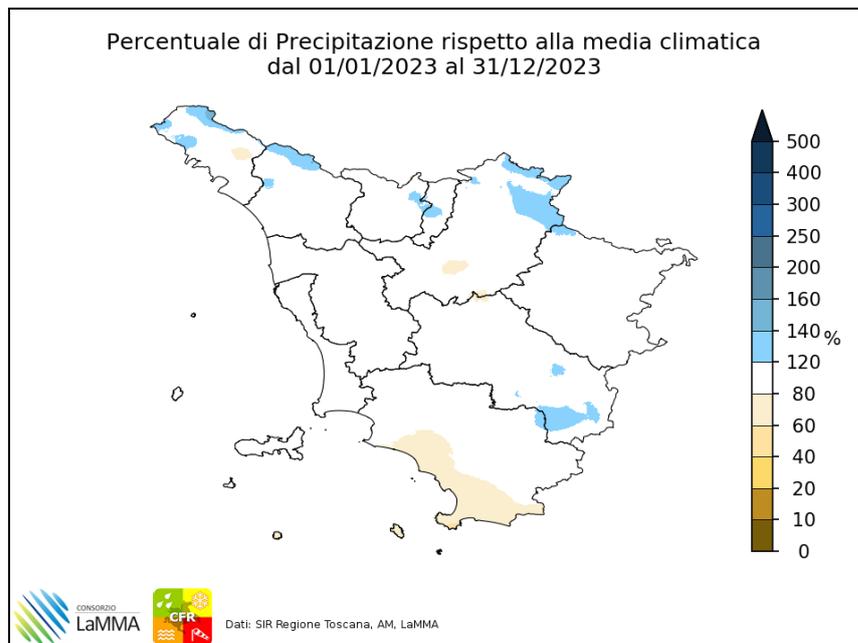


Figura 10: Percentuale di precipitazione rispetto alla media climatica di riferimento (1991-2020).

Analizzando il dato a livello mensile e stagionale si osserva una distribuzione delle precipitazioni caratterizzata da periodi con scarsi apporti, alternati a singoli mesi molto più piovosi del normale (Figura 11). Nello specifico, maggio e giugno hanno registrato surplus molto importanti in particolare sulle province centrali e meridionali (Figura 12). Altrettanto piovosi i mesi di gennaio, agosto, ottobre e novembre; per quanto riguarda il bimestre ottobre-novembre la pioggia registrata tra il 18/10 e il 10/11 (quindi in poco più di 20 giorni) ha rappresentato da sola il 30-40% delle precipitazioni totali cadute in Toscana nel 2023. I restanti mesi hanno fatto registrare spesso piogge molto al di sotto della norma (Figura 13), in particolare febbraio (-56%), luglio (-49%), settembre (-66%) e dicembre (-34%). Nel mese di dicembre il deficit ha riguardato le province centro-meridionali, mentre a settembre è stato molto marcato sulle zone settentrionali. I periodi meno piovosi e più caldi del 2023 hanno coinciso con durature e anomale fasi anticicloniche di matrice subtropicale, al contrario quelli più ricchi di precipitazioni con transiti perturbati di matrice nordatlantica e settentrionale.

Emblematico il caso di ottobre, mese eccezionalmente caldo e caratterizzato da una prima metà molto secca, capace però di concentrare precipitazioni estremamente abbondanti nell'ultima decade che hanno prodotto un surplus mensile del 24%; ricordiamo, a tal proposito, che statisticamente ottobre è il secondo mese più piovoso in Toscana e quindi un surplus del genere è molto rilevante (Figura 14).

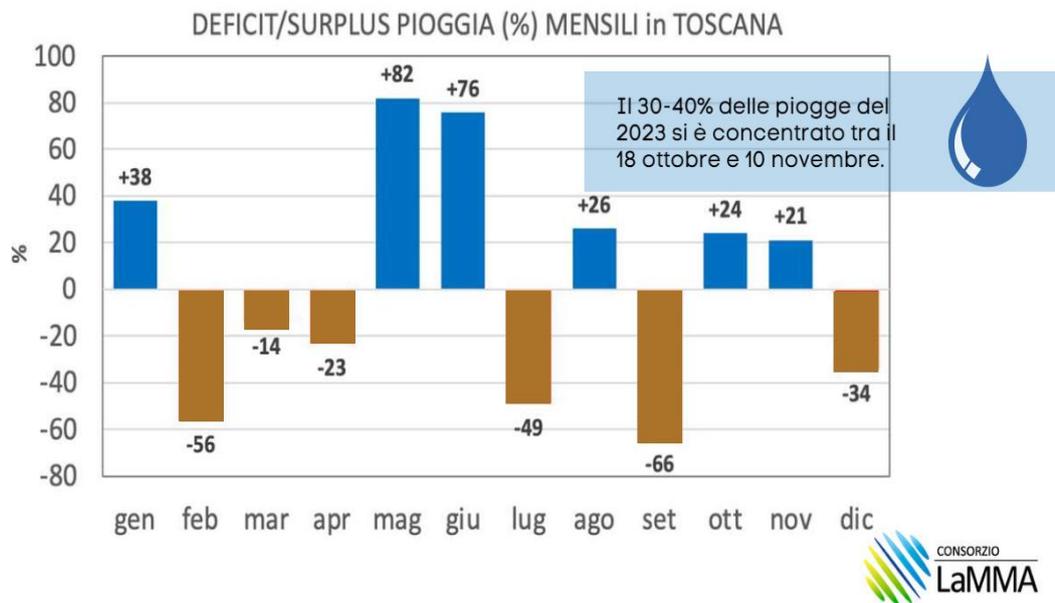


Figura 11: Anomalie di precipitazione (%) osservate in Toscana nel 2023.

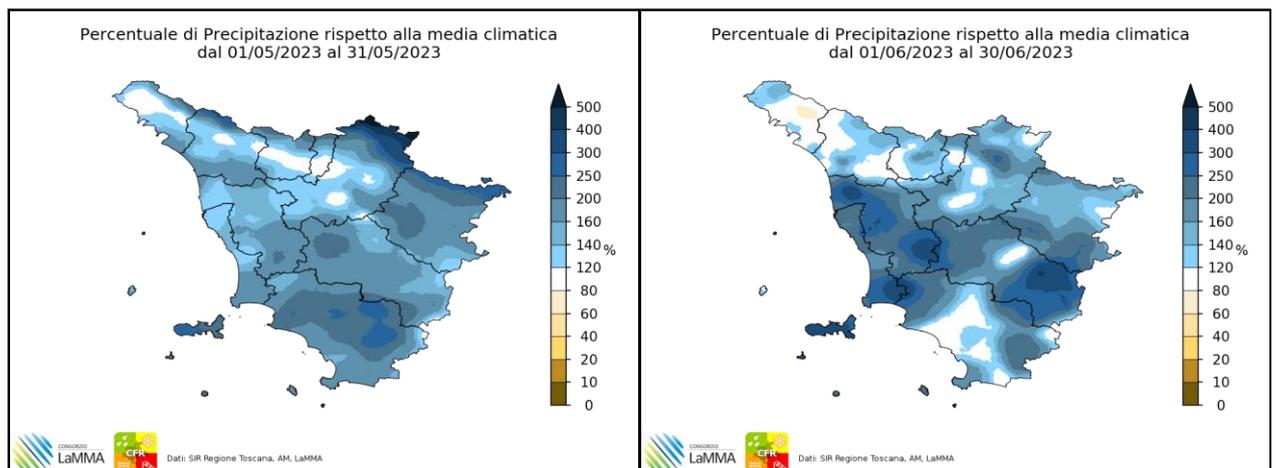


Figura 12: Percentuale di precipitazione a maggio (sx) e giugno (dx) rispetto alla media 91-20.

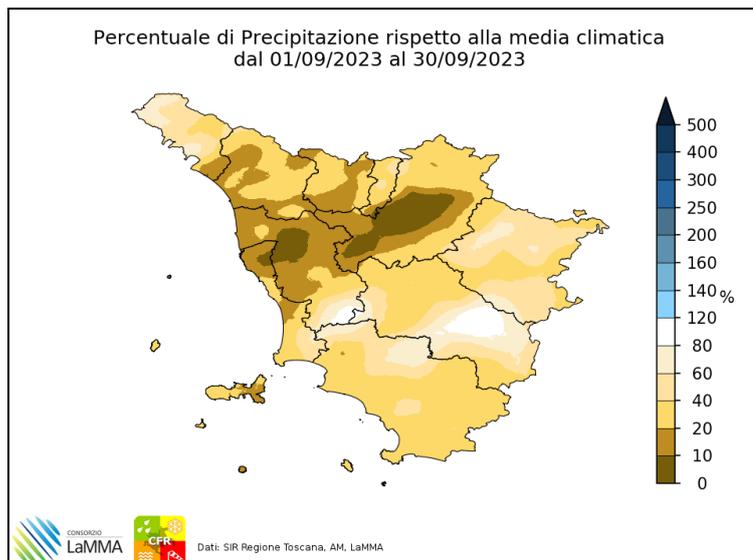


Figura 13: Percentuale di precipitazione di settembre rispetto alla media 91-20.

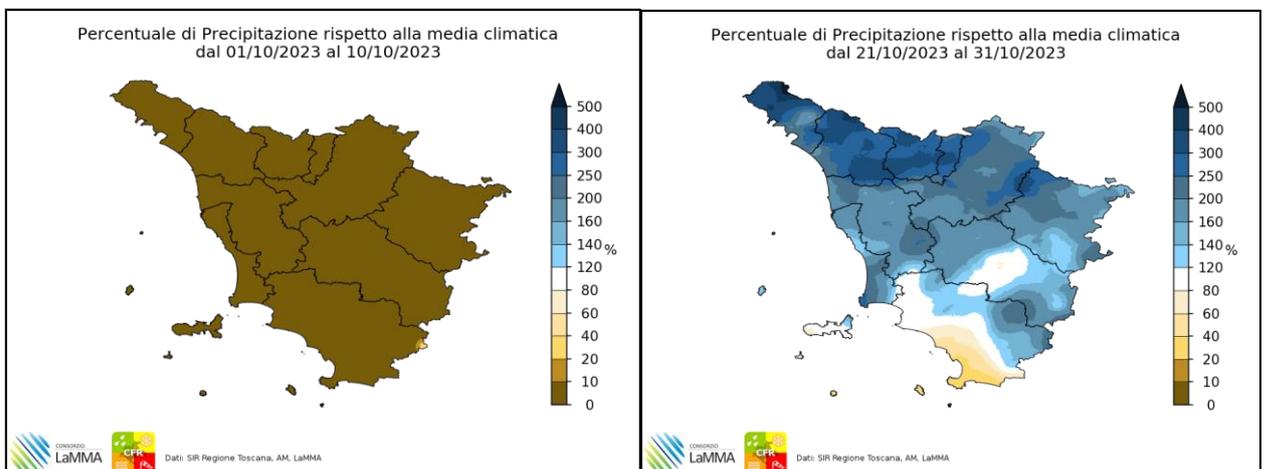


Figura 14: Percentuale di precipitazione della prima (sx) e ultima (dx) decade di ottobre.

#### CIRCOLAZIONE ATMOSFERICA

La circolazione atmosferica nel 2023 in Europa è stata caratterizzata da pressioni in quota molto più alte della norma sugli stati centro meridionali ed in particolare sulla penisola iberica e sul Mediterraneo centro-occidentale; valori leggermente negativi, invece, sulla Scandinavia (Figura 15).

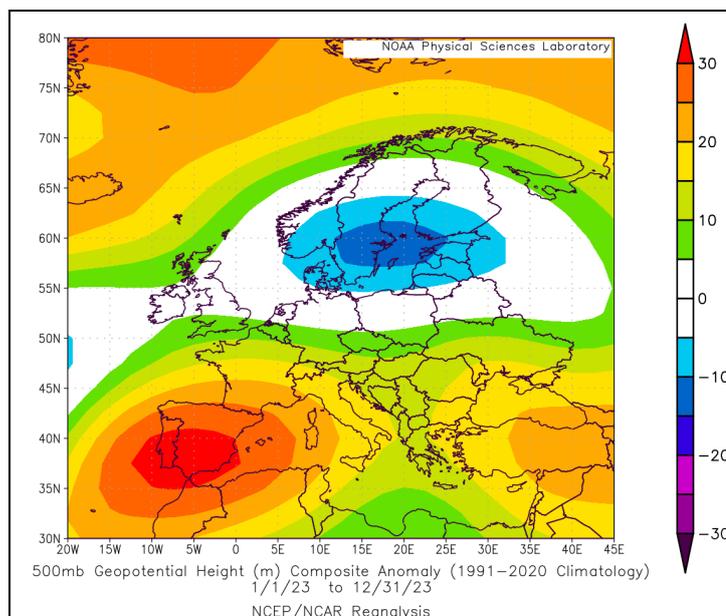


Figura 15: Mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale dell'isobara a 500 mb per l'anno 2023

Tale distribuzione, tuttavia, è il frutto di due fasi molto differenti tra loro, se non addirittura opposte: il primo semestre ha registrato frequenti blocchi anticiclonici sull'Europa nordoccidentale (Figura 16 sx), il secondo invece geopotenziali (pressione in quota) molto più alti del normale sull'Europa del sud e molto più bassi sull'Europa settentrionale (Figura 16 dx).

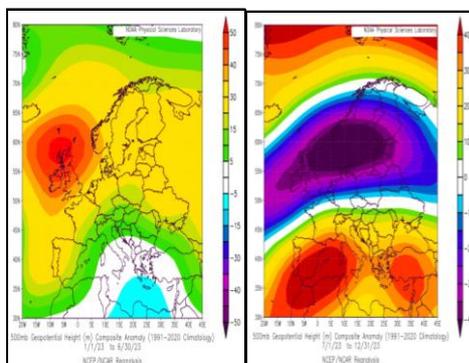


Figura 16: Mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale: gennaio-giugno (sx) e luglio-dicembre (dx) 2023.

La Toscana, insieme all'Italia settentrionale, ha risentito della presenza di blocchi anticiclonici sulle Isole Britanniche (immagine 16), registrando, come abbiamo visto, deficit pluviometrici rilevanti nel trimestre febbraio-aprile, frutto di una minor frequenza di perturbazioni atlantiche. Lo stesso blocco, tuttavia, ha contenuto le temperature riducendo la presenza di anticicloni di matrice subtropicale e consentendo alcuni ingressi d'aria fredda; una fase nel complesso dinamica che ha limitato il numero di

giornate favorevoli all'accumulo di inquinanti, ad eccezione della prima metà di febbraio (Figura 17) e della prima decade di gennaio, caratterizzate da stabilità, pressioni alte e scarso rimescolamento.

La seconda parte dell'anno ha visto un netto rinforzo delle anomalie termiche positive per via dell'affermarsi di anticicloni di blocco di matrice subtropicale desertica e oceanica, soprattutto nel bimestre settembre-ottobre (Figura 18), nelle ultime due decadi di dicembre (Figura 19 sx) e tra il 7 e il 21 luglio (Figura 19 dx). In diversi casi si sono registrati periodi caratterizzati da bassa qualità dell'aria.

Relativamente a luglio, le alte temperature, unite alla forte compressione adiabatica e all'assenza di nuvolosità, hanno favorito il raggiungimento o il superamento della soglia 8 dell'indice UV ben 7 volte; ciononostante non si sono registrati picchi di ozono particolarmente elevati (sempre entro la prima soglia).

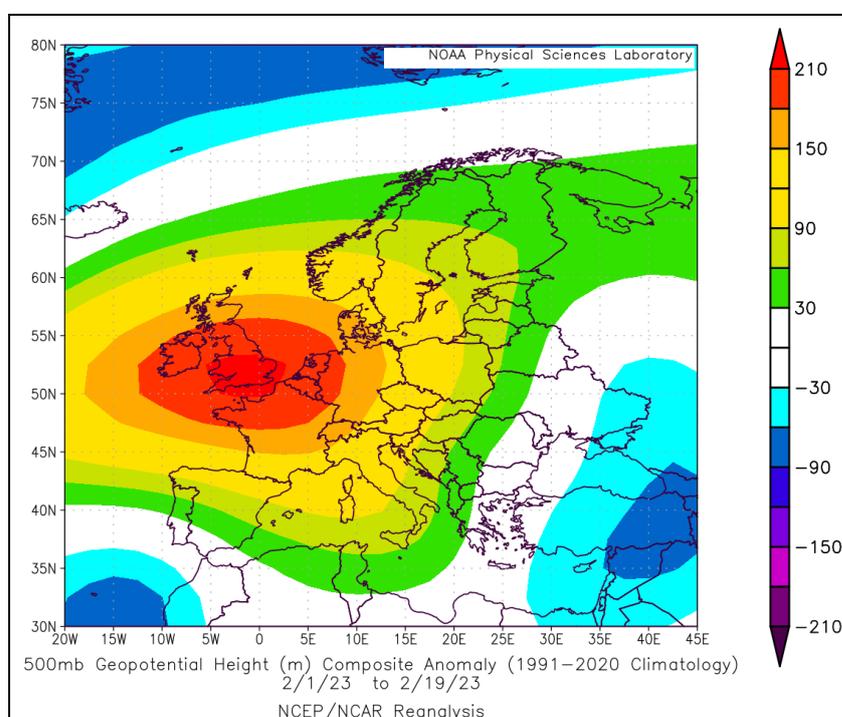


Figura 17: Mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale tra il 1° e il 19 febbraio

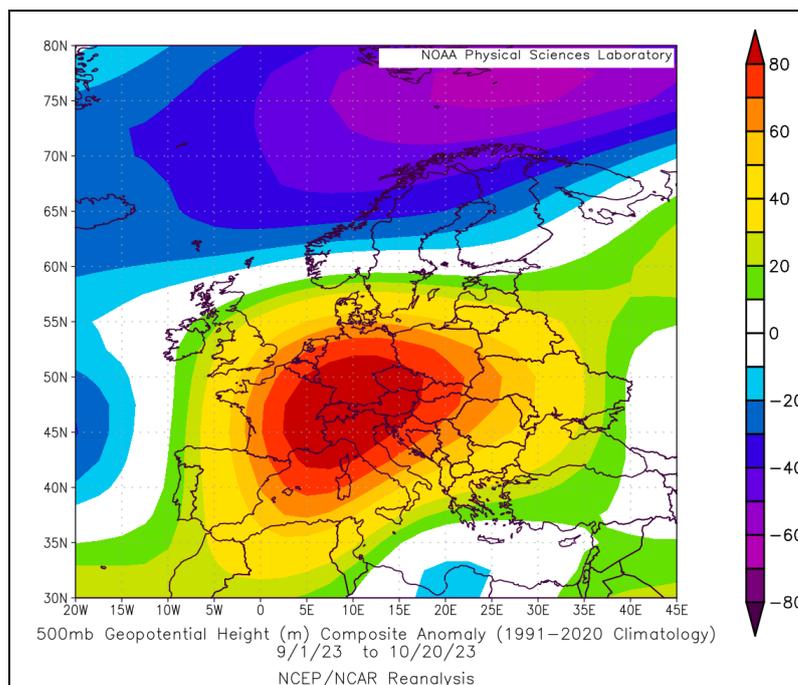


Figura 18: Mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale tra il 1° settembre e il 20 ottobre.

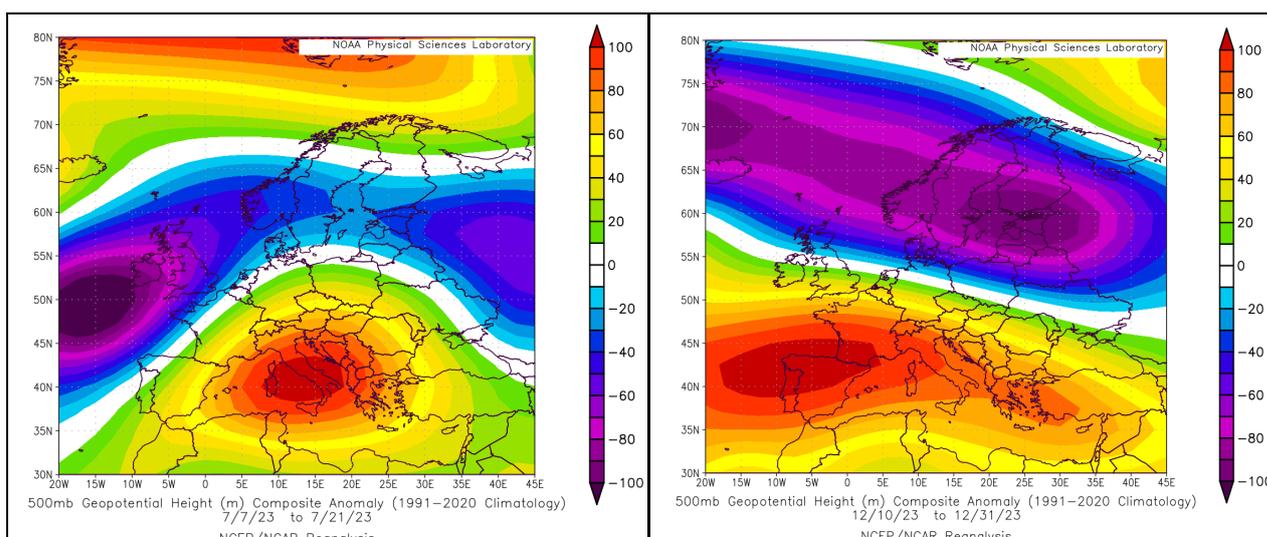


Figura 19: Anomalia dell'altezza geopotenziale relativa al periodo 7-21 luglio e 10-31 dicembre

Le fasi in cui si sono registrati periodi di stagnazione e picchi di concentrazione di inquinanti (in particolare di PM10 e PM2.5) hanno coinciso con la presenza di duraturi campi di alta pressione di matrice subtropicale oceanica, o afro-mediterranea nei mesi invernali e autunnali. Tra questi segnaliamo la prima settimana di gennaio, la seconda decade di febbraio e la seconda metà di dicembre, periodi durante i quali si sono toccati i picchi di inquinamento più alti dell'anno; la qualità dell'aria è risultata particolarmente bassa tra il 17 e il 28 dicembre e tra il 9 e il 16 febbraio. Al contrario, qualità dell'aria molto buona tra metà marzo e i primi di luglio. Relativamente ai restanti periodi, le fasi più inquinate hanno coinciso con alcune intrusioni di polveri desertiche.

## EPISODI DI DUST SAHARIANO

Relativamente agli eventi di dust sahariano (intrusioni di polveri desertiche legate ad avvezioni d'aria calda), anche nel 2023 si sono registrati diversi eventi. Tra tutti quelli osservati i più rilevanti sono stati: 2-3 gennaio, 11-13 luglio, 18-19 luglio, 24-25 luglio, 25-26 agosto, 17 settembre, 19-20 ottobre, 1-2 dicembre, 23-25 dicembre. Di seguito alcune di queste intrusioni descritte più del dettaglio.

### 2 GENNAIO

All'interno di un vasto anticiclone subtropicale si attiva un flusso di correnti meridionali cui si associano polveri desertiche (Figura 20).

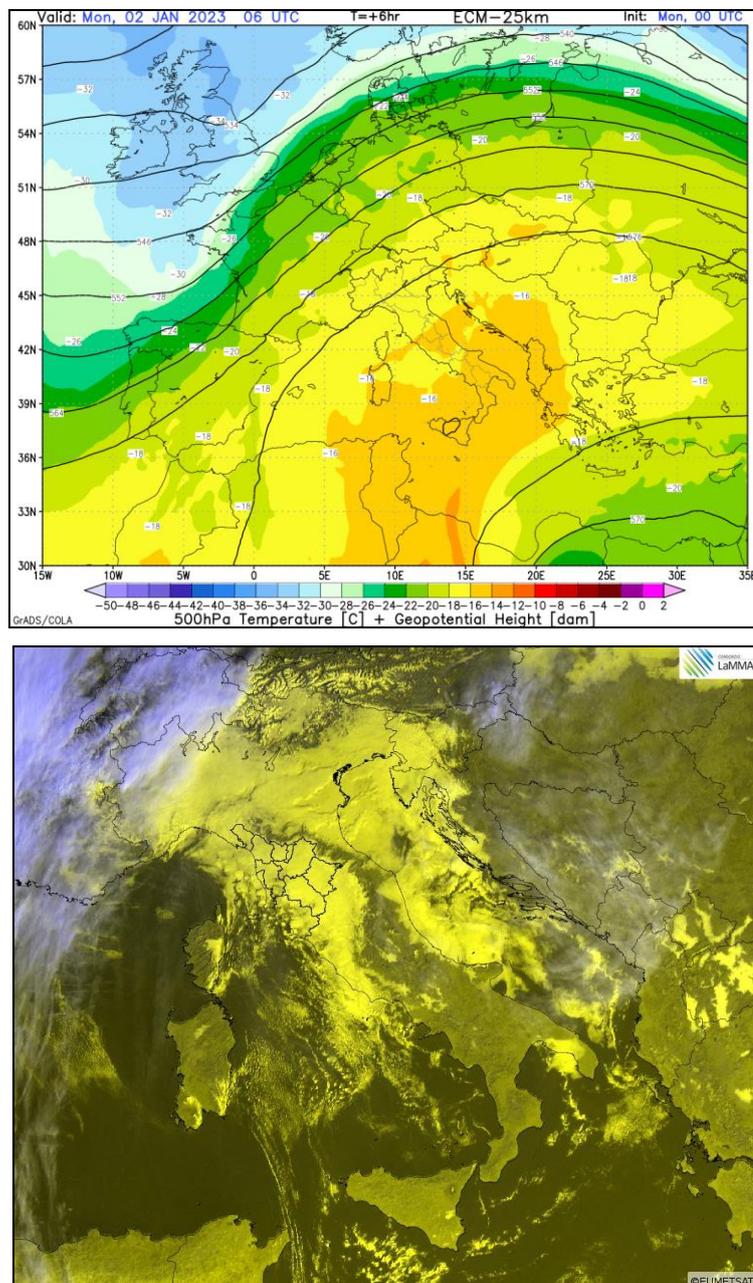


Figura 20: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso), 2 gennaio 2023

## 10-12 LUGLIO

L'intrusione di polveri sahariane verificatasi tra il 10 e il 12 luglio è stata particolarmente intensa. L'evento del 10-12 rappresenta l'apice di una serie di intrusioni di polveri desertiche protrattasi fino al 24 luglio. Anche in questo caso responsabile dell'ingresso delle polveri una saccatura di origine nordatlantica e la presenza di un promontorio anticiclonico di matrice subtropicale desertica.

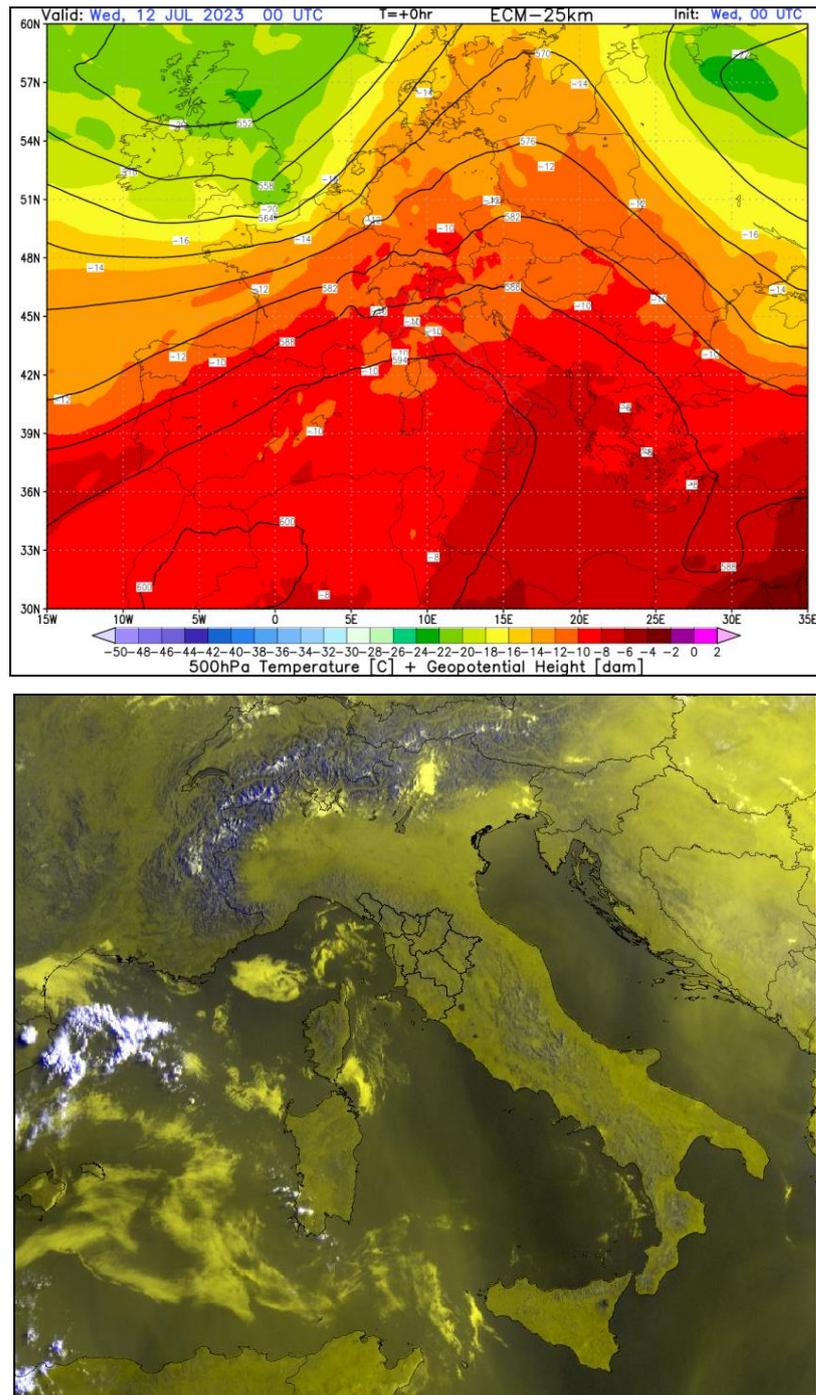


Figura 21: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso), 12 luglio 2023

## 17 SETTEMBRE

L'evento del 17 settembre è stato provocato da una profonda saccatura atlantica sulla Spagna nordoccidentale che ha richiamato masse d'aria molto calde e ricche di polveri dal deserto. Sull'Italia era presente un promontorio anticiclonico di matrice subtropicale.

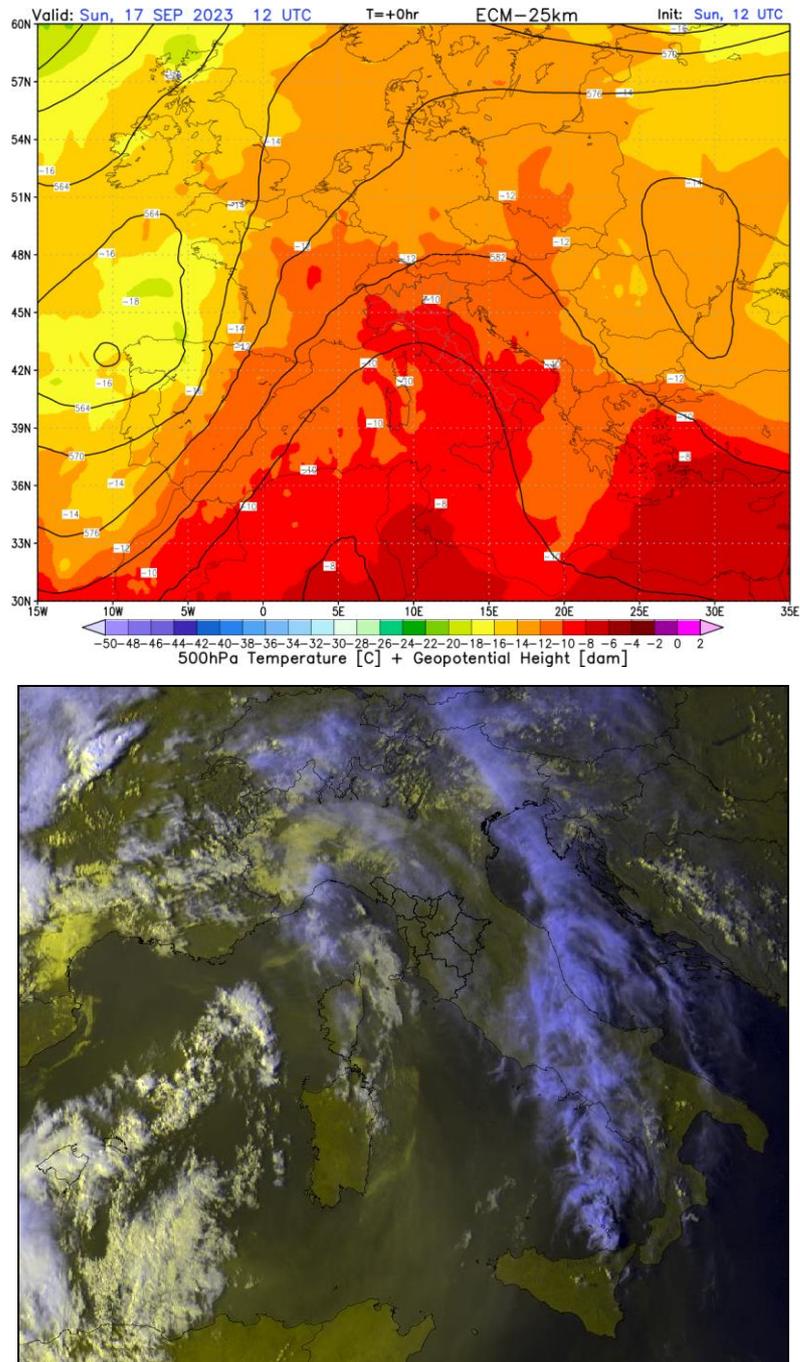


Figura 22: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso), 17 settembre

20 OTTOBRE

Anche l'evento del 20 ottobre è stato provocato, come nel caso dei precedenti, dall'azione di una saccatura che ha richiamato intensi venti meridionali e polveri sahariane. Tuttavia, l'intrusione è durata poco in quanto il sistema frontale è riuscito a vincere le resistenze anticicloniche portando poi abbondanti piogge. Nell'immagine satellitare riportata la nuvolosità nasconde le polveri presenti all'interno del flusso (Figura 23).

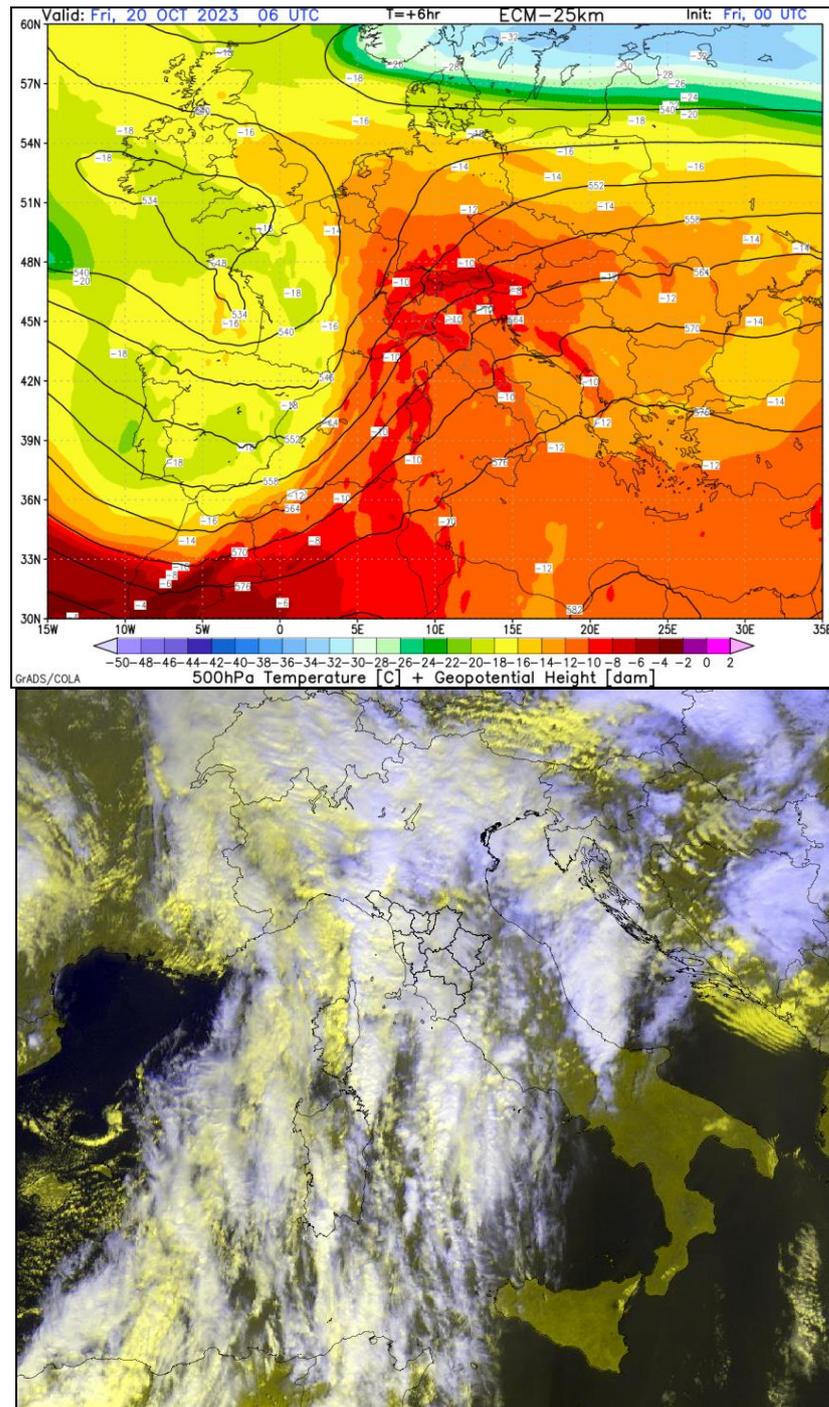


Figura 23: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso), 20 ottobre

1° DICEMBRE

Sebbene sia durata meno di 48 ore, l'intrusione del 1-2 dicembre 2023 è stata la più intensa del 2023 in termini di concentrazioni di polveri desertiche (Figura 25).

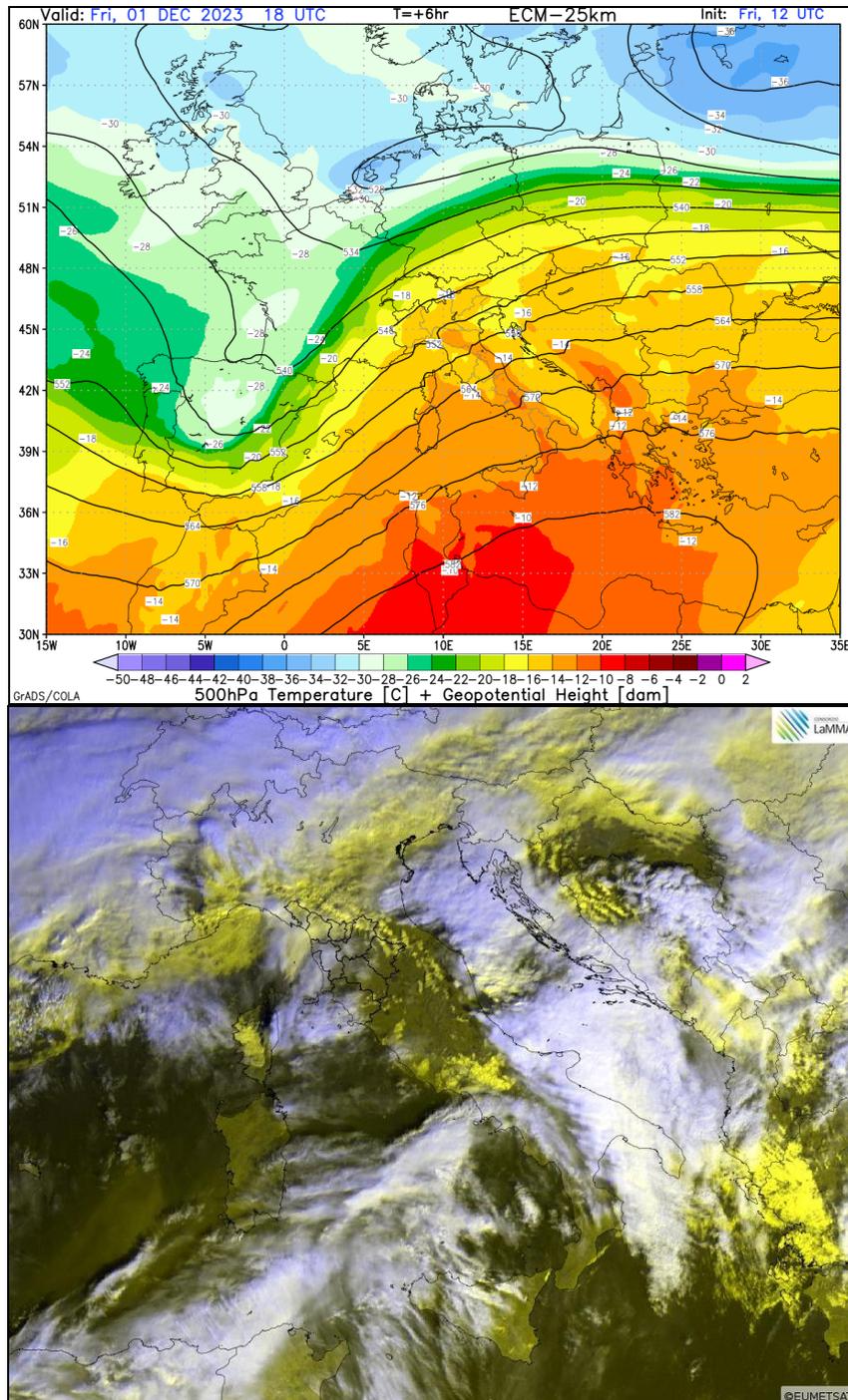


Figura 24: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso), 1° dicembre 2023

### 3. Risultati

Per la simulazione 2023, come dettagliato nei paragrafi precedenti, il sistema modellistico SPARTA è stato aggiornato, affinando la risoluzione orizzontale del CAMx ad 1 km, aumentando così la risoluzione utilizzata fino ad ora per le stime modellistiche (2km) dei vari inquinanti. Questa scelta permette di migliorare le performance modellistiche, infatti, è possibile aderire meglio al dato emissivo IRSE che viene fornito alla stessa risoluzione di 1km e inoltre vengono dettagliate in modo più accurato sia le aree ad elevato inquinamento, sia quelle caratterizzate da una maggior variabilità meteorologica o legata all'orografia locale. Per il 2023 sono stati prodotti i campi di concentrazione degli inquinanti normati (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), con frequenza oraria sull'intero dominio regionale.

I campi meteorologici sono stati ottenuti dalla run 2023 del modello prognostico WRF-ARW, le concentrazioni al contorno e iniziali dal modello CHIMERE utilizzando le opportune interfacce per il meccanismo chimico dal modello CAMx, e la componente emissiva dall'inventario regionale IRSE ad 1 km di risoluzione, nel suo più recente aggiornamento relativo al 2019. Nel dettaglio, sul dominio toscano, i campi emissivi di input sono stati allineati ai giorni di emissione 2023 secondo la classificazione tipo feriale, festivo e prefestivo. In maniera analoga è stato fatto anche per i campi di emissione extra-Toscana, provenienti dall'inventario nazionale e forniti su maglia a 4 km da ENEA. Entrambi i data-set sono disaggregati temporalmente a livello orario; il primo è stato utilizzato alla sua risoluzione originale di 1km, mentre il secondo è stato riscalato dai 4km originari a 1km.

Nei paragrafi seguenti, vengono analizzati i risultati ottenuti. In particolare, per ogni inquinante si valutano le mappe medie su base stagionale e annuale, al fine di caratterizzare la distribuzione spaziale degli inquinanti, anche tenendo conto della forzante meteorologica. Valutazioni puntuali sono state effettuate confrontando le serie storiche delle stime nei nodi di calcolo più prossimi alle centraline di monitoraggio (ARPAT - Figura 2) e le centraline stesse, anche valutando gli indicatori statistici richiesti dalla normativa (D.Lgs 155/2010), in modo da valutare l'adeguatezza della stima modellistica rispetto al relativo dato misurato e di conseguenza la performance del modello. L'analisi dei risultati è stata effettuata anche mediante l'utilizzo del software statistico *Delta Assessment & Planning* [Thunis,2012 e Janssen,2020], un software di valutazione dei modelli basato su IDL, sviluppato nell'ambito del progetto europeo FAIRMODE (<https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>), per il benchmarking delle applicazioni di modellistica numerica previste dalla Direttiva Europea sulla Qualità dell'Aria (AQD). La

maggior parte delle funzionalità di questo tool si concentra sul confronto tra dati stimati dalla modellistica e quelli monitorati dalla rete regionale, offrendo una rapida diagnosi delle prestazioni del modello in termini di vari indicatori statistici e diagrammi. Alcuni degli indicatori statistici vengono valutati rispetto a valori limite (criteri di prestazione e obiettivi di qualità del modello). Nel dettaglio, per la presente run modellistica, con questo software sono stati prodotti i target-plot e gli scatterplot, per ciascun inquinante stimato ed è stato calcolato l'indice di qualità MQI del modello. In particolare, gli scatterplot (Figura 29, Figura 38, Figura 47, Figura 52) sono utili per un confronto quantitativo fra i dati medi annuali di concentrazione misurata delle stazioni di monitoraggio (ascissa) e stimata dal modello nelle celle corrispondenti alla posizione delle stesse stazioni (ordinata). Il cono tratteggiato rappresenta l'intervallo di qualità dei dati, la cui ampiezza assume due valori diversi a seconda dell'inquinante:

1.  $\pm 50\%$  per la media su base annuale per PM10 e PM2.5;
2.  $\pm 30\%$  per la media su base annuale NO2, per i valori massimi giornalieri (biossido di azoto e ozono) e per il massimo giornaliero della media mobile su otto ore di O3 (calcolata esaminando le media consecutive su 8 ore di ogni giorno).

L'area verde e l'area arancione rappresentano le aree di confidenza, rispettivamente più e meno stringenti, all'interno delle quali possono ricadere i singoli valori calcolati per ciascuna stazione. La situazione ideale si raggiunge quando tutti i punti relativi alle stazioni ricadono all'interno dell'area tratteggiata, ma in ogni caso se alcuni punti cadono comunque entro l'area arancione, il modello può avere delle buone prestazioni.

Gli assessment target plot sono molto utili per verificare se l'obiettivo di qualità per il modello viene raggiunto per le diverse stazioni della rete regionale (Figura 30, Figura 39, Figura 48, Figura 53).

Il Delta-tool definisce un criterio di performance del modello quale livello minimo di qualità che deve essere raggiunto per poter utilizzare le stime prodotte per assessment e planning. Poiché si ritiene il modello abbia una buona performance quando raggiunge un grado di incertezza confrontabile con quello delle corrispondenti misure, l'obiettivo di qualità si raggiunge se l'indicatore *MQI* (Model Quality Index) risulta inferiore o pari a 1 per almeno il 90% delle stazioni disponibili. Tale indice viene calcolato considerando la discrepanza tra i valori osservati ad ogni tempo di osservazione e i corrispondenti valori stimati dal modello, secondo la formula seguente [Thunis, 2012]:

$$MQI = \frac{|O_i - M_i|}{\beta U_{95}(O_i)}, \beta = 2 \quad [\text{eq.1}]$$

dove  $O_i$  e  $M_i$  sono rispettivamente le osservazioni e le stime al tempo  $i$ , e U95 è l'incertezza relativa al 95esimo percentile dei livelli di concentrazione misurati. Questo valore è indicato nelle figure (Figura 30, Figura 39, Figura 48, Figura 53) in alto a sinistra con  $MQI_{HR}$ .

L'indice MQI può essere generalizzato anche alle medie delle serie temporali annuali considerando la seguente formula:

$$MQI = \frac{RMSE}{\beta RMSu} \quad [eq.2]$$

dove  $RMSu$  è la radice quadratica media dell'incertezza delle misure, e RMSE è l'errore quadratico medio tra misure e stime e  $\beta=2$ . Questo indice è riportato nelle figure degli assessment target plot in alto a sinistra come  $MQI_{YR}$ . Anche quest'ultimo indice dovrebbe assumere valori inferiori o pari a 1, ma essendo un valore aggregato, è meno rappresentativo per la performance del modello.

Il criterio di performance del modello  $MQI \leq 1$  [eq.1] è attivato per:

- O3 (relativamente alla massima concentrazione media mobile giornaliera su 8 ore)
- NO2 (relativamente alla concentrazione oraria)
- PM10 e PM2.5 (relativamente alla concentrazione media giornaliera) sull'anno.

In tali grafici, l'area colorata in verde identifica il raggiungimento del criterio di performance ( $T \leq 1$ ). Ciascun punto su tale grafico rappresenta una stazione, la cui distanza dal centro è il valore di MQI per quella stazione. Le stazioni che cadono all'interno dell'area verde sono identificate come stazioni che soddisfano il criterio di performance. La linea tratteggiata rappresenta il limite (ma ancora dentro il cerchio verde) fuori dal quale il modello risulta entro il range di incertezza delle misure. Quando l'MQI di una singola stazione è maggiore di 1 e quindi cade fuori dall'area verde significa che c'è una differenza significativa tra i valori stimati e quelli misurati per quella singola stazione. Per avere il raggiungimento dell'obiettivo di qualità modellistica, almeno il 90% delle stazioni considerate deve ricadere all'interno dell'area verde, registrando un  $MQI \leq 1$ .

### 3.1 PM10

La distribuzione spaziale della concentrazione di particolato atmosferico PM10, all'interno del dominio toscano, stimata come media annua per il 2023 (Figura 25), raggiunge i valori più alti nelle aree della piana Firenze-Prato-Pistoia e nella Piana Lucchese. Tali zone sono caratterizzate da elevate pressioni antropiche e quindi da valori più alti di emissione di inquinanti. Valori più alti si registrano anche nel Valdarno Superiore e nella Valle del Serchio, le cui conformazioni orografiche, in combinazione con la meteorologia, determinano una situazione di ristagno nei bassi strati dell'atmosfera, che ostacola la dispersione e favorisce l'accumulo di inquinanti.

Durante il periodo invernale (Figura 26), il PM10 raggiunge valori di concentrazione più alti, in particolare nei mesi di gennaio, febbraio, novembre e dicembre. Nei mesi primaverili ed estivi le concentrazioni sono mediamente più basse e distribuite più uniformemente su tutto il territorio. Questo è legato sia alla riduzione delle emissioni relative al macrosettore riscaldamento, sia all'aumento stagionale dell'altezza media dello strato di rimescolamento (HMix).

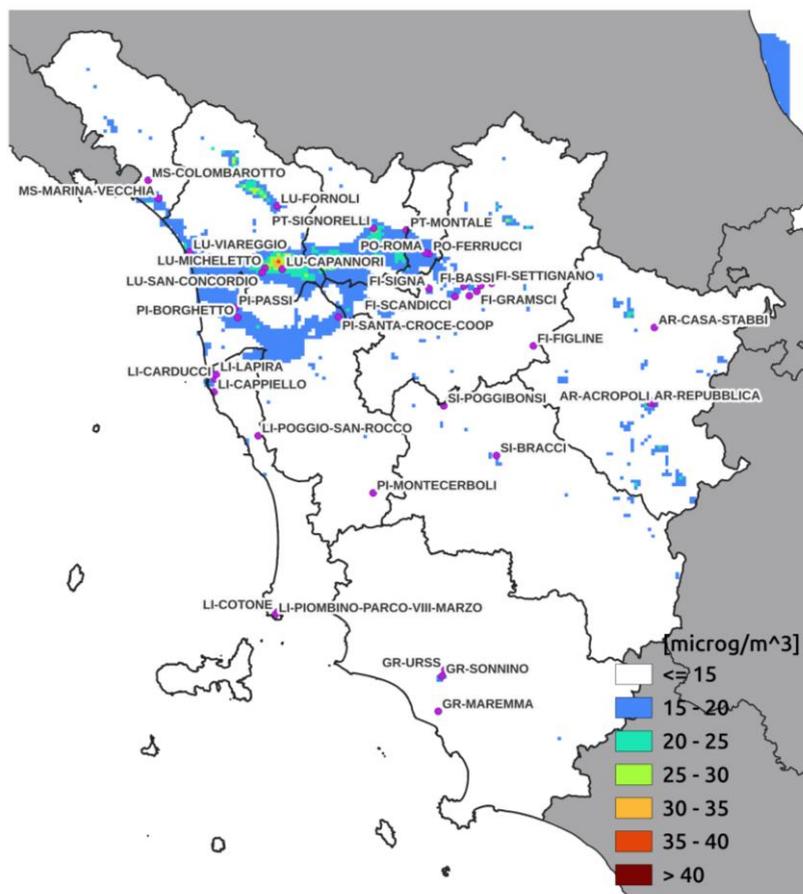


Figura 25. Concentrazione media annua 2023 delle stime di PM10

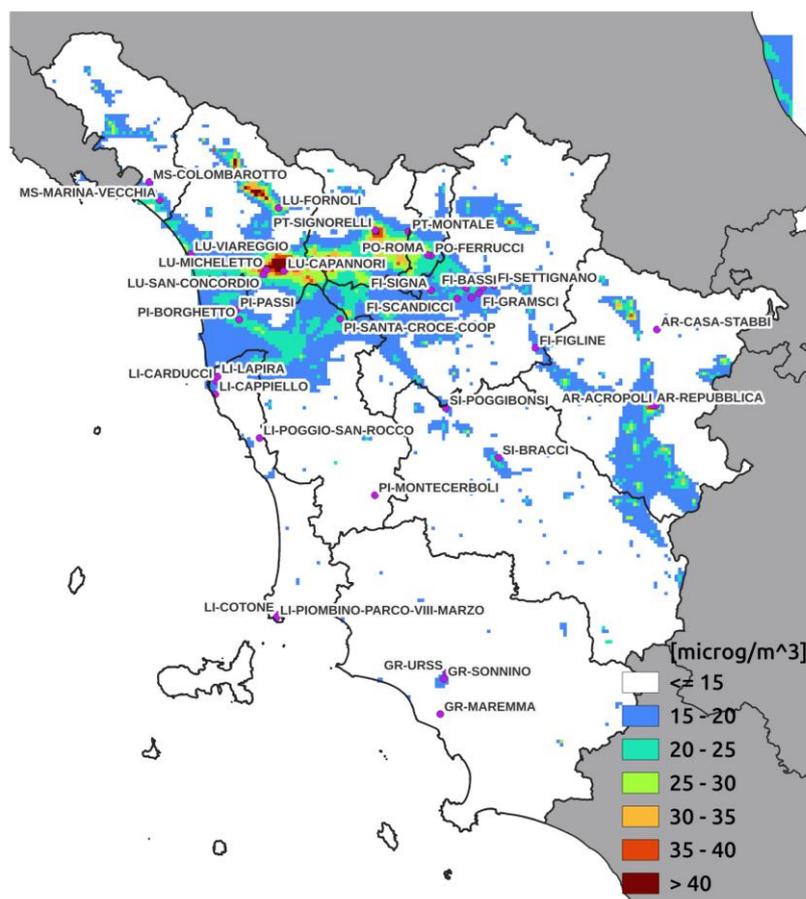


Figura 26. Concentrazione media invernale (gen-mar e ott-dic) 2023 delle stime di PM10

Il confronto tra le serie storiche stimate e quelle misurate nei punti relativi alle centraline evidenzia una buona performance del modello sulla riproduzione del dato misurato, sia in termini di andamento temporale che in termini quantitativi. La simulazione a 1km porta ad un sensibile miglioramento nella simulazione dell'andamento temporale.

Nelle stazioni di fondo della piana FI-PO-PT, si ha un'adeguata risposta del sistema modellistico per il periodo invernale, sebbene si evidenzi una generale sottostima modellistica (Figura 27). Durante il periodo estivo la sottostima è più marcata, ma comunque è relativa a valori mediamente più bassi.

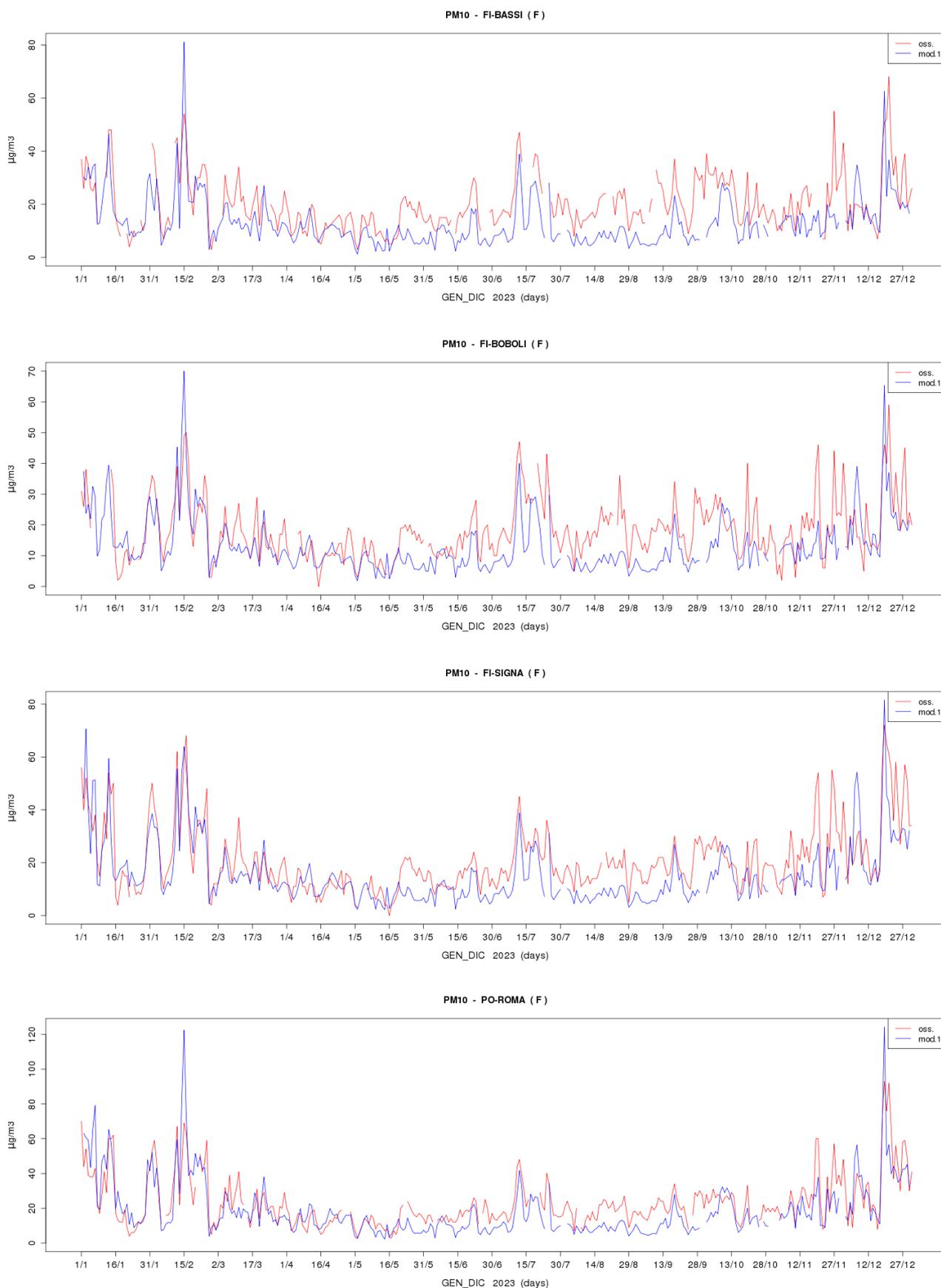


Figura 27. Serie storiche stimate (blu) rispetto alle centraline (rosso), per le stazioni di FI-Bassi, FI-Boboli, FI-Signa e PO-Roma.

Per la stazione di LU-Capannori, centralina che rappresenta una criticità per la regione Toscana, si nota un ottimo accordo tra stime e misure (Figura 28). Possiamo notare infatti che tutti i picchi di concentrazione osservati, sono correttamente individuati e riprodotti dalla modellistica.

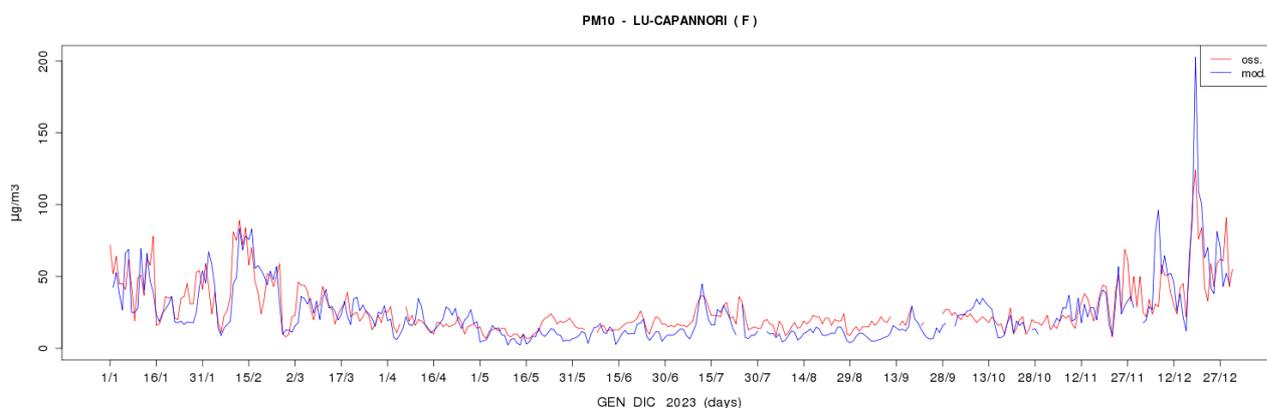


Figura 28. Serie storica stimata (blu) rispetto alla centralina (rosso), per la stazione di LU-Capannori.

Dallo scatter-plot per il PM10 (Figura 29) che mette in relazione i dati medi giornalieri osservati con le stime nei punti corrispondenti alle centraline di monitoraggio, per le serie temporali annuali, si nota che tutte le stazioni cadono all'interno dell'area di confidenza. Soltanto il punto corrispondente a FI-Gramsci cade al di fuori dell'area verde ma sempre entro l'area di confidenza evidenziata in arancione. Si ricorda che FI-Gramsci è una stazione urbana di traffico.

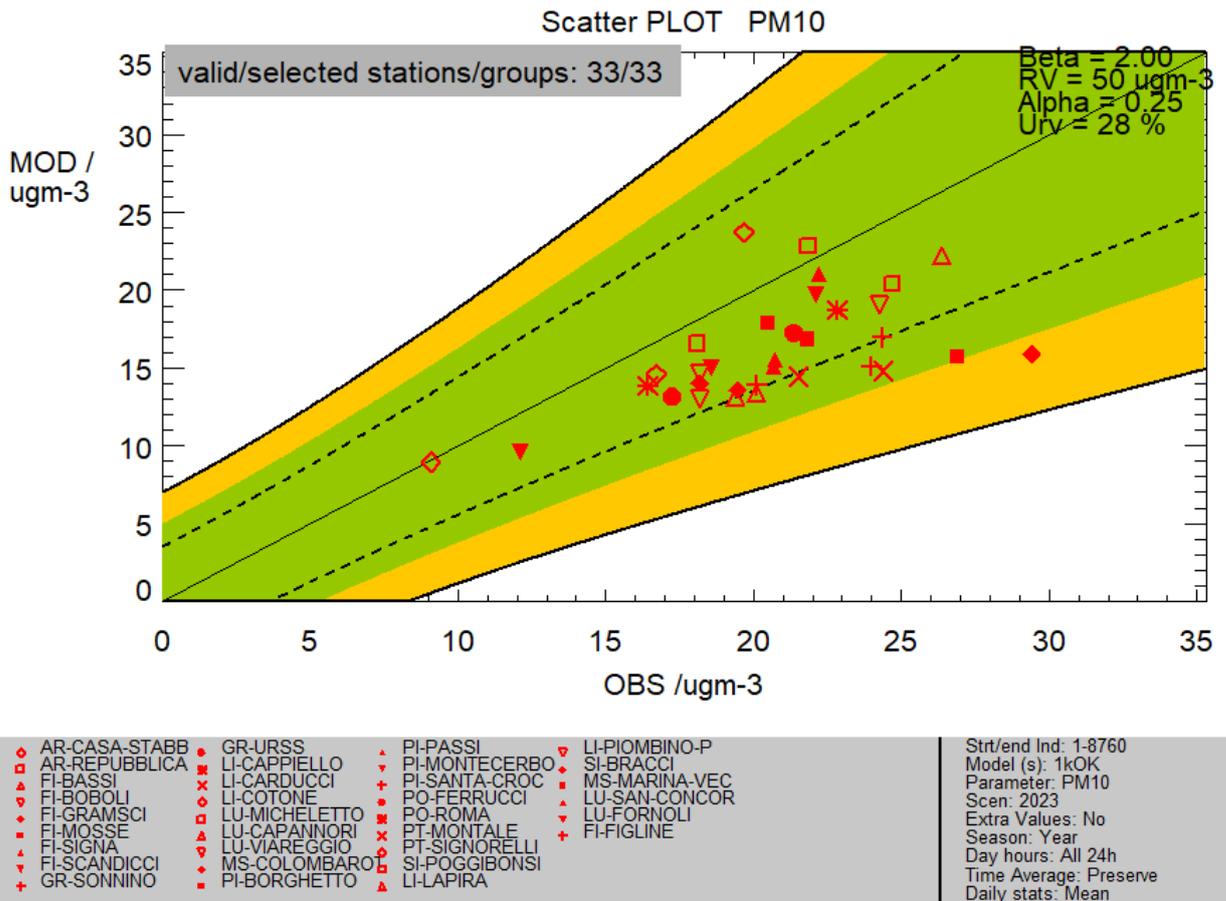


Figura 29. Scatter-plot relativo alle medie giornaliere (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di PM10.

La media giornaliera di PM10 è sottostimata dal modello in quasi la totalità delle stazioni della rete regionale, come si può valutare dal target-plot di Figura 30, in cui tutti i punti cadono all'interno dell'area T=1 (per la spiegazione del grafico si veda il paragrafo 3) ad eccezione di AR-Repubblica, che è una stazione di traffico, LU-Fornoli e PT-Signorelli. L'indice MQI\_HD globale è pari a 0.842, che rientra nel valore target per l'obiettivo di qualità della modellistica.

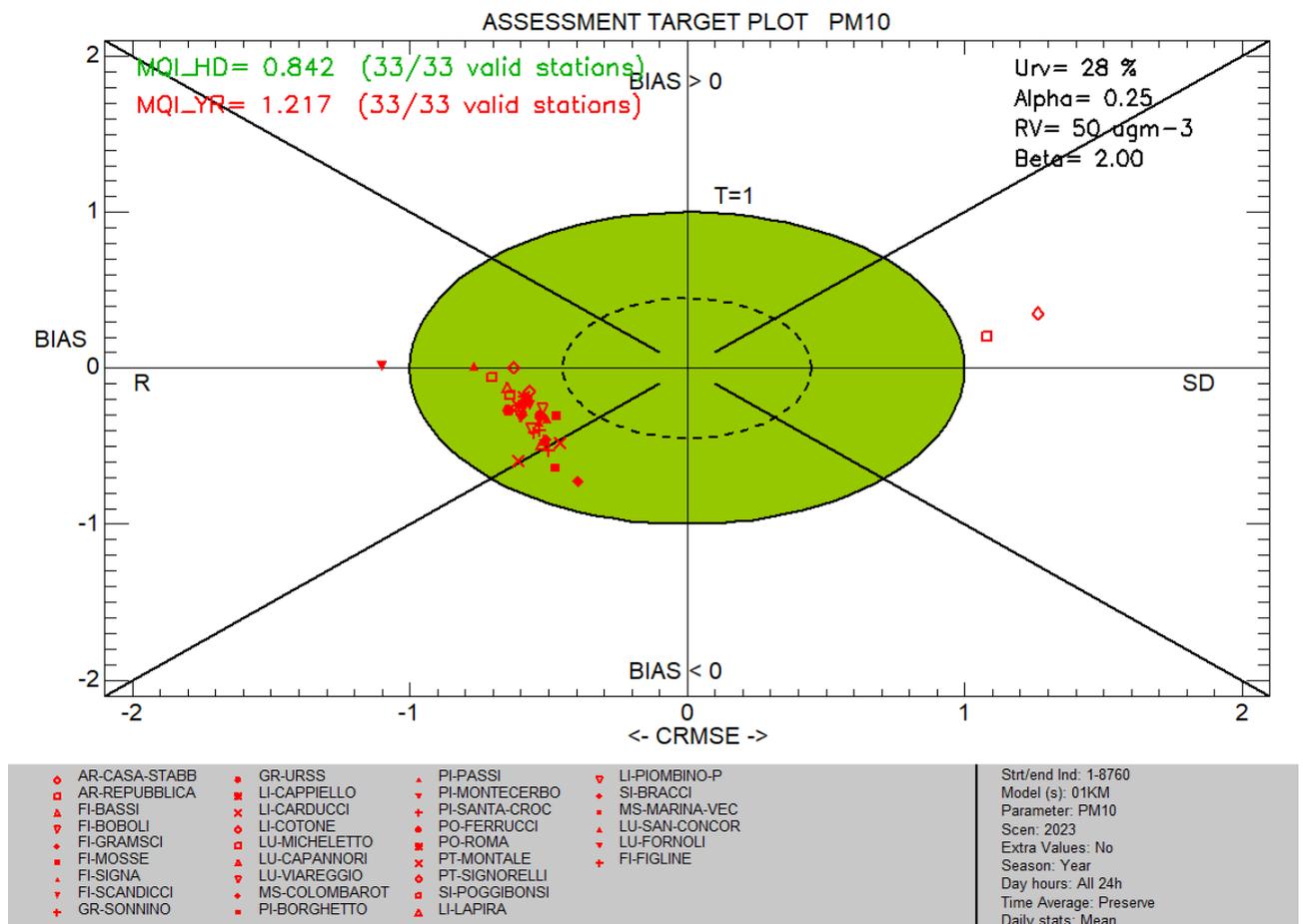


Figura 30. Assessment target plot relativo alle medie giornaliere di PM10 in corrispondenza delle stazioni della rete di monitoraggio.

### 3.1.1 Il contributo naturale al PM10

La componente di origine naturale del PM10 è costituita principalmente da polvere desertica e spray marino. Il sistema modellistico SPARTA consente di stimare tale componente, individuando in modo attendibile (vedi Progetto PATOS [4]) gli episodi legati alle intrusioni desertiche e al contributo di aerosol marino.

#### POLVERE DESERTICA

Il contributo desertico stimato da SPARTA deriva dalle condizioni al contorno fornite dal modello CHIMERE, il cui dominio comprende anche le principali sorgenti costituite dalle aride regioni nord-africane (in Algeria, Tunisia e Marocco) e asiatiche (nella penisola Arabica, nella regione del Mar Caspio, etc.). Il sistema modellistico SPARTA, che utilizza una più alta risoluzione spaziale, permette di individuare con maggiore precisione tali contributi sul territorio regionale.

Gli episodi desertici che hanno interessato la Toscana nel 2023 sono stati individuati, come negli anni precedenti, utilizzando i valori medi giornalieri di concentrazione di dust

stimati da SPARTA in corrispondenza delle 34 stazioni di PM10 della rete regionale gestita da ARPAT [6]. Si considerano giorni con contributo desertico quelli in cui, in almeno una delle stazioni considerate, la stima della concentrazione di dust supera la soglia di 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tale soglia è stata scelta in riferimento a quanto proposto in letteratura in studi riguardanti il territorio italiano [5].

In tabella 1 sono riportate le date corrispondenti ai giorni con intrusioni desertici e le relative stime di concentrazione di dust nei suoi valori minimo, medio e massimo, stimati quotidianamente in corrispondenza delle 34 stazioni. Nella tabella sono individuati gli episodi desertici (date contigue, uno o più giorni) con i colori alternati azzurro/bianco. Nell'anno 2023 sono stati individuati 13 episodi, con una durata molto variabile, da 1 a 18 giorni, per un totale di 61 giorni. Le intrusioni di dust avvengono soprattutto nel periodo estivo, in particolare nel mese di luglio e di settembre (34 giorni); in primavera e in autunno sono stati individuati 11 giorni; in inverno si segnalano solo 5 giorni, in febbraio.

Il sistema Alert Dust, servizio operativo per la previsione di intrusioni desertiche sviluppato nell'ambito del progetto PATOS [4], basato sulle previsioni del modello CHIMERE, nell'anno 2023 ha individuato gli stessi episodi riportati in tabella 1.

Episodi	MIN (ug/m3)	MED (ug/m3)	MAX (ug/m3)	Episodi	MIN (ug/m3)	MED (ug/m3)	MAX (ug/m3)
22/02/2023	1.3	4.5	7.8	23/07/2023	0.3	1.0	5.5
23/02/2023	3.9	10.8	15.0	24/07/2023	11.6	15.7	22.5
24/02/2023	3.8	9.0	14.7	25/07/2023	9.4	21.6	31.6
25/02/2023	8.1	10.5	12.6	30/07/2023	1.5	3.2	7.2
26/02/2023	0.3	2.0	9.2	14/08/2023	0.7	2.2	6.1
20/05/2023	4.0	6.5	10.3	15/08/2023	0.9	3.2	6.1
21/05/2023	0.8	1.9	6.9	16/08/2023	0.7	3.7	6.5
24/05/2023	0.3	4.3	11.3	19/08/2023	1.0	3.3	7.4
25/05/2023	0.5	3.0	7.2	13/09/2023	1.4	2.3	8.6
05/06/2023	0.5	2.5	6.6	14/09/2023	3.5	5.7	8.2
06/06/2023	1.3	4.7	6.5	15/09/2023	2.6	6.0	10.6
09/06/2023	0.9	4.4	9.2	16/09/2023	3.5	5.4	7.4
10/06/2023	1.7	5.1	7.5	17/09/2023	7.7	12.0	17.5
21/06/2023	6.0	10.9	17.9	18/09/2023	13.3	19.5	23.9
22/06/2023	7.7	12.7	18.7	19/09/2023	7.5	13.0	21.5
23/06/2023	7.0	10.2	15.1	20/09/2023	3.8	5.1	7.5
08/07/2023	1.3	3.3	7.0	21/09/2023	6.8	9.9	14.0
09/07/2023	2.3	6.2	11.8	22/09/2023	1.4	3.2	5.8
10/07/2023	4.6	11.8	21.8	26/09/2023	1.8	3.2	5.2
11/07/2023	8.0	25.9	42.5	08/10/2023	0.5	2.3	7.4
12/07/2023	19.3	34.5	51.6	09/10/2023	5.1	9.6	18.4
13/07/2023	12.1	23.8	38.7	10/10/2023	5.6	10.1	14.9
14/07/2023	4.9	10.5	21.3	11/10/2023	5.4	9.7	13.6
15/07/2023	2.0	6.8	16.0	12/10/2023	5.1	8.8	12.7
16/07/2023	5.7	11.3	17.1	13/10/2023	3.3	5.8	6.9
17/07/2023	12.4	22.8	31.2	14/10/2023	2.8	4.7	6.2
18/07/2023	11.2	20.4	29.1	19/10/2023	3.0	6.1	13.6
19/07/2023	12.1	23.6	35.0	20/10/2023	7.4	11.9	24.3
20/07/2023	11.4	20.5	26.6	23/10/2023	1.7	2.8	5.3
21/07/2023	7.3	13.0	21.3	24/10/2023	4.5	7.6	14.1
22/07/2023	1.3	3.3	9.1				

Tabella 1. Episodi di intrusioni di polvere desertica nell'anno 2023, stima (SPARTA) delle concentrazioni minime, medie e massime di dust nelle 34 stazioni di PM10 della rete regionale. In colori alternati gli episodi relativi a giorni consecutivi

Nelle figure 31 e 32, a titolo di esempio, sono riportati i grafici relativi a due stazioni rurale/suburbana di fondo, AR-Casa Stabbi e di PI-Montecerboli, in cui si possono distinguere in modo più netto i contributi desertici al PM10, rispetto a quanto accade in aree più antropizzate. La concentrazione media giornaliera di PM10 misurata nelle stazioni (barre blu) è contrapposta alla concentrazione di polvere desertica stimata da SPARTA (linea rossa). Si può notare che i principali episodi di intrusione di polvere desertica individuati con l'approccio modellistico corrispondono effettivamente a picchi di concentrazione di PM10 misurati. L'episodio dei giorni 1 e 2 dicembre, attribuibile a intrusione desertica rilevato nelle stazioni di PM10, non è stato correttamente individuato dal modello CHIMERE e, di conseguenza, dal modello SPARTA. Ma anche considerando i dati stimati dall'ensemble CAMS (<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-europe-air-quality-reanalyses?tab=download>) per questi giorni, anche gli altri modelli regionali europei non rilevano un significativo contributo di dust nel PM10 stimato.

Nel capitolo 2, di questo episodio e di altri (10-12 luglio, 17 settembre, 20 ottobre, correttamente individuati con il metodo adottato), sono state descritte le condizioni meteo, con l'ausilio di mappe meteo e di immagini satellitari. In particolare, gli episodi di luglio e di dicembre hanno portato ad un notevole aumento dei livelli di concentrazione di PM10 e al superamento del valore limite in alcune stazioni della rete regionale [6, 7].

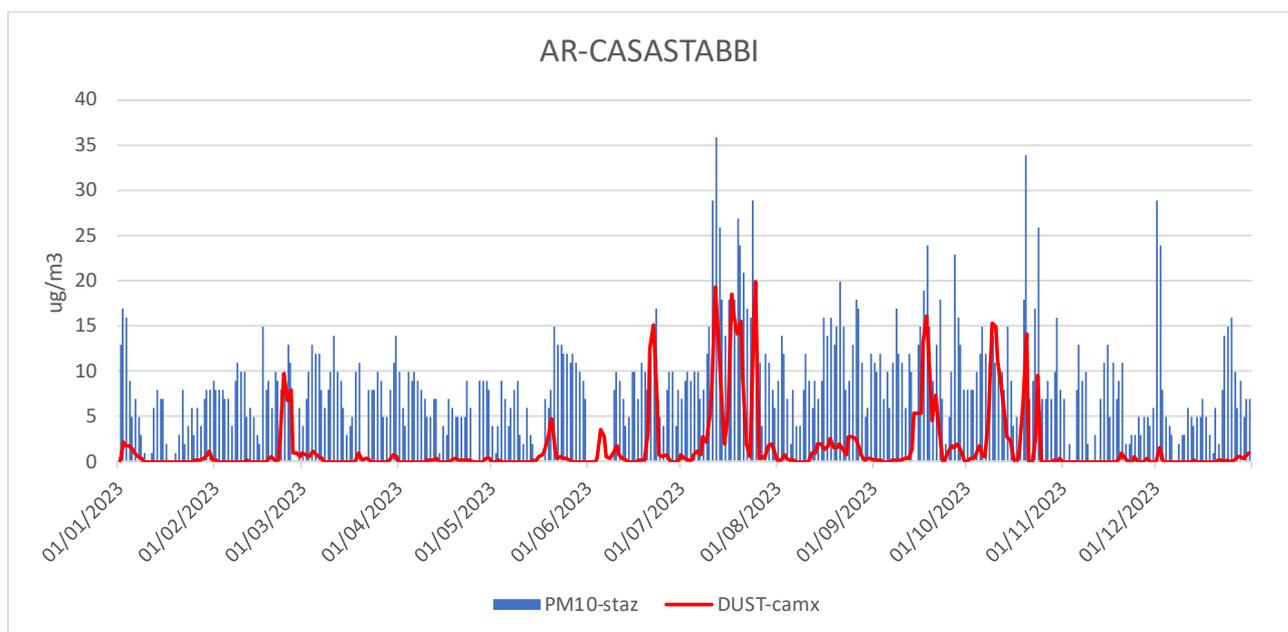
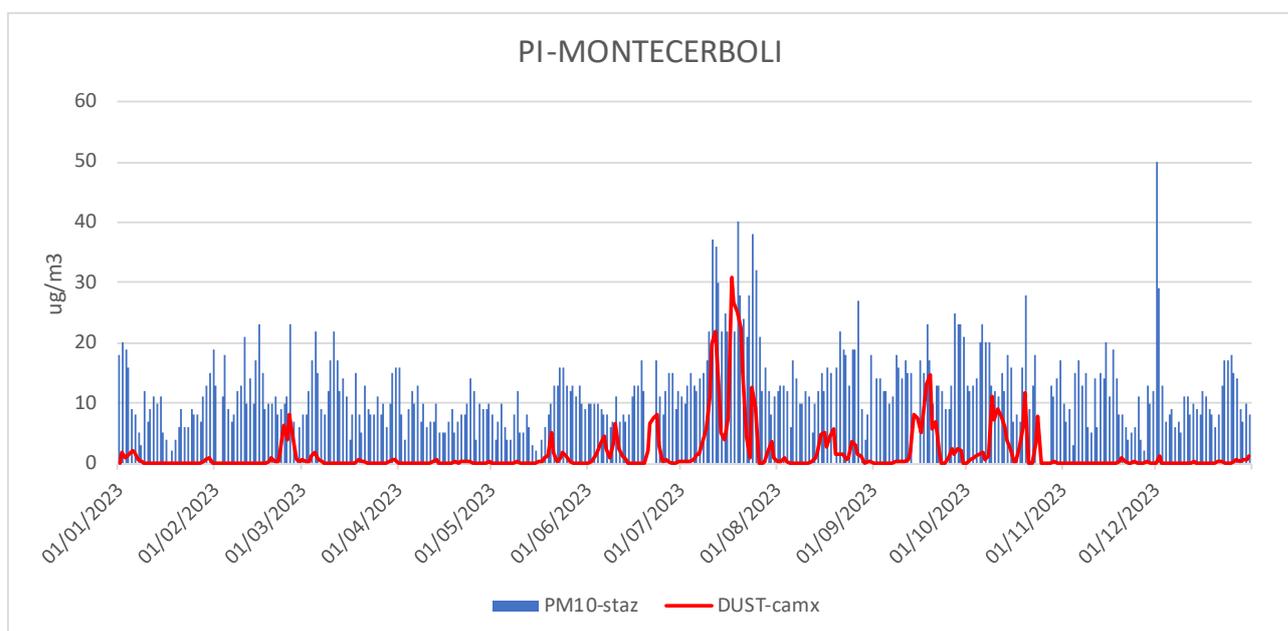


Figura 31. Serie storiche, confronto tra la concentrazione media giornaliera di dust stimato da modello (linea rossa) e PM10 misurato (barre blu) nella stazione di AR-CasaStabbi.



*Figura 32. Serie storiche, confronto tra la concentrazione mediana giornaliera di dust stimato da modello (linea rossa) e PM10 misurato (barre blu) nella stazione di PI-Montecerboli.*

### Spray marino

Nell'ambito del progetto PATOS [4] è stato svolto uno studio relativo allo spray marino ed in particolare all'elaborazione e alla validazione di un metodo semi-empirico per l'individuazione degli episodi caratterizzati da valori significativi di questa componente. Il metodo sviluppato si basa sull'utilizzo dei dati di vento misurati in una stazione costiera, in particolare nella stazione meteo Comma di Livorno. Sulla base dei dati di vento misurati e dei valori soglia per la velocità media giornaliera e la direzione di provenienza ( $VV > 4$  m/s e DV proveniente dai settori occidentali), è possibile individuare i giorni in cui il contributo dello spray marino al PM10 è rilevante, non solo sulla costa in prossimità della stazione meteo, ma anche nelle aree interne [4]. Tuttavia, nell'anno 2023 non è stato possibile utilizzare i dati misurati nella stazione meteo Comma, in quanto tali dati non sono stati registrati per alcuni mesi (1-11 gennaio, 25 maggio-7 giugno, 29 ottobre-31 dicembre). Per l'individuazione dei giorni con concentrazioni significative di spray marino, sono stati utilizzati i dati di direzione e intensità del vento stimati dal modello WRF-ARW a 3 Km di risoluzione orizzontale (modello che fornisce l'input meteo nel sistema SPARTA), in corrispondenza della stazione meteo Comma. Si può notare come il modello WRF riproduca correttamente la variabile velocità del vento, nel grafico in figura 33, in cui sono riportate la serie temporale dei valori medi giornalieri misurati nella stazione meteo Comma (linea rossa) e la corrispondente serie delle stime WRF (linea blu); l'ottimo accordo tra le due serie è evidenziato anche dal valore del coefficiente di correlazione, pari a 0.90. È stato quindi possibile individuare i giorni con contributo marino durante tutto l'anno 2023, anche in assenza dei dati di vento misurati.

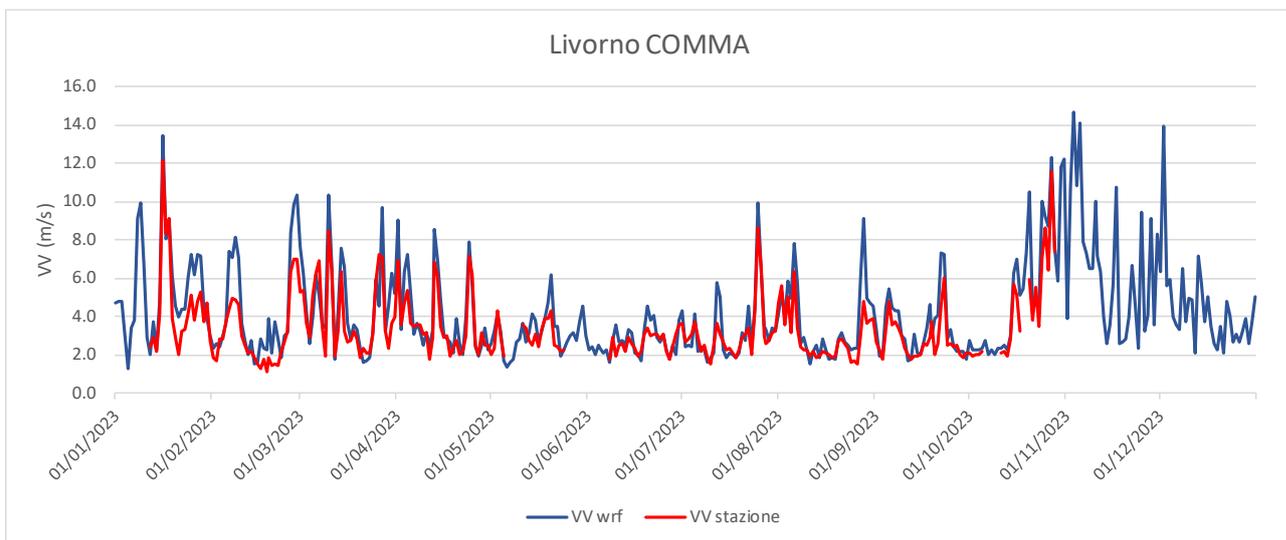


Figura 33. Media giornaliera delle concentrazioni di spray marino stimato da modello (barre rosse) nella stazione LI-La Pira (sopra), LU-Viareggio (centro), LU-Capannori (sotto) e velocità del vento misurato presso la stazione meteo Comma di Livorno (linea blu).

Nella tabella 2, in corrispondenza delle date relative agli episodi con contributo marino, sono riportati i valori di direzione e velocità del vento stimati da WRF e i valori di concentrazione di spray marino minimi, medi e massimi, stimati da SPARTA in corrispondenza delle 34 stazioni di PM10 della rete regionale. Sono stati individuati 60 giorni, 20 episodi (giorni consecutivi) di cui uno particolarmente persistente, dal 19 ottobre al 12 novembre.

Episodi	DV	VV (m/s)	MIN (ug/m3)	MED (ug/m3)	MAX (ug/m3)	Episodi	DV	VV (m/s)	MIN (ug/m3)	MED (ug/m3)	MAX (ug/m3)
08/01/2023	SW	9.1	1.1	2.0	4.2	30/08/2023	NW	4.7	0.4	0.6	1.6
09/01/2023	NW	10.0	3.1	4.5	7.3	31/08/2023	W	4.6	0.6	1.0	2.2
15/01/2023	SW	4.8	2.1	3.1	4.7	18/09/2023	SW	4.7	0.6	1.1	2.7
16/01/2023	W	13.4	6.2	8.0	10.7	21/09/2023	SW	4.1	0.4	0.8	1.7
17/01/2023	W	8.1	3.1	4.8	6.3	22/09/2023	SW	7.3	0.9	1.6	3.2
18/01/2023	NW	9.1	2.6	6.0	9.8	23/09/2023	W	7.3	3.0	4.1	7.0
06/03/2023	SW	6.2	1.4	2.6	4.2	15/10/2023	SW	6.3	1.5	2.9	4.3
07/03/2023	SW	5.1	1.7	2.5	5.2	19/10/2023	SW	7.3	3.1	4.5	7.6
10/03/2023	NW	10.4	3.5	6.3	10.0	20/10/2023	SW	10.5	4.3	6.0	8.2
11/03/2023	NW	6.7	5.8	8.1	10.5	21/10/2023	NW	4.3	1.4	3.9	6.8
13/03/2023	SW	4.2	1.0	1.7	4.2	22/10/2023	NW	4.8	4.8	5.8	7.1
14/03/2023	SW	7.6	3.6	5.6	8.0	24/10/2023	SW	10.1	2.6	4.4	6.8
25/03/2023	SW	5.9	2.0	3.6	5.7	25/10/2023	W	9.2	2.3	3.8	6.1
26/03/2023	SW	4.6	2.4	3.9	6.1	26/10/2023	SW	8.7	NaN	NaN	NaN
29/03/2023	W	4.6	1.1	1.9	3.7	27/10/2023	NW	12.4	5.7	8.5	11.4
30/03/2023	SW	6.2	2.1	2.8	4.4	28/10/2023	NW	7.5	3.7	4.9	6.8
31/03/2023	SW	5.2	2.4	3.6	5.4	29/10/2023	SW	5.8	2.1	3.2	5.0
01/04/2023	NW	9.1	3.8	6.2	9.3	30/10/2023	SW	11.8	NaN	NaN	NaN
13/04/2023	W	8.6	0.9	1.7	2.8	31/10/2023	NW	12.2	3.6	6.5	8.4
14/04/2023	NW	7.0	0.6	2.0	4.0	02/11/2023	SW	10.8	NaN	NaN	NaN
24/04/2023	NW	7.9	1.6	3.8	6.6	03/11/2023	NW	14.7	5.4	9.5	12.4
25/04/2023	NW	5.7	1.4	2.6	4.9	04/11/2023	NW	10.9	6.0	9.1	11.5
20/06/2023	SW	4.6	0.1	0.5	1.7	05/11/2023	NW	14.1	7.1	10.2	12.7
22/06/2023	SW	4.1	0.2	0.9	2.4	06/11/2023	W	7.9	6.7	8.3	10.1
01/07/2023	NW	4.3	0.2	0.5	1.2	07/11/2023	NW	7.3	3.6	5.3	6.8
05/07/2023	W	4.1	1.1	2.1	3.3	08/11/2023	NW	6.5	4.7	5.9	7.4
12/07/2023	SW	5.8	0.4	1.2	2.8	09/11/2023	SW	6.5	1.8	2.6	3.7
13/07/2023	W	5.0	1.1	2.1	5.1	10/11/2023	NW	10.0	1.3	3.5	5.5
22/07/2023	NW	4.5	1.0	2.2	4.8	11/11/2023	NW	7.2	4.2	6.6	9.7
24/07/2023	W	4.4	0.4	1.0	2.3	12/11/2023	W	6.4	3.0	3.7	5.5
25/07/2023	W	9.9	1.7	3.4	5.6	28/11/2023	NW	9.2	0.5	1.7	4.6
01/08/2023	NW	4.1	1.1	2.8	4.4	01/12/2023	SW	6.4	NaN	NaN	NaN
02/08/2023	NW	5.3	1.5	3.7	6.0	02/12/2023	W	14.0	4.8	7.3	9.5
04/08/2023	NW	5.8	1.4	4.4	8.0	11/12/2023	SW	4.9	3.1	4.3	7.7
06/08/2023	NW	7.8	1.4	3.6	6.8	13/12/2023	NW	7.2	3.1	5.7	8.1
27/08/2023	SW	6.0	0.2	0.6	1.5	22/12/2023	NW	4.8	2.0	3.9	6.4
28/08/2023	SW	9.1	0.5	2.3	4.0	23/12/2023	NW	4.0	3.8	6.9	8.5
29/08/2023	NW	5.0	0.3	0.6	1.6	31/12/2023	SW	5.0	0.5	0.6	0.9

Tabella 2. Elenco degli episodi di spray marino e relative concentrazioni ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) minime, medie e massime stimate dal sistema SPARTA, in corrispondenza delle 34 stazioni di PM10 della rete regionale.

	VV (m/s)		Spray marino ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	episodi	anno	episodi	anno
media	7.2	4.2	3.9	1.7

Tabella 3. Velocità media del vento stimato presso la stazione meteo Comma di Livorno dal modello meteo WRF e concentrazione media di spray marino stimata da modello, mediata sui valori corrispondenti alle 34 stazioni di PM10 della rete regionale, durante gli episodi di aerosol marino e durante tutto l'anno 2023.

Nella tabella 3 sono riportati i valori della velocità del vento stimato da WRF in corrispondenza della stazione meteo Comma, ed i valori della concentrazione di spray marino stimati da SPARTA, come media dei valori corrispondenti alle 34 stazioni ARPAT. I valori medi di vento e di concentrazione sono relativi agli episodi di spray marino (episodi) e all'intero anno 2023 (anno). La velocità media del vento e la concentrazione

di spray marino sono decisamente più alte durante gli episodi, rispetto ai valori medi dell'intero periodo.

A titolo di esempio, la velocità del vento stimata da WRF in corrispondenza della stazione Comma di Livorno (asse ordinate a sinistra, linea blu), e la concentrazione di spray marino stimata da Sparta in corrispondenza delle stazioni LI-La Pira, LU-Viareggio e LU-Capannori (asse ordinate a destra, barre rosse) sono riportati nei grafici in Fig. 34. L'indicazione della velocità del vento non è sufficiente per l'individuazione degli episodi, in quanto solo il vento moderato o forte proveniente dai settori occidentali è correlato all'aumento dello spray marino: nei grafici i segmenti neri indicano gli episodi individuati sulla base di questi criteri. Si può osservare una buona correlazione tra gli episodi di spray marino stimati e le stime di vento, non solo nei due siti costieri, ma anche nel sito di Capannori, nell'entroterra. Viceversa, nel periodo invernale si sono verificati tre episodi caratterizzati da forte vento proveniente da settori orientali, con concentrazione di aerosol marino molto bassa (fine gennaio, inizio febbraio e inizio marzo).

Le condizioni meteorologiche che determinano il trasporto di spray marino sono sfavorevoli all'accumulo degli inquinanti, quindi in questi casi si hanno generalmente livelli di PM10 non elevati. Tuttavia, le condizioni meteo caratterizzate da vento sostenuto proveniente dai quadranti occidentali non sono incompatibili con il trasporto di polvere desertica, che in alcuni casi può arrivare sul centro Italia anche da direzioni occidentali [12]. Quando si verificano contemporaneamente le condizioni di intrusioni desertiche e di trasporto di aerosol marino i valori di concentrazione di PM10 possono aumentare e talvolta superare il limite di  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , come è accaduto nei giorni 12 e 24 luglio 2023 e primo dicembre 2023.

Nel 2023 si sono verificati due casi in cui, a fronte di condizioni favorevoli all'aerosol marino, nella sola stazione di Viareggio la concentrazione di PM10 ha superato il valore soglia (6 marzo e 10 marzo). Tuttavia, a fronte di valori di PM10 sopra soglia, la concentrazione di PM2.5 resta bassa, evidenziando un importante contributo dovuto alla frazione grossa, riconducibile probabilmente a sorgenti crostali locali.

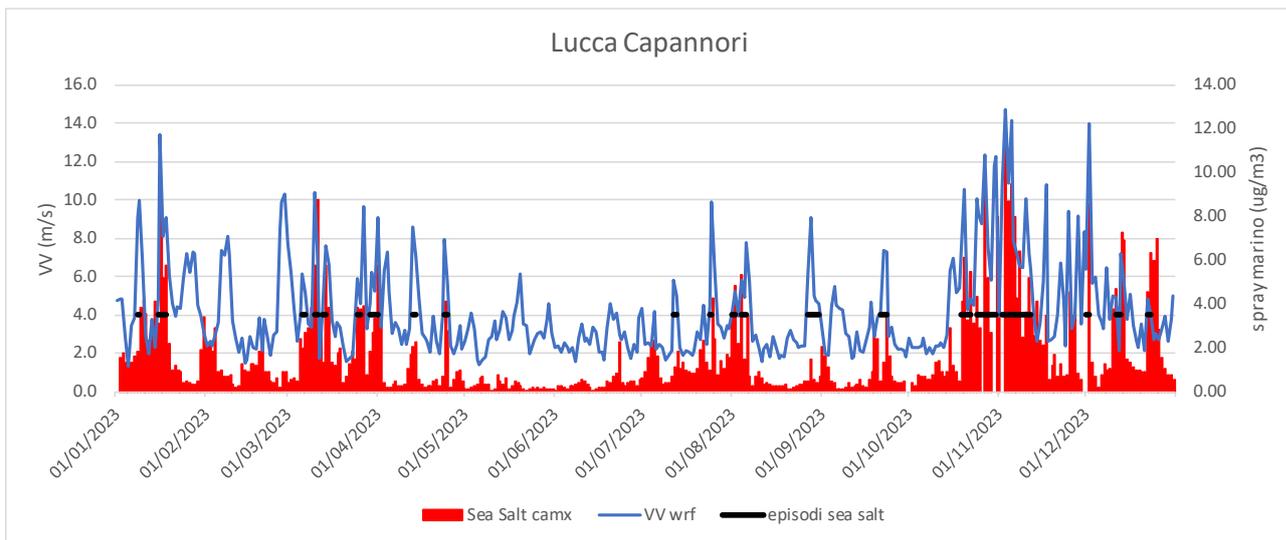
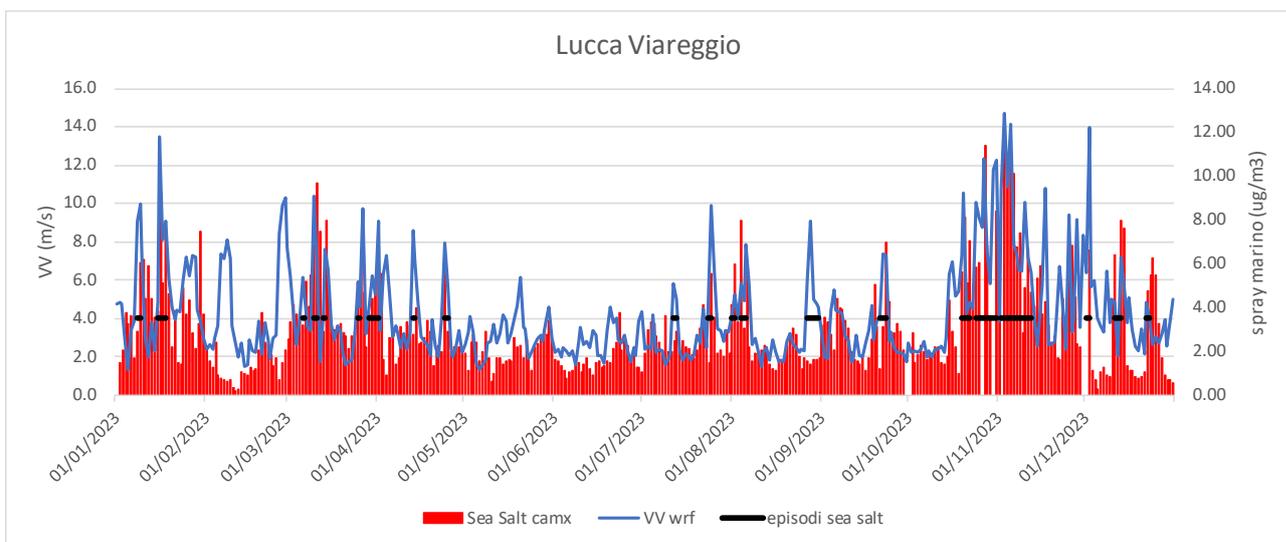
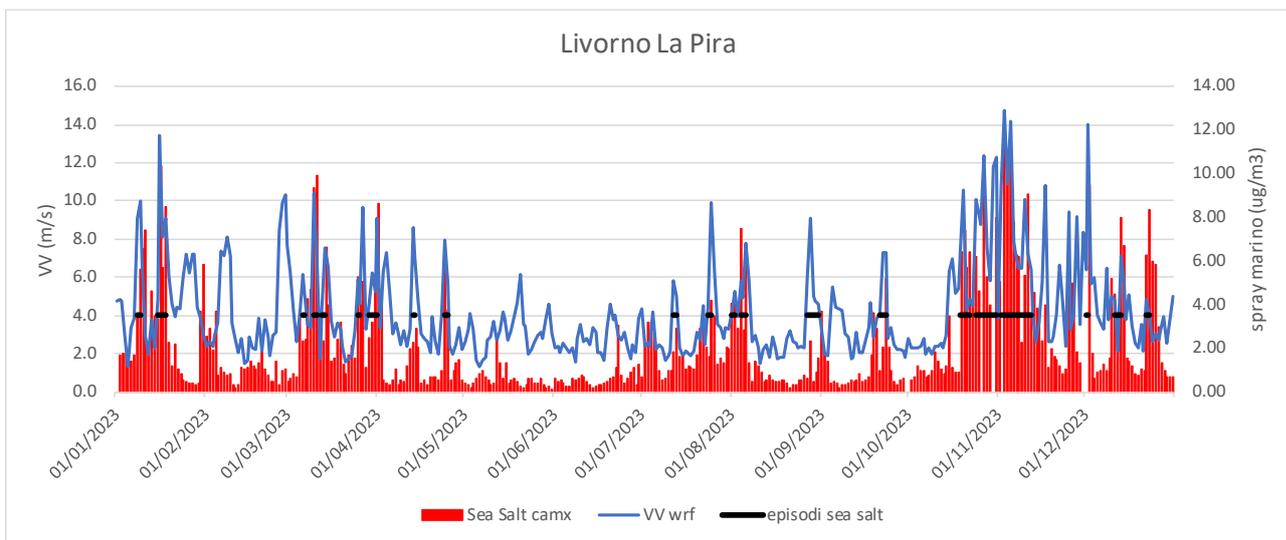


Figura 34. Media giornaliera delle concentrazioni di spray marino stimato da modello (barre rosse) nella stazione LI-La Pira (sopra), LU-Viareggio (centro), LU-Capannori (sotto) e velocità del vento misurato presso la stazione meteo Comma di Livorno (linea blu).

### 3.2 PM2.5

La distribuzione spaziale della concentrazione di particolato atmosferico PM2.5, stimata come media annua per il 2023, raggiunge i valori più elevati, sebbene con valori assoluti piuttosto bassi, nelle zone della piana Lucchese, la valle del Serchio e la piana pratese (Figura 35). Come per il PM10, il PM2.5 raggiunge valori di concentrazione più alti durante il periodo invernale (Figura 36), mentre nei mesi primaverili ed estivi le concentrazioni sono molto basse.

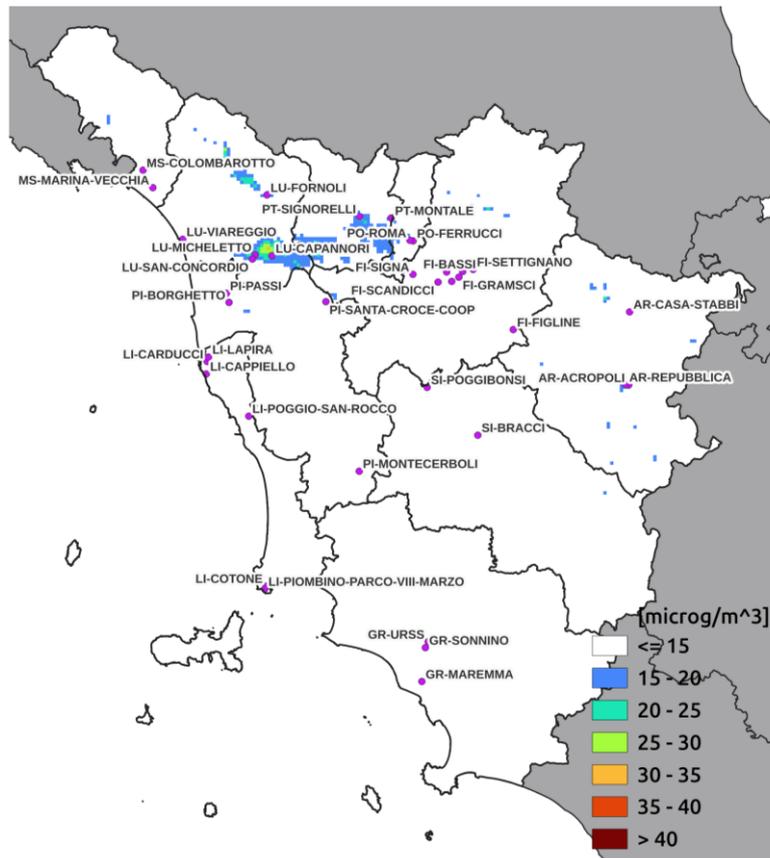


Figura 35. Concentrazione media annuale 2023 delle stime di PM2.5

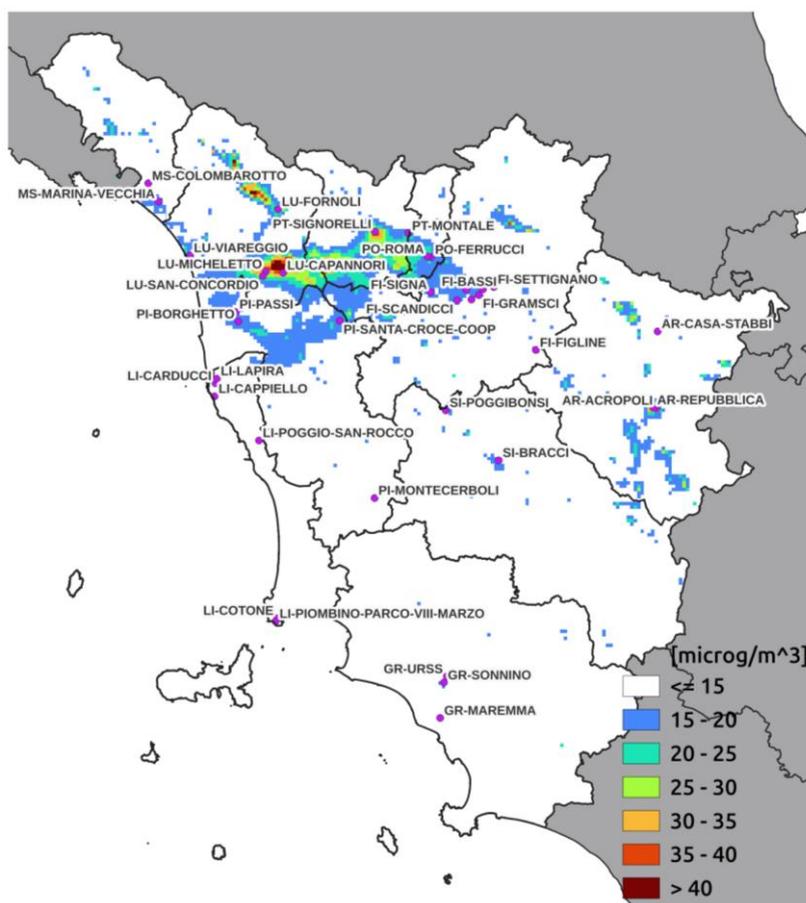


Figura 36. Concentrazione media invernale (gen-mar e ott-dic) 2023 delle stime di PM2.5

Per quanto riguarda il confronto delle stime a livello puntuale rispetto ai valori osservati dalle centraline di monitoraggio, si può osservare che, nelle stazioni di fondo di Figura 37, il modello sottostima nel semestre primaverile/estivo, mentre nel periodo invernale c'è un ottimo accordo tra i valori. In particolare, il modello è in grado di riprodurre con elevata affidabilità i valori di picco osservati durante l'anno.

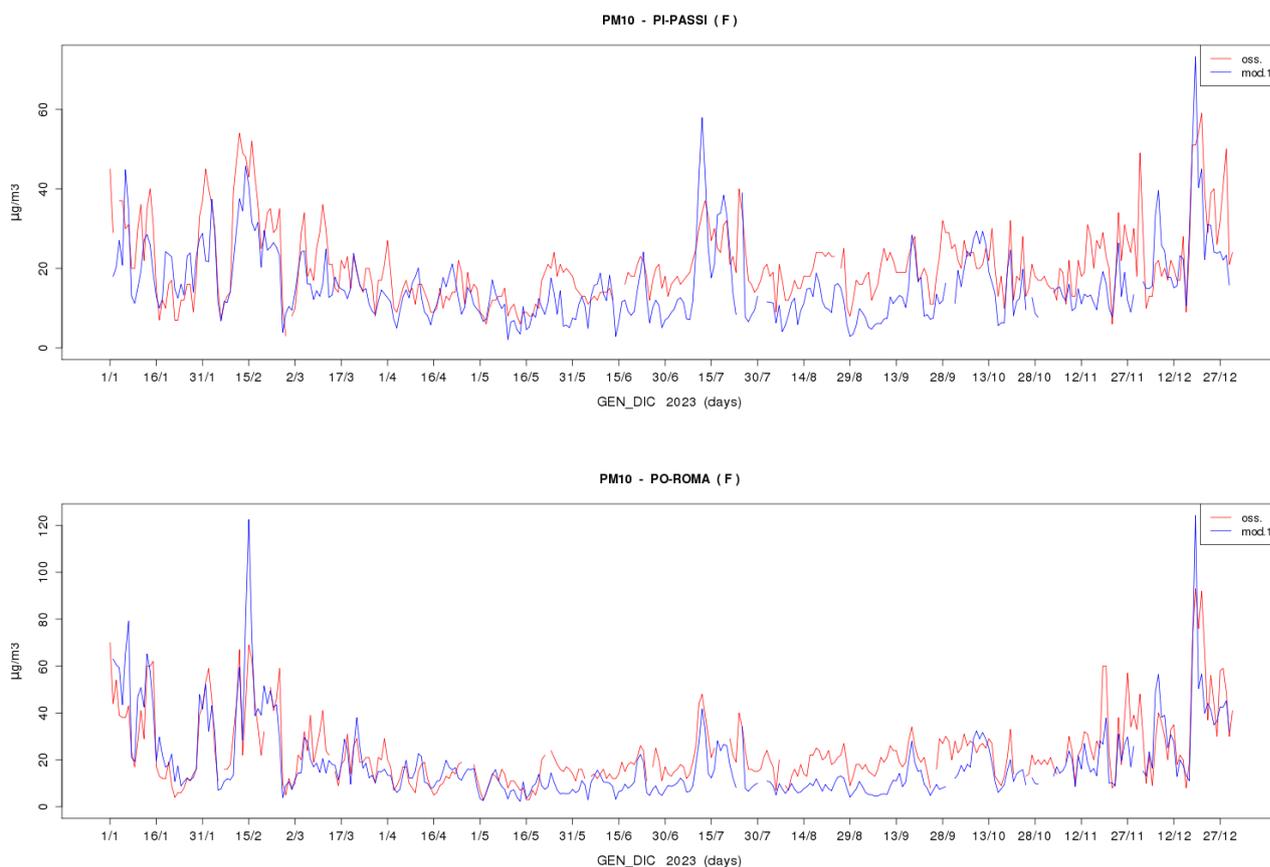


Figura 37. Serie storiche stimate (blu) rispetto alle centraline (rosso), per le stazioni di PI-Passi e PO-Roma.

Dallo scatter-plot relativo al PM2.5 (Figura 38), che mette in relazione i dati medi giornalieri osservati con le stime nei punti corrispondenti alle centraline di monitoraggio, per le serie temporali annuali, si nota che tutte le stazioni cadono all'interno dell'area di confidenza tratteggiata e si dispongono molto vicine alla linea ottimale (bisettrice).

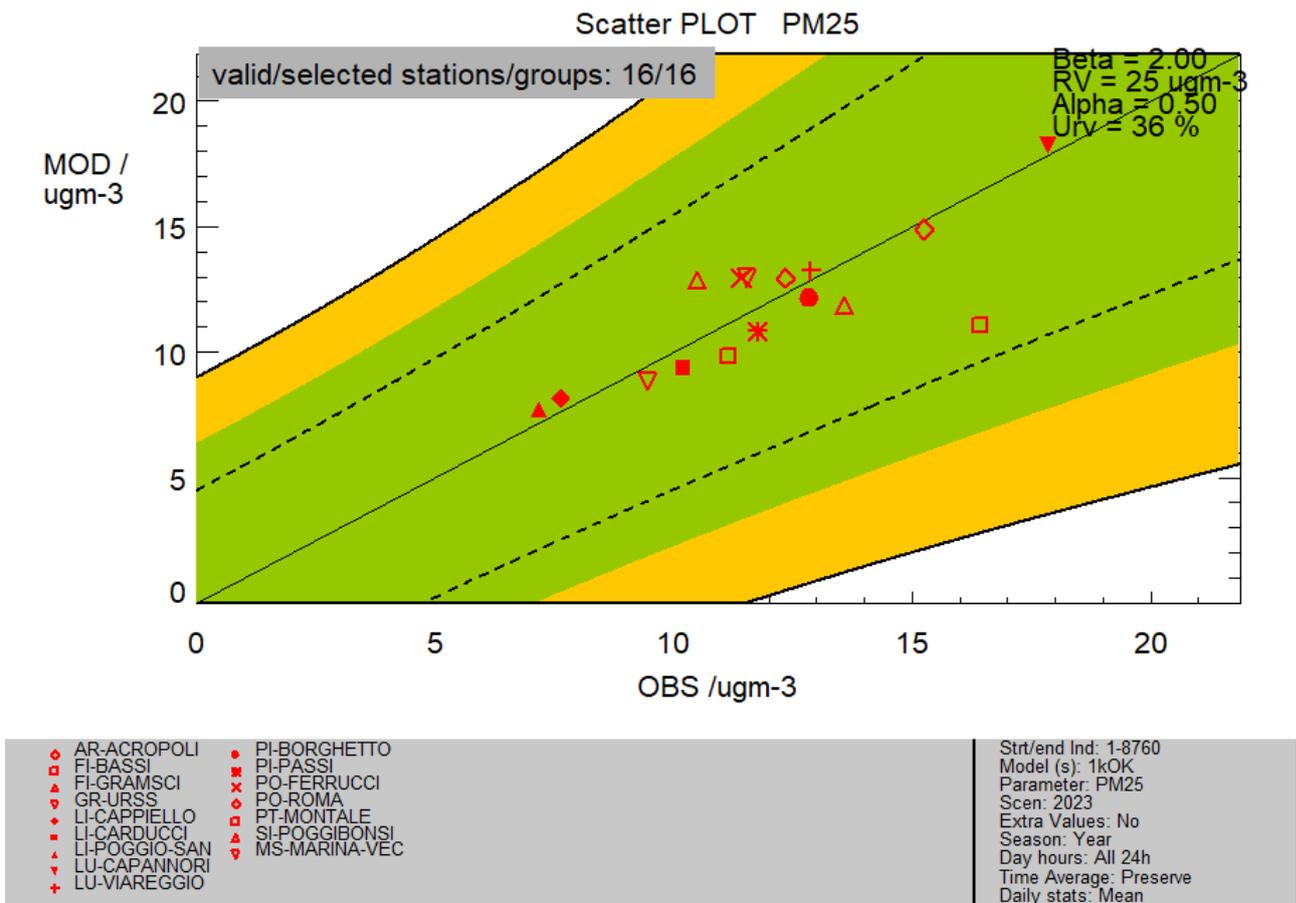


Figura 38. Scatter-plot relativo alle medie giornaliere (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di PM2.5 della rete regionale.

L'obiettivo di qualità per il modello viene pienamente raggiunto per il PM2.5, con un valore di MQI\_HD pari a 0.709 (Figura 39). Per questo inquinante, viene raggiunto anche l'obiettivo basato sui valori medi annuali (MQI\_YR=0.262). Infatti, la nuova configurazione ad 1 km di risoluzione migliora la stima modellistica del PM2.5.

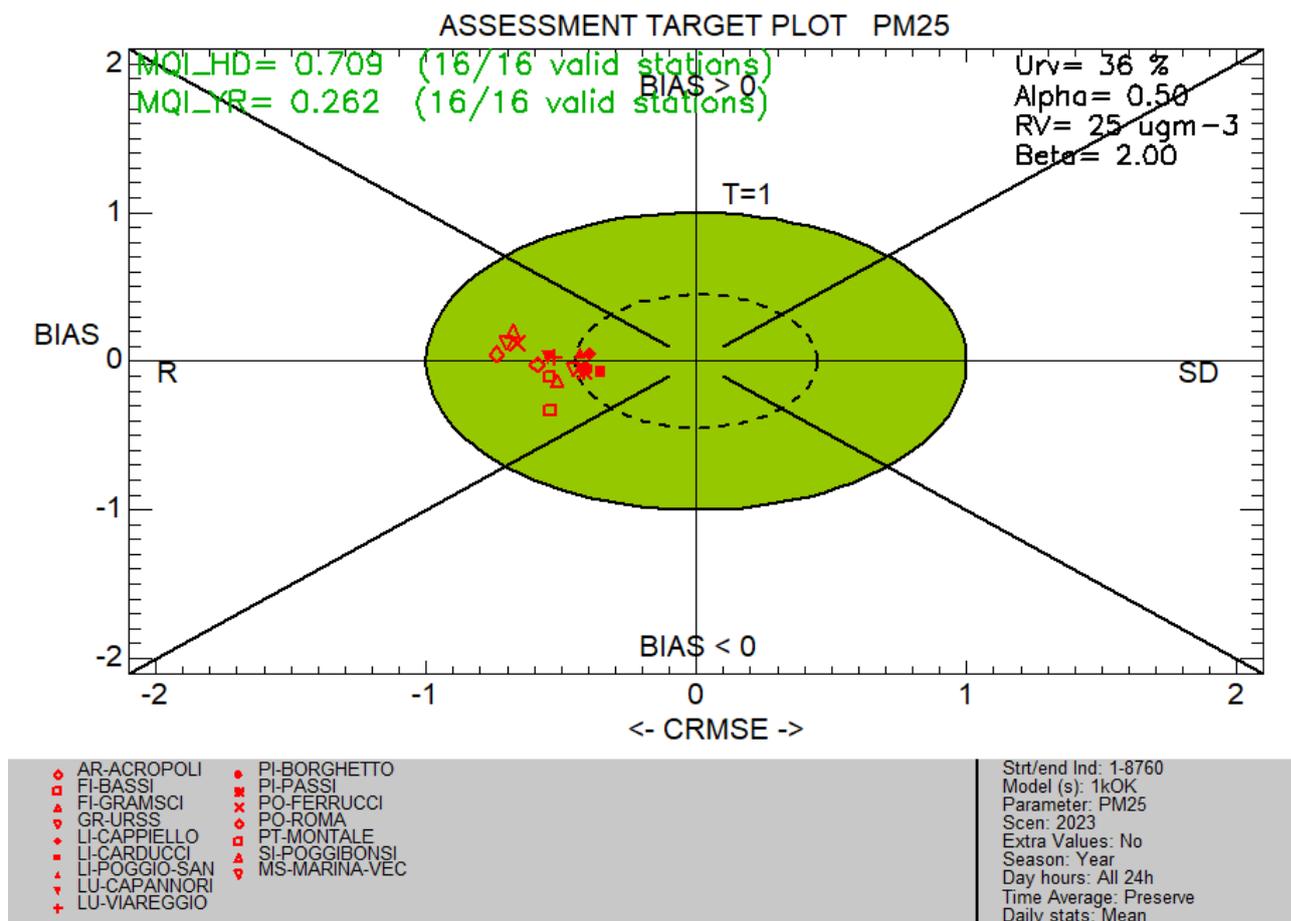


Figura 39. Assessment target plot relativo alle medie giornaliere in corrispondenza delle stazioni di PM2.5 della rete regionale.

### 3.3 NO2

Il biossido di azoto, NO<sub>2</sub>, è un inquinante che viene normalmente generato a seguito di processi di combustione. In particolare, tra le sorgenti emissive, il traffico veicolare è stato individuato come quello che contribuisce maggiormente all'aumento dei livelli di biossido d'azoto nell'aria ambiente. È un inquinante per lo più secondario, che svolge anche un ruolo fondamentale nella formazione dello smog fotochimico, in quanto costituisce l'intermedio di base per la produzione di una serie di inquinanti secondari come l'ozono. Per questo inquinante, per la protezione della salute umana, il decreto legislativo D.Lgs. 155/2010 stabilisce un valore limite orario, pari a 200  $\mu\text{g/m}^3$  di concentrazione, da non superare più di 18 volte in un anno e un valore limite medio annuale pari a 40  $\mu\text{g/m}^3$ .

La valutazione dei livelli di concentrazione simulati al suolo dal modello è affrontata a partire dalla concentrazione media annua (Figura 40) per ogni cella del grigliato di calcolo alla risoluzione atualizzata a 1km<sup>2</sup>. Nei centri urbani più antropizzati, come

quelli della piana Firenze-Prato-Pistoia le concentrazioni annue stimate sono mediamente inferiori ai  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Qui, le sorgenti emissive sono prevalentemente legate al traffico, sia urbano che extraurbano, e al riscaldamento. Valori più elevati si rilevano anche nelle aree relative alla piana lucchese, nell'area del Valdarno pisano e nelle città portuali di Livorno e Piombino.

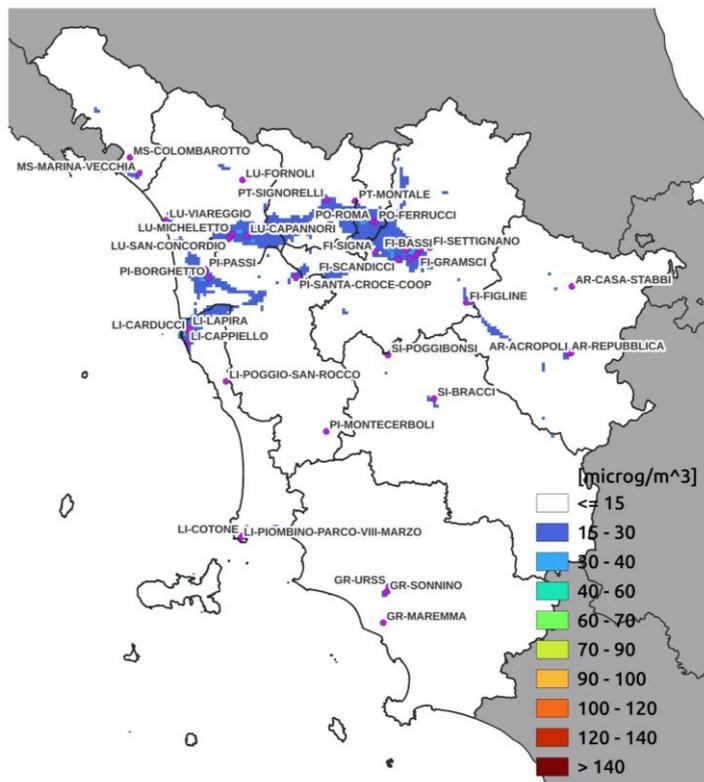
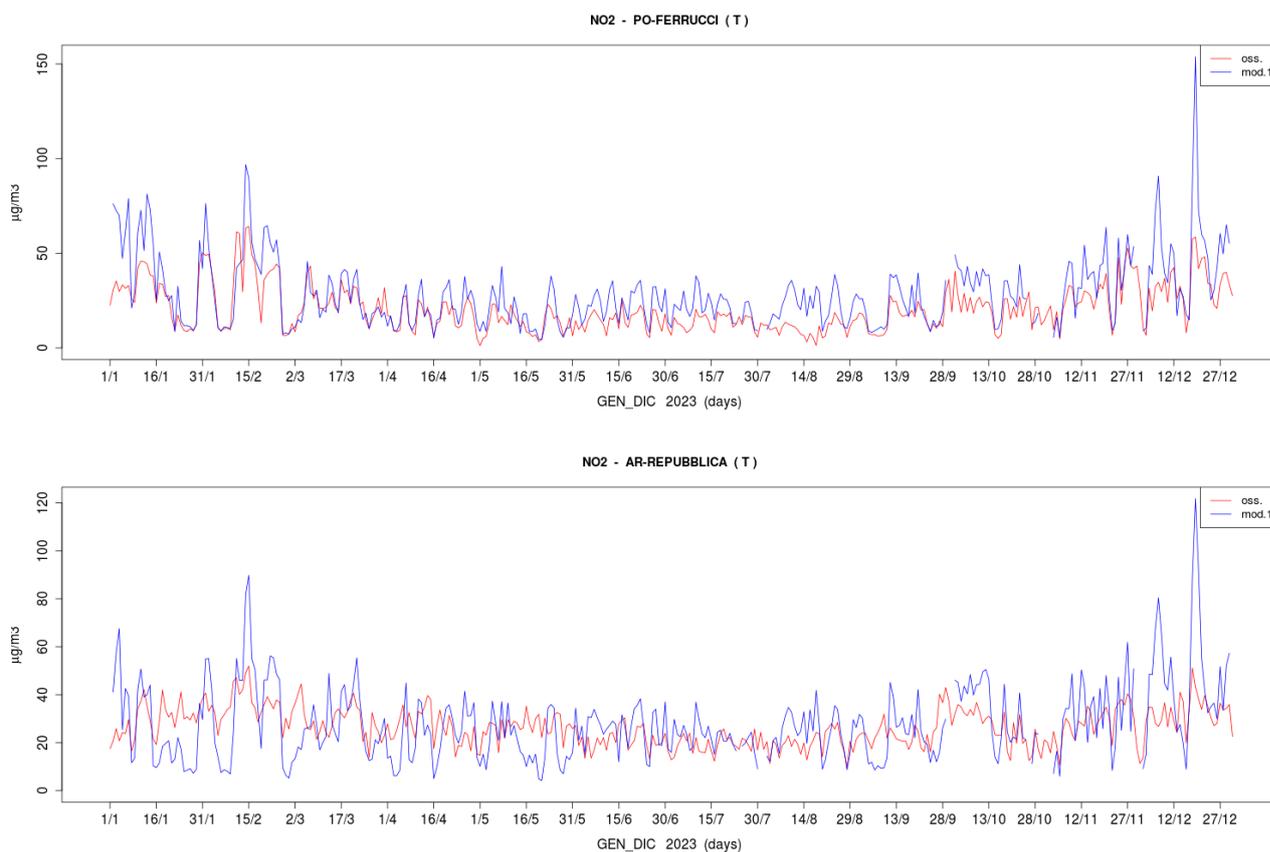


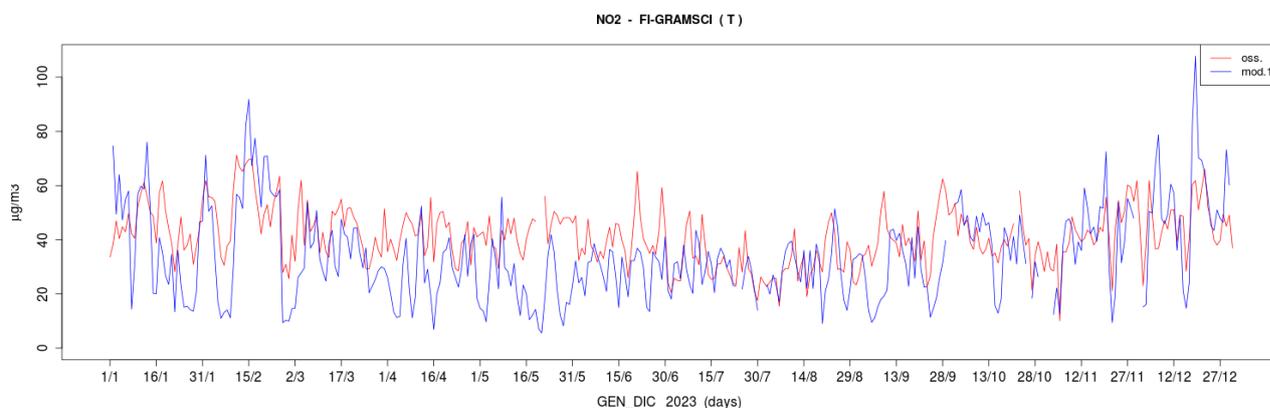
Figura 40. Concentrazione media annuale 2023 delle stime di NO<sub>2</sub>

Un'analisi puntuale e temporale è effettuata attraverso l'analisi delle serie storiche delle medie giornaliere, stimate e misurate, della concentrazione di NO<sub>2</sub>. I risultati ottenuti sono molto diversi a seconda della tipologia della centralina di monitoraggio e del posizionamento all'interno del grigliato di calcolo. A rigore, la validazione del modello dovrebbe essere effettuata con le sole stazioni di fondo, tuttavia si possono fare alcune considerazioni anche in corrispondenza delle stazioni di traffico, pur nella consapevolezza che questa tipologia di modello non fornisce prestazioni ottimali per tali tipi di centraline. In corrispondenza di alcune centraline di traffico si osserva una migliore riproduzione nei mesi più caldi dell'anno e una generalizzata sovrastima del modello nei mesi invernali come si rileva dai grafici riportati a titolo di esempio in (Figura 41).



*Figura 41. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu) relative a PO-Ferrucci e AR-Repubblica.*

Per altre centraline di traffico, la sottostima è evidente e riguarda soprattutto l'estate come si vede dal grafico di Figura 42. Il modello, fornendo una concentrazione media stimata su celle, non riesce a rappresentare le realtà locali che possono influenzare alcune postazioni già di per sé di natura puntuale. I valori stimati sono, infatti, rappresentativi di un'area più o meno ampia in funzione delle caratteristiche del sito di ubicazione e di eventuali sorgenti emissive presenti.



*Figura 42. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu) per FI-Gramsci.*

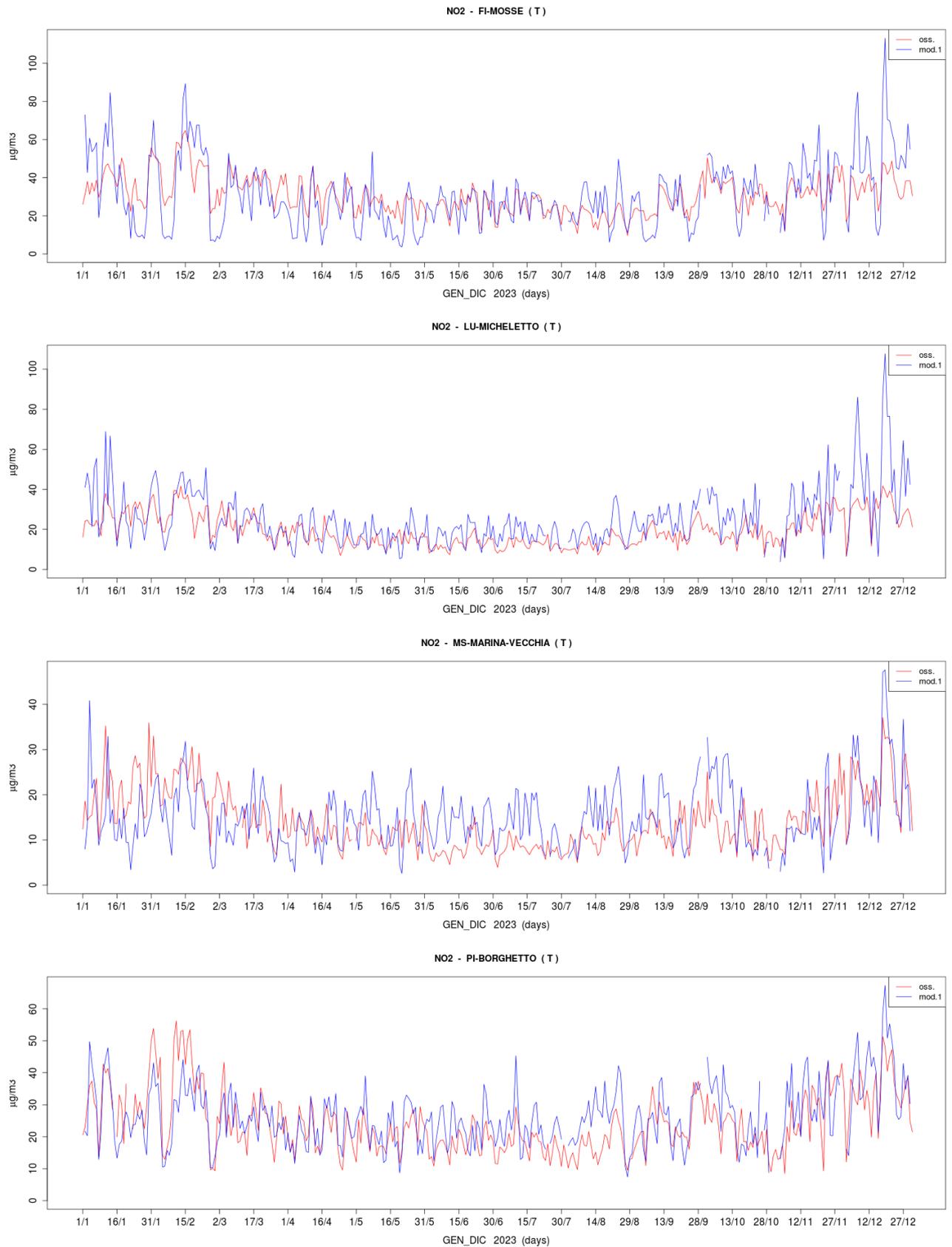


Figura 43. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu)

La collocazione della centralina rispetto al nodo di calcolo del grigliato del modello riveste un ruolo cardine nell'interpretazione e nella differenza stima/misura. Questo spiega il motivo per cui in alcune situazioni, lontane dai centri urbani in cui i flussi di traffico sono meno diversificati e importanti e in assenza di cambi di uso suolo nella stessa maglia, si rileva una migliore riproducibilità del modello. A titolo di completezza si riportano anche gli andamenti in corrispondenza di altre centraline di traffico che rappresentano casi diversi da quelli precedentemente descritti (Figura 43).

Il modello euleriano utilizzato risulta adeguato nello stimare i valori di fondo nelle aree rurali, suburbane ed urbane e per gli impatti dei maggiori impianti industriali come testimoniato dal confronto stima/misura in corrispondenza di FI-Bassi (Figura 44).

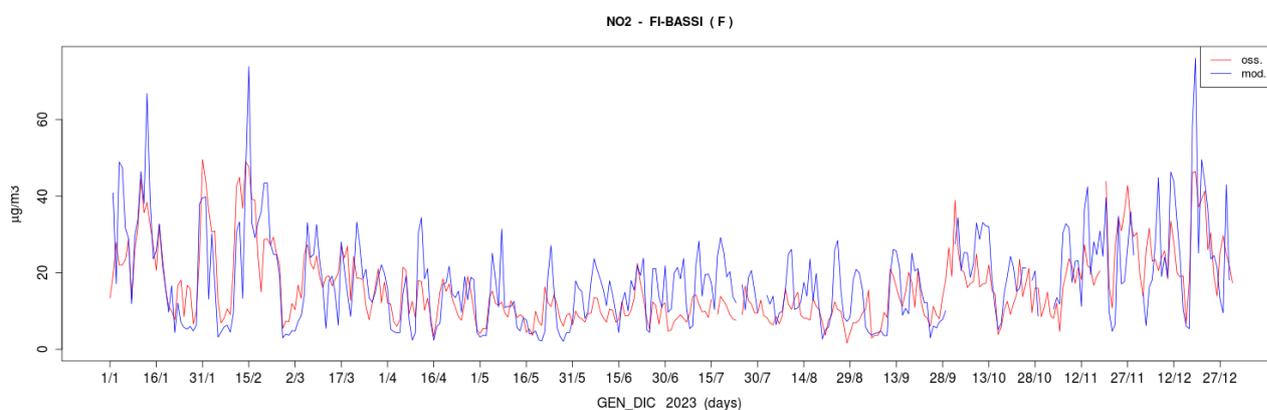


Figura 44. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu), FI-Bassi.

Per la stazione di LU-Viareggio, le simulazioni a 2km effettuate fino ad ora, come spiegato nella relazione relativa all'anno precedente non era rappresentata al meglio, mentre la simulazione di questo anno con la risoluzione aumentata ad 1km dà risultati adeguati. Infatti per Viareggio, la sua vicinanza al mare fa sì che la cella in cui cade tale centralina nel modello a risoluzione 2km contenga anche parti di territorio non rappresentate dalla centralina stessa. Invece, la cella a 1km risulta più adeguata, come mostrato dal raffronto delle due simulazioni (Figura 45), in cui si osserva una più adeguata rappresentazione delle misure da parte del modello.

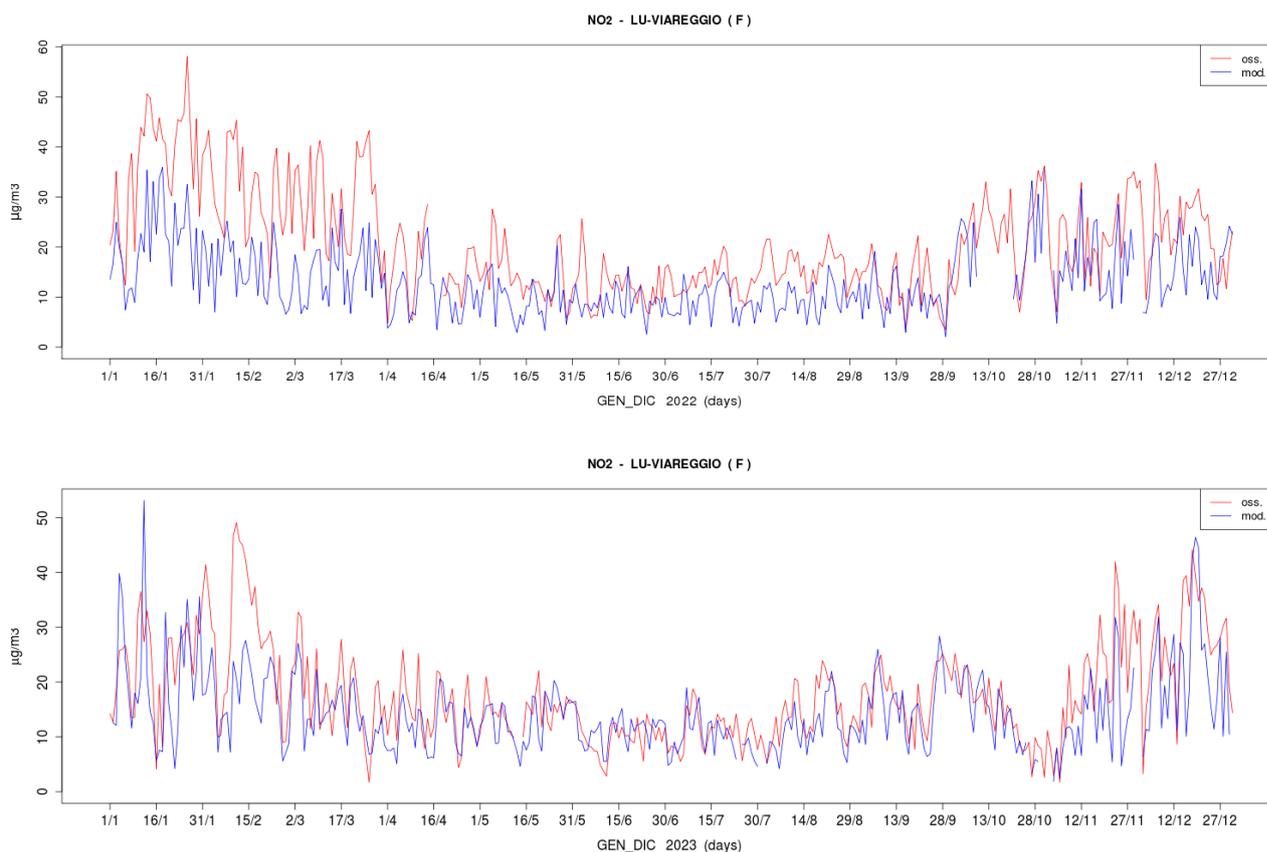
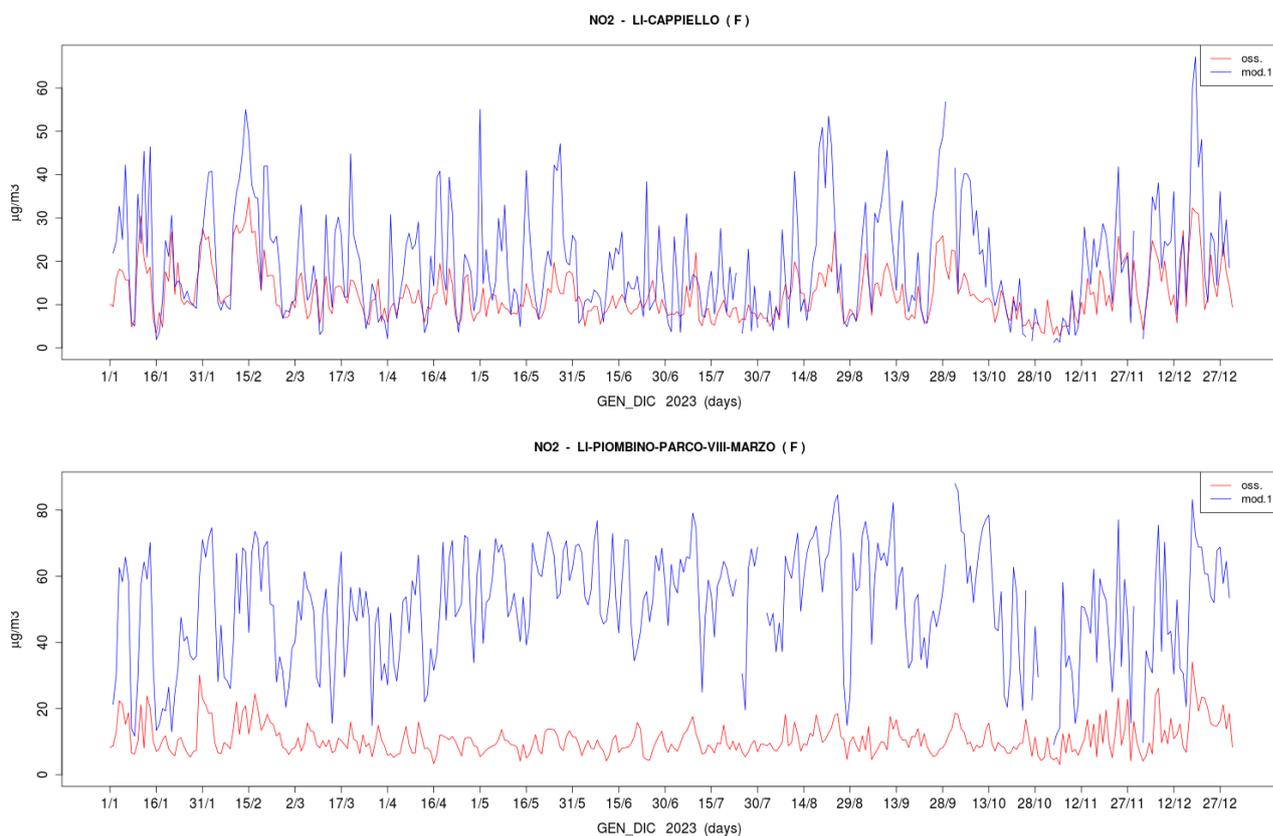


Figura 45. Serie storiche di confronto tra i dati di NO<sub>2</sub> da stazione (rosso) e da modello (blu), LU-Viareggio. In alto relativa al 2022 (ris. orizz. 2km), in basso relativa al 2023 (ris. orizz. 1km).

Un'altra importante criticità si osserva inoltre nelle aree portuali, in cui sono presenti valori di NO<sub>2</sub> molto sovrastimati, anche superiori alle stime derivanti dai precedenti inventari. In questo caso, probabilmente, la vicinanza al mare e la parametrizzazione della fonte emissiva giocano un ruolo sinergico nella non corretta riproduzione del dato (figura 46). In ogni caso, va ricordato che i ratei emissivi ottenuti dall'inventario sono frutto a loro volta di una applicazione modellistica e che la forzante predominante, coincidente con l'anno simulato 2023 e con la stazione di misura, è costituita unicamente dai campi meteorologici, pertanto il contributo quantitativo dell'uscita modellistica non può risentire delle fluttuazioni locali, contingenti e straordinarie come invece avviene per la misura. In particolare, le stime emissive in area portuale, con l'attuale inventario, vengono considerate al livello del suolo, fornendo quindi una sovrastima emissiva. Invece, con il prossimo aggiornamento dell'inventario, le emissioni delle navi saranno considerate come emissioni puntali ad un'altezza adeguata al tipo di cammino della singola nave. Questa modifica renderà la stima emissiva molto più aderente alla realtà e di conseguenza anche le stime modellistiche relative a NO<sub>2</sub> nella zona portuale.



*Figura 46. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu), LI-Cappiello e LI-Piombino VIII marzo*

Dallo scatter-plot di Figura 47 si può vedere che molte si addensano lungo la bisettrice, che rappresenta la situazione ottimale. Le stazioni di LI-Piombino e LI-Cotone cadono al di fuori della zona di confidenza; infatti, come appena spiegato hanno un problema nel dato emissivo.

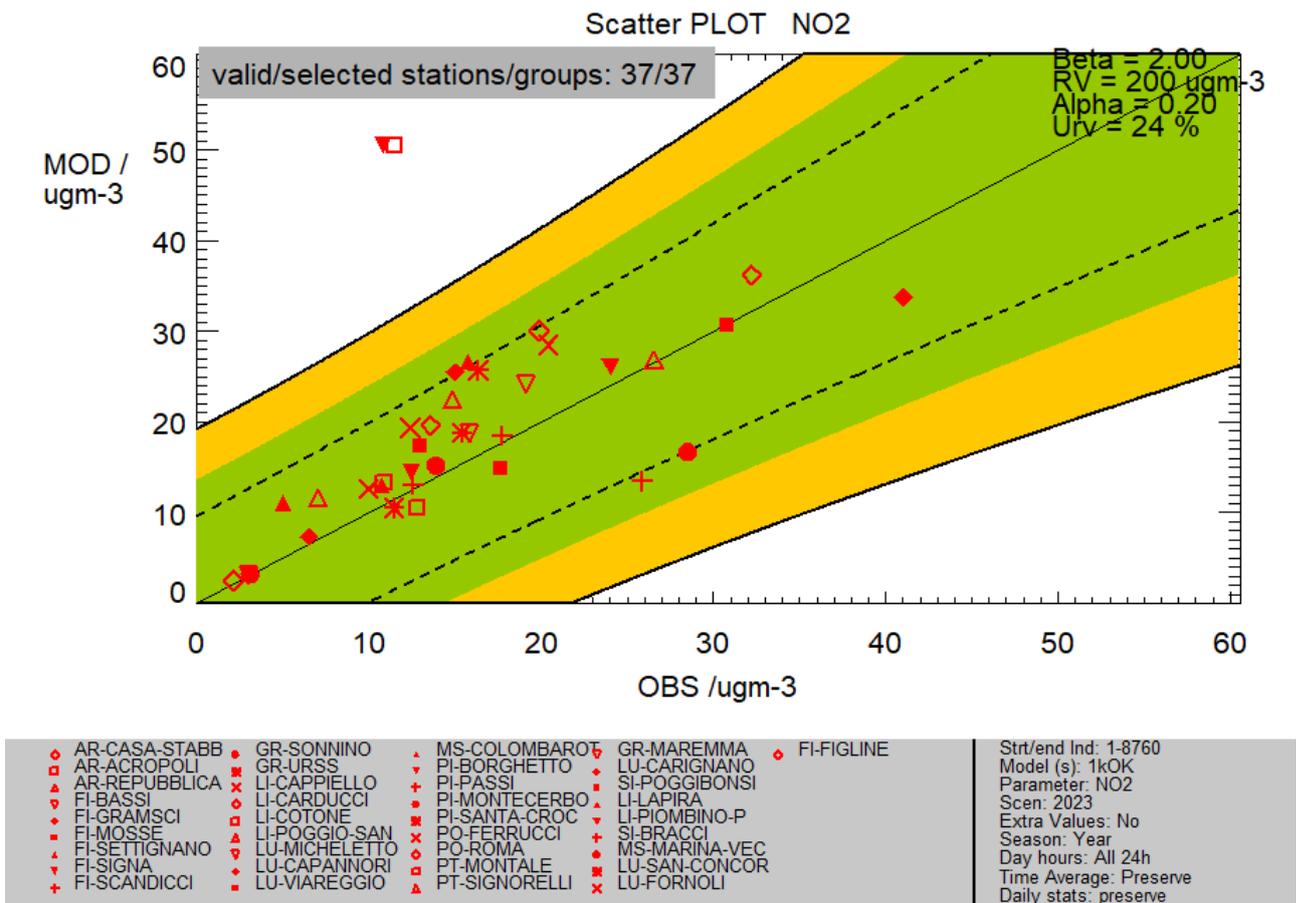


Figura 47. Scatter-plot relativo alle medie orarie (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di NO2 della rete regionale.

L'assessment target plot (Figura 48) rileva una situazione critica legata alle stazioni portuali, fornendo un indice  $MQI_{HD}$  con valore pari a 1.103; tutte le stazioni che ricadono all'esterno dell'area di confidenza sono quelle delle aree portuali. Lo stesso indice calcolato escludendo tali stazioni assumerebbe il valore di 0.945.

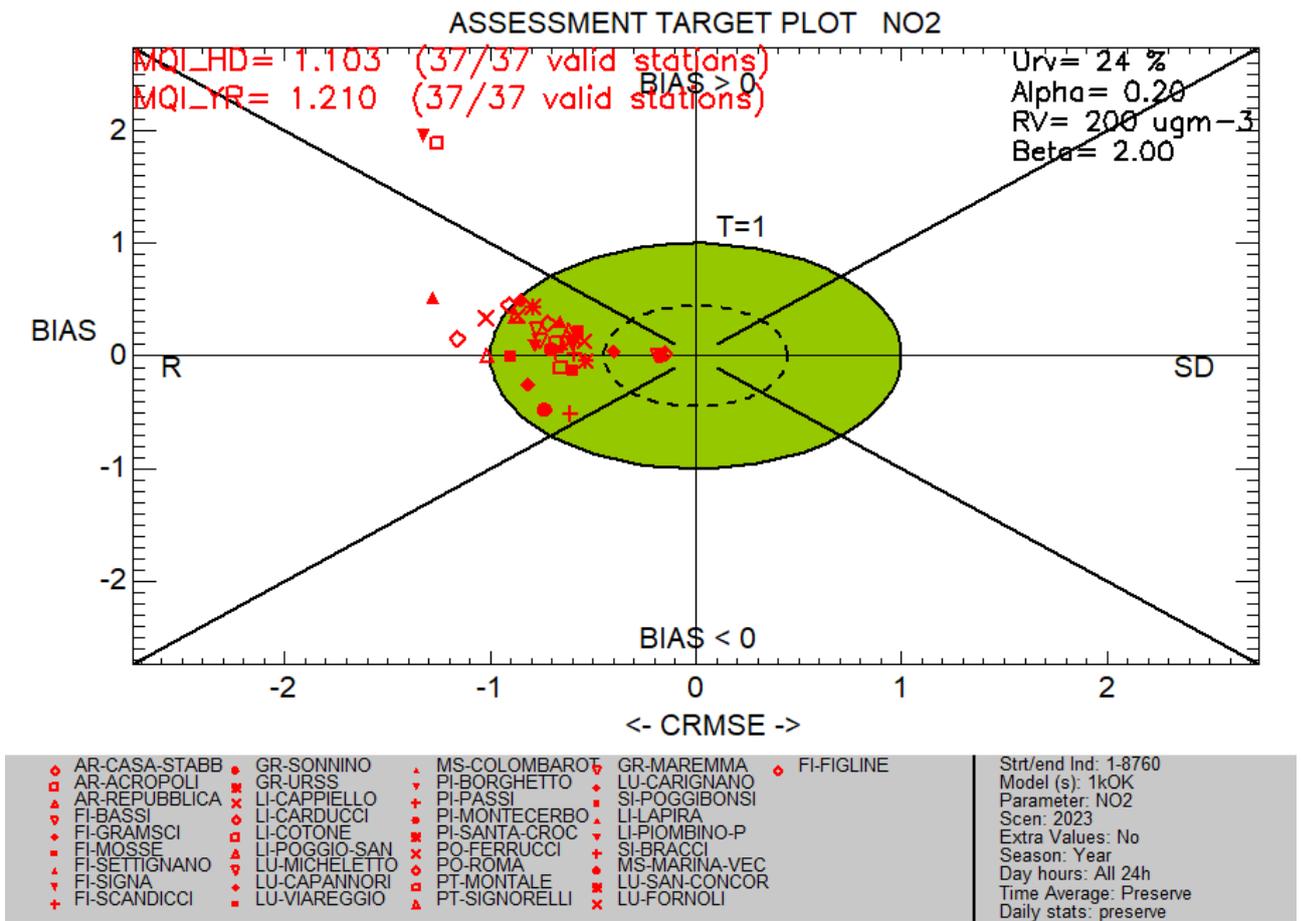


Figura 48. Assessment target plot relativo alle medie orarie in corrispondenza di tutte stazioni di NO2 della rete nazionale.

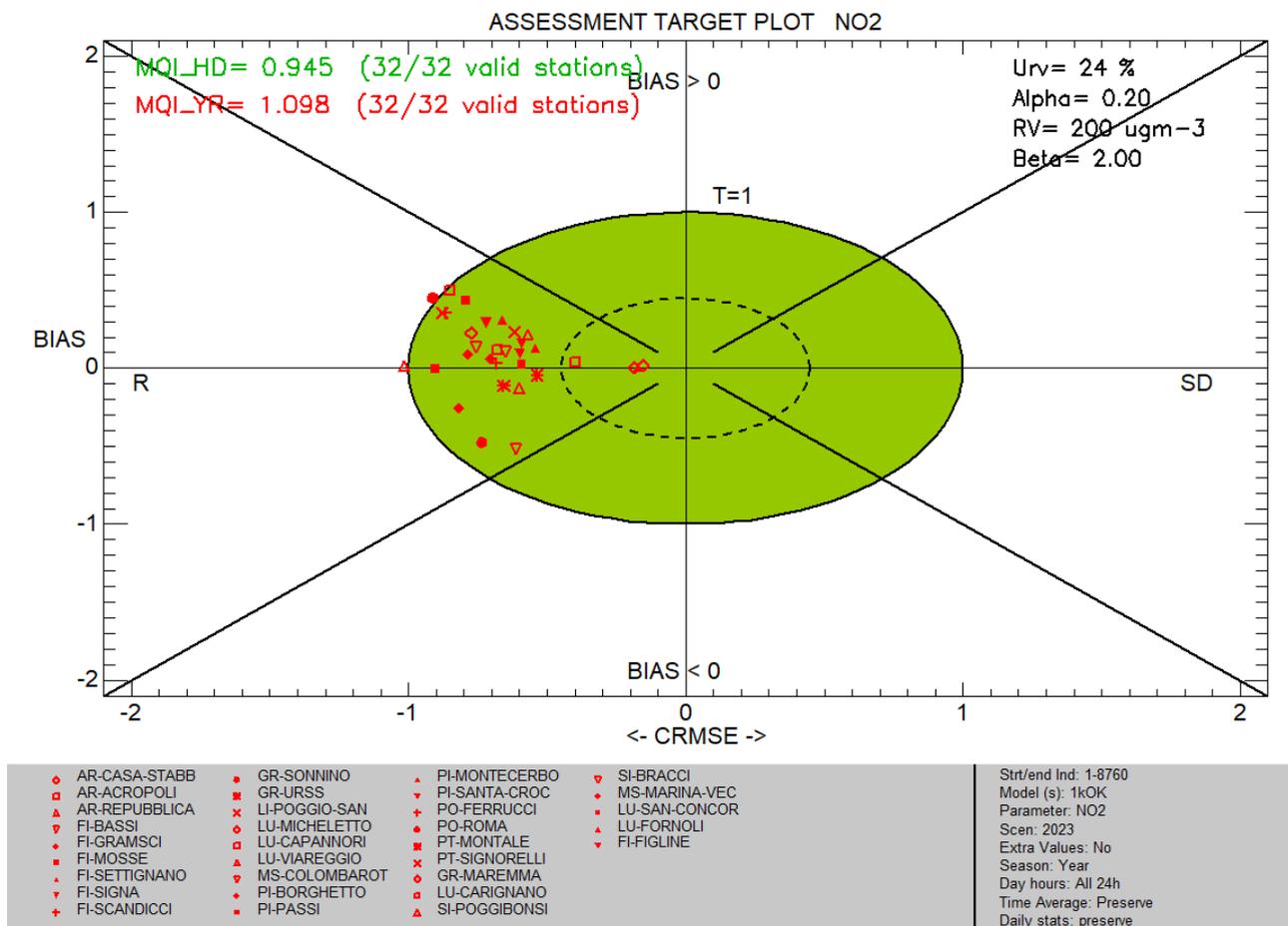


Figura 49. Assessment target plot relativo alle medie orarie in corrispondenza delle stazioni di NO<sub>2</sub> della rete regionale, ad eccezione delle stazioni relative alle zone legate ai porti di Livorno e Piombino.

### 3.4 03

L'ozono troposferico è un inquinante secondario che si forma attraverso processi fotochimici in presenza di inquinanti primari quali gli ossidi d'azoto (NOx) e i composti organici volatili (COV). L'inquinamento fotochimico, oltre che locale, è un fenomeno transfrontaliero che si dispiega su ampie scale spaziali; conseguentemente i livelli riscontrati in una certa zona non sempre sono esclusivamente attribuibili a fonti di emissione poste in prossimità della zona stessa, ma il contributo più importante può provenire dalle zone circostanti, per cui nelle simulazioni assume particolare importanza l'inizializzazione con i campi di concentrazione ai bordi del dominio. Le concentrazioni di ozono più elevate si registrano nei mesi più caldi dell'anno e nelle ore di massimo irraggiamento solare. Nelle aree urbane l'ozono si forma e si trasforma con grande rapidità e con un comportamento molto complesso e diverso da quello osservato per gli altri inquinanti.

È stata calcolata la media annuale dell'O<sub>3</sub> (figura 50), per avere una caratterizzazione territoriale della sua distribuzione. Tutta la regione presenta valori di inferiori a 100 µg/m<sup>3</sup>.

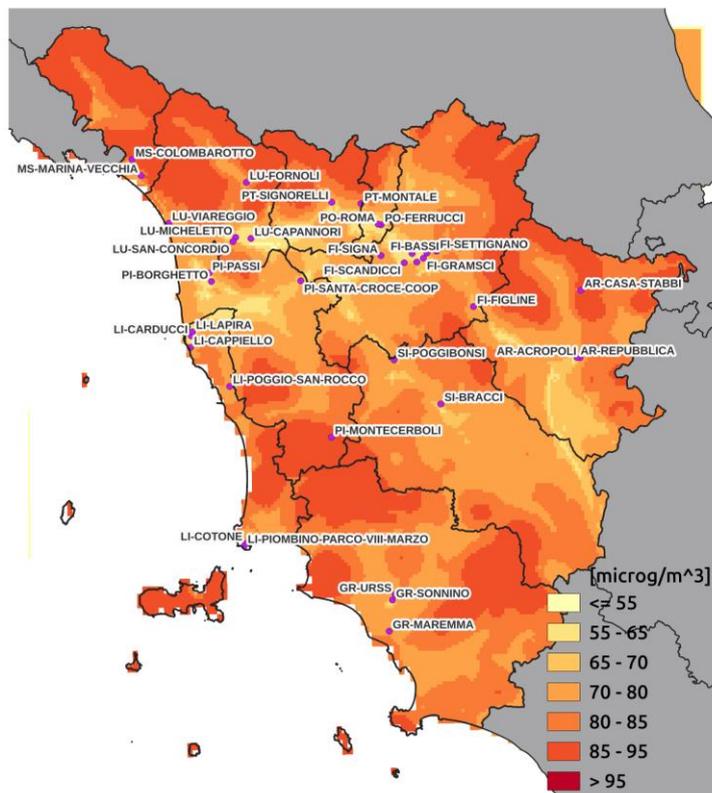


Figura 50. Concentrazione di O<sub>3</sub>, come media annuale relativa al 2023.

Come obiettivo a lungo termine per la salute umana la normativa prevede che non venga superato il valore di 120 µg/m<sup>3</sup> come massimo giornaliero della media mobile a

otto ore per più di 25 volte in un anno. In figura 51 è stata riportata la mappa con il numero di tali superamenti.

O3 - Num. superamenti orari a 120 [ug/m3] 2023

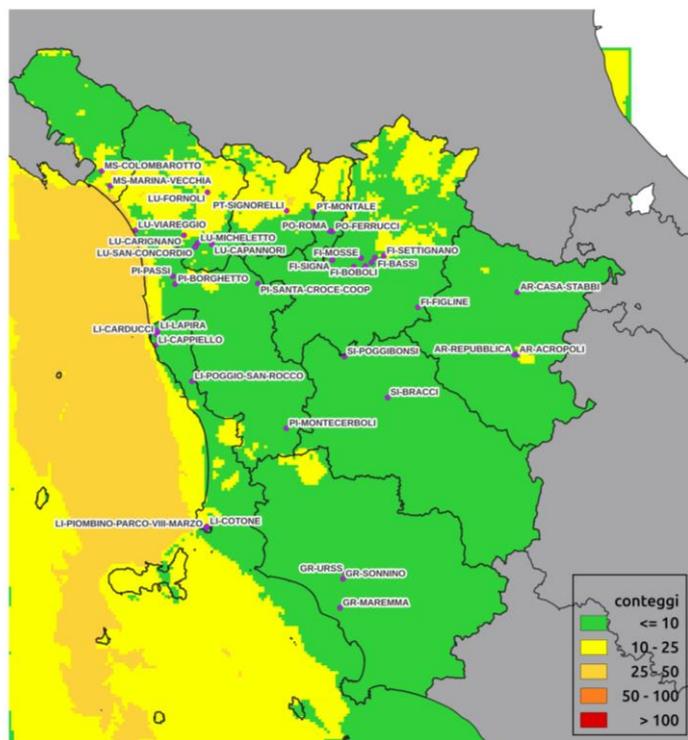


Figura 51. Superamenti del massimo giornaliero della media mobile a otto ore della soglia pari a  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana

Poiché l'O3 è un inquinante fotochimico e transfrontaliero, un margine di confini con una risoluzione più elevata come quella dei modelli regionali CAMS - Copernicus miglioramento si potrà presumibilmente ottenere utilizzando un'inizializzazione ai a 10 km.

Per quanto riguarda la valutazione della performance modellistica attraverso gli indici del Delta-tool si nota che tutti i punti relativi al massimo della media mobile 8 h, cadono all'interno dell'area verde di confidenza, con le con una leggera sovrastima per la maggior parte delle stazioni.

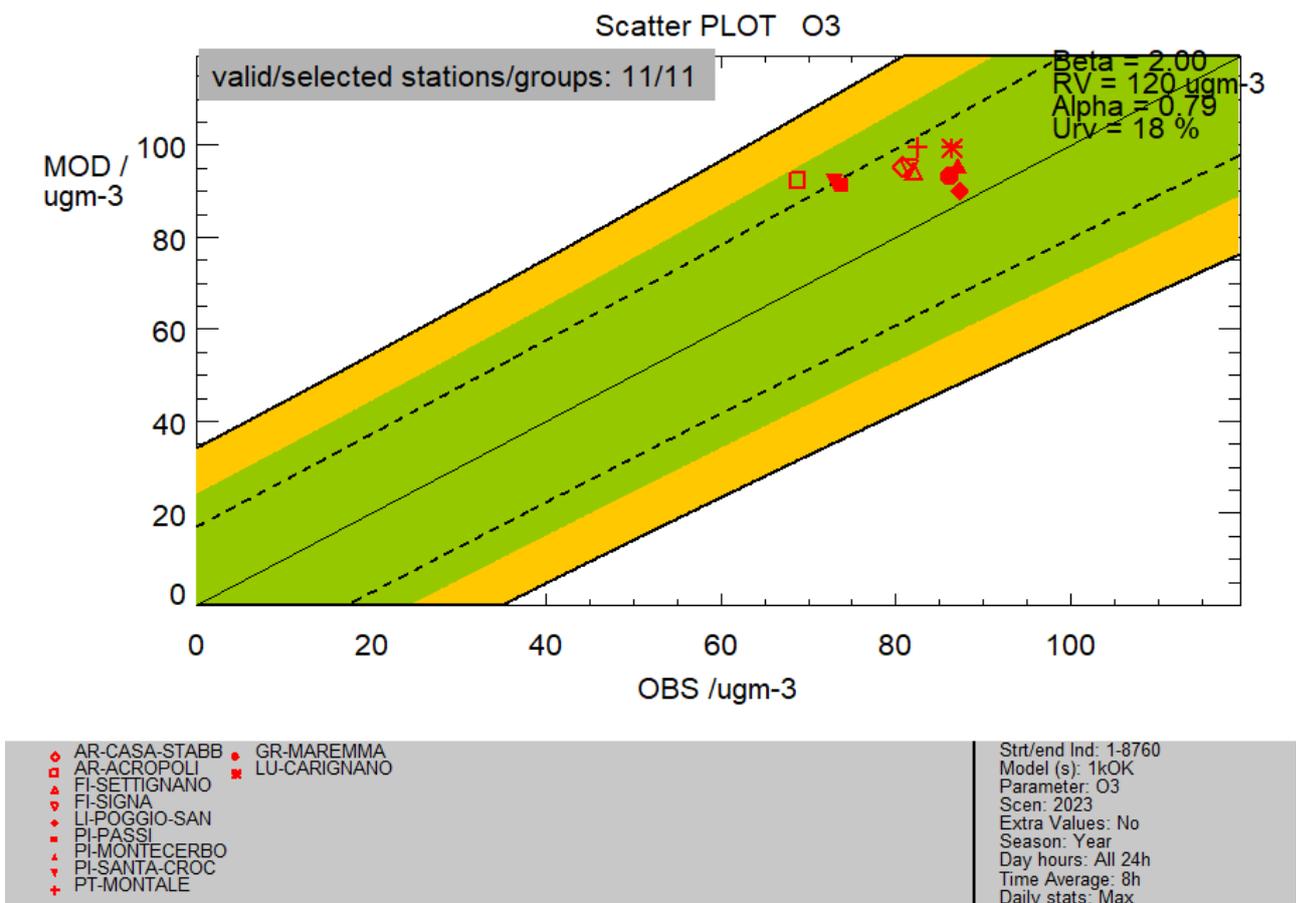


Figura 52. Scatter-plot relativo al massimo delle medie giornaliere a 8h (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di O3 della rete regionale.

L'obiettivo di qualità per il modello è pienamente raggiunto (Figura 53) per il massimo della media mobile a 8h, con un indice  $MQI_{HD}$  pari a 0.765, che indica un ottimo allineamento tra le incertezze del modello con quelle delle misure.

Anche l'indice annuale  $MQI_{YR}$  viene soddisfatto, con un valore pari a 0.924.

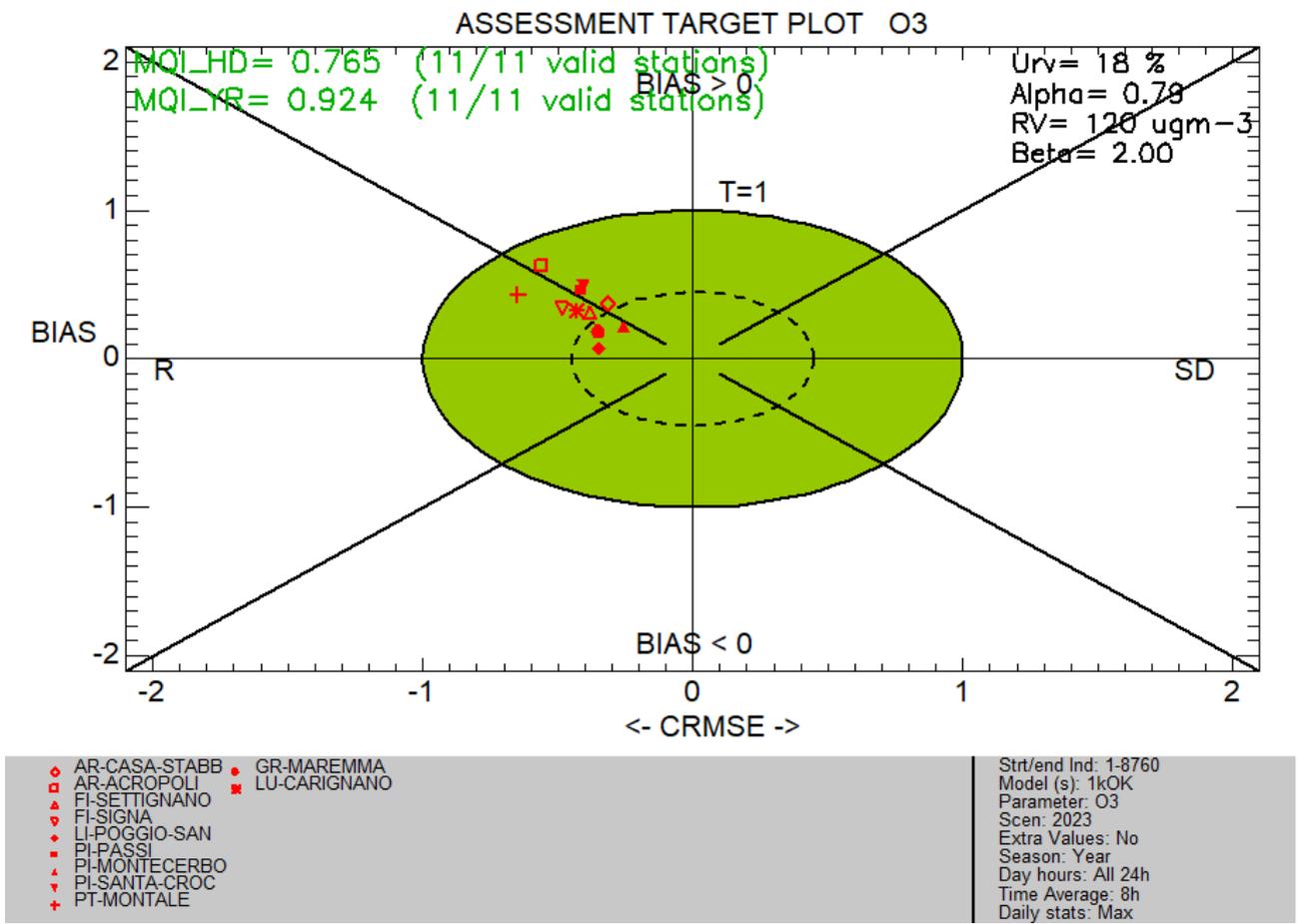


Figura 53. Assessment target plot relativo al massimo delle medie giornaliere a 8h in corrispondenza delle stazioni di O3 della rete regionale.

## Conclusioni

Per l'anno 2023, la stima dei principali inquinanti atmosferici attraverso l'approccio modellistico risulta adeguata agli standard richiesti, la cui valutazione è stata effettuata anche attraverso l'utilizzo del software DELTA Assessment & Planning Tool. Si possono evidenziare alcune criticità legate all'inizializzazione e un conseguente BIAS per i principali inquinanti. In particolare, per il PM10 il confronto tra le serie storiche stimate e misurate, nei punti relativi alle centraline, evidenzia una buona performance nella riproduzione del dato misurato, sia in termini di andamento temporale che in termini quantitativi. Nelle stazioni di fondo della piana FI-PO-PT, si ha una risposta pertinente del sistema modellistico per il periodo invernale, sebbene si evidenzia una generale sottostima modellistica. Durante il periodo estivo la sottostima è più marcata, ma in questo periodo i valori registrati per il PM10 sono quantitativamente più bassi. La media giornaliera di PM10 è sempre sottostimata dal modello.

Per il PM2.5 l'obiettivo di qualità per il modello viene pienamente raggiunto.

L'analisi puntuale e temporale della concentrazione di NO2 ha mostrato risultati molto diversi a seconda della tipologia della centralina di monitoraggio e del posizionamento geografico della stessa. Infatti, mentre per alcune stazioni si ha una buona rappresentazione dalla modellistica ad 1 km, per altre si conferma una difficoltà di riproduzione del dato osservato, soprattutto quelle in prossimità dei porti di Livorno e Piombino, come abbiamo spiegato a pag. 50.

Le serie storiche delle medie giornaliere delle concentrazioni di O3 hanno evidenziato che il modello riproduce correttamente i valori, soprattutto durante il periodo estivo. L'obiettivo di qualità modellistica è pienamente raggiunto con un indice *MQI\_HD* pari a 0.765, che indica un ottimo allineamento tra le incertezze del modello con quelle delle misure.

In sintesi, il sistema modellistico numerico si è rivelato uno strumento capace di fornire, con un buon grado di affidabilità, le concentrazioni degli inquinanti normati. Il sistema modellistico SPARTA è in continuo e ricorrente aggiornamento, in modo da fornire delle stime degli inquinanti sempre più aderenti ai dati ottenuti dai monitoraggi.

In questa ottica, il prossimo aggiornamento previsto, è quello di sostituire le condizioni al contorno attualmente utilizzate (CHIMERE a 25km), con le stime modellistiche provenienti dall'ensemble CAMS, alla risoluzione di circa 10km. Questo ensemble modellistico, che verrà utilizzato per l'inizializzazione della corsa modellistica del CAMx, è basato su un campione di membri di modelli individuali. I prodotti ensemble, infatti, generalmente offrono prestazioni migliori rispetto ai prodotti dei

singoli modelli e la dispersione tra i diversi membri può essere utilizzata per fornire informazioni sull'incertezza dei prodotti ensemble utilizzati.

Un successivo miglioramento che sarà implementato all'interno del sistema modellistico, riguarda la valutazione degli incendi all'inventario delle emissioni. Infatti, sarebbe utile usare il dato emissivo da incendi provenienti dall'inventario europeo, che stima gli incendi effettivamente avvenuti nell'arco dell'anno e non quelli avvenuti nell'anno dell'inventario. Inoltre nel prossimo aggiornamento dell'inventario emissivo sarà utilizzata una migliore stima delle emissioni da navi in modo da rendere la simulazione di NO<sub>2</sub> nei pressi delle aree portuali più aderente al dato misurato.

## Bibliografia

1. JANSSEN, STIJN, ET AL. (2020) "FAIRMODE GUIDANCE DOCUMENT ON MODELLING QUALITY OBJECTIVES AND BENCHMARKING." EUROPEAN UNION: LUXEMBOURG.
2. Thunis P, Georgieva E, Pederzoli A (2012a) "A tool to evaluate air quality model performances in regulatory applications." Environ Model Softw 38:220–230
3. DECRETO LEGISLATIVO 13 AGOSTO 2010, N° 155 "ATTUAZIONE DELLA DIRETTIVA 2008/50/CE RELATIVA ALLA QUALITÀ DELL'ARIA AMBIENTE E PER UN'ARIA PIÙ PULITA IN EUROPA", GAZZETTA UFFICIALE SERIE GENERALE N° 216 DEL 15 SETTEMBRE 2010, SUPPL. ORDINARIO N° 217.
4. "Progetto PATOS3", Calastrini, F., Busillo, C., Guarnieri, F. Prot. 00000207 del 16-03-2021, Consorzio Lamma - Relazione finale del Progetto Regionale PATOS3 - <https://www.regione.toscana.it/-/progetto-patos-particolato-atmosferico-in-toscana>
5. "Multiannual assessment of the desert dust impact on air quality in Italy combining PM10 data with physics-based and geostatistical models", Barnaba, F. et al., Environment International, Volume 163, 2022, 107204, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107204>.
6. <https://www.arp.at.toscana.it/temi-ambientali/aria/qualita-aria/>
7. <https://www.arp.at.toscana.it/temi-ambientali/aria/monitoraggio/report>
8. Forum for Air quality Modeling (FAIRMODE): <https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>
9. "Sistema modellistico SPARTA. Simulazione dell'anno 2021", Calastrini, F., Busillo, C., Guarnieri, F., Betti G., Prot. 00000751 del 02-08-2022, Consorzio Lamma - Attività ordinaria, PdA 2022 del Consorzio Lamma.
10. "Sistema modellistico SPARTA. Simulazione dell'anno 2020", Calastrini, F., Busillo, C., Guarnieri, F., Betti G., Prot. 00000372 del 10-05-2021, Consorzio Lamma - Attività ordinaria, PdA 2021 del Consorzio Lamma.
11. "Mediterranean dust outbreaks: dynamic meteorological patterns and weather types", A. Orlandi, F. Calastrini, F. Guarnieri, C. Busillo, G. Messeri – METMED, 9th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean, Genoa (Italy) 22-24 May 2023, Book of Abstracts, pag. 105, <https://www.metmed.eu/86600/section/43811/9th-international-conference-on-meteorology-and-climatology-of-the-mediterranean.html>