

SISTEMA MODELLISTICO SPARTA

SIMULAZIONE DELL'ANNO 2022

SETTEMBRE 2022

*Relazione finale:
Sistema modellistico SPARTA - simulazione dell'anno 2022*

Autori:

*Caterina Busillo
Francesca Calastrini
Francesca Guarnieri*

*Per la sintesi climatica:
Giulio Betti*

Indice

Introduzione	4
1. Il sistema modellistico e dati utilizzati	5
2. Sintesi delle condizioni climatiche	8
3. Risultati	22
3.1 PM10	26
3.1.1 Il contributo naturale al PM10	32
<i>Polvere desertica</i>	32
<i>Spray marino</i>	35
3.2 PM2.5	40
3.3 NO2	45
3.4 O3	55
Conclusioni	61
Bibliografia	62

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 2022.

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 2022, 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 Fig.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 (NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂) e per le analisi anche polvere desertica e spray marino.

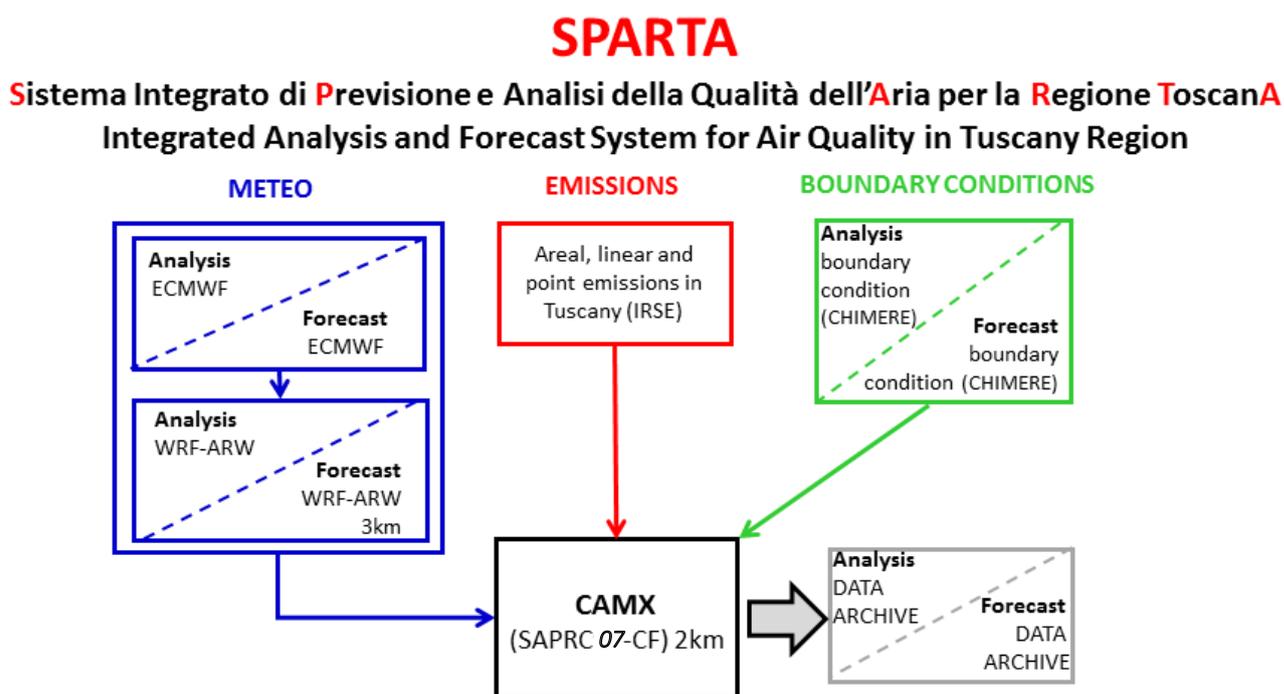


Figura 1. Schema a blocchi del sistema integrato SPARTA

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, a partire dai dati dell'inventario regionale IRSE 2017, 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 2km e con livelli verticali che variano da 10 a 10500 m.

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 2022 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 NO₂ (26 di fondo, 10 di traffico, 1 industriale), 34 stazioni misurano PM₁₀ (23 di fondo, 10 di traffico, 1 industriale), 16 stazioni misurano PM_{2.5} (11 di fondo, 5 di traffico), 11 stazioni misurano O₃ (tutte di fondo) e 3 stazioni misurano SO₂ (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>).

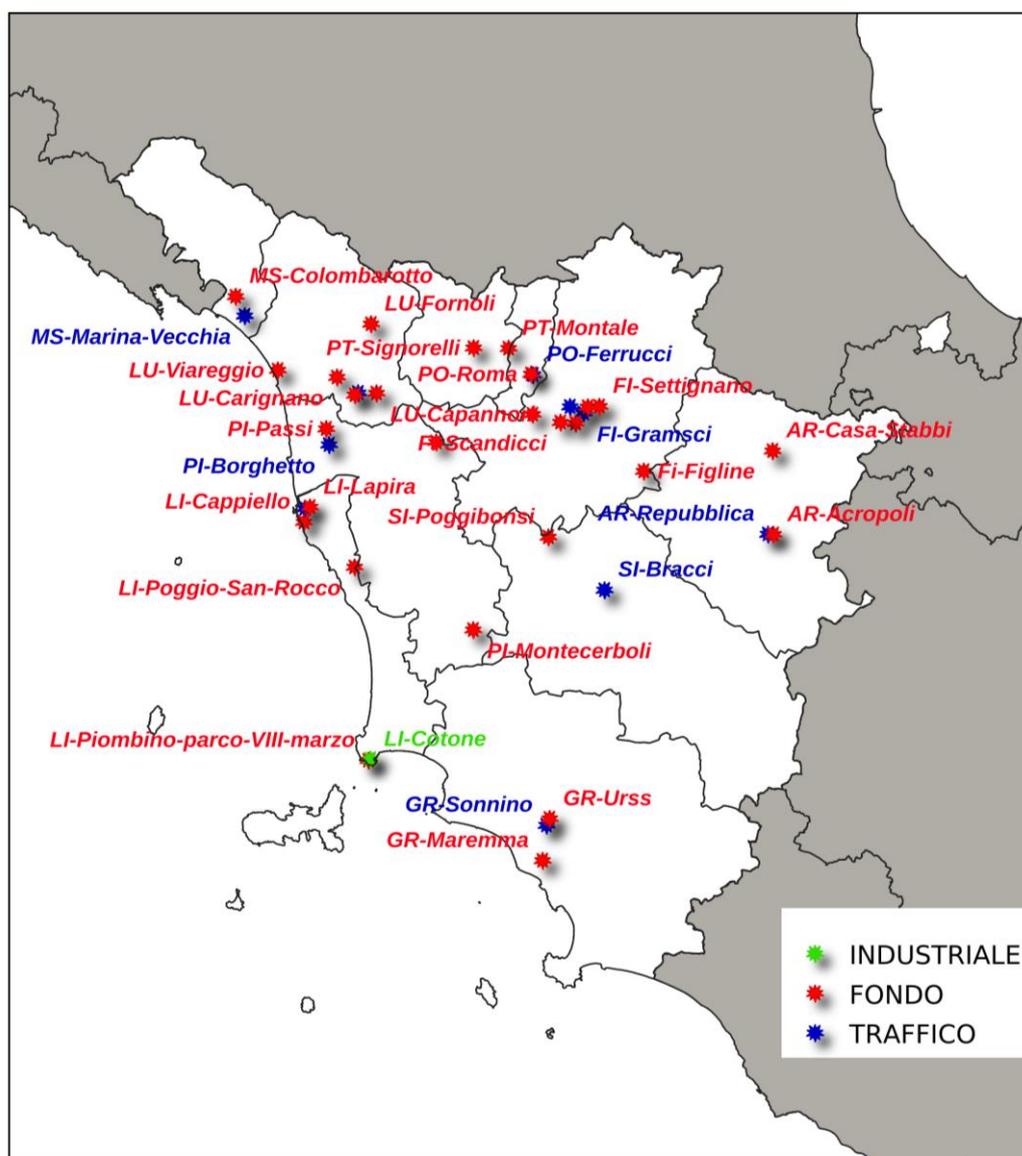


Figura 2. Mappa delle centraline della rete regionale gestita dal Centro regionale di Riferimento per il controllo e l'assicurazione di qualità dei dati (C.R.R.Q.A.) di ARPAT.

2. Sintesi delle condizioni climatiche

TEMPERATURE

In Toscana il 2022 è risultato l'anno più caldo dell'intera serie storica (iniziata nel 1955), con un'anomalia di $+1.3^{\circ}\text{C}$ rispetto al trentennio di riferimento 1991-2020; se confrontato col 2021, lo scarto rispetto alla media è risultato maggiore di ben 0.7°C . Anche il 2022 conferma la tendenza al costante rialzo termico osservato sulla nostra regione negli ultimi decenni. La Figura 3 mostra la distribuzione delle anomalie di temperatura media nel 2022 in Toscana: valori più elevati della norma su tutto il territorio regionale, ma più marcati nelle zone interne e sui rilievi. L'andamento climatico regionale rispecchia quello italiano ed europeo, infatti sia a livello nazionale che continentale l'anomalia termica complessiva del 2022 è risultata tra le più alte mai registrate. Nel dettaglio, in Italia il 2022 è l'anno più caldo dal 1800 con uno scarto di $+1.15^{\circ}\text{C}$ rispetto alla climatologia di riferimento 1991-2020 (fonte ISAC-CNR), mentre in Europa il 2022 è stato il secondo anno più caldo dal 1980 con uno scarto di $+0.9^{\circ}\text{C}$ (fonte elaborazioni Copernicus) rispetto al periodo di riferimento 1991-2020 (Figura 4). A livello globale l'anomalia è risultata più contenuta rispetto a quanto osservato in Europa e in Italia: il 2022 è il quinto anno più caldo dal 1980 per Copernicus e NASA e sesto dal 1880 per la NOAA.

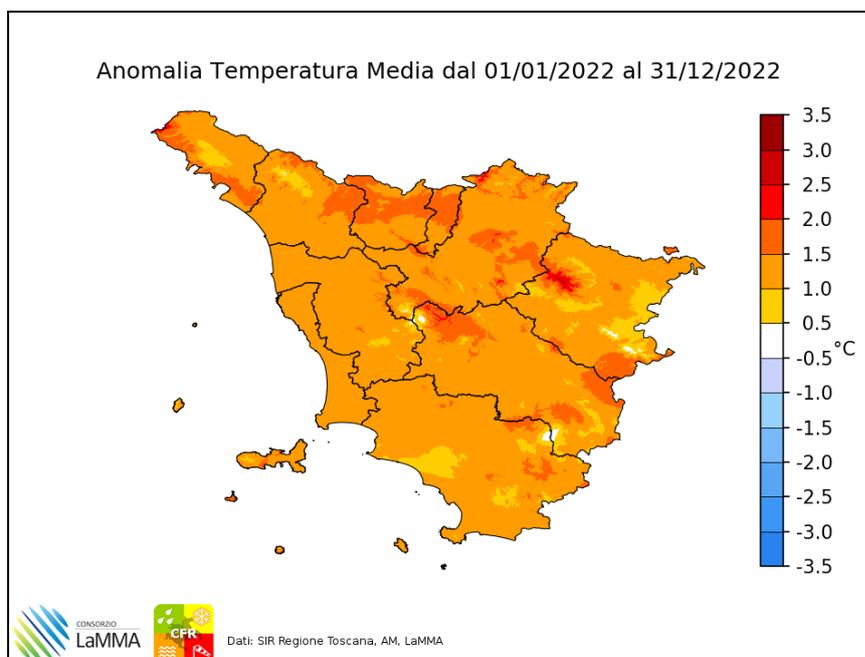


Figura 3: Distribuzione dell'anomalia della temperatura media in Toscana nel 2022, periodo di riferimento 1991-2020.

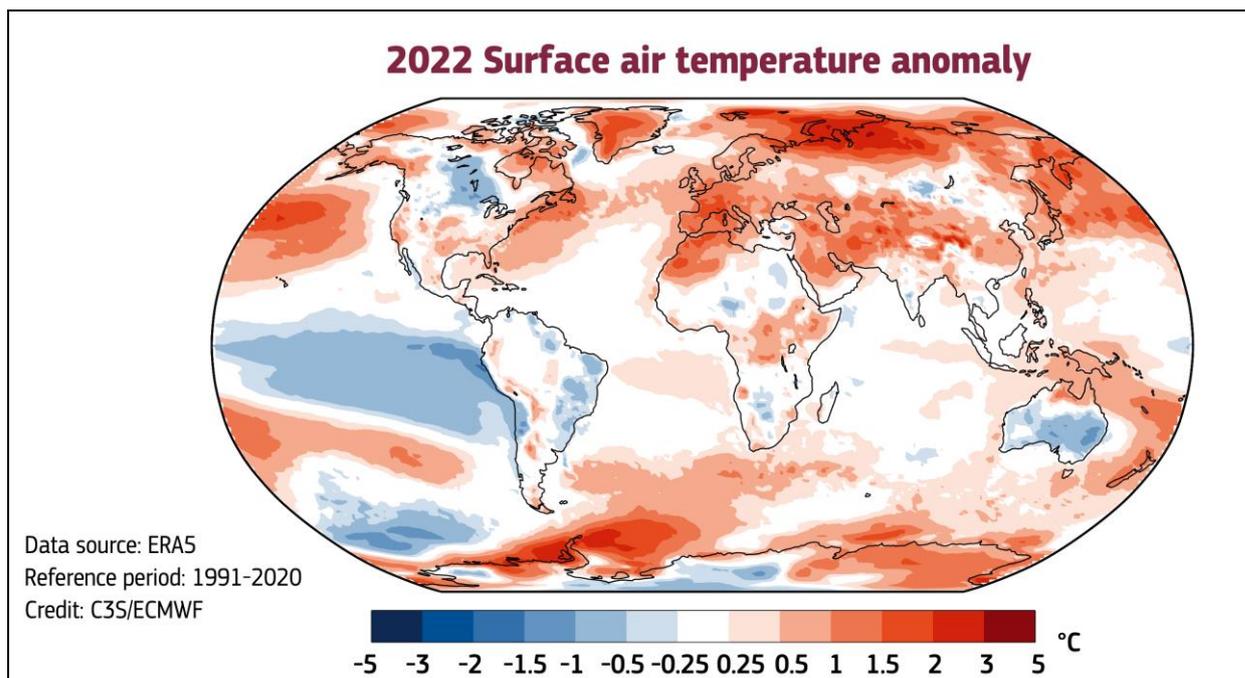


Figura 4: Distribuzione delle anomalie termiche a livello globale ed europeo nel 2022 (fonte COPERNICUS/ECMWF).

La distribuzione mensile delle anomalie a livello regionale mostra due periodi molto più caldi della norma, uno tra maggio e luglio e l'altro tra ottobre e dicembre, gli unici mesi caratterizzati da temperature inferiori alle medie sono risultati marzo e aprile (rispettivamente -1.0°C e -0.8°C rispetto alla climatologia di riferimento).

Nel dettaglio: su 12 mesi, 8 sono risultati termicamente superiori alla norma di almeno mezzo grado, 2 sostanzialmente in media e 2 leggermente al di sotto (Figura 5). Il mese che ha mostrato l'anomalia più marcata è stato giugno, con uno scarto di $+3.2^{\circ}\text{C}$ rispetto alla media, seguito da luglio e ottobre ($+2.8^{\circ}\text{C}$), da dicembre ($+2.7^{\circ}\text{C}$) e da maggio ($+2^{\circ}\text{C}$). Anomalie così marcate hanno coinciso con nuovi record storici, sia mensili che giornalieri: a maggio sono stati registrati in ben 6 capoluoghi di provincia record assoluti di caldo (tra questi 36.1°C a Firenze, 36.5°C a Pistoia e 35.8°C a Lucca); a giugno sono stati raggiunti i 41°C a Firenze, i 39.4°C a Pistoia, i 40°C a Prato e i 38.9°C a Arezzo ($+3.7^{\circ}\text{C}$ per le sole temperature massime). L'estate 2022 è risultata la seconda più calda dal 1955 dopo il 2003, mentre luglio è stato il più caldo dell'intera serie storica con uno scarto medio relativo alle temperature massime di $+3.7^{\circ}\text{C}$ (registrati picchi record di 40°C a Grosseto e 38°C a Pisa). Anche dicembre e ottobre sono risultati eccezionalmente miti, con anomalie mai osservate dall'inizio delle rilevazioni; per quanto riguarda dicembre lo scarto relativo ai soli valori minimi è stato

di ben $+3.6^{\circ}\text{C}$. Fatta eccezione per alcuni episodi freddi, in particolare a gennaio, marzo ed inizio aprile, nel 2022, non si sono registrate ondate di freddo degne di nota.

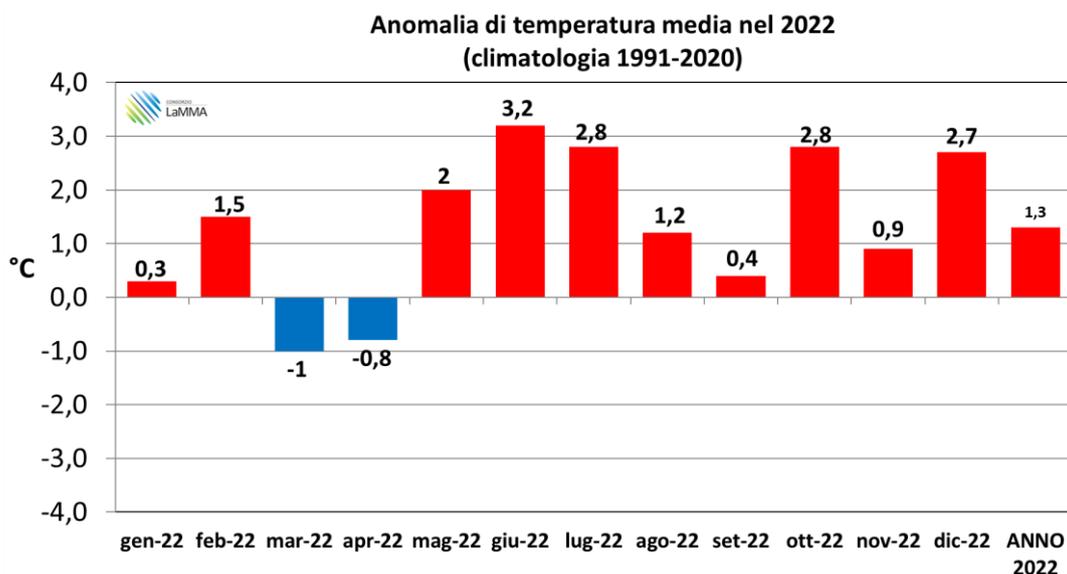


Figura 5: anomalie mensili di temperatura media nel 2022 in Toscana, periodo di riferimento 1991-2020

Per quanto riguarda il trimestre maggio-luglio e il mese di ottobre, le marcate anomalie osservate (Figura 6 e Figura 7) sono il risultato della presenza pressoché costante di aree di alta pressione di matrice subtropicale. Al contrario il forte scarto termico positivo di dicembre (Figura 8) è stato causato dall'influenza di correnti miti e perturbate di origine atlantica e tirrenica che hanno permesso, nella prima parte del mese, un costante rimescolamento degli strati bassi dell'atmosfera, mantenendo così la qualità dell'aria su valori nel complesso accettabili. Relativamente a marzo e aprile, gli unici mesi con temperature inferiori alla media (Figura 9), le anomalie sono state causate dalla presenza di masse d'aria di matrice continentale e settentrionale richiamate da alte pressioni poste ad alte latitudini.

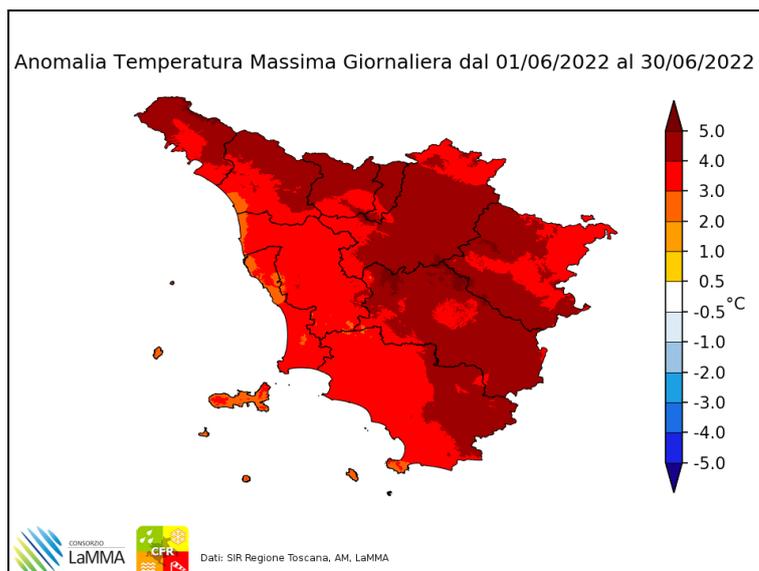


Figura 6: anomalie termiche regionali nel mese di giugno (T MAX). Periodo di riferimento 1991-2020.

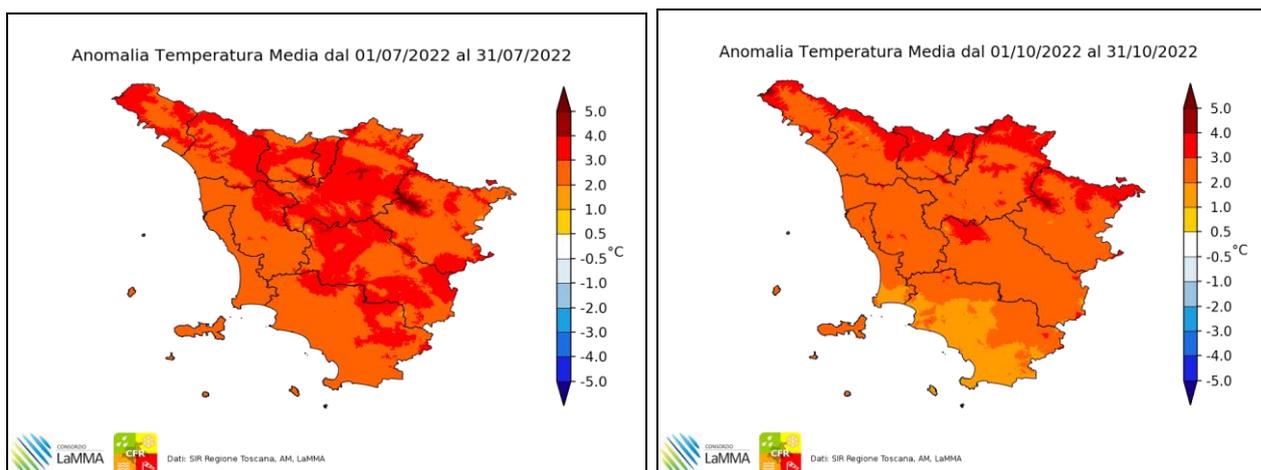


Figura 7: anomalie termiche regionali nei mesi di luglio e ottobre. Periodo di riferimento 1991-2020.

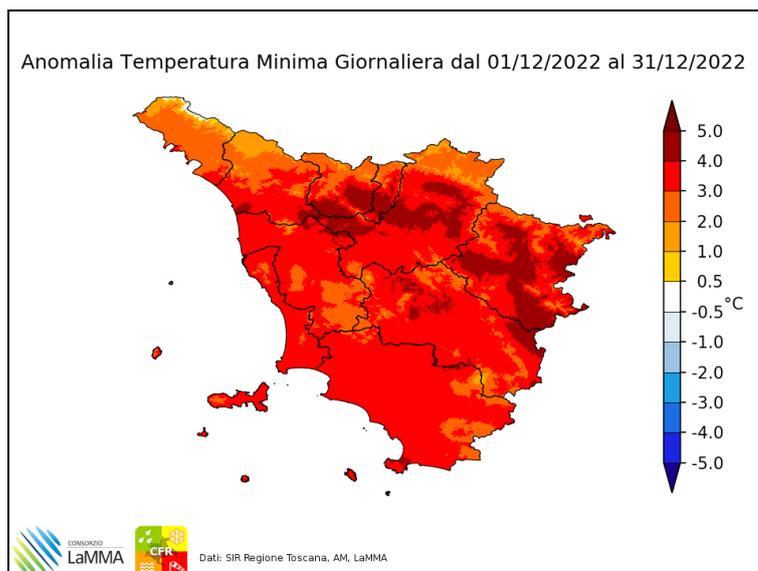


Figura 8: anomalie termiche (T MIN) del mese di dicembre. Periodo di riferimento 1991-2020.

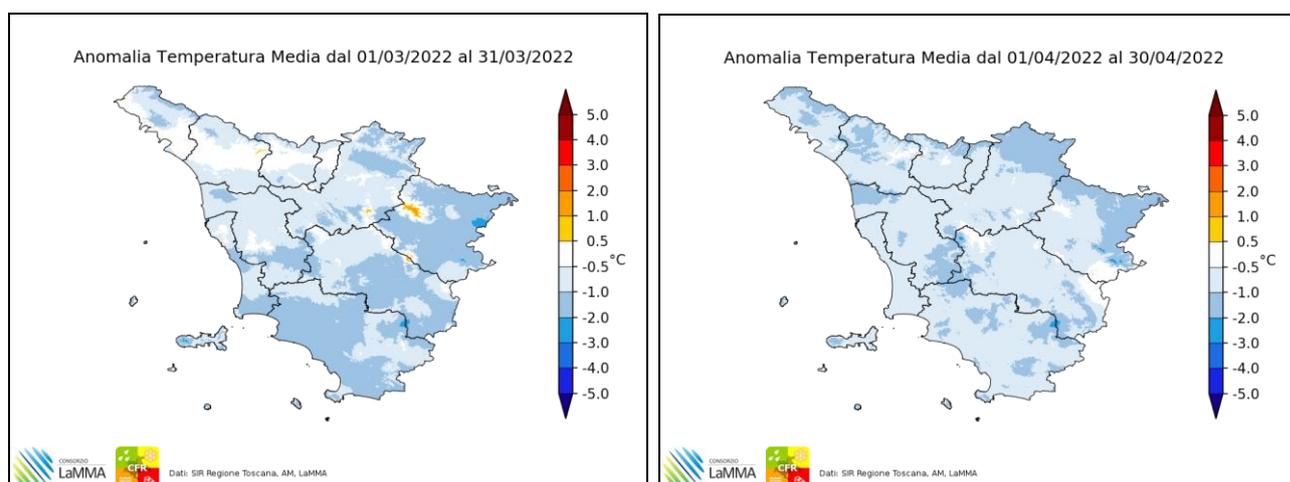


Figura 9: anomalie termiche del bimestre marzo-aprile. Periodo di riferimento 1991-2020.

PRECIPITAZIONI

Nel complesso il 2022, a livello regionale, è risultato meno piovoso della norma con l'11% in meno di precipitazioni, deficit in gran parte ascrivibile alle province settentrionali (-20/-30%), mentre sul resto della Toscana, i cumulati risultano nella norma, o leggermente superiori sull'alto Mugello e sulla Val Tiberina (Figura 10). L'anno 2022 è stato caratterizzato da un'estrema variabilità infrannuale dei quantitativi di pioggia. Infatti, la distribuzione molto irregolare delle piogge, in termini spaziali, mensili e stagionali, è una caratteristica osservata più volte negli ultimi anni e risulta in linea con le proiezioni dei principali modelli climatici.

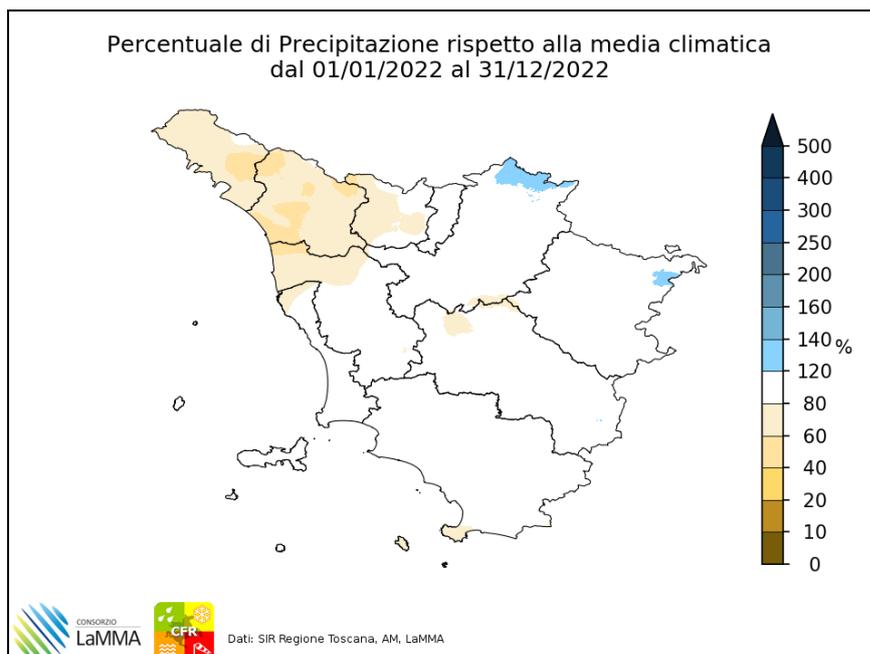


Figura 10: percentuale di precipitazione rispetto alla media climatica di riferimento (1991-2020).

Analizzando il dato a livello mensile e stagionale si osserva una distribuzione delle precipitazioni caratterizzata da lunghi periodi con scarsi apporti, alternati a singoli mesi estremamente piovosi (Figura 11). Nello specifico, agosto, settembre e dicembre hanno registrato surplus molto importanti (Figura 12), in particolare sulle province centrali e meridionali, con scarti compresi tra +50 e +100 mm e con un picco di +179 mm nel mese di settembre sulle zone meridionali della Toscana.

Fatta eccezione per aprile e novembre (in media), i restanti mesi hanno fatto registrare sempre piogge molto al di sotto della norma (tra -40 e -70 mm) con precipitazioni praticamente assenti nel mese di ottobre (Figura 13). I periodi meno piovosi e più caldi del 2022 hanno coinciso con fasi anticicloniche di matrice subtropicale particolarmente persistenti e anomale; al contrario quelli più ricchi di precipitazioni sono avvenuti in concomitanza con transiti perturbati di matrice atlantica e scandinava. A tal proposito fa eccezione il mese di agosto, durante il quale si è osservata un'inusuale attività temporalesca generata da infiltrazioni d'aria fredda in quota e non da veri e propri passaggi frontali.

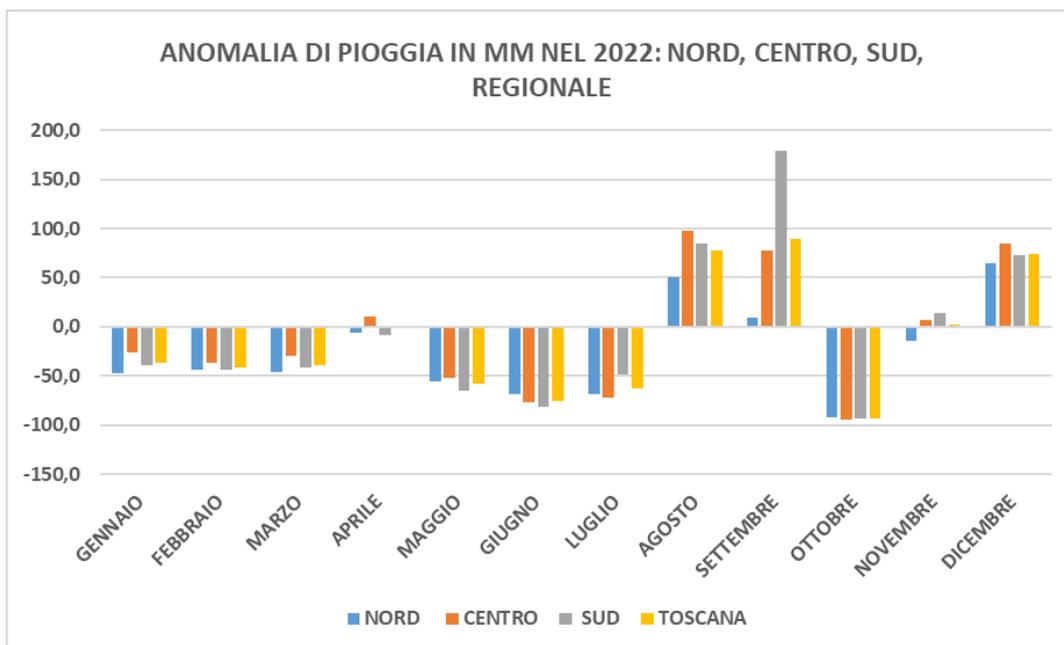


Figura 11: anomalie di precipitazione osservate in Toscana nel 2022, divise per macroarea.

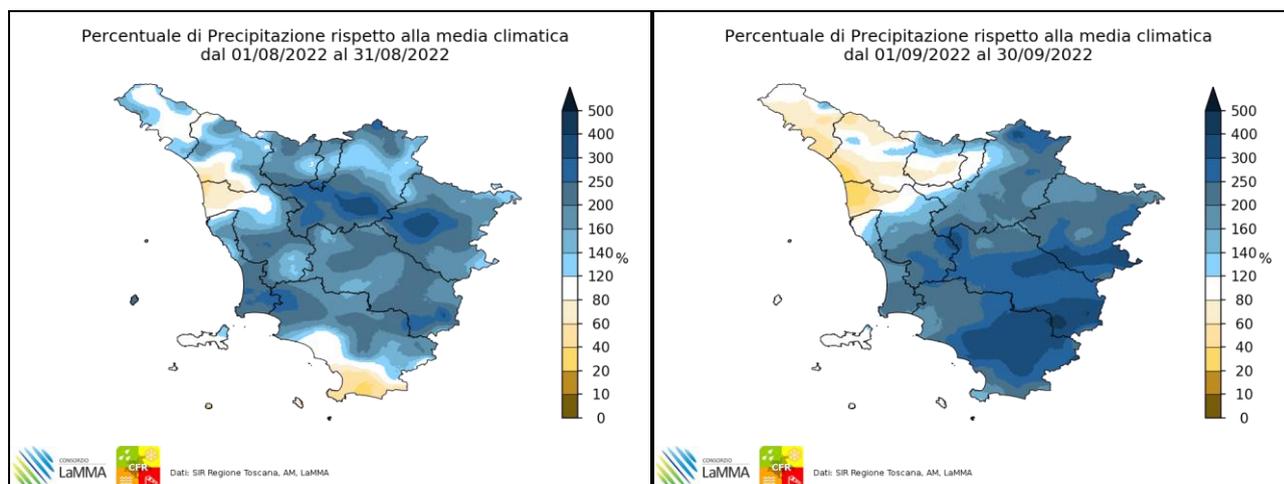


Figura 12: percentuale di precipitazione a agosto (sx) e settembre (dx) rispetto alla media 91-20.

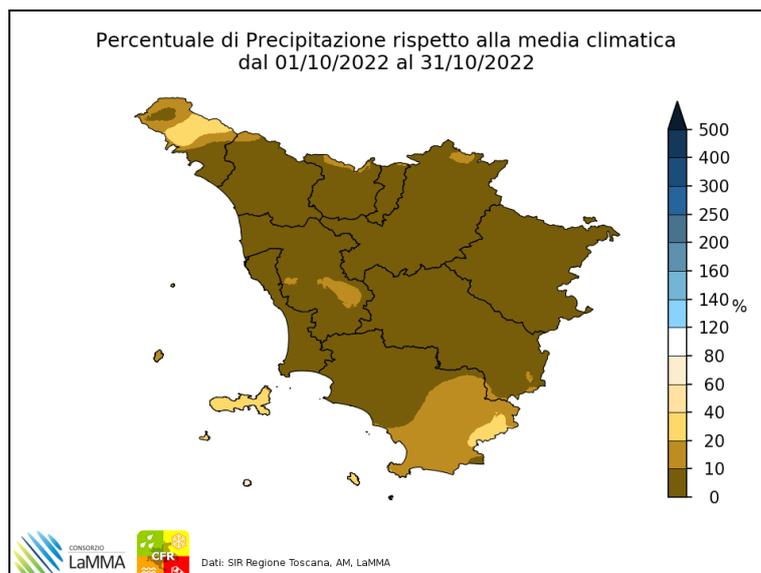


Figura 13: percentuale di precipitazione a ottobre rispetto alla media 91-20.

CIRCOLAZIONE ATMOSFERICA

Da un punto di vista circolatorio il 2022 in Europa è stato un anno caratterizzato da pressioni in quota molto più alte della norma, in particolare su Francia, Italia centro-settentrionale, area alpina e Mediterraneo centrale (Figura 14). La distribuzione delle anomalie indica un pattern fortemente influenzato da blocchi alla circolazione zonale (ovest-est) e quindi dal transito di un numero di sistemi frontali ben inferiore alla norma su gran parte del continente.

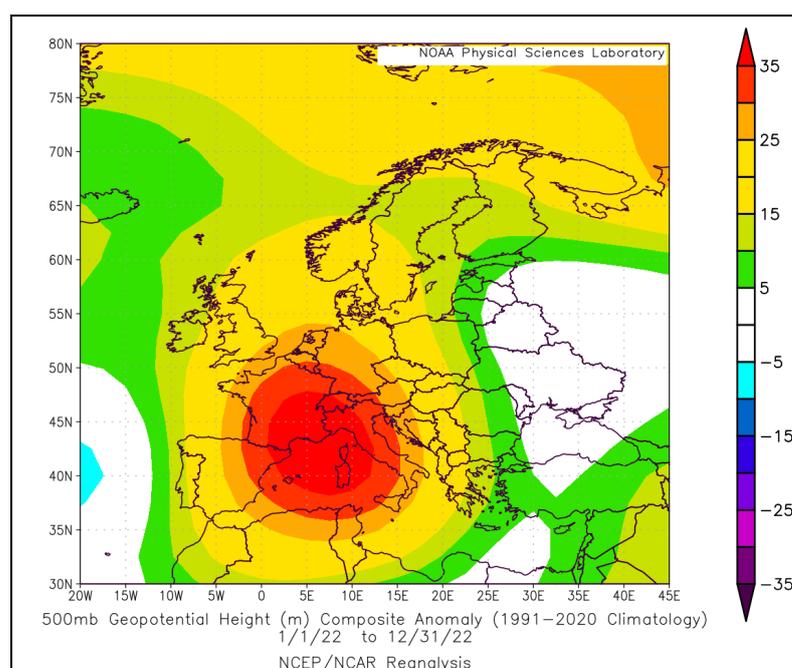


Figura 14: mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale dell'isobara a 500 mb per l'anno 2022

La Toscana, come l'Italia settentrionale/tirrenica e l'Europa centro-occidentale, ha registrato periodi caratterizzati dal transito di pochissime perturbazioni. Su tali zone, questa situazione ha determinato una delle più intense siccità degli ultimi 400/500 anni. Il trimestre maggio-luglio ha visto persistere anticicloni di matrice subtropicale desertica con forti anomalie di pressione (Figura 15). Le alte temperature, unitamente alla forte compressione adiabatica e all'assenza di nuvolosità, hanno favorito, sia a giugno che a luglio, il raggiungimento e talvolta il superamento della soglia 8 di UV (Figura 16). Ciononostante, non si sono registrati picchi anomali nelle concentrazioni di ozono.

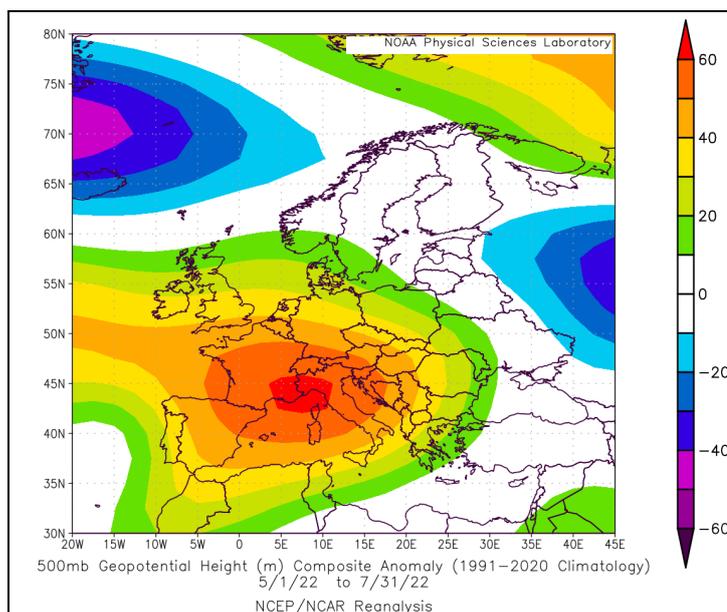


Figura 15: mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale dell'isobara a 500 mb a gennaio 2022.

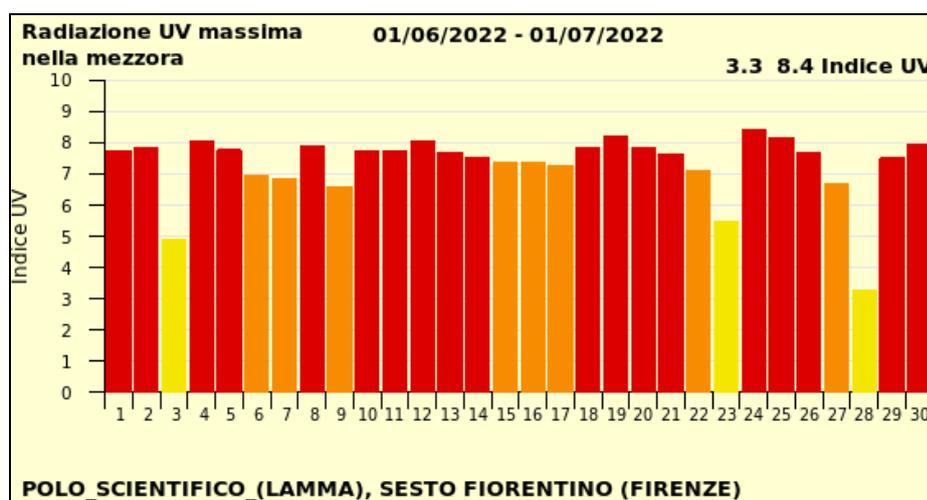


Figura 16: radiazione UV massima giornaliera nel mese di giugno (Sesto Fiorentino)

Le fasi in cui si sono registrati periodi di basso rimescolamento atmosferico 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 mediterranea nei mesi invernali (Figura 17 e Figura 18). Durante il resto dell'anno non si sono osservati, relativamente alle polveri sottili, picchi particolarmente alti.

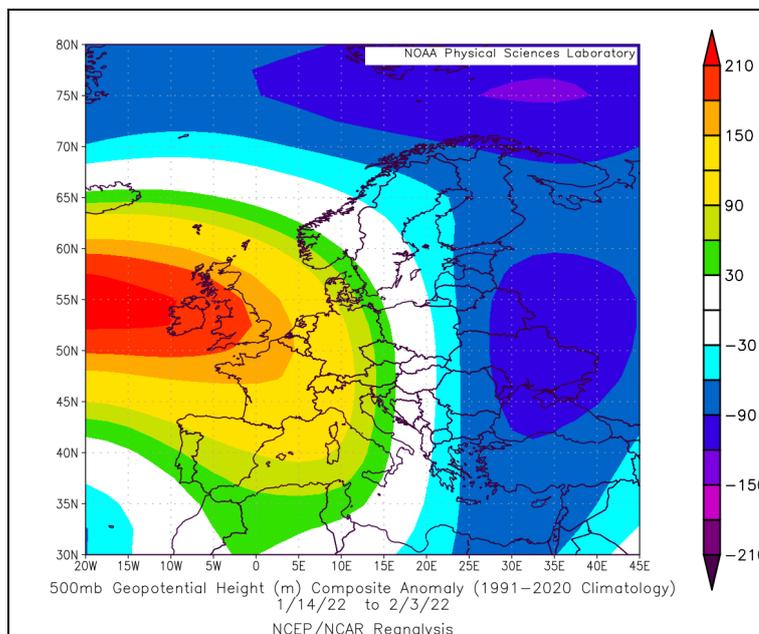


Figura 17: mappe di anomalia dell'altezza del geopotenziale dell'isobara a 500 mb nella seconda parte di febbraio 2022.

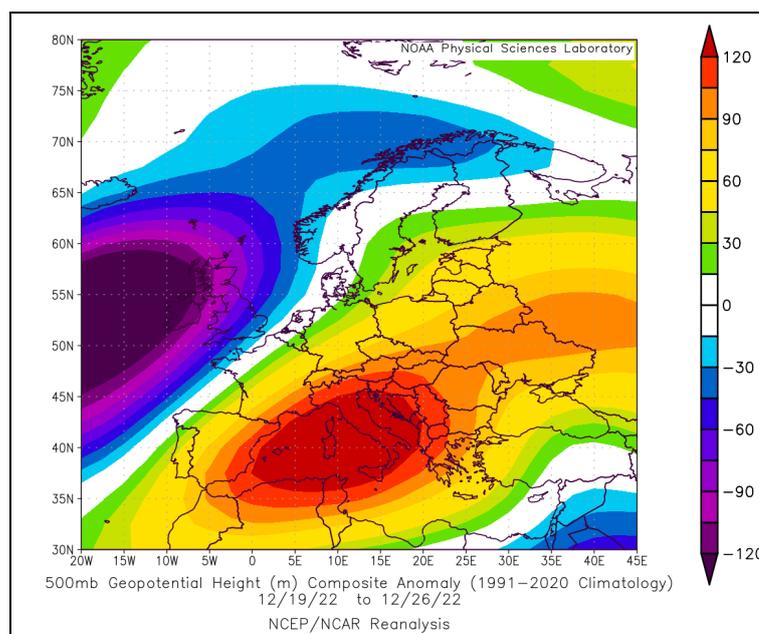


Figura 18: mappa di anomalia dell'altezza del geopotenziale dell'isobara a 500 mb nella seconda parte di dicembre 2022.

EPISODI DI DUST DUST SAHARIANO

Nel 2022, si sono registrati diversi eventi di intrusioni di polveri desertiche sahariane, legate ad avvezioni d'aria calda. Gli episodi quantitativamente più rilevanti sono registrati nei seguenti periodi: 28-30 marzo (data di picco 29 marzo), 24-28 maggio (data di picco 27 maggio), 3-6 giugno (data di picco 4 giugno), 27 giugno-6 luglio (data di picco 27 giugno), 16-18 agosto (data di picco 18 agosto), 15 settembre e 25-28 ottobre (data di picco 26 ottobre). Durante questi eventi le concentrazioni di polveri sottili, in particolare il PM10, hanno subito rialzi significativi.

29 MARZO

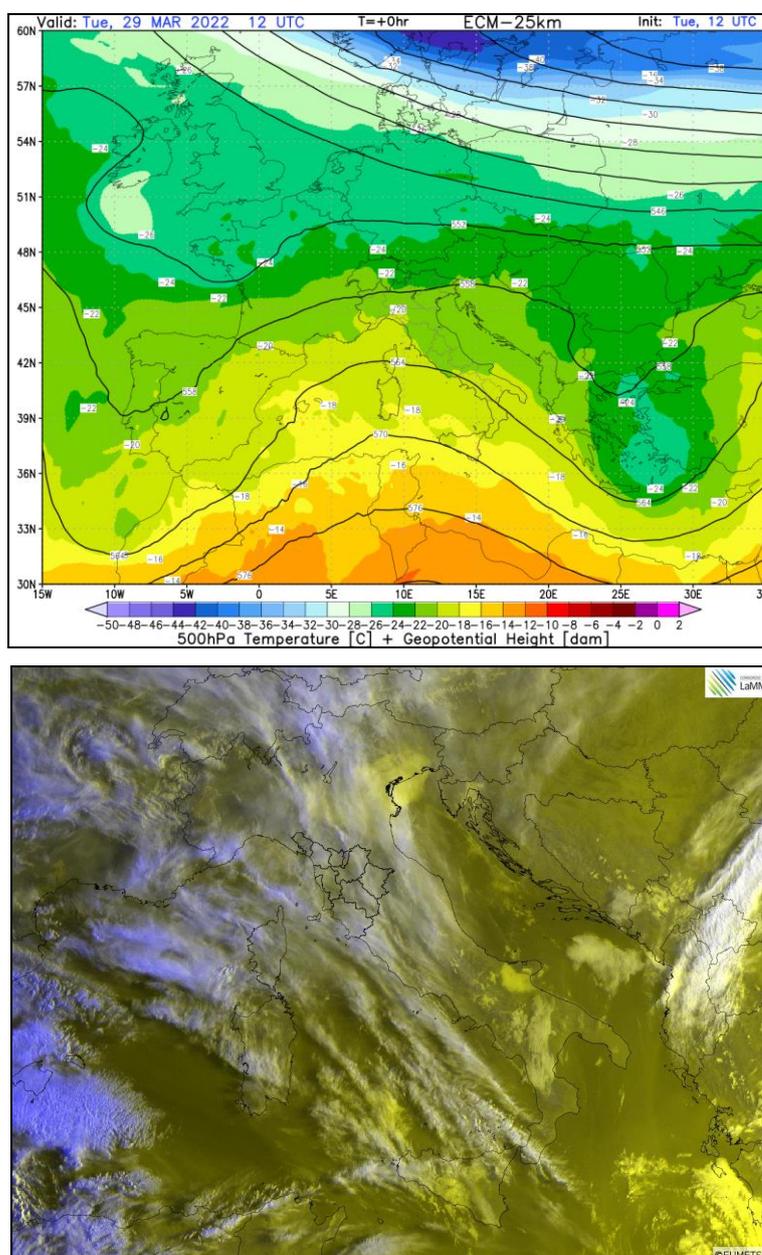


Figura 19: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso) relative all'intrusione di polveri sahariane del 29 marzo.

27-28 GIUGNO

L'intrusione di polveri sahariane verificatasi tra il 27 e il 28 giugno è stata la più intensa dell'anno ed il relativo picco di PM10 è stato il più alto del 2022. L'evento del 27-28 rappresenta l'apice di una serie di intrusioni di polveri desertiche protrattasi fino al 5-6 luglio. Anche in questo caso, responsabile dell'ingresso delle polveri una profonda saccatura di origine nordatlantica e la presenza di un promontorio anticiclonico di matrice subtropicale desertica (Figura 20).

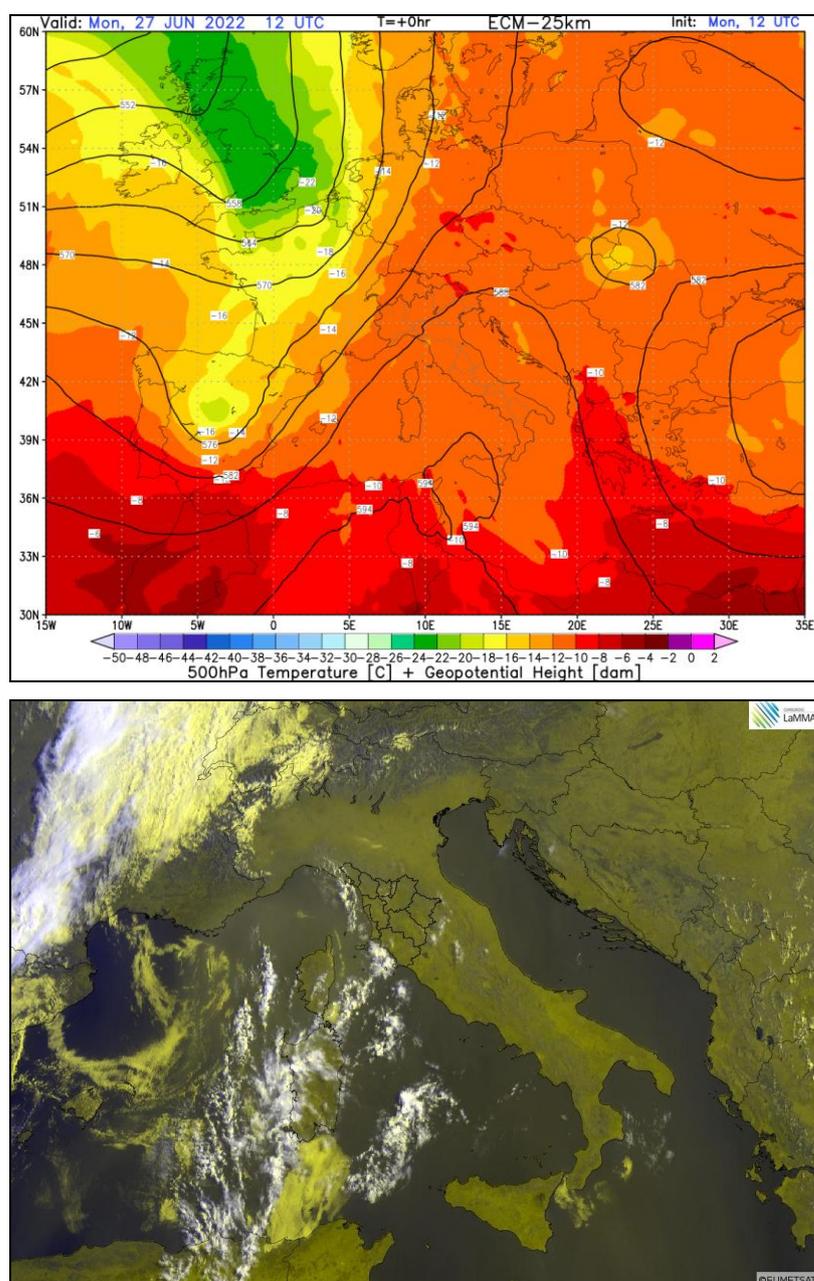


Figura 20: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso) relative all'intrusione di polveri sahariane del 27-28 giugno.

18 AGOSTO

L'evento del 18 agosto è stato provocato da una saccatura atlantica, piuttosto intensa, che ha richiamato masse d'aria molto calde e ricche di polveri dal deserto (Figura 21). La stessa perturbazione ha poi prodotto un'intensa linea temporalesca che ha attraversato tutta la regione.

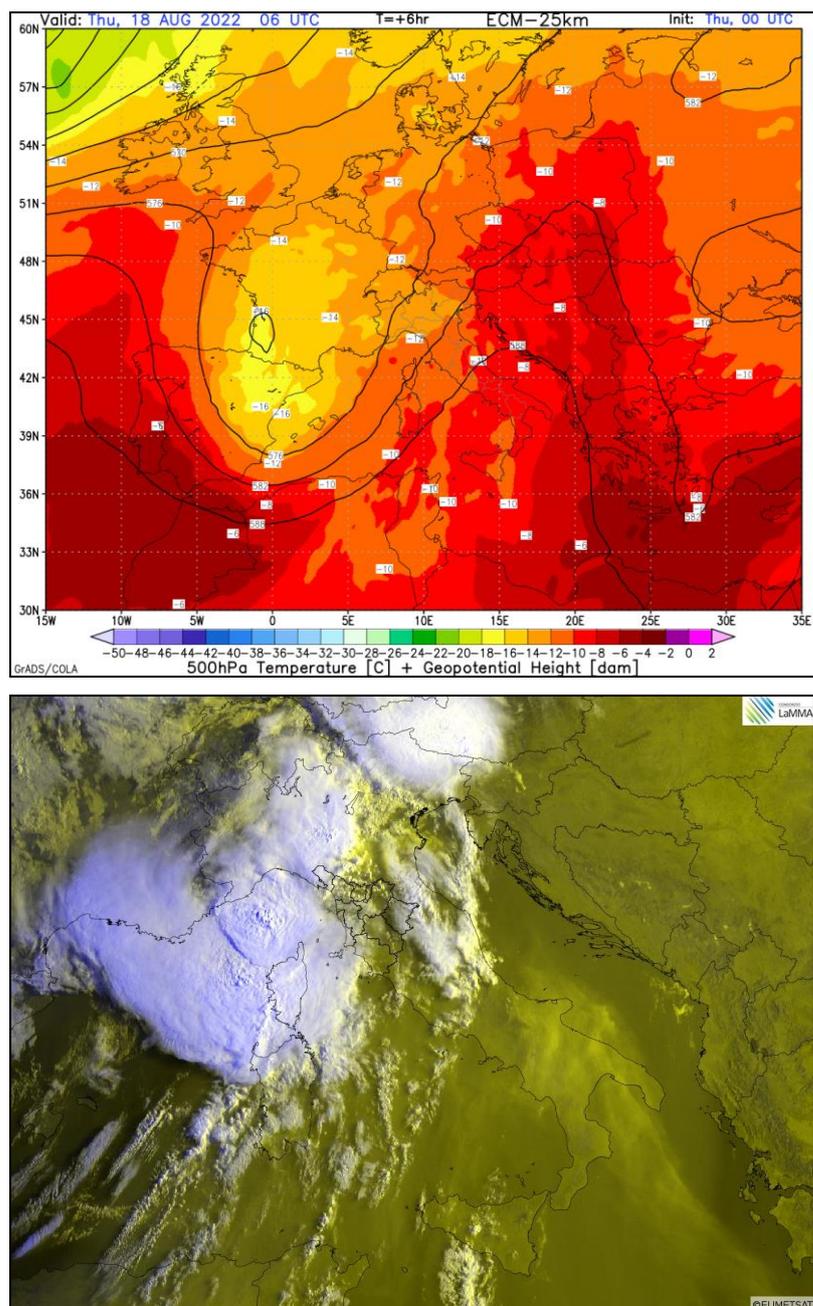


Figura 21: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso) relative all'intrusione di polveri sahariane del 18 agosto.

26 OTTOBRE

L'evento del 26 ottobre, a differenza degli altri, è stato causato da un'avvezione d'aria calda collegata ad un vasto anticiclone di matrice subtropicale-desertica centrato proprio sull'Italia. Le polveri sono rimaste "intrappolate" all'interno della struttura anticiclonica (Figura 22).

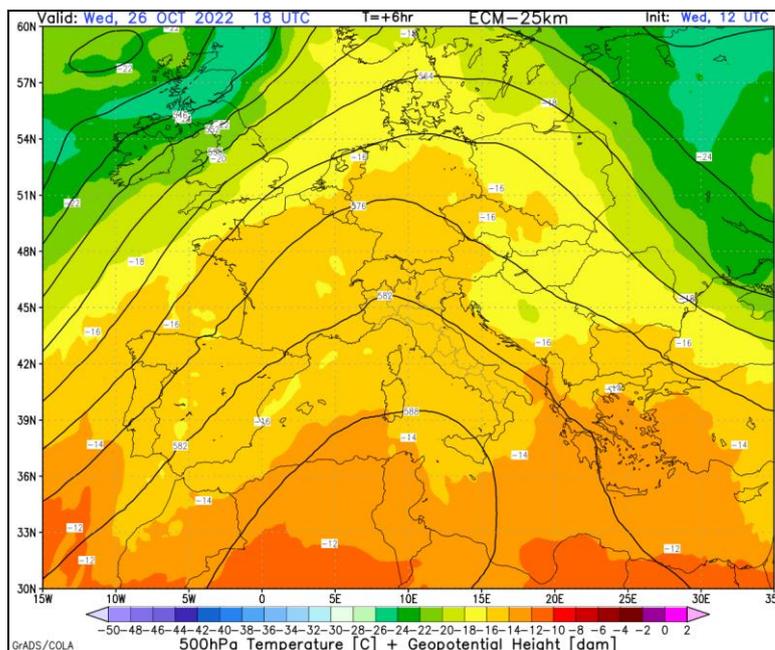


Figura 22: mappa barica (500 hPa – in alto) e satellite visibile (in basso) relative all'intrusione di polveri sahariane del 26 ottobre (fonte immagine <https://wvs.earthdata.nasa.gov/>)

3. Risultati

Per la simulazione 2022 non sono stati effettuati cambiamenti significativi nell'inizializzazione della run modellistica rispetto alla precedente e sono stati prodotti i campi di concentrazione degli inquinanti (NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}), con frequenza oraria sul dominio regionale.

I campi meteorologici sono stati ottenuti dalla run 2022 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-2017. Nel dettaglio, sul dominio toscano, i campi emissivi di input sono stati allineati ai giorni di emissione 2022 secondo la classificazione tipo feriale, festivo e prefestivo. In maniera analoga è stato fatto 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 e sono stati scalati alla risoluzione scelta per la corsa annuale, con passo pari a 2km.

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 (Tabella 1) 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.

Tabella 1. Tabella con le definizioni degli skill utilizzati per la valutazione modellistica.

NOME	FORMULA	NOTE
MEDIA OSSERVAZIONI	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$	
MEDIA MODELLO	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$	
STANDARD DEVIATION OSSERVAZIONI	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$	
STANDARD DEVIATION MODELLO	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$	
FRACTIONAL BIAS (FB)	$\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i + X_i)}{2}}$	Valori fra -2 e +2 Valore ottimo=0
FRACTIONAL ERROR (FE)	$\frac{\sum_{i=1}^N Y_i - X_i }{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i + X_i)}{2}}$	Valori fra 0 e 2 Valore ottimo 0
ROOT MEAN SQUARE ERROR (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}$	Valore ottimo = 0
NORMALIZED MEAN SQUARE ERROR (NMSE)	$\frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{XY}$	Valori tra 0 e inf. Valore ottimo = 0
BIAS	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)$	Valore ottimo = 0
CORRELATION (CORR)	$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$	Valori tra -1 e 1 Valore ottimo = 1
INDEX OF AGREEMENT di WILLMOTT (IOA)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X} + Y_i - \bar{X})^2}$	Valori fra 0 e 1 Valore ottimo = 1

N = numero osservazioni presenti

X_i = dati osservati

\bar{X} = media dei dati osservati

Y_i = dati simulati

\bar{Y} = media dei dati simulati

Inoltre l'analisi dei risultati è stata effettuata anche mediante l'utilizzo del software statistico *DeltaTool* [Thunis,2012 e Janssen,2020], sviluppato nell'ambito del progetto FAIRMODE (<https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>), in grado di verificare il soddisfacimento dei requisiti della Direttiva Europea 2008/50/EC. Nel dettaglio, con questo software, sono stati prodotti i *target-plot* e gli *scatter-plot*, per ciascun inquinante stimato ed è stato calcolato l'indice di qualità *MQI* del modello. In particolare, gli *scatter-plot* (Figura 28, Figura 37, Figura 48, Figura 54) 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).

Il margine superiore dell'area arancione è la radice quadrata di tale valore: $\sqrt{0.5}$ e $\sqrt{0.3}$ a seconda dell'inquinante, come descritto nei punti 1 e 2. Quindi 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 ha delle buone prestazioni.

Inoltre, 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.

Per calcolare tale indice viene considerata la discrepanza tra i valori osservati ad ogni tempo di osservazione e i corrispondenti valori stimati dal modello, secondo la formula seguente [Thunis, 2012]:

$$MQI(i) = \frac{|O_i - M_i|}{\beta U(O_i)} \quad [eq.1]$$

dove O_i e M_i sono rispettivamente le osservazioni e le stime al tempo i , β è un coefficiente di proporzionalità scelto pari 2, $U(O_i)$ è l'incertezza relativa al 95esimo percentile dei livelli di concentrazione misurati. L'indice *MQI* può essere generalizzato anche alle time-series considerando la seguente formula:

$$MQI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}}{\beta \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(O_i)^2}} \quad [eq.2]$$

Il criterio di performance del modello $MQI \leq 1$ [eq.2], che indica il raggiungimento dell'obiettivo di bontà del modello, è attivato per le serie storiche di:

- 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.

Gli assessment target plot, che riportano tale indice di performance, sono molto utili per verificare se l'obiettivo di qualità per il modello viene raggiunto per le diverse stazioni della rete regionale (Figura 29, Figura 38, Figura 49, Figura 55).

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 [eq. 2] 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 [eq. 2] 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 avere un $MQI \leq 1$ e quindi ricadere all'interno dell'area verde. Il valore di questo indice viene riportato nei grafici, in alto a sinistra con la sigla *MQI_HD*.

Per i modelli di qualità dell'aria che forniscono anche le concentrazioni medie annue degli inquinanti è possibile definire l'indice MQI come il bias medio tra le concentrazioni stimate e quelle misurate nei loro valori medi annuali, normalizzate rispetto alla misura di incertezza della concentrazione media, secondo la formula:

$$MQI = \frac{|\bar{O} - \bar{M}|}{\beta U(\bar{O})} \quad [\text{eq.3}]$$

dove \bar{O} è la media annuale delle osservazioni della singola serie storica, \bar{M} è la media annuale delle stime corrispondenti allo stesso punto, $U(\bar{O})$ è l'incertezza relativa al 95esimo percentile della concentrazione media misurata e $\beta=2$.

Il raggiungimento del criterio di bontà sulla media annuale è raggiunto se $MQI \leq 1$. Tale indice viene riportato, con la sigla *MQI_YR*, negli assessment target plot in alto a sinistra, sotto il criterio relativo alle serie storiche. All'interno dei grafici, in alto a destra, sono riportati anche i valori di incertezza usati per produrre i grafici stessi, insieme al valore di incertezza associato al modello (listato in blu).

3.1 PM10

La distribuzione spaziale della concentrazione di particolato atmosferico PM10, all'interno del dominio toscano, stimata come media annua per il 2022 (Figura 23), 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.

Durante il periodo invernale (Figura 24), come è noto, il PM10 raggiunge valori di concentrazione più alti, in particolare nei mesi di gennaio, febbraio, novembre e dicembre. Nei mesi primaverili-estivi le concentrazioni sono mediamente più basse e distribuite più uniformemente su tutto il territorio (Figura 25). Questo è legato sia alla riduzione delle emissioni relative al macrosettore riscaldamento, sia alla stagionale crescita dell'altezza media dello strato di rimescolamento (HMix).

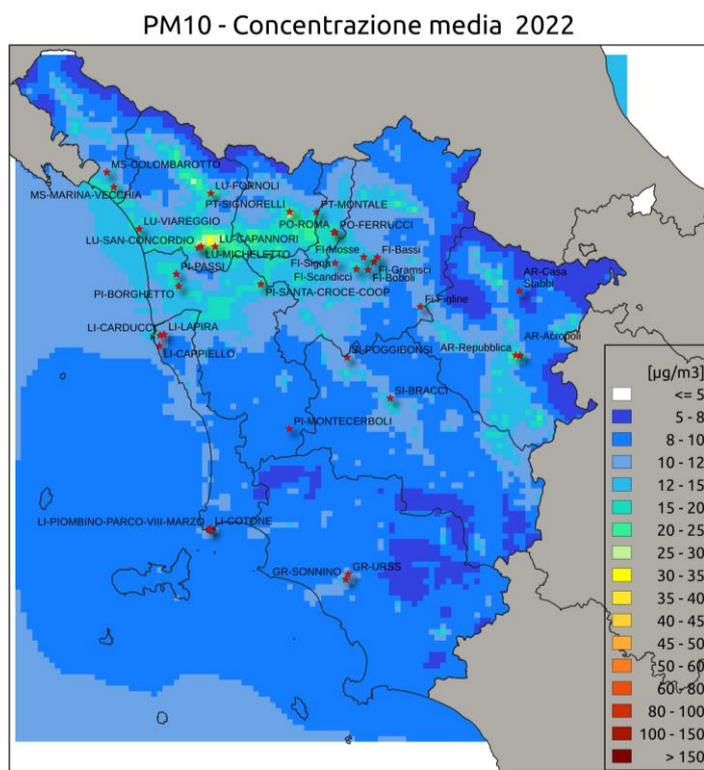


Figura 23. Concentrazione media annua 2022 delle stime di PM10

PM10 - Concentrazione media inverno 2022

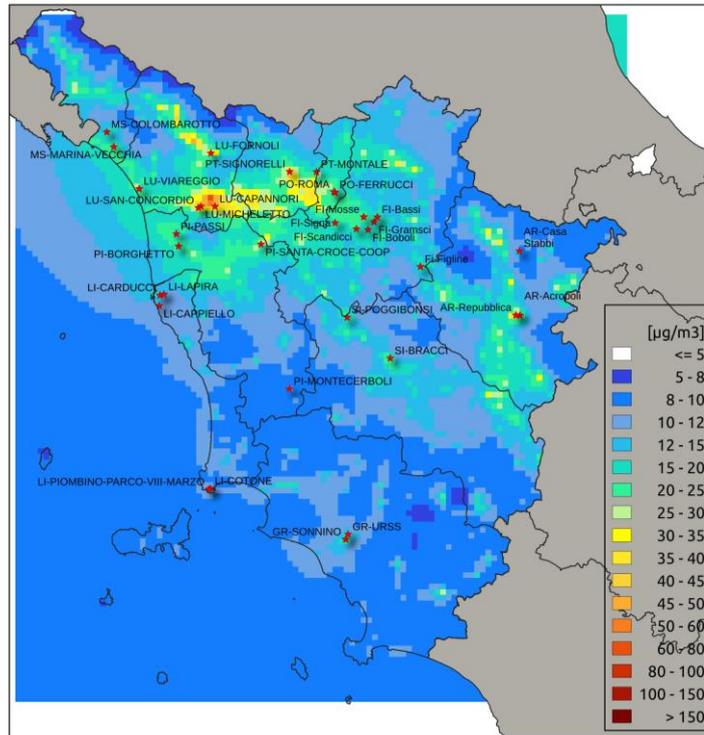


Figura 24. Concentrazione media invernale (gen-mar e ott-dic) 2022 delle stime di PM10

PM10 - Concentrazione media estate 2022

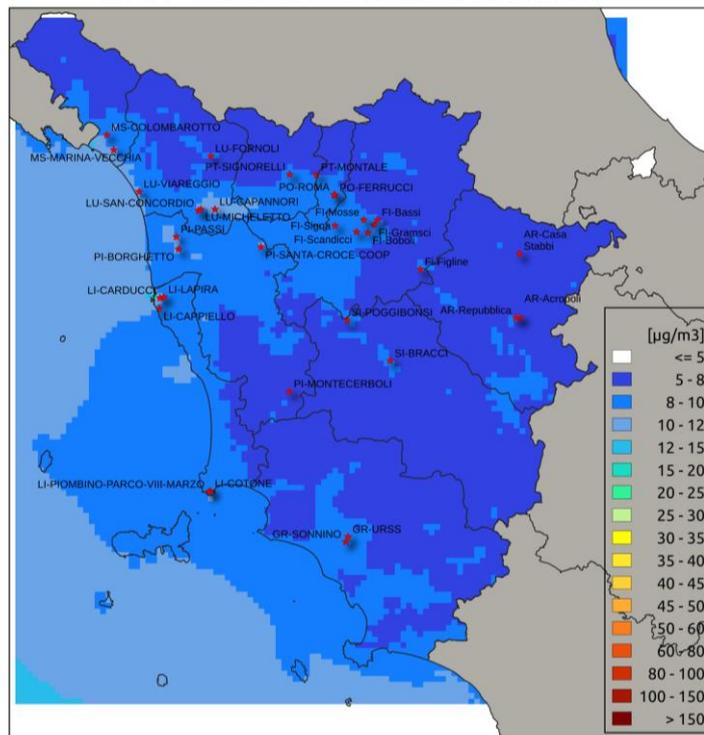
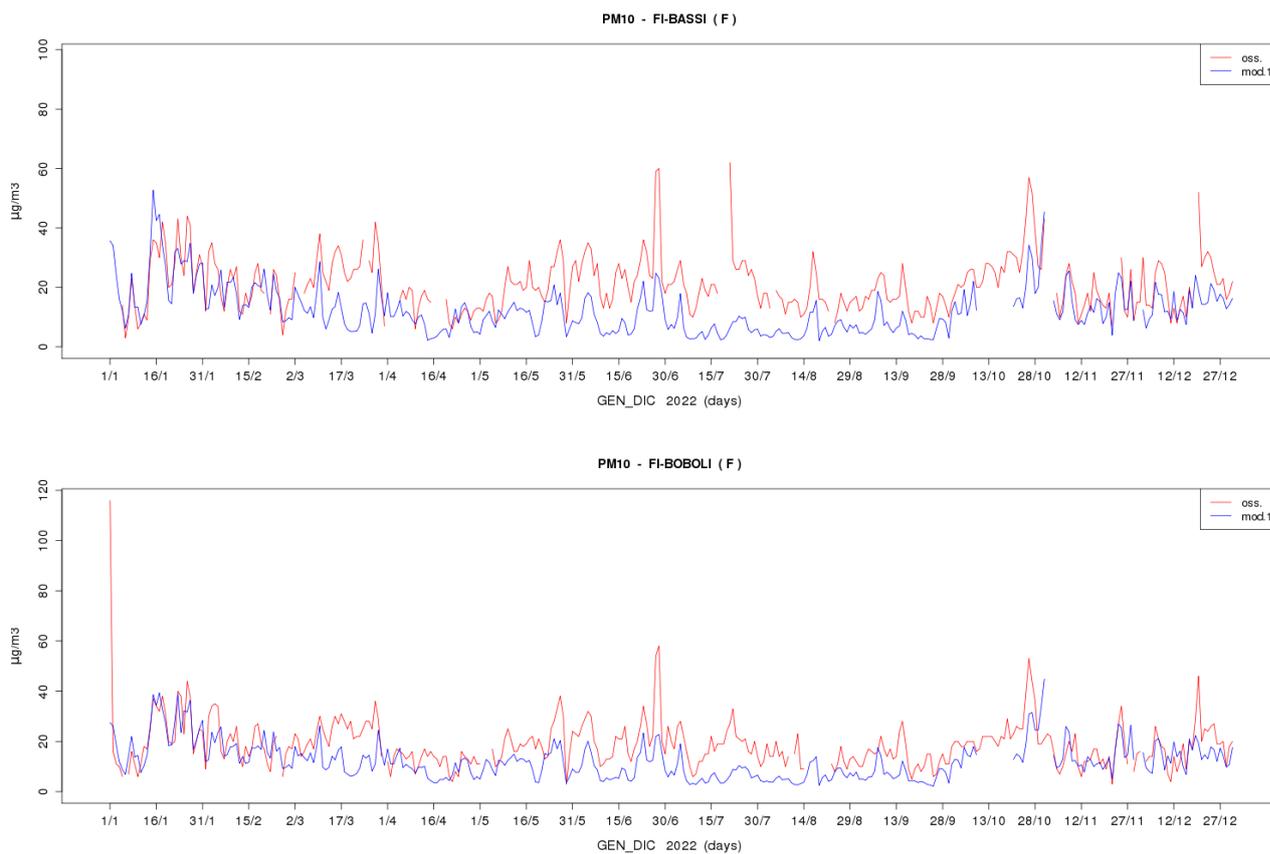


Figura 25. Concentrazione media estiva (apr-sett) 2022 delle stime di PM10

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.

Nelle stazioni di fondo della piana FI-PO-PT, si ha un'adeguata risposta del sistema modellistico per il periodo invernale, sebbene si evidenzia una generale sottostima modellistica. Durante il periodo estivo la sottostima modellistica è più marcata, ma in questo periodo i valori registrati per il PM10 sono quantitativamente più bassi (Figura 26).



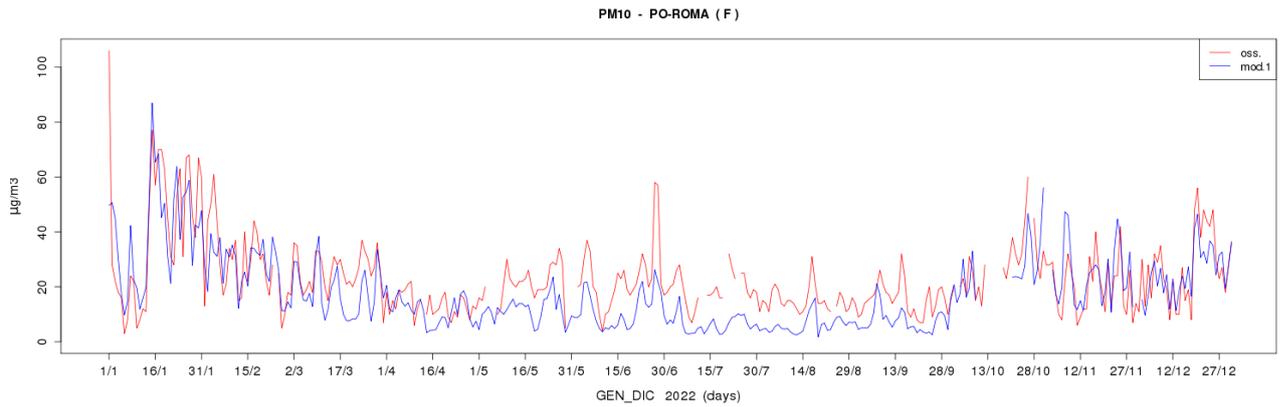
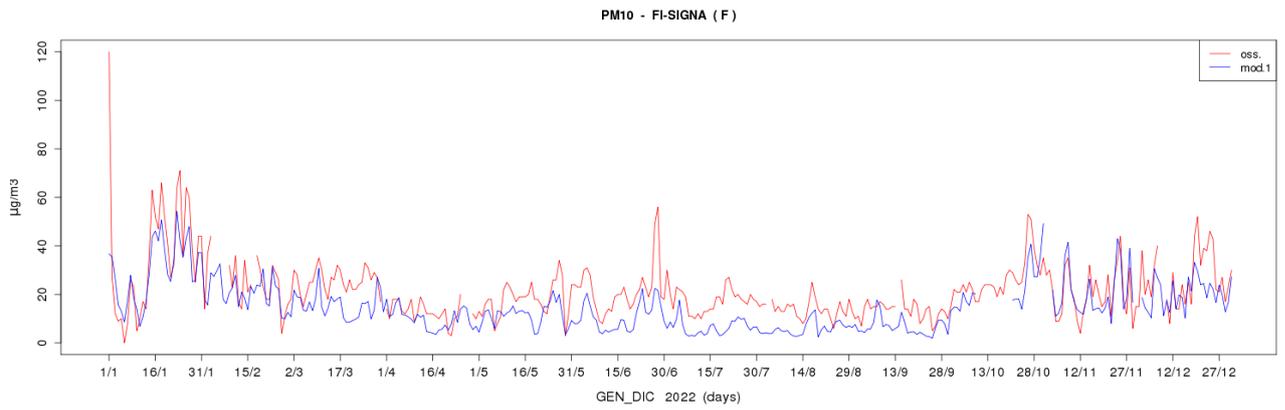
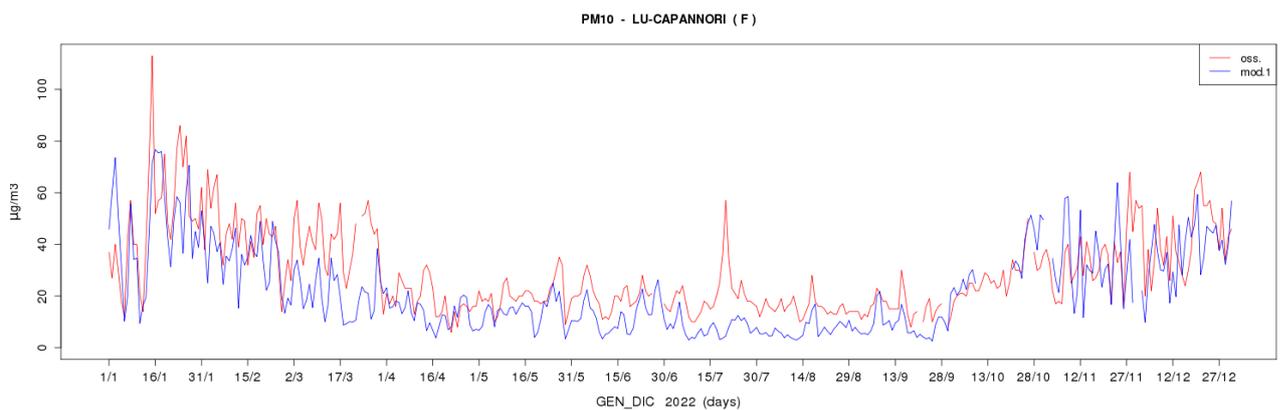


Figura 26. Serie storiche stimate (blu) rispetto alle centraline (rosso), per le stazioni di FI-Bassi, FI-Boboli, FI-Signa e PO-Roma.

Anche per le stazioni di LU-Capannori e PI-Santa Croce si nota lo stesso andamento.



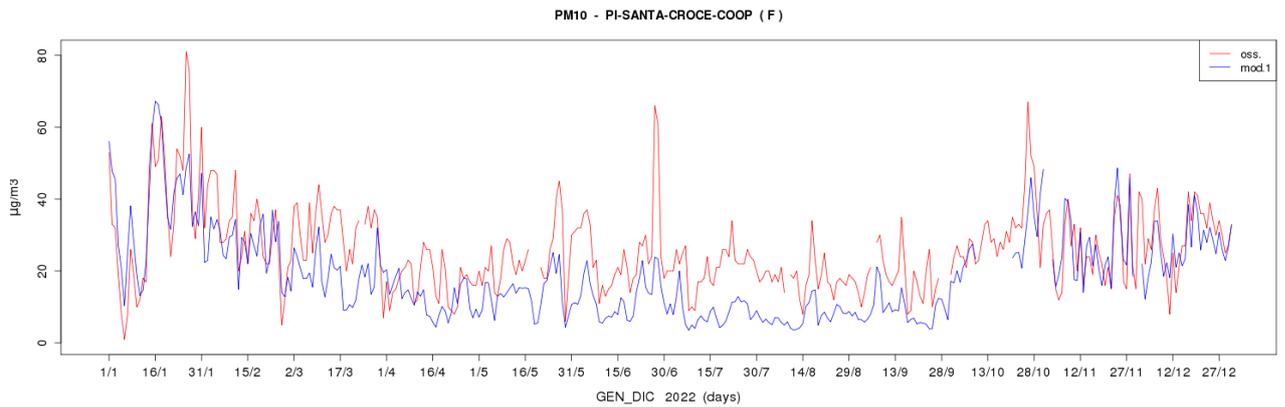


Figura 27. Serie storiche stimate (blu) rispetto alle centraline (rosso), per le stazioni di LU-Capannori e PI-Santa Croce.

Dallo scatter-plot per il PM10 (Figura 28) 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. Le stazioni di FI-Mosse, FI-Gramsci e PT-Montale cadono al di fuori dell'area verde ma comunque entro l'area arancione. Si ricorda che FI-Mosse e FI-Gramsci sono due stazioni urbane di traffico.

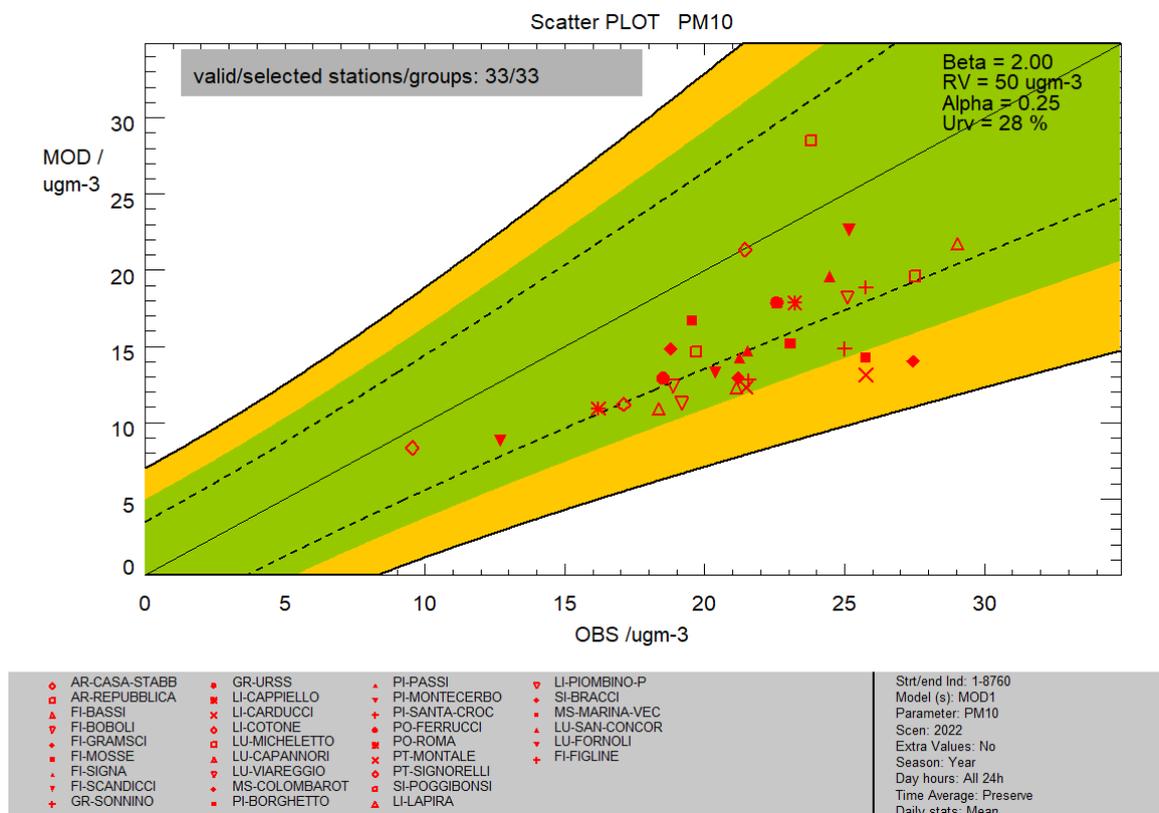


Figura 28. Scatter-plot relativo alle medie giornaliere (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di PM10.

La media giornaliera di PM10 è sempre sottostimata dal modello, come si può valutare dal target-plot di Figura 29, 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. L'indice MQI_HD globale è pari a 0.896, che rientra nel valore target per l'obiettivo di qualità.

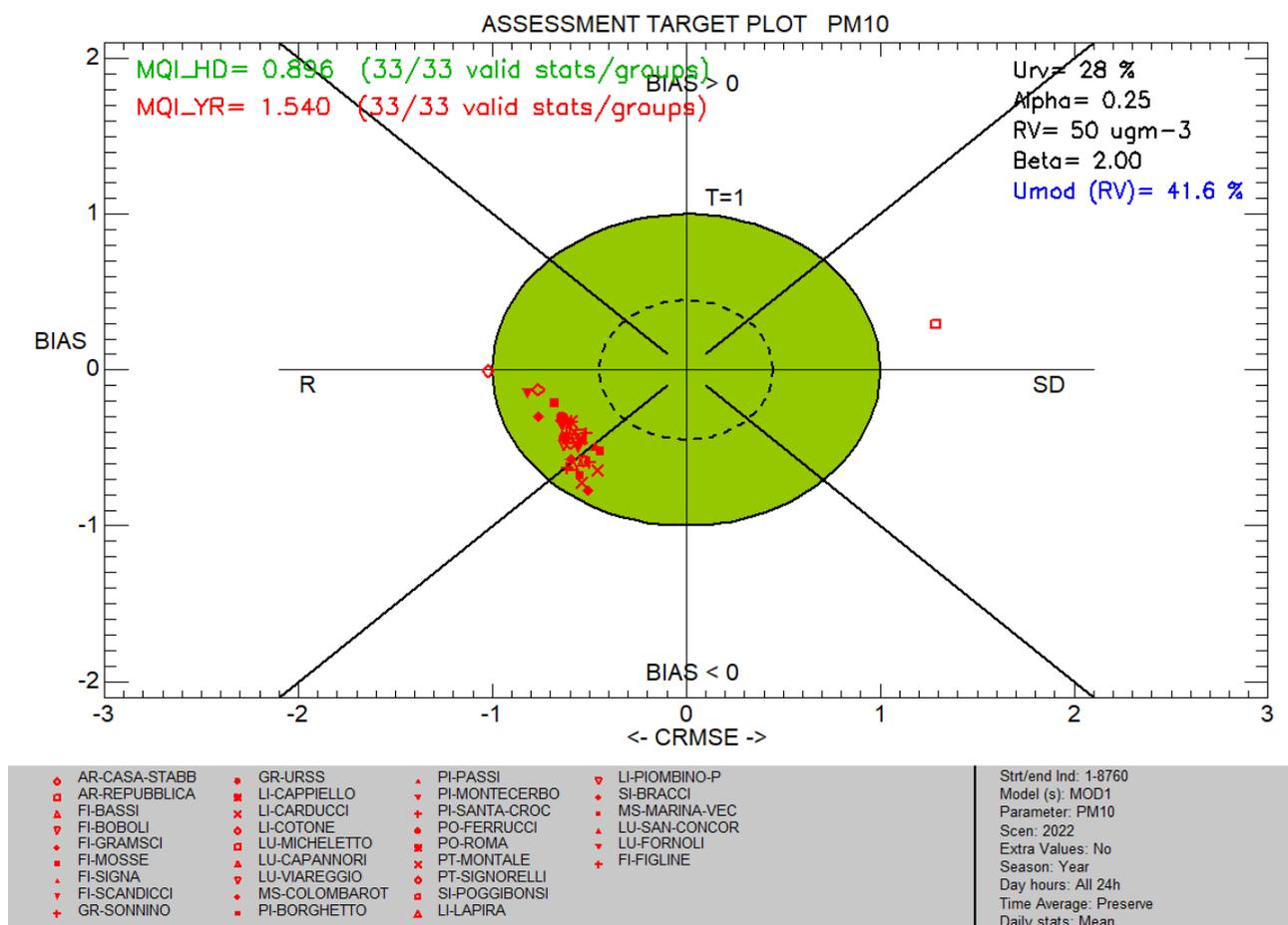


Figura 29. Assessment target plot relativo alle medie giornaliere di PM10 in corrispondenza delle stazioni della rete di monitoraggio.

Da un'analisi di tutti gli indicatori calcolati in corrispondenza delle centraline, anche per l'anno 2022 si rilevano delle criticità, con anche rilevanti sottostime. Tuttavia possiamo notare che gli index of agreement sono piuttosto elevati in corrispondenza di tutte le stazioni.

SKILL PM10 (day)														
NOME STAZIONE	TIPO	DATI PRESENTI STAZ [%]	DATI PRESENTI MOD [%]	MEDIA STAZ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MEDIA MOD [mg/m^3]	STD STAZ	STD MOD	FB	FE	RMSE	NMSE	BIAS	CORR	IOA
AR-ACROPOLI	F	94.8	95.9	20.45	15.59	10.34	14.08	-0.26	0.54	12.36	0.47	-4.63	0.60	0.72
AR-CASA-STABBI	F	94.3	95.9	9.61	8.35	6.71	4.55	-0.13	0.63	7.35	0.68	-1.20	0.22	0.49
AR-REPUBBLICA	T	97.5	95.9	23.85	28.31	11.31	26.11	0.18	0.60	20.98	0.65	4.69	0.66	0.66
FI-BASSI	F	93.2	95.9	21.24	12.34	10.27	8.07	-0.53	0.58	12.28	0.58	-8.83	0.59	0.63
FI-BOBOLI	F	95.3	95.9	18.94	12.28	10.07	7.48	-0.42	0.52	10.80	0.50	-6.49	0.55	0.64
FI-FIGLINE	F	96.7	95.9	21.68	12.78	10.41	7.40	-0.51	0.55	11.50	0.48	-8.78	0.70	0.67
FI-GRAMSCI	T	96.4	95.9	27.67	14.04	10.09	9.29	-0.65	0.69	16.08	0.67	-13.41	0.58	0.56
FI-MOSSE	T	97.0	95.9	25.85	14.23	12.70	9.45	-0.58	0.63	14.94	0.61	-11.52	0.67	0.64
FI-SCANDICCI	F	94.8	95.9	20.52	13.28	10.17	8.15	-0.42	0.50	10.75	0.43	-7.12	0.63	0.68
FI-SIGNA	F	96.2	95.9	21.57	14.80	12.64	10.13	-0.38	0.46	10.62	0.36	-6.81	0.77	0.79
GR-SONNINO	T	97.8	95.9	25.06	14.75	9.85	9.05	-0.51	0.60	14.27	0.55	-10.18	0.44	0.53
GR-URSS	F	97.8	95.9	18.52	12.89	7.99	7.24	-0.36	0.51	9.93	0.41	-5.62	0.43	0.58
LI-CAPPIELLO	F	97.0	95.9	16.19	10.95	7.35	5.13	-0.39	0.49	8.48	0.41	-5.26	0.48	0.59
LI-CARDUCCI	T	96.7	95.9	21.55	12.33	7.90	5.47	-0.54	0.56	11.31	0.48	-9.18	0.56	0.55
LI-COTONE	I	97.3	95.9	17.10	11.11	9.11	5.48	-0.42	0.51	9.66	0.49	-5.92	0.55	0.59
LI-LAPIRA	F	96.2	95.9	18.38	10.82	7.96	5.05	-0.51	0.56	10.17	0.52	-7.46	0.51	0.56
LI-PIOMBINO-PARCO-VIII-MARZO	F	96.4	95.9	19.14	11.11	8.58	5.44	-0.52	0.56	10.68	0.53	-7.91	0.55	0.56
LU-CAPANNORI	F	98.1	95.9	29.12	21.75	16.28	16.37	-0.29	0.43	13.86	0.30	-7.31	0.74	0.82
LU-FORNOLI	F	98.1	95.9	25.16	22.54	11.97	18.89	-0.11	0.46	13.91	0.34	-2.55	0.69	0.78
LU-MICHELETTO	T	98.4	95.9	28.01	19.59	13.00	14.82	-0.34	0.46	13.57	0.34	-7.93	0.69	0.77
LU-SAN-CONCORDIO	F	98.4	95.9	24.49	19.59	11.28	14.77	-0.22	0.42	11.69	0.29	-4.85	0.70	0.79
LU-VIAREGGIO	F	95.9	95.9	25.03	17.89	11.80	11.71	-0.32	0.42	11.53	0.29	-6.94	0.69	0.76
MS-COLOMBAROTTO	F	96.7	95.9	21.25	12.83	9.55	8.06	-0.48	0.57	12.00	0.53	-8.27	0.52	0.61
MS-MARINA-VECCHIA	T	97.3	95.9	19.47	16.52	8.65	11.13	-0.16	0.41	9.72	0.29	-2.89	0.58	0.72
PI-BORGHETTO	T	98.6	95.9	23.19	15.11	9.51	8.53	-0.41	0.46	10.45	0.31	-7.91	0.72	0.71
PI-MONTECERBOLI	F	96.7	95.9	12.73	8.86	7.61	4.18	-0.36	0.53	7.90	0.56	-3.88	0.44	0.55
PI-PASSI	F	93.4	95.9	21.38	14.29	9.36	8.02	-0.40	0.45	9.78	0.32	-7.01	0.70	0.72
PI-SANTA-CROCE-COOP	F	97.5	95.9	25.91	18.64	11.90	12.09	-0.31	0.41	11.16	0.26	-6.88	0.73	0.79
PO-FERRUCCI	T	93.4	95.9	22.63	17.60	12.27	13.66	-0.23	0.45	11.06	0.30	-4.69	0.71	0.80
PO-ROMA	F	94.5	95.9	23.18	17.60	13.80	13.63	-0.26	0.44	11.09	0.30	-5.36	0.75	0.83
PT-MONTALE	F	98.6	95.9	25.69	13.07	14.31	10.76	-0.65	0.68	15.80	0.74	-12.61	0.75	0.69
PT-SIGNORELLI	F	98.1	95.9	21.53	21.21	11.04	19.34	0.00	0.54	15.14	0.50	-0.11	0.62	0.72
SI-BRACCI	T	98.6	95.9	18.97	14.78	8.09	9.40	-0.24	0.53	10.76	0.42	-3.95	0.35	0.57
SI-POGGIBONSI	F	95.1	95.9	19.79	14.49	7.59	9.19	-0.30	0.46	9.74	0.33	-5.07	0.52	0.65

Tabella 2. Skill scores per il PM10 giornaliero del 2022.

3.1.1 Il contributo naturale al PM10

L'aerosol di origine naturale, in particolare polvere desertica e spray marino, costituisce una componente del PM10, che in alcuni casi contribuisce in modo significativo all'aumento dei livelli di concentrazione. Il sistema modellistico SPARTA fornisce una stima delle due componenti che, come è stato evidenziato nel corso del progetto PATOS [4], risulta attendibile per quanto riguarda l'individuazione degli episodi di entrambe le componenti. Di seguito vengono presentate tali stime per l'anno in esame.

Polvere desertica

Il sistema SPARTA stima il contributo derivante dalla polvere desertica utilizzando le condizioni al contorno fornite dal modello CHIMERE: grazie al meteo ad alta risoluzione, il sistema permette di individuare gli episodi desertici con una maggiore risoluzione spaziale sul territorio regionale.

Per l'individuazione dei giorni caratterizzati da contributi desertici significativi tramite l'approccio modellistico si utilizza un valore soglia, che nel nostro caso è stato scelto

pari a 5 µg/m³, in riferimento a quanto proposto in letteratura in studi riguardanti il territorio italiano [5].

Il metodo utilizzato consiste nel prendere in considerazione le serie temporali dei valori medi giornalieri di concentrazione di dust nell'anno 2022, 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 la stima della concentrazione di dust supera la soglia di 5 µg/m³, in corrispondenza di almeno una delle stazioni considerate. In tabella 3 sono riportate le date corrispondenti ai giorni affetti da contributi desertici, in base al metodo adottato. In tabella sono riportati per tali date i valori di concentrazione di dust minimi, medi e massimi, stimati da modello in corrispondenza delle 34 stazioni, in modo da rappresentare la variabilità sul territorio della concentrazione di polvere desertica. Si considera un episodio se le date individuate sono contigue, ed in tabella 5, gli episodi stimati si possono individuare con i colori alternati azzurro/bianco. Con questo metodo sono stati individuati 12 episodi: ciascuno di questi ha una durata, in termini di giorni, molto variabile, da 1 a 11, per un totale di 62 giorni. I giorni caratterizzati da importanti apporti di polvere desertica sono concentrati prevalentemente nel periodo primaverile e estivo (47 giorni, corrispondenti a 10 episodi).

date	MIN	MED	MAX	date	MIN	MED	MAX
28/03/2022	0.7	3.4	11.5	23/06/2022	11.5	16.0	18.7
29/03/2022	8.4	12.6	18.4	24/06/2022	3.8	7.2	9.9
30/03/2022	3.5	6.8	11.9	25/06/2022	1.4	3.2	6.7
31/03/2022	1.5	3.6	8.9	26/06/2022	6.1	8.9	12.1
21/04/2022	1.0	2.5	6.3	27/06/2022	11.8	17.1	22.4
22/04/2022	2.1	3.5	5.1	28/06/2022	12.3	17.9	24.2
23/04/2022	2.7	4.1	5.2	29/06/2022	5.0	9.1	13.8
06/05/2022	3.2	5.0	7.7	04/07/2022	3.1	6.7	13.0
07/05/2022	4.7	7.1	10.0	05/07/2022	8.7	13.3	18.3
08/05/2022	3.9	6.2	10.8	06/07/2022	1.7	3.9	8.3
10/05/2022	2.3	5.0	7.5	15/08/2022	1.9	4.4	8.6
12/05/2022	1.5	3.9	6.8	16/08/2022	4.5	7.7	10.8
13/05/2022	1.8	3.9	5.5	17/08/2022	6.6	9.2	14.9
14/05/2022	1.8	4.1	6.4	18/08/2022	9.4	12.3	16.6
15/05/2022	1.0	3.1	5.3	31/08/2022	2.8	3.8	5.3
17/05/2022	2.2	3.5	5.1	06/09/2022	3.1	4.8	7.8
22/05/2022	3.2	5.7	7.8	07/09/2022	11.5	16.1	21.6
23/05/2022	5.1	7.9	9.7	08/09/2022	8.4	15.0	34.1
24/05/2022	6.3	10.8	16.0	09/09/2022	0.2	1.3	5.4
25/05/2022	7.6	13.4	19.0	15/09/2022	4.1	7.3	12.3
26/05/2022	6.2	9.9	13.3	21/10/2022	3.1	5.0	8.1
27/05/2022	11.3	17.2	29.8	22/10/2022	2.9	5.1	9.4
28/05/2022	6.7	11.2	22.2	23/10/2022	2.4	4.3	9.1
31/05/2022	1.2	3.0	6.3	24/10/2022	1.9	3.2	5.9
01/06/2022	0.6	2.2	5.6	25/10/2022	4.8	8.0	11.6
03/06/2022	5.6	7.4	12.8	26/10/2022	8.0	12.8	17.1
04/06/2022	10.1	14.6	20.3	27/10/2022	9.2	11.4	16.8
05/06/2022	12.0	17.3	22.0	28/10/2022	3.6	6.1	9.7
06/06/2022	3.9	6.1	8.1	29/10/2022	2.4	4.0	6.6
21/06/2022	3.3	6.5	14.1	30/10/2022	3.5	5.7	11.0
22/06/2022	6.5	10.1	15.0	31/10/2022	3.4	5.7	8.8

Tabella 3. Episodi di intrusioni di polvere desertica nell'anno 2022, stima (SPARTA) delle concentrazioni minime, medie e massime di dust nelle 34 stazioni di PM10 della rete regionale.

Gli episodi individuati sulla base delle previsioni del modello CHIMERE, Alert Dust, servizio per la previsione di intrusioni desertiche sviluppato per il progetto PATOS [4], attualmente operativo, e sulla base delle stime di SPARTA con i criteri sopra descritti, sono gli stessi.

A titolo di esempio, di seguito sono riportati i grafici relativi alla concentrazione media giornaliera di PM10 misurata nelle stazioni di AR-Casa Stabbi e di PI-Montecerboli (barre blu), contrapposta alla concentrazione di polvere desertica stimata da SPARTA (linea rossa). Si tratta di due stazioni rurale/suburbana di fondo, in cui i contributi desertici al PM10 si distinguono in modo più netto rispetto a quanto accade nelle stazioni urbane: i principali episodi di intrusione di polvere desertica individuati con l'approccio modellistico corrispondono effettivamente a picchi di concentrazione di PM10 misurati nelle stazioni in esame (Fig. 30, 31). Tuttavia si può notare che il principale episodio attribuibile a intrusione desertica rilevato nelle stazioni di PM10 a fine giugno è stato sottostimato in termini quantitativi, in particolare il secondo picco. Anche l'episodio di ottobre, pur essendo stato individuato correttamente, è probabilmente sottostimato dal modello.

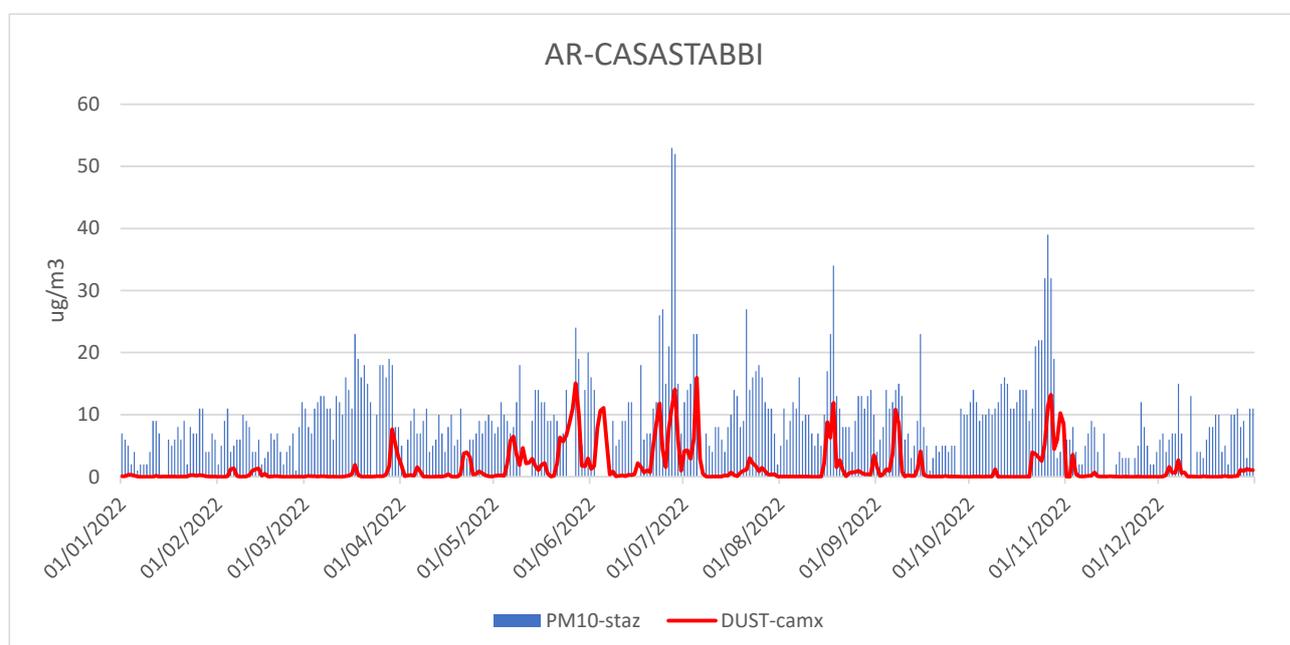


Figura 30. Serie storiche, confronto tra la concentrazione media giornaliera di dust stimato da modello (linea rossa) e PM10 misurato (barre blu) nella stazione di AR-CasaStabbi.

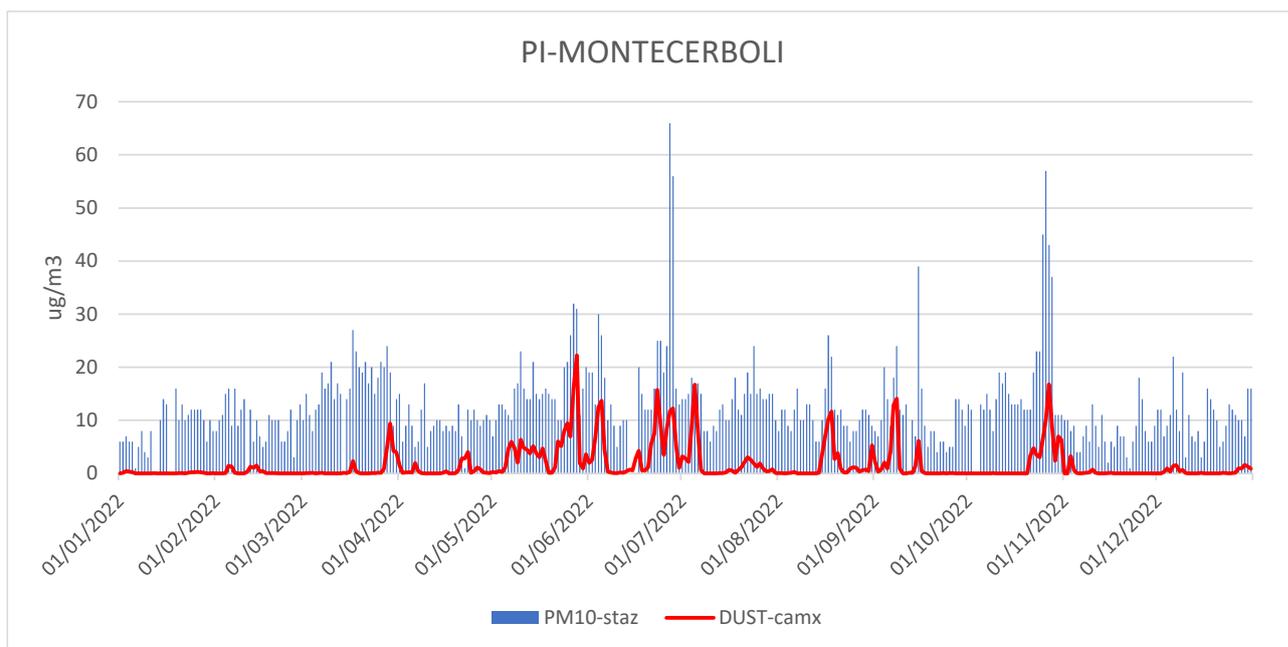


Figura 31. Serie storiche, confronto tra la concentrazione media giornaliera di dust stimato da modello (linea rossa) e PM10 misurato (barre blu) nella stazione di PI-Montecerboli.

Nel capitolo 2 sono state descritte le condizioni meteo di alcuni dei principali episodi di trasporto desertico, anche con l'ausilio di immagini satellitari (29 marzo, 27-28 giugno, 18 agosto, 26 ottobre). In particolare, gli episodi di fine giugno e di fine ottobre hanno portato ad un notevole aumento dei livelli di concentrazione di PM10 e al superamento del valore limite in molte delle stazioni della rete regionale [6, 7]. Per l'identificazione dei giorni di superamento dovuti ai contributi naturali e la successiva sottrazione dal conteggio annuale, ARPAT adotta il metodo di riferimento secondo quanto indicato dalle linee guida europee [7].

Spray marino

Per la valutazione del contributo dello spray marino al PM10, in particolare per l'individuazione degli episodi più significativi, viene qui utilizzato il metodo messo a punto nell'ambito del progetto PATOS3 [4]. Il metodo adottato si basa sull'utilizzo dei dati di vento misurati in una stazione costiera, in particolare nella stazione meteo Comma di Livorno. Il fenomeno in esame, infatti, ha effetti significativi non solo sulla costa in prossimità della stazione meteo, ma anche nelle aree interne. Sulla base dei dati di vento rilevati nell'anno 2022 e dei valori soglia scelti 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 significativo, sia sulla costa sia nelle aree interne.

Episodi	DV	VV (m/s)	MIN (ug/m3)	MED (ug/m3)	MAX (ug/m3)
04/01/2022	SW	4.7	1.9	2.6	3.7
05/01/2022	SW	4.4	1.3	1.8	3.0
07/02/2022	NW	5.8	2.4	3.6	5.4
21/02/2022	NW	6.6	3.1	4.0	5.1
01/04/2022	NW	10.7	2.7	4.3	5.8
07/04/2022	W	6.1	1.4	3.7	6.4
08/04/2022	W	6.4	3.9	6.8	9.7
09/04/2022	NW	9.2	3.7	5.6	7.4
24/04/2022	NW	4.4	2.8	4.0	5.2
07/06/2022	NW	4.3	1.1	2.7	5.0
08/06/2022	NW	4.9	0.5	2.2	3.8
09/06/2022	W	4.2	0.4	1.2	1.8
29/06/2022	NW	4.2	1.1	1.5	2.1
09/09/2022	NW	8.0	0.9	2.6	4.5
10/09/2022	NW	7.9	1.4	3.3	4.6
14/09/2022	SW	4.1	0.7	1.6	3.1
15/09/2022	NW	5.4	1.0	2.2	3.4
16/09/2022	NW	10.0	1.7	4.0	6.7
26/09/2022	NW	5.0	0.5	1.0	1.8
27/09/2022	NW	10.6	3.4	5.3	6.8
28/09/2022	W	11.4	4.4	6.2	7.9
29/09/2022	NW	9.6	3.3	5.6	7.3
01/10/2022	NW	6.4	1.3	2.3	4.3
22/10/2022	SW	5.0	1.6	3.4	5.8
04/11/2022	NW	8.3	3.0	4.2	5.3
17/11/2022	SW	5.9	1.6	2.4	3.8
18/11/2022	NW	8.5	1.8	2.9	4.6
11/12/2022	NW	6.2	0.4	0.9	2.4
28/12/2022	NW	4.1	0.9	1.1	1.5
29/12/2022	SW	4.1	0.9	1.2	1.9

Tabella 4. 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.

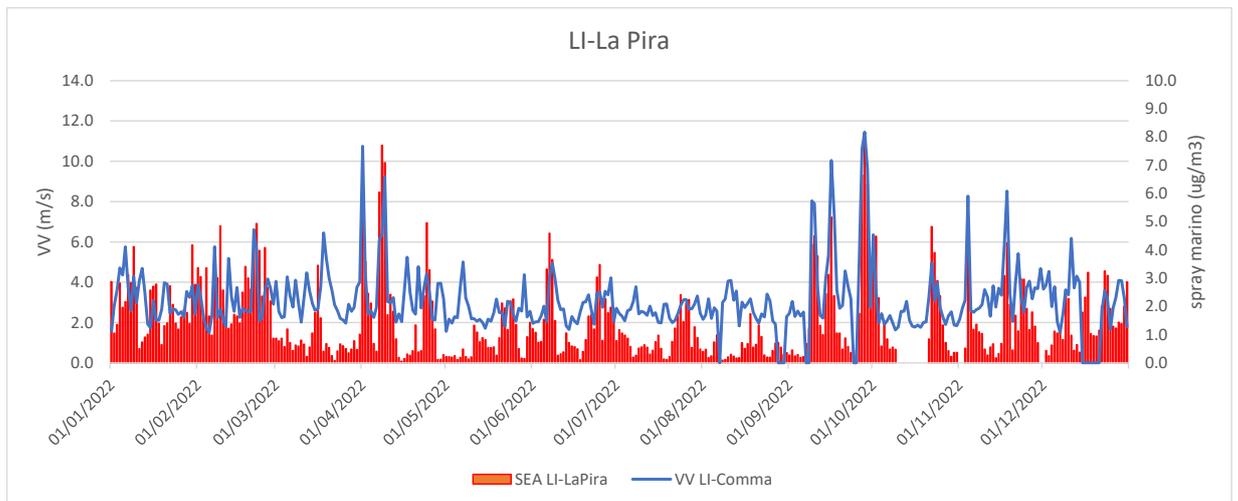
Per le date relative agli episodi significativi di spray marino, nella tabella 4, sono riportati i valori di concentrazione minimi, medi e massimi, stimati da SPARTA in corrispondenza delle 34 stazioni di PM10 della rete regionale, in modo da rappresentare la variabilità della componente marina sul territorio. Sono stati individuati 16 episodi, della durata di pochi giorni, da 1 a 5 giorni, per un totale di 30 giorni.

Nella tabella 5 è riportato il valore medio della velocità del vento misurato nella stazione meteo Comma di Livorno, come pure il valore medio della concentrazione di spray marino stimata da modello, mediato sui valori corrispondenti alle 34 stazioni di PM10 della rete regionale, durante gli episodi e durante tutto l'anno 2022. I valori di concentrazione stimati da modello per lo spray marino durante gli episodi sono più alti rispetto al valore medio annuo di questa componente (Tab. 5), pur rimanendo mediamente dell'ordine di 3-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con rari casi di valori superiori a 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tab. 5).

	Misure VV (m/s)		Stime Spray marino (ug/m3)	
	episodi	anno	episodi	anno
media	6.6	3.2	3.1	1.2

Tabella 5. Velocità media del vento misurato nella stazione meteo Comma di Livorno, 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 2022.

Nei grafici in Fig. 32 sono riportati i valori di velocità del vento misurato nella stazione meteo COMMA di Livorno (asse y a sinistra, linea blu), e le stime modellistiche di concentrazione di spray marino in corrispondenza della stazione di LI-La Pira, LU-Viareggio e LU-Capannori (asse ordinate a destra, barre rosse). Nei tre grafici si può osservare una buona correlazione tra gli episodi di spray marino stimati e le misure di vento. Tuttavia, la sola indicazione della velocità del vento non è sufficiente, in quanto solo il vento moderato o forte proveniente dai settori occidentali è correlato all'aumento dello spray marino: a titolo di esempio, si possono individuare tre episodi, il 18 marzo, il 17 aprile e il 7 maggio, in cui il vento di forte intensità, in questi casi proveniente da est, è anticorrelato con l'aerosol marino.



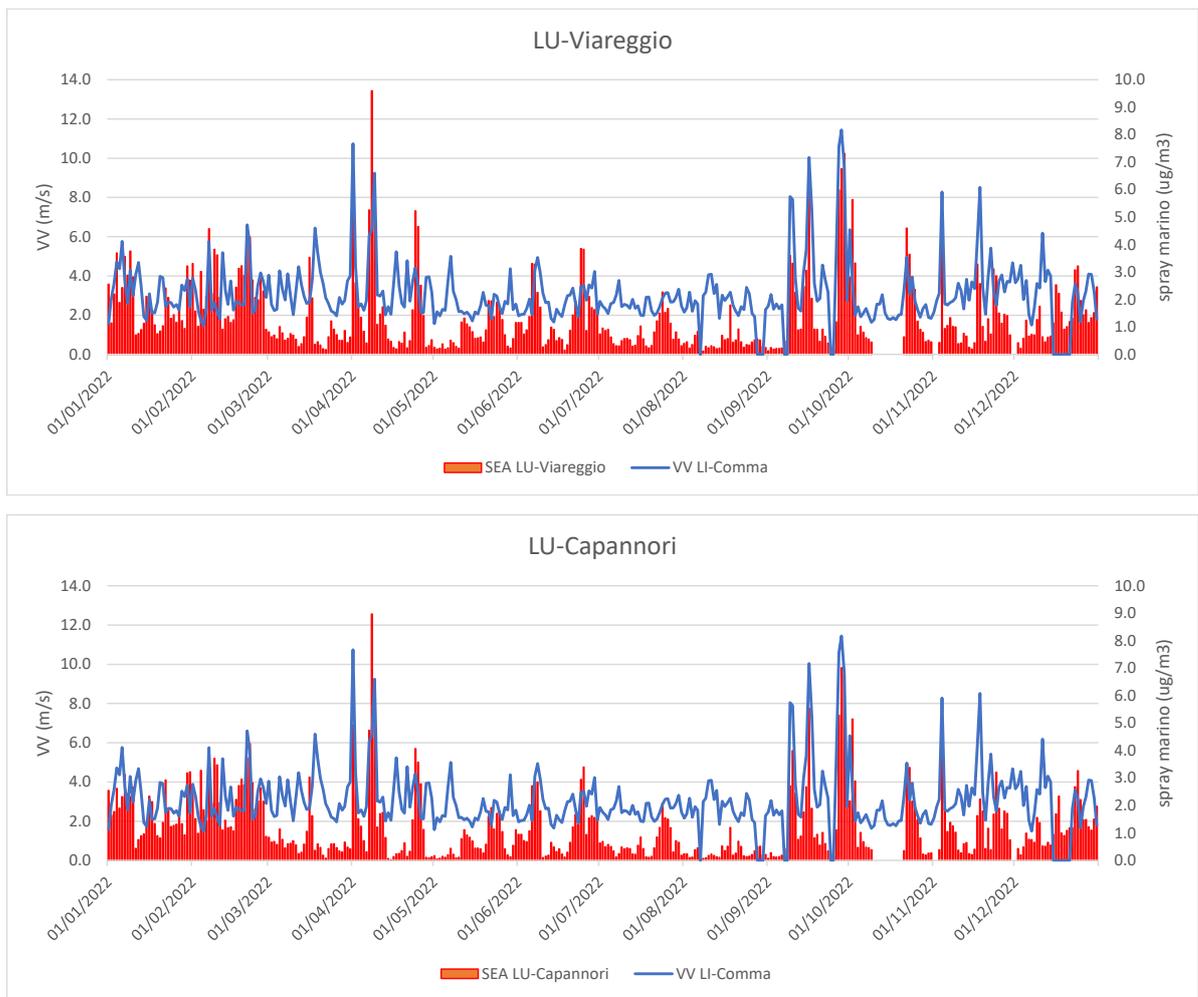


Figura 32. Media giornaliera delle concentrazioni di spray marino stimato da modello (barre rosse) nella stazione LI-La Pira (sopra), LU-Viareggio (centro), LU-Capannori (sotto) e velocità del vento misurato presso la stazione meteo Comma di Livorno (linea blu).

Come riscontrato nelle analisi effettuate negli anni precedenti [10, 11], le condizioni meteo favorevoli al trasporto di spray marino sono sfavorevoli all'accumulo degli inquinanti, quindi il contributo marino va a sommarsi a livelli di PM10 generalmente 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 sulla Toscana anche da direzioni occidentali [12]. Infatti, confrontando le tabelle 4 e 5, in cui sono riportate rispettivamente le date degli episodi di dust e spray marino, si può notare che in alcuni casi episodi di trasporto desertico e di aerosol marino coincidono: nei giorni 29 giugno, 9 e 15 settembre, 22 ottobre si verificano entrambi gli episodi. In particolare, il 15 settembre la concentrazione di PM10 misurata nelle stazioni di LI-Cotone e LI-Piombino supera il valore limite: in questo caso, sottraendo sia il contributo desertico (stimato da SPARTA pari a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) che il contributo dello spray marino (stimato da SPARTA pari a $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), il valore di concentrazione di PM10 misurata nelle due stazioni risulterebbe inferiore al valore limite.

Più in generale, se si considerano i valori di concentrazione di PM10 misurati nelle 34 stazioni di monitoraggio della rete regionale [6, 7] in corrispondenza degli episodi di spray marino (Tab. 3), si nota che i valori medi sono bassi, dell'ordine di 15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, come pure i valori massimi, dell'ordine di 25-35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Fanno eccezione 5 episodi, tra cui il 15 settembre con superamenti dovuti al trasporto di origine desertica, già commentato. Negli altri episodi una sola stazione supera il valore limite, a fronte di valori decisamente più bassi nelle altre stazioni della rete: nei giorni 8 e 9 aprile si ha il superamento nella stazione di LU-Viareggio, il 17 novembre nella stazione FI-Mosse, il 28 dicembre nella stazione di LU-Capannori. Per quanto riguarda l'episodio di aprile, nella stazione di LU-Viareggio, a valori elevati di PM10 (66, 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, misure) corrispondono valori decisamente bassi di PM2.5 (11, 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, misure), evidenziando in questo caso che il contributo maggiore al PM10 deriva dalla frazione grossa. Si può ipotizzare che, oltre al contributo marino (stimato 9, 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), un importante contributo derivi da una componente crostale locale (es. risollevarimento di sabbia).

PM10	MIN	MEDIA	MAX
04/01/2022	2	16	30
05/01/2022	4	12	19
07/02/2022	6	21	37
21/02/2022	4	20	50
01/04/2022	5	19	38
07/04/2022	6	18	32
08/04/2022	8	23	66
09/04/2022	11	24	55
24/04/2022	6	11	20
07/06/2022	10	20	26
08/06/2022	9	19	28
09/06/2022	5	13	22
29/06/2022	15	21	28
09/09/2022	12	19	29
10/09/2022	6	17	30
14/09/2022	7	16	35
15/09/2022	22	34	62
16/09/2022	8	21	35
26/09/2022	3	12	20
27/09/2022	10	19	44
28/09/2022	11	20	36
29/09/2022	9	16	32
01/10/2022	12	17	25
22/10/2022	19	28	39
04/11/2022	4	16	29
17/11/2022	2	22	60
18/11/2022	4	19	33
11/12/2022	4	15	27
28/12/2022	9	26	54
29/12/2022	3	18	36
Media	8	19	36

Tabella 6. Elenco degli episodi di spray marino e relative concentrazioni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) minime, medie e massime stimate dal sistema SPARTA.

3.2 PM2.5

La distribuzione spaziale della concentrazione di particolato atmosferico PM2.5, stimata come media annua per il 2022, all'interno del dominio toscano, è molto simile a quella già descritta per il PM10 (Figura 33): raggiunge i valori più alti nelle aree della piana Firenze-Prato-Pistoia, nella Piana Lucchese, nel Valdarno Superiore e nella Valle del Serchio.

Durante il periodo invernale (Figura 34), come per il PM10, il PM2.5 raggiunge valori di concentrazione più alti, mentre nei mesi primaverili-estivi le concentrazioni sono molto basse (Figura 35).

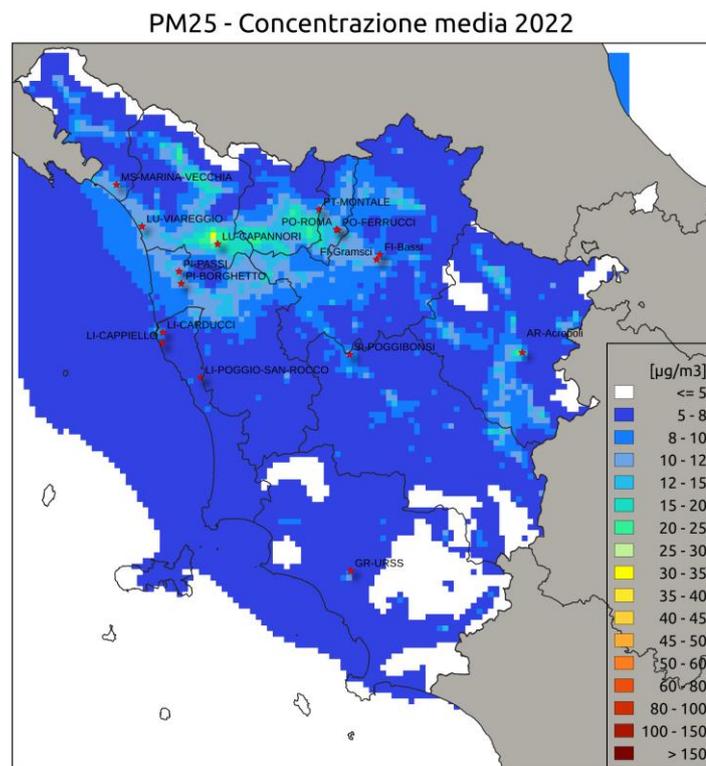


Figura 33. Concentrazione media annuale 2022 delle stime di PM2.5

PM25 - Concentrazione media inverno 2022

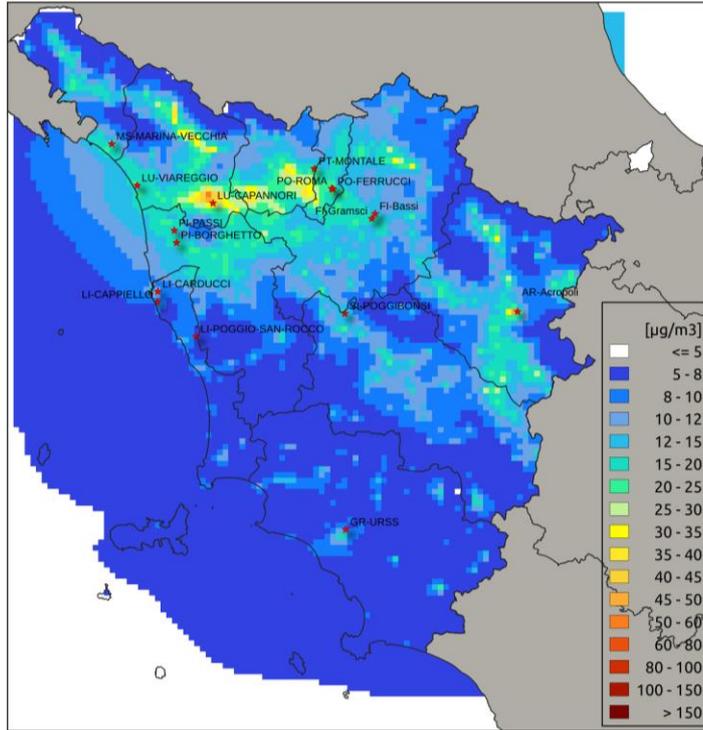


Figura 34. Concentrazione media invernale (gen-mar e ott-dic) 2022 delle stime di PM2.5

PM25 - Concentrazione media estate 2022

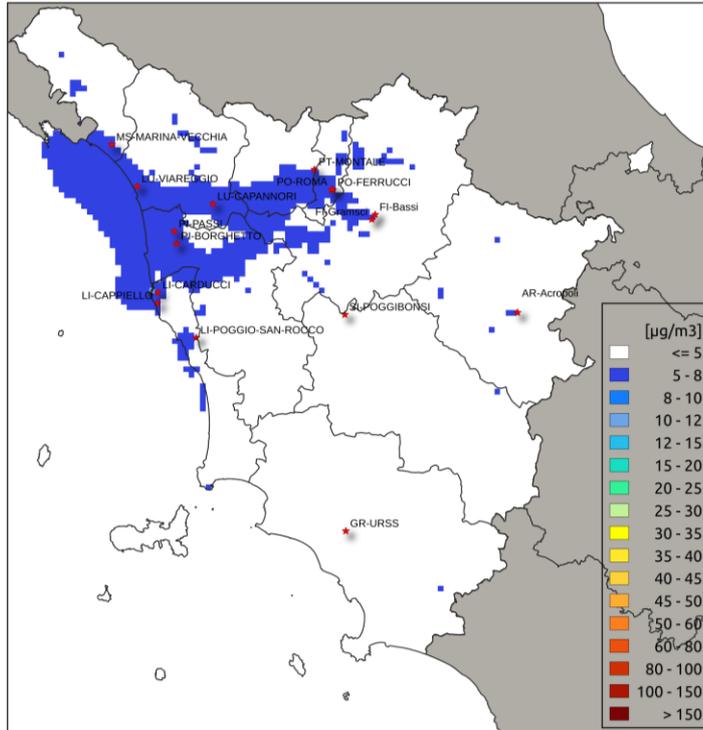


Figura 35. Concentrazione media estiva (apr-sett) 2022 delle stime di PM2.5

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 36, il modello sottostima nel periodo primavera-estate, mentre nel periodo invernale c'è un miglior accordo tra i valori.

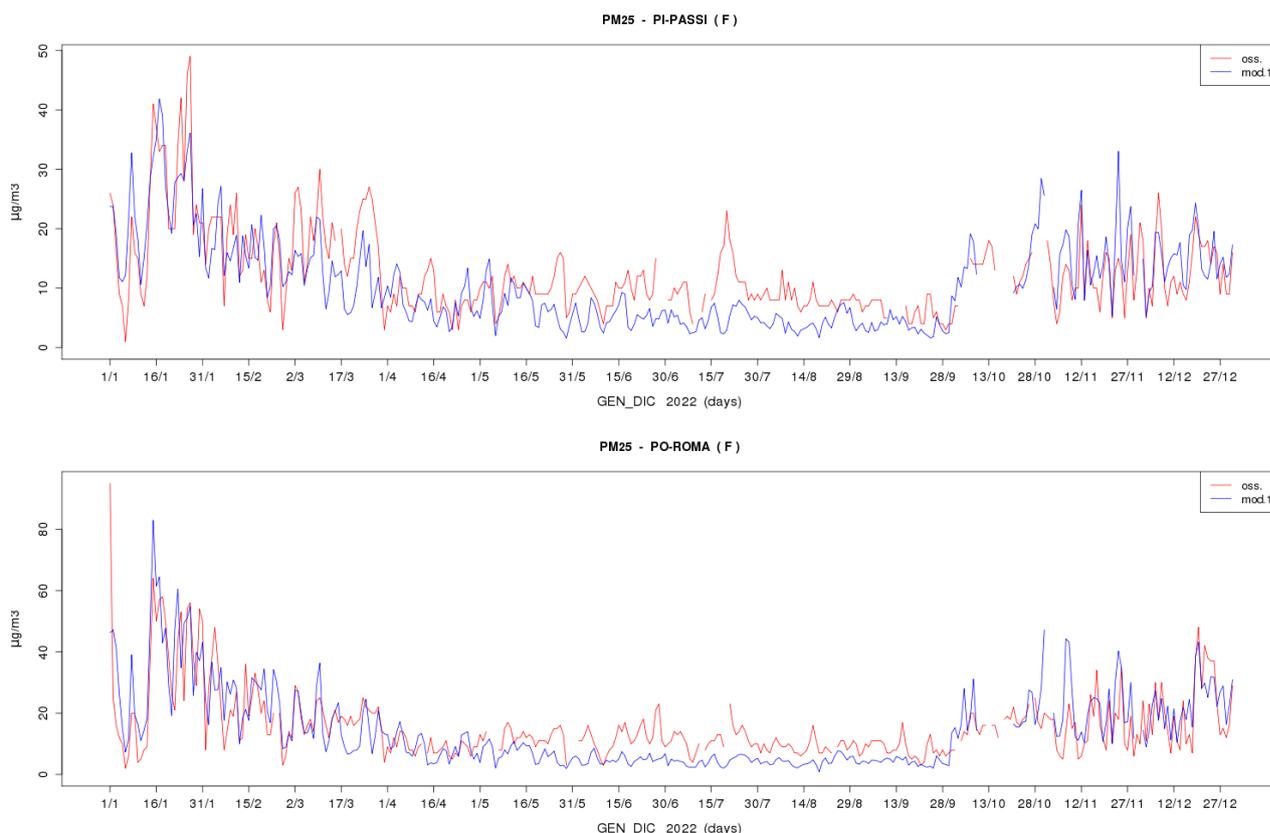


Figura 36. Serie storiche stimate (blu) rispetto alle centraline (rosso), per le stazioni di PI-Passi e PO-Roma.

Dallo scatter-plot per il PM2.5 (Figura 37) 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 con numero di dati validi superiore al 75%, cadono all'interno dell'area di confidenza tratteggiata, e sono piuttosto vicine alla linea ottimale (bisettrice).

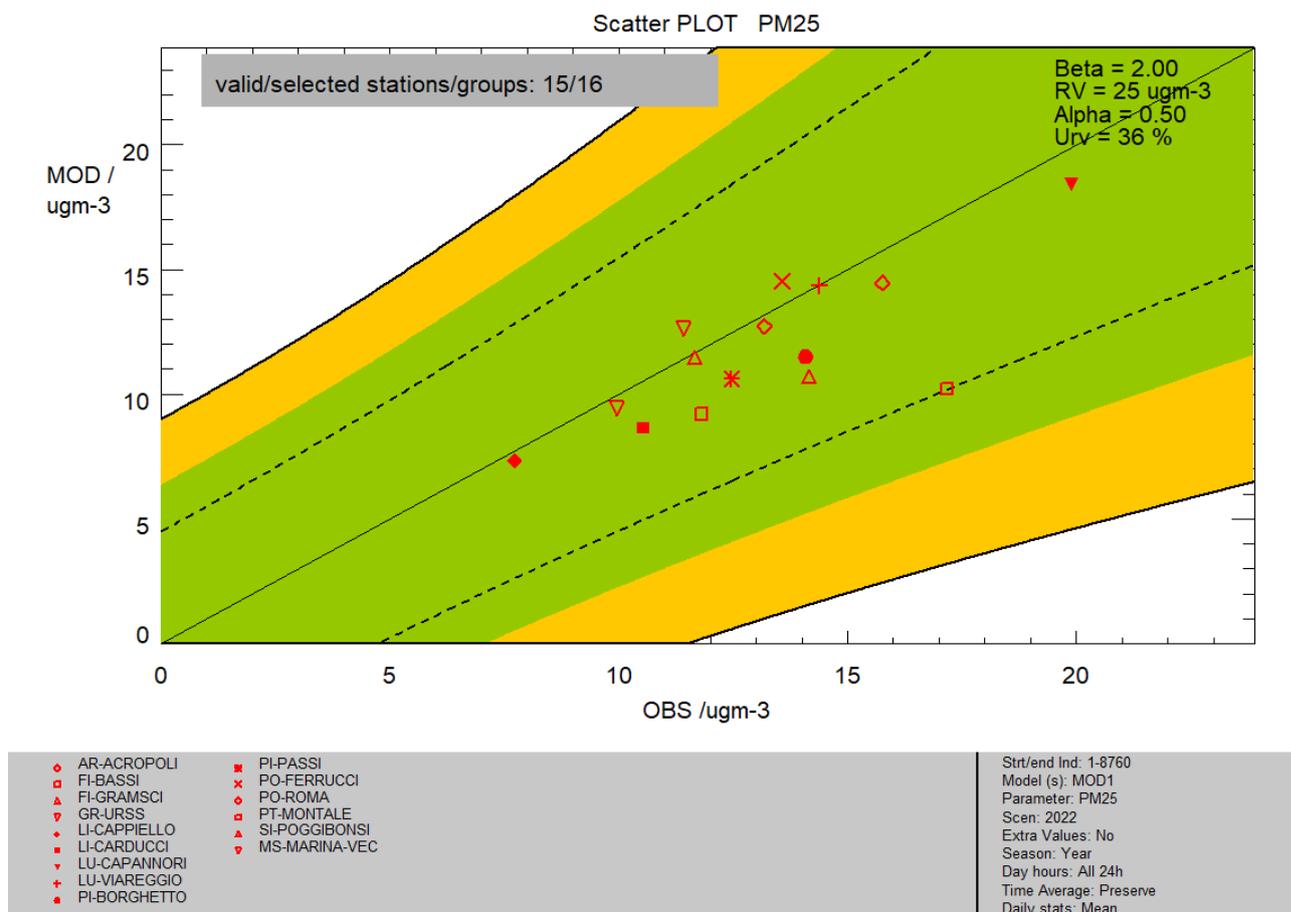


Figura 37. Scatter-plot relativo alle medie giornaliere (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di PM2.5 della rete regionale.

L'obiettivo di qualità per il modello viene pienamente raggiunto per il PM2.5, con un valore di MQI_HD pari a 0.682 (Figura 38). Per questo inquinante, viene raggiunto anche l'obiettivo basato sui valori medi annuali (MQI_YR=0.401).

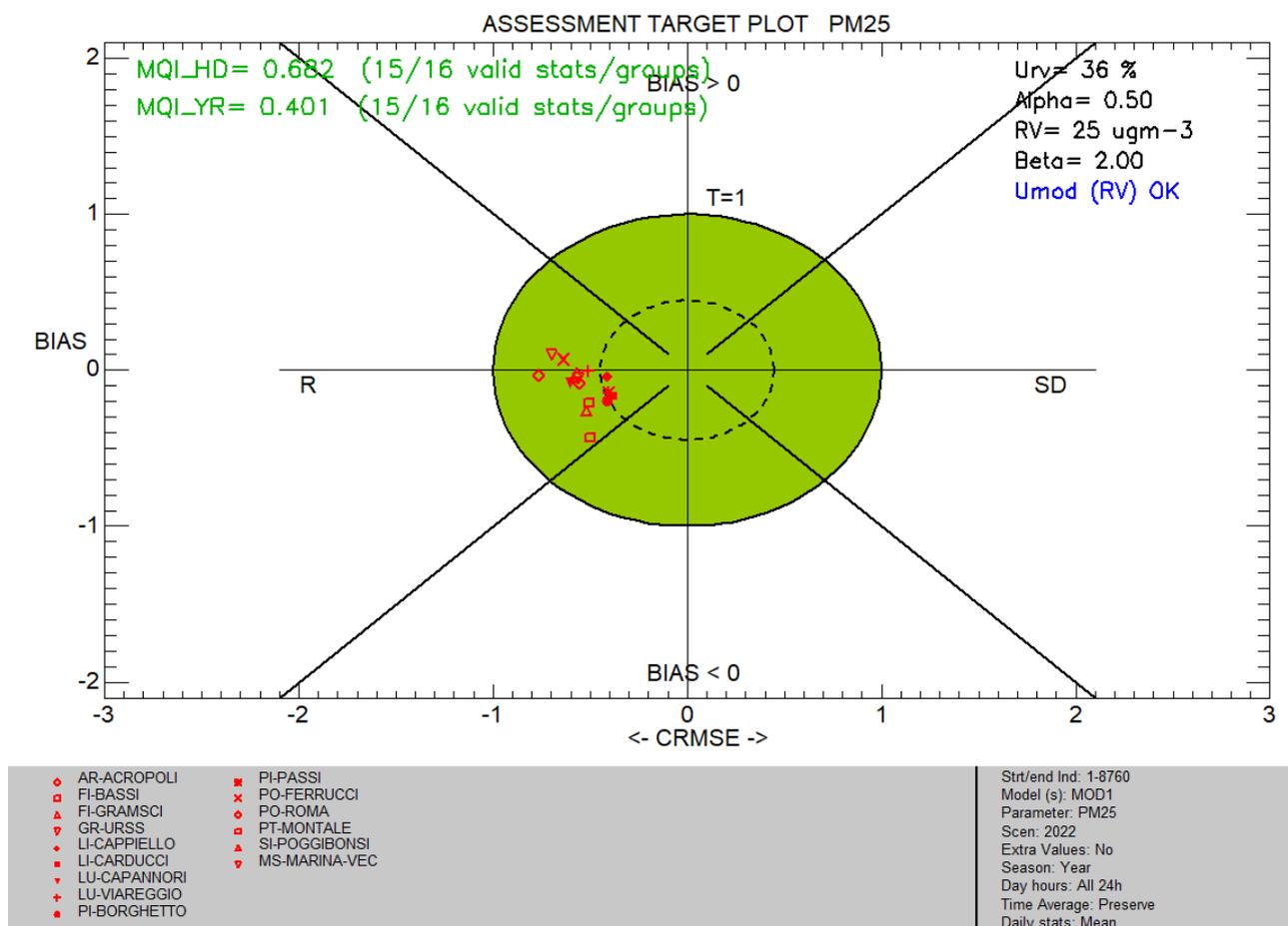


Figura 38. Assessment target plot relativo alle medie giornaliere in corrispondenza delle stazioni di PM2.5 della rete regionale.

Anche gli skill scores affermano che la simulazione modellistica per il PM2.5 raggiunge ottimi livelli di performance, registrando correlazioni e index of agreement molto elevati, fatta eccezione per LI-Cappiello, GR-URSS e LI-Poggio San Rocco; si ricorda che quest'ultima è comunque una centralina appartenente alla rete provinciale e non a quella regionale.

SKILL PM2.5 (day)														
NOME STAZIONE	TIPO	DATI PRESENTI STAZ [%]	DATI PRESENTI MOD [%]	MEDIA STAZ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MEDIA MOD [mg/m^3]	STD STAZ	STD MOD	FB	FE	RMSE	NMSE	BIAS	CORR	IOA
AR-ACROPOLI	F	94.8	95.9	13.18	12.54	8.03	13.73	-0.04	0.55	10.08	0.61	-0.47	0.69	0.76
FI-BASSI	F	92.6	95.9	11.85	9.29	7.06	7.40	-0.25	0.47	6.81	0.43	-2.60	0.62	0.76
FI-GRAMSCI	T	96.4	95.9	14.26	10.73	6.79	8.65	-0.28	0.49	7.77	0.40	-3.45	0.62	0.73
GR-URSS	F	97.5	95.9	10.01	9.36	3.66	6.49	-0.06	0.54	6.31	0.42	-0.54	0.34	0.55
LI-CAPPIELLO	F	97.3	95.9	7.79	7.31	3.27	3.91	-0.05	0.44	4.31	0.33	-0.40	0.30	0.57
LI-CARDUCCI	T	96.4	95.9	10.63	8.60	4.30	4.28	-0.20	0.38	4.80	0.25	-1.91	0.47	0.67
LI-POGGIO-SAN-ROCCO	F	75.6	95.9	7.56	6.21	3.57	2.96	-0.18	0.49	4.35	0.40	-1.23	0.19	0.51
LU-CAPANNORI	F	98.1	95.9	19.92	18.26	14.84	16.04	-0.08	0.40	10.93	0.33	-1.50	0.76	0.86
LU-VIAREGGIO	T	95.1	95.9	14.37	14.02	9.08	11.41	0.00	0.39	7.10	0.24	-0.03	0.78	0.87
MS-MARINA-VECCHIA	T	95.9	95.9	11.35	12.43	6.12	10.40	0.10	0.49	8.54	0.51	1.20	0.58	0.69
PI-BORGHETTO	F	98.6	95.9	14.18	11.41	7.10	8.05	-0.20	0.39	6.08	0.23	-2.60	0.74	0.83
PI-PASSI	T	93.4	95.9	12.56	10.61	7.22	7.52	-0.16	0.38	5.48	0.23	-1.84	0.76	0.85
PO-FERRUCCI	F	93.7	95.9	13.57	14.30	9.67	13.08	0.07	0.46	8.84	0.40	0.98	0.74	0.83
PO-ROMA	F	95.9	95.9	15.75	14.30	11.47	13.10	-0.09	0.43	8.54	0.32	-1.29	0.77	0.87
PT-MONTALE	F	98.6	95.9	17.10	10.18	12.75	10.23	-0.51	0.57	10.63	0.64	-6.94	0.78	0.80
SI-POGGIBONSI	F	95.1	95.9	11.71	11.31	4.88	8.93	-0.02	0.48	6.85	0.35	-0.21	0.65	0.73

Tabella 7. Skill scores per il PM2.5 giornaliero 2022.

3.3 NO2

Il biossido di azoto, NO₂, 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 µg/m³ di concentrazione, da non superare più di 18 volte in un anno e un valore limite medio annuale pari a 40 µg/m³.

La valutazione dei livelli di concentrazione simulati al suolo dal modello è affrontata a partire dalla concentrazione media annua (Figura 39) e stagionale (Figura 40 e Figura 41) per ogni cella del grigliato di calcolo alla risoluzione di 4km². Per tutti i grafici, è stato scelto di utilizzare una scala di colori in grado di evidenziare in maniera immediata la distribuzione territoriale di eventuali criticità. Nei centri urbani più antropizzati come quelli della piana Firenze-Prato-Pistoia le concentrazioni annue stimate sono mediamente inferiori ai 35 µg/m³. Qui le sorgenti emissive sono prevalentemente legate al traffico, sia urbano che extraurbano, e al riscaldamento. L'analisi delle mappe medie, evidenzia bene le concentrazioni più elevate in corrispondenza delle principali arterie autostradali, con stime che si attestano al di sotto dei 25 µg/m³. Valori più elevati, ma sempre al di sotto del limite normato, si rilevano anche nelle aree in cui sono presenti grosse fonti industriali: comprensorio cartario nell'area della piana lucchese, nell'area del Valdarno pisano e nelle città portuali di Livorno e Piombino. La variabilità stagionale non è molto marcata: da aprile a settembre si nota una certa riduzione generale ad eccezione delle aree portuali.

NO2 - Concentrazione media 2022

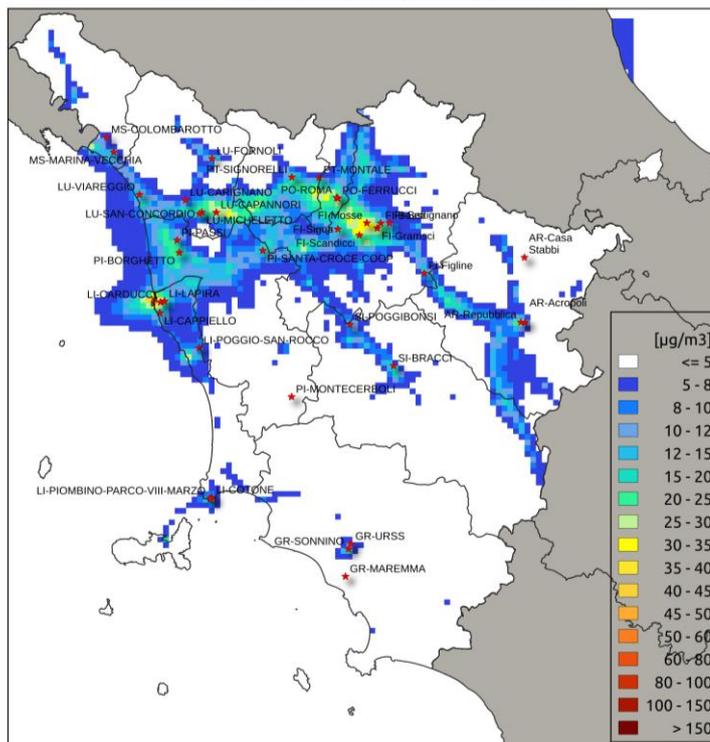


Figura 39. Concentrazione media annuale 2022 delle stime di NO2

NO2 - Concentrazione media inverno 2022

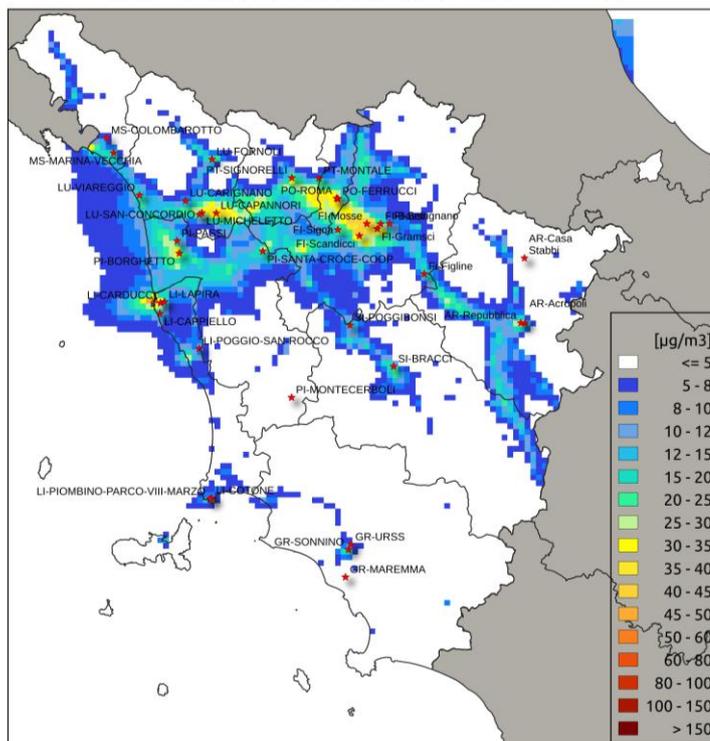


Figura 40. Concentrazione media invernale (gen-mar e ott-dic) 2022 delle stime di NO2

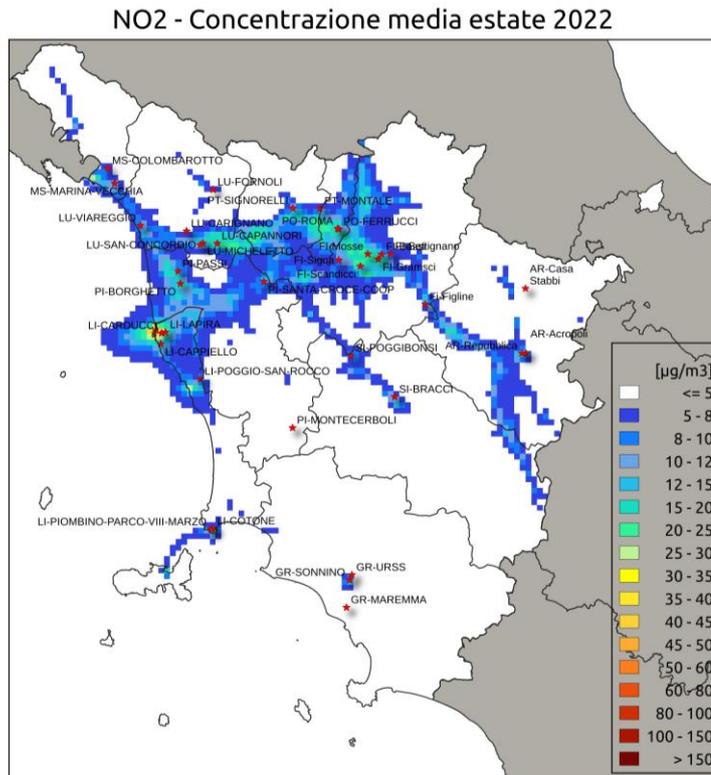


Figura 41. Concentrazione media estiva (apr-sett) 2022 delle stime di NO2

Un'analisi puntuale e temporale è effettuata attraverso l'affiancamento delle serie storiche delle medie giornaliere, stimate e misurate, della concentrazione di NO2. 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. 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 42).

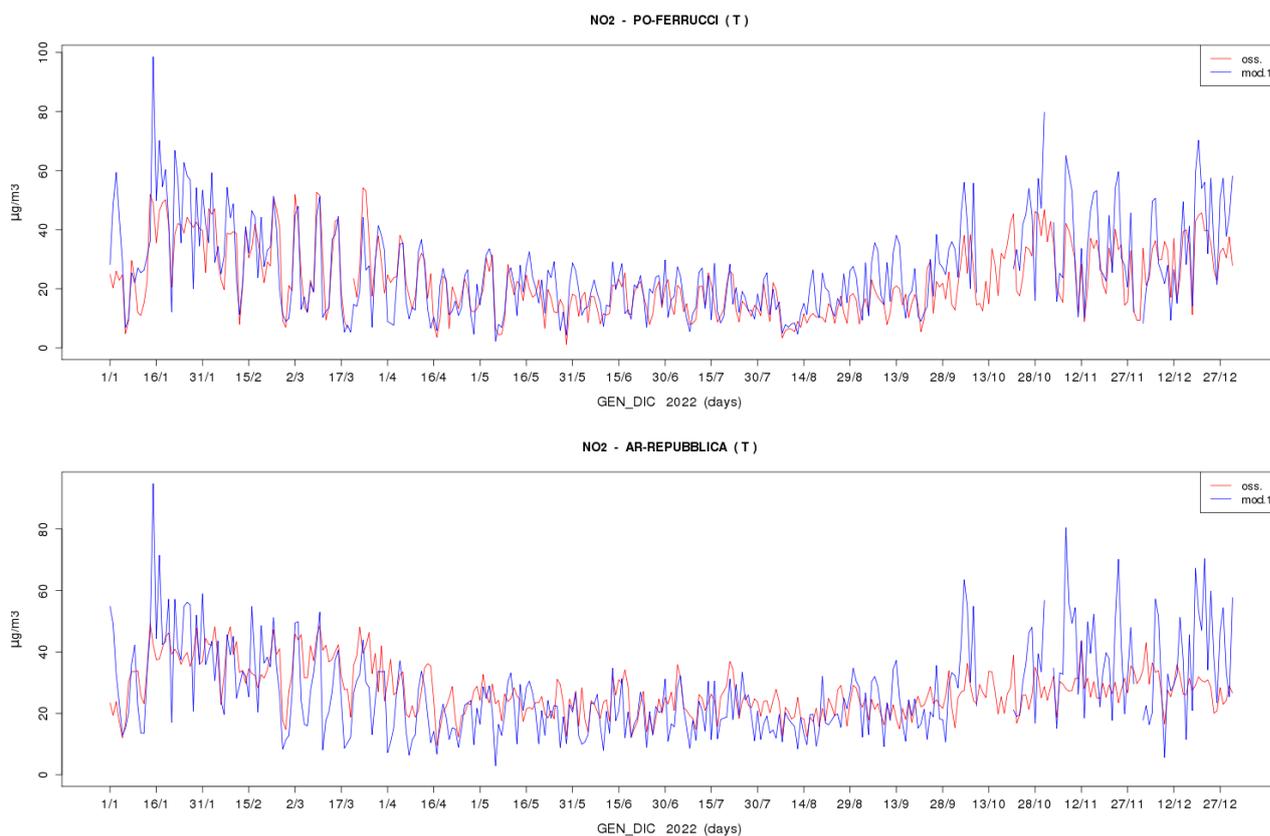


Figura 42. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu)

Per altre centraline di traffico, la sottostima è evidente e riguarda tutto l'anno come si vede dai grafici di figura 43. Occorre puntualizzare che la risoluzione del modello (4km^2) non permette di descrivere accuratamente situazioni sito-specifiche con impatti in aree di dimensioni inferiori a tale risoluzione. Il modello infatti, 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.

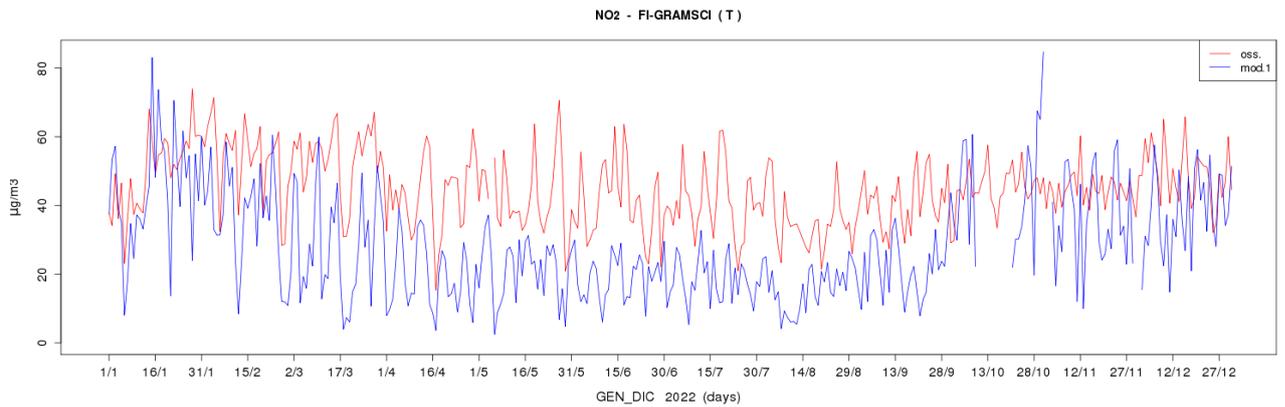
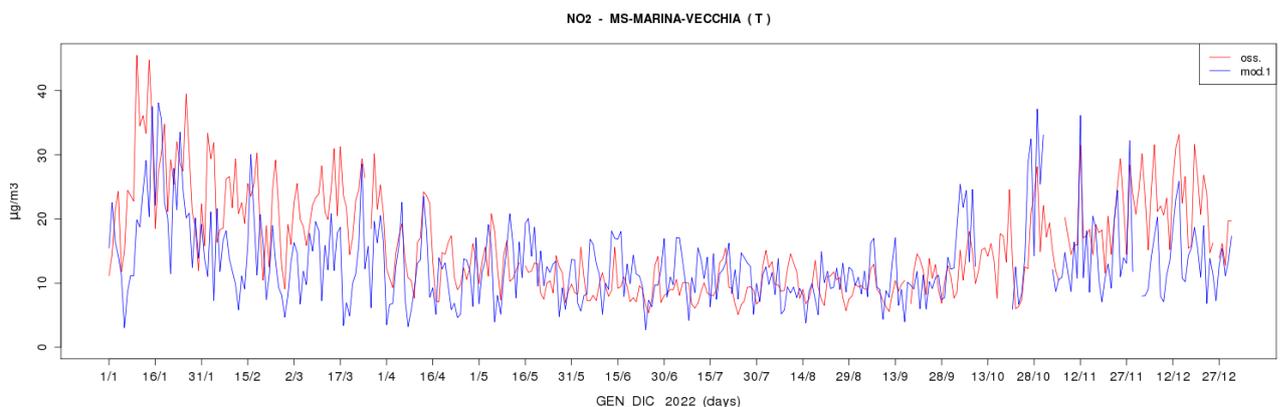
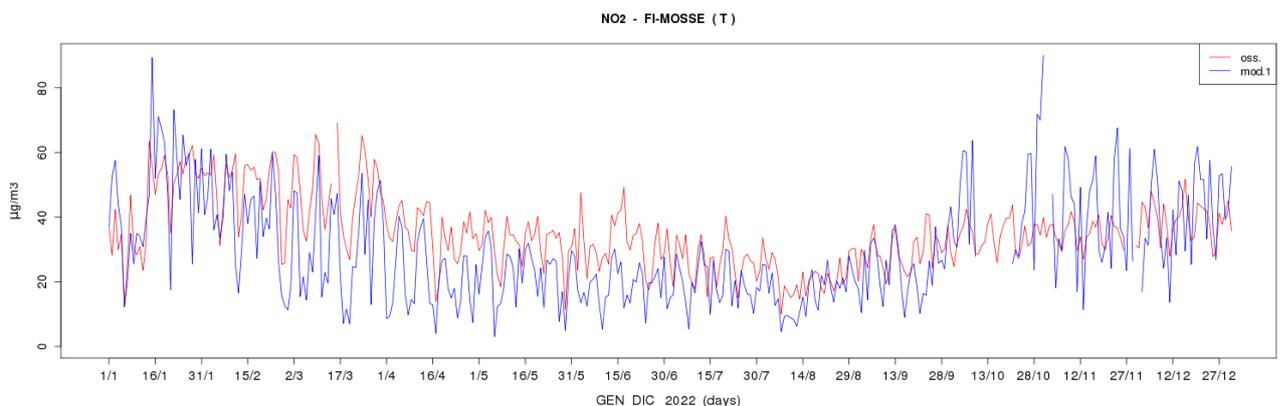


Figura 43. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu)

La collocazione della centralina rispetto al nodo di calcolo del grigliato del modello riveste quindi 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 inoltre gli andamenti in corrispondenza di altre centraline sempre di traffico che sono diversi dai casi precedentemente descritti (figura 44).



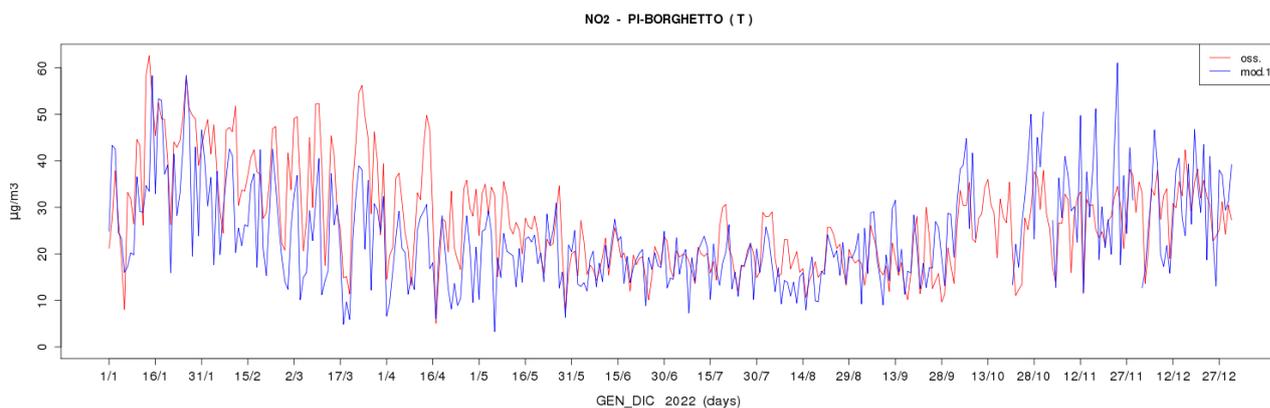


Figura 44. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu)

Pertanto, il modello euleriano è adeguato per la descrizione dei 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 45).

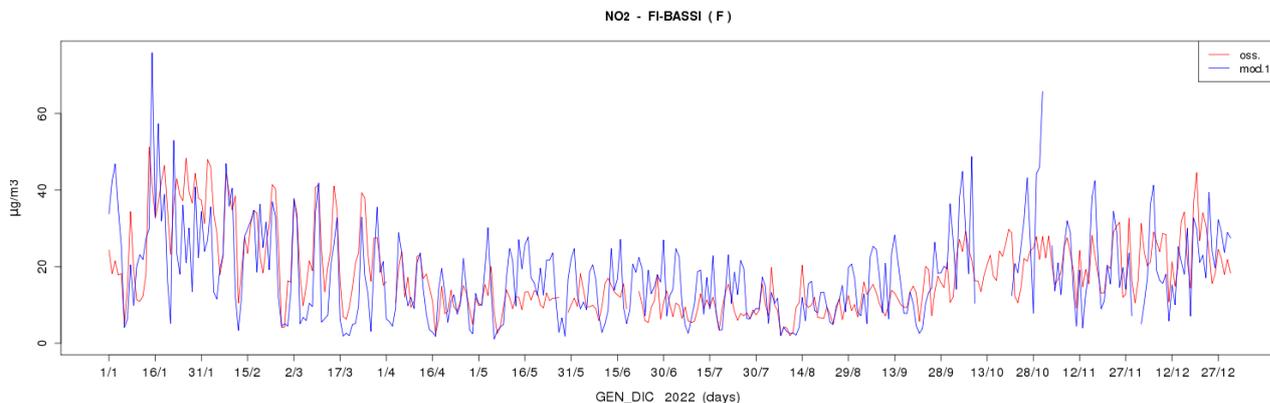


Figura 45. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu), FI-Bassi.

Tale valutazione non vale in corrispondenza di alcune stazioni di fondo posizionate non lontano dal mare, come ad esempio Viareggio (Figura 46), la cui vicinanza fa sì che la maglia stessa non rappresenti correttamente la centralina, per cui, anche in questo caso, sarebbe opportuno raffinare la risoluzione della griglia modellistica. Il sistema SPARTA è un sistema multi-scala in grado di effettuare simulazioni su diversi domini con diversa risoluzione, partendo infatti da un dominio a bassa risoluzione, attraverso la tecnica delle griglie innestate si può avere un *downscaling* con alta risoluzione.

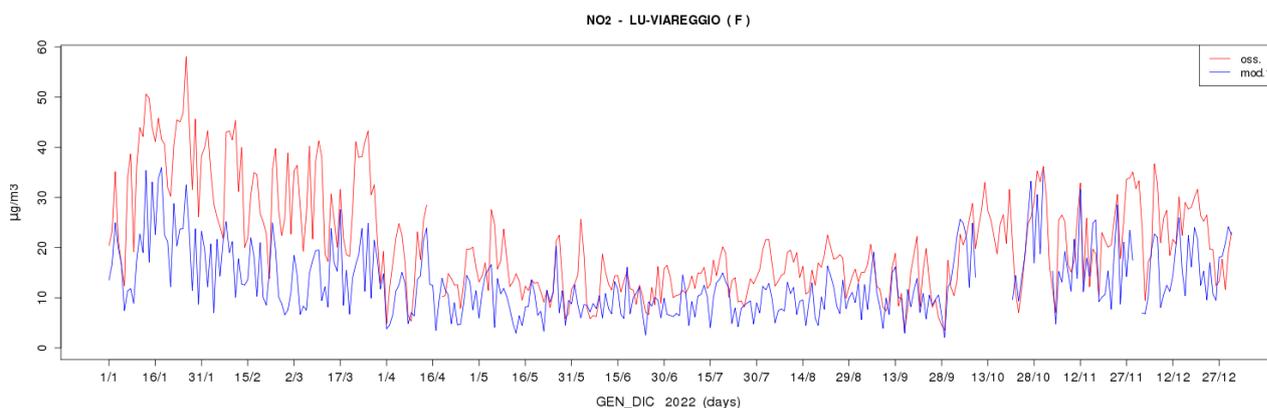
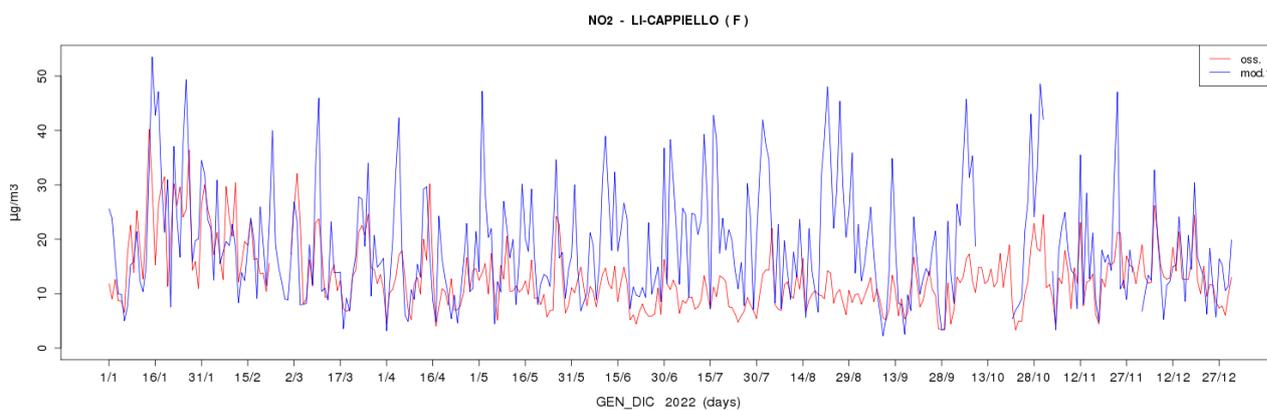


Figura 46. Serie storiche di confronto tra i dati di NO₂ da stazione (rosso) e da modello (blu), LU-Viareggio

Un'altra importante criticità si osserva inoltre nelle aree portuali, in cui sono presenti valori molto sovrastimati, soprattutto nel periodo estivo. 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 47). 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 2022 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.



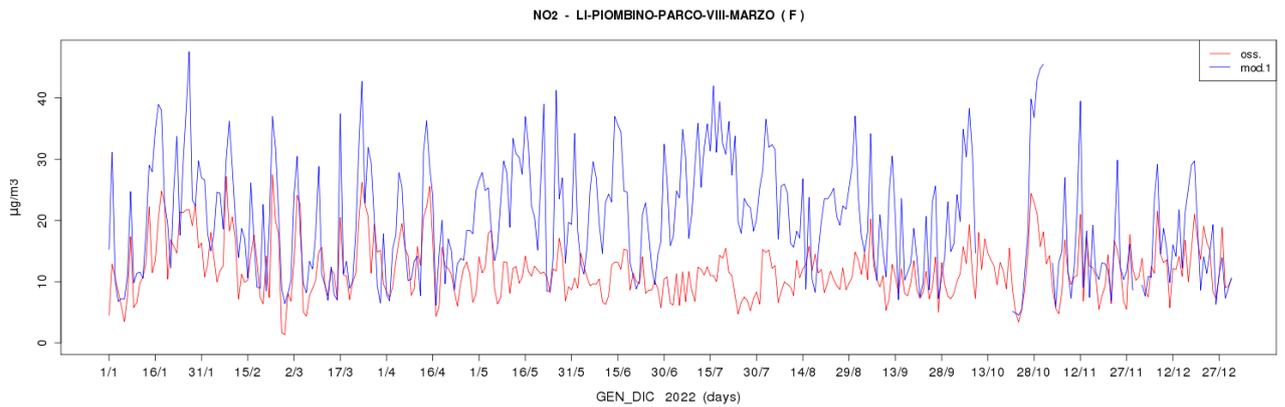


Figura 47. Serie storiche di confronto tra i dati di NO2 da stazione (rosso) e da modello (blu), LI-Cappiello e LI-Piombino VIII marzo

Dallo scatter-plot si può concludere che tutte le centraline ricadono all'interno dell'area di confidenza, molte si addensano addirittura lungo la bisettrice, che rappresenta la situazione ottimale. Valori leggermente al di sotto dell'area tratteggiata corrispondono alle stazioni di FI-Gramsci e GR-Sonnino, che sono due stazioni di traffico.

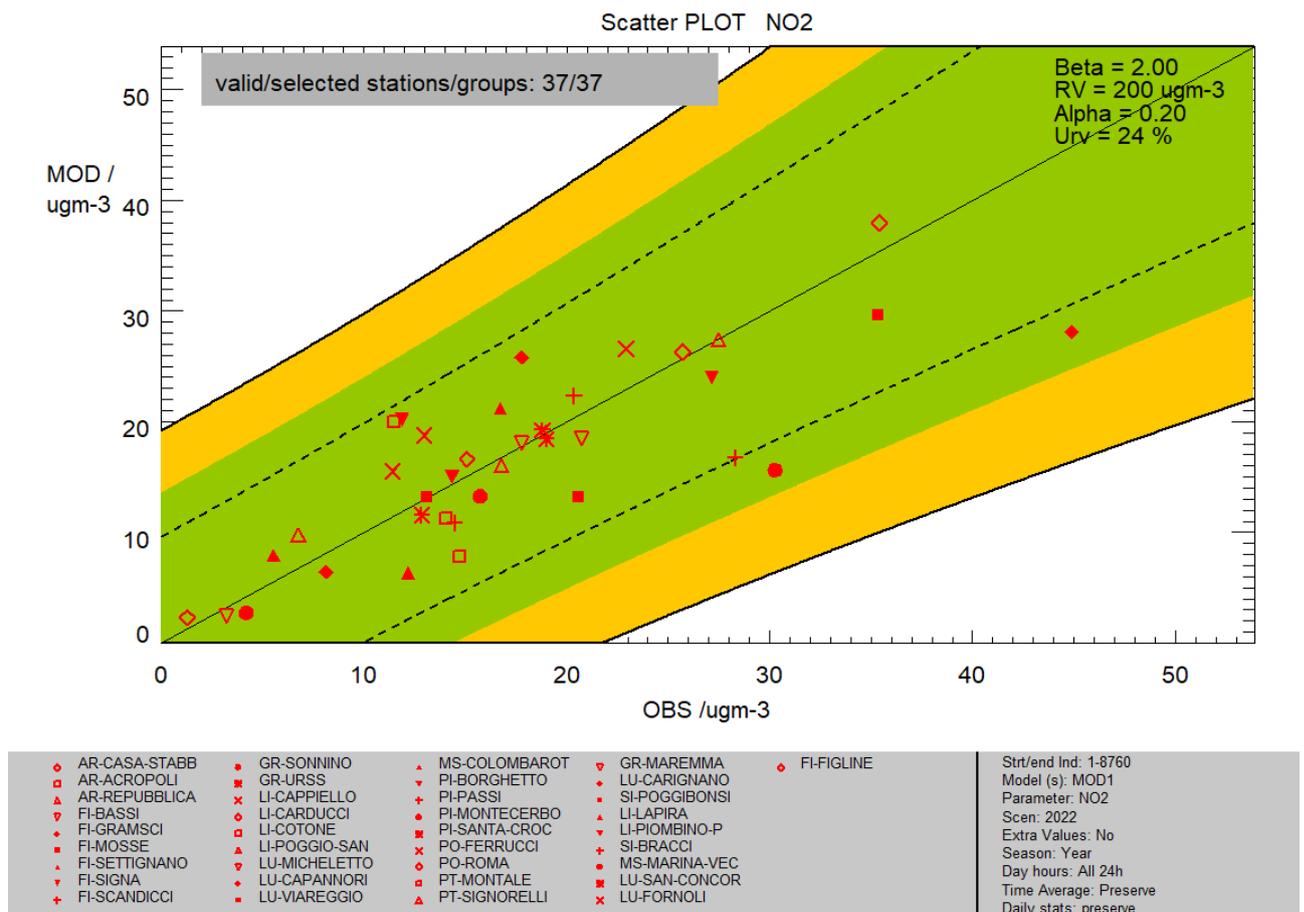


Figura 48. Scatter-plot relativo alle medie orarie (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di NO2 della rete regionale.

L'assessment target plot rileva una situazione di raggiungimento dell'obiettivo modellistico con un indice MQI_{HD} pari a 0.984; tre stazioni ricadono all'esterno dell'area di confidenza (LI-Carducci, LI-LaPira e AR-Repubblica), ma quattro cadono all'interno dell'area tratteggiata, che sta ad indicare che le incertezze del modello in quelle stazioni sono commensurabili con quelle delle misure stesse. Anche a livello medio annuale l'indice MQI_{YR} soddisfa i requisiti con un indice pari a 0.975.

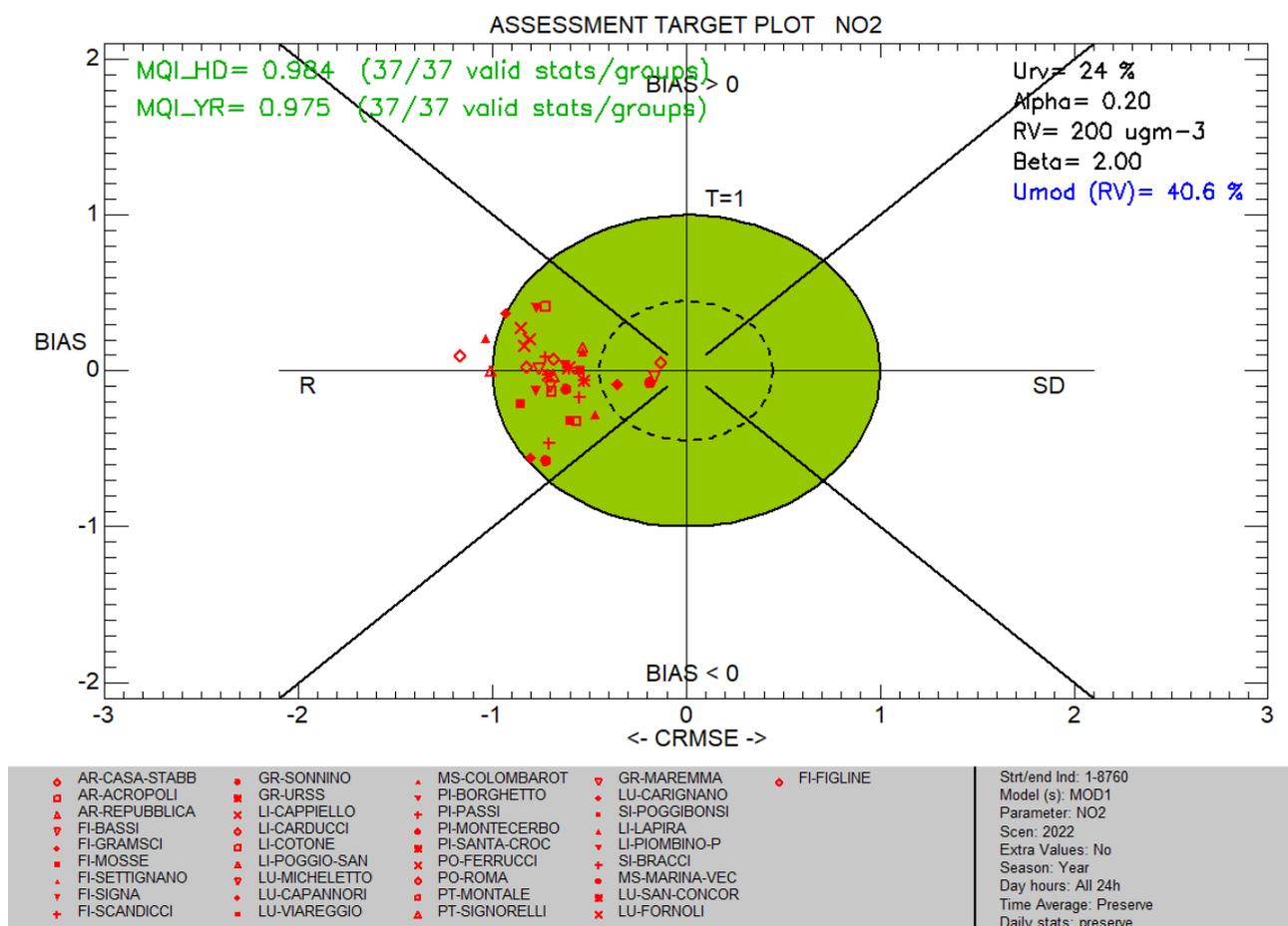


Figura 49. Assessment target plot relativo alle medie orarie in corrispondenza delle stazioni di NO2 della rete regionale.

La valutazione modellistica attraverso l'utilizzo di altri skill scores (Tabella 8) mostra alcune stazioni ben rappresentate dalla modellistica (con alti valori di IOA, CORR e bassi valori di BIAS, FE e FB). Tuttavia, come visto nelle precedenti analisi alcune stazioni (in particolare, AR-Casastabbi, LI-Poggio San Rocco, GR-Maremma, LI-Carducci, LI-La Pira e FI-Gramsci), gli skill confermano una difficoltà di riproduzione del dato osservato.

SKILL NO2 (day)														
NOME STAZIONE	TIPO	DATI PRESENTI STAZ [%]	DATI PRESENTI MOD [%]	MEDIA STAZ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MEDIA MOD [mg/m^3]	STD STAZ	STD MOD	FB	FE	RMSE	NMSE	BIAS	CORR	IOA
AR-ACROPOLI	F	98.9	95.9	14.17	11.24	6.41	8.94	-0.23	0.53	8.43	0.45	-2.87	0.51	0.68
AR-CASA-STABBI	F	99.5	95.9	1.27	2.29	0.85	1.30	0.58	0.77	1.78	1.10	1.03	0.14	0.38
AR-REPUBBLICA	T	100.0	95.9	27.46	27.31	8.22	14.47	-0.01	0.34	12.66	0.21	-0.16	0.49	0.63
FI-BASSI	F	98.1	95.9	17.85	17.85	10.44	11.75	0.02	0.43	9.94	0.31	0.28	0.60	0.77
FI-FIGLINE	F	100.0	95.9	15.11	16.57	6.94	7.99	0.09	0.40	8.09	0.26	1.48	0.44	0.65
FI-GRAMSCI	T	99.7	95.9	44.92	27.98	10.77	15.50	-0.46	0.53	22.72	0.41	-16.95	0.38	0.49
FI-MOSSE	T	98.9	95.9	35.35	29.71	11.39	16.31	-0.18	0.35	14.26	0.19	-5.79	0.61	0.72
FI-SCANDICCI	F	100.0	95.9	20.45	22.39	10.11	12.62	0.09	0.35	9.98	0.22	2.02	0.65	0.78
FI-SETTIGNANO	F	100.0	95.9	5.53	7.88	3.52	6.27	0.35	0.63	6.06	0.84	2.34	0.46	0.57
FI-SIGNA	F	99.2	95.9	14.54	15.09	9.13	9.68	0.04	0.38	8.07	0.30	0.65	0.64	0.79
GR-MAREMMA	F	97.3	95.9	3.21	2.44	1.28	1.19	-0.28	0.46	1.70	0.36	-0.78	0.26	0.53
GR-SONNINO	T	98.6	95.9	30.30	15.60	8.16	7.20	-0.64	0.64	16.46	0.57	-14.67	0.53	0.49
GR-URSS	F	98.1	95.9	13.19	11.41	6.84	5.41	-0.13	0.36	5.76	0.22	-1.63	0.61	0.76
LI-CAPPIELLO	F	98.4	95.9	13.03	18.80	6.23	10.38	0.37	0.50	10.93	0.49	5.82	0.47	0.56
LI-CARDUCCI	T	100.0	95.9	35.47	37.88	12.12	20.21	0.07	0.43	20.14	0.30	2.47	0.32	0.54
LI-COTONE	I	98.9	95.9	11.59	20.11	5.51	9.31	0.54	0.58	11.32	0.56	8.42	0.58	0.55
LI-LAPIRA	F	100.0	95.9	16.72	21.11	7.47	14.12	0.23	0.51	14.33	0.58	4.40	0.33	0.50
LI-PIOMBINO-PARCO-VIII-MARZO	F	100.0	95.9	11.95	20.11	4.70	9.42	0.51	0.56	11.49	0.55	8.21	0.52	0.49
LI-POGGIO-SAN-ROCCO	F	94.3	95.9	6.92	9.56	4.75	4.85	0.33	0.56	6.51	0.65	2.67	0.23	0.46
LU-CAPANNORI	F	100.0	95.9	17.94	25.77	8.23	14.03	0.36	0.53	14.65	0.47	7.94	0.49	0.57
LU-CARIGNANO	F	97.8	95.9	8.20	6.41	4.63	3.97	-0.23	0.41	4.03	0.31	-1.67	0.64	0.77
LU-FORNOLI	T	100.0	95.9	11.39	15.54	4.89	11.50	0.31	0.52	10.38	0.61	4.12	0.58	0.57
LU-MICHELETTO	F	100.0	95.9	20.95	18.41	9.79	10.87	-0.12	0.36	9.87	0.25	-2.34	0.57	0.75
LU-SAN-CONCORDIO	F	100.0	95.9	19.15	18.41	9.17	10.87	-0.03	0.38	10.00	0.29	-0.62	0.52	0.70
LU-VIAREGGIO	F	98.9	95.9	20.87	13.17	10.50	6.68	-0.44	0.49	10.79	0.43	-7.43	0.67	0.68
MS-COLOMBAROTTO	T	98.9	95.9	12.24	6.34	5.90	2.97	-0.63	0.67	8.01	0.83	-5.86	0.40	0.52
MS-MARINA-VECCHIA	T	98.6	95.9	15.80	13.16	7.78	6.36	-0.18	0.40	7.66	0.28	-2.57	0.49	0.68
PI-BORGHETTO	F	100.0	95.9	27.25	23.91	11.06	10.68	-0.13	0.29	9.87	0.15	-3.23	0.63	0.78
PI-MONTECERBOLI	F	100.0	95.9	4.28	2.72	1.89	1.26	-0.43	0.50	2.30	0.46	-1.51	0.45	0.58
PI-PASSI	F	100.0	95.9	14.67	10.84	8.03	4.73	-0.29	0.43	7.37	0.35	-3.64	0.60	0.69
PI-SANTA-CROCE-COOP	T	100.0	95.9	19.02	19.24	8.69	10.68	0.02	0.30	7.69	0.16	0.35	0.70	0.82
PO-FERRUCCI	F	99.7	95.9	23.03	26.46	11.89	15.68	0.15	0.33	10.77	0.19	3.59	0.76	0.84
PO-ROMA	F	98.6	95.9	25.73	26.46	11.68	15.71	0.02	0.32	11.26	0.19	0.63	0.70	0.81
PT-MONTALE	F	100.0	95.9	14.78	7.81	8.71	6.24	-0.62	0.72	10.44	0.95	-6.97	0.50	0.61
PT-SIGNORELLI	T	99.7	95.9	17.02	16.31	9.48	10.25	-0.04	0.34	7.51	0.20	-0.69	0.71	0.84
SI-BRACCI	F	99.5	95.9	28.39	16.63	9.97	8.43	-0.52	0.56	15.17	0.49	-11.63	0.45	0.55
SI-POGGIBONSI	F	98.9	95.9	13.20	13.15	7.53	6.16	0.00	0.37	6.59	0.25	-0.02	0.55	0.72

Tabella 8. Skill scores per l'NO2 giornaliero 2022.

3.4 O3

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.

Per ottenere un quadro conoscitivo e rappresentativo dello stato della qualità dell'aria sulla base dei risultati modellistici sono state elaborate le mappe delle grandezze come indicate nel decreto legislativo 155/2010 e riportate in tabella.

	<i>Valore</i>	<i>Periodo di mediazione</i>
<i>Soglia di informazione</i>	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 ora
<i>Soglia di allarme</i>	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 ora
<i>Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana</i>	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media massima giornaliera su 8 ore

Tabella O3 - Soglia di informazione, soglia di allarme, obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana ai sensi della normativa vigente

In prima analisi è stata calcolata la media annuale del massimo della media mobile giornaliera su 8 ore (figura 50), per avere una caratterizzazione territoriale della distribuzione. Valori mediamente elevati ($< 105 \mu\text{g}/\text{m}^3$) si osservano nella parte alta della regione e sul mare. Quasi tutta la regione presenta comunque valori medi inferiori a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

O3 - Concentrazione media MAXMM8 2022

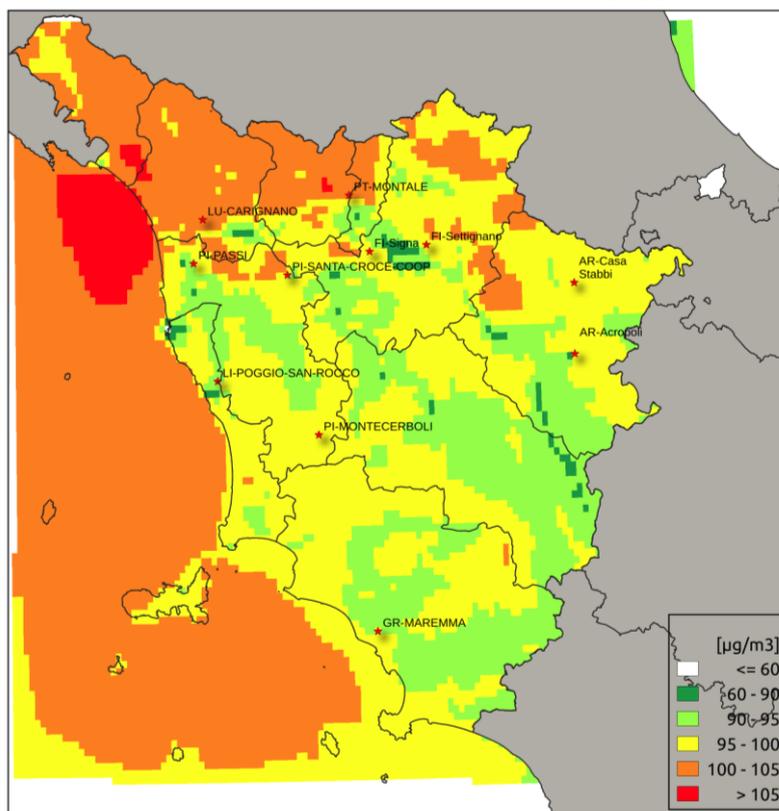


Figura 50. Concentrazione media dei massimi della media mobile sulle otto ore centrali del giorno

Coerentemente con le grandezze di riferimento del decreto normativo, sono state successivamente elaborate le mappe del numero di superamenti orari a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (soglia di informazione) e a $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (soglia di allarme), figura 51. L'analisi di questi valori è coerente con la distribuzione della concentrazione media annua, si evidenziano 2 casi di superamento della soglia di attenzione e meno di 20 episodi della soglia di informazione. Come obiettivo a lungo termine per la salute umana la normativa prevede che non venga superato il valore di $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come massimo giornaliero della media mobile a otto ore per più di 25 volte in un anno. In figura 52 è stata riportata la mappa con il numero di superamenti.

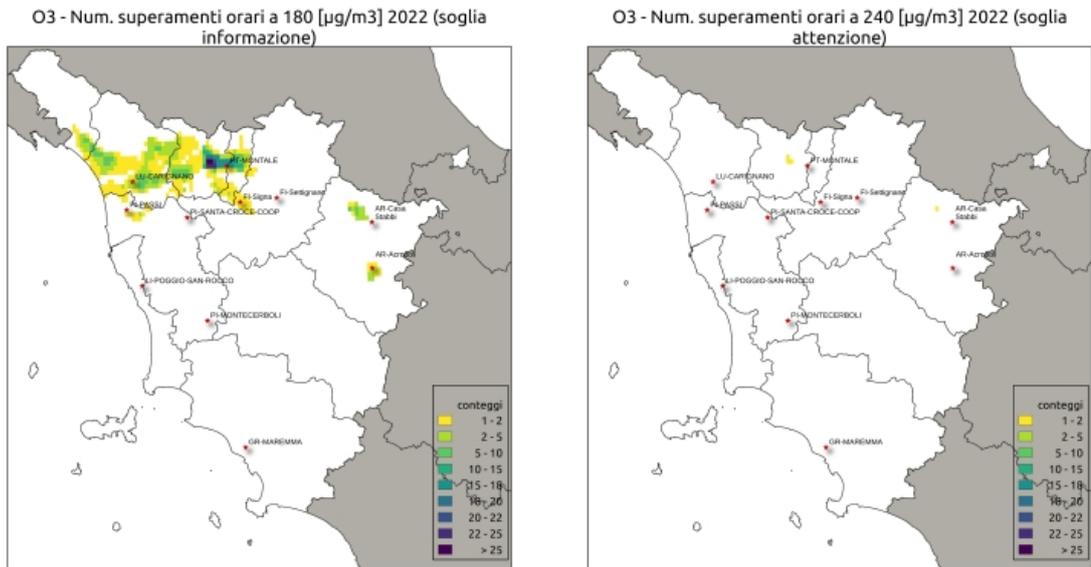


Figura 51. Superamenti della soglia di informazione (180 µg/m³) a sx e di attenzione (240 µg/m³) a dx

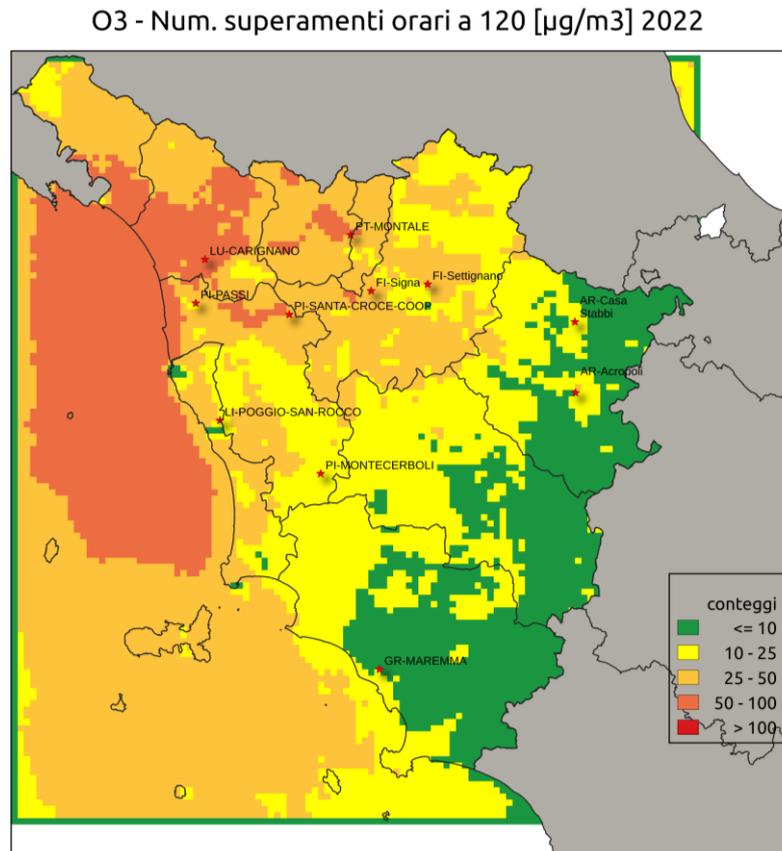


Figura 52. Superamenti del massimo giornaliero della media mobile a otto ore della soglia pari a 120 µg/m³. Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana

Considerando le serie storiche delle medie giornaliere delle concentrazioni di O₃, si deduce che il modello riproduce correttamente i valori soprattutto durante il periodo estivo (Figura 53).

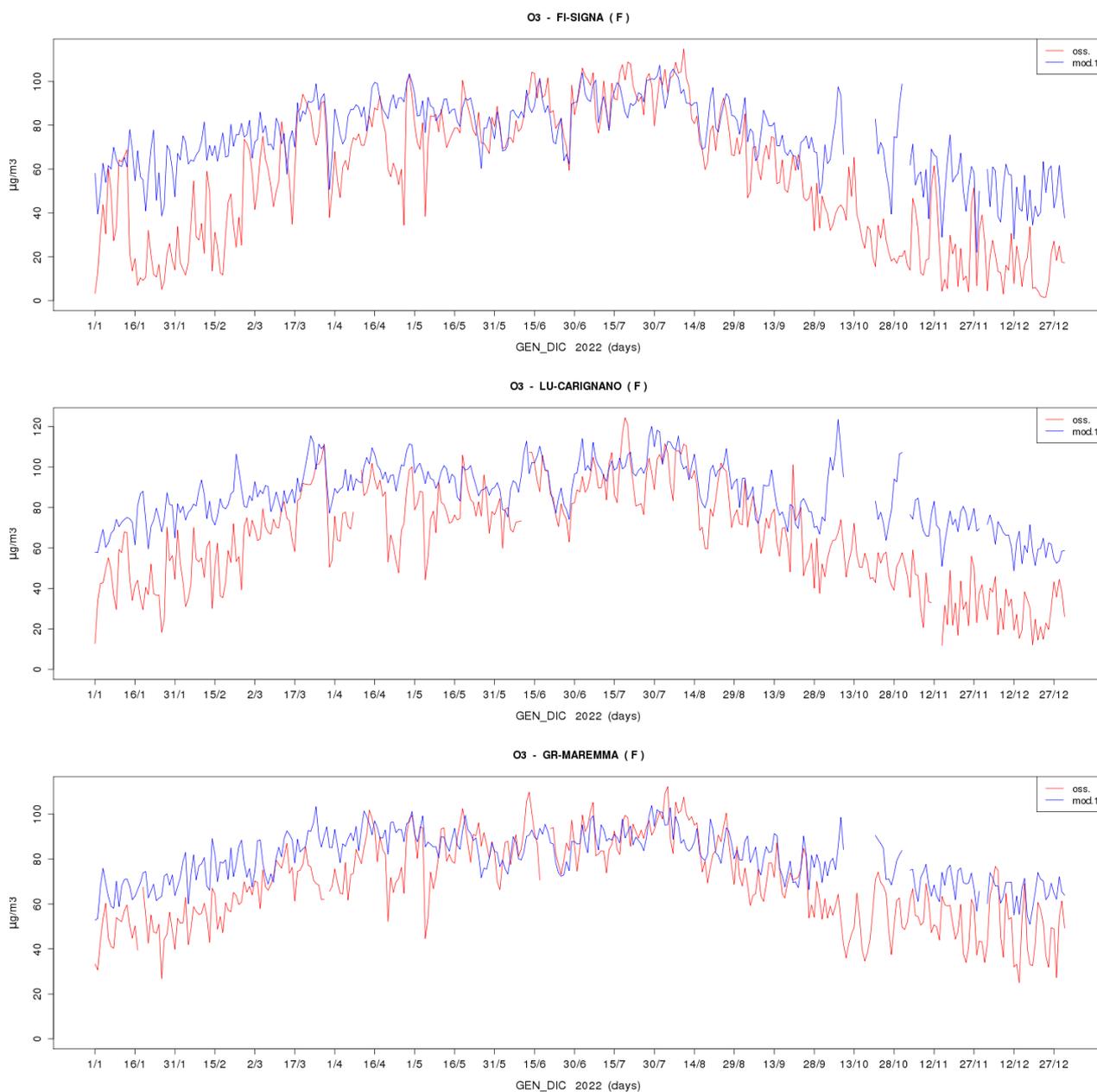


Figura 53. Serie storiche media giornaliera O₃, per le stazioni di FI-Signa, LU-Carignano e GR-Maremma.

Poiché l'O₃ è un inquinante fotochimico e transfrontaliero, un margine di miglioramento si potrà presumibilmente ottenere utilizzando un'inizializzazione ai confini con una risoluzione più elevata come quella dei modelli regionali CAMS - Copernicus 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 stazioni di AR-Acropoli e PI-Santa Croce leggermente spostate verso l'area arancione, caratterizzate quindi da maggiori sovrastime rispetto alle altre stazioni.

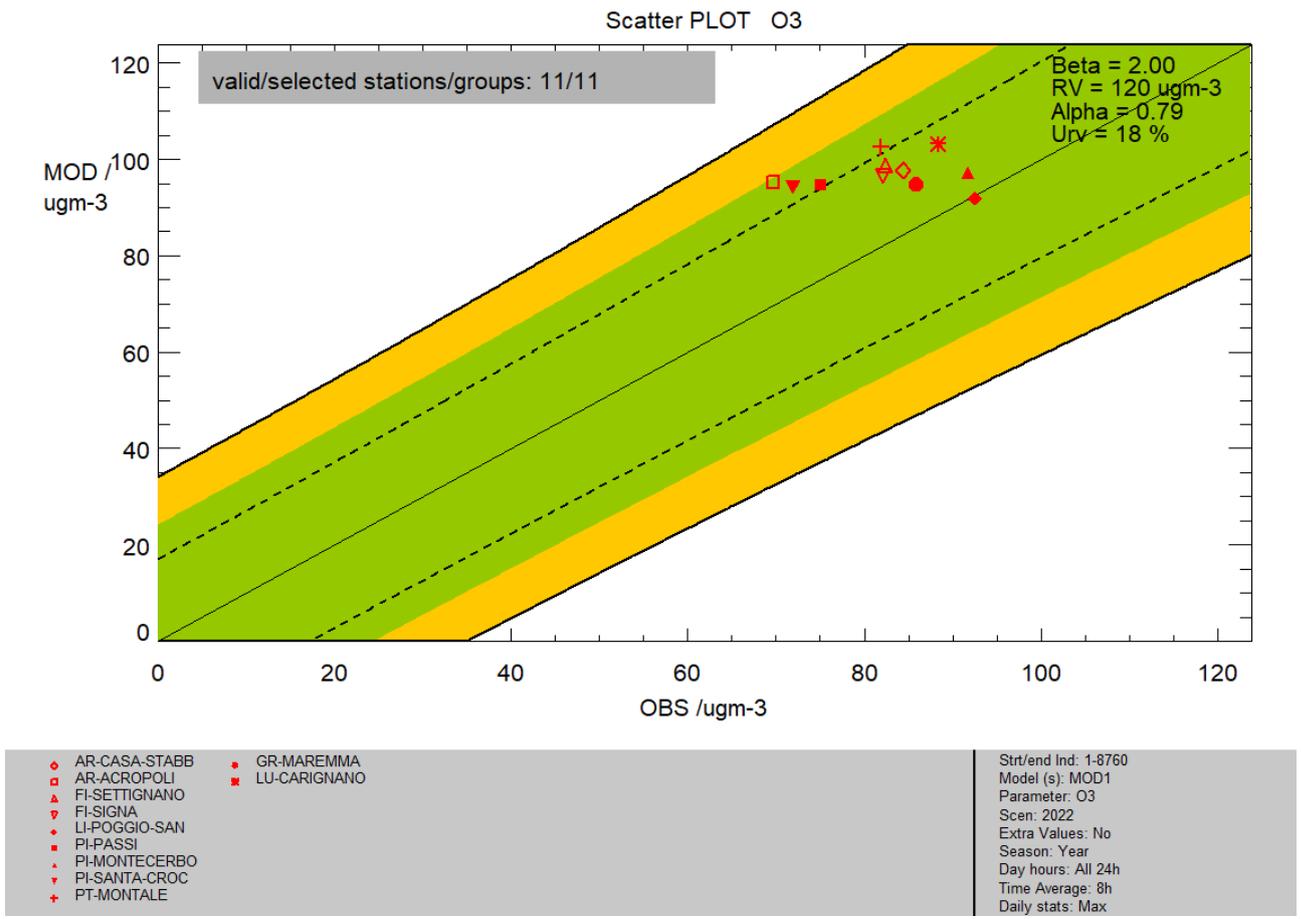


Figura 54. Scatter-plot relativo al massimo delle medie giornaliere a 8h (osservate vs. stimate) in corrispondenza delle stazioni di O3 della rete regionale.

L'obiettivo di qualità per il modello è pienamente raggiunto (Figura 55) anche per il massimo della media mobile a 8h, con un indice *MQI_HD* pari a 0.308, che indica un ottimo allineamento tra le incertezze del modello con quelle delle misure.

Anche l'indice annuale *MQI_YR* viene soddisfatto.

AOGRT / AD Prot. 0503546 Data 06/11/2023 ore 13:29 Classifica P.050.

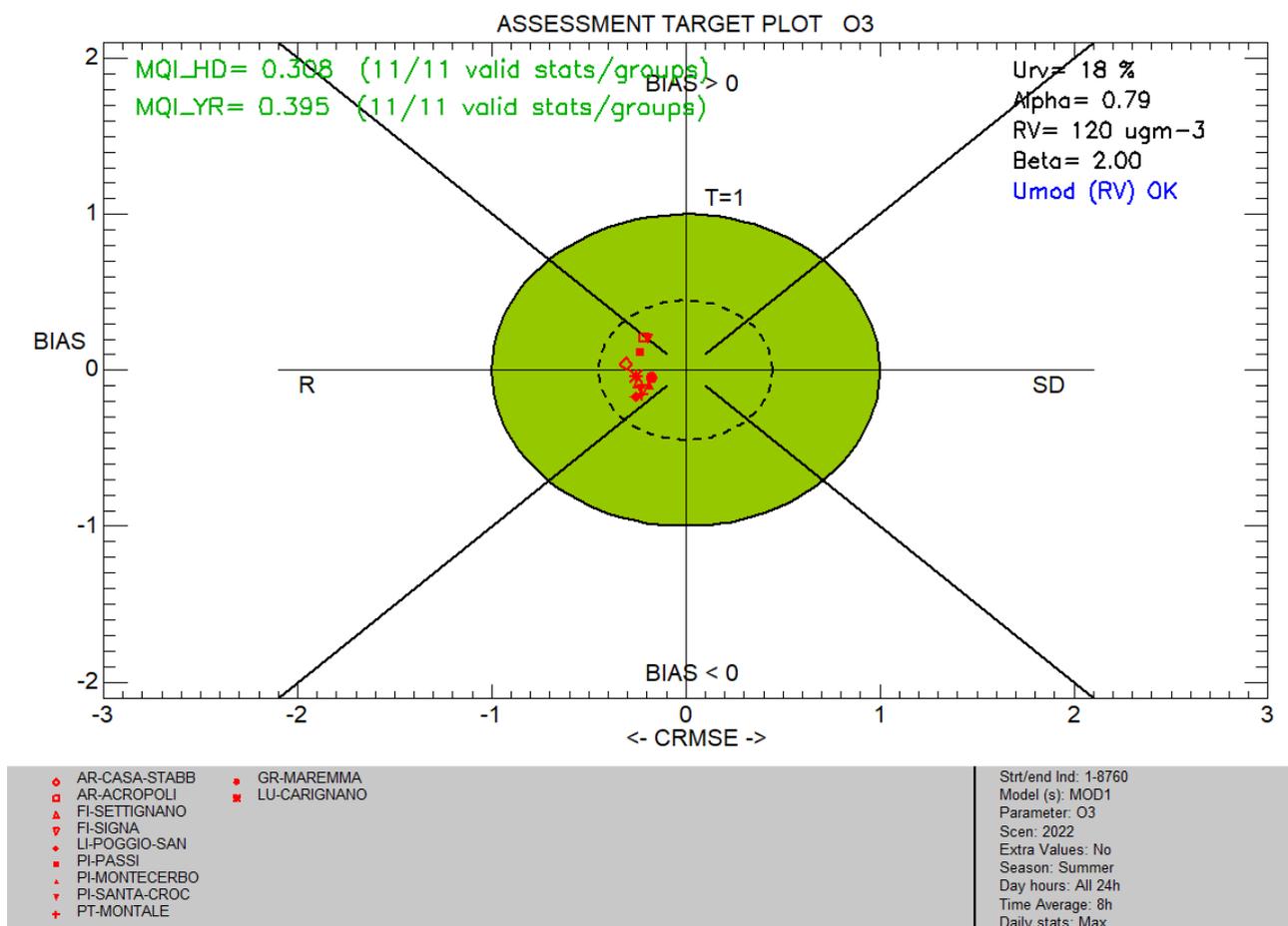


Figura 55. Assessment target plot relativo al massimo delle medie giornaliere a 8h in corrispondenza delle stazioni di O3 della rete regionale.

Gli altri skill scores confermano le osservazioni fatte fino a qui, con ottimi indici di correlazione e IOA, mentre le sovrastime invernali (Figura 53), soprattutto in alcune stazioni, fanno sì che i BIAS risultino abbastanza elevati.

SKILL O3 (day)														
NOME STAZIONE	TIPO	DATI PRESENTI STAZ [%]	DATI PRESENTI MOD [%]	MEDIA STAZ [µg/m ³]	MEDIA MOD [mg/m ³]	STD STAZ	STD MOD	FB	FE	RMSE	NMSE	BIAS	CORR	IOA
AR-ACROPOLI	F	98.9	95.9	48.26	80.80	23.22	13.93	0.49	0.49	36.04	0.33	31.72	0.68	0.58
AR-CASA-STABBI	F	98.4	95.9	70.04	91.06	20.26	11.49	0.25	0.26	24.80	0.10	20.12	0.71	0.65
FI-SETTIGNANO	F	99.5	95.9	62.45	83.23	24.95	14.03	0.27	0.29	25.83	0.13	19.92	0.78	0.70
FI-SIGNA	F	100.0	95.9	56.37	74.92	30.49	16.87	0.27	0.31	26.48	0.16	17.64	0.80	0.75
GR-MAREMMA	F	98.6	95.9	69.20	80.45	18.68	11.18	0.13	0.18	15.91	0.04	10.11	0.77	0.76
LI-POGGIO-SAN-ROCCO	F	97.3	95.9	81.00	78.95	19.84	12.93	-0.03	0.11	12.15	0.02	-2.61	0.82	0.85
LU-CARIGNANO	F	98.1	95.9	65.80	86.52	25.05	15.01	0.26	0.28	25.52	0.11	19.98	0.80	0.71
PI-MONTECERBOLI	F	100.0	95.9	76.11	90.37	19.72	12.37	0.16	0.17	17.67	0.04	13.15	0.82	0.76
PI-PASSI	F	99.2	95.9	49.04	78.01	23.30	14.21	0.44	0.44	32.03	0.26	28.03	0.76	0.62
PI-SANTA-CROCE-COOP	F	100.0	95.9	47.08	69.71	25.75	17.83	0.37	0.38	25.79	0.20	21.73	0.86	0.75
PT-MONTALE	F	99.5	95.9	54.04	86.57	29.78	14.89	0.45	0.46	39.33	0.33	31.83	0.65	0.60

Tabella 9. Skill scores per l'O3 giornaliero 2022.

Conclusioni

Analogamente agli anni precedenti, anche per l'anno 2022, 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 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 con un valore di MQI_HD pari a 0.682 e con MQI_YR pari a 0.401. Anche gli skill scores affermano che la simulazione modellistica per il PM2.5 raggiunge ottimi livelli di performance, registrando correlazioni e index of agreement molto elevati.

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 all'interno del grigliato di calcolo. L'analisi condotta con il Delta Tool rileva comunque il raggiungimento dell'obiettivo modellistico con un indice MQI_HD pari a 0.984. Alcune stazioni risultano ben rappresentate dalla modellistica (con alti valori di IOA, CORR e bassi valori di BIAS, FE e FB), mentre per altre gli skill confermano una difficoltà di riproduzione del dato osservato.

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 0.308, 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.

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
6. 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>.
7. <https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/aria/qualita-aria/>
8. <https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/aria/monitoraggio/report>
9. Forum for Air quality Modeling (FAIRMODE): <https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>
10. "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.
11. "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.
12. "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>