



**REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

**AGENZIA REGIONALE PRO S'AMPARU DE S'AMBIENTE DE SARDIGNA
AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA**

ARPAS

Direzione Tecnico-Scientifica
Servizio Controlli, Monitoraggi e Valutazione Ambientale
Linea di Attività Monitoraggio Qualità dell'Aria

Valutazione modellistica dello stato di Qualità dell'aria della Sardegna

Anno 2021

Gennaio 2023

Il presente documento "Valutazione modellistica dello stato di Qualità dell'aria della Sardegna - Anno 2021", è stato elaborato da **Arianet S.r.l.**, con sede a Milano, Via Benigno Crespi 57, nell'ambito del contratto di manutenzione della rete di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico regionale gestita dall'ARPAS, assegnato a **Project Automation S.p.A.**, con sede a Monza, Viale Elvezia 42; periodo contrattuale 2019 – 2022.

Autori

N. Pepe, C. Silibello, F. Uboldi

Riferimento

ARIANET R2022.18

Dicembre 2022

AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA - ARPAS

Direzione Tecnico-Scientifica

Servizio Controlli, Monitoraggi e Valutazione Ambientale

Linea di Attività Monitoraggio Qualità dell'Aria

Gruppo di Lavoro:

Direttore del Servizio: Mauro Iacuzzi

Responsabile di Procedimento della Rete: Alessandro Serci

Collaboratore: Viviana Sirigu



SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
SPAZIALIZZAZIONE DEI DATI DELLA RETE DI MONITORAGGIO SULL'INTERO TERRITORIO REGIONALE....	3
RETE REGIONALE DI QUALITÀ DELL'ARIA	3
CALIBRAZIONE ED APPLICAZIONE DEL MODULO LURF	5
<i>Predittori statici</i>	5
<i>Predittori mensili</i>	6
<i>Predittori orari e giornalieri</i>	6
<i>Altri predittori</i>	6
<i>Predittori e rete osservativa</i>	7
<i>Ottimizzazione</i>	12
CONFRONTO CONCENTRAZIONI MISURATE E CALCOLATE	13
<i>Agglomerato di Cagliari</i>	14
<i>Zona urbana – Area di Sassari</i>	16
<i>Zona urbana – Area di Olbia</i>	18
<i>Zona Industriale – Area di Assemini</i>	20
<i>Zona Industriale – Area di Sarroch</i>	22
<i>Zona Industriale – Area Portoscuso</i>	24
<i>Zona Industriale – Area di Porto Torres</i>	26
<i>Zona rurale – Area Sulcis–Iglesiente</i>	28
<i>Zona rurale – Area Medio Campidano</i>	30
<i>Zona rurale – Area di Oristano</i>	32
<i>Zona rurale – Area di Nuoro</i>	34
<i>Zona rurale – Area Sardegna Centro–Settentrionale</i>	36
<i>Zona rurale – Seulo (Stazione di Fondo Regionale)</i>	38
VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA	40
CRITICITÀ OZONO	46
CONCLUSIONI	47
BIBLIOGRAFIA	48

INTRODUZIONE

Mediante l'effettiva integrazione di modelli numerici ed informazioni sperimentali si prevede di migliorare la capacità di descrivere i fenomeni che determinano il degrado della qualità dell'aria e in prospettiva di meglio individuare le più efficaci strategie di mitigazione e risanamento. A tale proposito è opportuno riportare quanto affermato nella "Guidance on Assessment under the EU Air Quality Directives - FINAL DRAFT"¹ [...] *there is an almost continuous spectrum of combinations of measurements and other assessment methods. Neither of the two extremes is useful for investigating the state of compliance in a zone: 100% measuring (i.e. doing measurements that are not generalised at all) gives incomplete information, while, at the other extreme, 100% modelling (i.e. applying models that have not in any sense been validated) gives unreliable information. So, a useful assessment comprises elements of both.*"

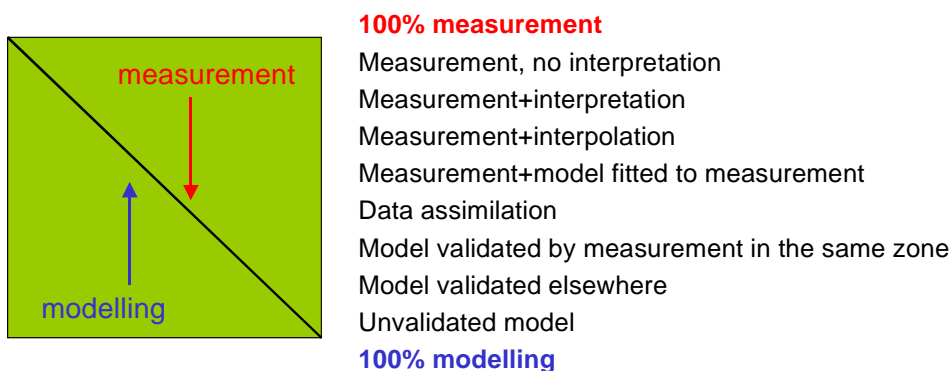


Figura 1 – Integrazione di modelli numerici ed informazioni sperimentali.
 (<http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/guidanceunderairquality.pdf>)

Per tali ragioni la direttiva del Parlamento Europeo relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa (*Direttiva 2008/50/CE*), recepita dal D. Lgs. n. 155 del 13 agosto 2010, raccomanda l'utilizzo di tecniche di modellazione in combinazione alle misurazioni in siti fissi.

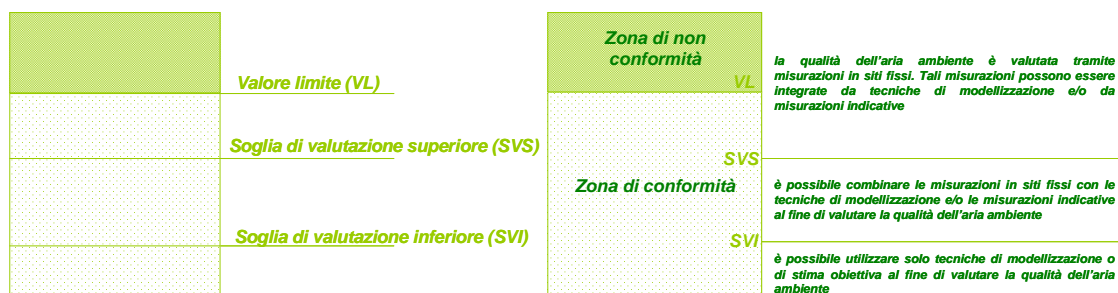


Figura 2 – Zone di conformità/non conformità relativamente al valore limite e uso di tecniche di modellazione in relazione alle soglie di riferimento superiore e inferiore.

Tale integrazione può essere effettuata utilizzando metodi di analisi oggettiva che combinano in modo ottimale le informazioni fornite dalle reti di monitoraggio della qualità dell'aria e da modelli matematici. Tale approccio è stato applicato per produrre, relativamente all'anno 2018, mappe regionali relative agli standard di qualità dell'aria definiti dalla suddetta normativa per i diversi inquinanti (ARPAS, 2019; Arianet, 2019).

Nell'ambito del progetto di ricerca BEEP (<https://www.irib.cnr.it/project/beep-bigdata-in-epidemiologia-ambientale-ed-occupazionale/>), finanziato da INAIL (Bando Ricerche in Collaborazione BRiC 2016-2018), ARIANET ha messo a punto, in collaborazione con il Dipartimento di Epidemiologia SSR Lazio/ASL Roma 1, un modulo denominato Land Use Random Forest (LURF) basato su algoritmi Machine Learning. Tale modulo prevede l'utilizzo di concentrazioni calcolate da un modello di dispersione unitamente ad altri predittori (ad esempio dati di uso del suolo, popolazione,

¹<http://ec.europa.eu/environment/archives/air/pdf/guidanceunderairquality.pdf>

etc.) al fine di produrre mappe di qualità dell'aria ad alta risoluzione spaziale (1 km), sul territorio nazionale (Silibello *et al.*, 2021).

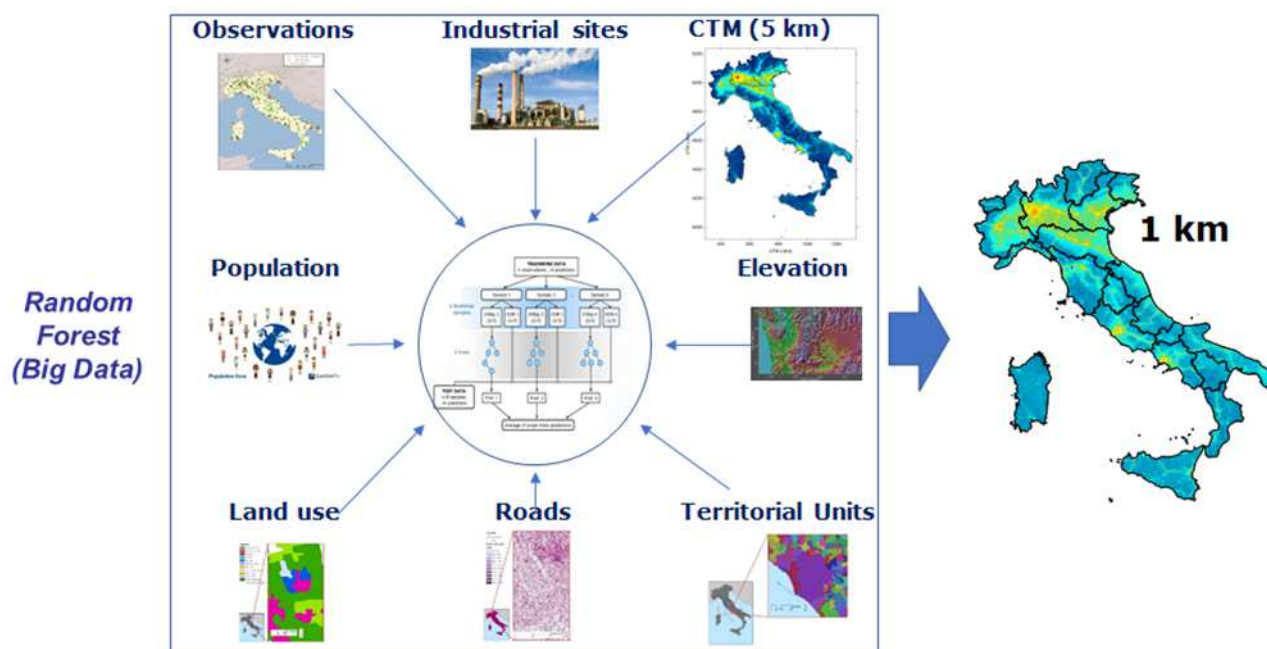


Figura 3 – Rappresentazione schematica dell'applicazione del modulo LURF nell'ambito del progetto BEEP.

Nel presente studio è stato applicato il modulo LURF al fine di poter produrre analoghe mappe regionali relative agli standard di qualità dell'aria per l'anno 2021 alla risoluzione spaziale di 1 km. Anche in questo caso sono stati utilizzati i campi di concentrazione prodotti dal sistema di previsione QualeAria (<http://www.aria-net.it/qualearia/it/>); si rimanda alla precedente relazione (Arianet, 2019) per la descrizione del sistema QualeAria.

SPAZIALIZZAZIONE DEI DATI DELLA RETE DI MONITORAGGIO SULL'INTERO TERRITORIO REGIONALE

RETE REGIONALE DI QUALITÀ DELL'ARIA

Nel presente studio sono stati considerati i seguenti inquinanti: benzene (C₆H₆), monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO₂), ozono (O₃), PM₁₀, PM_{2.5}, e biossido di zolfo (SO₂) che vengono rilevati dalle seguenti stazioni di misura della rete regionale di qualità dell'aria (Tabella 1). In aggiunta sono disponibili le misure fornite dal Laboratorio mobile e dalla Stazione mobile che fino al 30/09/2021 era posta nel comune di Elmas ed a partire dal 03/10/2021 fino alla fine dell'anno tale stazione è stata rilocata nel comune di Cagliari (area portuale). Di seguito viene riportata la suddivisione del territorio regionale, relativamente alla protezione della salute umana, nelle diverse zone di qualità dell'aria, atte alla gestione delle criticità ambientali, grazie all'accorpamento di aree il più possibile omogenee (Figura 4) in termini di tipologia di pressioni antropiche sull'aria ambiente:

- Agglomerato di Cagliari:
 - Cagliari;
 - Elmas;
 - Monserrato;
 - Selargius;
 - Quartu Sant'Elena;
 - Quartucciu.
- Zona urbana:
 - Sassari;
 - Olbia.
- Zona industriale:
 - Assemini-Macchiareddu;
 - Sarroch;
 - Portoscuso;
 - Porto Torres;
- Zona rurale:
 - Sulcis-Iglesiente;
 - Medio Campidano;
 - Oristano;
 - Nuoro;
 - Centro-Settentrionale;
 - Seulo (zona remota).

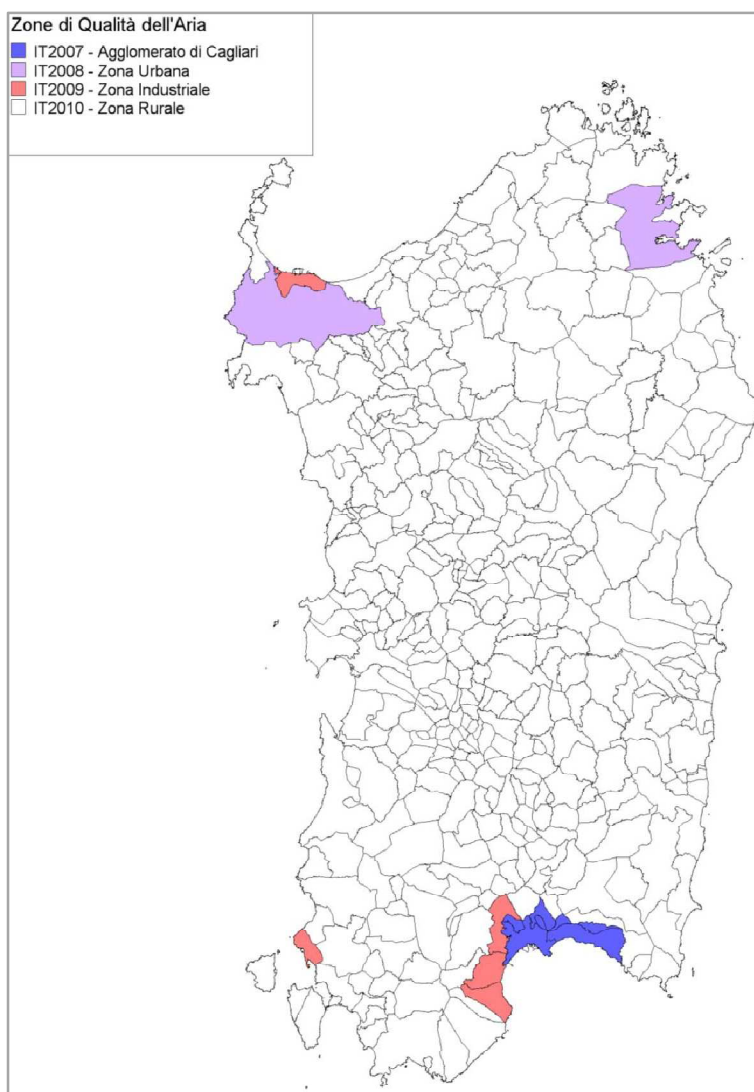


Figura 4 - Mappa di zonizzazione per la Regione Sardegna.

La zonizzazione della Sardegna al momento non prevede zone ai fini della valutazione della qualità dell'aria con riferimento alla vegetazione ed agli ecosistemi, in attesa di una definizione sui criteri da adottare su scala nazionale, di competenza del Coordinamento ex art. 20 D.Lgs. 155/2010.

Tabella 1 - Stazioni di misura ed inquinanti considerati nello studio.
 (*) indica stazioni poste in prossimità di aree urbane. (**) indica stazioni poste in siti remoti.
 (Sono indicate in grassetto le stazioni utilizzate per la valutazione della qualità dell'aria.)

Stazione	Zonizzazione	Comune	Tipo zona	Tipo staz.	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO ₂	O ₃	C ₆ H ₆	CO	SO ₂
CENCA1	Agglomerato di Cagliari	Cagliari	U	T	x	x	x	x	x	x	x
CENMO1		Monserrato	U	F	x	x	x	x	x	x	x
CENQU1		Quartu Sant'Elena	U	F	x		x	x	x		x
CENS12	Sassari (zona urbana)	Sassari	U	T	x		x	x		x	x
CENS16		Sassari	U	F	x	x	x	x	x	x	x
CENS10	Olbia (zona urbana)	Olbia	U	T	x		x			x	x
CEOLB1		Olbia	U	F	x		x	x	x	x	x
CENAS6	Assemini-Macchiareddu (zona industr.)	Assemini	R	I	x		x				x
CENAS8		Assemini	R	I	x		x	x		x	x
CENAS9		Assemini	U	F	x		x	x			x
CENSA2	Sarroch (zona industr.)	Sarroch	R*	I	x	x	x	x	x	x	x
CENSA3		Sarroch	U	F	x	x	x	x	x	x	x
CENPS4	Portoscuso (zona industr.)	Portoscuso	R	F	x		x			x	x
CENPS6		Portoscuso	R*	I	x	x	x				x
CENPS7		Portoscuso	U	F	x	x	x	x	x	x	x
CENPT1	Porto Torres (zona industr.)	Porto Torres	U	F	x	x	x	x	x	x	x
CENSS2		Sassari	R	I	x		x	x			x
CENSS3		Porto Torres	R	I	x		x	x		x	x
CENSS4		Porto Torres	R	I	x		x		x		x
CENNF1	Sulcis Iglesiente (zona rurale)	Gonnesa	R*	I	x		x				x
CENIG1		Iglesias	U	F	x		x	x			x
CENCB2		Carbonia	U	F	x		x	x	x		x
CENSG3	Medio Campidano (zona rurale)	San Gavino M.	R*	F	x		x				x
CENNM1		Nuraminis	R	F	x		x	x			x
CENOR1	Oristano (zona rurale)	Oristano	U	F	x		x	x			x
CENOR2		Oristano	U	T	x		x	x	x		x
CESG11		Santa Giusta	S	F	x		x			x	x
CENNU1	Nuoro (zona rurale)	Nuoro	U	T	x		x		x		x
CENNU2		Nuoro	U	F	x		x	x		x	x

CENMA1	Sardegna Centro- Settentrionale (zona rurale)	Macomer	S	F	x	x	x	x	x	x	x
CENSN1		Siniscola	S	F	x		x				x
CEALG1		Alghero	U	F	x		x	x	x	x	x
CENOT3		Ottana	R	I	x		x	x	x		x
CENSE0	Zona rurale	Seulo	R**	F	x	x	x	x		x	x
Lab. Mobile	Cagliari	Assemini	U	F	x		x	x	x	x	x
Staz. Mobile		Cagliari	S	I	x	x	x	x	x	x	x
		Elmas	U	F	x	x	x	x	x	x	x

CALIBRAZIONE ED APPLICAZIONE DEL MODULO LURF

I campi di concentrazione di inquinanti prodotti dal sistema QualeAria a scala nazionale sono stati elaborati dall'algoritmo Machine learning Random Forest (ML-RF; Breiman, 2001) per produrre corrispondenti mappe di qualità dell'aria sul territorio regionale, alla risoluzione spaziale di 1 km². I parametri della griglia di calcolo relativa a tale dominio sono i seguenti: coordinata SW del dominio pari a 420 km Est, 4290 km Nord nel sistema di coordinate UTM WGS84 - zona 32.

L'algoritmo RF, che consiste in un insieme di alberi decisionali (da cui "foresta"), è adatto sia a problemi di classificazione (separazione dei dati in classi) che di regressione ed è stato sviluppato per risolvere gli errori di *overfitting* (il modello raggiunge buoni risultati sui dati di addestramento ma scarse performance sui dati di controllo) e di alta varianza tipici di un singolo albero decisionale. Ogni albero, o nodo, viene costruito con un *bootstrap* dei dati di input e ad ognuno viene assegnato casualmente un sottoinsieme di predittori (Liaw e Wiener, 2002). L'*output* finale dell'insieme è calcolato facendo la media degli output di ogni singolo albero.

L'applicazione dell'algoritmo ML-RF si articola in due fasi: la prima finalizzata al suo addestramento, ovvero alla sua capacità di riprodurre le concentrazioni osservate nei siti di monitoraggio (fase di training) sulla base di un insieme di predittori. La seconda, detta di generalizzazione, è volta a stimare le concentrazioni nelle celle della griglia dove non sono disponibili osservazioni.

L'elenco dei predittori spaziali e spazio-temporali, scelti per catturare le peculiari fluttuazioni temporali e spaziali dei campi di concentrazione, è di seguito descritto. Tutti i predittori sono stati interpolati dalle loro risoluzioni originali a quella target (1000 m) mediante analisi geospaziale.

Predittori statici

Di seguito sono riportati i predittori statici considerati:

- copertura del suolo, basati sul database Corine Land Cover (CLC), riferiti all'anno 2012 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>) e definiti come percentuale di ciascuna cella della griglia coperta dalle seguenti otto classi:
 1. Tessuto urbano (**CRNurfa**);
 2. Unità industriali, commerciali e di trasporto (**CRNinco**);
 3. Aeroporti (**CRNairp**);
 4. Altre superfici artificiali (**CRNoart**);
 5. Aree agricole (**CRNagri**);
 6. Foreste (latifoglie, conifere o miste, **CRNfore**);
 7. Prati, aree arbustive, pianura brulla, spiagge naturali (**CRNnatu**);
 8. Masse d'acqua (**CRNwate**);
- inventario globale della distribuzione spaziale e della densità della superficie impermeabile costruita (Imperviousness Surface Areas, **ISA**). Esempi di ISA includono strade, parcheggi, edifici, vialetti, marciapiedi e altre superfici artificiali, derivata da https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/download_global_isa.html, dati NOAA relativi all'anno 2020;
- immagini satellitari notturne mediante le quali sono state prodotte mappe globali della luce notturna (Light At Night, **LAN**), raccolti dal Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) nell'anno 2015 (https://eogdata.mines.edu/nighttime_light/annual/v10/2015/);

- densità di popolazione:
 - Europa (<http://cmshare.eea.europa.eu/s/NAPoXyePo4J3o5X/download>, **EUPOP**);
 - Globale: (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4/sets/browse>, **GLOBPOP**);
- statistiche di vario tipo definite all'interno della cella ed a distanza del baricentro della cella, considerando in particolare tre tipi di strade: autostrada, principale più secondaria e locale. La rete stradale deriva dal progetto (Open Transport Map– OTM, <https://hub.plan4all.eu/otm>):
 - Distanza del centro della gridbox dall'autostrada più vicina (**DHWY**);
 - Lunghezza cumulativa dei tratti di autostrada inclusi nella gridbox (**HWLEN**);
 - Distanza del centro della gridbox dalle principali strade extra-urbane, autostrade escluse (**DXU**);
 - Lunghezza cumulativa dei tratti di strade extra-urbane inclusi nella gridbox (**XULEN**);
 - Distanza del centro della gridbox da strade locali (**DLO**);
 - Lunghezza cumulativa dei tratti di strade locali inclusi nella gridbox (**LOLEN**);
- Distanza dal mare (**DSEA**);
- Elevazione media (ELEV) ottenuta dal Servizio Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) - European Digital Elevation Model (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem>,);
- Elevazione dal livello medio del mare usata da FARM nella simulazione QualeAria (**FARMREL**);

Per ogni predittore statico, due statistiche vengono inoltre aggiunte come ulteriori predittori:

- per ogni cella, il valore medio dell'insieme composto dalla cella stessa e dalle 8 celle adiacenti;
- la percentuale del valore di ogni cella rispetto alla somma dei valori delle nove celle.

Predittori mensili

È stato considerato l'indice di superficie fogliare (Leaf Area Index, **LAI**), definito come metà dell'area totale degli elementi verdi della chioma per unità di superficie orizzontale del suolo. Il valore derivato dal satellite corrisponde al LAI verde totale di tutti gli strati della chioma, compreso il sottobosco che può rappresentare un contributo molto significativo, in particolare per le foreste. In pratica, il LAI quantifica lo spessore della copertura vegetale (dati raccolti dal satellite PROBA-V destinato all'osservazione della vegetazione, da cui il -V del nome, lanciato a metà del 2013, <https://land.copernicus.eu/global/products/lai>).

Predittori orari e giornalieri

Sono stati utilizzati i campi di concentrazione media giornaliera di PM₁₀ e PM_{2,5} e media oraria di NO₂, O₃, CO, SO₂ e benzene prodotti dal sistema QualeAria a scala nazionale interpolati sulla griglia regionale. Ogni specie è trattata separatamente, quindi il campo orario di ogni specie gassosa (NO₂, O₃, CO, SO₂, C₆H₆) è stato usato come predittore delle osservazioni orarie della stessa specie; i campi medi giornalieri di PM₁₀ e PM_{2,5} sono stati usati come predittori delle osservazioni medie giornaliere corrispondenti.

Altri predittori

Sono stati calcolati gli intervalli di tempo in giorni tra ogni giorno dell'anno e il giorno festivo immediatamente precedente o successivo (come giorni festivi sono stati considerati le domeniche e i giorni di festa nazionale italiana, compresi il giorno di Pasqua e il lunedì dopo Pasqua). Si vuole in questo modo invitare l'algoritmo RF a tener conto del fatto che l'inquinamento associato al traffico (ma anche al riscaldamento e al condizionamento degli edifici) può variare tra giorni feriali e giorni festivi.

Il giorno dell'anno, o giorno giuliano, che va da 1 (il primo gennaio a 365 (il 31 dicembre, 366 negli anni bisestili), viene spesso usato come indicatore della stagione. In questo lavoro, il giorno giuliano non viene usato direttamente come predittore, perché distingue maggiormente tra il 31 dicembre e il primo gennaio, che sono date consecutive, che tra il primo gennaio e il primo luglio, che hanno stagionalità opposte. Si è scelto di usare invece il seno e il coseno del giorno giuliano moltiplicato per $2\pi/365$, perché questa coppia di indicatori è ciclica. Analogamente, nel caso di variabili orarie si è scelto di usare il seno e il coseno dell'ora del giorno moltiplicato per $2\pi/24$.

Predittori e rete osservativa

Di fatto l'utilizzo e l'importanza di ogni predittore non sono condizionati solo dall'effettiva importanza di quel predittore per il campo di concentrazione di questa o quella specie. Dato che l'ottimizzazione viene effettuata usando osservazioni rese disponibili da una rete di stazioni, occorre valutare quanto le stazioni siano in grado, collettivamente, di dar conto dei possibili valori del predittore sul territorio di interesse. In altri termini, l'insieme dei valori di un predittore statico sui punti del grigliato target costituisce una distribuzione campionaria, di cui le posizioni delle stazioni individuano un sottoinsieme, ovvero un campione: si tratta di valutare quanto il campione "visto" dalle stazioni riesce a riprodurre l'intervallo di valori del predittore sul grigliato target. A tale scopo, predittore per predittore e specie per specie, sono stati confrontati i due istogrammi ottenuti da tutti i valori del predittore sul grigliato e dal sottoinsieme dei valori del predittore in corrispondenza delle stazioni attive, ovvero le stazioni hanno effettivamente fornito osservazioni nel 2021. Per poter essere confrontati gli istogrammi sono normalizzati in modo da sottendere un'area uguale a 1. Di questa analisi si mostrano, in Figura 5, cinque esempi per il biossido di zolfo.

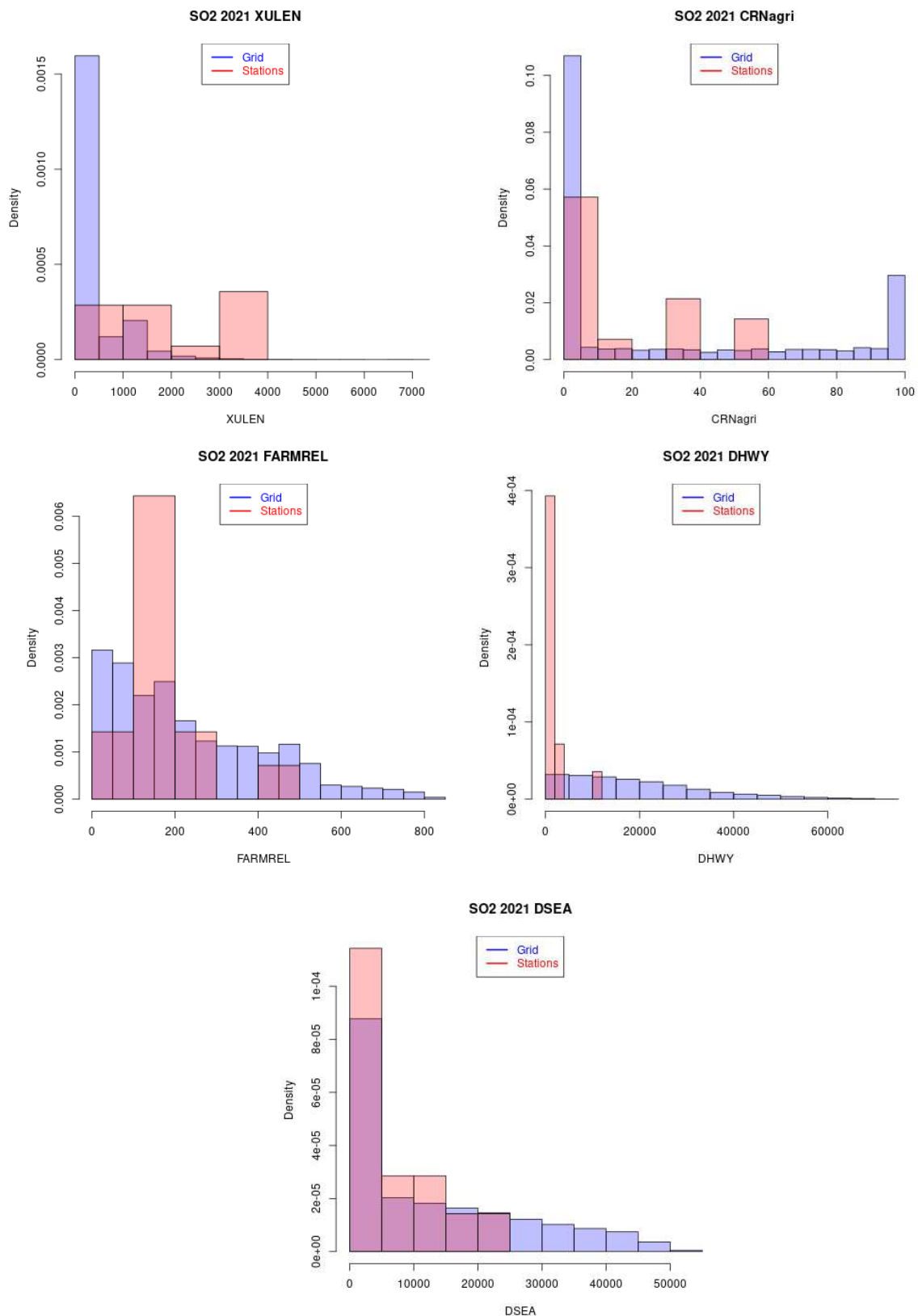
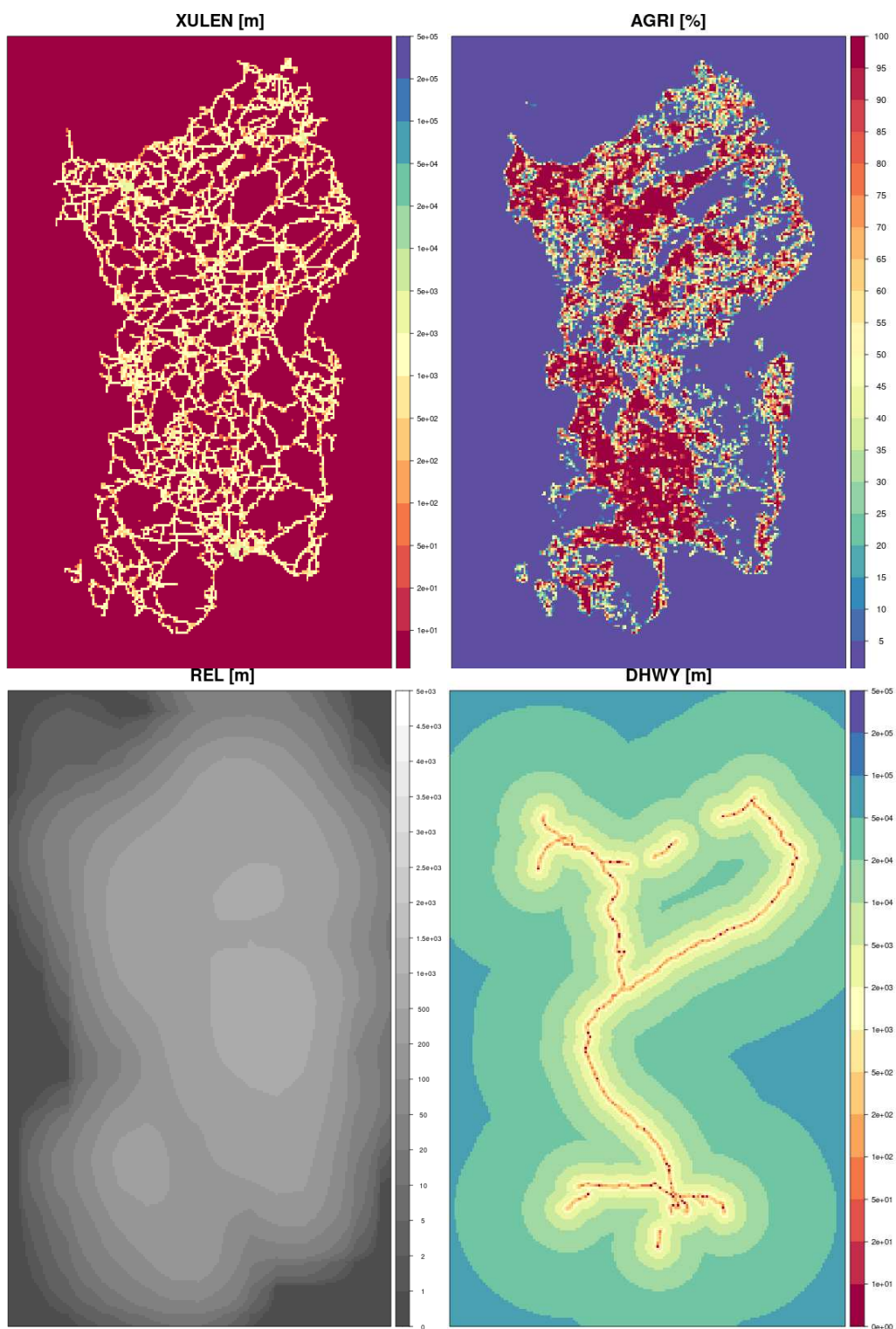


Figura 5 - Confronto delle distribuzioni dei valori dei predittori XULEN, CRNagri, FARMREL, DHWY e DSEA.
 (Istogramma blu su tutte le gridbox del grigliato target, istogramma rosso solo sulle posizioni delle stazioni della rete osservativa. Gli istogrammi sono normalizzati in modo da sottendere un'area uguale a 1.)

Per nessuno dei cinque predittori i due istogrammi possono essere considerati come rappresentativi della stessa distribuzione (un test di Smirnov darebbe risultati impietosi). Nel caso del predittore **XULEN**, però, l'intervallo su cui è distribuito il campione dei valori alle stazioni appare più ampio di quello su cui sono distribuiti la maggior parte dei valori su tutto il grigliato: questo significa che variazioni del predittore possono essere "viste" dalla rete osservativa. Ovvero, ammesso che il predittore sia rilevante per la specie in esame, è possibile che sia usato efficacemente. Negli altri casi il campione dei valori alle stazioni non riesce a "coprire" completamente la distribuzione dei valori sul grigliato target è coperta dalla distribuzione dei valori alle stazioni: sono presenti stazioni per cui FARMREL è superiore a 400 m, e ci sono almeno stazioni con CRNagri superiore al 50% (sebbene si tratti per CRNagri di una "copertura" abbastanza sbilanciata). Nel caso di DHWY, invece, il campione dei valori alle stazioni non può rappresentare adeguatamente la distribuzione dei valori su tutto il grigliato. Nel caso di DSEA, sebbene una parte importante della distribuzione dei valori su tutto il grigliato sia coperta dalle stazioni, si tratta certamente di una copertura sbilanciata: non ci sono stazioni a una distanza dal mare maggiore di 25 km (ovvero al centro dell'isola).

Come risultato di tale studio, anche dopo aver esaminato mappe di SO₂ ottenute con e senza i predittori più critici, si è deciso di scartare, per SO₂, i predittori **DHWY**, **DXU**, **DLO**, **DSEA** e i loro predittori derivati "mean" e "perc". Può essere discutibile, ma nello studio di SO₂ si è scelto di conservare CRNagri, e altri predittori dal comportamento simile. Tutti i predittori sono stati usati per le altre specie, apparentemente senza dar luogo a strutture anomale nei campi.

Degli stessi 5 predittori di Figura 5 sono mostrate le mappe in Figura 6. Per confronto, nella successiva Figura 7 sono mostrate le mappe di concentrazione di SO₂ ottenute dall'applicazione dell' algoritmo RF: a sinistra con tutti i predittori, a destra dopo aver scartato i predittori citati sopra, ovvero DHWY, DXU, DLO, DSEA e derivati.



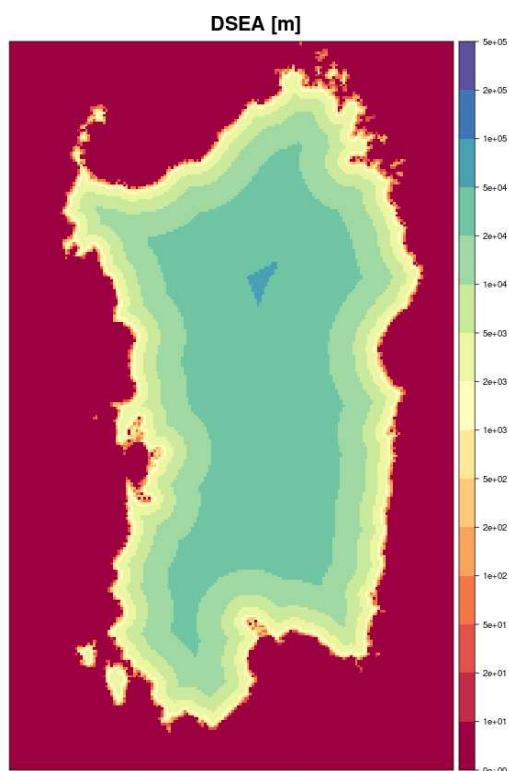


Figura 6 - Confronto delle distribuzioni dei valori dei predittori XULEN, CRNagri, FARMREL, DHWY e DSEA.

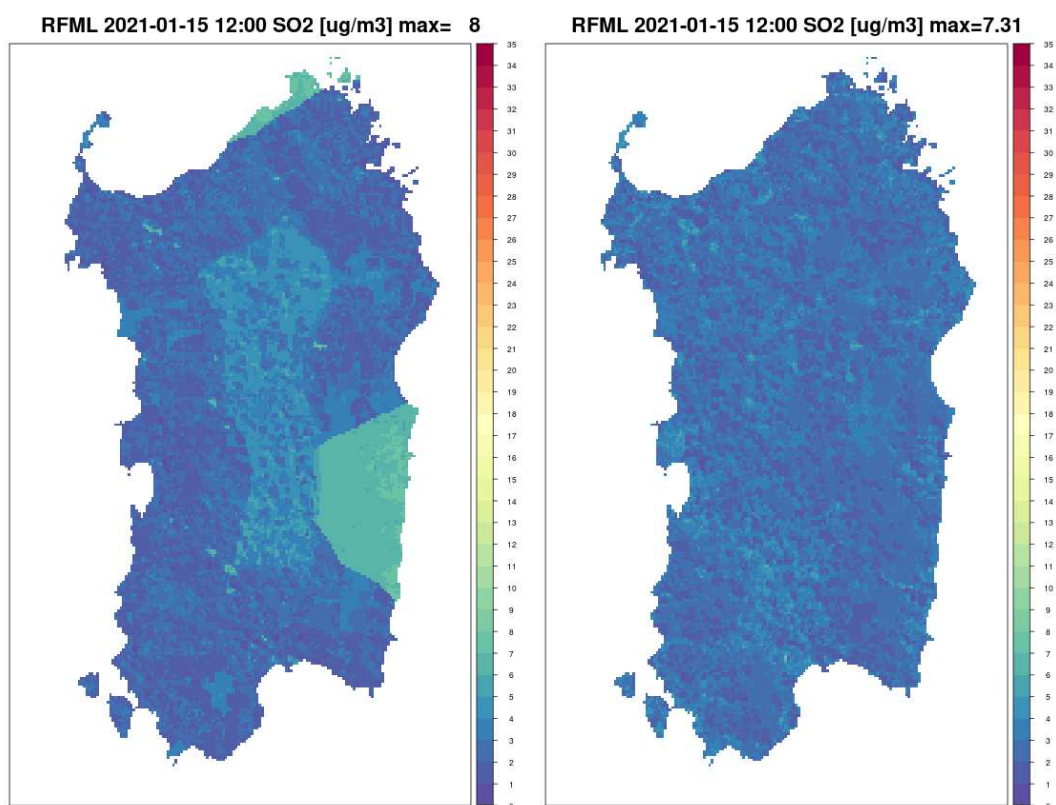


Figura 7 - Mappe di SO₂ ottenute: a sinistra con tutti i predittori, a destra con predittori selezionati.

Nella mappa di SO₂ ottenuta con tutti i predittori sono evidenti dei *pattern* correlati all'andamento dei predittori DHWY e DSEA. Occorre notare che tali *pattern* sono ripetuti sistematicamente in tutte le ore del giorno (e, di fatto in tutto il mese di gennaio) e hanno entità di diversi µg/m³, per un campo che ha valori di *background* in generale molto bassi, di qualche µg/m³, appunto. Tali *pattern* scompaiono quando i suddetti predittori sono esclusi dal training e dalla stima.

Il numero effettivo di predittori è stato di 45 per PM₁₀ e PM₂₅, 47 per NO₂, O₃, CO e C₆H₆ (i due in più sono seno e coseno dell'ora del giorno per le variabili orarie) e 35 per SO₂.

Ottimizzazione

Le osservazioni di una stazione di misura sono associate alla gridbox del grigliato target in cui cade la stazione. L'ottimizzazione è effettuata usando i valori dei predittori associati alle gridbox che contengono stazioni di misura.

La messa a punto del modello ML-RF è stata effettuata in R, utilizzando la libreria "caret" come interfaccia per il pacchetto "ranger" che implementa l'algoritmo Random Forest (Kuhn, 2008; Wright e Ziegler, 2017). I parametri liberi in "caret" sono:

- **mtry**: il numero di predittori associato in modo casuale a ogni albero decisionale della "foresta". La documentazione suggerisce che i valori appropriati di questo parametro dovrebbero essere approssimativamente un terzo, o comunque da un quinto a un mezzo, del numero totale di predittori. Questo parametro è stato lasciato libero per l'ottimizzazione effettuata da "caret".
- **min.node.size**: la minima dimensione del nodo (albero). La documentazione suggerisce il valore 5 come appropriato per modelli di regressione. Sono stati valutati altri valori, ma si è infine scelto di fissare questo parametro a tale valore.
- **splitrule**: istruzione su come deve essere scelto il set ottimale di parametri. Si è scelto di usare il minimo valore dell'errore quadratico medio (RMSE: Root Mean Square Error) piuttosto che il massimo valore di R². Si è visto a posteriori che i due criteri sono praticamente equivalenti in questo caso e si è scelto di usare RMSE.

Il numero di alberi decisionali nella "foresta" può essere specificato, ma dopo un controllo della documentazione si è scelto di usare il valore di default, 500.

In effetti, quindi, l'unico parametro lasciato libero per l'ottimizzazione di "caret" è stato il parametro **mtry**. L'ottimizzazione è stata effettuata per ogni variabile e per ogni mese dell'anno. I valori "ottimali" di mtry sono stati più o meno gli stessi nei diversi mesi: 15 su 45 predittori per PM₁₀, 15 o 20 su 45 per PM₂₅, 20 su 47 per NO₂, 20 o 25 su 47 per O₃, 25 o 30 su 47 per CO, 25 su 47 per C₆H₆ e 20/35 per SO₂.

CONFRONTO CONCENTRAZIONI MISURATE E CALCOLATE

Il modulo LURF è stato quindi applicato a tutto l'anno 2021, su base temporale giornaliera per quanto riguarda il PM₁₀ ed il PM_{2.5} ed oraria per i rimanenti inquinanti: NO₂, O₃, CO, SO₂ e benzene oraria. Di seguito vengono presentati i confronti tra le concentrazioni medie giornaliere misurate dalla rete regionale e calcolate mediante l'utilizzo del modulo LURF. Nei confronti che seguono saranno considerate preferibilmente le stazioni selezionate da ARPA per la valutazione della qualità dell'aria (Figura 8); inoltre occorre tener conto che, relativamente al particolato atmosferico, l'approccio utilizzato non consente di considerare intrusioni di polveri di origine Sahariana od eventi anomali quali incendi boschivi. Dall'analisi dei dati sperimentali di PM₁₀ e PM_{2.5} risultano livelli anomali probabilmente attribuibili ad eventi di questo tipo durante i seguenti periodi dell'anno: 6-7/2, 25/2-2/3, 19-21/6, 25/7-1/8, 9-16/8, 16-17/9 e 25-27/9.

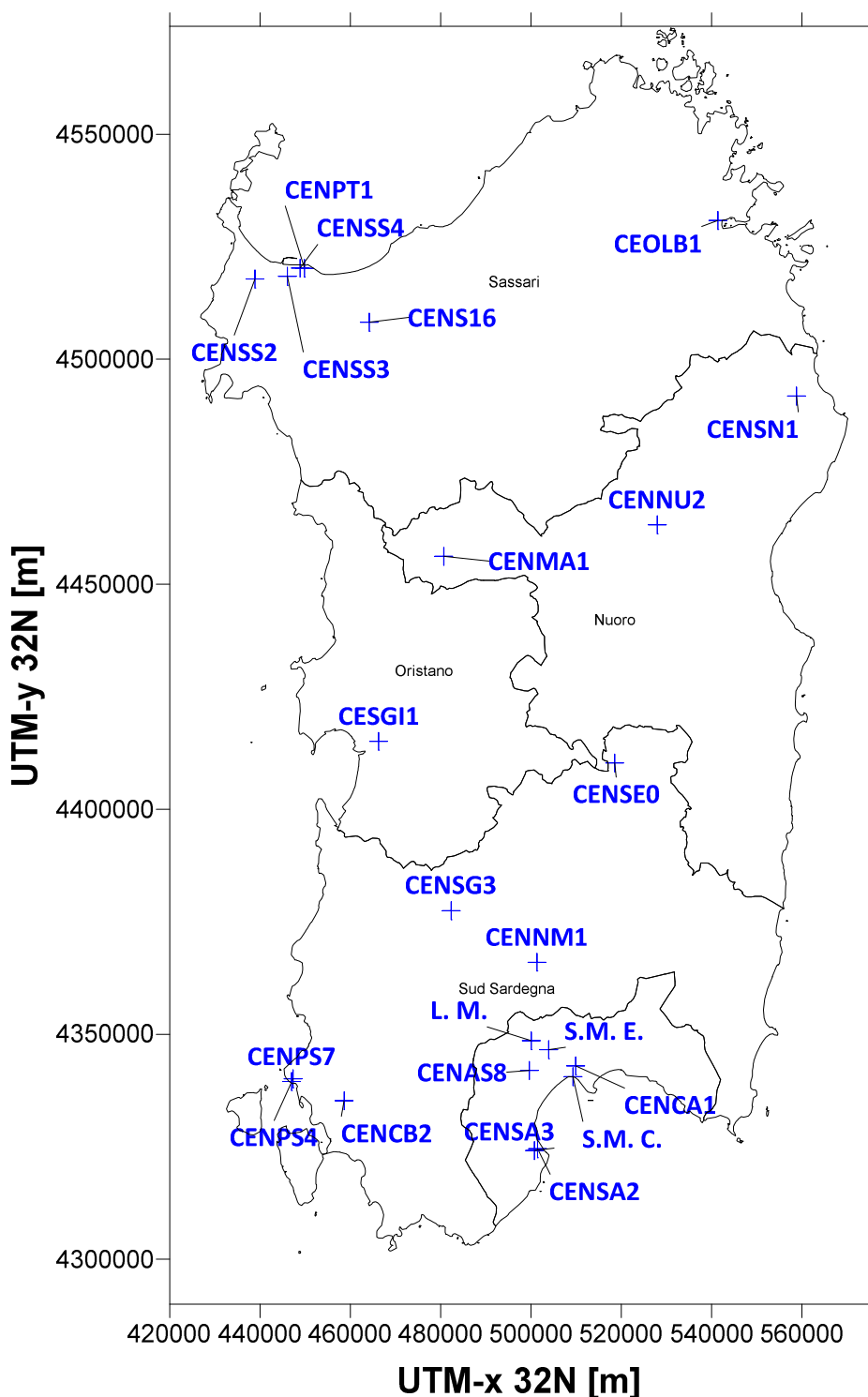


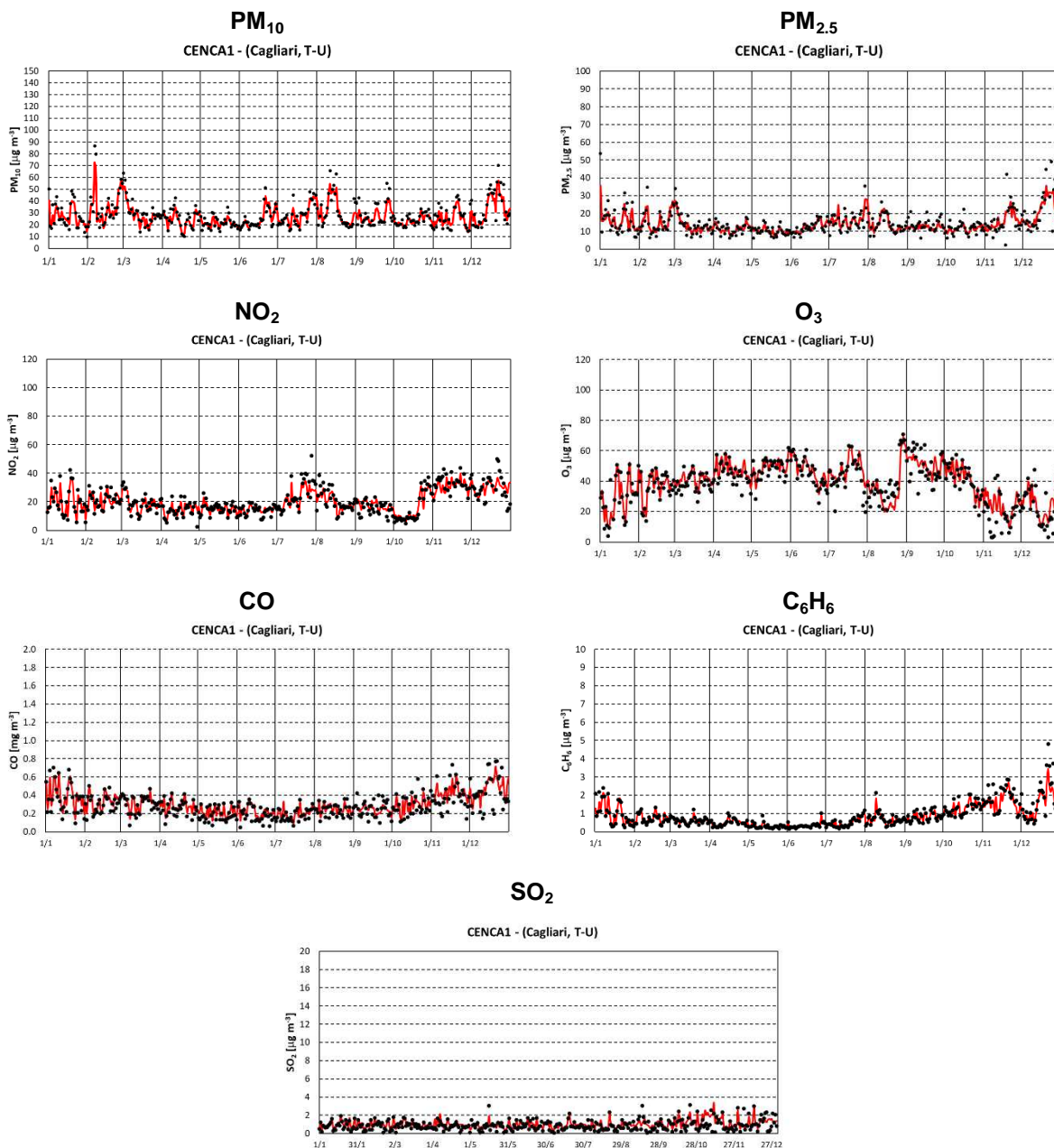
Figura 8 - Stazioni di misura utilizzate per i confronti con le osservazioni nelle diverse zone.
(L.M. indica il Laboratorio mobile; S.M.C. e S.M.E. indicano le stazioni mobili poste a Cagliari e ad Elmas.)

Agglomerato di Cagliari

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (stazione di traffico di Cagliari, CENCA1, e stazioni di fondo di Monserrato e Quartu S. E., CENMO1 e CENQU1) ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione di Cagliari (CENCA1) e stimate dal modulo LURF.



Figura 9 - Posizione delle stazioni di misura dell'agglomerato di Cagliari: CENCA1, CENMO1, CENQU1 e Stazione Mobile (STAMOB).
(Viene sottolineata la stazione utilizzata preferibilmente per i confronti.)



• Misurato — LURF

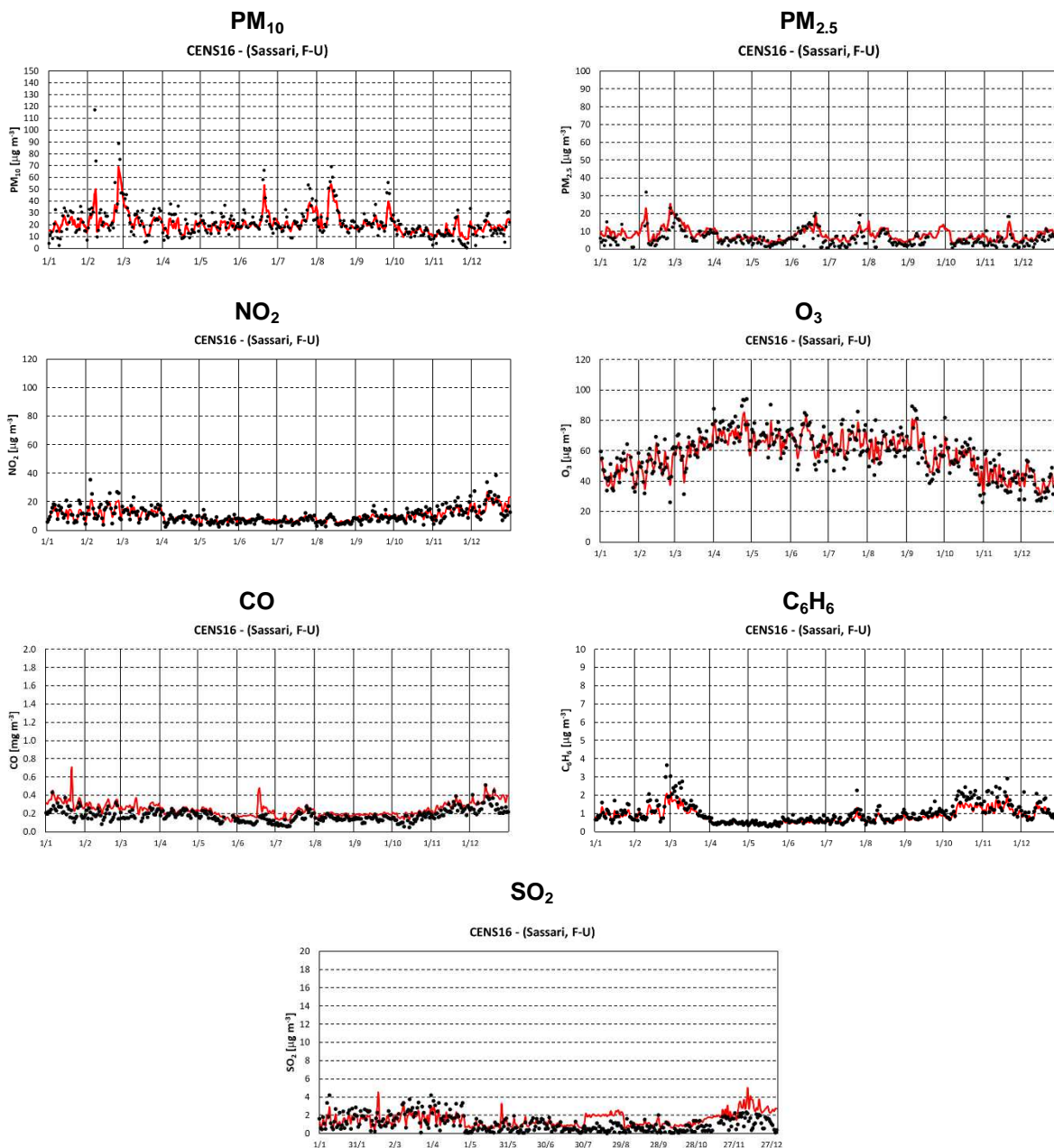
Figura 10 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona urbana – Area di Sassari

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (stazione di elevato traffico veicolare, CENS12, e stazione posta in area residenziale, CENS16) ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione di Sassari (CENS16) e stimate dal modulo LURF.



Figura 11 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Sassari: CENS12 e CENS16.



• Misurato — LURF

Figura 12 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona urbana – Area di Olbia

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (stazione di fondo CEOLB1 ubicata all'interno del parco "Fausto Noce" e stazione di traffico CENS10) ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione di Olbia (CEOLB1) e stimate dal modulo LURF.

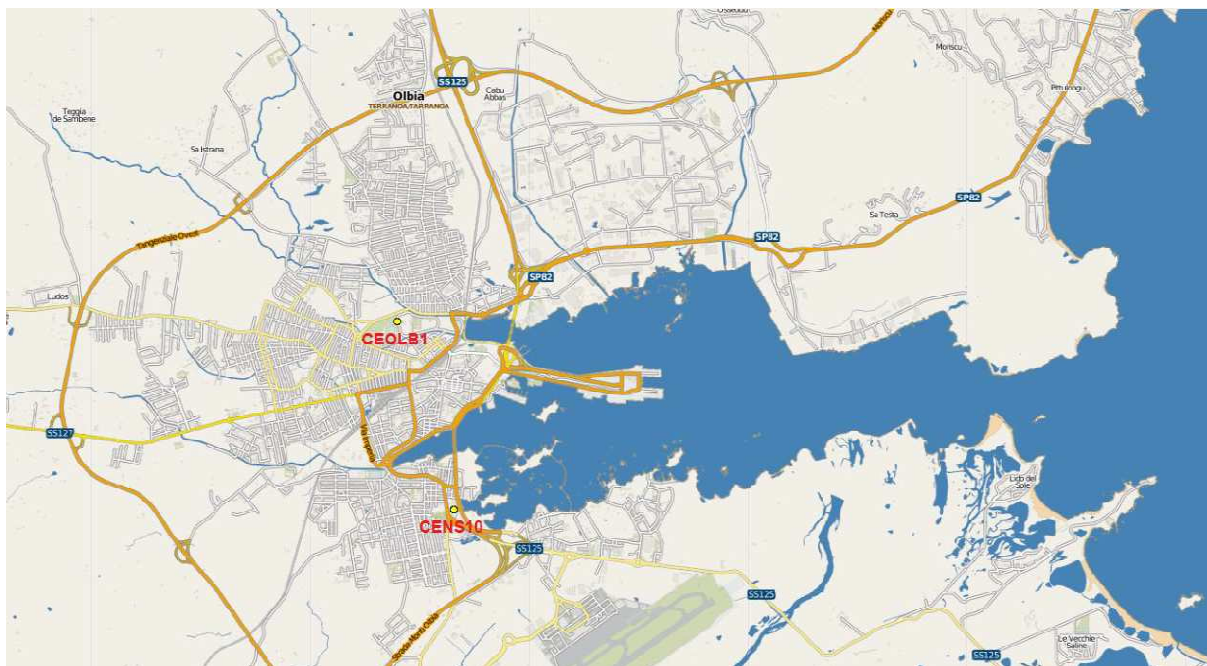
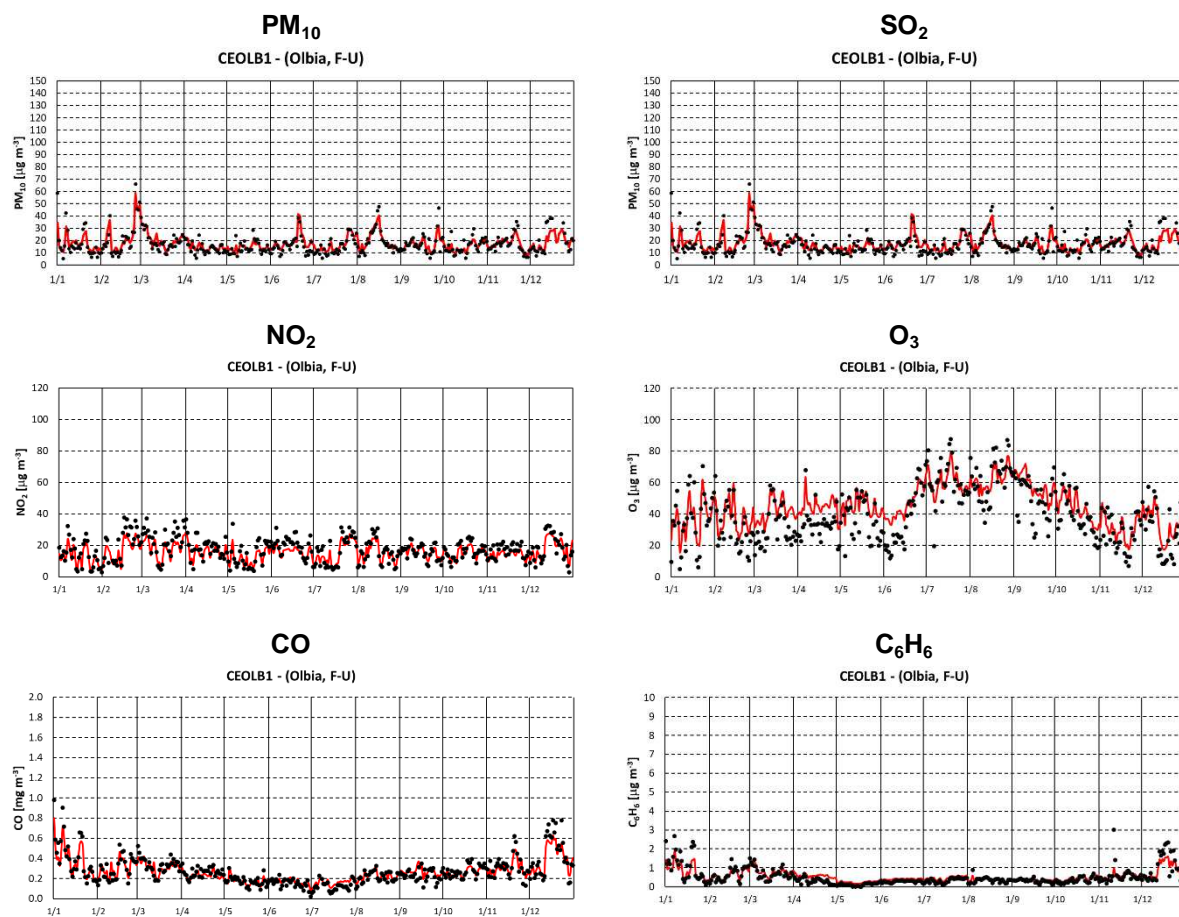


Figura 13 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Olbia: CENS10, CEOLB1.



• Misurato — LURF

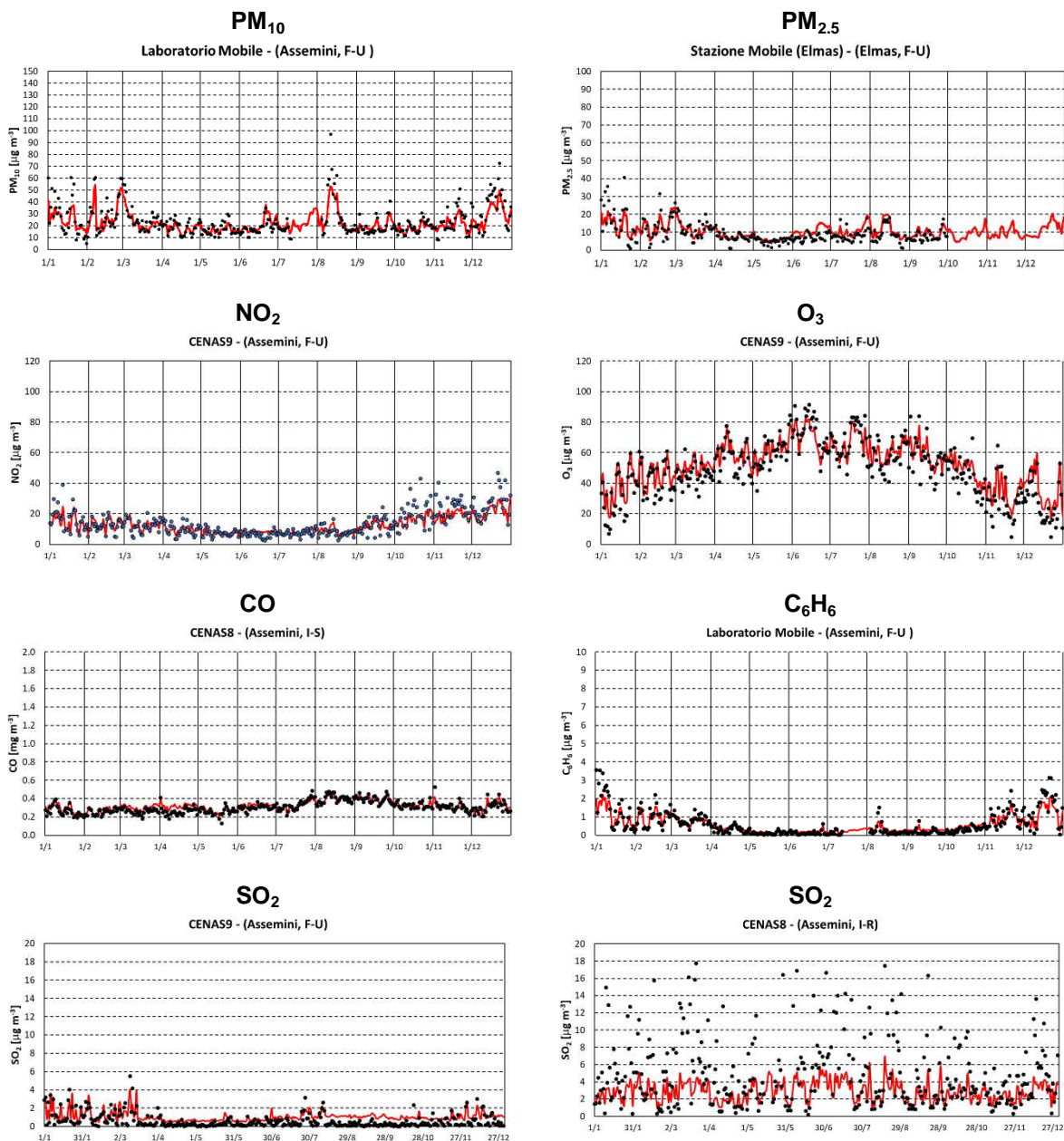
Figura 14 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona Industriale – Area di Assemini

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (stazioni CENAS6 e CENAS8 poste nell'area industriale e stazione CENAS9 posta nel centro urbano di Assemini ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione di Assemini (CENAS9) o, se non disponibili, nei siti CENAS8, "Laboratorio Mobile" e "Stazione Mobile" posta a Elmas e stimate dal modulo LURF (per quanto riguarda il biossido di zolfo è stata considerata anche la stazione CENAS8).



Figura 15 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Assemini: CENAS6, CENAS8, CENAS9 e Laboratorio Mobile (LABMOB).



• Misurato — LURF

Figura 16 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona Industriale – Area di Sarroch

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (stazioni CENSA3 ubicata all'interno dell'area urbana e CENSA2 posta nella periferia del centro abitato in prossimità dell'area industriale) ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione CENSA2 e stimate dal modulo LURF (per quanto riguarda il benzene è stata considerata anche la stazione CENSA3).

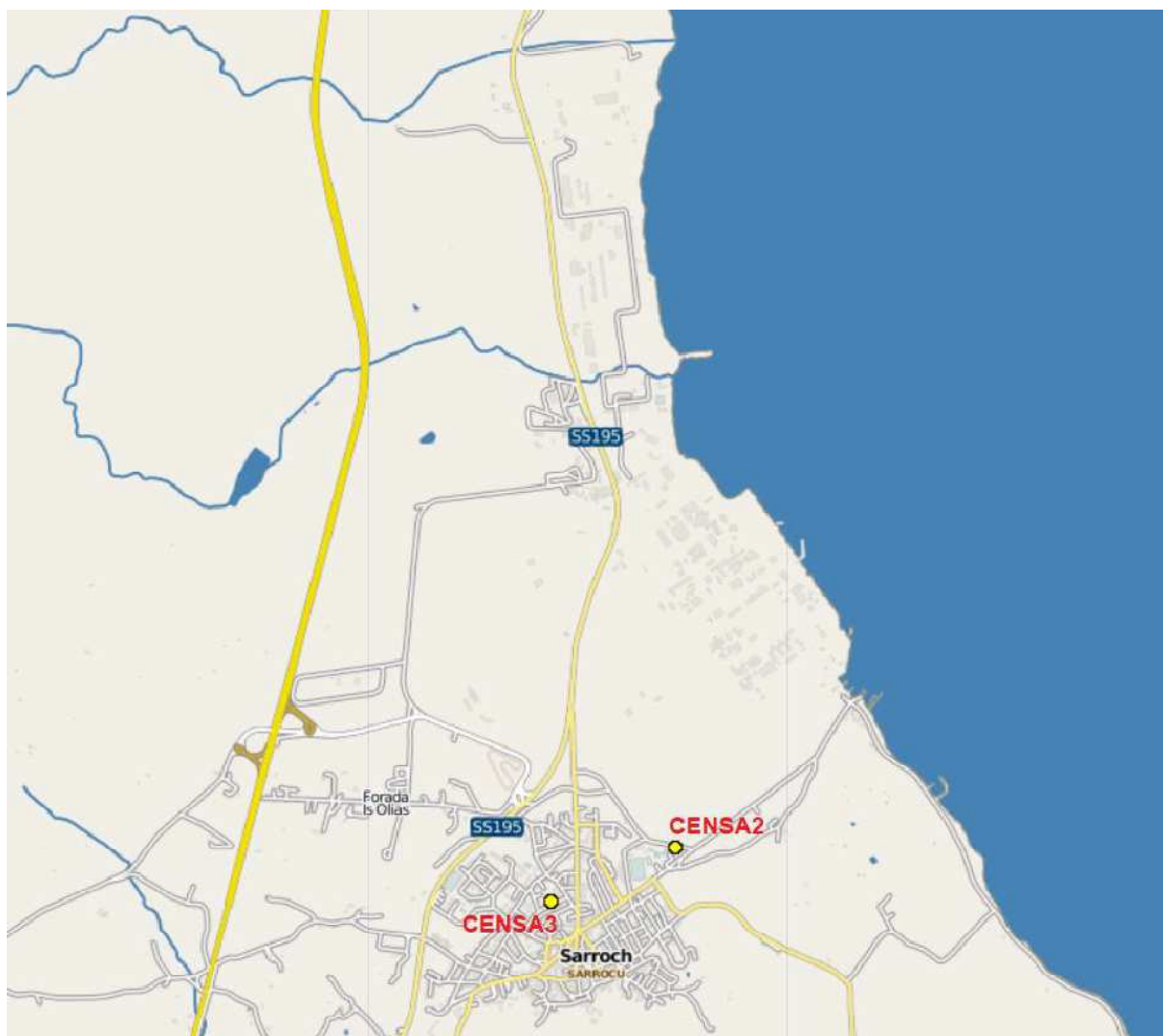
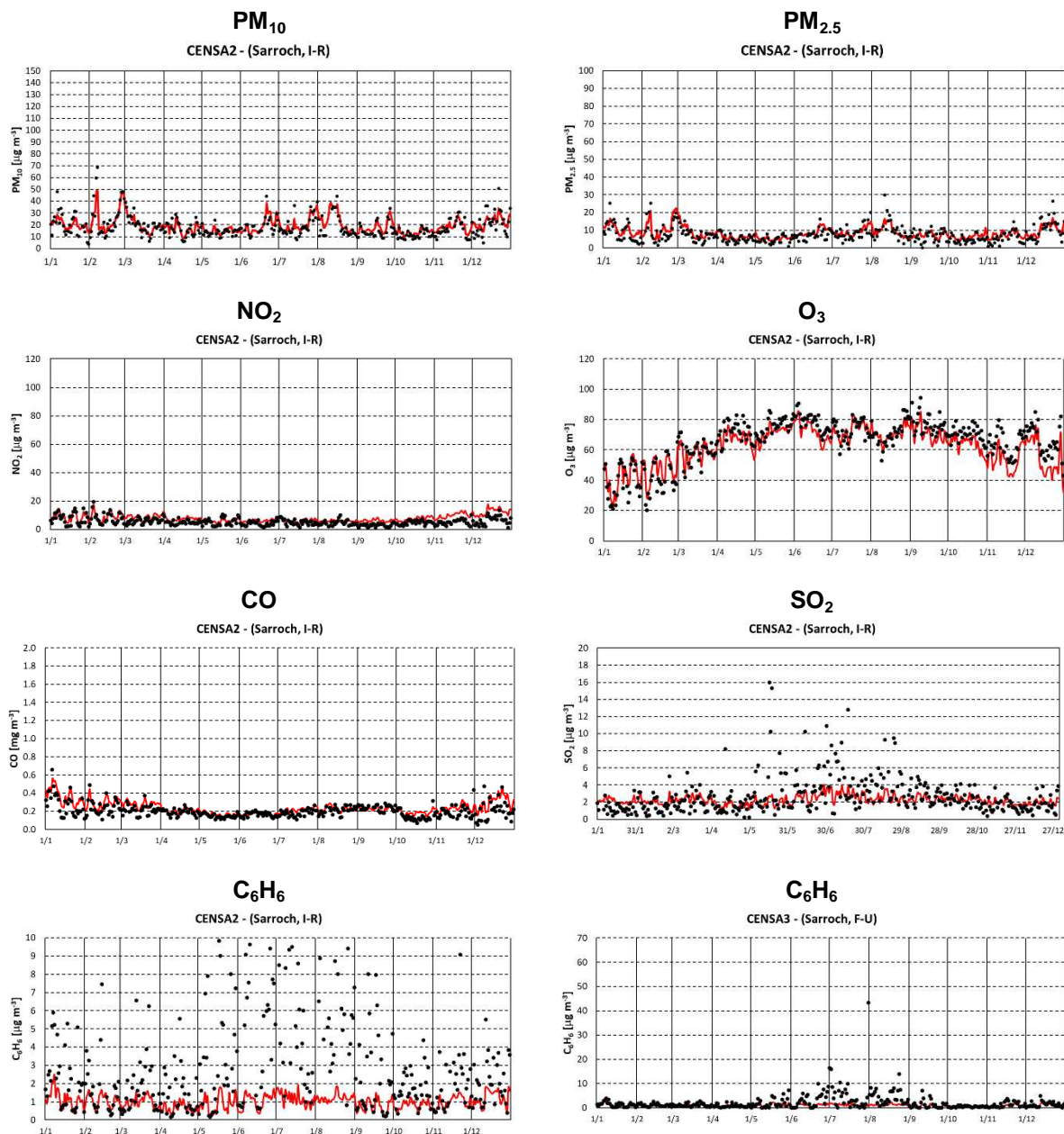


Figura 17 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Sarroch: CENSA2 e CENSA3.



• Misurato — LURF

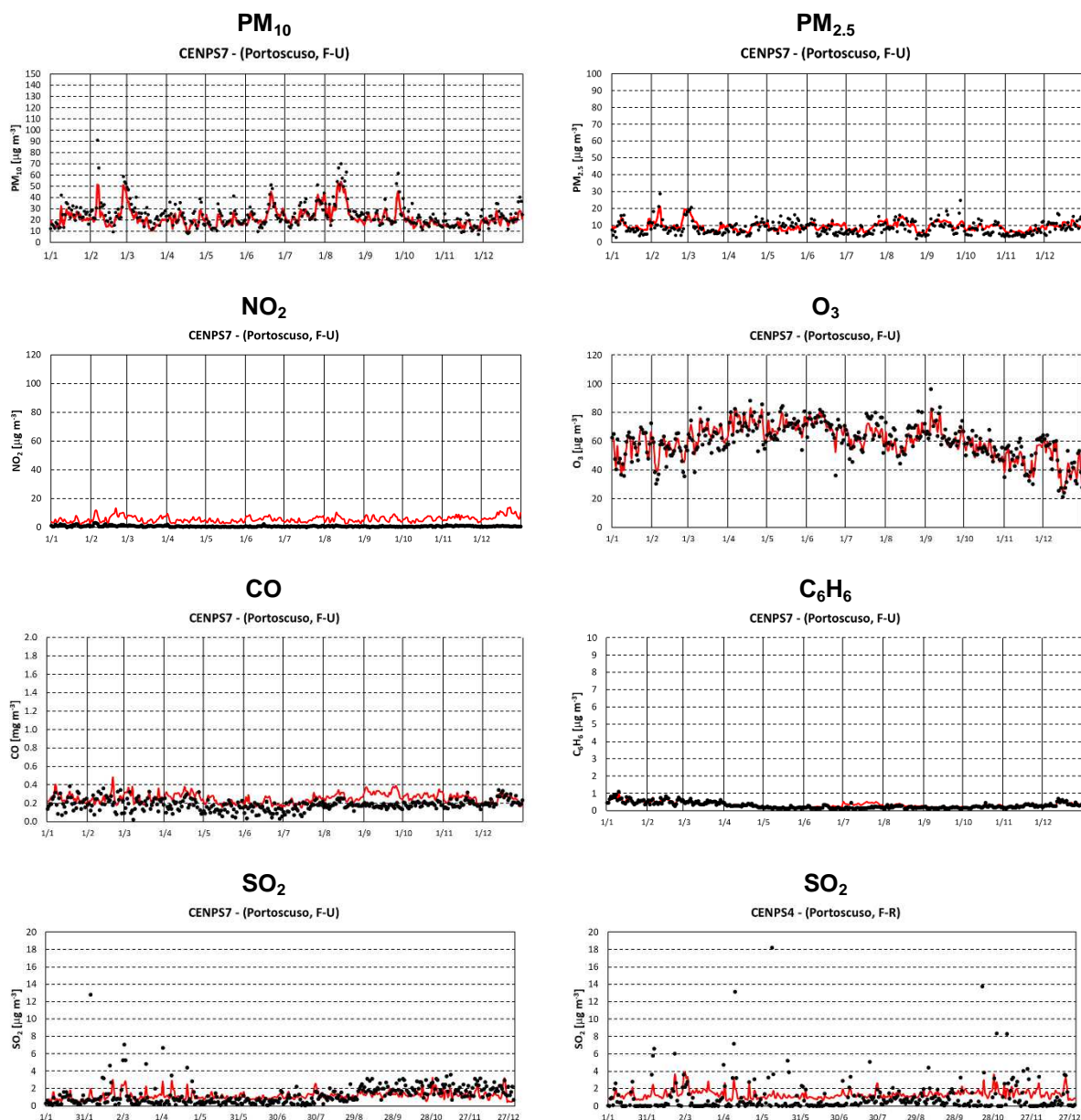
Figura 18 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF. (La scala relativa al benzene è stata modificata.)

Zona Industriale – Area Portoscuso

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (stazione CENPS4 dislocata in prossimità dell'area industriale e due stazioni posizionate rispettivamente nel centro urbano di Portoscuso, CENPS7, e nella frazione di Paringianu, CENPS6) ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione CENPS7 e stimate dal modulo LURF (per quanto riguarda il biossido di zolfo è stata considerata anche la stazione CENPS4).



Figura 19 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Portoscuso: CENPS2, CENPS4, CENPS6, CENPS7.



• Misurato — LURF

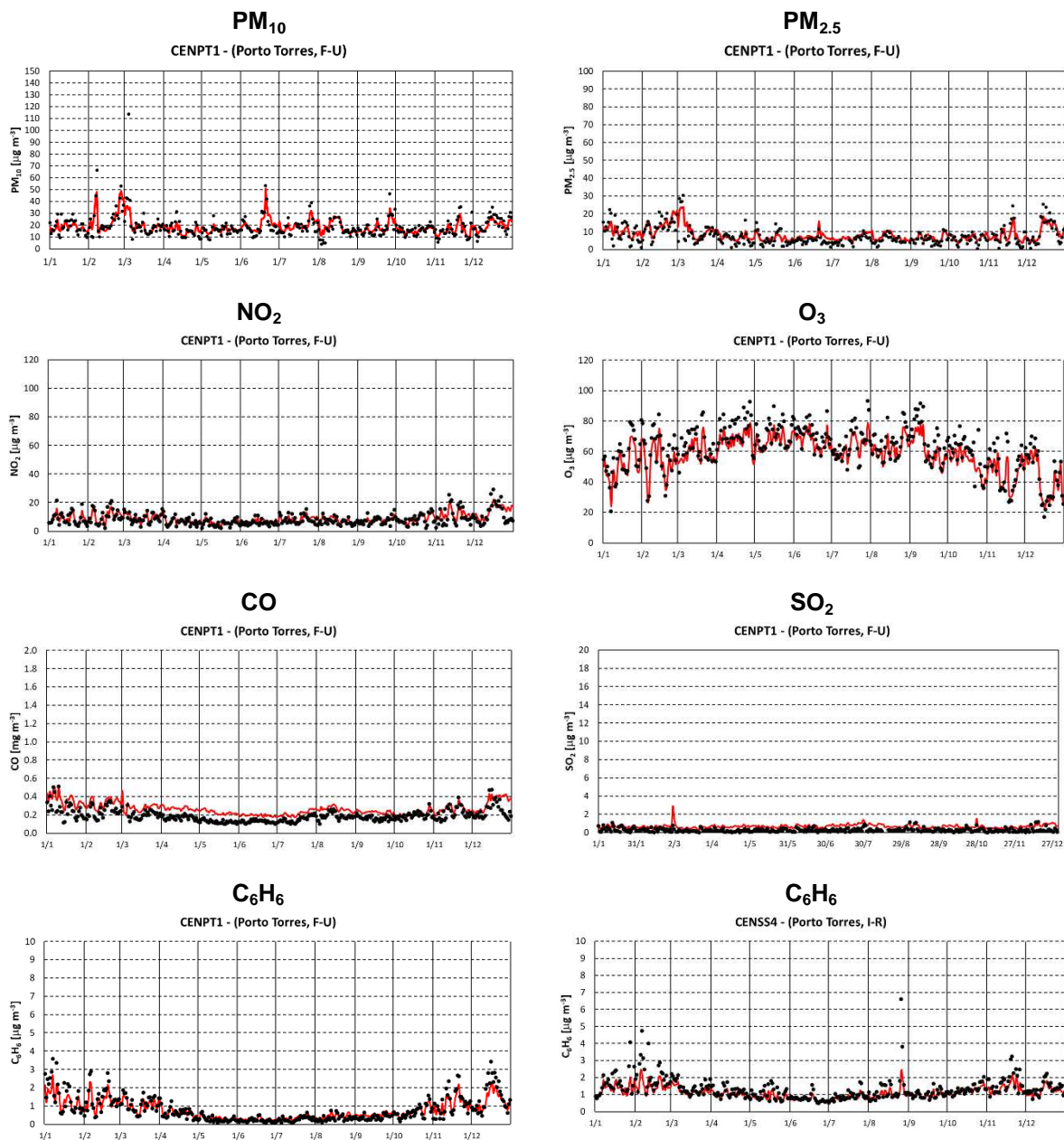
Figura 20 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona Industriale – Area di Porto Torres

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area (CENSS3 dislocata in area industriale, CENSS4 a protezione del centro abitato, CENSS2 a ovest della centrale termoelettrica di Fiume Santo e CENPT1 nel centro urbano) ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione CENPT1 e stimate dal modulo LURF (per quanto riguarda il benzene è stata considerata anche la stazione CENSS4).



Figura 21 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Porto Torres (più l'area industriale di Fiume Santo): CENPT1, CENSS2, CENSS3 e CENSS4.



• Misurato — LURF

Figura 22 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona rurale – Area Sulcis–Iglesiente

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la localizzazione della stazione di misura Carbonia (CENCB2) ed i confronti tra le concentrazioni misurate in tale stazione e stimate dal modulo LURF.

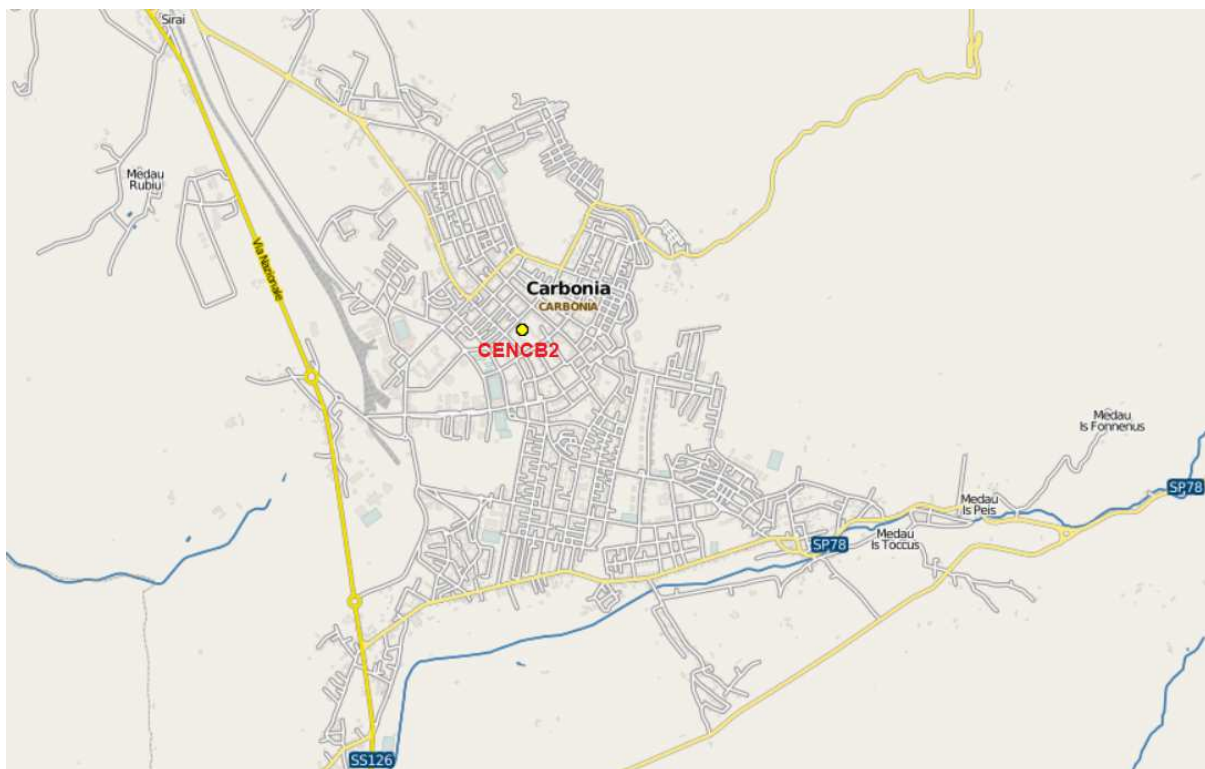
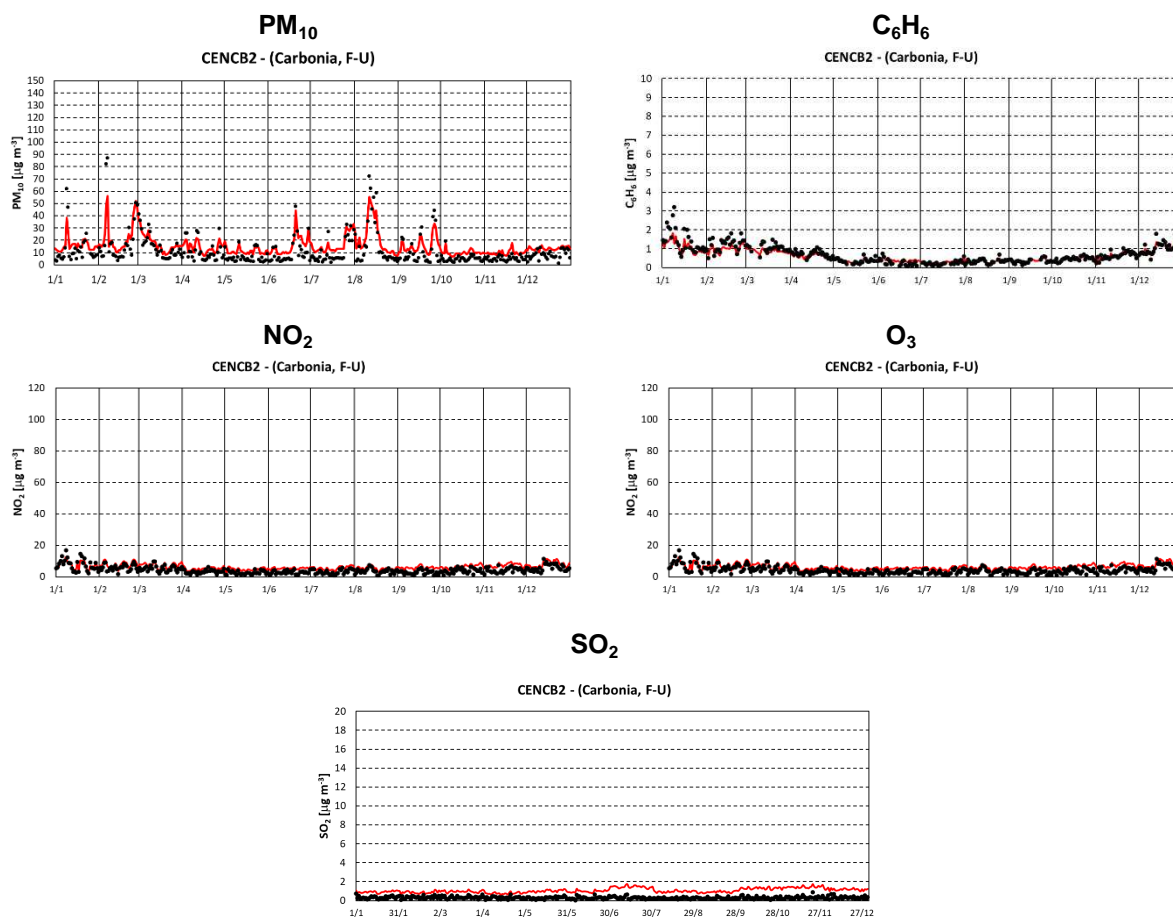


Figura 23 - Posizione della stazione di misura Carbonia dell'area di Sulcis–Iglesiente: CENCB2.



• Misurato — LURF

Figura 24 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona rurale – Area Medio Campidano

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione di Nuraminis (CENNM1) e stimate dal modulo LURF.

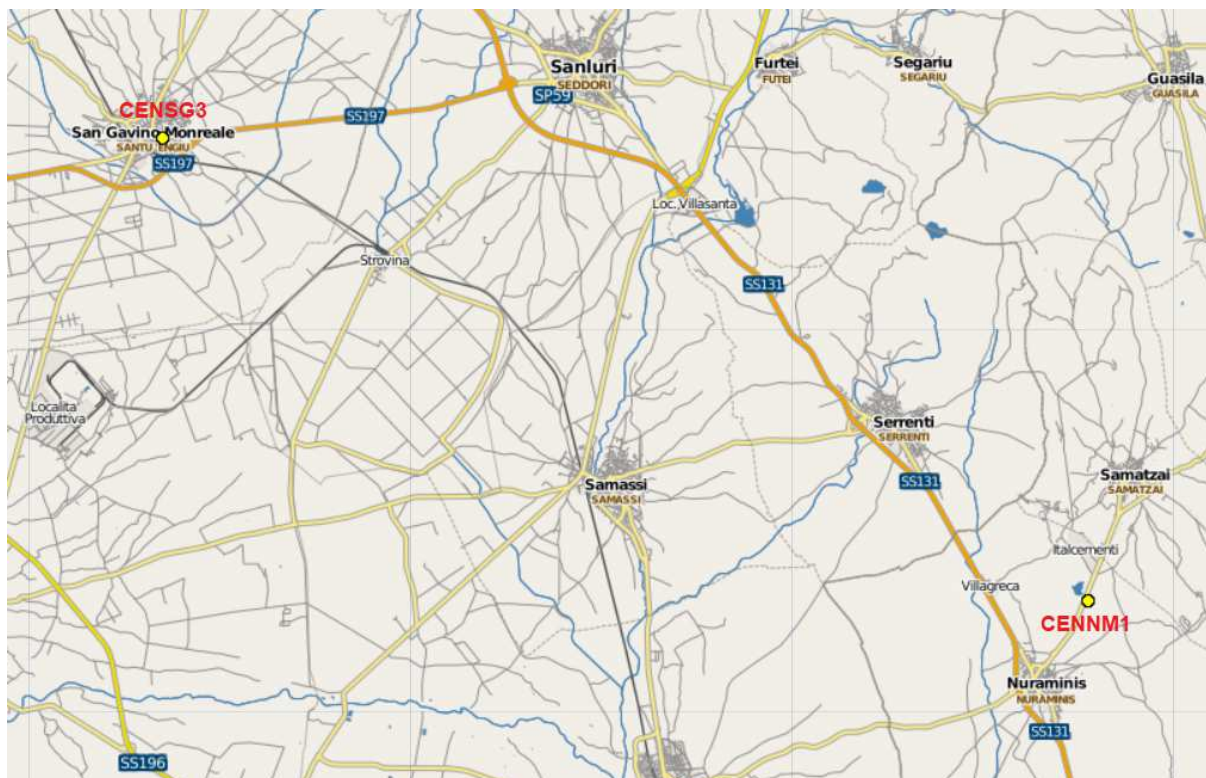
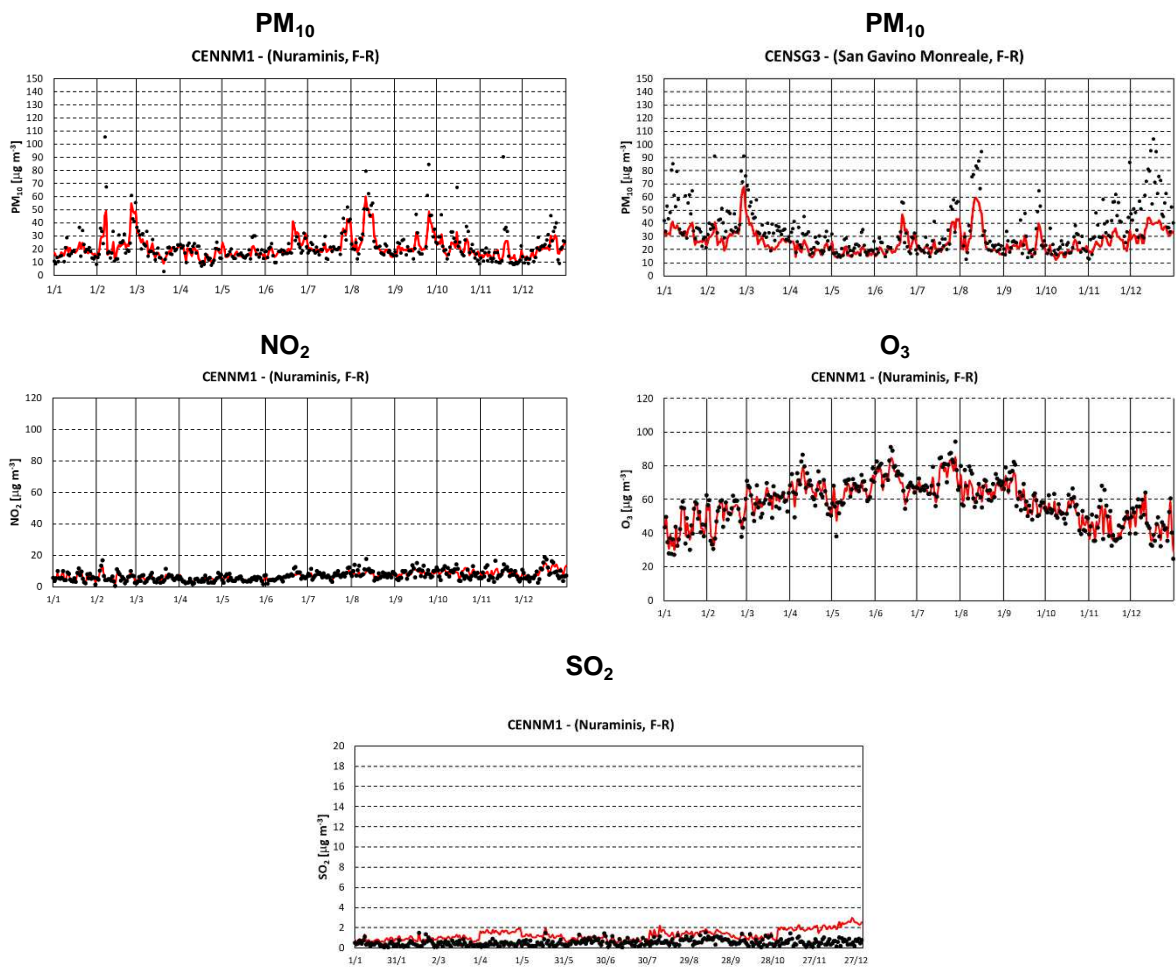


Figura 25 - Posizione delle stazioni di misura dell'area Medio Campidano: CENNM1 e CENSG3.



• Misurato — LURF

Figura 26 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona rurale – Area di Oristano

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area ed i confronti tra le concentrazioni misurate nella stazione di Santa Giusta (CESGI1) e, se non disponibili, nelle stazioni di Oristano CENOR1 e CENOR2 e stimate dal modulo LURF.

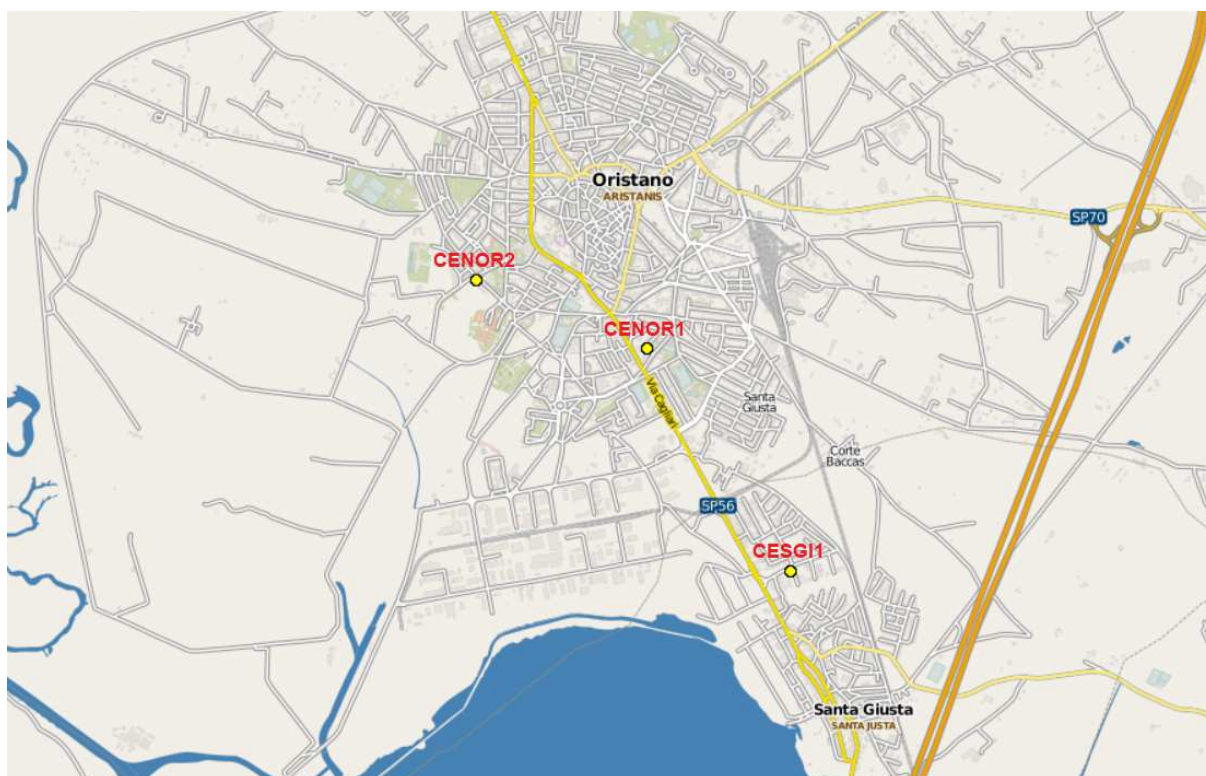
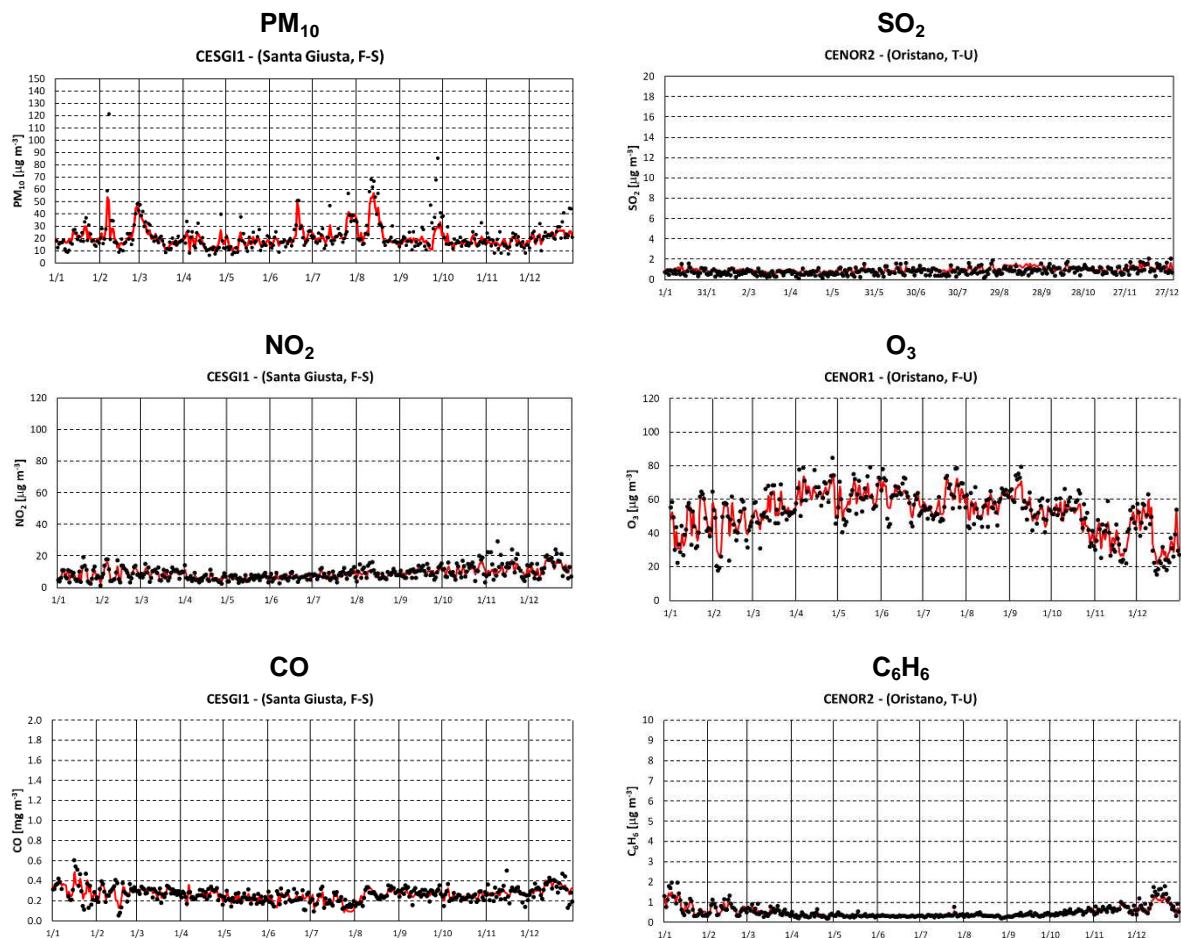


Figura 27 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Oristano: CENOR1, CENOR2, CESGI1.



• Misurato — LURF

Figura 28 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona rurale – Area di Nuoro

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la dislocazione delle stazioni di misura presenti in tale area ed i confronti tra le concentrazioni misurate nelle stazioni di Nuoro (CENNU2 o, se non disponibili, CENNU1) e stimate dal modulo LURF.

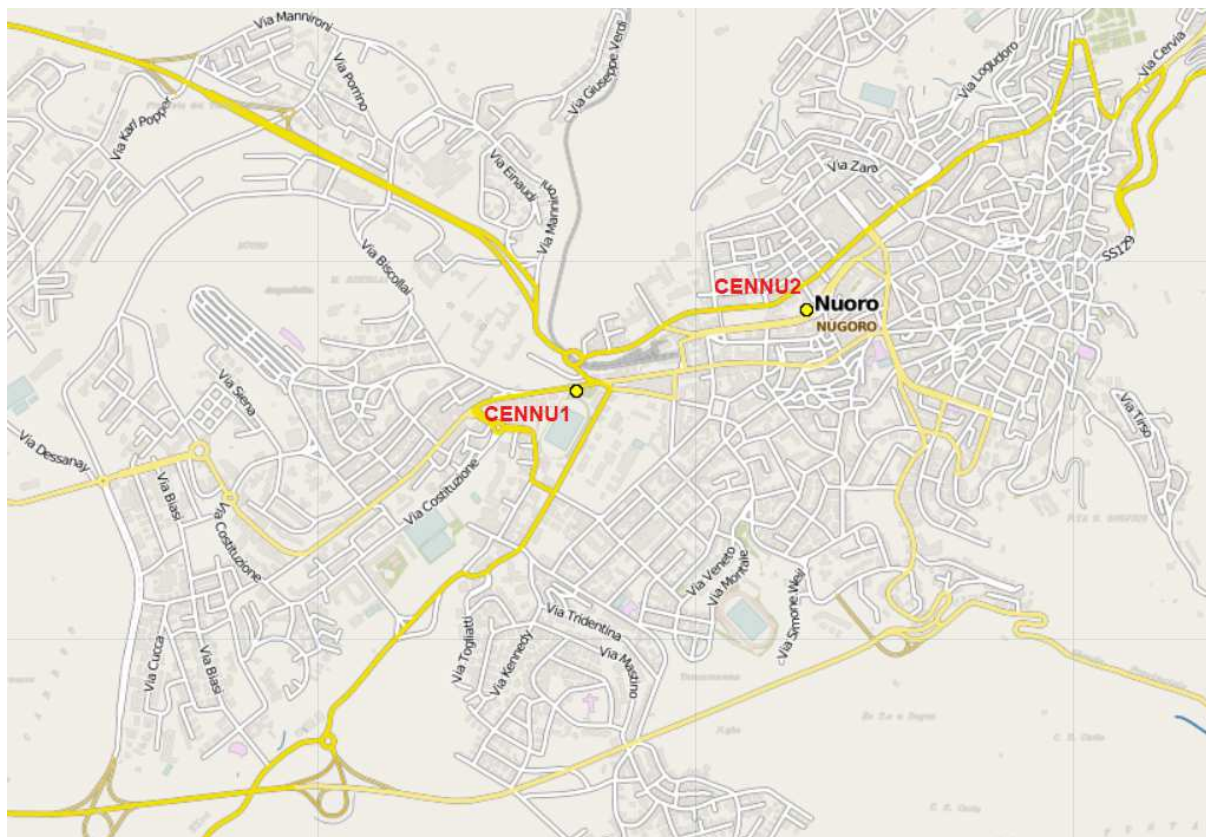
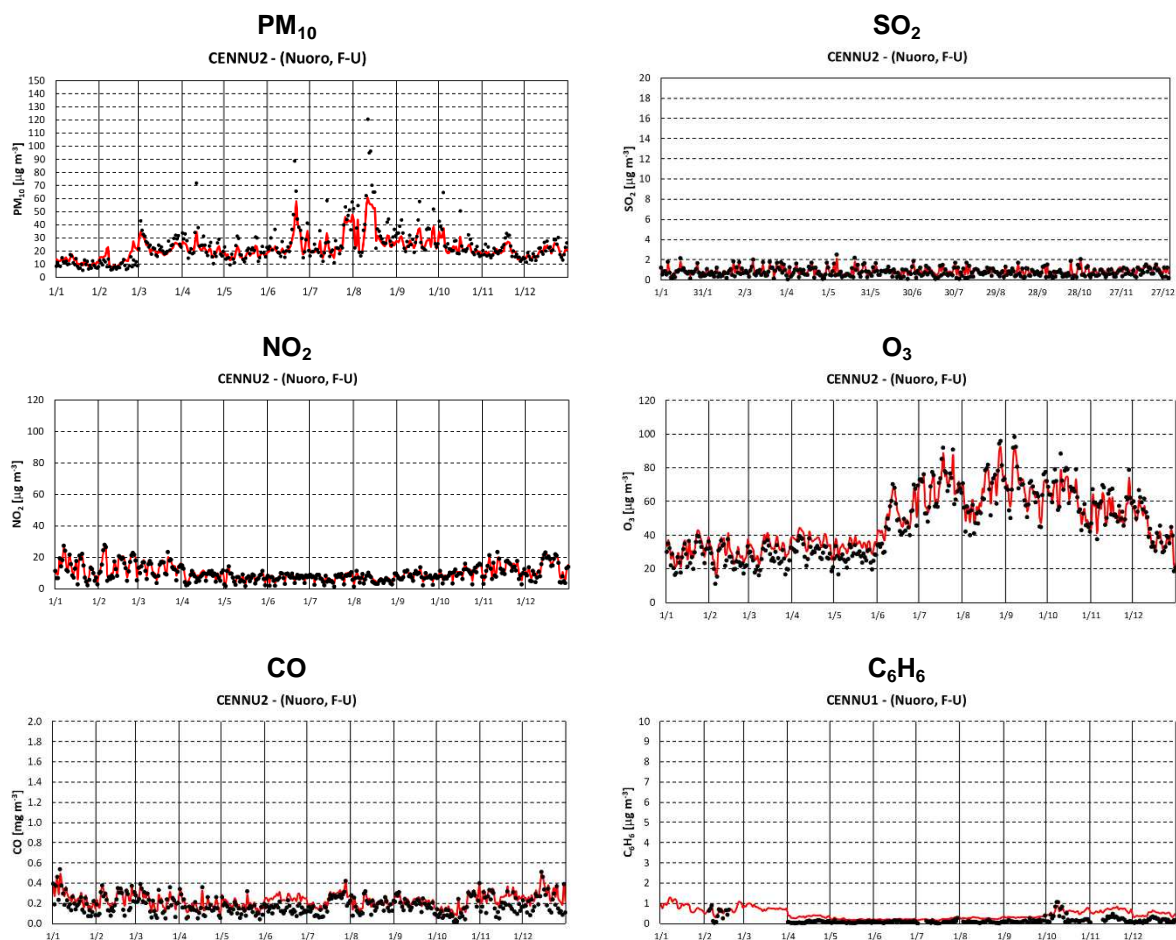


Figura 29 - Posizione delle stazioni di misura dell'area di Nuoro: CENNU1, CENNU2.



• Misurato — LURF

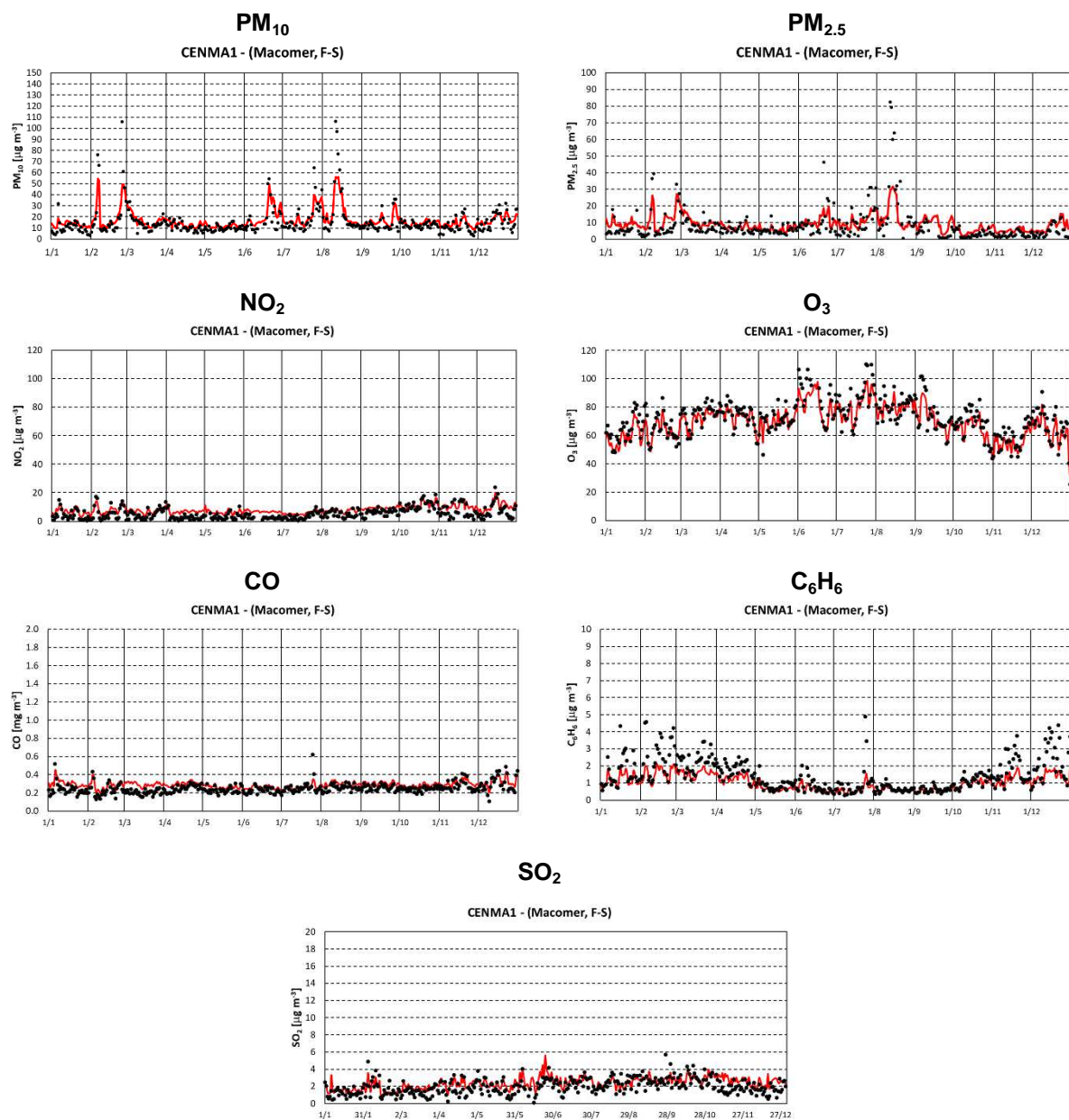
Figura 30 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona rurale – Area Sardegna Centro–Settentrionale

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la localizzazione della stazione di misura Macomer (CENMA1) ed i confronti tra le concentrazioni misurate in tale stazione e stimate rispettivamente dal modulo LURF.



Figura 31 - Posizione delle stazioni di misura MACOMER dell'area Sardegna Centro–Settentrionale: CENMA1.



• Misurato — LURF

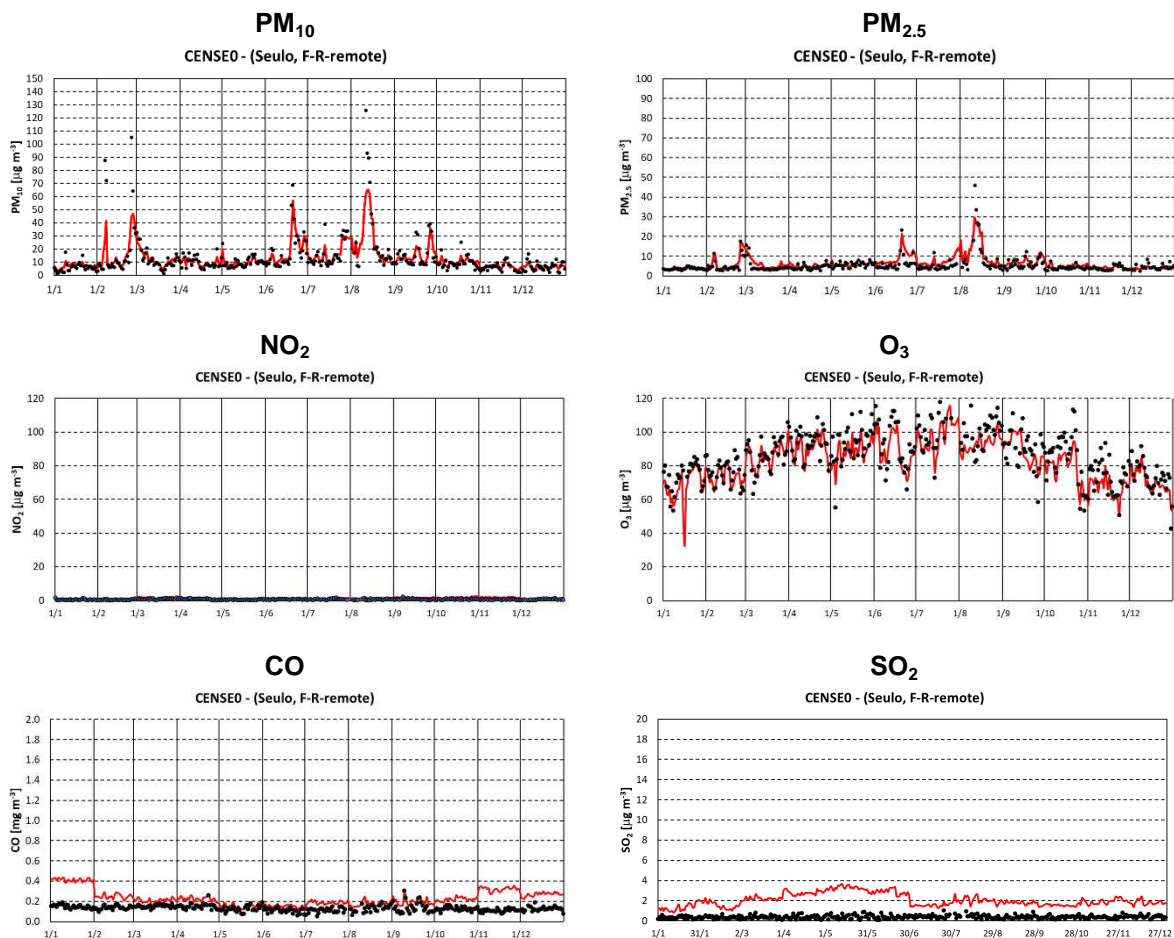
Figura 32 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

Zona rurale – Seulo (Stazione di Fondo Regionale)

Nelle figure seguenti sono mostrate rispettivamente la localizzazione della stazione di misura Seulo (CENSE0) ed i confronti tra le concentrazioni misurate in tale stazione e stimate rispettivamente dal modulo LURF.



Figura 33 - Posizione della stazione di misura Seulo, Stazione di Fondo Regionale: CENSE0.



• Misurato — LURF

Figura 34 - Confronti tra le concentrazioni misurate dalla rete regionale e stimate dal modulo LURF.

VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

I risultati mostrati nel paragrafo precedente evidenziano un ottimo accordo tra le concentrazioni misurate e stimate mediante l'utilizzo del modulo LURF nelle diverse aree definite dalla zonizzazione del territorio regionale. Tale risultato giustifica quindi l'utilizzo dei campi prodotti mediante l'applicazione del modulo LURF per produrre le mappe regionali relative agli standard di qualità dell'aria, definiti dal D. Lgs. n. 155/2010, per i seguenti inquinanti: SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, CO, benzene ed O₃.

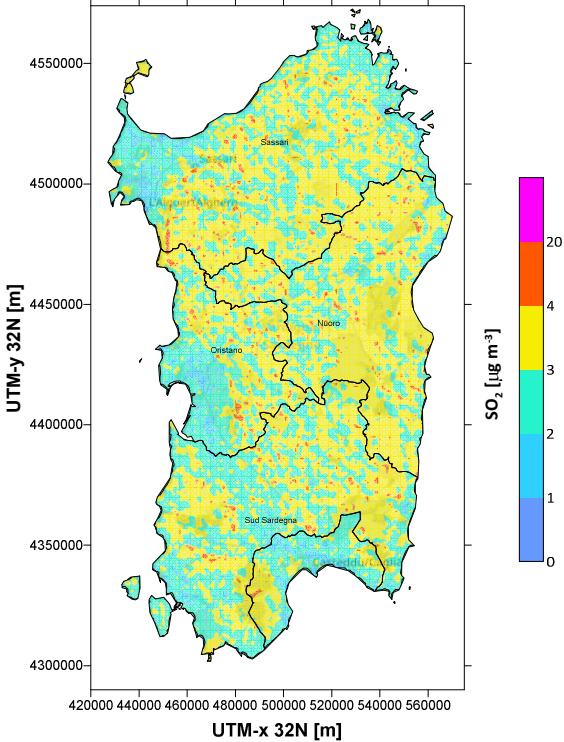
Valore limite	Mappa regionale
<p>Numero di superamenti del valore limite per le concentrazioni medie orarie di SO₂.</p> <p>Valore limite per la protezione della salute: 350 µg m⁻³ da non superare più di 24 volte per anno civile.</p>	<p>NESSUN SUPERAMENTO</p>
<p>Numero di superamenti del valore limite per le concentrazioni medie giornaliere di SO₂.</p> <p>Valore limite per la protezione della salute: 125 µg m⁻³ da non superare più di 3 volte per anno civile.</p>	<p>NESSUN SUPERAMENTO</p>
<p>Concentrazioni medie annuali di SO₂.</p> <p>Valore limite per la protezione della vegetazione: 20 µg m⁻³</p>	
<p>Non si evidenziano particolari criticità ambientali relativamente all'SO₂. Non risultano superamenti del valore limite per le concentrazioni medie orarie e giornaliere e le concentrazioni medie annuali risultano inferiori al valore limite per la protezione della vegetazione.</p>	

Figura 35 - SO₂: Mappe regionali relative ai valori limite di qualità dell'aria.

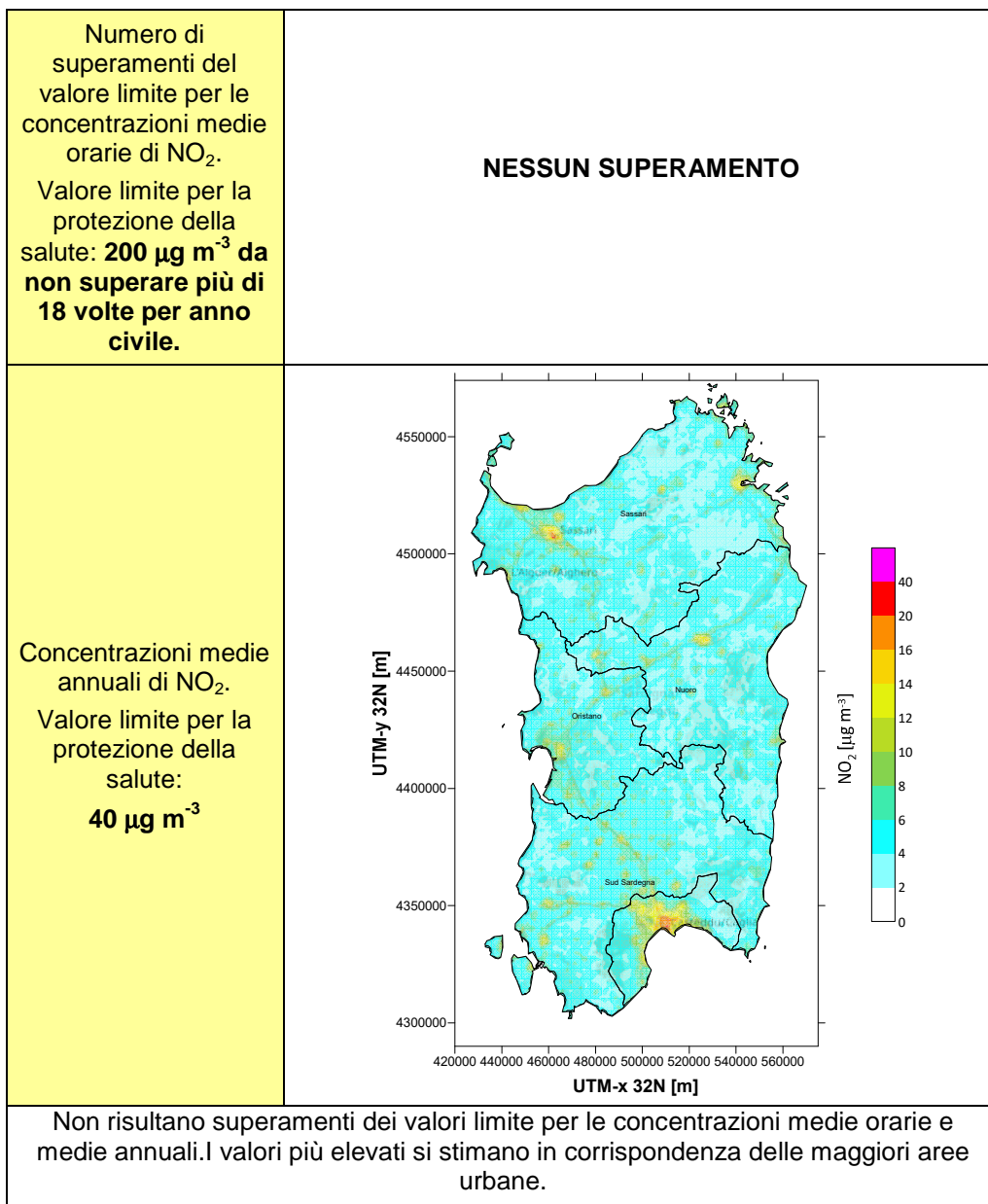


Figura 36 - NO₂: Mappe regionali relative ai valori limite di qualità dell'aria.

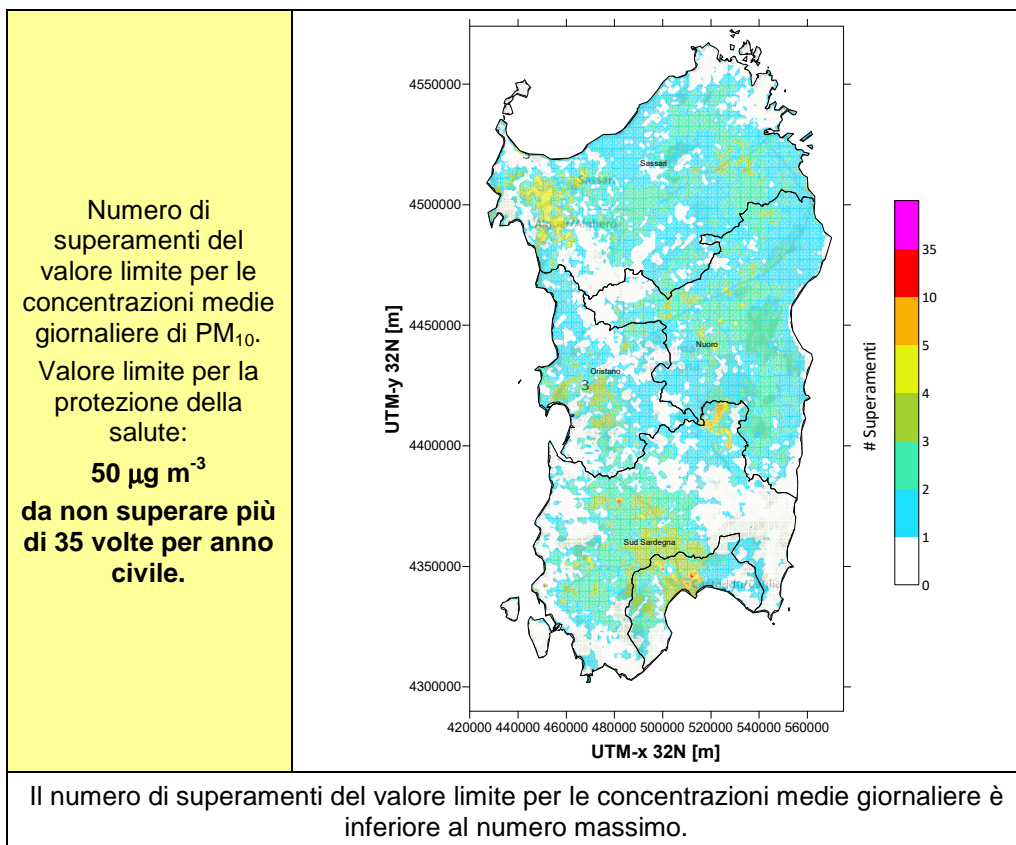


Figura 37 - PM₁₀: Mappa regionale relativa al numero di superamenti del valore limite per la protezione della salute.
(Le aree di colore "bianco" corrispondono a zone nelle quali non risulta alcun superamento del valore limite.)

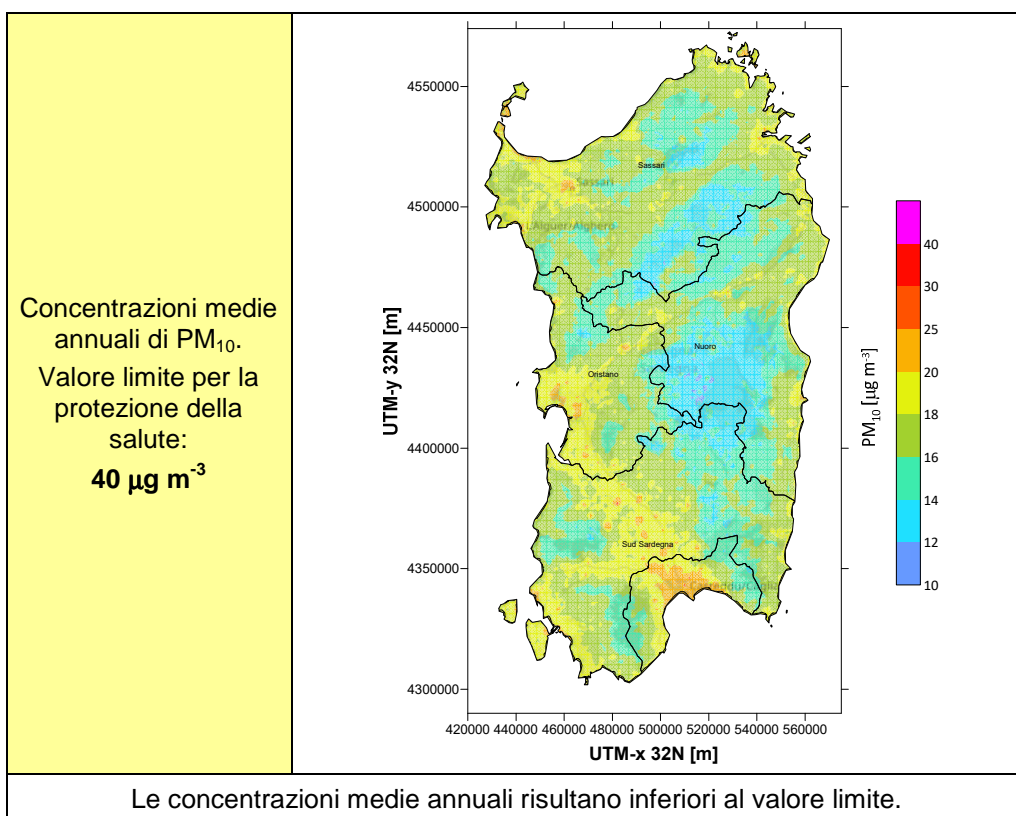


Figura 38 - PM₁₀: Mappa regionale relativa alle concentrazioni medie annuali.

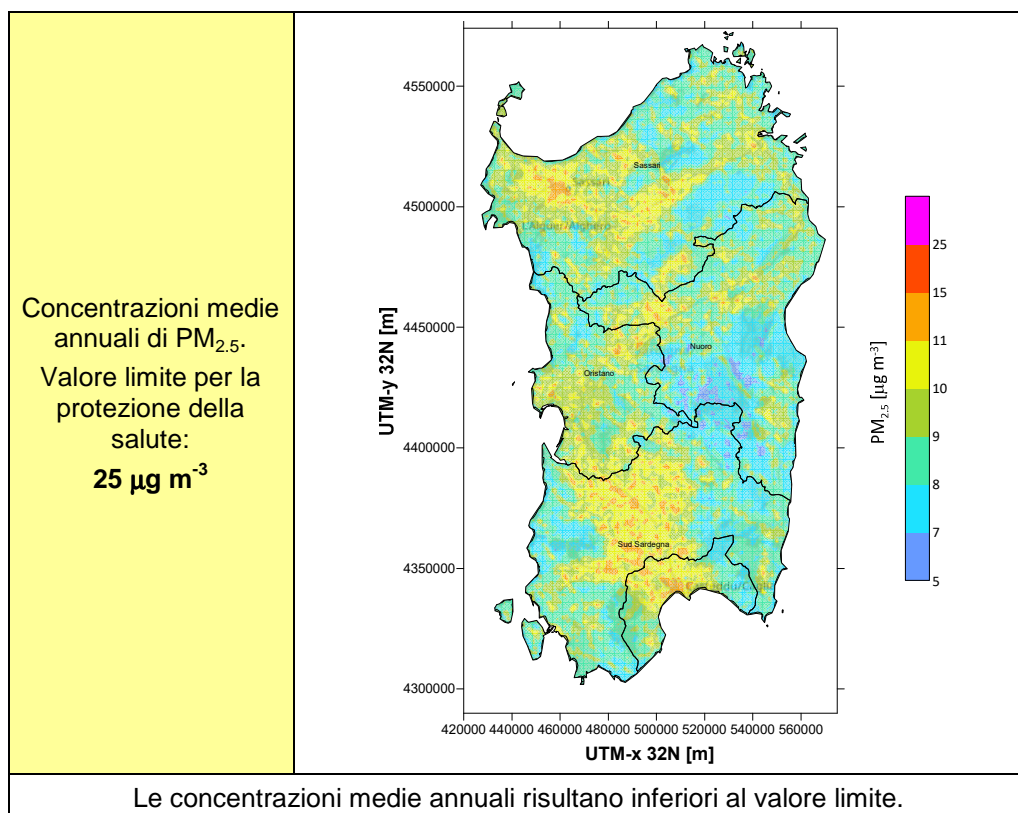


Figura 39 - PM_{2.5}: Mappa regionale relativa alle concentrazioni medie annuali.

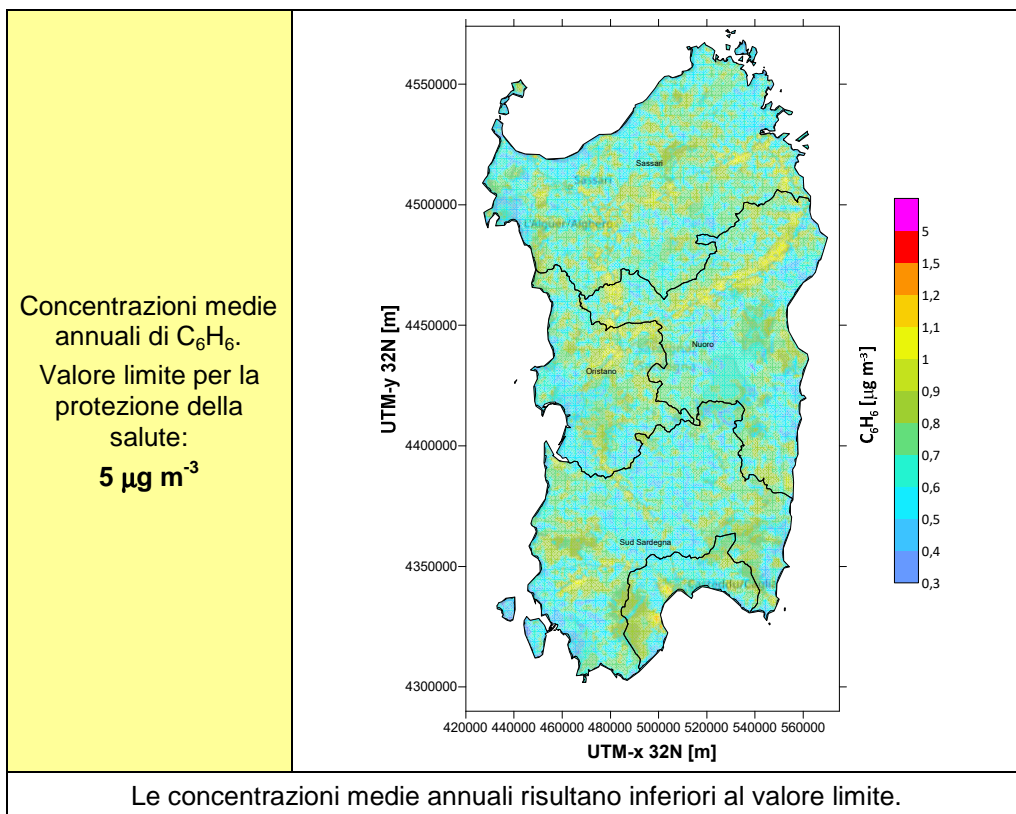


Figura 40 - C₆H₆: Mappa regionale relativa alle concentrazioni medie annuali.

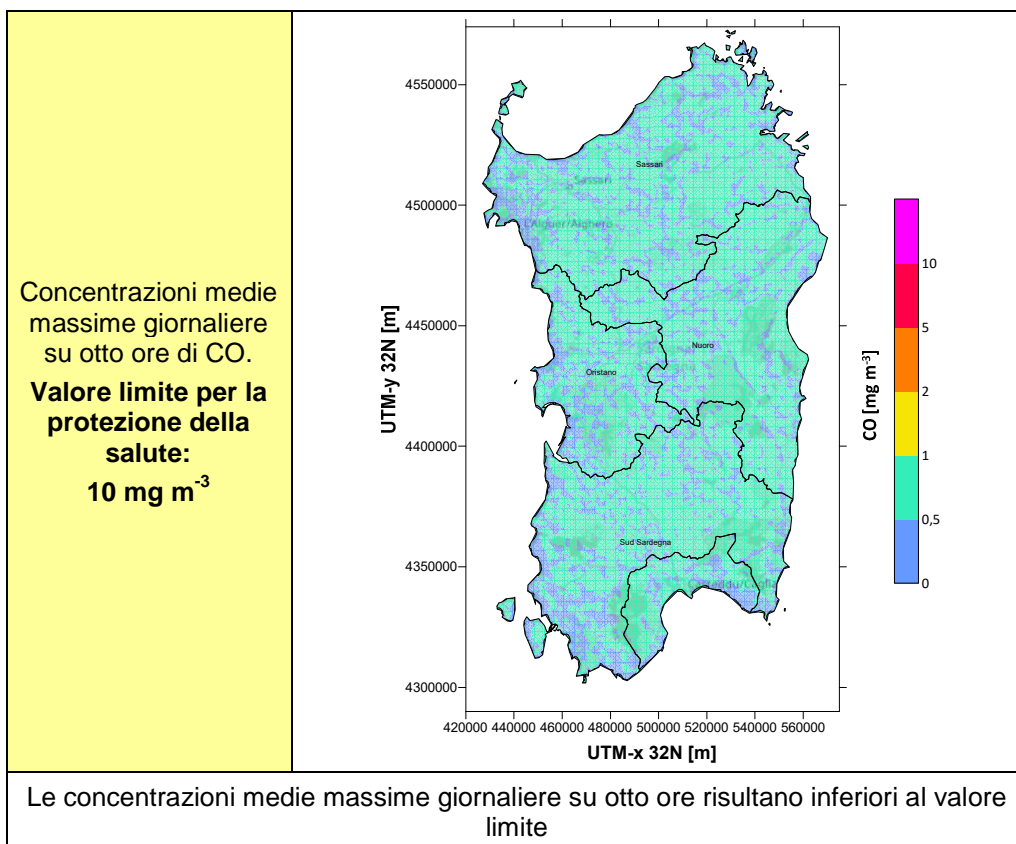


Figura 41 - CO: Mappa regionale relativa alle concentrazioni medie massime giornaliere su 8 ore.

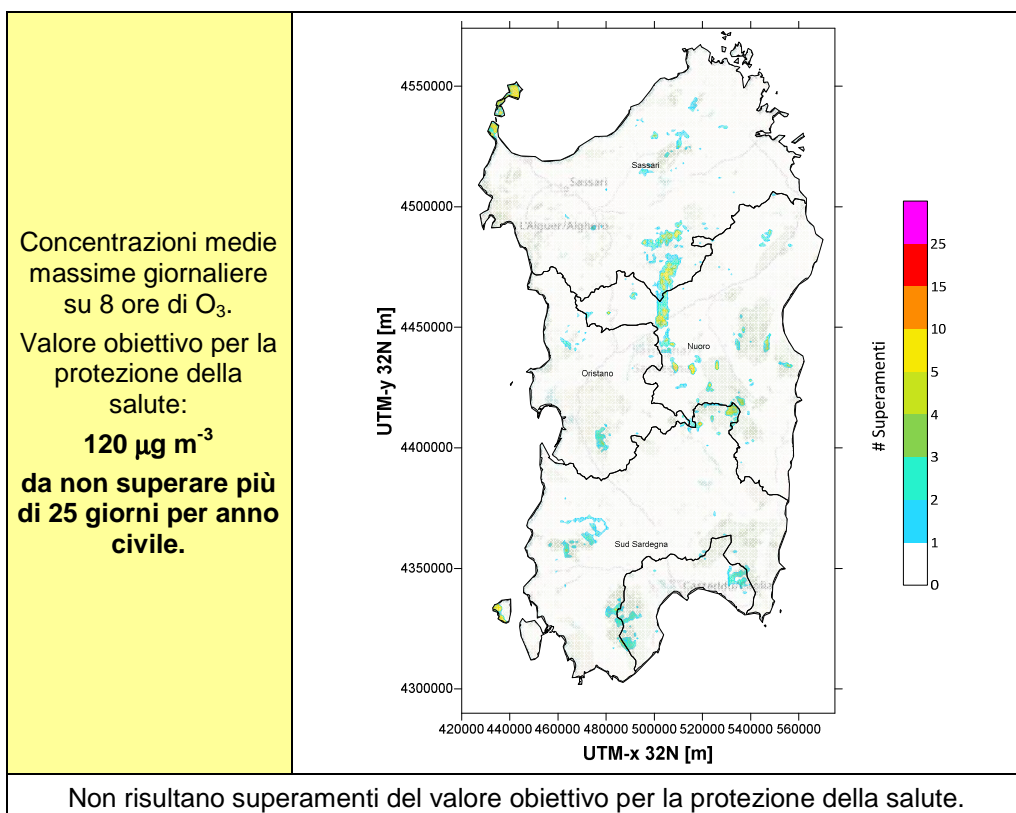


Figura 42 - O₃: Mappa regionale relativa al numero di superamenti del valore limite per la protezione della salute.

(Le aree di colore "bianco" corrispondono a zone nelle quali non risulta alcun superamento del valore limite.)

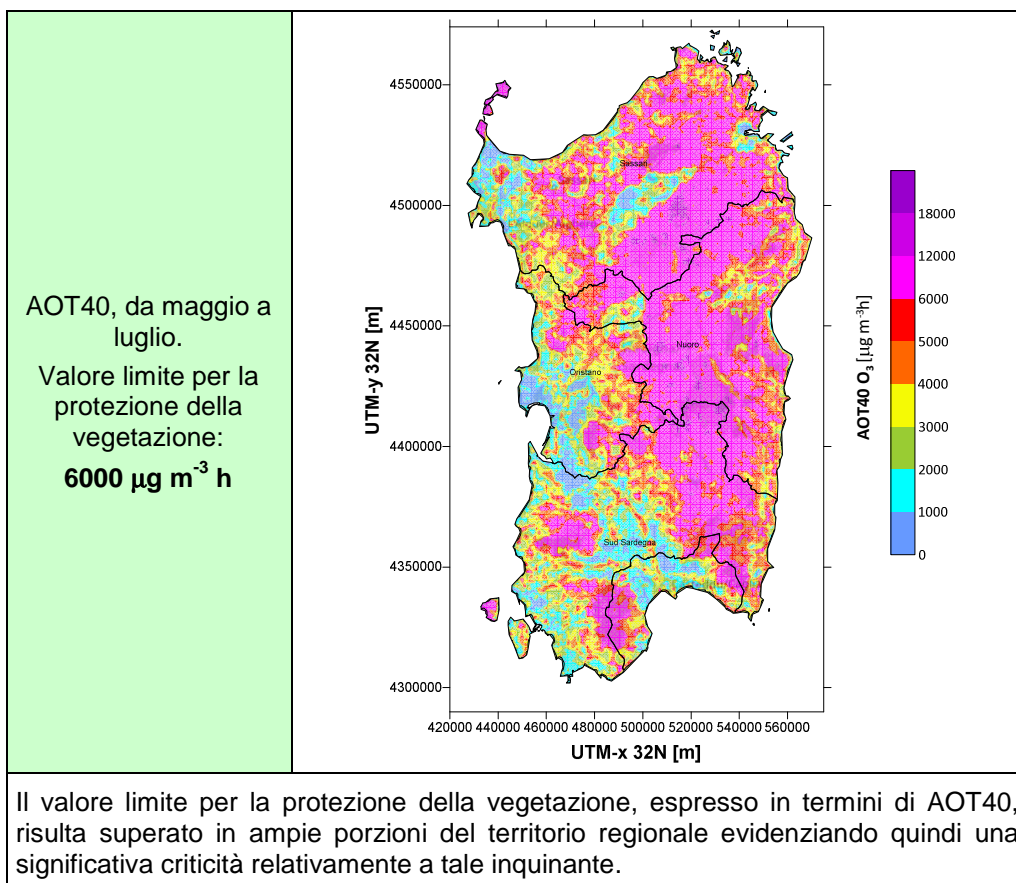


Figura 43 - AOT40: Mappa regionale relativa all'indicatore AOT40.

CRITICITÀ OZONO

L'analisi delle mappe regionali relative agli standard di qualità dell'aria, evidenzia quindi una significativa criticità ozono relativa alla salvaguardia della vegetazione e degli ecosistemi.

Ricordiamo che l'ozono è un elemento tossico anche per la vegetazione perché, oltre ad avere un elevato potere ossidante, ha una grande facilità di penetrazione nelle foglie nonché una solubilità in acqua (e quindi nei liquidi cellulari) dieci volte superiore a quella dell'ossigeno. Ne consegue tra l'altro un invecchiamento fogliare e talvolta l'insorgere di necrosi. Si è riscontrato un ingiallimento degli aghi nel pino silvestre dopo sole tre settimane di fumigazione con $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre nel faggio e nell'abete rosso i primi sintomi visibili sono comparsi dopo sei settimane con concentrazioni di $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Questa sensibilità della vegetazione verso variazioni delle concentrazioni di ozono rispetto al fondo, fornisce un metodo di analisi quantitativa dei livelli di ozono, tanto che si può parlare di monitoraggio biologico. Per esempio il tabacco costituisce un buon bioindicatore perché manifesta caratteristici danni visibili già dopo 24 - 48 ore di esposizione ad aria ambiente. Studi in proposito sono stati condotti anche utilizzando altre specie vegetali come il trifoglio o la pianta del fagiolo.

Si ritiene pertanto opportuno fare il punto sull'attuazione di possibili politiche ambientali finalizzate ad una riduzione della criticità rilevata, tendo conto che, allo stato attuale, manca la definizione sui criteri ai fini della valutazione della vegetazione ed agli ecosistemi da adottare su scala nazionale, di competenza del Coordinamento ex art. 20 D.Lgs. 155/2010. Conseguentemente la zonizzazione della Sardegna al momento non prevede zone ai fini della valutazione della vegetazione ed agli ecosistemi.

D'altra parte gli studi sull'ozono in Sardegna (si veda il documento "Appendice A - O3 e NO2 sul Mediterraneo occidentale", allegato alla documentazione di pianificazione di risanamento della qualità dell'aria del 2005: https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_39_20051005113450.pdf) hanno evidenziato che gli alti valori sono da attribuire a movimenti transfrontalieri dell'inquinante, per cui difficilmente affrontabili da un punto di vista esclusivamente regionale.

E' evidente che data la natura ubiquitaria e secondaria di tale inquinante ed il significativo contributo transfrontaliero sia piuttosto complesso definire politiche finalizzate alla sua riduzione. A tale proposito in ambito modellistico sono stati definiti degli indicatori basati su rapporti di diversi inquinanti mediante i quali individuare le politiche di riduzione delle emissioni dei suoi precursori, ossidi di azoto (NOx) e composti organici volatili (VOC), più idonee ai fini della riduzione dei livelli di ozono. In generale si ritiene che sia più efficace ridurre le emissioni di NOx in aree rurali (ove sono presenti gli ecosistemi da preservare) e viceversa agire sui VOC nelle aree urbane.

Sulla guida di queste indicazioni generali, si riscontra che la pianificazione regionale del 2017 (https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_274_20170112144658.pdf), indirizzata a preservare la migliore qualità dell'aria in tutto il territorio regionale, già attua la stessa strategia per l'ozono, come evidenziato nella parte IV del piano (par. 11 – Obiettivi e misure del piano ai sensi dell'articolo 13 del D.Lgs. 155/2010).

Infatti, la distribuzione uniforme delle medie di ozono su tutto il territorio regionale, documentato dalla modellistica, e il verificarsi negli ultimi anni di numerosi superamenti del valore obiettivo in alcune aree, come registrato dalla rete di monitoraggio della qualità dell'aria, ha portato a pianificare l'adozione di misure aggiuntive cautelative per il contenimento delle emissioni dei precursori dell'ozono (ad es. le misure D0T02, M5E07 e M5E08, contenute nel piano 2017).

Bisognerebbe pertanto adoperarsi per incentivare e finanziare l'applicazione della misura relativa alla determinazione del contributo transfrontaliero alle concentrazioni dell'ozono (misura E0E07), volta ad aumentare la disponibilità e la qualità dei dati ambientali, estesa al territorio del mare Mediterraneo.

CONCLUSIONI

Nel presente studio sono mostrati i risultati di elaborazioni effettuate, mediante l'applicazione del modulo LURF (Land Use Random Forest) al fine di poter produrre mappe regionali relative agli standard di qualità dell'aria per l'anno 2021 dei seguenti inquinanti: benzene (C₆H₆), monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO₂), ozono (O₃), PM₁₀, PM_{2,5}, e biossido di zolfo (SO₂).

Tale modulo è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca BEEP in collaborazione con il Dipartimento di Epidemiologia SSR Lazio/ASL Roma 1. In questo studio, come in quello precedente relativo all'anno 2018 (Arianet, 2019), sono stati utilizzati i campi di concentrazione prodotti dal sistema di previsione QualeAria. Tali campi, unitamente ad altri predittori spaziali e spazio-temporali, scelti per catturare le peculiari fluttuazioni temporali e spaziali dei campi di concentrazione, sono stati elaborati dall'algoritmo Machine learning Random Forest (Breiman, 2001) per produrre corrispondenti mappe di qualità dell'aria sul territorio regionale, alla risoluzione spaziale target di 1 km².

I campi di concentrazione così ottenuti sono stati quindi elaborati al fine di verificare le prestazioni del metodo adottato, mediante il confronto con i dati osservati, nelle diverse aree definite dalla zonizzazione del territorio regionale. Tale confronto ha evidenziato un ottimo accordo ed ha quindi confermato l'utilità di tale approccio allo scopo di produrre mappe regionali relative agli standard di qualità dell'aria per i suddetti inquinanti. Le mappe prodotte hanno evidenziato quanto segue:

- SO₂: non si evidenziano particolari criticità ambientali relativamente al biossido di zolfo. Non risultano superamenti del valore limite per le concentrazioni medie orarie e giornaliere e le concentrazioni medie annuali risultano inferiori al valore limite per la protezione della vegetazione (20 µg m⁻³);
- NO₂: non risultano superamenti dei valori limite per le concentrazioni medie orarie e medie annuali. I valori più elevati si stimano in corrispondenza delle maggiori aree urbane;
- PM₁₀: il numero di superamenti del valore limite per le concentrazioni medie giornaliere è inferiore al numero massimo (35 volte) su tutto il territorio regionale e le concentrazioni medie annuali risultano inferiori al valore limite (40 µg m⁻³);
- PM_{2,5}: le concentrazioni medie annuali risultano inferiori al valore limite su tutto il territorio regionale;
- benzene (C₆H₆): le concentrazioni medie annuali risultano inferiori al valore limite su tutto il territorio regionale;
- CO: le concentrazioni medie massime giornaliere su otto ore risultano inferiori al valore limite su tutto il territorio regionale;
- Ozono (O₃): non risultano superamenti del valore obiettivo per la protezione della salute. Il valore limite per la protezione della vegetazione, espresso in termini di AOT40, risulta superato in ampie porzioni del territorio regionale evidenziando quindi una significativa criticità relativamente a tale inquinante.

BIBLIOGRAFIA

- Arianet (2019) Valutazione modellistica dello stato di Qualità dell'aria sulla Regione Sardegna per l'anno 2018. ARIANET R2019.05.
- ARPAS (2019) Relazione annuale sulla qualità dell'aria in Sardegna per l'anno 2019. Giugno 2019. <https://portal.sardegناسira.it/rete-di-misura-in-siti-fissi>.
- Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5–32. <https://doi:10.1023/A:1010933404324>.
- Kuhn, M., 2008. Building Predictive Models in R Using the caret Package. *J. Stat. Softw.*, **28** (1), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>.
- Liaw, A., Wiener, M. (2002) Classification and regression by random forest. *R News*, 2, 18–22. <https://cogns.northwestern.edu/cbmq/LiawAndWiener2002.pdf>
- Silibello, C., Carlino, G., Stafoggia, M. et al. (2021) Spatial-temporal prediction of ambient nitrogen dioxide and ozone levels over Italy using a Random Forest model for population exposure assessment. *Air Qual Atmos Health*, **14**, 817–829 (2021). <https://doi.org/10.1007>.
- Wright, M. N., & Ziegler, A. (2017). ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *J. Stat. Softw*, 77(1), 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>.
- European Environment Agency (2022) Exposure of Europe's ecosystems to ozone. <https://www.eea.europa.eu/ims/exposure-of-europes-ecosystems-to-ozone>.