

Piano Strutturale del Comune di Livorno
Valutazione Ambientale Strategica

Rapporto Ambientale

Redatto ai sensi dell'art. 24 della LRT 10/2010 e ss.mm.ii.

ALLEGATO 12

Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la
valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per al
gestione degli interventi previsti dal PR del Porto di
Livorno



Predisposto da: **ARIANET**
Novembre 2018

**Sviluppo ed implementazione di un
sistema integrato per la
valutazione degli impatti sulla
qualità dell'aria, per la gestione
degli interventi previsti nel PR del
Porto di Livorno**

Rapporto finale

Autori: G. Calori; S. Finardi; C. Pozzi; P. Radice

Riferimento: R2018.17

Novembre 2018

Rapporto R2018.17

Autori: G. Calori;S. Finardi;C. Pozzi;P. Radice

Cliente:

Autorità Portuale di Livorno

SOMMARIO

1	Introduzione.....	2
1.1	Area di indagine.....	2
2	Modellistica meteorologica	4
2.1	Acquisizione dei dati geografici e meteorologici.....	4
2.2	Configurazione del modello meteorologico	5
2.2.1	Campi meteorologici sull'area di studio	6
2.3	Validazione della simulazione di riferimento	8
2.3.1	Verifica delle prestazioni del modello sul periodo di durata annuale	9
2.3.1	Verifica della ricostruzione della variabilità stagionale.....	14
2.4	Estensione del periodo temporale coperto dalle simulazioni meteorologiche	20
3	Modellistica emissiva.....	22
3.1	Inventario regionale delle emissioni	22
3.2	Traffico navale	25
3.2.1	Metodologia	25
3.2.2	Applicazione al porto di Livorno	30
3.3	Traffico stradale nelle aree afferenti al porto	34
3.3.1	Modello emissivo.....	35
3.3.2	Parco circolante	35
3.3.3	Flussi di traffico	36
3.4	Sorgenti puntuali.....	39
3.5	Sorgenti naturali.....	41
3.6	Predisposizione dell'input al modello di qualità dell'aria	42
4	Modellistica di qualità dell'aria	45
4.1	Sistema modellistico e configurazione del modello di qualità dell'aria	45
4.2	Condizioni al contorno.....	46
4.2.1	Sabbie sahariane.....	47
4.3	Simulazione di riferimento e validazione.....	50
4.3.1	Confronto con le stazioni della rete ARPAT	53
4.4	Confronti con i dati delle campagne.....	63
5	Piattaforma informatica	67
5.1	Server di calcolo.....	67
5.2	Componenti del sistema modellistico	67
5.3	Basi di dati	68
5.4	Documentazione	69
6	Conclusioni	70
7	Bibliografia	73

1 Introduzione

Gli adempimenti connessi alle prescrizioni della procedura di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) del nuovo Piano Regolatore Portuale (PRP) attuato dall'Autorità Portuale di Livorno (APL) limitatamente alle emissioni in atmosfera e alla qualità dell'aria, e contenute nel parere del Nucleo Unificato Regionale di Valutazione e verifica degli adempimenti pubblici (NURV) della Regione Toscana, espresso con determinazione n.4 del 03.06.2014, prevedono lo sviluppo e l'implementazione di un sistema modellistico integrato finalizzato alla valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel Porto di Livorno.

Il sistema dovrà essere in grado di fornire informazioni sulla qualità dell'aria, comprendendo non solo gli effetti del singolo intervento, ma anche l'effetto combinato delle azioni precedentemente attuate. Quest'ultimo aspetto potrà considerare sia l'ambito di attuazione del PRP, sia altre strategie di pianificazione ed attuazione sviluppatesi nel frattempo (Piano Regolatore Generale, piani di settore quali la mobilità, energetico, di risanamento atmosferico, acustico, ecc.).

L'Autorità Portuale per far fronte a tali adempimenti ha bandito una gara d'appalto mediante procedura negoziata, che prevede un servizio complessivo di sviluppo ed implementazione del sistema modellistico, includente reperimento dati, attività di monitoraggio, messa a punto e validazione del sistema e formazione del personale.

ARIANET, aggiudicataria del contratto per la fornitura di tali servizi, ha messo a punto tale sistema, costituito da tre principali componenti, dedicati alla modellazione meteorologica, emissiva e di qualità dell'aria. Copre un'ampia area intorno a Livorno, è alimentato da basi dati che descrivono la conformazione del territorio, le emissioni legate alle attività presenti su di esso, nonché gli apporti ai livelli di fondo delle concentrazioni dati dalle sorgenti più lontane. Le attività di messa a punto e validazione del sistema modellistico, nonché la sua implementazione su un server di calcolo dell'APL sono descritte in questo rapporto, mentre la complementare campagna di monitoraggio della qualità dell'aria nella città di Livorno, effettuata dall'Istituto di Biometeorologia del CNR (IBIMET, Firenze), di cui ARIANET si è avvalso, è descritta in un rapporto complementare:

Baraldi R., Carotenuto F., Facini O., Gioli B., Gualtieri G., Martelli F., Pellegrino L., Rossini G., Toscano P., Tudoroiu M., Vagnoli C., Zaldei A. *Campagna di monitoraggio della qualità dell'aria nella città di Livorno – Rapporto finale*, CNR IBIMET, 16/11/2018.

1.1 Area di indagine

Il territorio di riferimento per lo sviluppo e l'applicazione e dei modelli di simulazione richiesti è il porto di Livorno ed un suo intorno significativo, comprendente la città di Livorno e l'area ad essa circostante. Il dominio preso in considerazione è riportato in Figura 1: di ampiezza pari a 40 km, include il porto di Livorno, il resto del territorio comunale, la fascia costiera che si estende da Rosignano Solvay sino ad oltre Marina di Pisa ed un entroterra che giunge nella parte settentrionale sino a Pisa.

La scelta del dominio riflette sia la possibilità di considerare le aree potenzialmente interessate da impatti significativi delle attività portuali sulla qualità dell'aria, sia la necessità di includere nelle simulazioni modellistiche i possibili contributi delle sorgenti poste nelle aree circostanti. Il modello di qualità dell'aria scelto per l'implementazione su tale dominio è di tipo tridimensionale reattivo: attraverso un'opportuna descrizione delle condizioni al contorno (concentrazioni evolutive degli inquinanti ai bordi del dominio) è in grado di tenere in conto anche della possibile influenza delle sorgenti poste a maggiori distanze (al di fuori del dominio) sulla formazione degli inquinanti secondari (ozono, particolato secondario, ecc.).

Su di un secondo dominio più interno, di ampiezza pari a 20 km, viene impiegato con una maggiore risoluzione il medesimo modello in modalità non reattiva, in modo da descrivere con maggior dettaglio la distribuzione territoriale degli impatti delle variazioni delle configurazioni delle sorgenti emissive sulla componente primaria delle concentrazioni nelle aree circostanti.

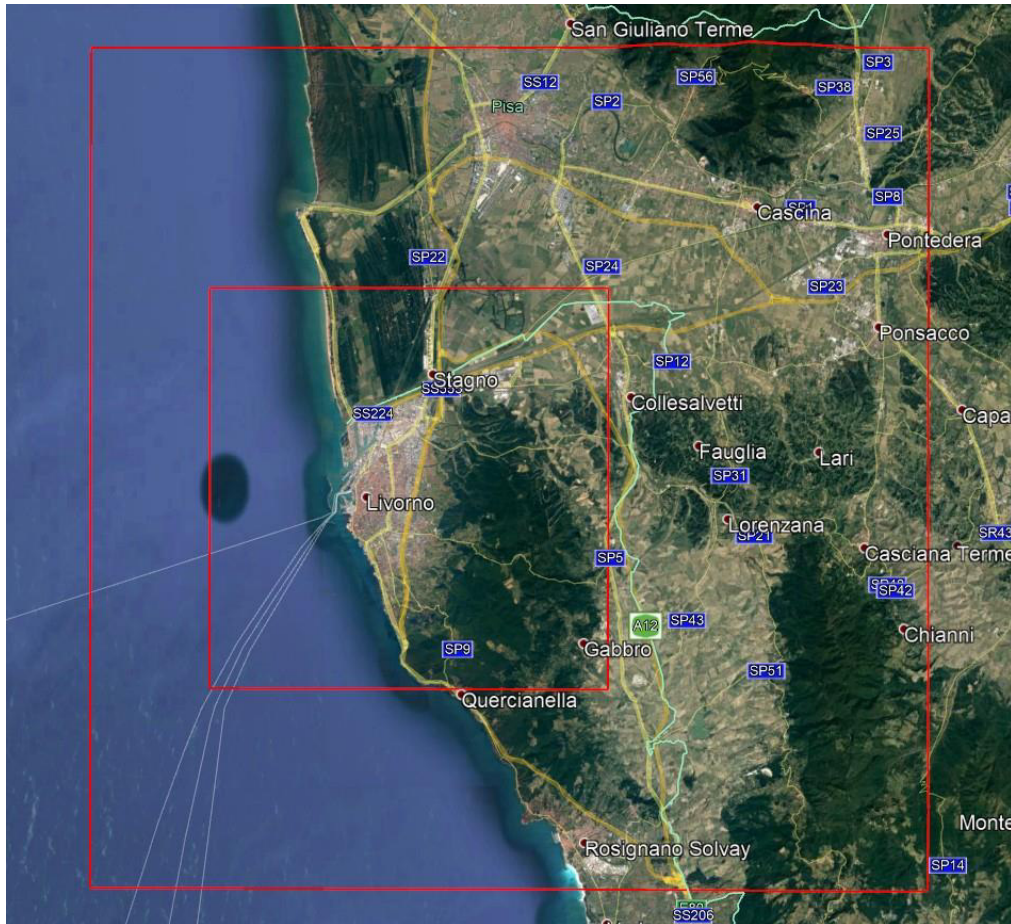


Figura 1. Domini di simulazione per il modello di qualità dell'aria in modalità reattiva (esterno) e non-reattiva (interno).

2 Modellistica meteorologica

Le condizioni meteorologiche e diffusive sul territorio di interesse sono state ricostruite attraverso l'applicazione del modello meteorologico prognostico WRF-ARW (<http://wrf-model.org>; <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>) la cui applicazione come sistema di produzione dei dati di input per modelli di qualità dell'aria si può considerare consolidata e per il quale esiste una vasta letteratura scientifica su attività di sviluppo, applicazione e validazione in tutto il mondo. WRF vanta una vastissima comunità di utilizzatori, con più di 30000 utenti registrati in 150 paesi. La scelta di WRF risulta inoltre congruente con le attività di modellistica meteorologica previsionale svolte dal consorzio LAMMA per la Regione Toscana (<http://www.lamma.rete.toscana.it/meteo/modelli/wrf-info-sul-modello>). Nel contesto italiano WRF è utilizzato per attività di ricerca da molte università e da diversi istituti del CNR (IBIMET, IIA, ISAC, ISAFOM ed altri) e per attività di supporto alla previsione di qualità dell'aria da alcune agenzie regionali di protezione dell'ambiente (ARPA Lombardia, ARPA Friuli Venezia Giulia, ARPA Lazio, ARPA Molise, ARPA Puglia, ARPA Calabria).

2.1 Acquisizione dei dati geografici e meteorologici

Il modello WRF, come tutti i modelli meteorologici a scala limitata, necessita in input condizioni al contorno che descrivano l'evoluzione dei campi meteorologici a scala sinottica. Queste informazioni possono essere estratte da analisi o previsioni meteorologiche prodotte da modelli globali, quali quelli utilizzati dai principali servizi meteorologici nazionali ed internazionali. Per la ricostruzione di eventi meteorologici passati si preferisce normalmente l'uso di analisi meteorologiche il cui processo produttivo si basa sull'integrazione di osservazioni sperimentali nei calcoli prodotti dai modelli prognostici. Fra le basi dati disponibili ed accessibili liberamente a livello internazionale sono state selezionate le rianalisi ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>) prodotte dall'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e disponibili per il periodo temporale compreso fra il 1979 e i giorni nostri. Per ulteriori informazioni e valutazioni della base dati si rimanda alla letteratura scientifica di riferimento (Bao e Zhang, 2013; Chen et al., 2014; Dee et al., 2011; Hodges et al., 2011; Szczypta et al., 2011; Mooney et al., 2010; Betts et al., 2009).

I campi tridimensionali delle variabili necessarie all'applicazione di WRF sono stati scaricati dagli archivi di ECMWF per il periodo compreso fra il 01/03/2017 ed il 28/02/2018. I campi meteorologici delle analisi su livelli di pressione sono stati estratti per un'area compresa fra 30 gradi ovest e 45 gradi est di longitudine e tra 25 e 75 gradi nord di latitudine, in modo da includere l'intero continente europeo.

L'applicazione del modello meteorologico WRF richiede la disponibilità di informazioni statiche in grado di descrivere le caratteristiche della superficie terrestre nell'area interessata dalle simulazioni. Tali dati includono: il modello digitale del terreno, la descrizione dell'uso del suolo, ed una serie di informazioni accessorie che riguardano le caratteristiche del sottosuolo, della superficie terrestre e della sua copertura naturale o artificiale. Le basi dati di riferimento per tutte le variabili richieste sono rese disponibili, a corredo del codice WRF, del National Centre for Atmospheric Research (NCAR; <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>). L'insieme delle informazioni disponibili si ritiene sufficiente alla caratterizzazione del terreno nell'area di interesse. In particolare, il modello digitale del terreno (DTM) è caratterizzato da una risoluzione spaziale di 30 secondi in latitudine e longitudine e si può considerare quindi adeguato alla descrizione dell'area di interesse con risoluzione spaziale di 1 km. La base dati di WRF relativa al DTM citato è stata costruita a partire dai dati della base dati GMTED (<https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010>) dell'United States Geological Survey (USGS), una delle basi dati di maggior credito ed utilizzo per le risoluzioni spaziali di interesse. Si ritiene invece non soddisfacente la descrizione dell'uso del suolo disponibile all'interno delle basi dati standard di WRF. La base dati Europea di riferimento del CORINE Land Cover è stata quindi aggiunta ai set di dati disponibili per WRF in modo da ottenere la miglior descrizione possibile della copertura del terreno. Il CORINE Land Cover è prodotto

dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) integrando le basi dati nazionali e viene distribuita attraverso il Land Monitoring Service del sistema Copernicus (<http://land.copernicus.eu>). Si sono utilizzati i dati CORINE in formato raster alla risoluzione spaziale di 250 m.

2.2 Configurazione del modello meteorologico

La configurazione del modello WRF si è basata su 3 domini di calcolo innestati aventi maglie di risoluzione orizzontale pari a 25, 5 e 1 km, rispettivamente per Europa continentale e Mediterraneo centro-occidentale, Italia centro-settentrionale, ed area di Livorno (Figura 2). Sono stati utilizzati 35 livelli verticali con spaziatura crescente con l'altezza, fino alla quota corrispondente ad una pressione atmosferica di 50 hPa, con il livello più prossimo al suolo localizzato all'altezza di circa 29 m sul livello del terreno.

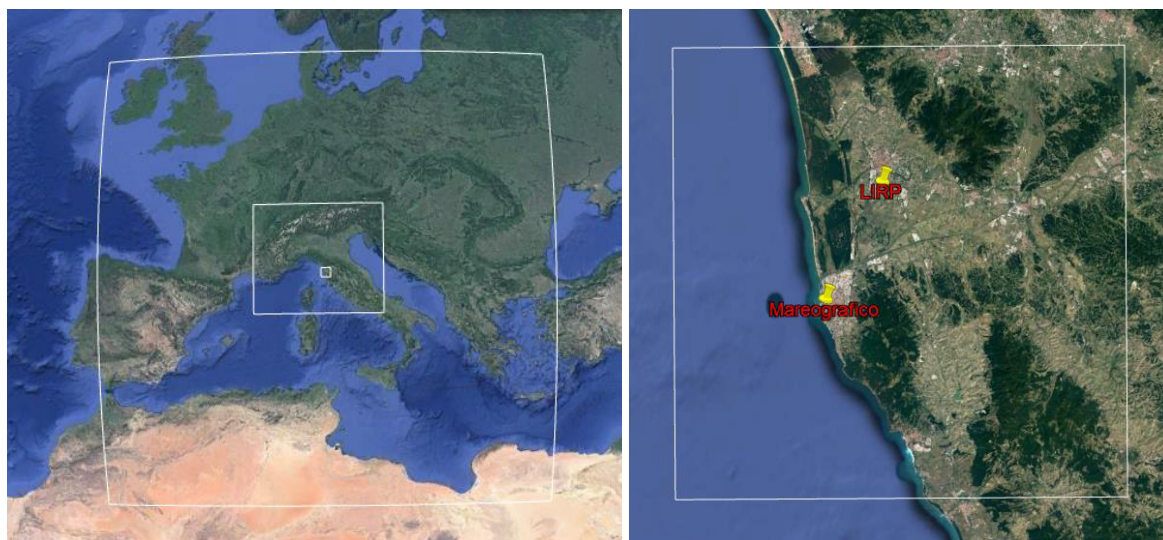


Figura 2. Domini di calcolo innestati del modello meteorologico WRF (sinistra) ed area coperta dal dominio più interno e a maggior risoluzione spaziale (destra), sul quale sono indicate le postazioni meteorologiche dell'aeroporto di Pisa LIRM e dell'Istituto Mareografico.

I parametri di controllo del modello sono stati ottimizzati al fine di ottenere la miglior definizione possibile dei parametri meteorologici e dispersivi necessari alle simulazioni di qualità dell'aria. Le parametrizzazioni fisiche utilizzate nella configurazione della simulazione di WRF sono riportate nella tabella seguente.

Parametrizzazioni fisiche utilizzate per la simulazione di WRF

WRF schema fisico di WRF ARW 3.8.1	Descrizione
Microfisica	WRF Single-Moment 6-class scheme (ice, snow and graupel processes)
Radiazione a onda lunga	RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for GCMs)
Radiazione a onda corta	RRTMG
Parametrizzazione della convezione dei cumuli	Kain-Fritsch scheme (deep and shallow convection). <u>Solo sulla griglia più esterna.</u>
Fenomeni superficiali	Noah Land Surface Model
Surface Layer	Eta similarity (based on Monin-Obukhov theory).
Strato limite atmosferico	Mellor-Yamada-Janjic Eta operational scheme

Il calcolo è stato effettuato in modalità di two-way-nesting. Si è inoltre utilizzata la modalità di calcolo di "nudging spettrale" sulle due griglie più esterne, in modo da evitare possibili effetti di deriva della simulazione rispetto ai campi di analisi sulla scala I risultati della simulazione sono stati archiviati con frequenza temporale oraria e suddivisi in files della durata di un giorno. È stata

così costruita una base dati meteorologica di durata annuale, per il periodo compreso fra il 01/03/2017 ed il 28/02/2018.

2.2.1 Campi meteorologici sull'area di studio

Sono riportati in questo paragrafo, a titolo di esempio, i campi di vento e temperatura in prossimità del suolo durante due giornate rappresentative delle condizioni di circolazione atmosferica primaverile/estiva ed invernale.

In Figura 3 sono illustrati i campi di vento e di temperatura in prossimità del suolo calcolati da WRF per il giorno 27 maggio 2017 alle ore 04:00. Si osserva la presenza di brezza di terra notturna con venti deboli di provenienza intorno est con rotazioni locali influenzate dai rilievi orografici e dall'orientamento della linea di costa. Anche il campo di temperatura presenta una significativa variabilità spaziale, con valori più bassi nell'area pianeggiante compresa fra Pisa e Livorno e valori più elevati sulle alture, che indicano la presenza di un'inversione termica negli strati bassi dell'atmosfera.

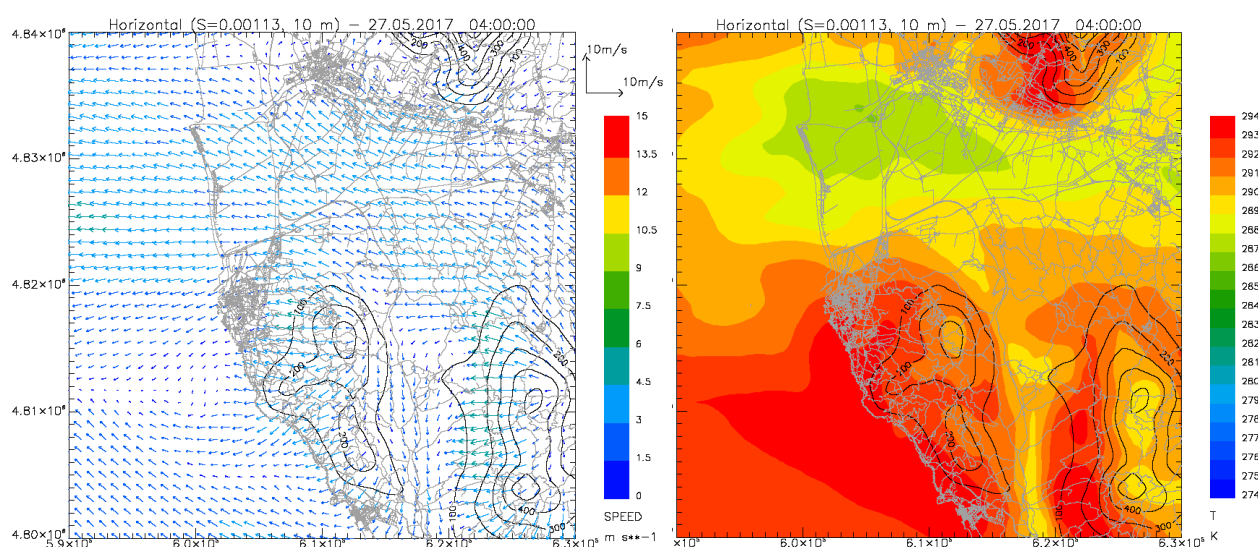


Figura 3. Campi di vento (sinistra) e temperatura (destra) in prossimità del suolo calcolati da WRF per il giorno 27/05/2017 alle ore 04:00.

Durante le ore diurne si osserva lo sviluppo della brezza di mare. Alle ore 12:00 si rileva la presenza di venti da ovest in una fascia della profondità di circa 10 km dalla costa (Figura 4), all'interno della quale si registra un graduale aumento della temperatura muovendosi dalla costa verso l'interno. Il fronte di brezza è chiaramente identificabile dall'analisi dei campi di vento e temperatura (Figura 4). Nel corso delle ore del mattino e del primo pomeriggio i campi meteorologici permettono di seguire la penetrazione graduale della brezza di mare sul territorio in esame.

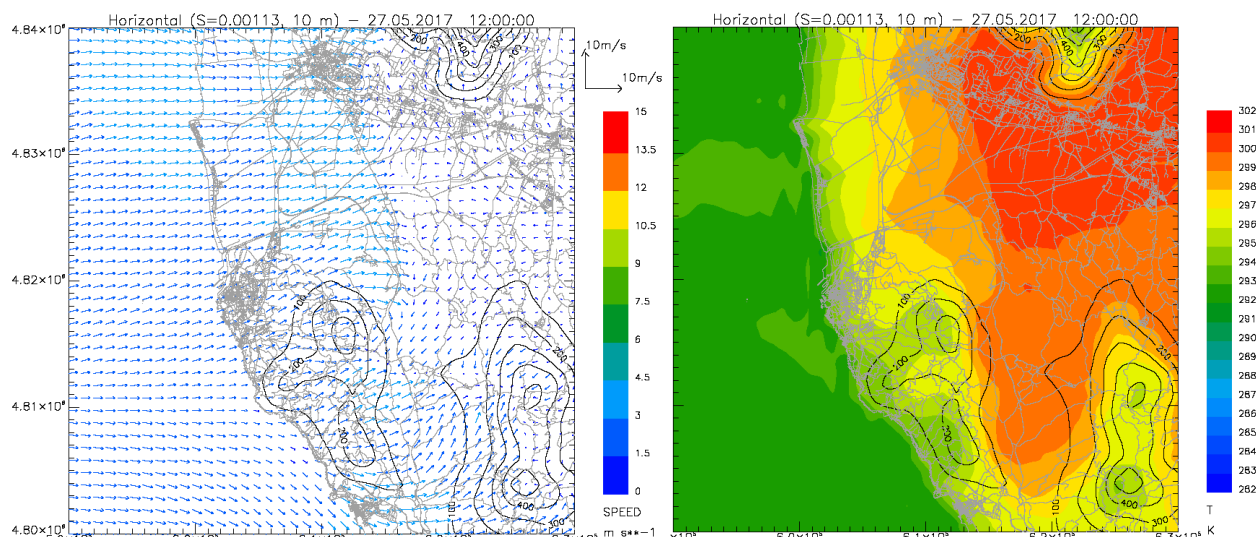


Figura 4. Campi di vento (sinistra) e temperatura (destra) in prossimità del suolo calcolati da WRF per il giorno 27/05/2017 alle ore 12:00.

Le condizioni di circolazione che caratterizzano la stagione invernale mostrano una persistenza di venti di provenienza intorno est con limitate variazioni durante l'arco della giornata. I campi di vento hanno quindi caratteristiche molto simili durante le ore notturne (Figura 5) e diurne (Figura 6). Il campo di temperatura notturno mostra anche in inverno temperature fredde sull'area pianeggiante fra Pisa e Livorno, mentre sui rilievi le temperature decrescono con l'altezza e non mostrano, in questo caso segnali evidenti di inversione termica (Figura 5). Le temperature diurne appaiono piuttosto uniformi sull'area costiera e sulle zone pianeggianti, si osserva unicamente una diminuzione con la quota sui rilievi orografici (Figura 6).

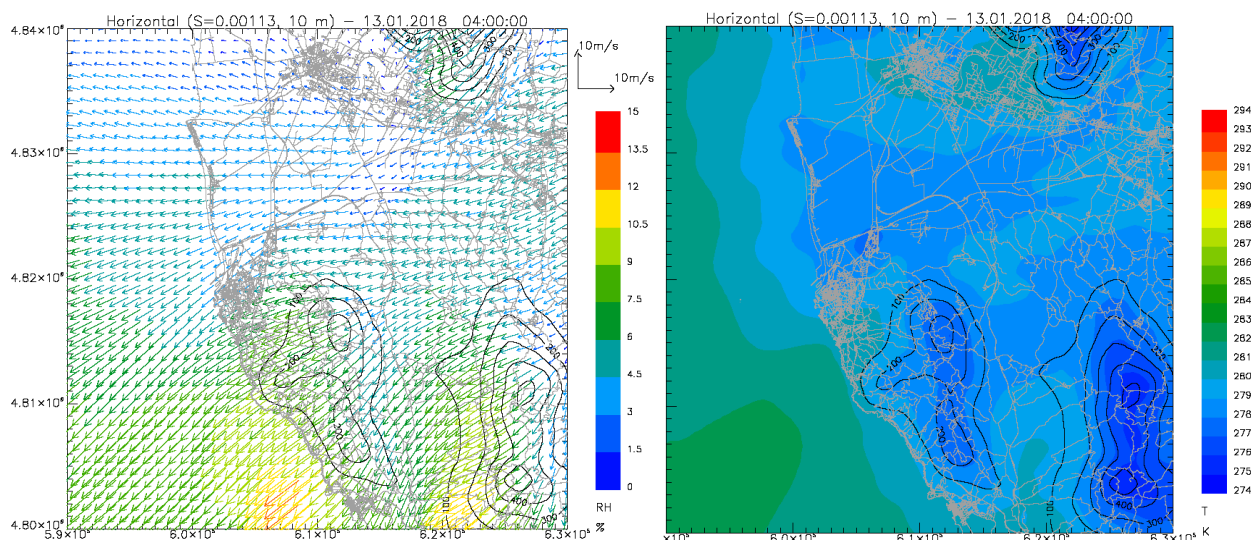


Figura 5. Campi di vento (sinistra) e temperatura (destra) in prossimità del suolo calcolati da WRF per il giorno 13/01/2018 alle ore 04:00.

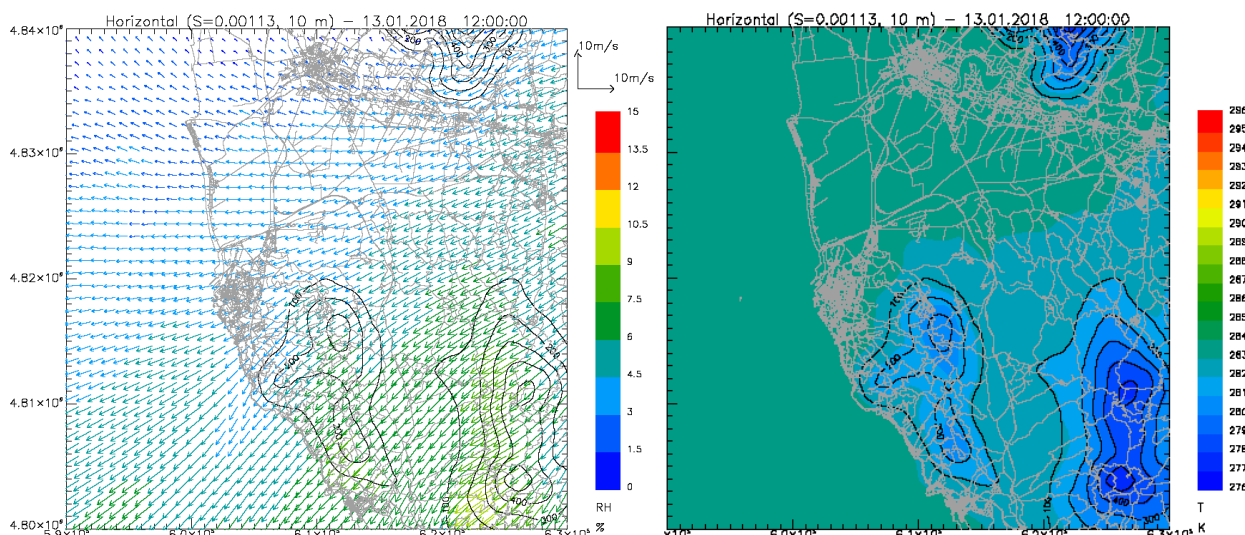


Figura 6. Campi di vento (sinistra) e temperatura (destra) in prossimità del suolo calcolati da WRF per il giorno 13/01/2018 alle ore 12:00.

2.3 Validazione della simulazione di riferimento

I risultati delle simulazioni meteorologiche di WRF sono stati confrontati con le osservazioni della postazione METAR dell'aeroporto di Pisa (codice ICAO LIRP) e della postazione di Livorno della Rete Mareografica Nazionale (<http://www.mareografico.it/>) localizzata all'interno dell'area portuale. Dai campi meteorologici tridimensionali prodotti dalle simulazioni modellistiche sono state estratte le serie temporali delle variabili meteorologiche confrontabili con le osservazioni disponibili in corrispondenza dei punti di misura. La localizzazione delle postazioni di misura citate è illustrata in Figura 2 e, con maggior dettaglio, in Figura 7.

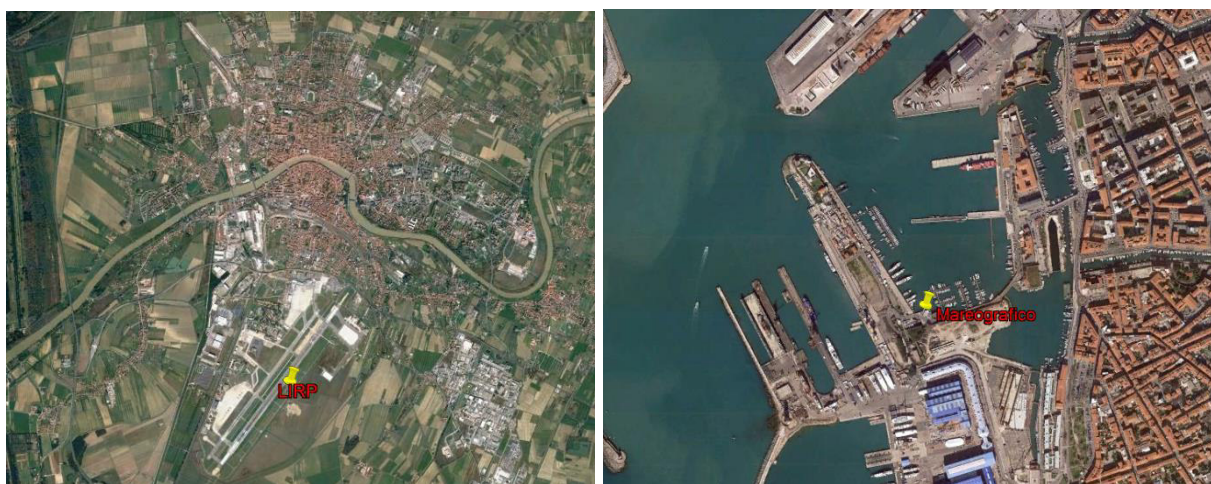


Figura 7. Postazioni meteorologiche dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e dell'Istituto Mareografico nel porto di Livorno (destra).

Il confronto ha riguardato i valori di temperatura, umidità relativa, intensità e direzione del vento a livello orario. Le variabili per le quali erano disponibili valori sperimentali con frequenza temporale inferiore all'ora sono state mediate in modo da ottenere valori orari confrontabili con le stime modellistiche ottenute dalla simulazione di WRF. Nei paragrafi seguenti sono riportati sia i confronti statistici sui risultati complessivi a livello annuale, che una selezione dei confronti effettuati a livello mensile, che permettono di mettere in luce la rilevante variabilità stagionale che caratterizza la circolazione atmosferica locale. Per brevità è stato omissso dalla verifica su base annuale il confronto fra i valori di umidità relativa.

2.3.1 Verifica delle prestazioni del modello sul periodo di durata annuale

Il confronto fra le distribuzioni dei valori di temperatura in corrispondenza della postazione dell'aeroporto di Pisa mostra una ricostruzione soddisfacente della variabilità dei valori osservati (Figure 8 e 9). I box-plot rappresentano la distribuzione dei valori attraverso: mediana, primo e terzo quartile, primo dato superiore al primo quartile meno 1.5 volte la distanza interquartile, ultimo dato inferiore al terzo quartile più 1.5 volte la distanza interquartile; eventuali dati esterni a questo range di valori sono considerati *outliers* e rappresentati singolarmente. Le Figure 8 e 9 mostrano una sostanziale sovrapposizione delle distribuzioni delle temperature calcolate e misurate, con una correlazione pari a 0.97, un BIAS di 0.45 C e un RAMS di 1.9 C. L'unica differenza significativa fra le due distribuzioni si identifica nella struttura bimodale della distribuzione calcolata, che non è presente in quella relativa ai valori misurati (Figura 9). Va ricordato comunque che i valori validi misurati sono pari al 88% del totale e che i dati mancanti non sono uniformemente distribuiti nel tempo, ma risultano essere più numerosi durante le ore notturne (Figure 8). Il ciclo diurno delle temperature risulta ben riprodotto dal modello.

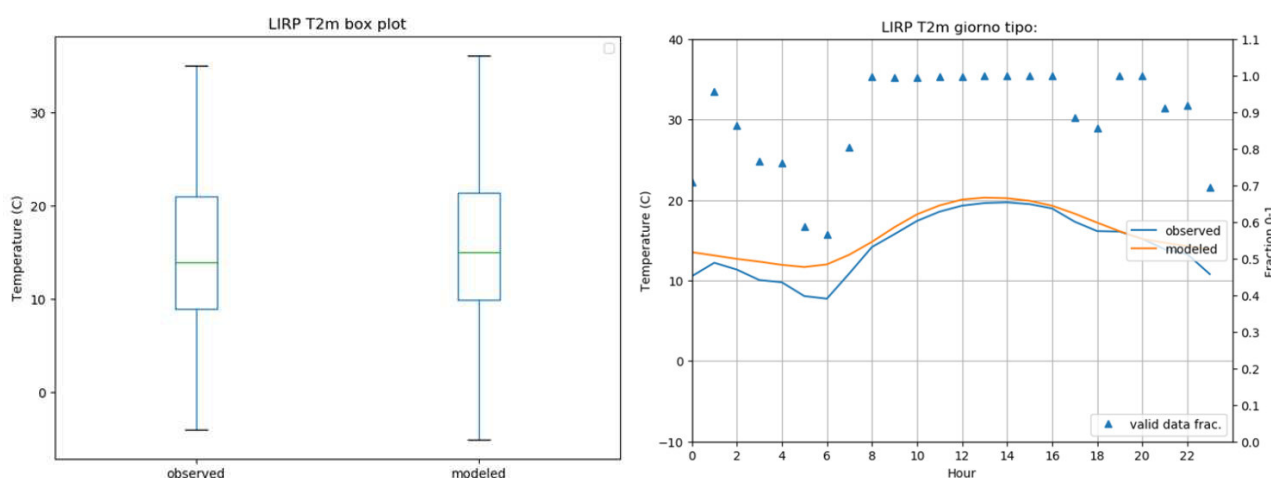


Figura 8. Confronto fra i valori di temperatura calcolati da WRF ed osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Confronto delle distribuzioni in forma di box plot (sinistra) e dei cicli giornalieri medi (destra). I triangoli blu (destra) indicano la frazione di dati sperimentali disponibili per ognuna delle ore considerate, leggibile sull'asse verticale di destra.

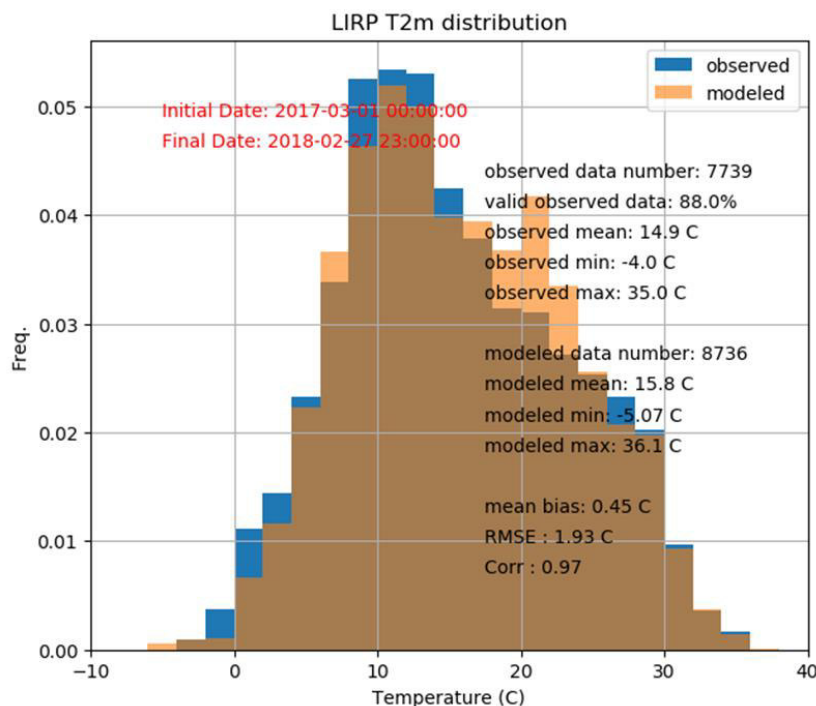


Figura 9. Confronto fra le distribuzioni dei valori di temperatura calcolati da WRF ed osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Il grafico riporta alcuni valori statistici relativi alle distribuzioni osservate e calcolare, oltre ai valori di BIAS, RMSE ed indice di correlazione di Pearson.

La distribuzione delle velocità del vento calcolate mostra una buona rappresentazione dei valori osservati, anche se evidenzia una tendenza alla sovrastima sia dei valori medi che dei valori estremi (Figure 10), che corrisponde ad una sottostima della frequenza dei venti con intensità compresa fra 1 e 3 m/s ed una sovrastima della frequenza dei venti di intensità superiore (Figura 11). La sovrastima media corrisponde ad un BIAS piuttosto basso, di circa 0.7 m/s (Figura 11), e risulta pressoché uniformemente distribuita sulle ore del giorno (Figura 10). Il valore dell'indice di correlazione, pari a 0.64, è inferiore a quanto ottenuto per la temperatura ma in linea con i valori usualmente ottenibili dai modelli meteorologici per confronti con osservazioni rilevate all'interno dello strato limite atmosferico. L'errore quadratico medio è pari a circa 1.9 m/s.

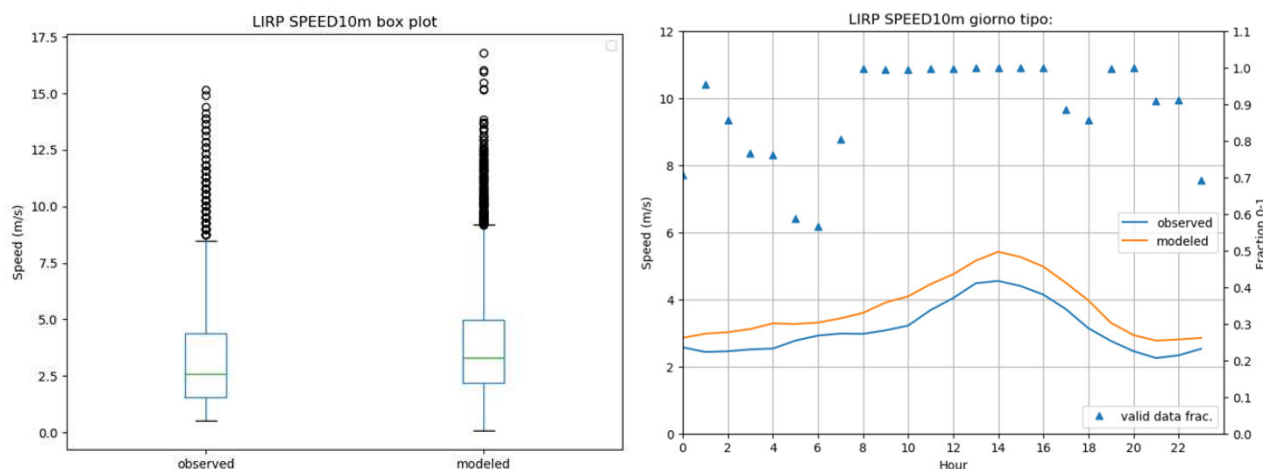


Figura 10. Confronto fra i valori di intensità del vento calcolati da WRF ed osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Confronto delle distribuzioni in forma di box plot (sinistra) e dei cicli giornalieri medi (destra). I triangoli blu (destra) indicano la frazione di dati sperimentali disponibili per ognuna delle ore considerate, leggibile sull'asse verticale di destra.

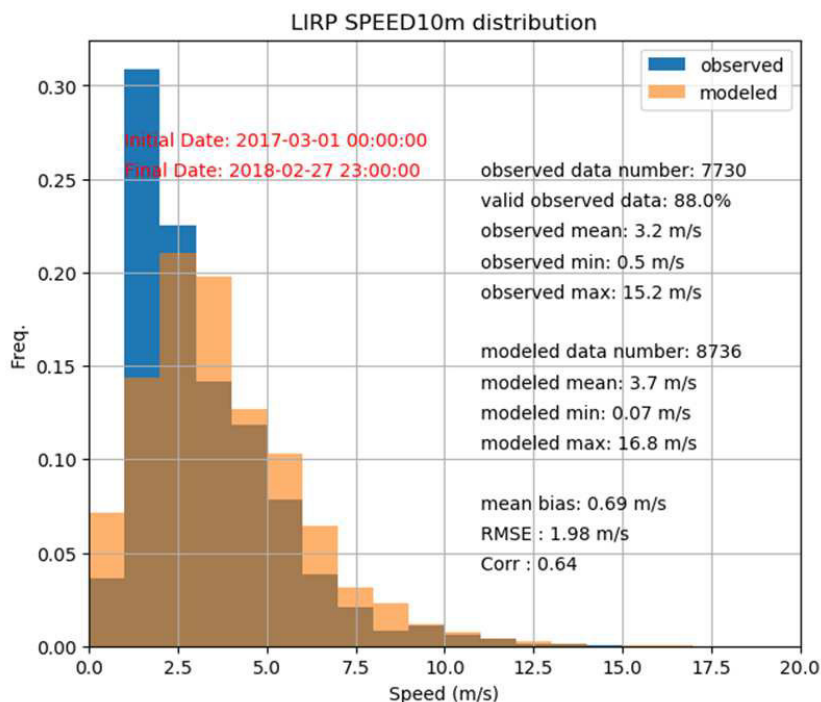


Figura 11. Confronto fra le distribuzioni dei valori di velocità del vento calcolati da WRF ed osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Il grafico riporta alcuni valori statistici relativi alle distribuzioni osservate e calcolare, oltre ai valori di BIAS, RMSE ed indice di correlazione di Pearson.

Il confronto delle rose dei venti (Figura 12) mostra una buona riproduzione delle caratteristiche della circolazione locale, con una tendenza alla sottostima della frequenza dei venti deboli di provenienza intorno sud-est. In corrispondenza di questa postazione si nota una forte polarizzazione delle rose dei venti attorno a direzioni di provenienza ovest e est-sud-est, con completa assenza di venti fra nord e nord-est e scarsissima frequenza di venti intorno sud.

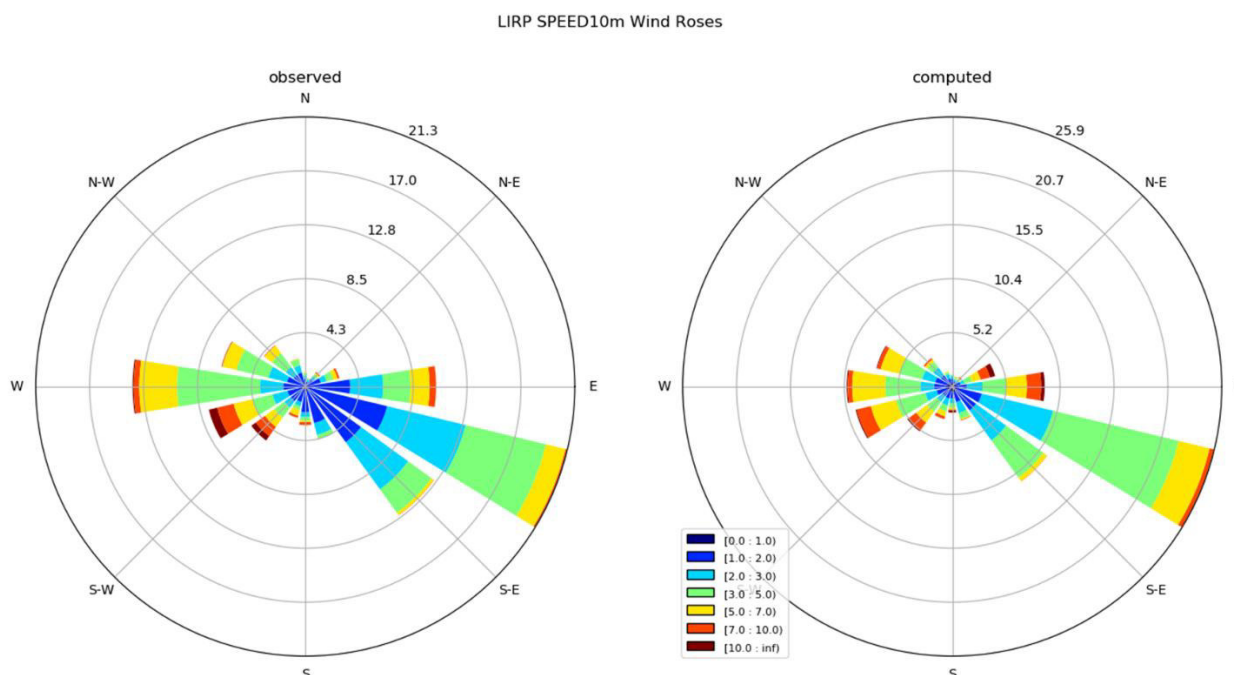


Figura 12. Confronto fra le rose dei venti osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e calcolati da WRF (destra) per il periodo annuale 03/2017-02/2018. NB.: i valori percentuali lungo l'asse radiale non sono gli stessi per i due grafici.

La distribuzione delle temperature calcolate in corrispondenza della postazione della Rete Mareografica mostra un range di valori inferiore alla distribuzione dei valori misurati (Figura 13) che corrisponde ad una sottostima delle frequenze di occorrenza sia dei valori più freddi sia dei valori più caldi misurati (Figura 14). Questo comportamento si spiega con una tendenza alla sottostima dell'escursione termica diurna, che corrisponde alla limitata sovrastima dei valori notturni e sottostima dei valori diurni mostrata dal confronto dei cicli diurni (Figura 13). Il confronto statistico dei valori calcolati e misurati mostra un BIAS sostanzialmente nullo (pari a -0.02 C), un RMSE di 1.8 C ed un indice di correlazione pari a 0.96. In questa postazione sia la distribuzione osservata sia quella calcolata hanno forma bimodale, con valori massimi di frequenza a circa 12 e 22 C.

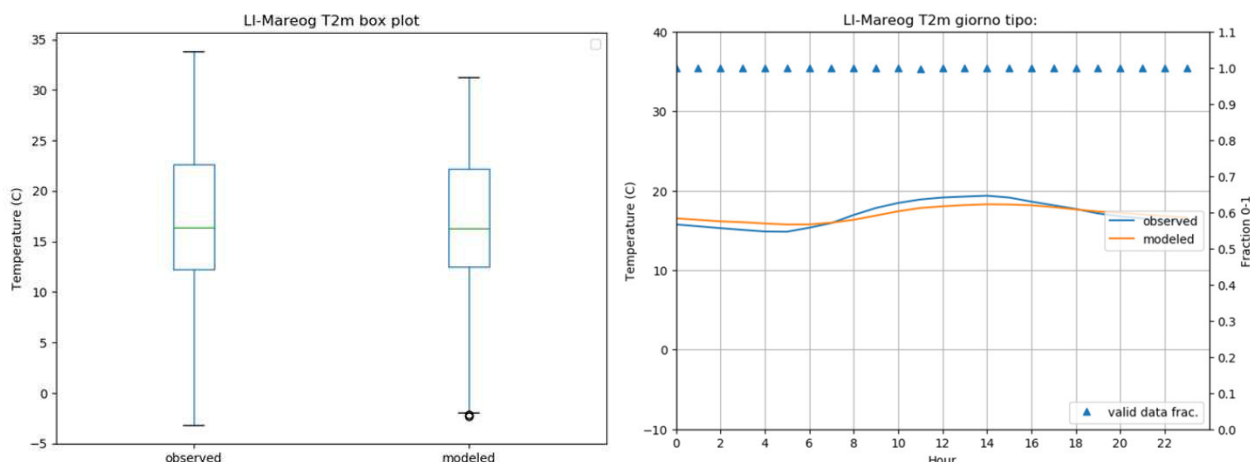


Figura 13. Confronto fra i valori di temperatura calcolati da WRF ed osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Confronto delle distribuzioni in forma di box plot (sinistra) e dei cicli giornalieri medi (destra). I triangoli blu (destra) indicano la frazione di dati sperimentali disponibili per ognuna delle ore considerate, leggibile sull'asse verticale di destra.

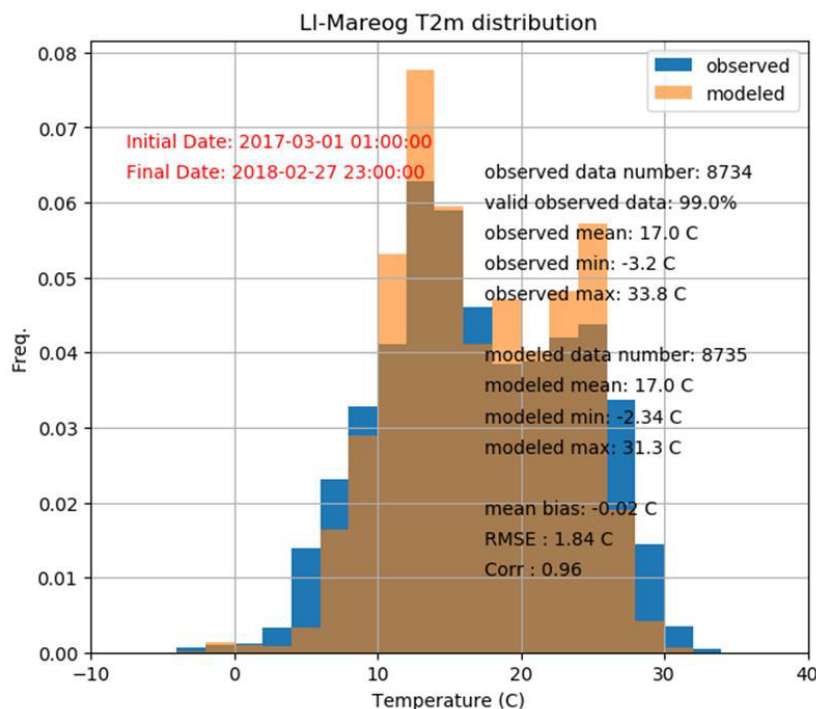


Figura 14. Confronto fra le distribuzioni dei valori di temperatura calcolati da WRF ed osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, durante il periodo

annuale 03/2017-02/2018. Il grafico riporta alcuni valori statistici relativi alle distribuzioni osservate e calcolare, oltre ai valori di BIAS, RMSE ed indice di correlazione di Pearson.

Il confronto delle velocità dei venti mostra per la postazione del porto di Livorno una sovrastima più significativa di quella rilevata per l'aeroporto di Pisa (Figure 15-16), che rimane pressoché costante nelle diverse ore della giornata (Figura 15), con un valore del BIAS di 1.7 m/s e del RMSE di circa 2.8 m/s. L'indice di correlazione, pari 0.7, risulta invece lievemente migliore di quanto ottenuto a Pisa, indicando una buona riproduzione della sequenza temporale degli eventi.

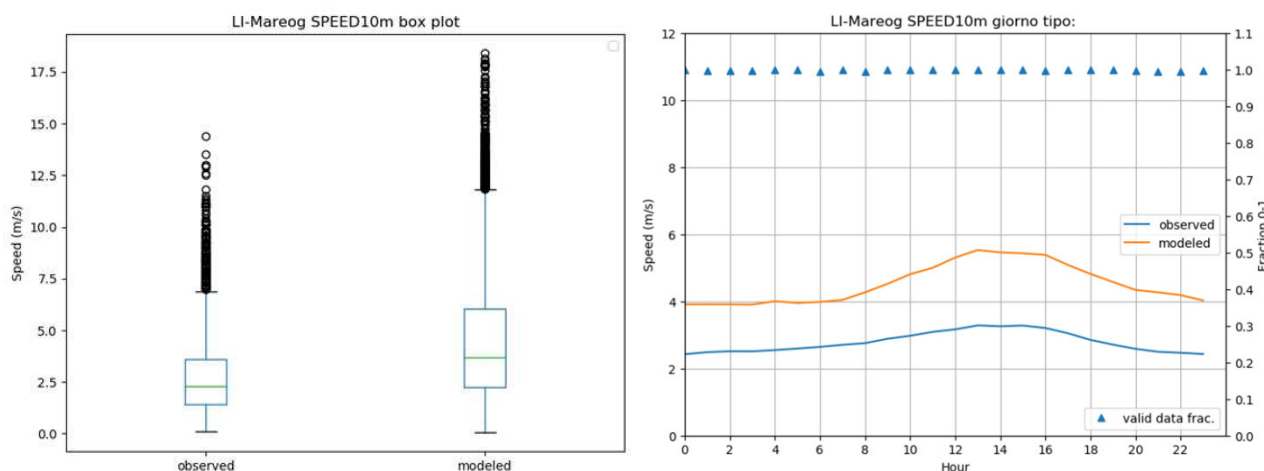


Figura 15. Confronto fra i valori di intensità del vento calcolati da WRF ed osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Confronto delle distribuzioni in forma di box plot (sinistra) e dei cicli giornalieri medi (destra). I triangoli blu (destra) indicano la frazione di dati sperimentali disponibili per ognuna delle ore considerate, leggibile sull'asse verticale di destra.

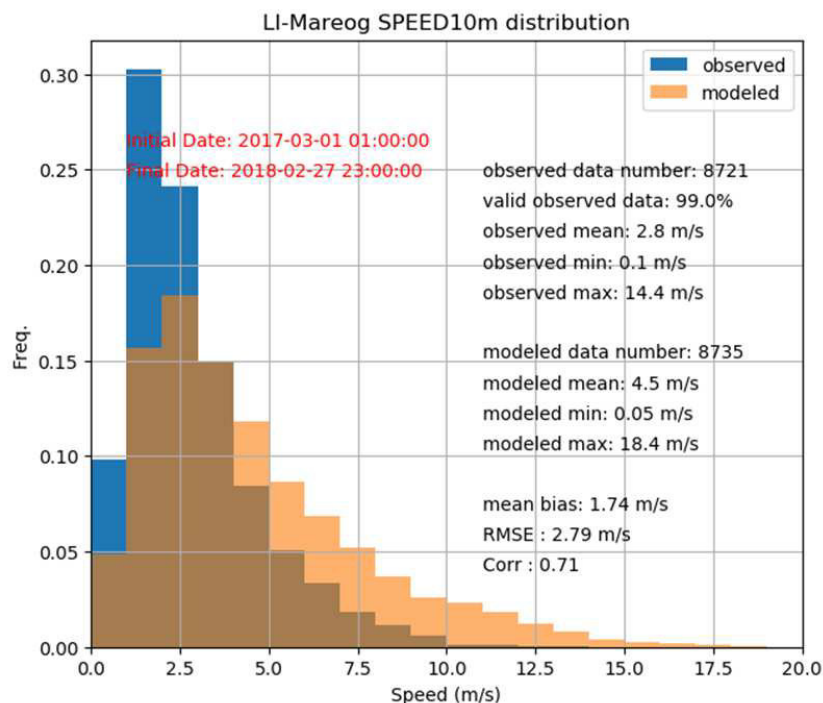


Figura 16. Confronto fra le distribuzioni dei valori di velocità del vento calcolati da WRF ed osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, durante il periodo annuale 03/2017-02/2018. Il grafico riporta alcuni valori statistici relativi alle distribuzioni osservate e calcolare, oltre ai valori di BIAS, RMSE ed indice di correlazione di Pearson.

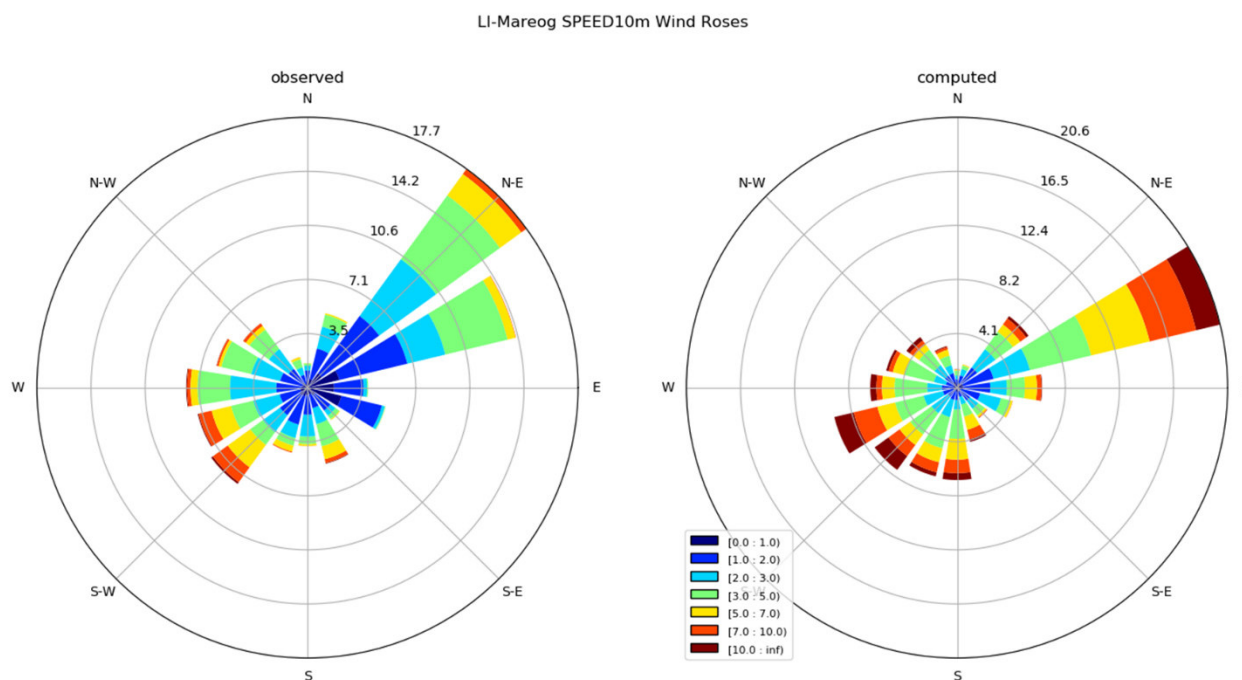


Figura 17. Confronto fra le rose dei venti osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale (sinistra) e calcolati da WRF (destra) per il periodo annuale 03/2017-02/2018. NB.: i valori percentuali lungo l'asse radiale non sono gli stessi per i due grafici.

La rosa dei venti della stazione portuale è riprodotta dalla simulazione di WRF (Figura 17) con una rotazione di circa 22.5 gradi in senso orario del settore di provenienza prevalente da nord-est, ed una sovrastima delle velocità dei venti già commentata. I risultati di WRF riproducono correttamente le variazioni delle caratteristiche anemologiche osservate fra Pisa e Livorno (Figure 12 e 17). Anche nella postazione localizzata all'interno del porto di Livorno si osserva la sostanziale assenza di venti di provenienza intorno nord.

2.3.1 Verifica della ricostruzione della variabilità stagionale

La circolazione atmosferica nell'area costiera di Livorno è soggetta ad una rilevante variabilità stagionale. In particolare, l'intensità e le direzioni prevalenti dei venti subiscono variazioni tali da modificare significativamente le condizioni dispersive e le sorgenti di inquinanti di maggior impatto sulla città e sui rilievi della rete di monitoraggio della qualità dell'aria. Per individuare le caratteristiche principali della variabilità meteorologica stagionale e verificare la capacità del modello meteorologico WRF di fornirne una rappresentazione soddisfacente, sono stati condotti confronti dei valori calcolati e misurati a livello mensile. Per ragioni di brevità sono riportati in questa sezione i risultati relativi ai soli mesi di maggio 2017 e gennaio 2018 che si possono considerare rispettivamente rappresentativi della circolazione atmosferica primaverile/estiva ed invernale, che mostrano le differenze più pronunciate. I risultati sono presentati parallelamente per le due postazioni di Pisa e Livorno già precedentemente utilizzate per il confronto in modo da fornire un'indicazione immediata delle differenze territoriali attese nei diversi periodi dell'anno. Durante il mese di maggio 2017, nella postazione dell'aeroporto di Pisa, si è rilevato un graduale aumento delle temperature che ha portato da valori massimi inferiori ai 20 C e minimi attorno ai 10 C, durante i giorni iniziali del mese, fino a massimi di poco inferiori ai 30 C e minimi di poco superiori ai 10 C nella seconda metà del mese (Figura 18). In corrispondenza di questa postazione, si è osservata quindi una crescita dell'escursione termica diurna ben riprodotta dalla simulazione modellistica, con una lieve sovrastima dei valori minimi nella seconda metà del mese. Nella postazione del porto di Livorno la crescita di temperatura non ha corrisposto ad una crescita dell'escursione termica. Mentre i valori medi della temperatura sono risultati ben riprodotti, il modello ha confermato la sottostima dell'escursione termica già identificata precedentemente ed

attribuibile al posizionamento della stazione (Figura 18). Seppure con il limite evidenziato, si osserva come la variazione delle temperature fra le due postazioni sia ben riprodotta dal modello.

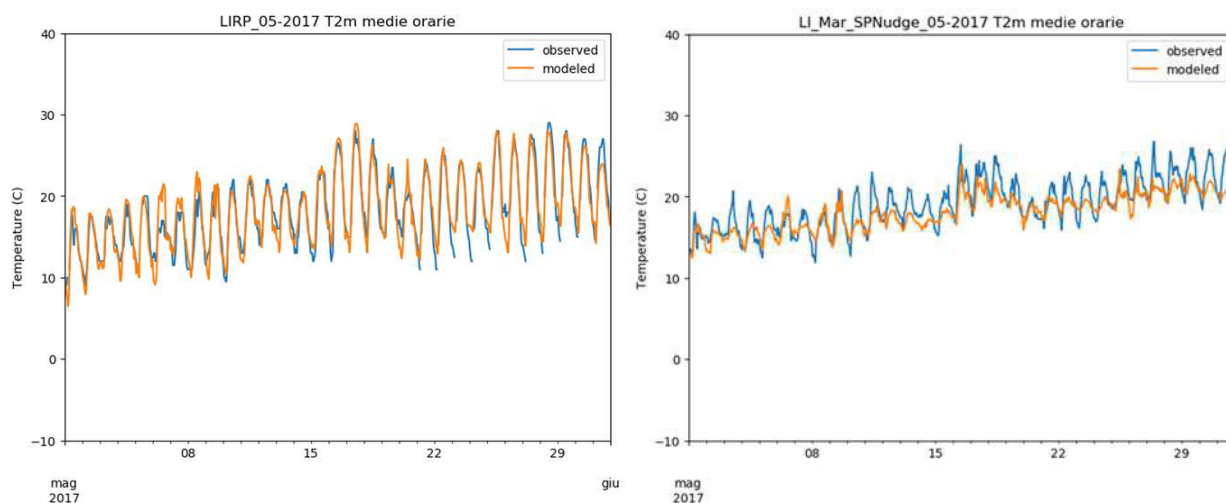


Figura 18. Confronto fra i valori di temperatura calcolati da WRF ed osservati nelle postazioni dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e della Rete Mareografica Nazionale nel porto di Livorno (destra), durante il mese di maggio 2017.

Il confronto fra i valori di umidità misurati e calcolati a Pisa conferma quanto osservato per le temperature, con una soddisfacente riproduzione della variabilità rilevata nel corso del mese ed una buona riproduzione dell'escursione giornaliera (Figura 19). Si osserva una lieve sottostima delle condizioni di saturazione notturne la stima delle quali va però considerata piuttosto critica anche per gli strumenti di misura. La variabilità osservata nel corso del mese è riprodotta dal modello anche per la postazione localizzata nel porto di Livorno, che rileva una limitata escursione diurna dei valori e non raggiunge mai condizioni di saturazione (Figura 19). Come già commentato per la temperatura, la simulazione modellistica non riproduce completamente la variabilità dei valori di umidità all'interno della giornata a causa del particolare posizionamento della stazione di misura, mentre descrive correttamente le rapide variazioni associate alle variazioni della pressione (Figura 21) ed all'occorrenza di perturbazioni. Anche per l'umidità risultano invece ben descritte le variazioni spaziali messe in evidenza dal confronto delle osservazioni di Pisa e Livorno.

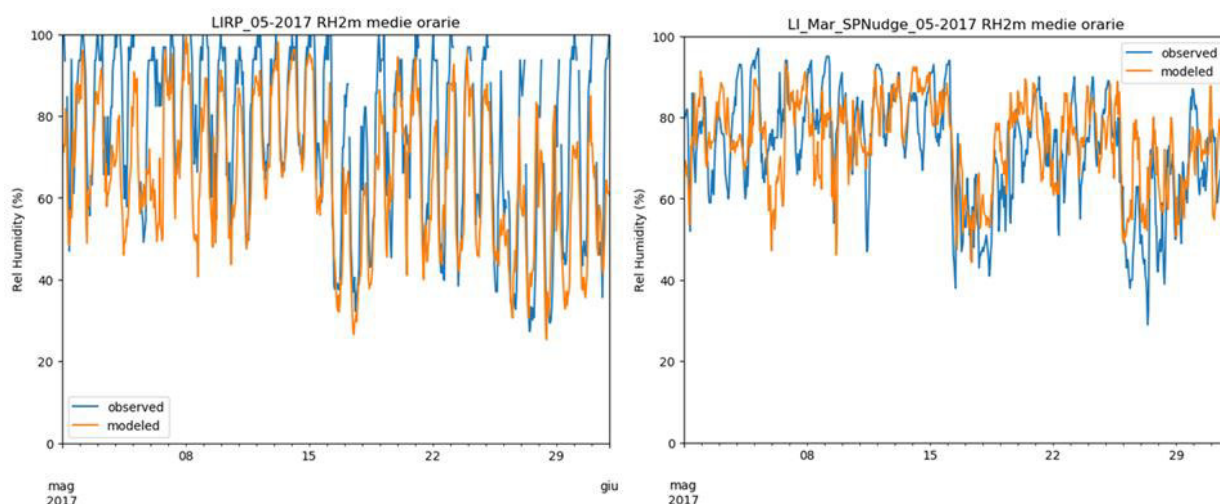


Figura 19. Confronto fra i valori di umidità relativa calcolati da WRF ed osservati nelle postazioni dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e della Rete Mareografica Nazionale nel porto di Livorno (destra), durante il mese di maggio 2017.

I venti osservati durante il mese di maggio mostrano la ciclicità diurna tipica dell'alternanza delle brezze di mare e terra con venti diurni che raggiungono valori massimi diurni di 5-6 m/s nella postazione dell'aeroporto di Pisa mentre rimangono normalmente inferiori ai 4 m/s nel porto di Livorno (Figura 20). I venti notturni risultano invece deboli in entrambe le postazioni con valori dell'ordine di 1 m/s. Il ciclo delle brezze è interrotto episodicamente da eventi di origine sinottica che si caratterizzano per la maggior intensità dei venti, e risultano coincidenti con le variazioni di pressione rilevate a Pisa e correttamente riprodotte da WRF (Figura 21). La differenza fra i valori di pressione calcolati e misurati è dovuta alla differenza fra le quote di riferimento che non sono state conciliate per migliorare la leggibilità del grafico.

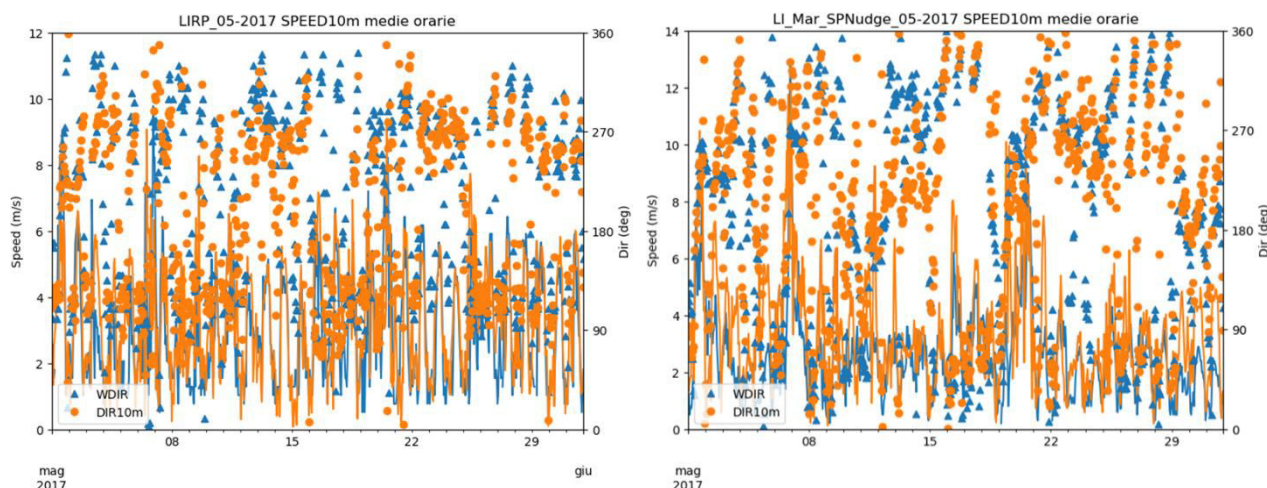


Figura 20. Confronto fra i valori di velocità (linee) e direzione (simboli) del vento calcolati da WRF ed osservati nelle postazioni dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e della Rete Mareografica Nazionale nel porto di Livorno (destra), durante il mese di maggio 2017.

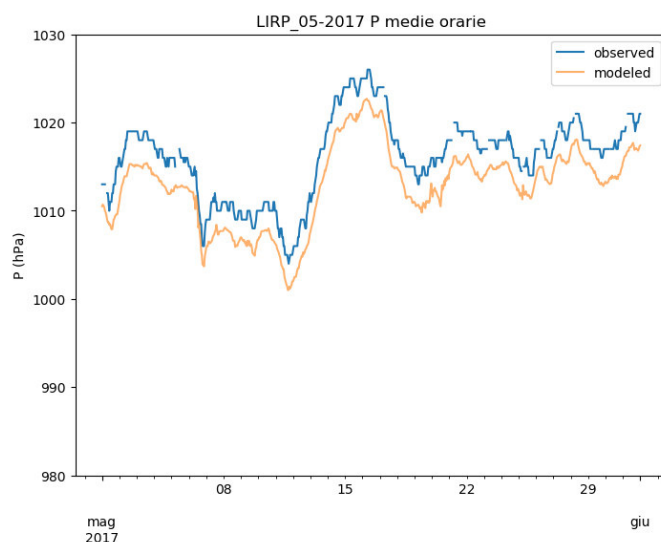


Figura 21. Confronto fra i valori di pressione atmosferica (simboli) calcolati da WRF ed osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) durante il mese di maggio 2017.

Nella postazione di Pisa le direzioni dei venti assumono provenienza intorno ovest durante il giorno ed intorno est-sud-est durante la notte (Figure 20 e 22). La direzione dei venti in questa postazione è ben riprodotta dalla simulazione di WRF sia a livello di sequenza temporale degli eventi (Figura 20) che come rosa dei venti (Figura 22). Come già osservato in precedenza nell'analisi dei dati a livello annuale, la simulazione modellistica tende a sovrastimare l'intensità dei venti misurata nel porto di Livorno, mentre ne riproduce correttamente la variabilità temporale (Figura 20). Data l'evidente differenza fra le osservazioni di Livorno e quelle di Pisa è però possibile ritenere che le

strutture portuali esterne effettuino un parziale effetto barriera sui venti provenienti dal mare che non può essere rappresentato nella simulazione. Le caratteristiche generali della rosa dei venti misurata nel porto di Livorno sono riprodotte dalla simulazione di WRF (Figura 23), con una rotazione in senso antiorario rispetto a quanto osservato a Pisa ed una maggior variabilità delle direzioni di provenienza intorno ovest sud-ovest. L'irregolarità della distribuzione angolare dei venti osservati di provenienza intorno ovest fa pensare al possibile effetto di incanalamento di alcune strutture portuali che possono determinare direzioni privilegiate (Figura 23).

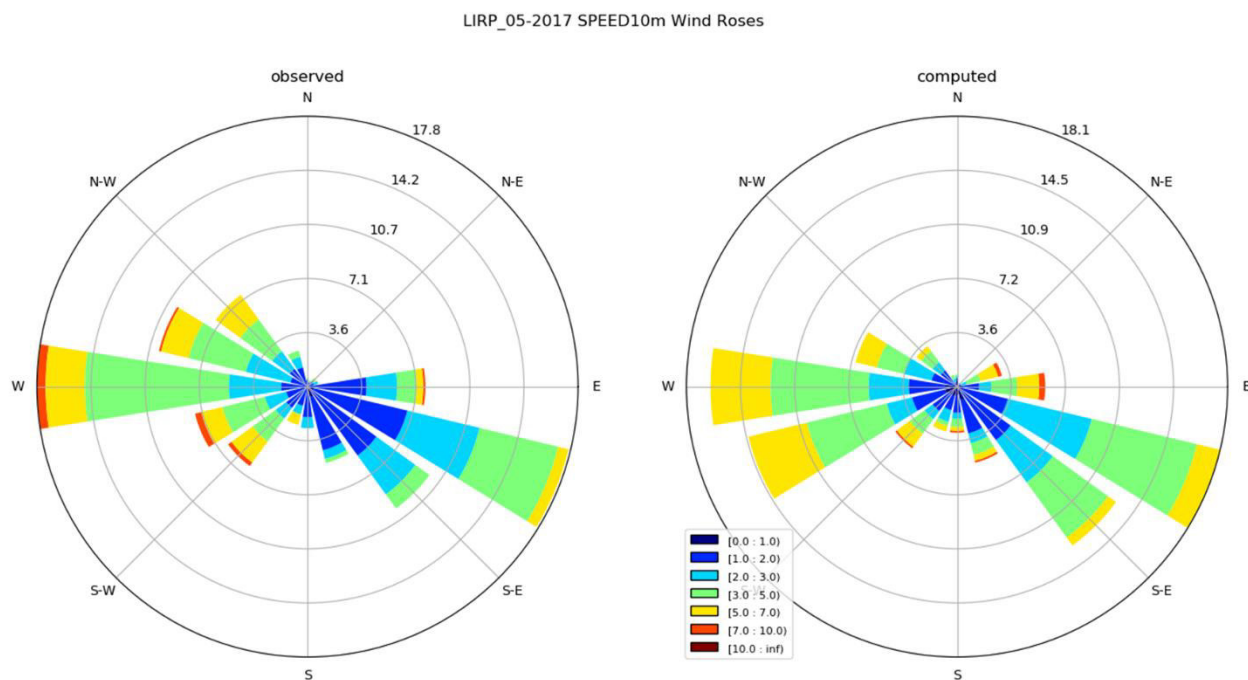


Figura 22. Confronto fra le rose dei venti osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e calcolati da WRF (destra) per il mese di maggio 2017. NB.: i valori percentuali lungo l'asse radiale non sono gli stessi per i due grafici.

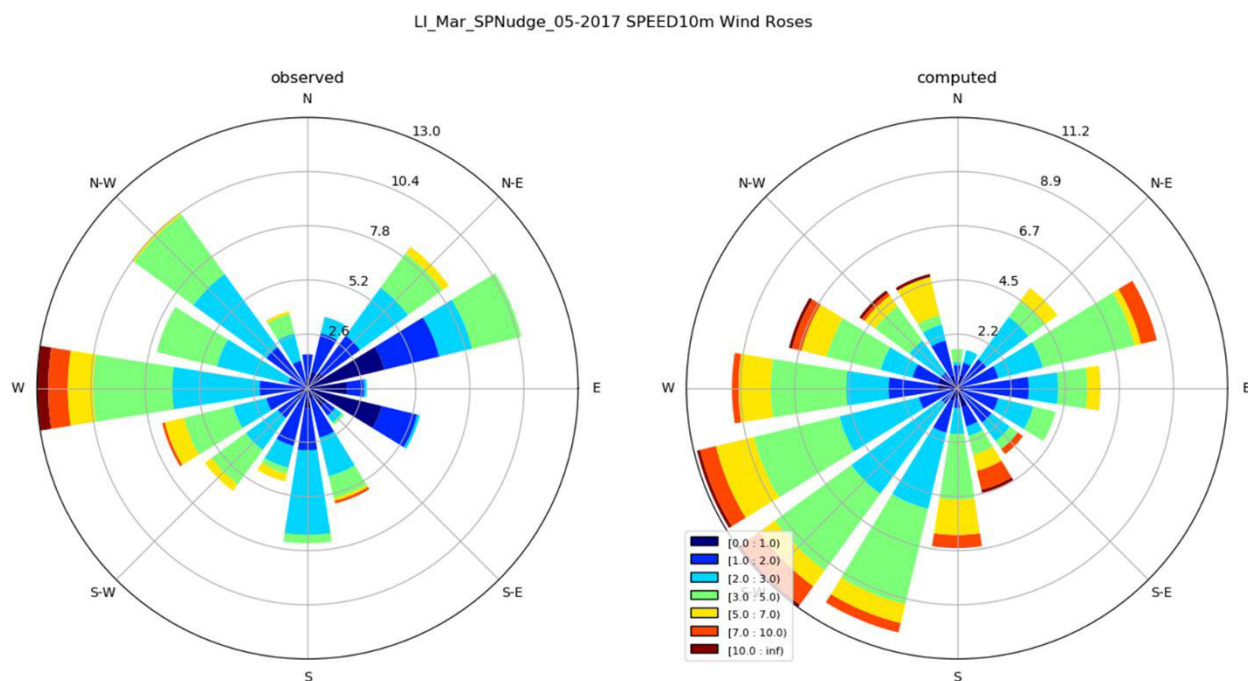


Figura 23. Confronto fra le rose dei venti osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale (sinistra) e calcolati da WRF (destra) per il mese di maggio 2017. NB.: i valori percentuali lungo l'asse radiale non sono gli stessi per i due grafici.

Durante il mese di gennaio la temperatura mostra una variabilità piuttosto irregolare, solo durante brevi periodi si osserva la variabilità ciclica tipica delle giornate serene (Figura 24), che corrispondono ai brevi periodi di alta pressione registrati durante questo mese (Figura 27) e correttamente riprodotti dalla simulazione. In questo periodo i risultati della simulazione di WRF paiono più efficaci per la riproduzione dei valori registrati dalla postazione della Rete Mareografica, per la quale le variazioni di breve periodo sono riprodotte con maggior accuratezza (Figura 24).

La variabilità registrata dai valori di umidità relativa nel corso del mese di gennaio 2018 è riprodotta dalle simulazioni modellistiche che descrivono correttamente le differenze osservate fra il porto di Livorno e l'aeroporto di Pisa (Figura 25), dove il ciclo diurna risulta più pronunciato e vengono raggiunti spesso valori di saturazione durante le ore notturne. In corrispondenza di quest'ultima postazione il modello tende a sottostimare i massimi notturni ed i minimi diurni di umidità durante la seconda parte del mese, mentre nella postazione di Livorno si osserva una tendenza alla sovrastima dei valori massimi di umidità.

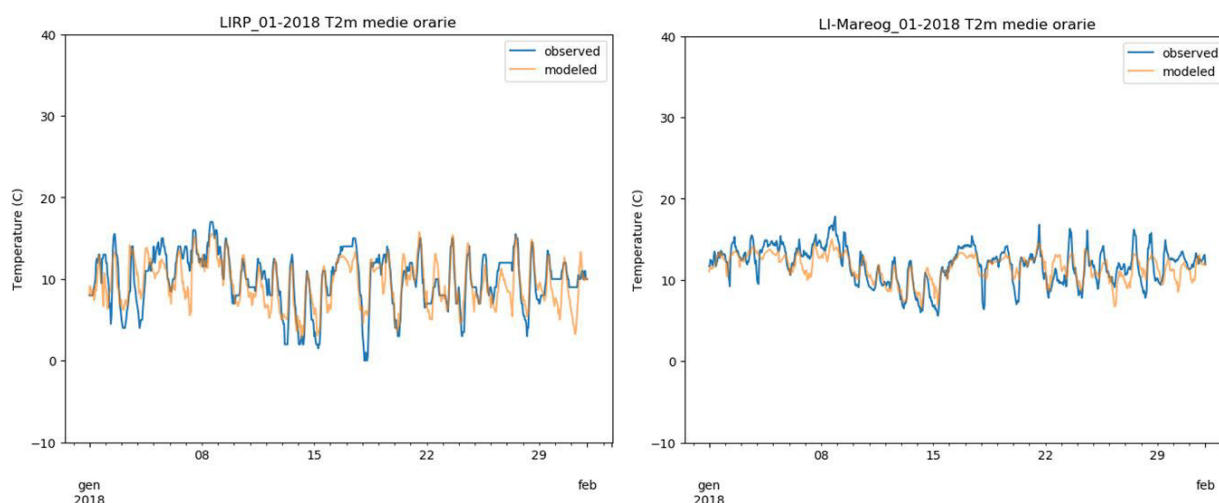


Figura 24. Confronto fra i valori di temperatura calcolati da WRF ed osservati nelle postazioni dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e della Rete Mareografica Nazionale nel porto di Livorno (destra), durante il mese di gennaio 2018.

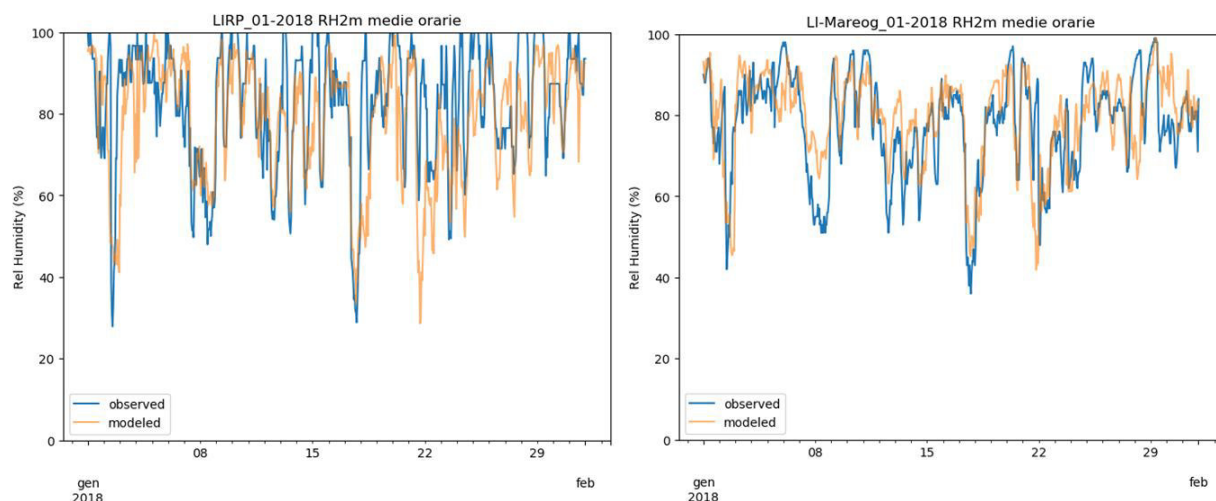


Figura 25. Confronto fra i valori di umidità relativa calcolati da WRF ed osservati nelle postazioni dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e della Rete Mareografica Nazionale nel porto di Livorno (destra), durante il mese di gennaio 2018.

I venti registrati durante il mese di gennaio 2018 sono stati prevalentemente di debole intensità e di provenienza persistente intorno est-sud-est a Pisa e est-nord-est a Livorno (Figure 26, 28 e 29). Questa condizione di circolazione è stata interrotta da brevi periodi di intensificazione delle correnti

verificatisi durante l'occorrenza di perturbazioni correlate con gli abbassamenti di pressione registrati localmente (Figura 27) e caratterizzati da direzioni di provenienza fra ovest e sud-ovest (Figure 26, 28 e 29). Queste caratteristiche anemologiche sono rappresentative delle condizioni di circolazione invernali, durante questa stagione i venti deboli di provenienza intorno est risultano infatti dominanti.

La simulazione di WRF ha riprodotto correttamente la variabilità locale del campo di pressione (Figura 27), la variabilità temporale dei venti e le differenze spaziali riscontrate fra le postazioni di Pisa e Livorno (Figure 26, 28 e 29). Come già rilevato in precedenza il modello mostra una tendenza alla sovrastima dell'intensità del vento in prossimità del suolo che risulta più pronunciata nel confronto con la postazione di Livorno rispetto a quella di Pisa. Va notato a questo riguardo che la postazione della Rete Mareografica è localizzata su di una banchina del porto ed è possibile che subisca una parziale schermatura dei venti da parte delle strutture portuali e delle barriere esterne per i venti da ovest e da parte delle strutture edilizie del centro di Livorno per i venti di provenienza intorno est.

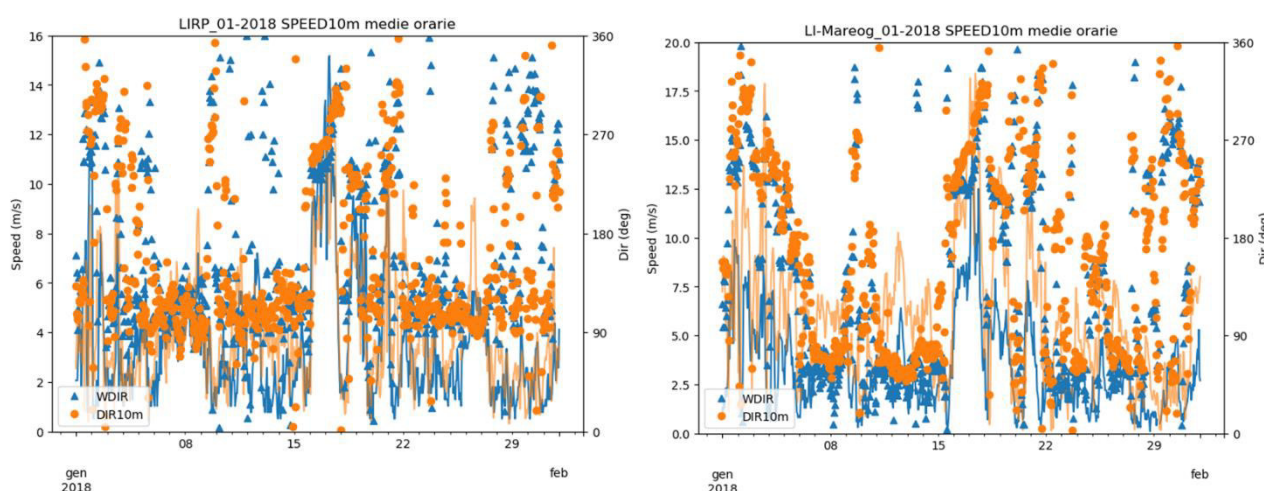


Figura 26. Confronto fra i valori di velocità (linee) e direzione (simboli) del vento osservati nelle postazioni dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e della Rete Mareografica Nazionale nel porto di Livorno (destra), durante il mese di gennaio 2018.

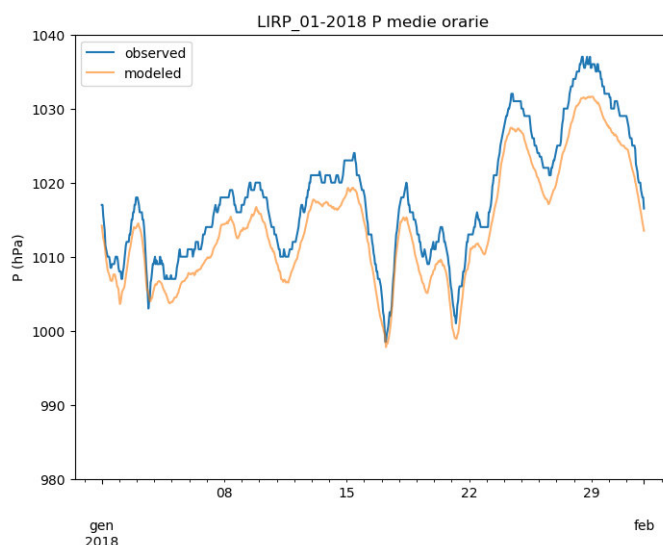


Figura 27. Confronto fra i valori di pressione atmosferica (simboli) calcolati da WRF ed osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) durante il mese di gennaio 2018.

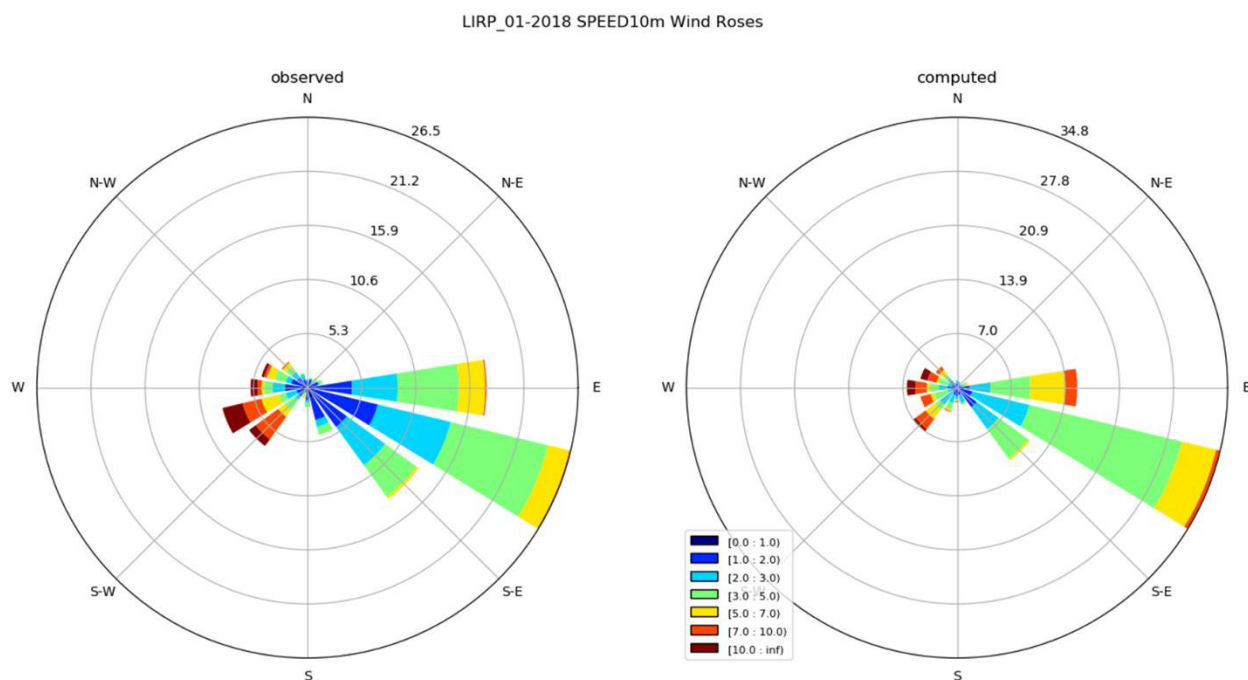


Figura 28. Confronto fra le rose dei venti osservati nella postazione dell'aeroporto di Pisa LIRP (sinistra) e calcolati da WRF (destra) per il mese di gennaio 2018. NB.: i valori percentuali lungo l'asse radiale non sono gli stessi per i due grafici.

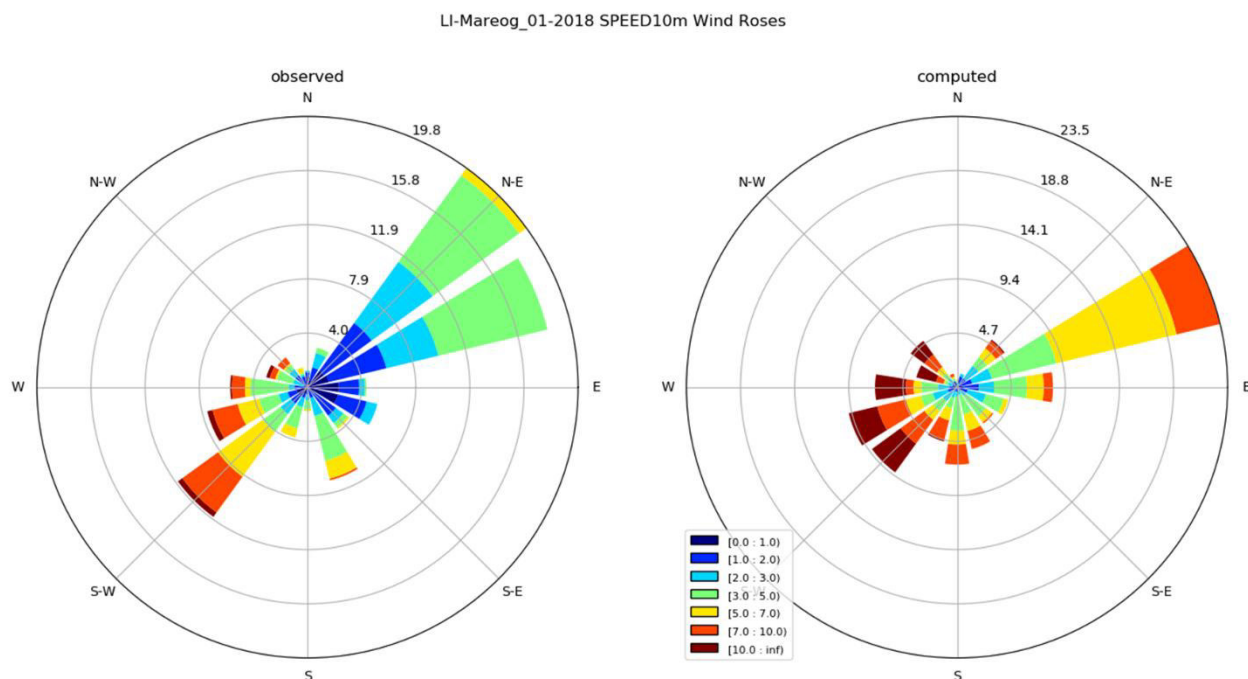


Figura 29. Confronto fra le rose dei venti osservati nella postazione del porto di Livorno della Rete Mareografica Nazionale (sinistra) e calcolati da WRF (destra) per il mese di maggio 2017. NB.: i valori percentuali lungo l'asse radiale non sono gli stessi per i due grafici.

2.4 Estensione del periodo temporale coperto dalle simulazioni meteorologiche

Il periodo coperto dalle simulazioni meteorologiche è stato esteso oltre l'anno di riferimento per coprire la gran parte delle campagne sperimentali realizzate nell'area portuale e consentire la verifica delle prestazioni del sistema modellistico con le osservazioni raccolte durante i periodi di indagine intensiva. La ricostruzione dei campi meteorologici è stata quindi estesa al periodo

temporale compresa fra marzo e agosto 2018. La configurazione e la modalità di applicazione del modello WRF è rimasta la stessa descritta nel Paragrafo 2.2 per il periodo annuale di riferimento.

3 Modellistica emissiva

Come punto di partenza per l'integrazione di un database emissivo per le analisi di scenario nell'area del porto di Livorno è stato utilizzato il più recente Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in atmosfera (IRSE, Regione Toscana), fonte informativa di riferimento per la valutazione di piani, programmi ed interventi che hanno effetto sulla qualità dell'aria nella regione.

Per sorgenti o settori particolarmente significativi in relazione al porto di Livorno e le aree circostanti sono state quindi effettuate delle integrazioni ai dati IRSE, modellando le emissioni sulla base dei dati locali di dettaglio disponibili.

Per le emissioni associate al traffico navale è stato implementato un modello emissivo alimentato dai dati forniti dall'APL circa i movimenti dei natanti nel corso di un anno di riferimento e ad informazioni complementari circa i mezzi di supporto utilizzati per ciascuna tipologia in fase di manovra.

Le emissioni da traffico stradale relative ad una porzione della rete di accesso al porto sono state calcolate a partire dai risultati di uno studio di traffico condotto dall'Università di Pisa, mentre quelle associate ai movimenti dei veicoli sui piazzali della Stazione Marittima sono state stimate a partire da dati sui movimenti forniti dall'APL.

Infine, le emissioni di aerosol marini emessi a seguito dell'azione eolica ed i composti volatili organici emessi dalla vegetazione sono state stimate sul dominio di calcolo direttamente su base oraria, utilizzando i campi meteorologici messi a punto e le informazioni sull'uso del suolo.

Nei paragrafi seguenti sono illustrati i dati utilizzati e le modellazioni effettuate, così come l'approccio utilizzato per predisporre l'input emissivo al modello a partire dal database emissivo complessivo messo a punto.

3.1 Inventario regionale delle emissioni

Il primo riferimento utilizzato per la preparazione dell'input emissivo al modello è l'Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in atmosfera (IRSE) relativo all'anno 2010, fornito da ARPA Toscana.

Il database emissivo è strutturato in modo da fornire informazioni specifiche circa la tipologia di sorgente, la localizzazione, l'entità e la tipologia delle emissioni; questo risultato si ottiene tramite la classificazione dei dati che segue la metodologia standard europea EMEP-CORINAIR, che definisce le attività in base alle categorie SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution), articolate secondo "macrosettori", "settori" ed "attività".

I macrosettori sono 11 e vengono così definiti:

- macrosettore 1: "produzione energetica", riunisce le emissioni dovute ai processi di trasformazione dell'energia;
- macrosettore 2: "combustione non industriale", cioè le emissioni provenienti da impianti di riscaldamento commerciali ed istituzionali, residenziali ed agricoli stazionari;
- macrosettore 3: "combustione nell'industria", ovvero riscaldamento di capannoni e stabilimenti e tutti i processi che necessitano la presenza di forni di fusione o cottura dei materiali;
- macrosettore 4: "processi produttivi", è il macrosettore che comprende le emissioni legate alla produzione di un determinato bene o materiale;
- macrosettore 5: "estrazione, distribuzione combustibili fossili/geotermico", comprende le emissioni dovute ai processi di produzione, distribuzione, stoccaggio di combustibile solido, liquido e gassoso e riguarda sia le attività sul territorio che quelle off-shore.
- macrosettore 6: "uso di solventi", raggruppa le attività riconducibili all'uso di vernici, allo sgrassaggio alla lavorazione e sintesi dei prodotti chimici, etc...

- macrosettore 7: “trasporti stradali”, sono le emissioni (esauste e non) prodotte da automobili, mezzi leggeri e pesanti, motocicli, nei diversi cicli di guida;
- macrosettore 8: “altre sorgenti mobili”, ovvero il trasporto ferroviario, i mezzi militari, il traffico marittimo, quello aereo, i mezzi agricoli, forestali ed i mezzi industriali;
- macrosettore 9: “trattamento e smaltimento rifiuti”, raggruppa le attività di incenerimento, spargimento, interrimento di rifiuti, e gli aspetti ad essi collaterali come il trattamento delle acque reflue, il compostaggio, la produzione di biogas, lo spargimento di fanghi, ecc;
- macrosettore 10: “agricoltura”, macrosettore in cui si raggruppano le emissioni legate agli allevamenti, alle attività agricole (con e senza fertilizzanti e/o antiparassitari, pesticidi, diserbanti) ed all’incenerimento di residui effettuato in loco;
- macrosettore 11: “altre sorgenti di emissione ed assorbimenti”, comprende tutte quelle attività non antropiche che generano emissioni (attività fitologica di piante, arbusti ed erba, fulmini, emissioni spontanee di gas, emissioni dal suolo, vulcani, combustione naturale, ecc.).

Oltre alla suddivisione delle emissioni in base alle attività soggiacenti, all’interno dell’IRSE vi è un’ulteriore distinzione, fatta in base alle caratteristiche geometriche delle sorgenti:

- di tipo puntuale: sono emissioni da sorgenti localizzabili geograficamente con precisione che emettono quantità di inquinanti superiori a determinate soglie; le informazioni relative a tali tipi di sorgente vengono solitamente raccolte a partire da apposite schede compilate dai gestori degli impianti;
- di tipo lineare: sono emissioni derivanti da sorgenti assimilabili a linee come, ad esempio, le strade e le linee ferroviarie;
- di tipo diffuso: comprendono le tutte le sorgenti non localizzabili, ma distribuite sul territorio (per questo sono spesso anche chiamate emissioni areali); nell’inventario IRSE tali sorgenti sono riferite ai comuni.

Nel dominio considerato l’inventario registra 22 sorgenti puntuali, di cui 5 impianti di produzione energetica (compresi quelli nelle raffinerie) situati nei comuni di Rosignano Marittimo, Collesalveti e Livorno, che, complessivamente emettono circa il 70% dei NOx, oltre l’80% degli ossidi di azoto e circa la metà del particolato fine emessi dalle sole sorgenti puntuali presenti nell’area.

In Figura 30 si osserva la distribuzione delle emissioni di NOx nel dominio in esame. Si osserva come le fonti emissive (complessive) si concentrino nei comuni di Pisa, Livorno, ed, in misura minore, nei comuni ad essi circostanti, caratterizzati da una maggiore presenza industriale e centri urbani ed assi viari importanti; le emissioni di ossidi d’azoto sono infatti prodotte dal macrosettore 07 a cui sono legati tutti i trasporti stradali e, in seconda battuta, dai macrosettori 08 e 02 riguardanti rispettivamente le altre sorgenti mobili e gli impianti di combustione non industriali.

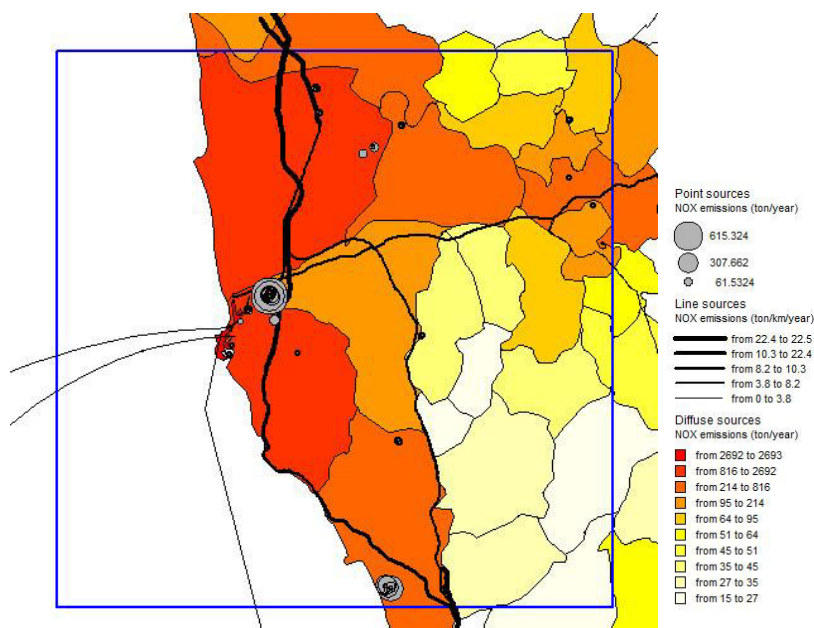


Figura 30. Distribuzione delle emissioni di ossidi di azoto nel dominio in esame, secondo i dati dell'inventario regionale IRSE 2015.

Vista la forte presenza industriale è anche interessante osservare la distribuzione degli ossidi di zolfo (Figura 31) prodotti essenzialmente nel comune di Livorno e Collesalveti, e legati, in entrambi i casi ad impianti di produzione energetica (macrosettore 1) e gestione dei rifiuti (macrosettore 9) e, per quanto riguarda il capoluogo di Provincia, alla presenza del porto.

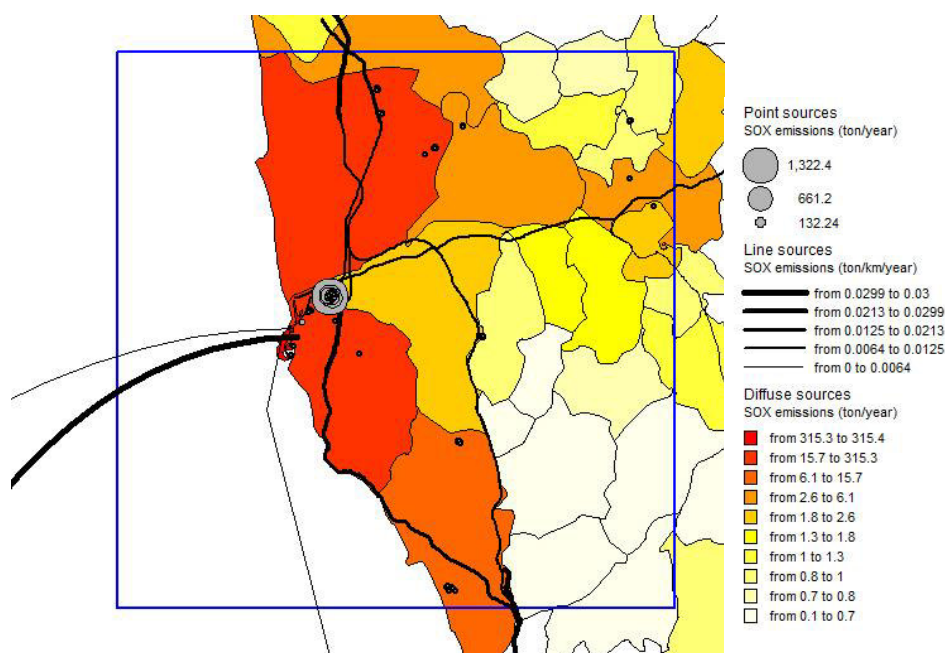


Figura 31. Distribuzione delle emissioni di ossidi di zolfo nel dominio in esame, secondo i dati dell'inventario regionale IRSE 2015.

Analizzando con particolare dettaglio le emissioni riportate nell'inventario IRSE per il solo comune di Livorno, si osserva come i settori che contribuiscono maggiormente alle emissioni complessive siano essenzialmente il riscaldamento residenziale per quanto riguarda le emissioni di particolato, il traffico stradale ed gli altri trasporti, di cui il settore marittimo rappresenta il 62% nel caso degli ossidi d'azoto ed oltre il 70% nel caso degli ossidi di zolfo.

In Figura 32 sono riportate le percentuali emissive dei diversi comparti che assumono una importanza diversa in base all'inquinante considerato.

Le emissioni di ossidi di azoto appaiono dominate dal macrosettore 8 – “Altre sorgenti mobili” (63%), che è composto, oltre che dal traffico navale, dal traffico ferroviario, dalle attività legate ai mezzi agricoli ed dai mezzi presenti nelle industrie, e dal trasporto stradale (27%). Il particolato è prodotto, con contributi tra essi paragonabili, dal traffico stradale e dalla combustione non industriale (riscaldamento degli edifici) e per circa il 20 % dalle altre sorgenti mobili.

Il monossido di carbonio è essenzialmente prodotto dal trasporto stradale, per oltre l'80% del totale, dalla combustione residenziale (10%) e, in piccola parte, dalla combustione residenziale e dagli altri trasporti. I composti organici volatili sono invece rappresentati per circa la metà dalle attività legate all'uso dei solventi e, in seconda battuta, dal traffico su strada e dai processi produttivi.

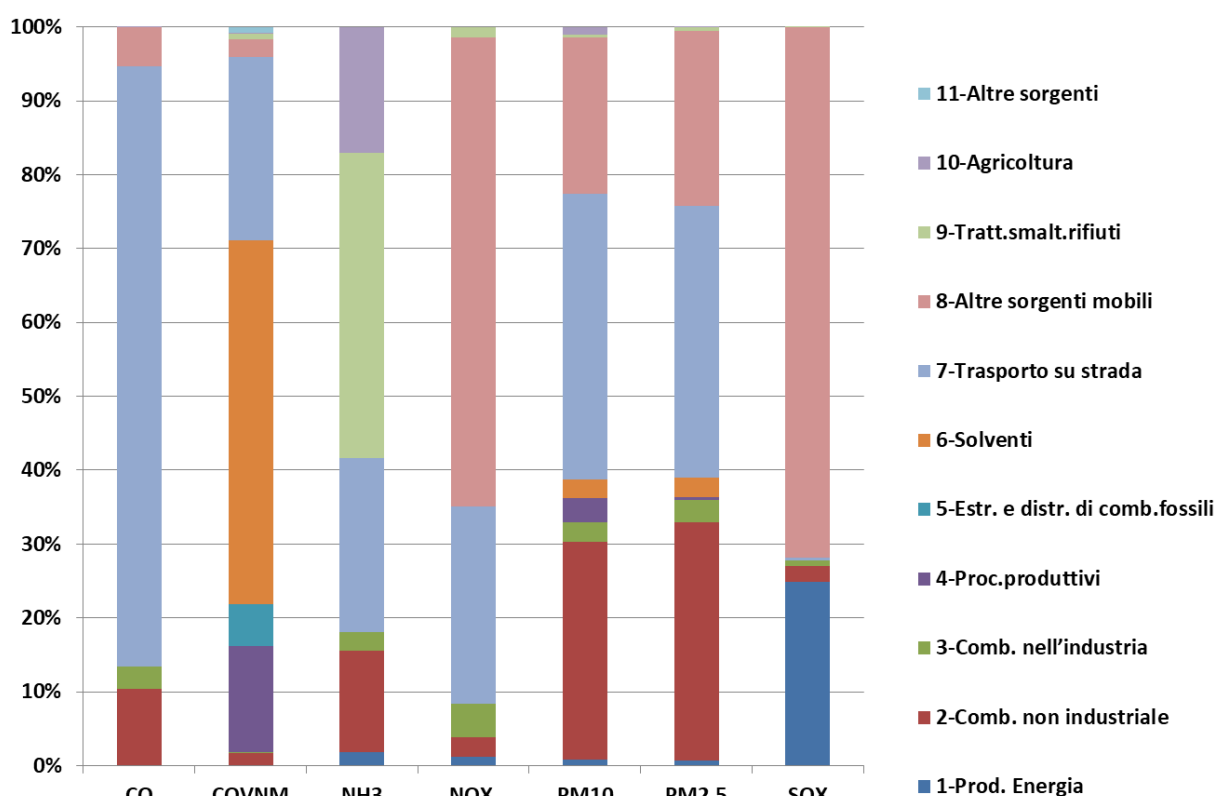


Figura 32. Contributi emissivi dei diversi macrosettori presenti nel comune di Livorno (fonte IRSE 2015).

Dalle osservazioni appena riportate si evince come il comparto navale rappresenti per il comune e per l'area circostante una fonte rilevante di emissioni inquinanti e per questo merita un'attenzione particolare ed un trattamento più approfondito.

3.2 Traffico navale

3.2.1 Metodologia

Per realizzare una stima bottom-up delle emissioni navali, in grado di cogliere la differenza tra le varie aree del porto, sia in termini di quantità emesse sia della loro articolazione nel tempo, si è fatto riferimento agli approcci descritti nelle linee guida europee dell'Emission Inventory Guidebook (EMEP/EEA, 2016), dove vengono definite diverse metodologie di calcolo in base ai dati effettivamente a disposizione.

In Figura 33 è l'approccio che deve essere adottato nella scelta del calcolo emissivo; se sono disponibili i dati dei movimenti delle navi stratificati per tipo di motore si utilizzerà il metodo Tier 3; nel caso in cui questi dati non siano disponibili, ma ci siano solo quelli relativi al tipo di motore si utilizzerà il metodo Tier 2; in caso contrario e quindi in assenza di dati sui movimenti e sui motori si utilizzerà il metodo Tier 1. E' importante ricordare come, in special modo nei primi due approcci, oltre ai dati effettivamente disponibili si possano utilizzare di letteratura e con validità statistica.

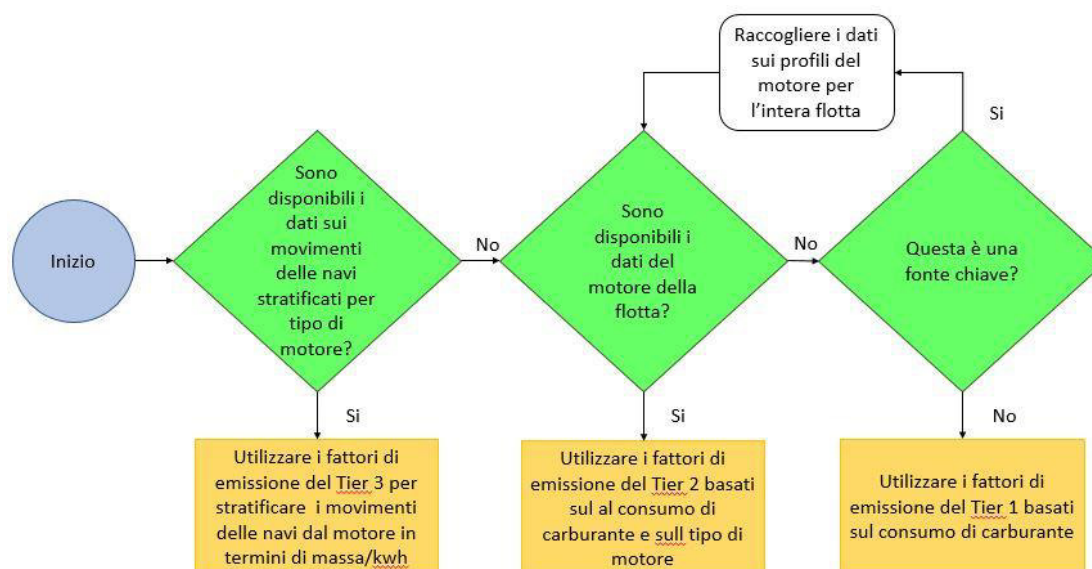


Figura 33. Albero decisionale per la stima delle emissioni derivanti attività navali.

Vediamo i diversi approcci nel dettaglio.

Tier 1 - Approccio predefinito

Questo approccio si basa sull'ipotesi che le quantità di carburante vendute per le attività di navigazione siano disponibili per tipo di carburante dai dati raccolti a livello nazionale e siano suddivisi per navigazione nazionale, internazionale, pesca e militare.

L'approccio Tier 1 per la navigazione utilizza la seguente equazione generale:

$$E_i = \sum_m (FC_m \cdot EF_{i,m})$$

dove:

- E_i = emissione dell'inquinante i in chilogrammi;
- FC_m = massa del tipo di carburante m venduta nel paese per la navigazione (tonnellate);
- $EF_{i,m}$ = fattore di emissione specifico del consumo di carburante legato al tipo di inquinante i e al tipo di carburante m [kg / tonnellata];
- m = tipo di carburante (olio combustibile, diesel marino, gasolio marino, benzina).

Il prodotto $FC_m \cdot EF$ viene sommato per i diversi tipi di carburante utilizzati per fornire così le emissioni totali dalla navigazione.

I fattori di emissione del Tier 1 ($EF_{i,m}$) presuppongono una tecnologia media per la flotta, quindi sono predefiniti per ciascun inquinante e per ciascun tipo di carburante utilizzato.

Tier 2 - Approccio specifico tecnologico

Oltre al consumo di carburante se ne considera anche la tipologia associata al tipo di motore.

L'algoritmo risulta dunque così strutturato:

$$E_i = \sum_m \left(\sum_j FC_{m,j} \cdot EF_{i,m,j} \right)$$

dove:

- E = emissione annuale (tonnellate);
- $FC_{m,j}$ = massa del tipo di carburante m utilizzata dalle navi con tipo di motore j (tonnellate);
- $EF_{i,m,j}$ = fattore di emissione medio per inquinante i da parte di navi con tipo di motore j che utilizzano tipo di carburante m;
 - i = inquinante;
 - j = tipo di motore (diesel a bassa, media e alta velocità, turbina a gas e turbina a vapore);
 - m = tipo di carburante (olio combustibile, diesel marino / gasolio marino (MDO / MGO), benzina).

Le tipologie di motori che si considerano sono così riassumibili:

- motore diesel a bassa velocità (SSD, Slow Speed Diesel): ha una velocità operativa massima di 300 giri/min, sebbene la maggior parte funziona a velocità comprese tra 80 e 140 giri / min; di solito opera su cicli a due tempi;
- motore diesel a media velocità (MSD, Medium Speed Diesel): motore diesel marino con velocità operativa massima di 300-900 giri/min; di solito funziona su cicli a quattro tempi;
- motore diesel a alta velocità (HSD, High Speed Diesel): motore diesel marino con una velocità operativa superiore a 900 giri/min;
- turbine a vapore (ST, Steam Turbines): i serbatoi a turbina a vapore sono prevalentemente alimentati con olio combustibile piuttosto che con carburanti leggeri;
- turbine a gas (GT, Gas Turbines): questo tipo di motore è il più utilizzato nelle navi militari, spesso in combinazione con motori diesel.

Vengono alimentati da olio combustibile (BFO), diesel marino (MDO) o gasolio marino (MGO), che va ad influenzare fortemente il tipo e la quantità di emissioni che vengono prodotte.

Statisticamente il 99% della flotta navale utilizza motori diesel, mentre le turbine a gas e a vapore sono utilizzate solo nell'1% dei casi.

Poiché in uno studio che comprende tutti i movimenti che si verificano in un porto è molto difficile avere l'informazione specifica relativa alla combinazione motore/carburante di ogni singola nave, per questo parametro ci si affida a statistiche nazionali ed internazionali (ad esempio a livello europeo ci si affida ai dati raccolti da Eurostat da tutti gli Stati membri in base alla direttiva sulle statistiche marittime, dir.96/64/CE, e disponibili nella base dati Eurostat Newcronos Maritime).

Con l'approccio Tier 2 la stima delle emissioni viene così effettuata:

1. raccolta dei dati statistici sugli arrivi nei porti per tipo di nave;
2. calcolo della potenza totale installata per tipo di nave;
3. ripartizione della potenza totale installata per ciascun tipo di imbarcazione in base alla velocità del motore / classe di carburante;
4. calcolo del consumo di carburante;
5. stima delle emissioni usando i fattori di emissione.

Tier 3 - Metodologia di movimento delle navi

Nel caso ottimale in cui siano disponibili dati dettagliati sui movimenti delle navi e informazioni tecniche delle imbarcazioni (ad esempio dimensioni e tecnologia del motore, tempo di permanenza in porto, potenza installata o consumo di carburante) si usa l'approccio cosiddetto Tier 3.

La metodologia considera il viaggio nelle sue diverse fasi (rappresentate in Figura 34) per poi sommarne le emissioni prodotte:

$$E_{viaggio} = E_{stazionamento} + E_{manovra} + E_{crocera}$$

Le fasi sono definite come:

- fase di crociera (cruising), si svolge in mare aperto, all'esterno del porto;
- fase di manovra (maneuvering), distinguibile in realtà in due movimenti, la prima dalla decelerazione dall'ingresso in porto al momento di ormeggiare, la seconda quando la nave libera gli ormeggi e finisce quando ha raggiunto la velocità di crociera;
- fase di stazionamento (hotelling), in cui la nave rimane in banchina.

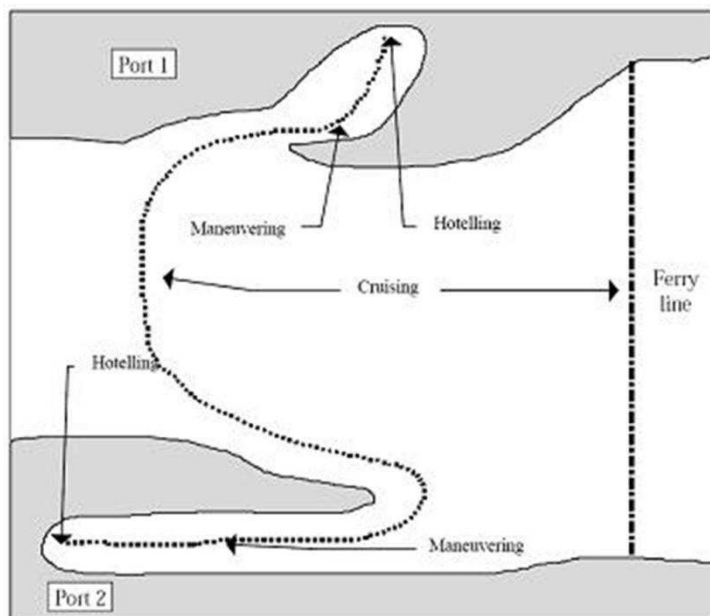


Figura 34. Fasi dei movimenti navali considerate per la stima delle emissioni (da EMEP/EEA, 2016).

L'inventario complessivo è ottenuto mediante somma delle emissioni associate a tutti i viaggi di tutte le navi durante l'intervallo di tempo prescelto.

Nel caso in cui si conosca il consumo di carburante per le diverse fasi del viaggio il calcolo è così composto:

$$E_{viaggio,i,j,m} = \sum_p (FC_{j,m,p} * EF_{i,j,m,p})$$

dove:

- $E_{viaggio}$ = emissione per un viaggio completo (tonnellate);
- FC = consumo di carburante (tonnellate);
- EF = fattore di emissione (kg / t);
 - i = inquinante (NOx, NMVOC, particolato; le emissioni di CO, SOx e microinquinant possono essere calcolate utilizzando il metodo Tier 1 a seconda del tipo di combustibile);
 - m = tipo di carburante (olio combustibile, diesel marino / gasolio marino (MDO / MGO), benzina);
 - j = tipo di motore (diesel a bassa, media e alta velocità, turbina a gas e turbina a vapore);
 - p = diversa fase del viaggio (crociera, stazionamento, manovra).

Generalmente è molto difficile conoscere il consumo di carburante distinto per singola fase, pertanto l'approccio modificato tiene conto della potenza installata e del tempo trascorso nelle diverse fasi di navigazione.

Le emissioni possono essere calcolate grazie alla conoscenza dettagliata della potenza del motore principale e ausiliario installati, del fattore di carico e del tempo totale trascorso, in ore, per ciascuna fase utilizzando la seguente equazione:

$$E_{viaggio,i,j,m} = \sum_p \left[T_p \sum_e (P_e * LF_e * EF_{e,i,j,m,p}) \right]$$

dove:

- $E_{viaggio}$ = emissione per un viaggio completo (tonnellate);
- EF = fattore di emissione (kg/t) a seconda del tipo di nave;
- LF = fattore di carico del motore (%);
- P = potenza nominale del motore (kW);
- T = tempo (ore);
 - e = categoria del motore (principale, ausiliario);
 - i = (NOx, NMVOC, particolato; le emissioni di CO, SOx e microinquinanti sono calcolate utilizzando il metodo Tier 1 a seconda del tipo di carburante);
 - j = tipo di motore (diesel a bassa, media e alta velocità, turbina a gas e turbina a vapore);
 - m = tipo di carburante (olio combustibile, diesel marino/gasolio marino, benzina);
 - p = diversa fase del viaggio (crociera, stazionamento, manovra).

Il tempo di crociera, se sconosciuto, può essere calcolato come:

$$T_{crociera}(ore) = \frac{distanza\ crociera\ (km)}{velocità\ media\ crociera\ (\frac{km}{ore})}$$

Per stimare le emissioni di piccole imbarcazioni, per le quali non sono state raccolte statistiche separate dalle attività nazionali, in genere i dati valori di attività vengono ricavati dai dati sulla popolazione di queste imbarcazioni, dal tipo di imbarcazione, dal tipo di carburante, dal tipo di motore, dal livello tecnologico e dai dati di attività per il fattore di carico del motore e per le ore di utilizzo annuali stimati.

Il consumo di carburante e le emissioni per tipo di carburante sono stimati come segue:

$$E_{i,m} = \sum_b \sum_e \sum_z (N_{b,e,z} * T_{b,e,z} * P_{b,e,z} * LF_{b,e,z} * EF_{b,e,z})$$

dove:

- E = emissioni per piccole imbarcazioni all'anno (tonnellate);
- N = numero di navi (navi);
- T = durata media di funzionamento di ogni nave per anno (ore/nave);
- P = potenza nominale del motore (kW);
- LF = fattore di carico del motore (%);
- EF = fattore di emissione (g / kWh);
 - b = tipo di imbarcazione (scialuppa, barca con cabina, vela, ...);
 - e = tipo di motore;
 - i = inquinante (NMVOC, NH3, NOx, PM) o consumo di carburante;
 - m = tipo di carburante (benzina, diesel);
 - z = strato tecnologico (convenzionale, 2003/44 / CE).

Le emissioni possono essere stimate in base al consumo del combustibile o alla potenza del motore.

3.2.2 Applicazione al porto di Livorno

Alla luce dei dati disponibili presso l'Autorità Portuale e dell'articolazione delle metodologie di stima delle emissioni navali sulla base delle informazioni richieste, l'approccio utilizzato nel presente studio è risultato un mix tra il Tier 2 ed il Tier 3.

L'Autorità Portuale ha fornito una ricca base dati fornita relativa all'anno 2016 ed ai primi sei mesi del 2017, che include per ogni nave in transito dal porto le seguenti informazioni (un estratto è riportato in Tabella 1):

- nome nave,
- tipo nave,
- Gross Tonnage,
- carico,
- data ingresso,
- ora ingresso,
- data ormeggio,
- ora ormeggio,
- data disormeggio,
- ora disormeggio,
- data partenza,
- ora partenza,
- banchina,
- ore banchina.

Tabella 1. Esempio del report sul traffico navale fornito dall'Autorità Portuale.

VESSEL_NAME	SHIP_TYPE	CARICO	GT	DATA_IN	DATA ORMEGGIO	DATA DISORM	DATA_OUT	BANCHINA
MARTORELL	RO RO CARGO	AUTOVETTURE NUOVE	57789	1/1/16 8.30	1/1/16 9.18	2/1/16 0.12	2/1/16 0.50	CAL.LUCCA 15C
ZIM LUANDA	CONTAINER	CONTENITORI	40030	1/1/16 8.52	1/1/16 9.37	2/1/16 6.40	2/1/16 7.14	CAL.MASSA 14C
CORSICA VICTORIA	PASSENGER	PASSEGGERI	13085	1/1/16 17.25	1/1/16 17.47	1/1/16 20.54	1/1/16 21.10	SGARALLINO 62
LIBURNA	PASSENGER	PASSEGGERI	1640	1/1/16 21.00	1/1/16 21.14	2/1/16 8.31	2/1/16 8.38	MOLO CAPIT 64S

A queste informazioni è stato necessario aggiungere i rimorchiatori, il cui numero è stato stimato in base alla lunghezza ed alla tipologia delle navi presenti, come dalle informazioni fornite dalla Capitaneria di Porto e così sintetizzabili:

- CONTAINER: in base alle dimensioni vengono affiancati in ingresso e in uscita da 1 o 2 rimorchiatori se sono lunghi tra 120 e 250 m, da 2 se sono lunghi tra 250 e 300 m e 3 se superano i 300 m; i containers inferiori a 120 m non hanno l'obbligo di rimorchiatori, tranne in caso di maltempo;
- DRY BULK CARRIERS e GENERAL CARGO: per questa tipologia non esiste una regola precisa, ma si può assumere che fino a 100 m di lunghezza della nave non vengono impiegati rimorchiatori, tra 100 e 120 m viene utilizzato 1 rimorchiatore (solo in entrata), tra 120 e 180 m 2 rimorchiatori e tra i 180 e 220 m 2 o 3 rimorchiatori;
- LIQUID BULK SHIPS: vista l'elevata variabilità legata alle caratteristiche della nave, alle condizioni meteorologiche ed alla destinazione finale, si assume che tutte le navi cisterna con lunghezza inferiore a 90 m non impiegano rimorchiatori, tra 120 e 200 m si utilizzano 2 rimorchiatori, tra 200 e 230 m 3 rimorchiatori (2 in uscita), e tra 230 e 275 m 4 rimorchiatori (3 in uscita).
- PASSENGER: solo le navi da crociera sopra i 330 m di lunghezza utilizzano 2 rimorchiatori obbligatori in arrivo ed 1 in uscita, mentre in tutti gli altri casi non hanno obbligo di essere accompagnate da rimorchiatori, a meno di condizioni meteo sfavorevoli;
- RORO CARGO: i cargo dedicati al trasporto delle auto utilizzano tipicamente 2 rimorchiatori in ingresso e due in uscita; per le altre categorie di roro cargo non vengono invece impiegati.

In molti casi è stato possibile risalire alla lunghezza delle navi basandosi sulle informazioni presenti in database presenti in rete (ad esempio <https://www.marinetraffic.com>) mentre dove questo non è stato possibile sono state sviluppate delle correlazioni su quella parte di flotta per cui sono disponibili i dati di GT e lunghezza (esempi riportati in Figura 35), e sulla base della lunghezza stimata in tal modo a partire dal GT di ogni singola nave sono stati poi associati il numero corretto di rimorchiatori.

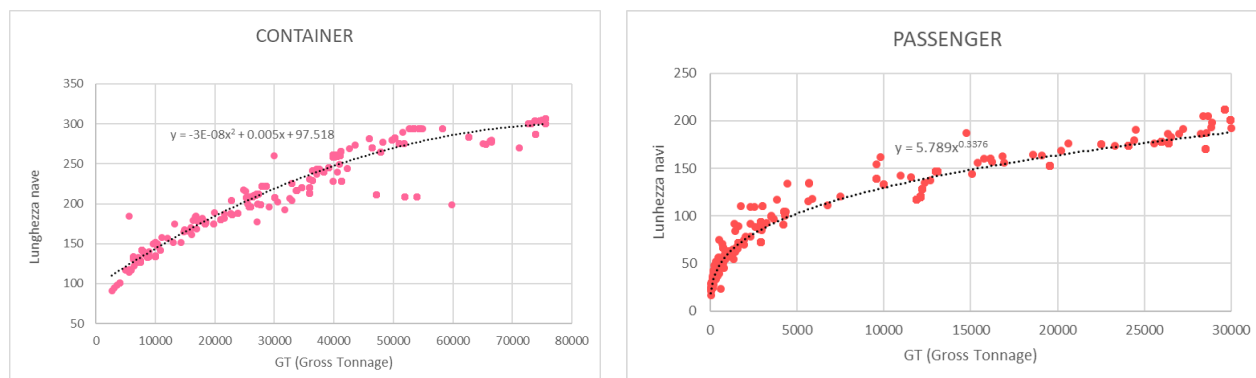


Figura 35. Esempi di correlazione tra il Gross Tonnage e la lunghezza della nave.

Una volta definito anche il numero dei rimorchiatori presenti, si è dunque potuto procedere all'utilizzo dell'approccio dettagliato, in grado di tenere conto del tipo di imbarcazione, della stazza lorda e degli intervalli di tempo interessati dalle diverse fasi di manovra all'interno del porto.

Per ovviare alla mancanza di informazioni sulla singola nave in merito al carburante, al tipo di motore ed alla sua potenza si è fatto riferimento ai dati di letteratura riportati all'interno dell'Emission Inventory Guidebook (Tabelle 2 e 3).

Tabella 2. Potenza del motore principale installata in funzione della stazza lorda (GT).

Categoria nave	Flotta mondiale 2010 [kw]
Liquid bulk ship	$14.755 \cdot GT^{0.6082}$
Dry bulk carriers	$35.912 \cdot GT^{0.5276}$
Container	$2.9165 \cdot GT^{0.8719}$
General Cargo	$5.56482 \cdot GT^{0.7425}$
Ro Ro Cargo	$164.578 \cdot GT^{0.4350}$
Passenger	$9.55078 \cdot GT^{0.7570}$
Fishing	$9.75891 \cdot GT^{0.7527}$
Other	$59.049 \cdot GT^{0.5485}$
Tugs	$54.2171 \cdot GT^{0.6420}$

Tabella 3. Ripartizione percentuale secondo tipologia del motore principale installato e carburante per diverse categorie di nave.

Categoria nave	SSD MDO /MGO	SSD BFO	MSD MDO /MGO	MSD BFO	HSD MDO /MGO	HSD BFO	GT MDO /MGO	GT BFO	ST MDO /MGO	ST BFO
Liquid bulk ship	0.87	74.08	3.17	20.47	0.52	0.75	0	0.14	0	0
Dry bulk carriers	0.37	91.63	0.63	7.29	0.06	0.02	0	0	0	0
Container	1.23	92.98	0.11	5.56	0.03	0.09	0	0	0	0
General Cargo	0.36	44.59	8.48	41.71	4.3	0.45	0	0.1	0	0
Ro Ro Cargo	0.17	20.09	9.86	59.82	5.57	2.23	2.27	0	0	0
Passenger	0	3.81	5.68	76.98	3.68	1.76	4.79	3.29	0	0.02
Fishing	0	0	84.42	3.82	11.76	0	0	0	0	0
Other	0.48	30.14	29.54	19.63	16.67	2.96	0.38	0.2	0	0
Tugs	0	0	39.99	6.14	52.8	0.78	0.28	0	0	0

In base alle medesime fonti sono stati calcolati la potenza dei motori ausiliari e le percentuali di carico per entrambi i motori.

La sequenza dei calcoli svolti è sintetizzata in Figura 36.

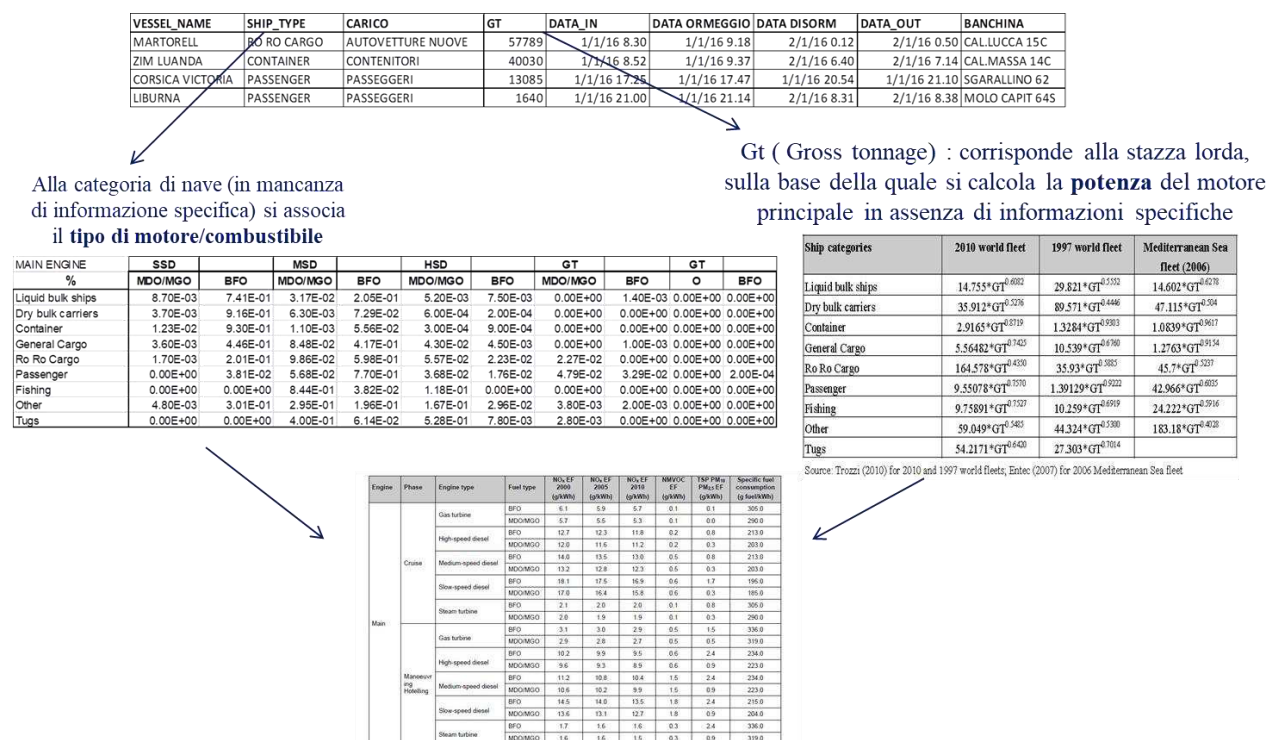


Figura 36. Sintesi dell'approccio adottato per il calcolo emissivo del comparto navale.

I risultati complessivi per su base annuale per il porto di Livorno sono riportati in Tabella 4. La parte di crociera include la porzione di navigazione all'interno del dominio considerato. Considerando come "emissioni in porto" le emissioni in fase di stazionamento e manovra, si nota come la maggior parte delle emissioni venga prodotta nella fase di stazionamento.

Tabella 4. Emissioni totali per il traffico navale del porto di Livorno calcolate con l'approccio bottom-up.

	CO	NMVOC	NOx	TSP/PM10/PM2.5	SOx
stazionamento	373.3	111.2	2590.7	138.1	15.1
manovra	84.6	52.8	569.5	73.9	3.4
crociera	254.3	78.8	2174.0	149.7	10.3
rimorchiatori in manovra	14.3	7.7	84.6	7.8	0.6

Per quanto riguarda i rimorchiatori si è considerata la sola fase di manovra all'interno del porto: essi compiono una parte delle manovre accompagnando le navi e una parte dopo aver lasciato le navi alla propria destinazione (banchina o uscita dal porto). Si è assunto che abbiano una velocità media di circa 7 km/h in fase "operativa", e si è poi ipotizzato che in assenza di navi i rimorchiatori compiano le manovre a una velocità di 10 km/h. Perciò al totale delle ore di accompagnamento si è aggiunta la frazione di ore in cui i rimorchiatori svolgono manovre in assenza di navi.

In Figura 37 sono riportate a titolo esemplificativo le emissioni di ossidi di azoto prodotte dalle navi in stazionamento nelle diverse banchine; i totali sono stati ottenuti tenendo conto delle tipologie di navi che attraccano alla banchina specifica, ai motori in uso ed alle ore di stazionamento effettivo.

Si osserva come la maggior parte delle emissioni sia prodotta nella parte nord, dove stazionano la maggior parte delle navi in un numero inferiore di banchine.

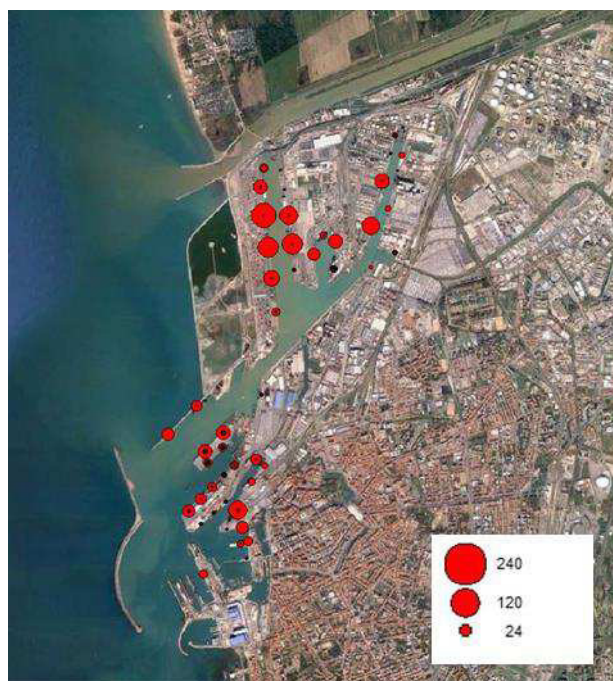


Figura 37. Emissioni di ossidi di azoto (esprese in t/anno) associate allo stazionamento nelle singole banchine.

In Figura 38 le emissioni totali risultanti dai dati di dettaglio sui movimenti (metodologia bottom-up) sono messe a confronto dei dati di inventario IRSE. Si osserva un buon accordo tra le due stime per ciò che riguarda gli ossidi di azoto, valori superiori risultanti dalla metodologia bottom-up per ciò che riguarda particolato, monossido di carbonio e composti organici non metanici, e valori sostanzialmente inferiori per gli ossidi di zolfo. Questo ultimo aspetto potrebbe essere dovuto alle diverse assunzioni in merito al tenore di zolfo fatte nel calcolo dell'inventario regionale e che saranno analizzate con maggior dettaglio nella seconda parte del lavoro.

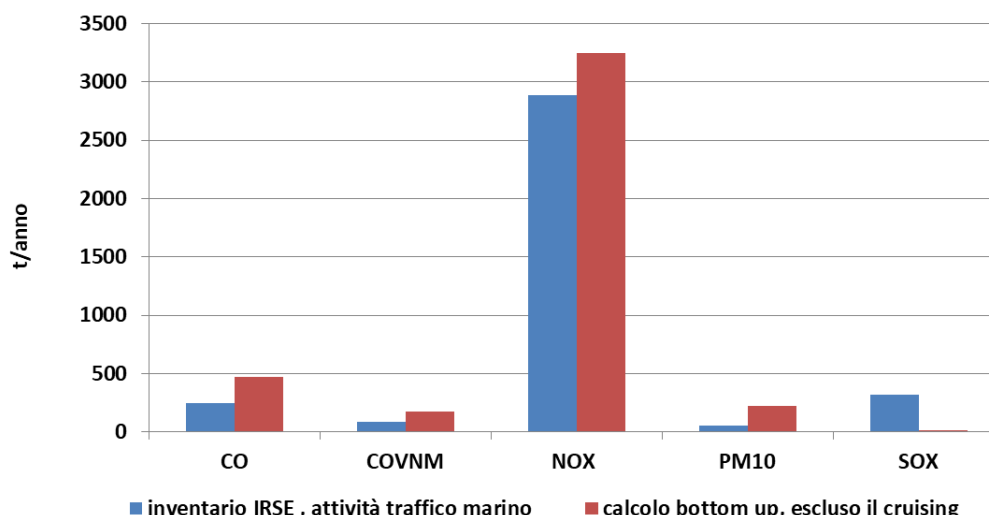


Figura 38. Emissioni totali da traffico marino per il porto di Livorno: confronto tra dati di inventario IRSE e calcolo a partire dai dati di dettaglio sui movimenti (metodo bottom-up).

3.3 Traffico stradale nelle aree afferenti al porto

La disponibilità di diverse fonti di dati riguardanti il traffico stradale, di particolare dettaglio nei dintorni dell'area portuale di Livorno, ha suggerito l'utilizzo della seguente metodologia integrata per il trattamento delle diverse componenti durante il periodo di simulazione considerato:

- le emissioni fornite dall'Inventario a livello comunale sono state trattate utilizzando due diversi approcci:
 - per il grafo della viabilità primaria sono stati combinati il dato emissivo di tipo lineare e la relativa rete geometrica fornita;
 - per il traffico urbano ed extraurbano il dato è stato spazializzato usando rispettivamente le tipologie di uso del suolo e un grafo di viabilità secondaria ricostruito dal dataset Open Street Map.
- le emissioni relative ad una porzione di rete di accesso al porto, selezionata dall'Università di Pisa per condurre uno studio di traffico (Pratelli et al., 2017), sono state calcolate mediante l'utilizzo del codice TREFIC combinando i dati di flussi di traffico e relative velocità ricostruiti con modellistica di assegnazione e una stima della composizione veicolare derivata dalle statistiche ACI;
- le emissioni relative ai traffici portuali privati e commerciali mensili registrati presso la Stazione Marittima sono state calcolate a livello aggregato nell'area portuale sempre con il codice TREFIC utilizzando la suddetta flotta veicolare ACI e ipotizzando velocità medie e percorrenze interne;

Nella figura seguente si riporta il complesso delle tipologie di sorgenti da traffico stradale considerate nell'area di studio

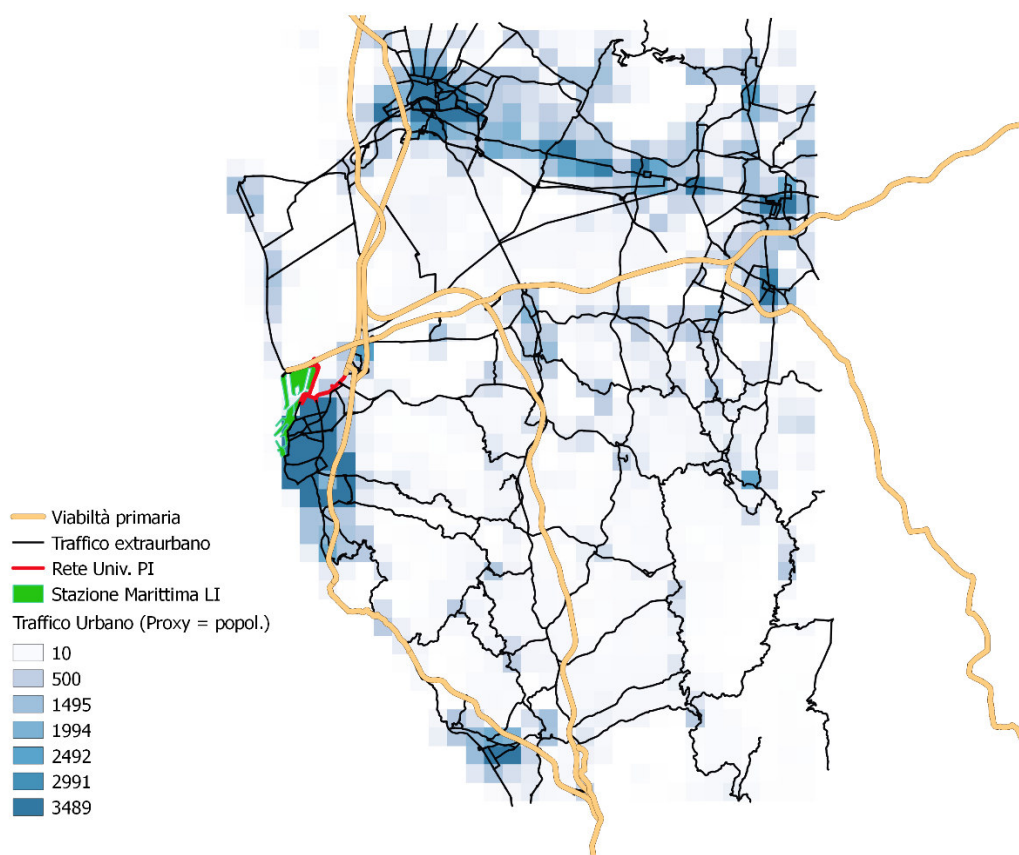


Figura 39. Sintesi di tutte le sorgenti emissive di traffico stradale.

3.3.1 *Modello emissivo*

Il calcolo delle emissioni da traffico, per la parte relativa all'area Stazione Marittima e al grafo locale fornito dall'Università di Pisa, è stato effettuato utilizzando il codice TREFIC v5.1 sviluppato da Arianet srl, che implementa la metodologia europea COPERT 5.1 per la stima dei fattori di emissione dei veicoli stradali (Ntziachristos, 2017). Per l'inquinante PM_{10} TREFIC integra le emissioni esauste COPERT con le abrasioni di pneumatici, freni e manto stradale calcolate mediante i fattori di emissione ufficiali dell'EEA più aggiornati (EMEP/EEA, 2016).

L'input del programma TREFIC è costituito dai flussi di traffico e dalla velocità medie di percorrenza sulle strade considerate, specificati per quattro macrocategorie di veicoli (motocicli, autovetture, veicoli commerciali leggeri e pesanti). Inoltre, è necessario specificare la distribuzione dei veicoli circolanti all'interno di ogni macrocategoria, in termini di classi COPERT, distinte per alimentazione, cilindrata, portata (nel caso dei veicoli commerciali) e direttiva europea di riferimento per quanto riguarda il rispetto dei limiti alle emissioni.

3.3.2 *Parco circolante*

Per quanto riguarda la caratterizzazione qualitativa del parco circolante nel dominio di studio, in termini di distribuzione nelle 409 categorie COPERT, sono stati utilizzati i dati ACI sui veicoli iscritti al PRA, aggiornati al 31/12/2016, relativi alle aree del Nord e Centro Italia.

Tale scelta riguardante l'area geografica è stata assunta rappresentativa dei fruitori dello scalo portuale, provenienti appunto anche dalle Regioni del Nord Italia prive di un'analoga infrastruttura in assenza di un accesso diretto al mare, per quanto la distribuzione tra le classi non cambi significativamente anche focalizzandosi solo sul dato regionale della Toscana.

3.3.3 Flussi di traffico

Le informazioni veicolari per la porzione di rete limitrofa allo scalo portuale sono state fornite dall'Università di Pisa nell'ambito di uno studio di traffico basato su campagne di misura condotte nel 2017, sia in termini geometrici (grafo stradale georeferito) che di risultati di assegnazione modellistica ottenuta dal software Aimsun. Quest'ultima restituisce per ciascun arco:

- flusso orario veicoli leggeri (comprendenti le autovetture e i piccoli furgoni);
- flusso orario veicoli pesanti;
- velocità media di percorrenza;

Il grafo stradale di riferimento valido per lo scenario attuale è mostrato in Figura 40.

Le simulazioni effettuate hanno come base temporale di riferimento l'ora di punta del mattino (7:45 - 8:45), rispetto alla quale sono state calcolate le emissioni e poi successivamente il quantitativo annuo mediante profili temporali.

La distribuzione oraria degli spostamenti è stata calcolata elaborando i dati di conteggio effettuati ogni 15' presso le 20 postazioni di rilievo monodirezionali distribuite sulla rete, mantenendo distinte le informazioni relative alle categorie di moto, leggeri e pesanti (Figura 41).

Per l'andamento mensile del traffico, in assenza di informazioni specifiche sull'andamento dei flussi, considerando la prossimità dell'area portuale a cui il traffico descritto è prevalentemente legato, sono state applicate le modulazioni medie ottenute dalle statistiche sui movimenti delle navi passeggeri (per il traffico privato) o cargo (per quello commerciale) (Figura 42).

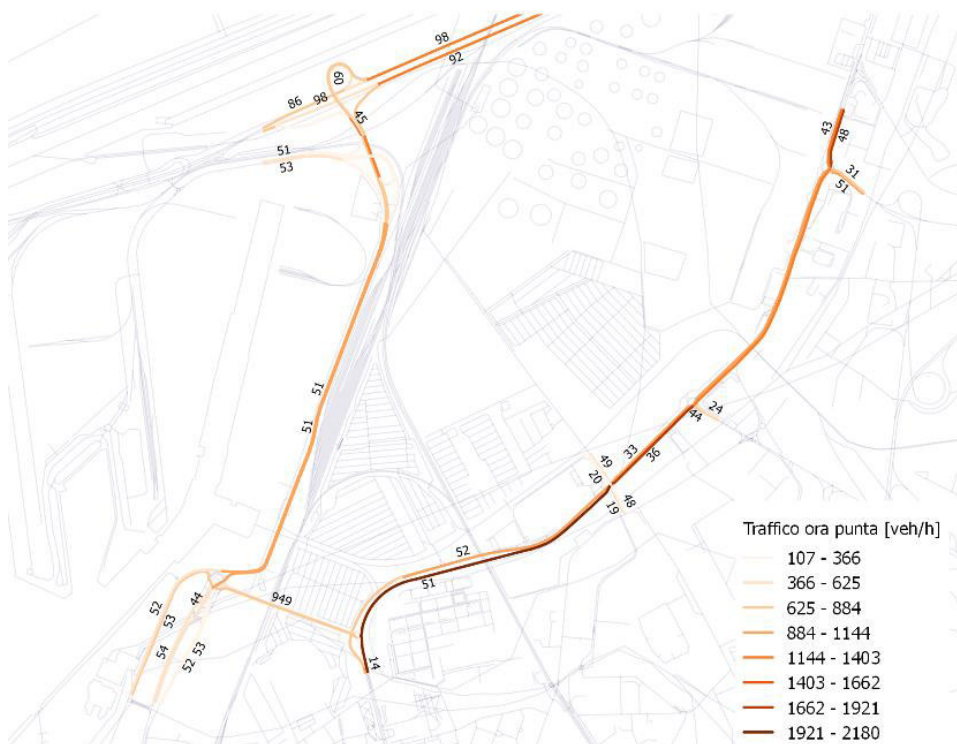


Figura 40. Zoom sul grafo stradale caricato con i valori di velocità vicino agli archi.

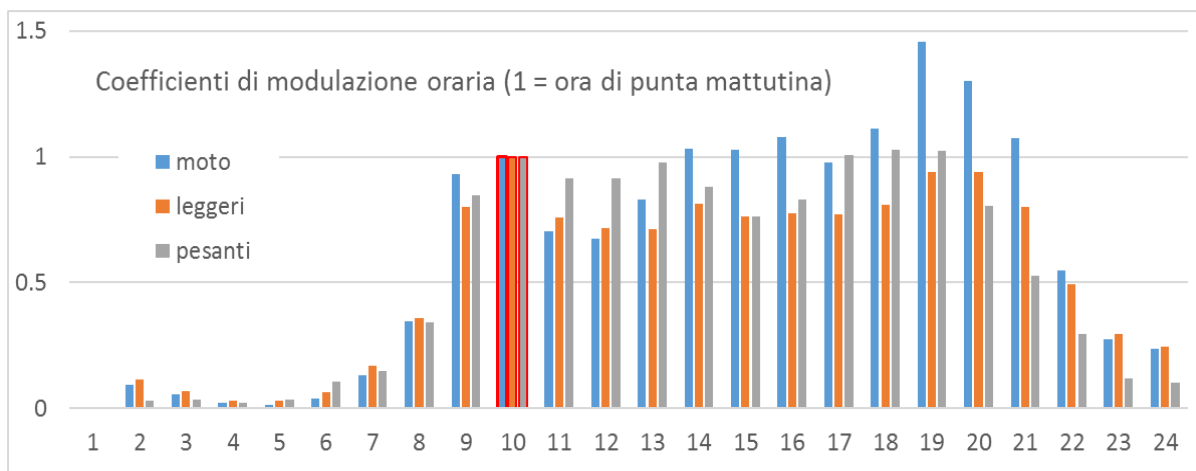


Figura 41. Andamento dei flussi distinti per categoria rilevata nel corso della giornata.

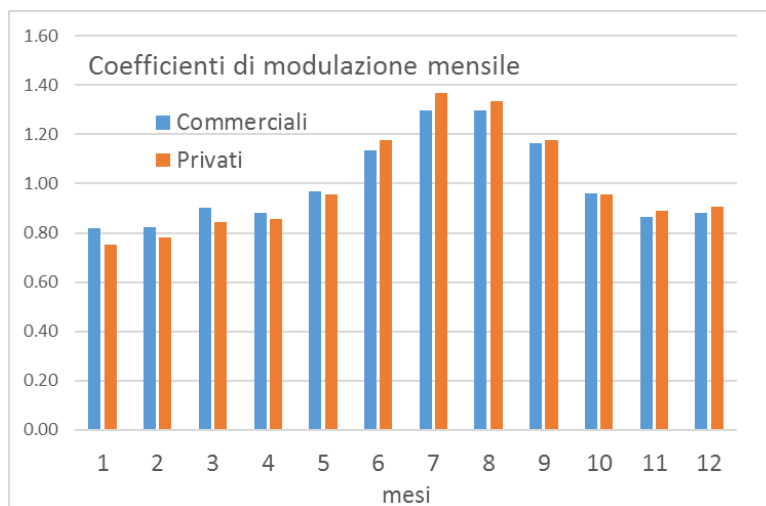


Figura 42. Andamento dei flussi distinti in leggeri - pesanti nel corso dell'anno.

L'Autorità Portuale ha invece messo a disposizione i traffici portuali privati e commerciali mensili relativi all'anno 2017 presso la Stazione Marittima, ovvero statistiche dei movimenti relativi a ciascuna nave arrivata/partita e relativo accosto.

La stima delle emissioni veicolari in questo caso è stata condotta a livello aggregato sull'area portuale, associando il dato di traffico giornaliero medio (TGM) delle categorie commerciali (Guidati, Semirimorchi) alla porzione Nord e quello privato nella parte (Auto, Moto, Camper, Bus) sulla base della distribuzione prevalente delle tipologie navali presso le varie banchine. La stima del percorso medio interno A/R dipende dall'estensione dell'area relativa (3 km per l'area Nord e 2 km per l'area Sud) e son state ipotizzate delle velocità di circolazione medie coerenti con la tipologia di percorso e veicolo (15 km/h per i mezzi commerciali e 25 km/h per i privati).



Figura 43. Sorgenti di traffico associate ai movimenti veicolari interni alla Stazione Marittima.

Il dato medio giornaliero è stato poi modulato nel corso della giornata e della settimana utilizzando i profili medi delle tipologie di nave a cui sono associati (Passenger o Cargo, si veda il § 3.2) mentre per l'andamento mensile sono state ricavate delle modulazioni specifiche a partire dall'elaborazione dei movimenti veicolari specifici forniti per il 2017:

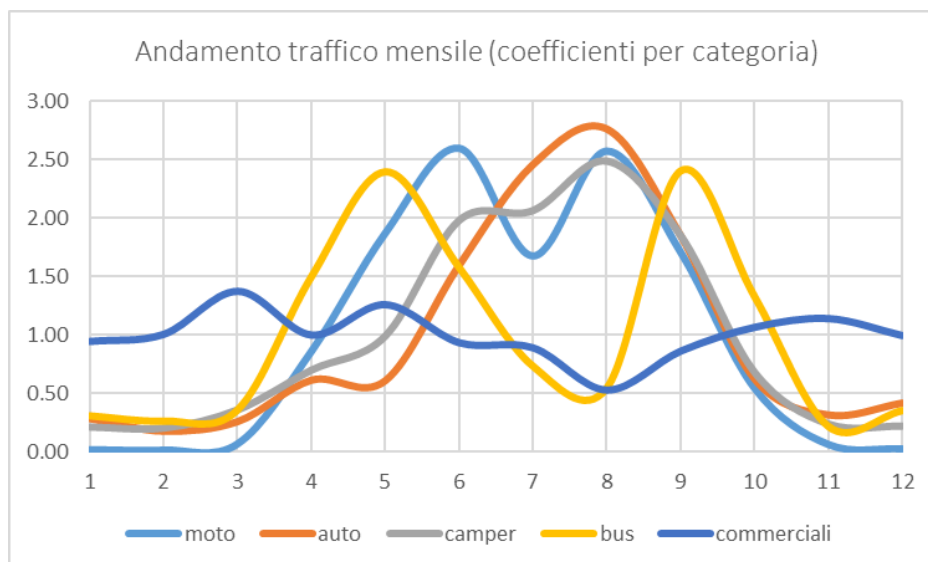


Figura 44. Andamento mensile dei volumi di traffico interni alla Stazione Marittima.

3.4 Sorgenti puntuali

L'analisi nel dettaglio degli impianti presenti nell'inventario IRSE ha portato ad esaminare con attenzione le principali sorgenti industriali presenti nel dominio; in particolare sono state ricercate le informazioni più aggiornate disponibili in modo da rappresentare il più realisticamente possibile i contributi dalle principali sorgenti che possono interagire con la zona portuale e le aree circostanti.

La Figura 45 mostra i contributi emissivi delle diverse sorgenti puntuali che compaiono nell'inventario e che ricadono all'interno del dominio di calcolo.

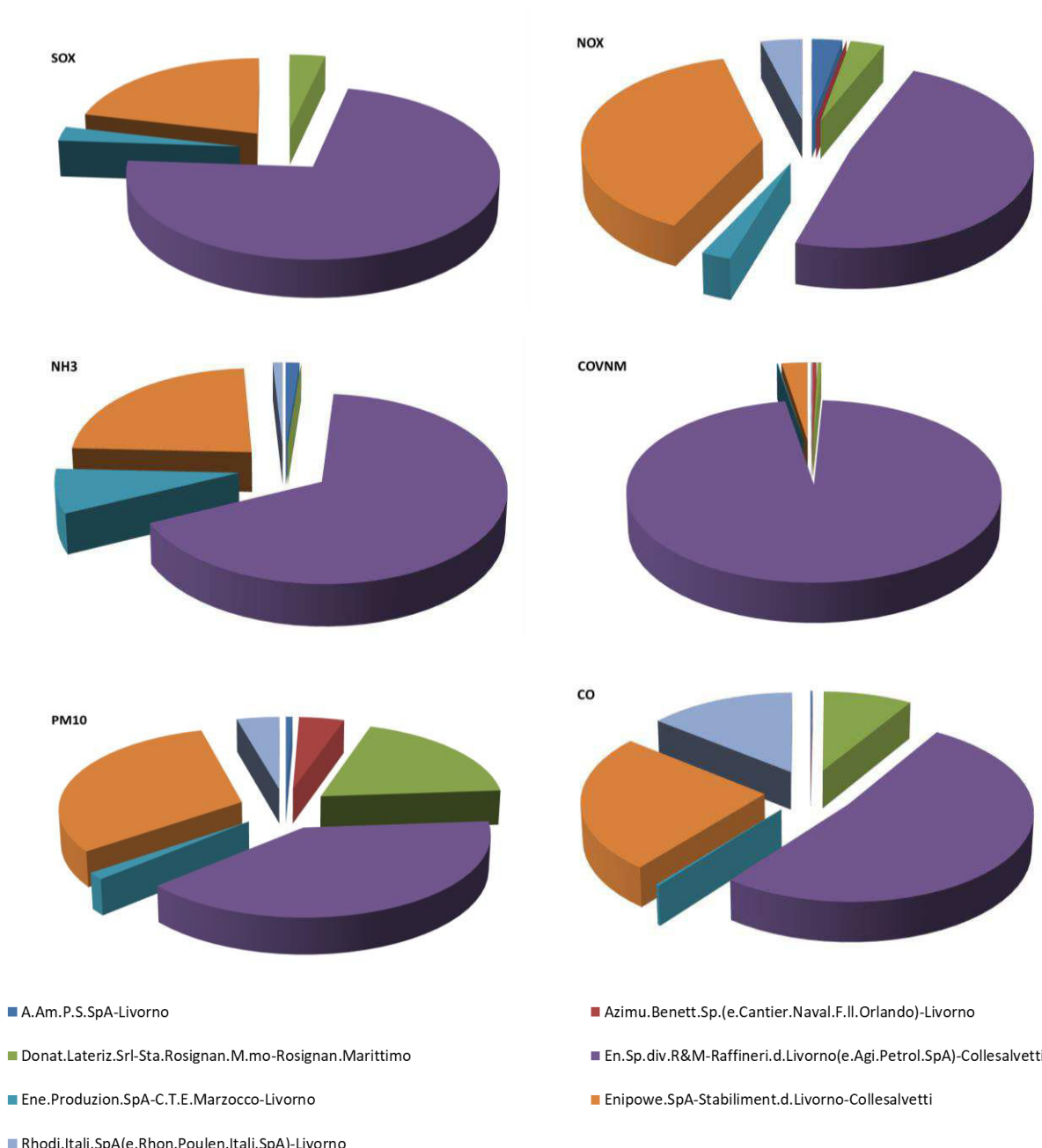


Figura 45. Contributi emissivi delle singole sorgenti puntuali presenti nel dominio.

L'inventario IRSE, riferendosi al 2010, include i contributi emissivi della centrale termoelettrica di Marzocco (ENEL); dall'anno 2014 essa ha tuttavia cessato completamente l'attività produttiva, ed è stata dunque eliminata dall'input alle simulazioni.

Per ciò che riguarda invece la raffineria EniPower situata nel comune di Collesalveti, la sorgente industriale più rilevante presente all'interno dell'area, i dati emissivi sono stati aggiornati al 2015, prendendo come riferimento come quantità totali per le diverse attività quanto riportato nell'ultimo inventario ISPRA disponibile, riferito all'anno 2015 (Figura 46).

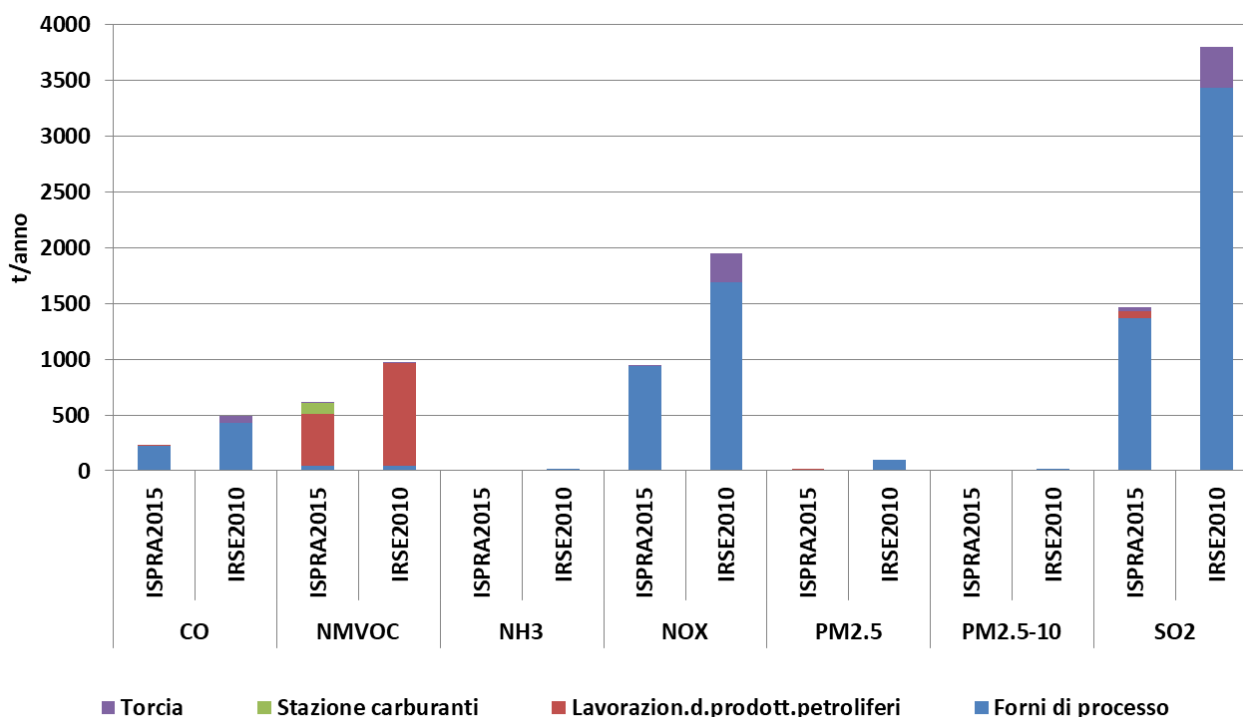


Figura 46. Confronto tra i totali emissivi (t/anno) associati alla raffineria nei due inventari considerati.

3.5 Sorgenti naturali

Le emissioni da due importanti tipologie di sorgenti naturali, gli aerosol marini emessi a seguito dell'azione eolica ed i composti volatili organici emessi dalla vegetazione (emissioni biogeniche) sono state stimate sul dominio di calcolo su base oraria attraverso il preprocessore meteorologico *SURFPro*, utilizzando le informazioni di uso del suolo CORINE Land Cover ed i campi meteorologici messi a punto tramite il modello meteo WRF.

Per gli aerosol marini è stato utilizzato un algoritmo che ne stima le emissioni in funzione dell'umidità relativa e dell'intensità del vento (Zhang *et al.*, 2005).

Le emissioni biogeniche sono state stimate mediante il modello MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006; Guenther *et al.*, 2000); sviluppato presso il gruppo di ricerca sulle interazioni biosfera-atmosfera della divisione di chimica atmosferica del National Center for Atmospheric Research (NCAR), è stato progettato per l'implementazione in sistemi modellistici regionali e globali (es. WRF-Chem, GEOS-Chem) e rappresenta lo stato dell'arte per ciò che riguarda la stima dinamica delle emissioni biogeniche. Stima i tassi di emissione in atmosfera da parte di un ecosistema terrestre presente in un luogo specifico e in un determinato istante tenendo conto della presenza di diversi tipi funzionali di piante (latifoglie, aghiformi, arbusti ed erbacee), dell'evoluzione della copertura fogliare nel corso dell'anno e delle condizioni ambientali correnti (radiazione solare, temperatura, umidità del suolo); vengono così calcolate le emissioni orarie da parte della vegetazione di 20 composti / classi di composti, che possono poi essere raggruppati secondo le specie (esplicitate o aggregate) proprie di vari meccanismi chimici gassosi. Utilizzando fattori di emissione aggiornati e condizioni ambientali orarie consente di effettuare stime emissive potenzialmente più realistiche di quelle ottenute tramite l'utilizzo di metodologie semplificate basate, su sintesi annuali delle condizioni meteorologiche di una determinata zona.

I campi orari delle emissioni ottenuti su base oraria lungo tutto l'anno di riferimento considerato sono stati forniti in input al modello di qualità dell'aria, a complemento degli analoghi campi messi a punto per le emissioni antropogeniche. In Figura 47 a titolo di esempio sono mostrati i campi

medi su base annuale risultanti per le emissioni biogeniche di isoprene e terpeni, maggiormente associabili rispettivamente alle latifoglie ed alle conifere.

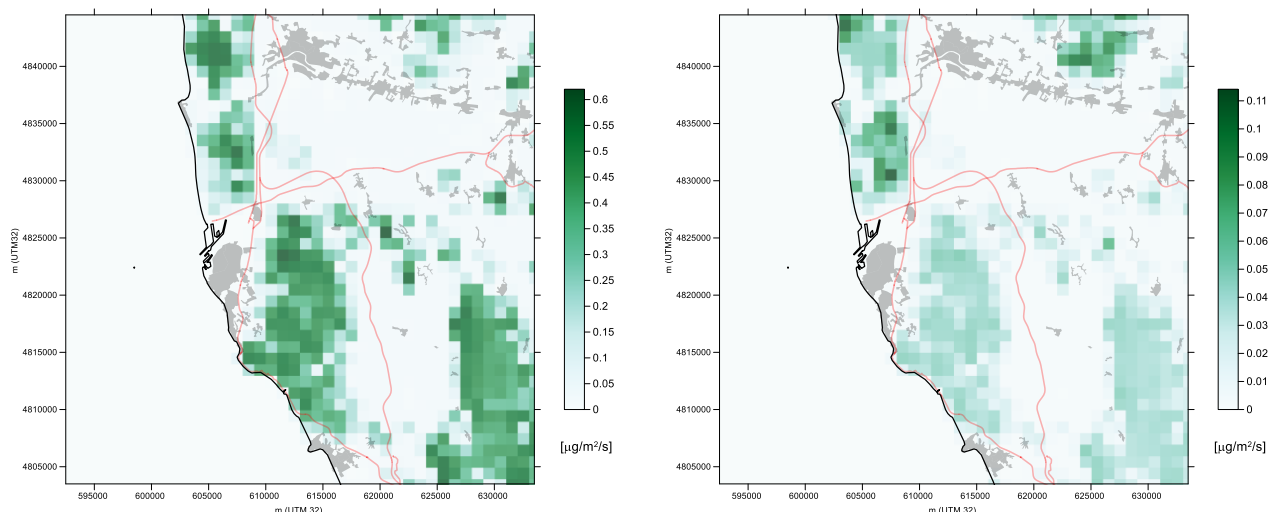


Figura 47. Emissioni biogeniche di isoprene (sinistra) e terpeni (destra) su base media annuale.

3.6 Predisposizione dell'input al modello di qualità dell'aria

I dati emissivi relativi alle sorgenti finora descritte sono stati utilizzati per generare l'input emissivo al modello di qualità dell'aria (FARM). Tale input è su base oraria, riferito alle le griglie di calcolo considerate e deve includere tutte le specie chimiche articolate secondo le specifiche del meccanismo chimico adottato dal modello. I dati di inventario sono invece espressi in termini di totali annuali, sono riferiti ad entità geografiche di diversa geometria e si riferiscono a specie aggregate (es. totale dei "composti organici non metanici").

Il passaggio dai dati di inventario all'input del modello viene effettuato attraverso il sistema Emission Manager, il pre-processore delle emissioni del sistema modellistico ARIA Regional (si veda al capitolo successivo).

La Figura 48 illustra concettualmente la sequenza delle operazioni effettuate da Emission Manager:

- speciazione dei composti organici e del particolato, sulla base di profili tipici di ogni attività;
- disaggregazione spaziale sui due grigliati di calcolo, con l'ausilio di dati cartografici tematici;
- modulazione temporale a risoluzione oraria sulla base di profili annuali, settimanali e giornalieri tipici di ciascuna attività.

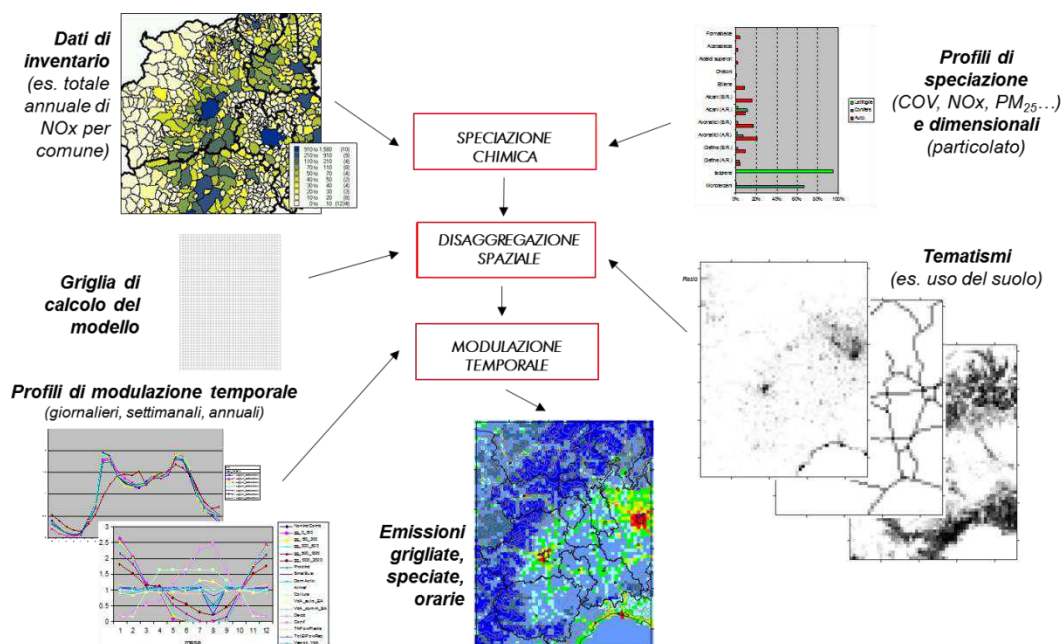


Figura 48. Schema logico del processo di produzione delle emissioni in input al modello reattivo a partire dai dati di inventario.

La disaggregazione sulle due griglie di calcolo delle emissioni associate nell'inventario a poligoni avviene mediante l'ausilio di tematismi grigliati alla risoluzioni di interesse (1 km per la griglia del modello in configurazione reattiva, 250 m per la griglia in configurazione non reattiva). Ciascun poligono viene dapprima intersecato con le celle del grigliato di calcolo, e le emissioni ad esso associate vengono ripartite sulle celle in modo proporzionale all'area dell'intersezione risultanti tra il poligono di partenza e le celle. La ripartizione viene quindi corretta tramite un tematismo su griglia, che rappresenta la percentuale di ciascuna cella coperta da una data tipologia di uso del suolo (es. aree urbanizzate, agricole, ecc.), o più in generale il peso che una proxy correlata con le emissioni ha su ciascuna cella, relativamente alle circostanti. I tematismi di riferimento sono stati ricavati tramite proiezione e rigrigliatura dei dati del database di uso del suolo CORINE Land Cover 2012 a 100 m di risoluzione, sui dati di distribuzione della popolazione su base di sezione censuaria relativi al Censimento 2011 (ISTAT) e sulla geometria della rete stradale.

Le emissioni relative al traffico navale sono localizzate in funzione delle diverse fasi: quelle relative allo stazionamento in prossimità delle diverse banchine di pertinenza, quelle relative alla manovra in corrispondenza delle porzioni del bacino portuale che dalle banchine si estendono fino alle bocche di porto, quelle relative alla crociera sulla porzione di mare aperto interessato dalle principali rotte di navigazione.

La modulazione delle emissioni associate al porto di Livorno è stata effettuata utilizzando il più possibile le informazioni disponibili circa il traffico navale e stradale ad esso riferito. Disponendo delle informazioni circa i movimenti delle singole navi (approdi e tempi) nel corso di un intero anno, sono stati ricostruiti gli andamenti tipici nel tempo del traffico navale. In Figura 49 sono riportati i profili di modulazione annuali e settimanali e giornalieri risultanti per le emissioni complessive, raggruppate secondo le diverse fasi di navigazione: crociera, manovra e stazionamento (distinguendo tra le banchine poste nella parte settentrionale e meridionale del porto). In prima approssimazione le modulazioni giornaliere sono state ricavate sulla base dei tempi di arrivo; nella seconda fase del lavoro verranno considerati gli intervalli di permanenza in porto.

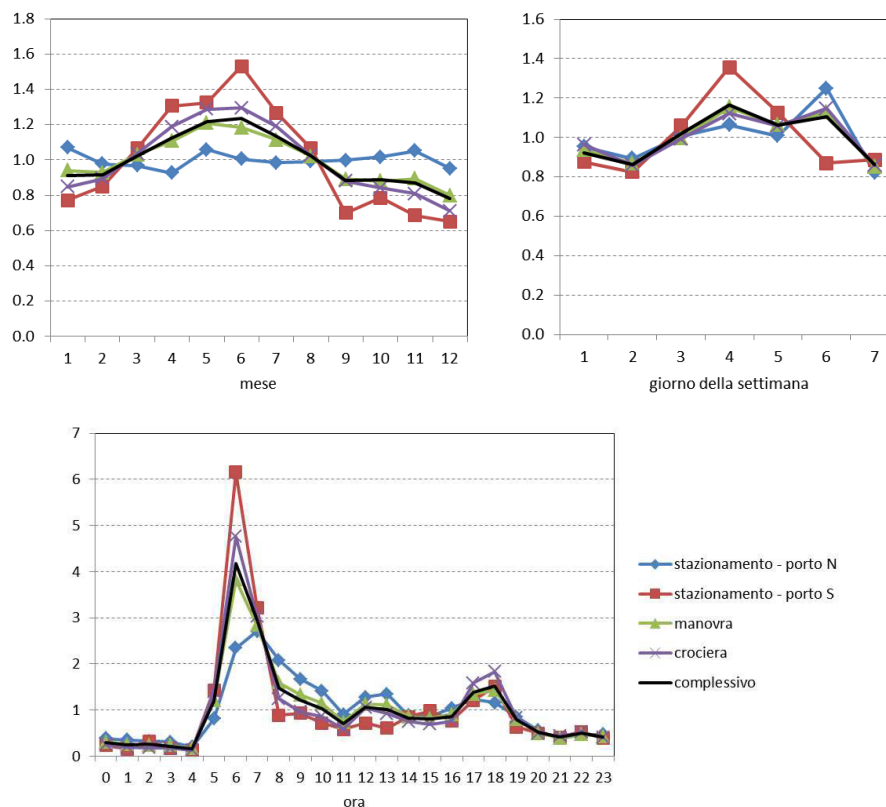


Figura 49. Profili di modulazione annuali, settimanali e giornalieri delle emissioni associate al traffico marittimo del porto di Livorno, così come risultante dai dati dei movimenti delle navi.

La Figura 50 riporta come esempio le emissioni di NO risultanti in input a FARM sul primo livello verticale (nei pressi del suolo) della griglia a risoluzione di 1 km, alle ore 8 di un giorno feriale di gennaio. Sono chiaramente visibili le aree più densamente popolate ed i principali assi stradali nonché, in misura minore, le principali rotte di navigazione.

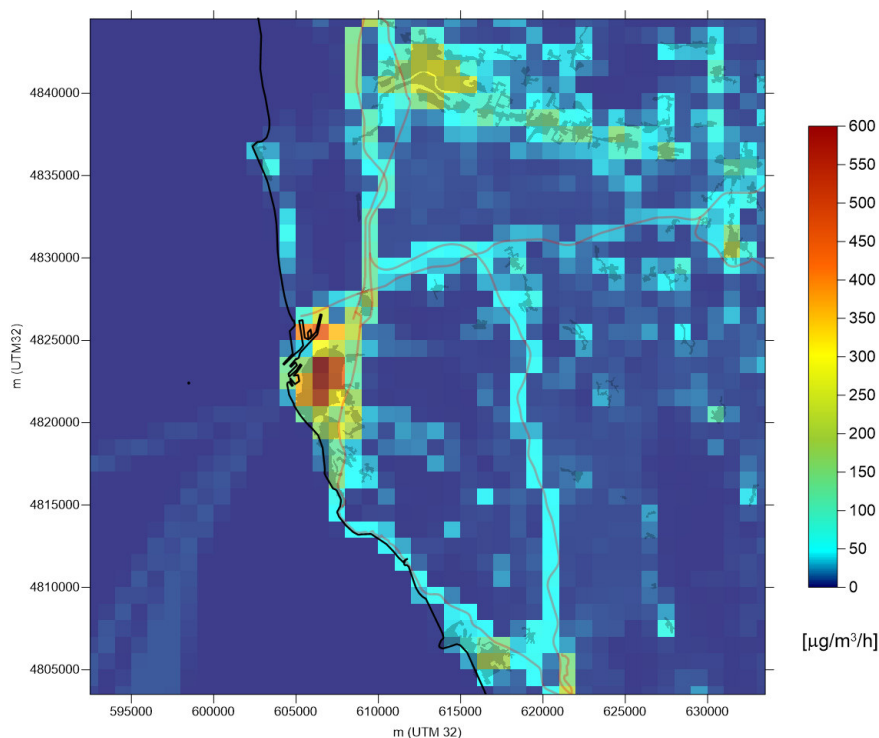


Figura 50. Esempio di input emissivo sulla griglia ad 1 km di risoluzione: emissioni di NO nei pressi del suolo alle h 8 di un giorno feriale di gennaio.

4 Modellistica di qualità dell'aria

I dati territoriali, meteorologici, ed emissivi descritti ai capitoli precedenti costituiscono l'input per il modello di qualità dell'aria, che è stato utilizzato per una prima simulazione di riferimento, che copre un intero anno (marzo 2017 – febbraio 2018). Le sue uscite (concentrazioni orarie di inquinanti al suolo), sono state validate in prima istanza a fronte dei dati di qualità dell'aria disponibili sistematicamente all'interno dell'area di studio lungo tutto il periodo in questione: le serie storiche delle concentrazioni rilevate presso le stazioni fisse della rete di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPAT.

Ad integrazione di tali informazioni, a partire da fine ottobre 2017 sino ad ottobre 2018 è stata effettuata una campagna di monitoraggio nell'area del porto di Livorno, finalizzata ad evidenziarne le eventuali peculiarità rispetto al resto dell'area urbana e negli andamenti temporali, nonché possibili correlazioni con i regimi anemologici e con le principali fonti emissive presenti nell'area. La campagna è condotta dal CNR-IBIMET e si avvale di 6 centraline low-cost (AIRQino), di cui 5 installate nell'area portuale ed una nell'entroterra urbano, e di un laboratorio mobile (AIRQlab), posizionato continuativamente su indicazione di ARPAT nei pressi della Stazione Calambrone.

Nel medesimo periodo ARPAT ha effettuato una campagna di misura con proprio mezzo mobile, posizionato alternativamente in località Fortezza Vecchia e Darsena Toscana Ovest.

Compatibilmente con le tempistiche legate alla disponibilità dei dati ed all'effettuazione delle elaborazioni la ricostruzione meteorologica per via modellistica e la successiva modellazione della qualità dell'aria sono state quindi estese sino ad agosto 2018, in modo da coprire gran parte del periodo delle campagne ed estendere il confronto con i dati da essi derivati in modo analogo a quanto effettuato per l'anno meteorologico di riferimento.

4.1 Sistema modellistico e configurazione del modello di qualità dell'aria

Per la simulazione delle concentrazioni di inquinanti primari e secondari originate dalle sorgenti legati alle attività portuali, nonché di tutte le sorgenti presenti sul territorio circostante è stato utilizzato il modello euleriano fotochimico FARM.

FARM (www.farm-model.org, disponibile attraverso CINECA HPC Forge <https://hpc-forge.cineca.it/projects/open/20>), di cui ARIANET coordina sviluppo e distribuzione, è un modello euleriano reattivo in grado di simulare trasporto e diffusione, trasformazioni chimiche in fase gassosa ed aerosol, nonché rimozioni per via secca ed umida degli inquinanti rilasciati dall'insieme di tutte le sorgenti presenti all'interno dei domini di calcolo considerati, di origine antropica o naturale. Tramite le "condizioni al contorno" per i diversi inquinanti ai bordi del dominio di calcolo consente inoltre di tenere conto dei contributi delle sorgenti più lontane ai livelli di fondo degli inquinanti secondari. Il modello dunque, propriamente configurato ed alimentato, è in grado di stimare i livelli di qualità dell'aria da comparare con gli standard di legge.

FARM è il modello di riferimento nazionale utilizzato nell'ambito del progetto MINNI (www.minni.org), nelle attività istituzionali di diverse ARPA (Lombardia, Piemonte, Valle d'Aosta, Friuli Venezia Giulia, Lazio, Molise, Puglia, Calabria), comprendenti valutazioni annuali della qualità dell'aria a scala regionale, sistemi per la previsione giornaliera e studi di scenario, nonché in valutazioni di impatto ambientale a varie scale.

FARM fa parte di *ARIA Regional*, una suite modellistica co-sviluppata da ARIANET ed ARIA Technologies, per la simulazione multiscala della qualità dell'aria. Il sistema modellistico utilizzato nella configurazione utilizzata per questo studio è illustrato schematicamente in Figura 51 ed include:

- moduli per il trattamento dei dati territoriali (orografia, uso del suolo, cartografia);
- un insieme di moduli per la predisposizione di un input emissivo complesso (Emission Manager) a partire dai dati di inventario;

- modelli per la messa a punto dell'input meteorologico alle simulazioni di qualità dell'aria (WRF e SURF*pro*);
- pre-processor per il trattamento delle condizioni al contorno chimiche;
- il modello FARM per la dispersione e le trasformazioni chimiche degli inquinanti.

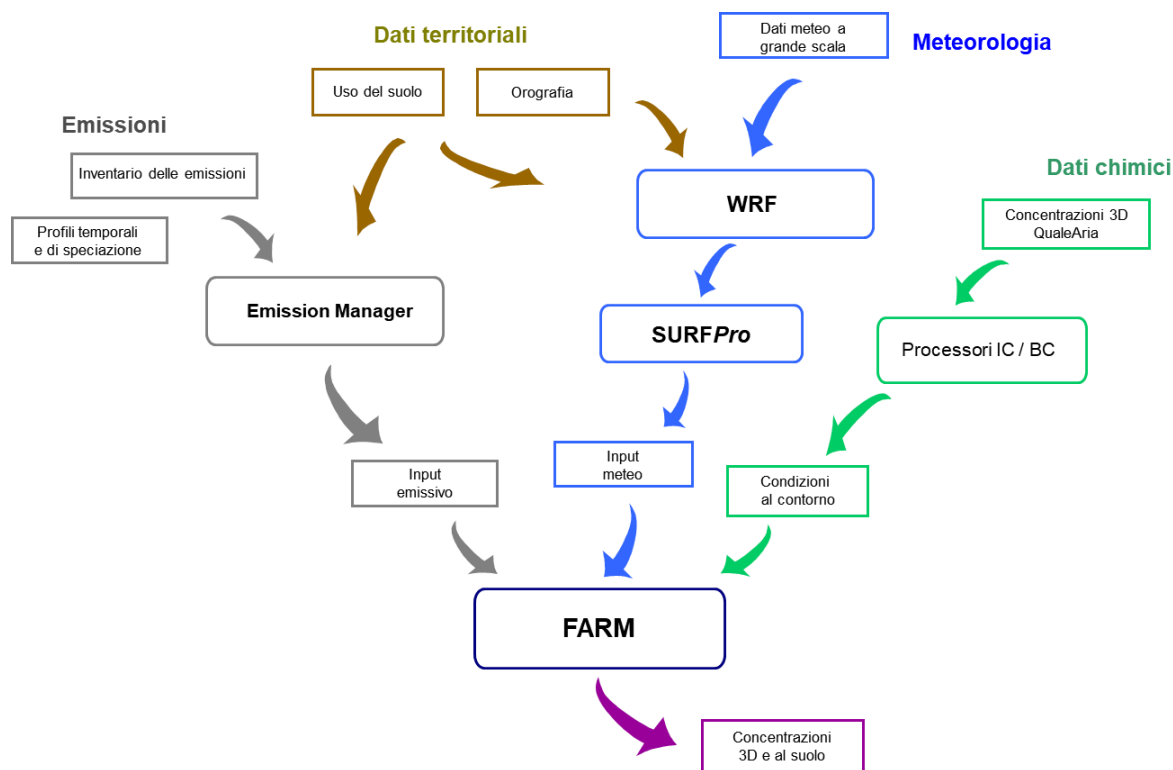


Figura 51. Schema di utilizzo della suite modellistica ARIA Regional / FARM.

Il modello FARM in modalità reattiva è stato configurato sul dominio di lato 40 km indicato in Figura 1, utilizzando una griglia orizzontale con passo di 1 km e 16 livelli verticali, progressivamente spazati a partire dal suolo, posti a 10, 31, 55, 84, 121, 171, 242, 347, 505, 743, 1100, 1635, 2440, 3650, 5470, 8200 m al di sopra dell'orografia.

Mediante il preprocessore SURF*Pro* l'input meteorologico è stato completato con le informazioni necessarie a FARM. A valle della stima dei parametri "di scala" utilizzati per descrivere la turbolenza atmosferica, realizzata a partire dai campi delle variabili meteo di base fornite dal modello WRF e dalle informazioni di uso del suolo, sono stati stimati i campi 3D delle diffusività turbolente orizzontale e verticale e le velocità di deposizione per le diverse specie chimiche. Queste ultime vengono utilizzate per descrivere gli scambi con la superficie in assenza di precipitazioni, e sono stimate tramite parametrizzazioni che tengono conto sia della natura dell'inquinante, sia dell'uso del suolo e delle condizioni meteorologiche correnti in ciascun punto.

4.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno evolutive per la griglia di calcolo ad 1 km, cioè le concentrazioni orarie sulle facce laterali e superiore del dominio per tutte le specie inquinanti considerate dallo schema chimico di FARM, sono state predisposte a partire dai dati provenienti da QualeAria (<http://www.aria-net.eu/QualeAria>; Baklanov et al., 2007; Kukkonen et al., 2012).

Operativo dal 2007 e costantemente aggiornato, il sistema QualeAria produce giornalmente previsioni meteorologiche e di inquinamento su due domini (Figura 52), uno più interno che copre tutto il territorio nazionale alla risoluzione orizzontale di 12 km, ed uno più esterno a scala europea, con risoluzione orizzontale di 48 km. Le condizioni al contorno per il dominio europeo vengono assegnate a partire dai campi di concentrazione degli inquinanti prodotti dalla simulazione globale

del modello C-IFS del servizio europeo di previsione della qualità dell'aria CAMS/Copernicus (atmosphere.copernicus.eu). La componente meteorologica di QualeAria utilizza il modello prognostico RAMS (Walko e Tremback, 1995), mentre la dispersione e trasformazione di inquinanti è modellata mediante il codice FARM.

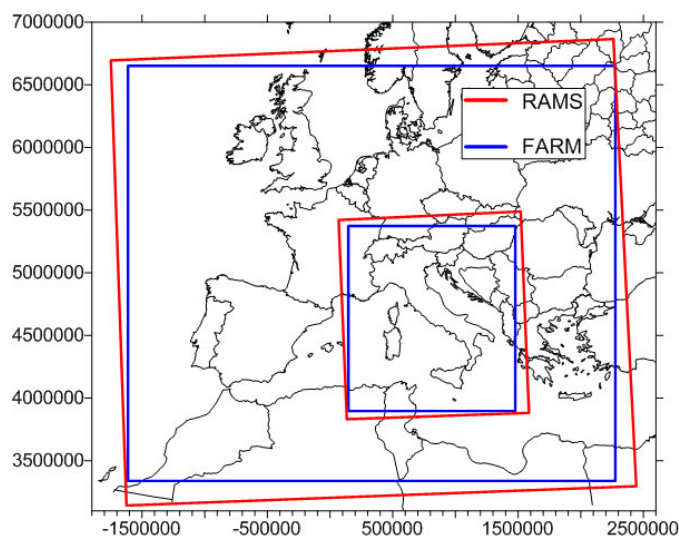


Figura 52. Domini di calcolo di QualeAria.

Le condizioni al contorno su base oraria per il dominio livornese lungo l'intero periodo considerato (marzo 2017 – febbraio 2018) sono state predisposte a partire dai campi di concentrazione 3D a 12 km di risoluzione prodotti da QualeAria (Figura 53), previa interpolazione sulla griglia di calcolo, ma senza necessità di adattare le specie chimiche, utilizzando entrambi i sistemi lo stesso modello di qualità dell'aria (FARM).

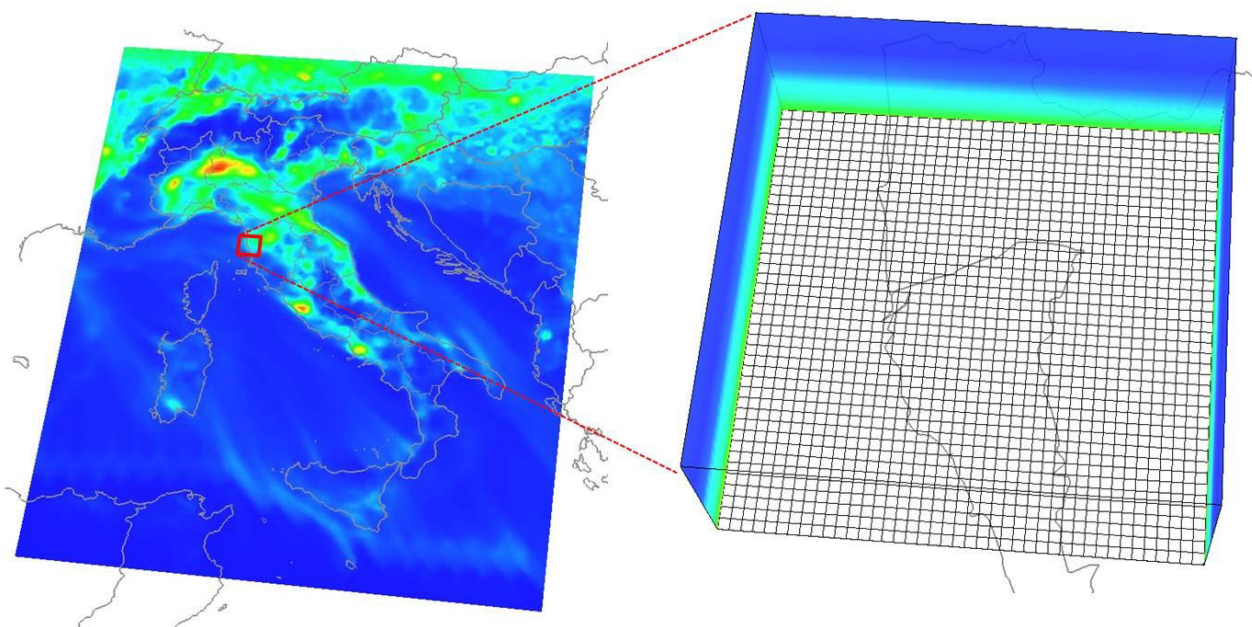


Figura 53. Predisposizione delle condizioni al contorno sulla griglia regionale a partire dai campi di QualeAria a scala nazionale.

4.2.1 Sabbie sahariane

L'avvezione di polveri di origine desertica può contribuire in modo significativo alle concentrazioni di particolato atmosferico. La simulazione diretta del fenomeno richiede l'utilizzo di un modello in

grado di descrivere le emissioni di sabbie dalle zone aride, che sia applicato su un dominio di calcolo di estensione spaziale sufficiente ad includere le principali aree desertiche africane e medio-orientali, oltre all'area oggetto dello studio. Risulta quindi più facilmente realizzabile la quantificazione dell'apporto delle polveri desertiche attraverso l'integrazione, nell'analisi a scala locale, dei risultati di modelli specificamente sviluppati per la descrizione della fenomenologia citata. Fra le possibilità esistenti (si veda ad esempio il "Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS)" del WMO: <https://sds-was.aemet.es/>) si è scelto di utilizzare i risultati del modello globale C-IFS distribuiti dal servizio CAMS/Copernicus (<http://atmosphere.copernicus.eu/>). I risultati del modello C-IFS, distribuiti come campi di concentrazione con frequenza temporale tri-oraria, sono stati integrati in forma di condizioni al contorno, nelle simulazioni effettuate con il modello FARM. In pratica, le concentrazioni atmosferiche di particolato di origine desertica previste dal modello C-IFS su tutti i livelli verticali di calcolo sono state acquisite per l'intero periodo temporale coperto dalle simulazioni su di un'area spaziale che include il dominio di calcolo utilizzato per l'area portuale di Livorno. Dai campi tridimensionali si sono estratte le concentrazioni di particolato sui confini del dominio di calcolo di FARM, alle quote altimetriche corrispondenti ai livelli di calcolo utilizzati.

Il modello CAMS descrive le concentrazioni di particolato utilizzando tre seguenti classi granulometriche espresse in micron: dust = 0.03-0.55, 0.55-0.9, 0.9-20.0. Si è quindi costruita un'interfaccia fra la descrizione di tipo "sezionale" adottata da C-IFS, nella quale la distribuzione granulometrica delle polveri è descritta attraverso classi che coprono intervalli dimensionali predefiniti, e la descrizione di tipo "modale" adottata da FARM, nella quale la distribuzione dimensionale delle polveri è descritta dalla sovrapposizione di tre distribuzioni lognormali chiamate "modi": modo di Aitken, modo di accumulazione e modo *coarse*.

Le concentrazioni fornite da CAMS/C-IFS nelle tre classi granulometriche sono state ridistribuite nei tre modi della distribuzione secondo lo schema riportato in Tabella 5:

Tabella 5. Corrispondenza fra le classi granulometriche del modello CAMS/C-IFS ed i modi della distribuzione dimensionale del particolato in FARM.

CAMS/IFS	FARM		
	Aitken mode	Accumulation mode	Coarse mode
0.03-0.55 μ	-	100%	-
0.55-0.90 μ	-	-	100%
0.90-20.0 μ	-	-	50%

In Figura 54 è riportato il campo di concentrazione media annuale di particolato totale previsto dal servizio CAMS/Copernicus sull'Italia centrale durante il periodo compreso fra marzo 2017 e febbraio 2018. I valori previsti sull'area di Livorno risultano compresi fra 1.5 e 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Con il termine "particolato totale" ci si riferisce alla somma delle concentrazioni relative alle tre classi granulometriche precedentemente introdotte.

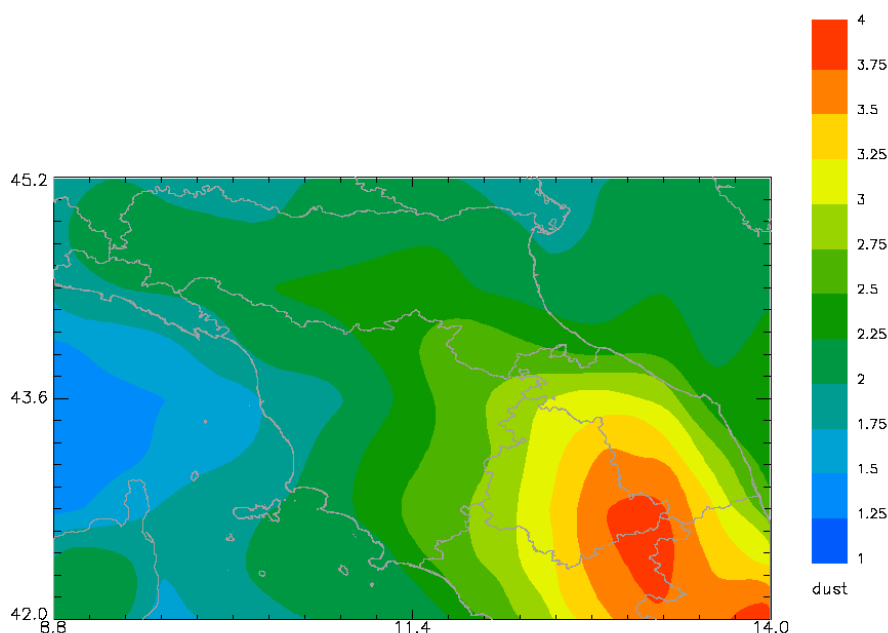


Figura 54. Concentrazioni medie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di particolato totale di origine desertica previste dal modello C-IFS in prossimità del suolo per il periodo annuale 01/03/2017 – 28/02/2018.

L'avvezione di polveri di origine desertica ha un impatto limitato a livello di concentrazioni medie di lungo periodo, ma può produrre contributi rilevanti alle concentrazioni di breve periodo e contribuire al superamento del limite di legge per le concentrazioni medie giornaliere di PM_{10} . In Figura 55 è riportata la serie temporale delle concentrazioni medie giornaliere di particolato di origine sahariana previste dal 01/03/2017 al 28/02/2018. Si osserva la presenza di frequenti episodi durante i quali il contributo delle polveri desertiche supera i $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre nei pochi episodi di maggior rilievo tale contributo supera i $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante alcuni periodi dell'anno, come giugno (Figura 56) e agosto 2017, il contributo delle polveri di origine desertica è risultato quasi continuo, seppure di limitata entità, mentre i valori di concentrazione più alti sono stati previsti per il 9 gennaio 2018 (Figura 57).

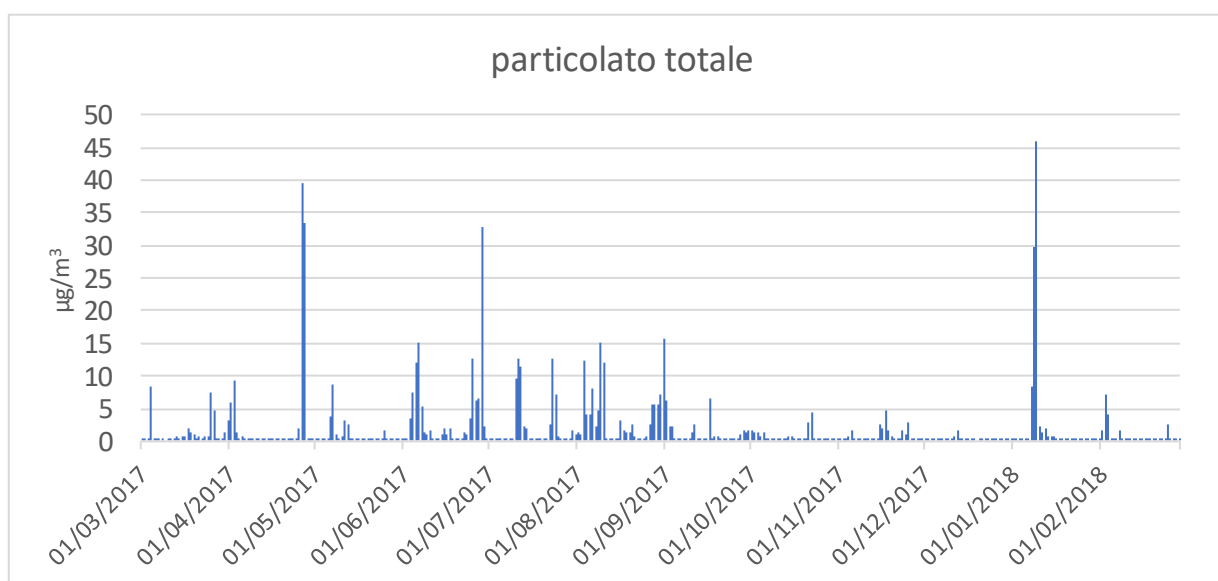


Figura 55. Concentrazioni medie giornaliere ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di particolato totale di origine desertica previste dal modello C-IFS in prossimità del suolo sulla città di Livorno per il periodo annuale 01/03/2017 – 28/02/2018.

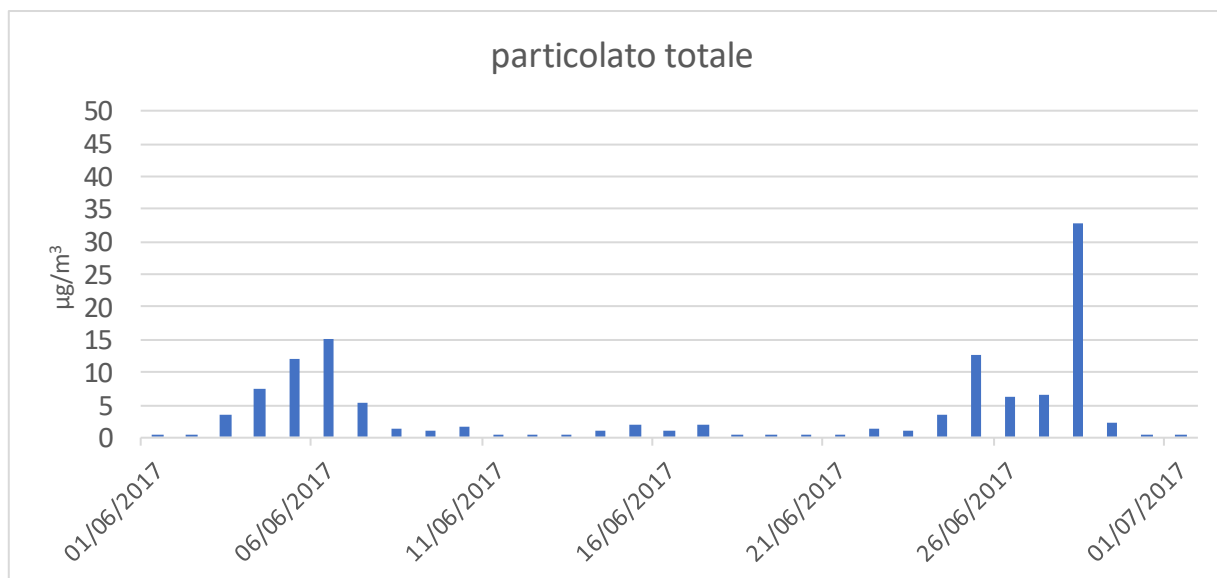


Figura 56. Concentrazioni medie giornaliere ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di particolato totale di origine desertica previste dal modello C-IFS in prossimità del suolo sulla città di Livorno durante il mese di giugno 2017.

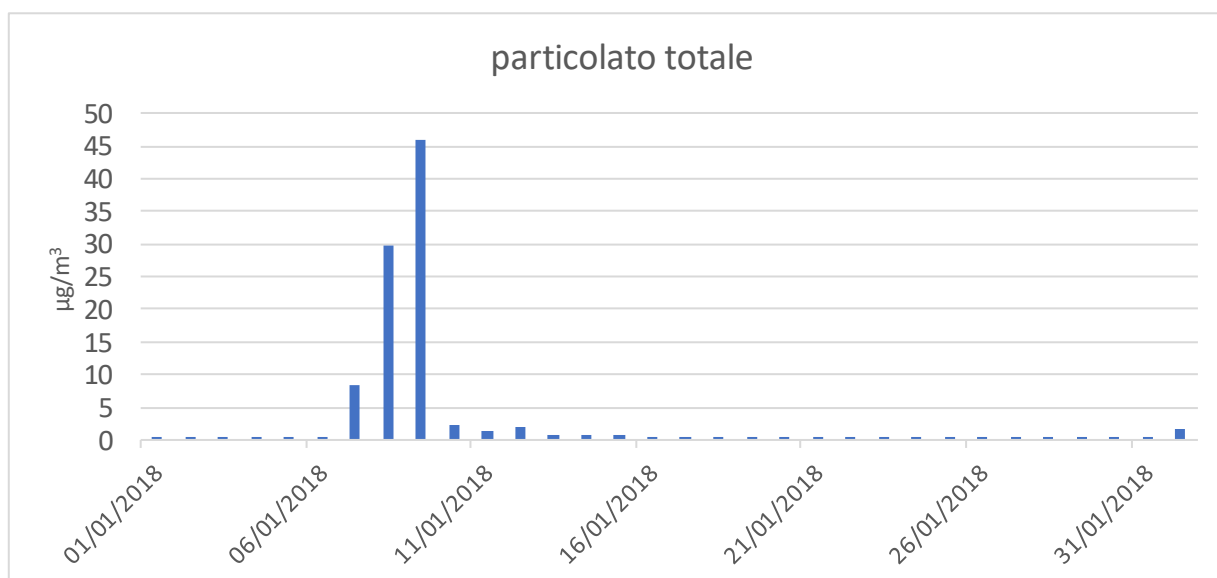


Figura 57. Concentrazioni medie giornaliere ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) di particolato totale di origine desertica previste dal modello C-IFS in prossimità del suolo sulla città di Livorno durante il mese di gennaio 2018.

4.3 Simulazione di riferimento e validazione

Il sistema ARIA Regional / FARM, configurato sulla griglia ad 1 km di risoluzione, è stato applicato per ricostruire su di esso le concentrazioni complessive degli inquinanti per l'intero l'anno di riferimento scelto. A partire dai campi orari delle concentrazioni simulate sono state poi calcolate le statistiche di interesse.

Le Figure 58-62 mostrano le mappe delle medie annuali delle concentrazioni al suolo dei principali inquinanti di interesse risultanti sul dominio in corrispondenza dello scenario emissivo di riferimento.

Nelle mappe è evidente l'influenza combinata della conformazione del territorio (presenza di rilievi e del mare) e della distribuzione delle sorgenti emissive.

Le emissioni di ossidi di azoto avvengono solitamente in gran parte sotto forma di NO e in misura minore di NO₂; le reazioni che governano la formazione di NO₂ in atmosfera sono tuttavia relativamente veloci, dando luogo a concentrazioni elevate nei pressi delle sorgenti; la distribuzione spaziale dell'NO₂ riflette dunque la distribuzione delle sorgenti, con gradienti spaziali importanti. Ciò accade anche per la componente primaria del particolato, mentre a maggior distanza dalle sorgenti aumenta la componente secondaria, con gradienti spaziali più contenuti rispetto al caso dell'NO₂.

Nel campi di concentrazione di questi inquinanti sono chiaramente evidenti le principali aree urbane (influenza del traffico urbano e del riscaldamento degli edifici, specie per il particolato) e dei principali assi viari (specie nel caso del biossido di azoto), così come nel tratto di mare antistante Livorno è visibile l'influenza delle emissioni dell'area urbana e del traffico navale.

In virtù della sua natura prettamente secondaria, la distribuzione delle concentrazioni medie di ozono è generalmente "duale" rispetto a quelle appena viste, con valori più contenuti in corrispondenza dei maggiori centri abitati ed assi viari (a causa delle emissioni locali di ossidi di azoto), e valori più elevati sui rilievi (a causa della quota stessa e della distanza dalle principali sorgenti emmissive) o sul mare, allontanandosi progressivamente dalla costa e dal tratto di mare antistante Livorno (maggiormente interessato dal traffico navale).

La distribuzione delle concentrazioni medie di SO₂ sul territorio risulta invece strettamente legata alla presenza di sorgenti industriali, in primo luogo la raffineria a nord di Livorno ed in misura minore la produzione di laterizi nella parte settentrionale del comune di Rosignano.

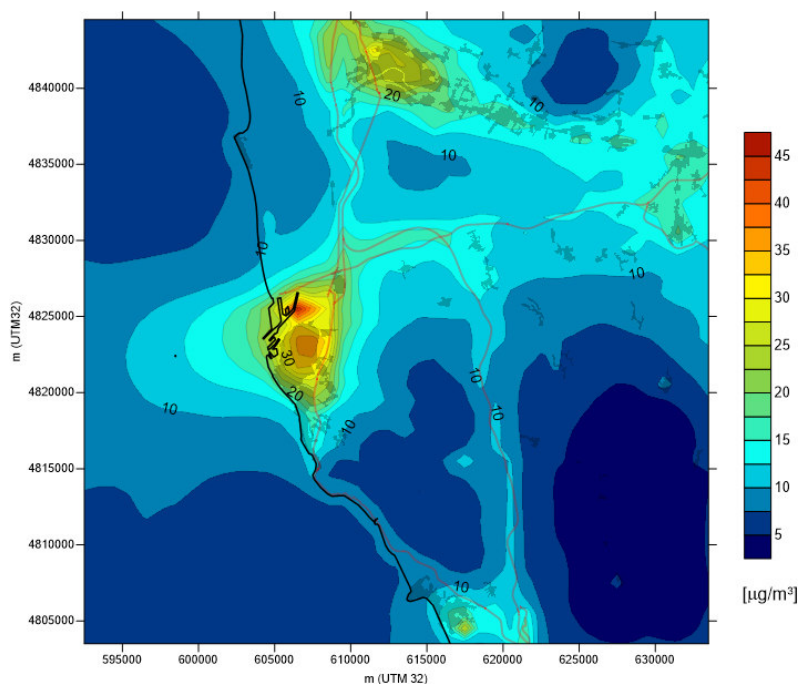


Figura 58. Concentrazioni al suolo di NO₂ simulate per lo scenario emissivo di riferimento – medie il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

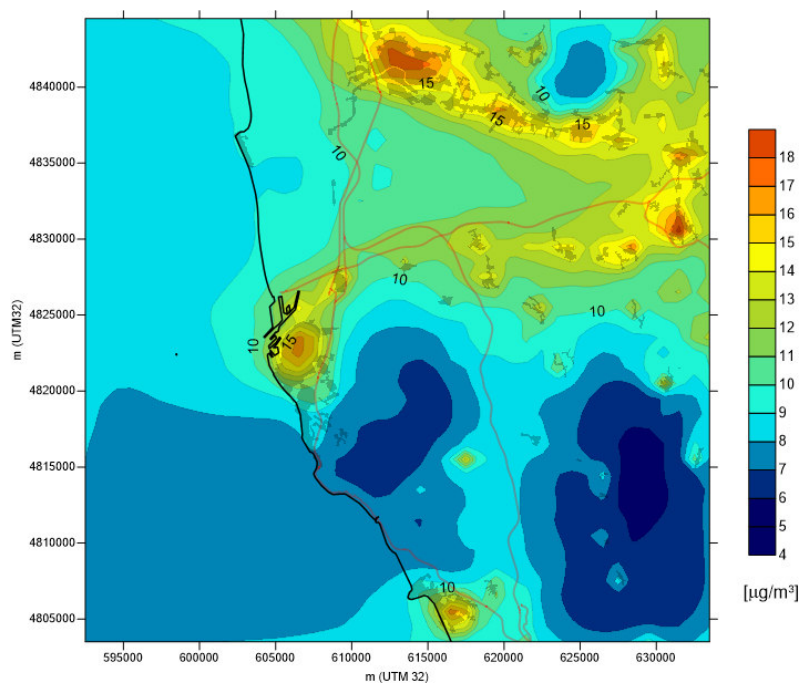


Figura 59. Concentrazioni al suolo di PM_{2.5} simulate per lo scenario emissivo di riferimento – medie il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

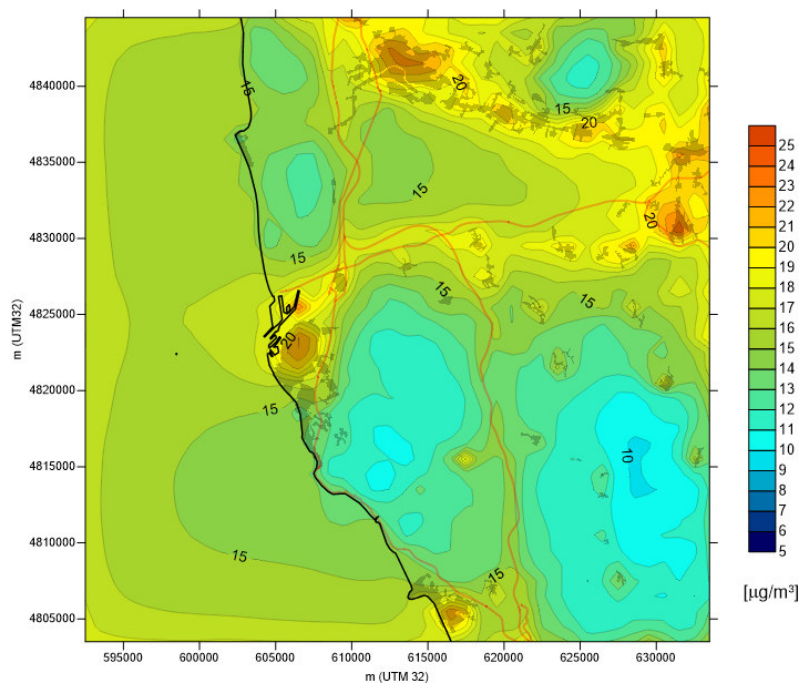


Figura 60. Concentrazioni al suolo di PM₁₀ simulate per lo scenario emissivo di riferimento – medie il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

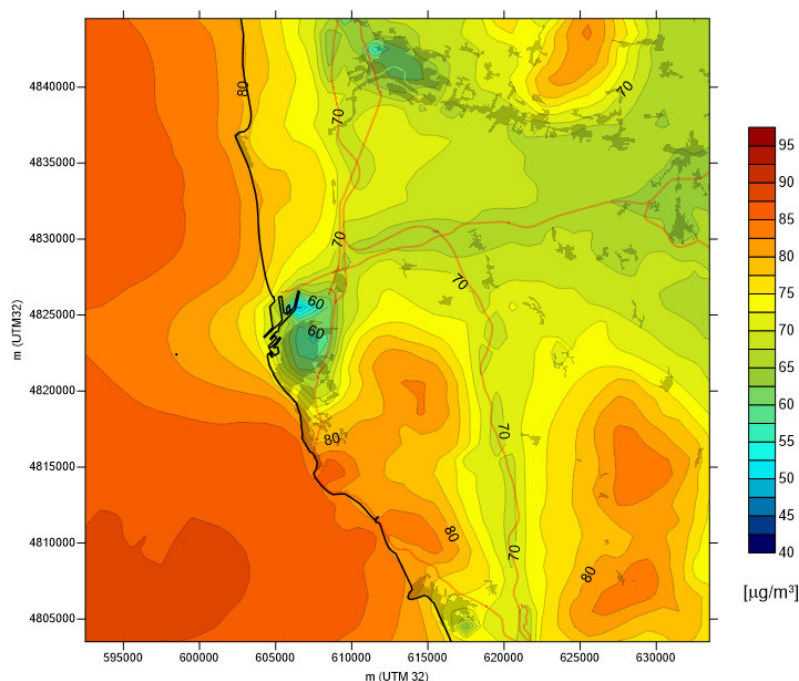


Figura 61. Concentrazioni al suolo di O₃ simulate per lo scenario emissivo di riferimento – medie il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

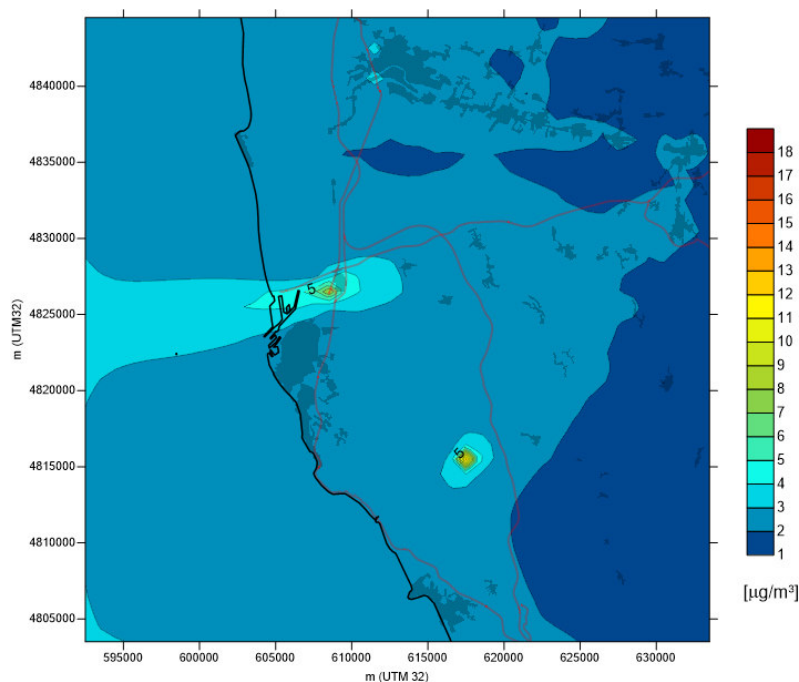


Figura 62. Concentrazioni al suolo di SO₂ simulate per lo scenario emissivo di riferimento – medie il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

4.3.1 Confronto con le stazioni della rete ARPAT

Un sistema modellistico basato su un codice euleriano reattivo, propriamente alimentato con dati meteorologici, emissivi ed al contorno, è potenzialmente in grado di riprodurre i livelli di concentrazioni complessivi di inquinanti primari e secondari riscontrabili nell'aria ambiente, così come le principali caratteristiche delle loro distribuzioni nel tempo e nello spazio, compatibilmente con la risoluzione adottata. Per verificare ciò nel caso in esame, le concentrazioni simulate tramite ARIA Regional / FARM lungo l'intero anno considerato sono state messe a confronto con i valori rilevati in corrispondenza delle stazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria di

Arpa Toscana lungo il medesimo arco di tempo. Le stazioni di monitoraggio fisse che effettuano misure in continuo presenti all'interno del dominio considerato sono localizzate a Livorno e Pisa. La loro posizione sul territorio è riportata in Figura 63, mentre in Tabella 6 ne è indicata la tipologia e gli inquinanti monitorati.

Tabella 6. Stazioni fisse della rete di monitoraggio ARPAT poste all'interno del dominio considerato.

Comune	Stazione	Tipo stazione	Tipo zona	NO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	SO ₂
Livorno	La Pira	Fondo	Urbana	✓		✓		✓
Livorno	Carducci	Traffico	Urbana	✓	✓	✓		
Livorno	Cappiello	Fondo	Urbana	✓	✓	✓		
Pisa	Passi	Fondo	Urbana	✓	✓	✓	✓	
Pisa	Borghetto	Traffico	Urbana	✓	✓	✓		

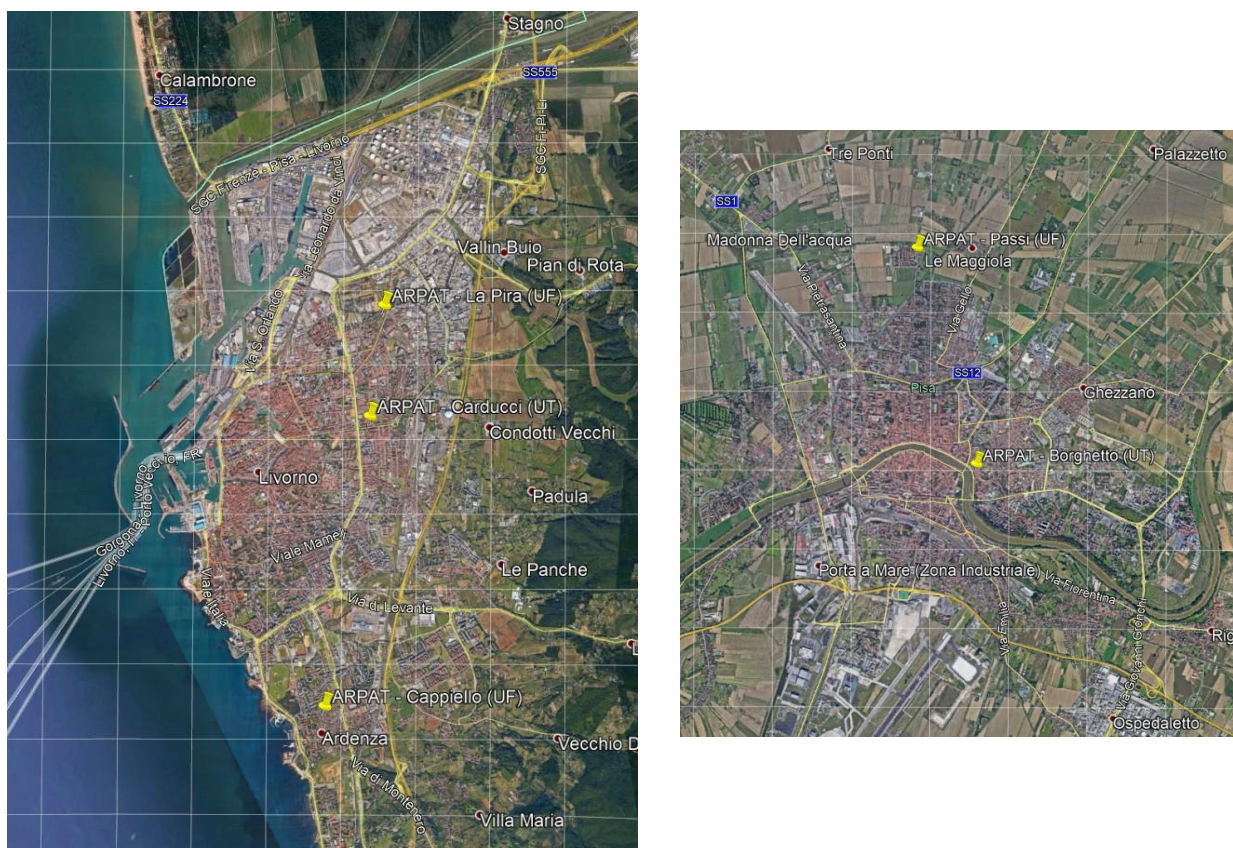


Figura 63. Localizzazione presso Livorno e Pisa delle stazioni di monitoraggio fisse in continuo facenti parte della rete della qualità dell'aria ARPAT.

Nel confronto, è importante tenere presente come un qualsiasi modello a griglia possa mirare a descrivere la qualità dell'aria in termini di condizioni medie su ciascuna delle celle di calcolo (1 km di ampiezza nel caso in esame). Sono pertanto difficilmente riproducibili le situazioni a carattere fortemente 'locale', siano esse dovute a conformazioni del territorio o condizioni meteodispersive particolari oppure alla presenza di fonti emissive rilevanti e concentrate.

In Figura 64 è riportato il confronto tra le medie annuali osservate presso le stazioni della rete regionale ed i corrispondenti valori simulati.

Per ciò che riguarda l'NO₂ si rileva generalmente un buon accordo. A Livorno il sistema modellistico risulta in grado di ben riprodurre la differenza tra i livelli più elevati riscontrati nella stazione da traffico di Carducci e quella di fondo urbano di Cappiello, posta in un'area residenziale nella parte meridionale della città. Risulta invece sovrastimato il livello medio misurato presso la

stazione di fondo urbano di La Pira, posta in prossimità delle aree portuale ed industriale nella parte settentrionale della città. A Pisa analogamente il sistema modellistico mette in evidenza la differenza tra i valori della stazione urbana di fondo (Passi, posta alla periferia settentrionale) e quella di traffico (Borghetto, presso il centro città), sebbene il livello medio presso quest'ultima, paragonabile a quello della stazione da traffico di Livorno, risulta leggermente sottostimato.

Nel caso del $PM_{2.5}$ l'accordo tra valori osservati e simulati è ottimo, con una tendenza da parte del sistema modellistico a sovrastimare i livelli osservati. Plausibilmente in virtù della componente secondaria, la differenza tra i livelli rilevati presso le stazioni risulta meno marcata che nel caso del biossido di azoto, tuttavia vengono anche per il $PM_{2.5}$ il sistema mette in evidenza in ciascuna area urbana la differenza tra quanto rilevato dalla stazione da traffico e quella di fondo urbano.

Le variazioni tra i valori rilevati presso le diverse stazioni risultano ancora più contenute nel caso del PM_{10} . Anche in questo caso il sistema modellistico mostra una differenza tra i valori presso le diverse tipologie di stazioni, ma con una generale tendenza a sottostimare i livelli osservati. Considerato l'ottimo accordo riscontrato per il $PM_{2.5}$, la ragione della sottostima è attribuibile principalmente al contributo della frazione grossolana del particolato. Ciò può essere dovuto a diversi fattori, quali una sottostima o un mancato conteggio di sorgenti antropogeniche presenti sul territorio (es. risospensione di polveri causata dal traffico veicolare) od una sottostima del contributo di sorgenti naturali (sali marini e risospensione eolica di componenti terrigene).

L'ozono è rilevato presso la stazione di fondo urbano di Pisa-Passi e risulta in media sovrastimato da parte del sistema modellistico.

Nel caso degli ossidi di zolfo i dati disponibili riguardano la sola stazione di La Pira. Le principali emissioni di SO_2 provengono da impianti industriali (nel caso specifico, quelle presenti nell'area a nord di Livorno), e dal traffico navale. Il valore medio osservato risulta sostanzialmente contenuto e viene correttamente riprodotto da parte del sistema modellistico.

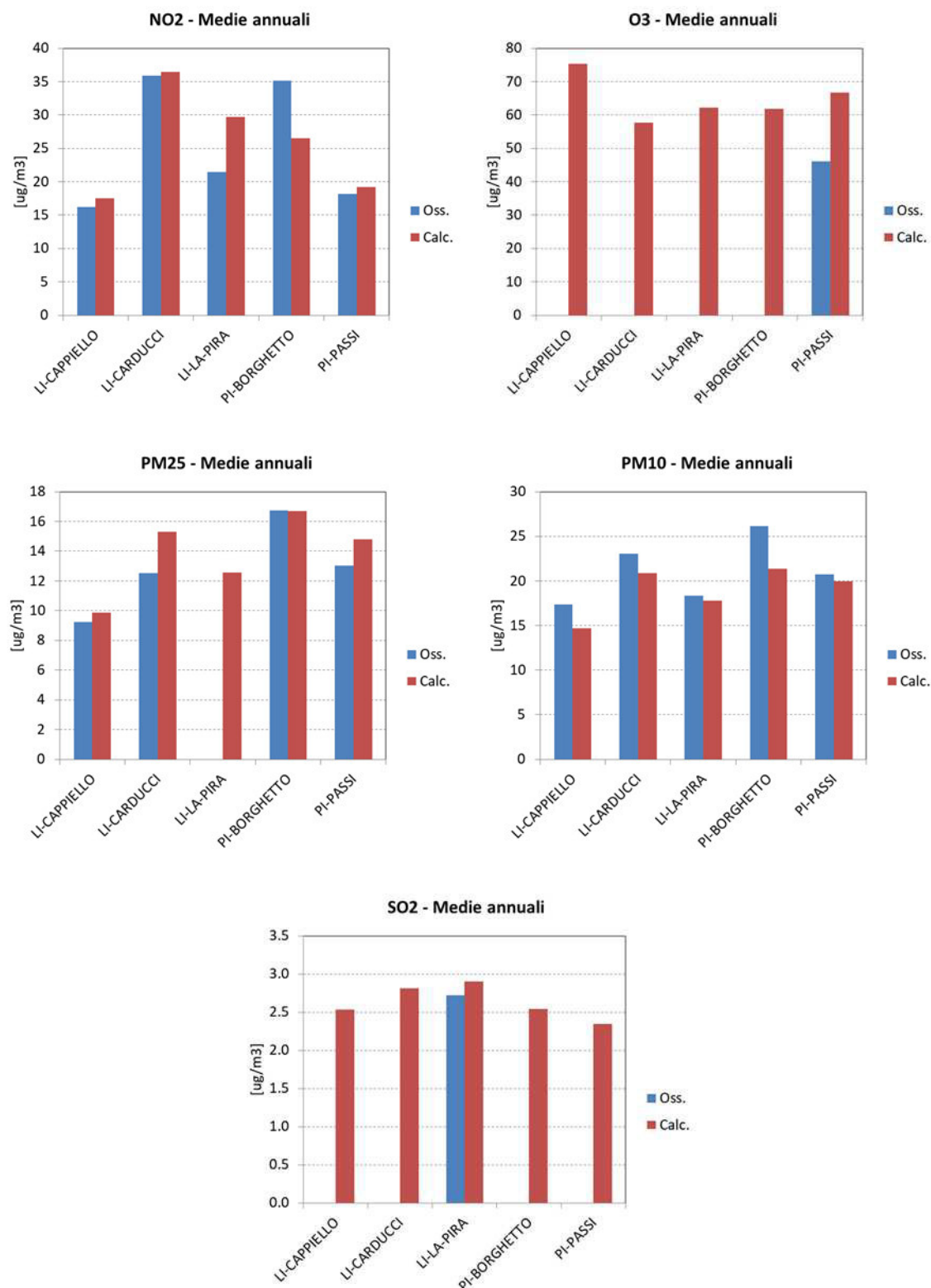


Figura 64. Concentrazioni medie per il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT e quelli calcolati relativamente allo scenario emissivo di riferimento.

Per fornire ulteriori elementi di ausilio all'interpretazione dei valori di concentrazione osservati e calcolati presso le stazioni è stato effettuato un run del modello di qualità dell'aria in modalità non reattiva, tracciando il contributo dei principali insiemi di sorgenti di interesse:

- il traffico navale, suddiviso secondo le fasi di stazionamento (distinguendo tra parte settentrionale e meridionale del porto), manovra e crociera;
- il traffico stradale nelle aree afferenti al porto ed il resto del traffico stradale;
- la combustione non industriale (riscaldamento degli edifici);
- le attività industriali, sia rappresentate individualmente come sorgenti "puntuali" all'interno dell'inventario, sia come sorgenti "diffuse";
- le altre sorgenti presenti all'interno dell'inventario.

Per ciascun insieme di sorgenti è stato definito un tracciante delle emissioni corrispondenti di NO_x e PM_{10} , e se ne è simulata la dispersione durante il corso dell'anno considerato. La Figura 65 mostra i contributi alle concentrazioni risultanti presso le stazioni fisse ARPAT, in termini medi annuali e per i mesi di gennaio e luglio. Avendo inibito le reazioni chimiche nel modello, le concentrazioni di PM_{10} ottenute rappresentano la sola componente primaria, mentre quelle di NO_x gli ossidi di azoto totali. I valori riflettono la consistenza assoluta delle fonti emittive (così come attualmente presenti all'interno dell'inventario), la loro articolazione nel tempo e l'influenza che esse esercitano presso ciascun sito in virtù della loro localizzazione sul territorio e delle condizioni meteorologiche prevalenti.

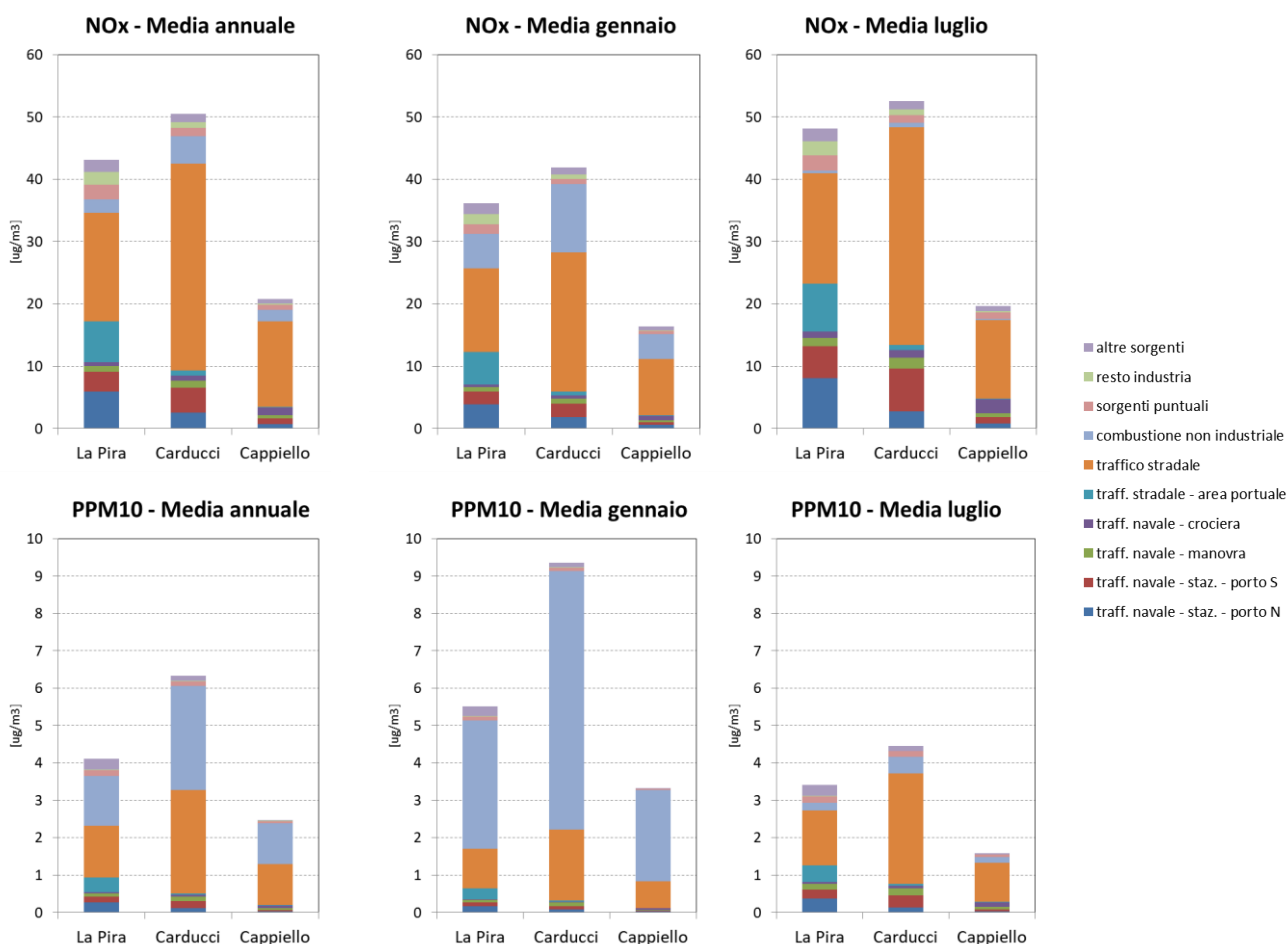


Figura 65. Contributi delle diverse sorgenti emittive alle concentrazioni di NO_x e PM_{10} primario presso le stazioni fisse ARPAT, in termini medi annuali e per i mesi di gennaio e luglio.

Rispetto alle altre sorgenti presenti nell'area, il traffico navale risulta esercitare un ruolo maggiore sulle concentrazioni di ossidi di azoto che su quelle di particolato. Il suo contributo decresce progressivamente da nord a sud e risulta più elevato nel mese di luglio, anche in virtù del maggiore traffico durante la stagione estiva.

Il traffico stradale nel suo complesso risulta il settore che esercita la maggiore influenza sulle concentrazioni di ossidi di azoto, ed esplica un contributo importante anche nel caso del particolato. In termini assoluti l'apporto risulta più elevato nella parte centrale dell'area urbana (stazione Carducci). Nella parte settentrionale dell'area urbana (stazione La Pira) si nota in particolare un ruolo non trascurabile da parte del traffico legato alle aree afferenti al porto.

La combustione non industriale (legata al riscaldamento degli edifici ed all'acqua sanitaria) risulta di particolare importanza nel caso del particolato. Dà luogo al contributo di gran lunga prevalente durante il mese di gennaio, ed in termini assoluti risulta più elevato nella parte centrale dell'area urbana (stazione Carducci).

Le attività industriali danno luogo ad un contributo inferiore rispetto a quello dei settori sinora menzionati, ed è più evidente nella parte settentrionale dell'area urbana.

A complemento del confronto tra valori osservati e calcolati effettuato sulla base dei livelli medi annuali è stato effettuato un confronto in termini di medie giornaliere lungo tutto il periodo annuale considerato (marzo 2017 – febbraio 2018), in modo da verificare la corrispondenza degli andamenti temporali delle concentrazioni. Nelle Figure 66-70 sono riportati i grafici di confronto tra valori medi giornalieri osservati e calcolati, mentre in Tabella 8 sono riportati i valori dei principali indici statistici (Tabella 7) relativi al confronto tra le i valori medi giornalieri osservati e calcolati.

Le serie relative all' NO_2 mostrano una sostanziale coerenza nell'occorrenza dei principali episodi e negli andamenti stagionali, specialmente in corrispondenza delle stazioni pisane. La sovrastima già evidenziata in corrispondenza della postazione di La Pira appare sostanzialmente occorrere durante i mesi primaverili ed estivi, mentre i livelli di concentrazione sono stimati correttamente durante i mesi autunnali ed invernali. Alla luce di quanto evidenziato circa il ruolo delle diverse fonti emissive, ciò parrebbe indicare la necessità di meglio descrivere il traffico stradale durante la stagione calda.

Dall'analisi dell'andamento delle serie temporali e degli indicatori statistici risulta confermato come il sistema modellistico sia in grado di simulare il $\text{PM}_{2.5}$ in modo ottimale, riproducendo i valori delle medie giornaliere, gli andamenti stagionali, gli episodi e picchi principali nelle diverse postazioni. I dati osservati mostrano una variabilità stagionale più pronunciata nelle postazioni pisane rispetto a quelle localizzate nell'aerea di Livorno, con una crescita più evidente dei valori invernali rispetto a quelli primaverili ed estivi. Anche questo aspetto risulta correttamente riprodotto dal sistema modellistico.

Il confronto evidenzia analoghe capacità del sistema modellistico nel riprodurre i livelli e gli andamenti del per il PM_{10} , inclusa la variabilità stagionale meno marcata rispetto alla frazione fine, plausibilmente dovuta al ruolo della frazione grossolana del particolato, il cui contributo risulta più significativo durante la stagione estiva, quando condizioni di maggior ventosità incrementano le emissioni di polveri di origine naturale. In alcune stazioni la tendenza alla sottostima del PM_{10} in, unitamente alla tendenza alla sovrastima del $\text{PM}_{2.5}$ dà luogo ad un valore modellato della frazione fine che (espressa come rapporto $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$) sulle stazioni prese in considerazione risulta pari a 0.74, a fronte di un valore osservato di 0.59.

L'esame delle serie giornaliere di ozono presso Pisa - Passi evidenzia come la sovrastima occorra nelle stagioni primaverile ed estiva, mentre i valori più contenuti durante quelle autunnale ed invernale risultano correttamente riprodotti, così come l'andamento stagionale e le variazioni giornaliere (indice di correlazione).

Per quanto riguarda l' SO_2 , gli andamenti temporali presso la stazione Livorno – La Pira confermano l'influenza prevalente dell'impatto al suolo di emissioni di origine industriale. Non è evidente una netta tendenza stagionale, con episodi di rialzo (sebbene non rilevanti in termini assoluti) variamente distribuiti durante l'anno. Il sistema modellistico riproduce correttamente i livelli medi e la variabilità delle concentrazioni, sebbene non in modo ottimale l'occorrenza degli episodi, che potrebbe essere legata a cicli di funzionamento specifici degli impianti industriali.

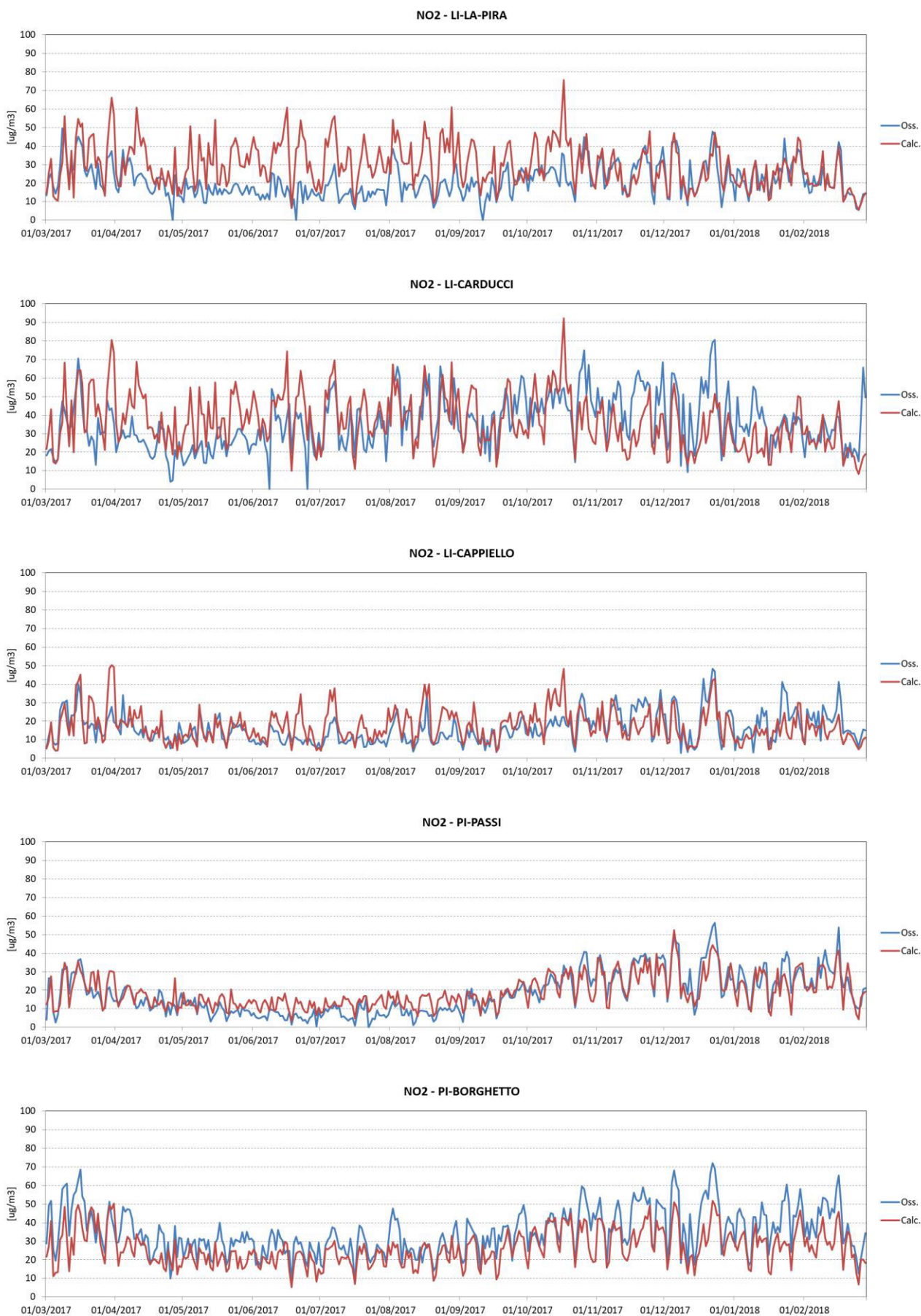


Figura 66. Concentrazioni medie giornaliere di NO₂: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT e quelli calcolati.



Figura 67. Concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5}: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT e quelli calcolati.

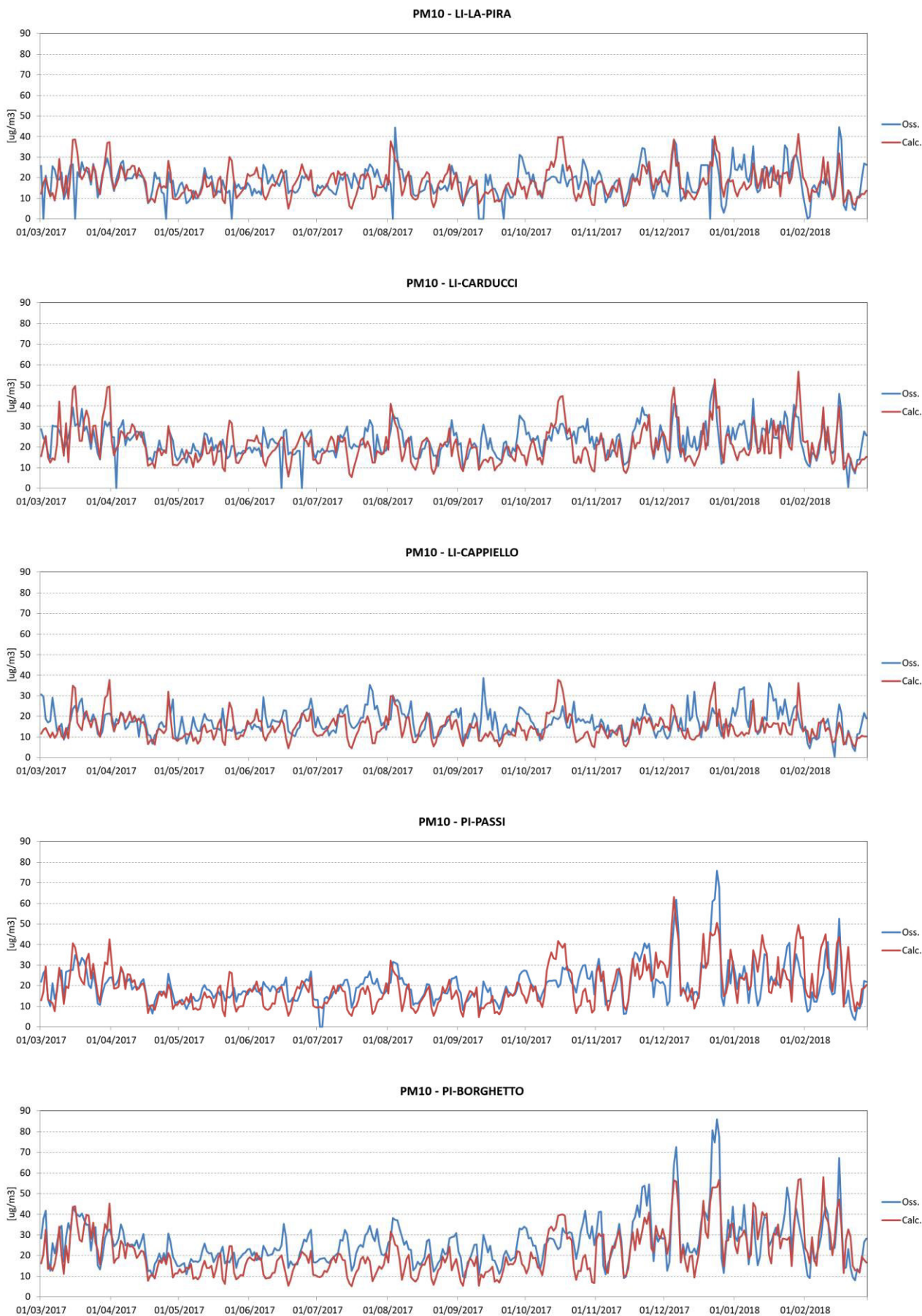


Figura 68. Concentrazioni medie giornaliere di PM_{10} : confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT e quelli calcolati.

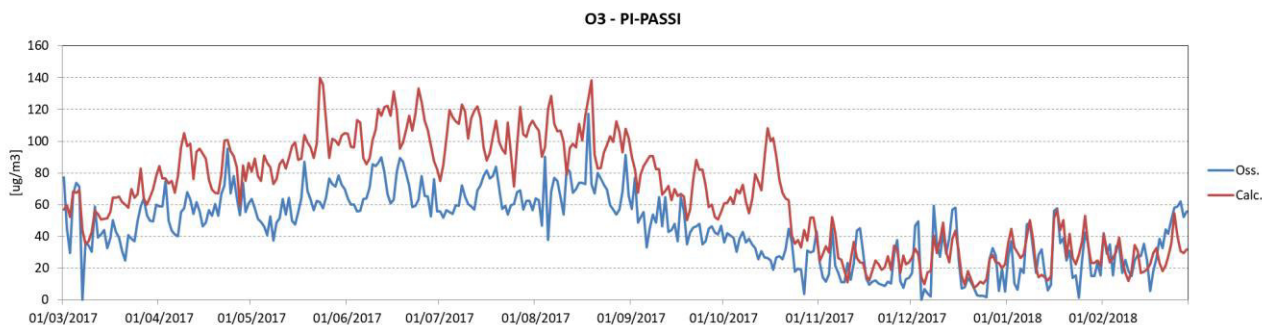


Figura 69. Concentrazioni medie giornaliere di O₃: confronto tra i valori osservati presso la stazione ARPAT di Pisa-Passi e quelli calcolati.

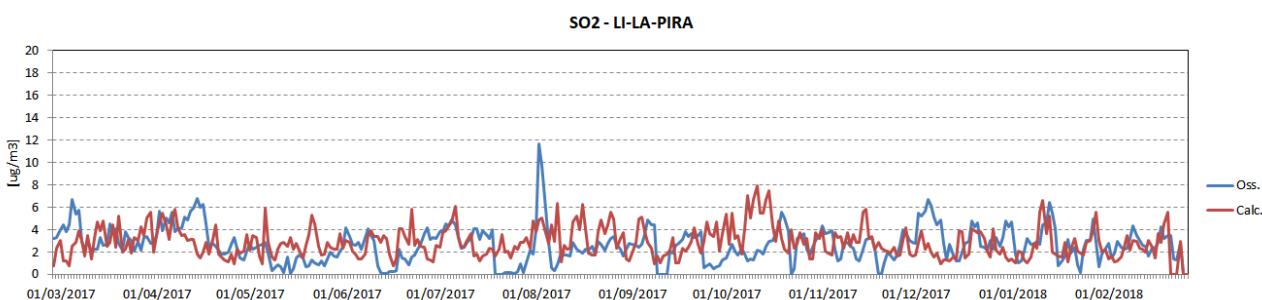


Figura 70. Concentrazioni medie giornaliere di SO₂: confronto tra i valori osservati presso la stazione ARPAT di Livorno-La Pira e quelli calcolati.

Tabella 7. Indicatori statistici utilizzati nel confronto tra valori osservati e calcolati (O_i = dati osservati, C_i = dati calcolati, N = numero totale di dati osservati o calcolati).

Medie dati osservati e calcolati	$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i$; $\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$
Deviazioni standard dati osservati e calcolati	$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$; $\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}$
Mean bias (MB)	$MB = \bar{C} - \bar{O}$
Normalized mean bias (NMB)	$NMB = (\bar{C} - \bar{O}) / \bar{O}$
Root mean square error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}$
Correlazione	$R = \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(O_i - \bar{O}) / \sigma_c \sigma_o$

Tabella 8. Indicatori statistici relativi al confronto tra valori osservati e calcolati delle concentrazioni medie giornaliere di inquinanti presso le stazioni ARPAT all'interno del dominio, per il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

NO₂									
Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R
LI-LA-PIRA	F / U	21.3	29.7	9.0	12.1	8.4	40%	14.1	0.46
LI-CARDUCCI	T / U	35.7	36.5	14.5	14.6	0.8	2%	15.7	0.42
LI-CAPPIELLO	F / U	16.3	17.5	8.4	8.9	1.3	8%	8.1	0.57
PI-BORGHETTO	T / U	35.1	26.6	12.2	9.6	-8.5	-24%	11.4	0.78
PI-PASSI	F / U	18.2	19.2	11.4	8.8	1.0	6%	6.2	0.85

PM_{2.5}									
Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R
LI-CARDUCCI	T / U	12.4	15.3	5.1	7.8	2.9	23%	6.7	0.63
LI-CAPPIELLO	F / U	9.2	9.9	3.6	5.1	0.6	7%	4.4	0.54
PI-BORGHETTO	T / U	16.8	16.7	9.2	10.4	-0.1	0%	7.0	0.75
PI-PASSI	F / U	12.8	14.8	8.2	9.6	2.1	16%	6.7	0.75

PM₁₀									
Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R
LI-LA-PIRA	F / U	17.8	17.8	7.2	7.0	-0.1	0%	7.9	0.39
LI-CARDUCCI	T / U	22.8	20.9	7.3	8.8	-2.0	-9%	8.1	0.54
LI-CAPPIELLO	F / U	17.4	14.7	6.0	6.0	-2.7	-15%	7.5	0.31
PI-BORGHETTO	T / U	26.1	21.4	11.2	11.0	-4.7	-18%	9.5	0.72
PI-PASSI	F / U	20.6	20.0	9.4	10.2	-0.6	-3%	7.9	0.68

SO₂									
Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	Corr.
LI-LA-PIRA	F / U	2.6	2.9	1.6	1.4	0.2	8%	2.0	0.13

O₃									
Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	Corr.
PI-PASSI	F / U	45.8	66.8	22.3	33.9	21.0	46%	29.6	0.80

4.4 Confronti con i dati delle campagne

Il confronto delle concentrazioni al suolo simulate dal sistema modellistico è stato successivamente esteso ai dati risultanti dalle campagne di monitoraggio condotte da CNR-IBIMET ed ARPA Toscana a partire da fine ottobre 2017 a fine ottobre 2018.

La posizione dei punti di misura è indicata in Figura 71.

IBIMET ha condotto una campagna mediante utilizzo di 6 stazioni di qualità dell'aria low-cost (AIRQino), in corrispondenza dei punti indicati in figura come SMART 02, 06, 07, 08, 11 e 13 ed un laboratorio mobile (AIRQLab), su indicazione di ARPAT posizionato continuativamente in corrispondenza della stazione SMART02. Il periodo di acquisizione delle stazioni AIRQino si estende da ottobre/novembre 2017 ad ottobre 2018, per il laboratorio AIRQLab i periodi di misura effettivi corrispondono al 22/01/2018–26/06/2018 e 20/09/2018–31/10/2018 per gli inquinanti gassosi ed al 22/01/2018–23/05/2018 per il particolato.

In concomitanza, il laboratorio mobile ARPAT ha effettuato campagne di misura alternate tra i siti di Darsena Toscana Ovest (corrispondente a SMART06) e Fortezza Vecchia (corrispondente a SMART08), nei seguenti periodi:

- Darsena Toscana: 22/11/2017–11/02/2018; 06/05/2018–27/05/2018; 01/08/2018–20/08/2018;
- Fortezza Vecchia: 26/10/2017–20/11/2017; 13/02/2018–24/02/2018; 12/04/2018–02/05/2018; 19/07/2018–31/07/2018.

Per una descrizione esaustiva della modalità di effettuazione delle campagne ed un esame dei risultati si rimanda ai rispettivi rapporti.

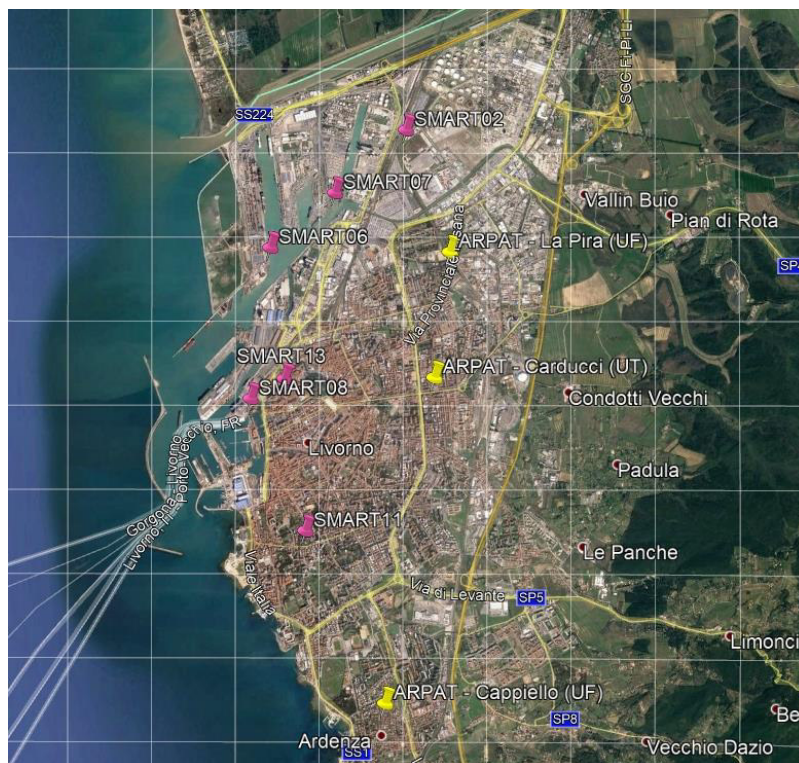


Figura 71. Localizzazione delle stazioni di monitoraggio IBIMET ed ARPAT.

La Figura 72 mostra il confronto tra i valori medi per il periodo 1/11/2017 - 30/8/2018 misurati dalle centraline AIRQino e quelli modellati in corrispondenza dei medesimi punti. Il periodo temporale si estende dall'inizio delle campagne sino alla data cui è stato possibile estendere le simulazioni meteorologiche. I dati di NO₂ e PM delle centraline AIRQino sono stati ricalibrati sulla base di un confronto diretto tra i dati rilevati dalle centraline SMART06 e SMART08 e le misure di riferimento effettuate dal laboratorio mobile ARPAT in una serie di periodi presso i siti di Fortezza Vecchia (corrispondente a SMART08) e Darsena Toscana Ovest (corrispondente a SMART06). Sebbene le misure delle stazioni della rete AIRQino non siano direttamente confrontabili con quelle delle stazioni fisse di ARPAT, in Figura 72 è comunque mostrato come riferimento il confronto sul medesimo periodo dei dati modellati a fronte dei valori rilevati dalle stazioni fisse di ARPAT, in analogia a quanto già mostrato in precedenza per l'anno meteorologico di riferimento.

Pur nei limiti derivanti da una parte dal procedimento di calibrazione tra siti differenti e dall'altra dalla capacità discriminativa legata alla risoluzione del modello, la concordanza tra i valori osservati e calcolati risulta buona per i diversi inquinanti nella maggior parte dei siti. Si nota in particolare l'ottimo accordo del modello, per tutti gli inquinanti analizzati, con le osservazioni della postazione SMART11, il cui posizionamento permette di considerarla come indicatore delle concentrazioni nell'area di background urbano esposta alle emissioni della porzione sud del porto.

Le discrepanze più significative riguardano la sovrastima degli ossidi di azoto in corrispondenza della centralina SMART07, ed una sottostima delle concentrazioni di particolato in corrispondenza

delle centraline più in prossimità della zona portuale (come la SMART08), possibilmente attribuibili ad una non ottimale rappresentazione del ruolo delle emissioni locali alla risoluzione del modello reattivo.

La tendenza del modello alla sovrastima delle concentrazioni di NO_2 nelle postazioni SMART07 e ARPAT/La Pira potrebbe indurre ad ipotizzare una parziale sovrastima delle emissioni nella parte nord del porto industriale. D'altra parte, l'accordo mostrato dal modello con le osservazioni di NO_2 delle postazioni SMART02, SMART06 e AIRQLab (Figura 73), insieme all'analisi di provenienza delle concentrazioni (riportata nel paragrafo 4.2.3 della relazione sulle campagne sperimentali), porta ad ipotizzare che la risoluzione spaziale non permetta di discriminare gli effetti di sorgenti locali su postazioni la cui distanza reciproca è dell'ordine o inferiore al passo griglia del modello reattivo (come nel caso delle postazioni SMART06 e 07 o SMART 08 e 13).

Le concentrazioni misurate di PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$ sono ben riprodotte dal modello reattivo in corrispondenza delle postazioni SMART08 e 11, oltre che per tutte le postazioni ARPAT, mentre risultano sottostimate per le altre postazioni SMART. La sottostima rilevabile per le postazioni localizzate nella zona nord del porto non è invece confermata dal confronto con i dati di particolato rilevati dal laboratorio AIRQLab durante il periodo freddo, che indicano uno scostamento di segno opposto. Anche in questo caso le discrepanze potrebbero essere quindi attribuite alla risoluzione del modello che non permette descrivere gli impatti diretti delle emissioni a breve distanza, ma fornisce una stima d'insieme dell'impatto sull'area portuale monitorata nel suo complesso dalle diverse postazioni.

I livelli di particolato in rilevati in corrispondenza della stazione posta in una zona residenziale più all'interno (SMART11) risultano invece correttamente rappresentati, analogamente a quanto avviene per la stazione di fondo urbano ARPAT (Cappiello) posta nella parte sud dell'area urbana.

Risulta infine ottima la riproduzione da parte del sistema modellistico dei livelli medi di ozono rilevati dalle centraline SMART, considerando che per tale inquinante i valori misurati non sono stati ricalibrati.

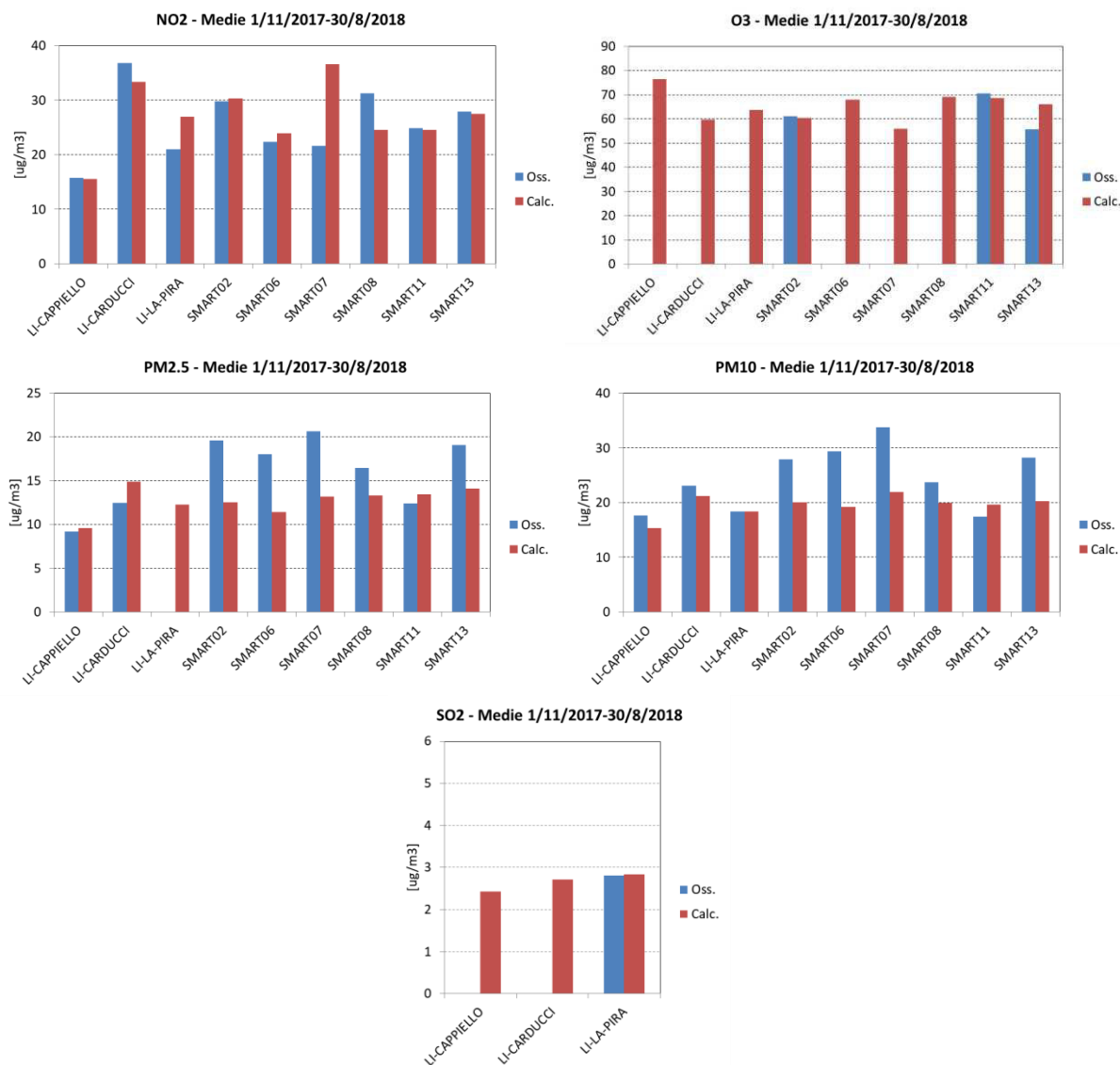


Figura 72. Concentrazioni medie per il periodo 1/11/2017 - 30/8/2018: confronto tra i valori osservati presso le centraline AIRQino ed ARPAT e quelli modellati.

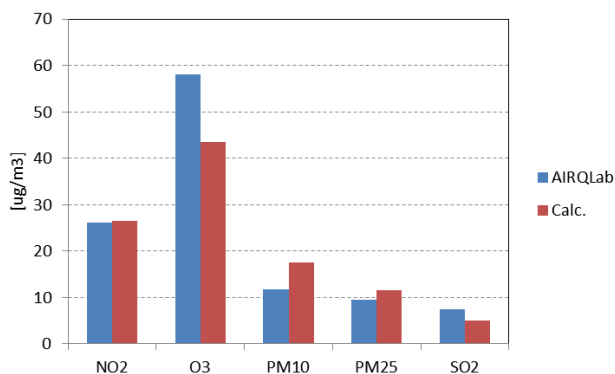


Figura 73. Confronto tra i valori medi delle concentrazioni rilevate dalla stazione AIRQLab nel periodo 22/01/2018–15/04/2018 e quelli modellati.

5 Piattaforma informatica

Il sistema modellistico per la qualità dell'aria messo a punto è stato configurato per l'area livornese e confrontato positivamente con i dati come illustrato in dettaglio nelle sezioni precedenti del rapporto.

Il sistema è stato in seguito installato su un server di calcolo ad alte prestazioni presso l'Autorità Portuale di Livorno. Integra le componenti di software modellistico attinenti alla descrizione meteorologica, emissiva e della qualità dell'aria ed è corredato di una serie di basi dati "statiche" (orografia, uso del suolo) e delle basi dati annuali su base oraria realizzate per la ricostruzione dello "scenario di riferimento".

Tale configurazione è utilizzabile come punto di partenza e confronto per i successivi studi di scenario, fornendo informazioni sulla qualità dell'aria conseguenti agli interventi di interesse, che possano comprendere non solo gli effetti del singolo intervento, ma anche il loro effetto combinato nel contesto delle sorgenti emissive legate alle attività già esistenti sul territorio.

In generale, tali analisi di scenario potranno essere realizzate tramite il sistema predisponendo dapprima scenari emissivi alternativi mediante l'utilizzo combinato dei pre-processor emissivi e quindi simulandone gli effetti sulle concentrazioni ambiente di inquinanti tramite il modello di qualità dell'aria, a parità di meteorologia e condizioni al contorno. L'entità di tali effetti potrà essere analizzata in termini di differenze di concentrazioni rispetto allo scenario di riferimento.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le principali caratteristiche del server di calcolo, del sistema modellistico e della relativa documentazione fornita a corredo, nonché delle basi dati installate.

5.1 Server di calcolo

Il sistema modellistico configurato e corredato delle proprie basi dati è stato installato sul server di calcolo Linux ad alte prestazioni predisposto dall'APL.

Il server è un HPE ProLiant DL560 GEN10 2U rack con queste caratteristiche:

- n. 2 Intel® Xeon-Gold 5118 2.3GHz 16,5M Cache, Turbo, HT, 12C/24T
- n. 2 32GB Dual Rank x4 DDR4-2666 Registered Smart Memory
- n. 2 300GB 15K RPM SAS 12Gbps 2.5in Hot-plug Hard Drive
- n. 2 1.8TB 10K RPM SAS 12Gbps 512e 2.5in Hot-plug Hard Drive

Su di esso è installato il S.O. Linux Debian 9.5 (stable) e si presenta con l'hostname `aria.portauthority.com`. Ulteriori dettagli circa la configurazione del sistema sono illustrati nel rapporto tecnico Aethia "*Server aria at ADSP-MTS*".

I dischi sono organizzati in due volumi RAID1, un primo da 211GB di spazio effettivo per sistema operativo ed applicativi ed un secondo da 1.7TB per la home degli utenti.

In particolare, l'account utente `model` è dedicato all'utilizzo del sistema modellistico.

5.2 Componenti del sistema modellistico

Il sistema modellistico messo a punto per l'area di Livorno, come illustrato in dettaglio nelle sezioni precedenti del rapporto, integra le seguenti componenti:

- il modello meteorologico WRF ed i relativi post-processor verso il modello di qualità dell'aria, per la possibile generazione di basi dati meteo relativi ad altri periodi, qualora di interesse;

- i modelli emissivi relativi al traffico navale (HECTOR) e stradale (TREFIC) nelle aree afferenti al porto, per consentire l'introduzione di modifiche al quadro emissivo fornito al modello di qualità dell'aria atte a seguire gli sviluppi dell'opera e/o scenari di interesse;
- il modulo Emission Manager, per la predisposizione dell'input emissivo al modello di qualità dell'aria a partire dai dati delle diverse basi dati emissive, nonché complementare i moduli emissivi nella messa a punto di particolari scenari emissivi;
- il modello fotochimico tridimensionale FARM, per la simulazione dello scenario di riferimento della qualità dell'aria e degli effetti sulle concentrazioni di inquinanti di scenari emissivi alternativi;
- una serie di post-processor per il calcolo di indicatori statistici, estrazione dati e conversione per l'utilizzo dei risultati delle elaborazioni modellistiche al di fuori del sistema.

Le componenti del sistema modellistico sono installate nella cartella di sistema `/home/model/AriaRegional_linux`.

5.3 Basi di dati

Le basi dati di riferimento per il sistema modellistico di qualità dell'aria si trovano all'interno della cartella `/home/model/Livorno`, organizzate come segue.

Meteorologia

Nella sottocartella `meteo/g1` si trova la base dati annuale di campi meteorologici orari 2D/3D, messa a punto tramite il modello meteorologico WRF ed il pre-processore SURFPro, da fornire in input al modello di qualità dell'aria in versione reattiva sulla griglia ad 1 km di risoluzione. I dati sono suddivisi secondo file giornalieri:

- `wrfout_d03_aaaammgg.utm.nc` (campi meteo da WRF)
- `surf_g03_aaaammgg.nc` (SURFPro)

dove `aaaammgg` si riferisce al giorno.

Nella sottocartella `meteo/g2` si trovano gli analoghi file contenenti la base dati annuale di campi meteorologici relativi alla griglia a 250 m di risoluzione:

- `meteo.g2.aaaammgg.nc` (campi meteo)
- `surfpro.g2.aaaammgg.nc` (SURFPro)

Condizioni al contorno

Nella sottocartella `icbc/10m.dust` si trovano i file (uno per giorno) contenenti le concentrazioni dei diversi inquinanti ai bordi del dominio ad 1 km di risoluzione, su base trioraria:

- `BC.g1.aaaammgg.lat.nc` (facce laterali)
- `BC.g1.aaaammgg.top.nc` (faccia superiore)

Nella sottocartella `icbc/10m.coa60` si trovano le analoghe condizioni al contorno, ma senza il contributo delle polveri di origine sahariana.

Emissioni

Nella sottocartella `emi` risiedono i "casi emissivi" per lo scenario di riferimento, contenenti le emissioni relative a tutte le sorgenti e le informazioni ausiliarie (disaggregazione su griglia, speciazione, modulazione temporale), necessarie alla generazione di input al modello di qualità dell'aria sui due domini considerati:

- `g1.v4.e` (dominio ad 1 km di risoluz., per modello in configurazione reattiva);
- `g2.v4.a` (dominio ad 250 m di risoluz., per modello in configurazione non reattiva).

Concentrazioni di inquinanti

Nella sottocartella *farm* si trovano le uscite su base oraria del modello di qualità dell'aria per l'anno di riferimento considerato, organizzate anch'esse in file giornalieri:

- *emi.v4.e/out/conc.g1.aaaammgg.nc* (1 km di risoluz., configurazione reattiva);
- *g2.emi.v4.a/out/conc.g1.aaaammgg.nc* (250 m di risoluz., configurazione non reattiva).

5.4 Documentazione

Il sistema è corredato di documentazione tecnica, riguardante la formulazione delle componenti modellistiche ed il manuale di riferimento dei diversi moduli. La documentazione è in buona parte accessibile on-line via web, in formato wiki (ipertesto simile a quello di Wikipedia), modalità che consente di condividere una documentazione costantemente aggiornata. Laddove non indicato il riferimento on-line, i manuali sono disponibili sotto forma di documenti elettronici (pdf).

- SURFPRO3 3.2.1 - User's guide
Disponibile on-line: <http://doc.aria-net.it/SURFPRO>
Pre-processore per il completamento dell'input meteorologico alle simulazioni di qualità dell'aria a partire dall'output di un modello meteorologico e di una descrizione dell'uso del suolo.
- HECTOR (Harbour Emissions CalculaTOR) User Guide, ARIANET R2014.12
Pre-processore per il calcolo delle emissioni relative al traffico marittimo sulla base della metodologia europea CORINAIR, a partire dalle informazioni sulla flotta ed i suoi movimenti.
- TREFIC 5 - User's guide
Pre-processore per il calcolo delle emissioni relative al traffico stradale sulla base della metodologia europea COPERT, a partire dalle informazioni sul parco veicolare ed i suoi movimenti.
Disponibile on-line: <http://doc.aria-net.it/TREFIC>
- Emission Manager 6.6 - User's guide
Sistema modulare per la predisposizione di un input emissivo complesso ai modelli di qualità dell'aria a partire dai dati di inventari.
Disponibile on-line: <http://doc.aria-net.it/EmissionManager>
- FARM 4.11.2 - Model formulation and user's manual, ARIANET R2017.15, Dec 2017
Modello fotochimico euleriano multigriglia per la dispersione e le trasformazioni chimiche degli inquinanti.
- FARM/BFM 1.5.2 - User's guide on-line
Sistema integrato per la stima del contributo delle sorgenti alle concentrazioni ambientali (*source apportionment*) tramite il modello FARM.
Disponibile on-line: <http://doc.aria-net.it/FarmBFM>
- Aria suites tools - Reference guide on-line
Altre componenti della suite modellistica ARIA Regional: moduli per il trattamento dei dati territoriali (orografia, uso del suolo, cartografia), pre-processor per il trattamento delle condizioni al contorno chimiche, post-processor per estrazione e conversione dati, calcolo di statistiche.
Disponibile on-line: <http://doc.aria-net.it/AriaSuitesTools>

6 Conclusioni

In ottemperanza agli adempimenti connessi alle prescrizioni della VAS del nuovo Piano Regolatore Portuale (PRP) limitatamente alle emissioni in atmosfera e alla qualità dell'aria, è stato messo a punto e configurato per l'area livornese un sistema modellistico integrato. Le tre principali componenti del sistema sono dedicate alla modellazione meteorologica, emissiva e di qualità dell'aria, e sono alimentate da basi dati che descrivono la conformazione del territorio, le emissioni legate alle attività presenti su di esso, nonché gli apporti ai livelli di fondo delle concentrazioni dati dalle sorgenti più lontane.

Per la componente meteorologica e di qualità dell'aria sono stati utilizzati modelli tridimensionali allo stato dell'arte, configurati in modo da permettere di effettuare simulazioni su un dominio di lato 40 km e di risoluzione 1 km che include il porto di Livorno, il resto del territorio comunale, la fascia costiera che si estende da Rosignano Solvay sino ad oltre Marina di Pisa ed un entroterra che giunge nella parte settentrionale sino a Pisa. La scelta di tale dominio consente sia di considerare le aree potenzialmente interessate da impatti significativi delle attività portuali sulla qualità dell'aria, sia di includere nelle simulazioni modellistiche i possibili contributi delle sorgenti poste nelle aree circostanti. Il modello di qualità dell'aria scelto per l'implementazione su tale dominio è di tipo tridimensionale reattivo: attraverso un'opportuna descrizione delle condizioni al contorno (concentrazioni evolutive degli inquinanti ai bordi del dominio) è in grado di tenere in conto anche della possibile influenza delle sorgenti poste a maggiori distanze (al di fuori del dominio) sulla formazione degli inquinanti secondari (ozono, particolato secondario, ecc.). Per produrre campi meteorologici sull'area di interesse consistenti con l'evoluzione a scala sinottica il modello meteorologico è stato configurato su tre domini di calcolo innestati, che coprono a risoluzione via via crescente l'Europa continentale e Mediterraneo centro-occidentale, l'Italia centro-settentrionale, ed infine l'area di Livorno alla risoluzione di 1 km.

Come punto di partenza per l'integrazione del database emissivo è stato utilizzato il più recente Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in atmosfera (IRSE, Regione Toscana), fonte informativa di riferimento per la valutazione di piani, programmi ed interventi che hanno effetto sulla qualità dell'aria nella regione. I dati IRES sono stati integrati per la descrizione di sorgenti particolarmente significative in relazione al porto di Livorno, modellando le emissioni sulla base dei dati locali di dettaglio disponibili: per le emissioni associate al traffico navale è stato implementato un modello emissivo alimentato dai dati forniti dall'APL circa i movimenti dei natanti nel corso di un anno di riferimento e ad informazioni complementari circa i mezzi di supporto utilizzati per ciascuna tipologia in fase di manovra; le emissioni da traffico stradale relative ad una porzione della rete di accesso al porto sono state calcolate a partire dai risultati di uno studio di traffico condotto dall'Università di Pisa, mentre quelle associate ai movimenti dei veicoli sui piazzali della Stazione Marittima sono state stimate a partire da dati sui movimenti forniti dall'APL. Il sistema di simulazione considera altresì gli apporti dalle principali sorgenti naturali: i composti volatili organici emessi dalla vegetazione (emissioni biogeniche), modellati sulla base della copertura vegetativa e delle condizioni meteorologiche, gli aerosol marini emessi a seguito dell'azione eolica, stimati in funzione dell'umidità relativa e dell'intensità del vento, e le polveri di origine desertica, il cui trasporto a lunga distanza è tenuto in conto tramite le condizioni al contorno mutate dal modello globale dal servizio europeo CAMS/Copernicus.

Il sistema modellistico è stato applicato per ricostruire le concentrazioni complessive degli inquinanti sul dominio di analisi lungo un intero anno di riferimento, da marzo 2017 a febbraio 2018, in modo da coprire lo spettro delle condizioni emissive e meteodispersive che si presentano nelle diverse stagioni. Le concentrazioni simulate sono state messe a confronto con i valori rilevati in corrispondenza delle stazioni fisse della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria di Arpa Toscana lungo il medesimo arco di tempo.

Per integrare le informazioni fornite dalle stazioni fisse, a partire da fine ottobre 2017 a fine ottobre 2018, CNR-IBIMET in coordinamento con ARPA Toscana ha condotto una campagna di monitoraggio della qualità dell'aria nella città di Livorno, mediante l'utilizzo di 6 stazioni di qualità dell'aria low-cost (AIRQino) e di un laboratorio mobile (AIRQLab). In concomitanza, ARPAT ha anch'essa effettuato una campagna di monitoraggio mediante laboratorio mobile, posizionato in corrispondenza di due postazioni delle centraline AIRQino. In particolare, la corrispondenza tra i siti di misura lungo una serie di periodi ha consentito di calibrare le misure effettuate tramite le stazioni low-cost e di ampliare la base di confronto per il modello, prolungando il periodo di simulazione del modello in modo da coprire buona parte dei periodi di campagna. Le metodologie impiegate e le risultanze delle campagne sono illustrate in rapporti specifici.

Il confronto tra valori osservati e calcolati è stato effettuato sulla base dei livelli medi annuali ed in termini di medie giornaliere, in modo da verificare la corrispondenza degli andamenti temporali delle concentrazioni. Per ciò che riguarda l'NO₂ l'accordo è generalmente buono, con una sostanziale coerenza nella riproduzione dell'occorrenza dei principali episodi e negli andamenti stagionali, così come delle differenze tra i livelli più elevati riscontrati nelle stazioni fisse da traffico e quelle di fondo urbano a Livorno e Pisa (Carducci vs. Cappiello e La Pira, Borghetto vs. Passi). Dall'analisi dell'andamento delle serie temporali e degli indicatori statistici risulta come il sistema modellistico sia in grado di ben simulare il particolato, riproducendo i valori delle medie giornaliere, gli andamenti stagionali ed i principali episodi, con una tendenza alla sovrastima nel caso del PM_{2.5} ed alla sottostima nel caso del PM₁₀. I livelli medi e la variabilità delle concentrazioni di SO₂ risultano anch'essi ben riprodotti. I valori medi di ozono simulati sono coerenti con quanto indicato dalle centraline AIRQino. A Livorno le discrepanze più significative si riscontrano nella parte settentrionale della città, con una sovrastima dell'NO₂ in corrispondenza della postazione di La Pira durante i mesi primaverili ed estivi, mentre i valori di particolato simulati risultano inferiori a quelli rilevati dalle centraline AIRQino poste più in prossimità della zona portuale, possibilmente a causa ad una non ottimale rappresentazione del ruolo delle emissioni locali alla risoluzione del modello reattivo.

Il buon accordo riscontrato relativamente a gran parte dei siti e degli indicatori ha mostrato come il sistema modellistico nel suo complesso sia in grado di riprodurre i livelli medi e la variabilità delle concentrazioni di inquinanti primari e secondari nelle diverse zone del dominio, ed in particolare a Livorno.

Il sistema, costituito dal software modellistico configurato e validato, corredato dalle basi dati annuali su base oraria realizzate per la ricostruzione della situazione attuale ("scenario di riferimento") è stato quindi installato su un server di calcolo ad alte prestazioni presso l'Autorità Portuale di Livorno.

Tale configurazione è utilizzabile come punto di partenza e confronto per i successivi studi di scenario, fornendo informazioni sulla qualità dell'aria conseguenti agli interventi di interesse, che possano comprendere non solo gli effetti del singolo intervento, ma anche il loro effetto combinato nel contesto delle sorgenti emissive legate alle attività già esistenti sul territorio, dunque riguardanti sia l'ambito diretto di attuazione del PRP, sia altre strategie di pianificazione ed attuazione sviluppatesi nel frattempo (Piano Regolatore Generale, piani di settore, di risanamento atmosferico, ecc.). Tali analisi di scenario potranno essere realizzate tramite il sistema predisponendo scenari emissivi alternativi e simulandone gli effetti sulle concentrazioni ambiente di inquinanti, consentendo di stimare l'entità degli effetti in termini di differenze di concentrazioni rispetto allo scenario di riferimento.

Le modalità scelte per la descrizione della componente emissiva, effettuata in coerenza con l'inventario regionale delle emissioni, arricchito per le principali componenti di interesse per l'area portuale (traffico navale e stradale nelle aree afferenti) fanno sì che sarà possibile accogliere sia aggiornamenti o proiezioni future dell'inventario regionale, sia variazioni delle sorgenti derivanti dal futuro assetto dell'area portuale.

Il confronto tra le simulazioni condotte e i dati di qualità dell'aria provenienti dalla rete delle stazioni fisse e dalle campagne, a fronte di una sostanziale conferma della complessiva consistenza della

modellazione di riferimento messa a punto, ha evidenziato alcuni aspetti che potrebbero beneficiare di maggiori approfondimenti ed informazioni. Per quanto riguarda la descrizione delle sorgenti emissive pare opportuno suggerire come la disponibilità di una descrizione di dettaglio del traffico stradale per la città di Livorno e dintorni, in termini di flussi veicolari sul reticolo stradale (analogamente a quanto reso disponibile tramite lo studio effettuato dall'Università di Pisa per una porzione della rete stradale in prossimità dell'area portuale) e loro articolazione nel tempo, in particolar modo durante la stagione calda, potrebbe contribuire a migliorare la modellazione delle emissioni del traffico urbano derivante dai dati dell'inventario regionale delle emissioni disponibili su base comunale.

7 Bibliografia

- ARIANET (2015) SURFPro3 (SURrface-atmosphere interFace PROcessor, Version 3) Reference guide. <http://95.228.102.186/trac/SURFPro>.
- Baklanov, A., Hänninen, O., Slørdal, L. H., Kukkonen, J., Bjergene, N., Fay, B., Finardi, S., Hoe, S. C., Jantunen, M., Karppinen, A., Rasmussen, A., Skouloudis, A., Sokhi, R. S., Sørensen, J. H., (2007) Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 855–874, 2007 (www.atmos-chem-phys.net/7/855/2007/)
- Bao X, Zhang F (2013) Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *J Clim* 26:206–214. doi:10.1175/JCLI-D-12-00056.1
- Betts, A. K., M. Kohler, and Y. Zhang, 2009: Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalysis with observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D02101, doi:10.1029/2008JD010761.
- Chen, G., T. Iwasaki, H. Qin, and W. Sha, 2014: Evaluation of the Warm-Season Diurnal Variability over East Asia in Recent Reanalyses JRA-55, ERA-Interim, NCEP CFSR, and NASA MERRA. *J. Climate*, 27(14), 5517–5537 (DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00005.1).
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597.
- EMEP/EEA (2016) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. European Environment Agency, Report No 21/2016. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., and Fall, R., Natural Emissions of Non-Methane Volatile Organic Compounds, Carbon Monoxide, and Oxides of Nitrogen from North America, *Atmospheric Environment*, 34, 2205–2230, 2000.
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., and Geron, C., Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181–3210, 2006.
- Hodges, K. I., R. W. Lee, and L. Bengtsson, 2011: A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *J. Climate*, 24, 4888–4906.
- Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D. M., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A. I., Monteiro, A., Hirtl, M., Tarvainen, V., Boy, M., Peuch, V.-H., Poupkou, A., Kioutsioukis, I., Finardi, S., Sofiev, M., Sokhi, R., Lehtinen, K. E. J., Karatzas, K., San José, R., Astitha, M., Kallos, G., Schaap, M., Reimer, E., Jakobs, H., and Eben, K., 2012: A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1–87, doi:10.5194/acp-12-1-2012. (<http://www.atmos-chem-phys.net/12/1/2012/>)
- Mooney, P. A., F. J. Mulligan, and R. Fealy, 2010: Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland. *Int. J. Climatol.*, 31, 545–557, doi:10.1002/joc.2098.
- Pratelli I.A., Mannucci F., Masi C.A., Sechi P., Zanobetti D. (2017) *Sviluppo di un modello previsionale del traffico veicolare indotto relativo al porto di Livorno e della sua cintura stradale*. Università di Pisa, Polo Sistemi Logistici, Laboratorio LOGIT. Rapporto 24/11/2017.
- Szczypta, C., and Coauthors, 2011: Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 647–666, doi:10.5194/hess-15-647-2011.
- Walko R.L., Tremback C.J., Pielke R.A., Cotton W.R. (1995) An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. *J. Appl. Meteor.* 34, 994–999.
- Zhang, K.M., Knipping E.M., Wexler A.S., Bhawe P.V., Tonnesen, G.S. (2005) Size distribution of sea-salt emissions as a function of relative humidity. *Atmospheric Environment*, 39, 3373–3379.