

“S.In.A.T.Ra. II”

(S.orveglianza In.quinamento A.tmosferico T.erritorio di Ra.venna II)

Studio ambientale ed epidemiologico dell'inquinamento atmosferico e suo impatto sanitario
sulla popolazione residente nell'area urbana di Ravenna



Linea progettuale (LP1):
Valutazione della dispersione degli inquinanti
atmosferici

A cura di:

Patrizia Luciali, Samuele Marinello
Servizio Sistemi Ambientali APA Est

Indice

PROTOCOLLO PROGETTO S.In.A.T.Ra II	1
1. INTRODUZIONE	1
2. OBIETTIVI PROGETTUALI E METODOLOGIA DELL'INDAGINE	2
3. DOMINIO DI CALCOLO	3
4. METODOLOGIA DI CALCOLO DELLE EMISSIONI PER LE DIVERSE SORGENTI	4
5. METODOLOGIA PER LA "STORICIZZAZIONE" DELLE EMISSIONI PER GLI ANNI 2014 - 2019	15
6. IL MODELLO DI DISPERSIONE	17
7. DATI METEOROLOGICI	19
8. SIMULAZIONE DELLA DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI PER LE DIVERSE SORGENTI - MEDIE MENSILI E ANNUALI	22
9. CONFRONTO CON I DATI MISURATI DALLE STAZIONI DI MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA E VALIDAZIONE DEL MODELLO	25
10. CONTRIBUTO DELLE MACROSORGENTI ALL'INQUINAMENTO DELL'AREA	35
11. SINTESI LINEA PROGETTUALE 1 – MONITORAGGIO AMBIENTALE	38

Progetto S.In.A.T.Ra II

S.orveglianza In.quinamento A.tmosferico T.erritorio di Ra.venna II

1. INTRODUZIONE

Le aree urbane si caratterizzano, oltre che per la densità abitativa, per la presenza di numerose attività antropiche impattanti sulla qualità dell'aria: popolazione, flussi di traffico, attività industriali e portuali determinano nelle città concentrazioni di sostanze inquinanti significative. Anche le condizioni meteorologiche e orografiche dell'area influenzano i processi di formazione, di trasformazione e di accumulo degli inquinanti atmosferici.

L'inquinamento dell'aria ha effetti diretti e indiretti sulla salute dei cittadini e sulla qualità degli ecosistemi e risulta, come riportato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), causa di morte prematura nel mondo di milioni di persone ogni anno. L'inquinamento atmosferico, ed in particolare il particolato atmosferico, è stato riconosciuto e classificato dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) come *cancerogeno certo per l'uomo (gruppo 1 - 2013)*, ovvero nel gruppo di sostanze ed agenti per i quali esiste una evidenza sufficiente di cancerogenicità per l'uomo.

Vi sono, poi, evidenze scientifiche che dimostrano come i bambini presentino, rispetto agli adulti, una maggiore vulnerabilità nei confronti dell'inquinamento atmosferico a causa di caratteristiche comportamentali, fisiologiche e correlate alla relativa immaturità di organi ed apparati specifica dell'età infantile. Recenti studi epidemiologici suggeriscono che diverse malattie dell'infanzia - fra queste l'asma, le allergie e le infezioni delle vie respiratorie - abbiano origine in epoca prenatale o nei primi mesi di vita: l'esposizione cronica a sostanze tossiche e all'inquinamento atmosferico, in queste fasi, è potenzialmente in grado di determinare conseguenze sullo stato di salute di una persona per il resto della propria vita.

L'asma, in particolare, è una delle malattie croniche infantili più diffuse nel mondo; sebbene non sia chiaro il grado di associazione tra esposizione a livelli diversi di concentrazione degli inquinanti in aria ed insorgenza di asma, è ben accertato (HEI 2010) il legame tra l'esposizione all'inquinamento atmosferico ed episodi di esacerbazione dell'asma.

La conoscenza delle concentrazioni degli inquinanti nei contesti urbani, in genere densamente abitati, assume, quindi, un ruolo prioritario per la salute dei cittadini, oltre che per la tutela della qualità della vita e dell'ambiente. L'esame dei processi di formazione e di diffusione degli inquinanti, unito alla valutazione dei loro trend temporali e degli effetti sulla salute e sugli ecosistemi, costituiscono le azioni propedeutiche e necessarie per intraprendere un percorso di progressivo miglioramento della qualità dell'aria e di politiche conseguenti.

In anni recenti (2016), sull'area urbana e portuale/industriale di Ravenna, è stato realizzato un primo studio (S.In.A.T.Ra. I) con l'obiettivo di valutare gli inquinanti più significativi prodotti dalle principali sorgenti di inquinamento (traffico veicolare, riscaldamento domestico, industria, porto) nel periodo 2004-2013 ed effettuare una valutazione epidemiologica degli effetti sulla salute della popolazione residente nell'area urbana del comune di Ravenna, con riferimento agli esiti della gravidanza e alla popolazione di età superiore a 15 anni. I risultati dello studio S.In.A.T.Ra.I hanno evidenziato, per l'area urbana di Ravenna, una situazione non particolarmente critica in termini di impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute dei residenti adulti. In questo quadro - generalmente buono - è tuttavia emerso un rischio maggiore per alcune patologie in relazione ai più alti livelli di esposizione riferiti ad alcune fonti inquinanti (traffico, porto).

Nel 2018 è stato avviato un ulteriore studio, denominato S.In.A.T.Ra. II, per approfondire e aggiornare le evidenze ed i risultati osservati estendendo il periodo di valutazione al 2014 ÷ 2019 e focalizzando l'attenzione su *esposizione ad inquinanti atmosferici e l'incidenza di patologie respiratorie in età infantile* (ovvero fino ai 15 anni), una fascia di popolazione non considerata in S.In.A.T.Ra. I.

2. OBIETTIVI PROGETTUALI E METODOLOGIA DELL'INDAGINE

L'obiettivo generale del progetto è proseguire nella valutazione di dettaglio dello stato della qualità dell'aria nell'area, dando continuità a quanto già effettuato in S.In.A.T.Ra I, e valutare l'impatto sullo stato di salute della popolazione in età infantile.

Lo studio prende come riferimento l'area già definita in S.In.A.T.Ra I ed è strutturato sulle tre linee progettuali, schematizzate in figura 1.

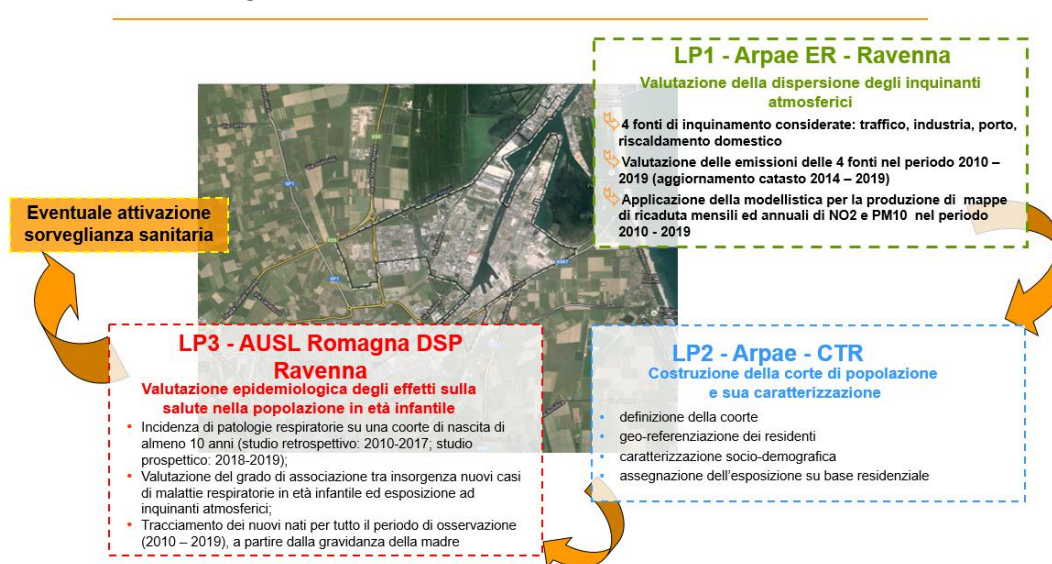


Figura 1 – Linee progettuali S.In.A.T.Ra II

➔ Linea progettuale 1 – Monitoraggio ambientale

La linea progettuale 1 – in capo al SSA di APA Est - ha l'obiettivo di valutare gli impatti - in termini emissivi ed immissivi - per il decennio 2010 – 2019, di: traffico veicolare, riscaldamento domestico, area industriale, area portuale ovvero i fattori di pressione ritenuti più significativi sul comparto atmosferico dell'area urbana e periurbana di Ravenna.

A valle della valutazione degli impatti immissivi di NO₂ e PM₁₀, sono prodotte mappe di isoconcentrazione delle medie mensili ed annuali dei due inquinanti utilizzate per stimare l'esposizione, nello specifico della popolazione in età infantile.

L'attività di elaborazione e ricostruzione delle concentrazioni medie mensili ed annuali degli inquinanti è realizzata utilizzando un modello di dispersione atmosferica (ADMS-Urban) gaussiano avanzato. E' questa la linea progettuale oggetto del presente elaborato e di seguito descritta con maggior dettaglio.

➔ Linea progettuale 2 – Costruzione della coorte e sua caratterizzazione

Prevede la costituzione – da parte del Dipartimento di Sanità Pubblica - della coorte di popolazione, con la caratterizzazione in termini di esposizione agli inquinanti atmosferici e di distribuzione spaziale dei fattori socioeconomici. Per la definizione della coorte è identificato un campione rappresentativo di bambini, nati nel Comune di Ravenna dal 2010, da madri residenti, durante tutta la gravidanza, entro l'area del dominio indagato. Per ciascun bambino è prevista la registrazione della storia residenziale e la valutazione dell'esposizione in relazione alla storia residenziale, così da indagare la relazione funzionale tra residenza dei bambini e stima delle concentrazioni degli inquinanti (NO₂, PM₁₀).

➔ Linea progettuale 3 – Valutazione epidemiologica degli effetti sulla salute

Questa ultima linea progettuale effettua una valutazione epidemiologica degli effetti sulla salute in relazione ai gradienti di esposizione, stimando l'incidenza di patologie respiratorie mediante l'associazione tra insorgenza di nuovi casi di malattie respiratorie in età infantile ed esposizione ad inquinanti atmosferici. Tale associazione è indagata attraverso l'applicazione di modelli statistici per il calcolo di indicatori di rischio, correggendo per i possibili fattori confondenti.

3. DOMINIO DI CALCOLO

Il dominio di calcolo, rappresentato in figura 2, è un quadrato di dimensioni 15 km x 15 km (225 km²), avente come coordinate del vertice Sud Ovest:

x = 749657 e

y = 919178 nel sistema UTM 32.

La griglia è costituita da un reticolo di passo 300 m, per un totale di 2500 celle.

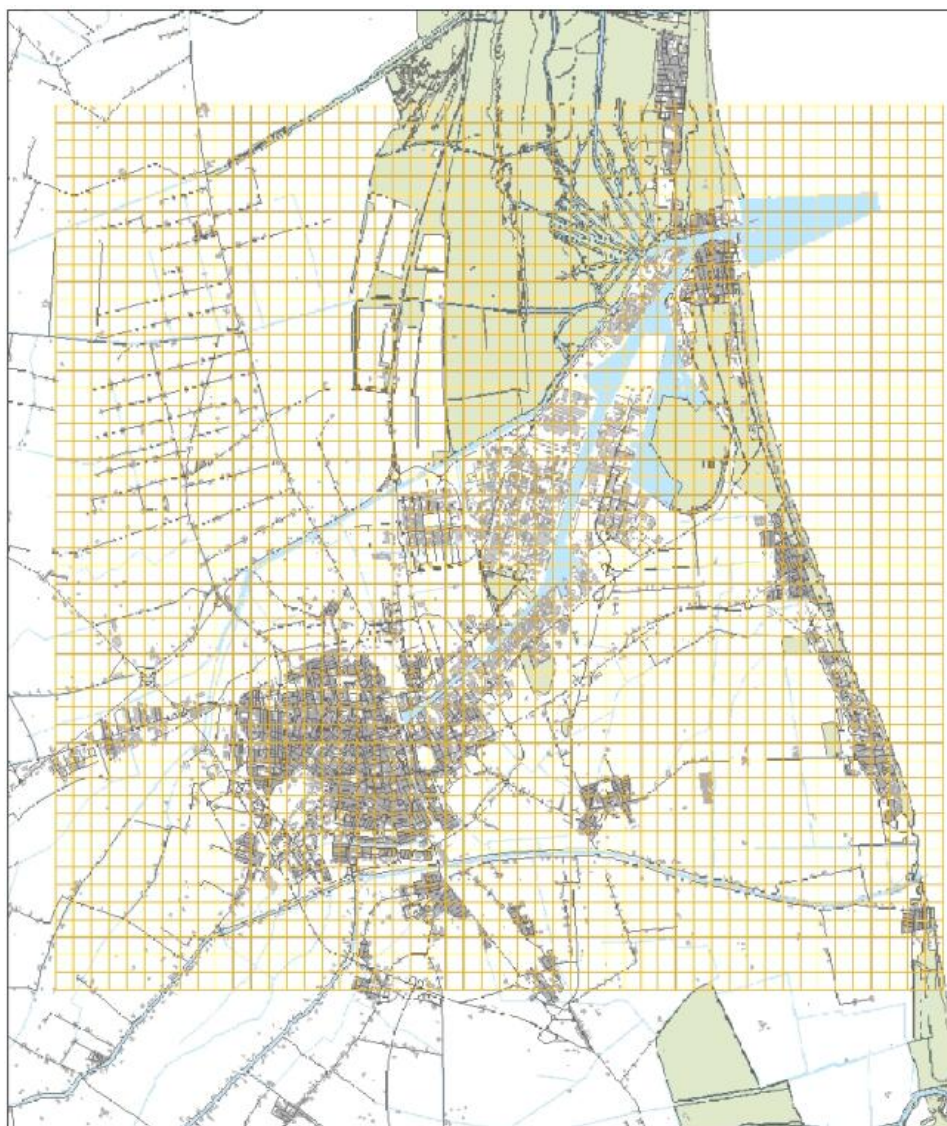


Figura 2 - Dominio di calcolo del progetto

Lo studio valuta:

- le concentrazioni medie annuali e mensili relative al periodo 2014-2019 per ciascun macrosettori e per gli inquinanti considerati (PM10 e NO₂);
- in quale percentuale i diversi macrosettori contribuiscono alle concentrazioni dei vari inquinanti in tutto il dominio di calcolo a partire dai risultati delle simulazioni condotte.

4. METODOLOGIA DI CALCOLO DELLE EMISSIONI PER LE DIVERSE SORGENTI

Per la stima delle emissioni è stata seguita la metodologia prevista dal progetto CORINAIR (COoRdination-Information-AIR), finalizzato alla raccolta ed all'organizzazione di informazioni coerenti sulle emissioni in atmosfera nella Comunità europea.

Per alcuni anni - per i quali erano già disponibili informazioni di dettaglio - è stato compilato l'inventario delle emissioni utilizzando l'approccio "bottom-up": partendo da dettagliate informazioni di input sulla localizzazione e sulla distribuzione spaziale delle emissioni (e non solo sulla loro entità complessiva), è stato possibile effettuare una stima accurata.

Le emissioni di questi anni sono state prese come riferimento e a partire da queste - utilizzando delle opportune variabili *proxy* - sono state stimate le emissioni delle altre annualità, come spiegato più in dettaglio al capitolo 5.

4.1 - Traffico veicolare

Per la valutazione delle emissioni da traffico veicolare l'annualità di riferimento è il 2014; per questo anno le emissioni di NO₂ e PM10 sono state calcolate utilizzando i dati di flusso di traffico nell'area urbana di Ravenna valutati dal *software* VISUM, della PTV DIVISION®. Si tratta di un modello previsionale che a partire da dati di input misurati associati al grafo stradale, è in grado di simulare i flussi veicolari sul grafo stesso. Per passare dai flussi veicolari totali ai flussi delle diverse tipologie di veicoli, sono stati utilizzati i risultati di uno studio condotto dal Comune di Ravenna con specifiche interviste.

Le strade sono state distinte in:

→ strade comunali, a loro volta suddivise in:

- *strade del centro*, ovvero strade composte da archi stradali caratterizzati da una significativa presenza di autovetture e mezzi a due ruote (motocicli, ciclomotori e biciclette) e da un basso traffico di mezzi pesanti;
- *strade della periferia*, dove transitano pochi mezzi a due ruote ed un numero più significativo di mezzi pesanti e autovetture;

→ e strade statali per le quali la distribuzione percentuale dei diversi tipi di veicoli usata è quella prodotta dalle campagne di rilevamento del traffico effettuate dalla Regione ed elaborate da Arpa per il calcolo delle emissioni del catasto regionale delle emissioni (INEMAR).

Ad ogni tronco stradale sono stati, quindi, associati i flussi dei diversi tipi di veicoli calcolati tenendo conto della suddivisione percentuale nei vari tipi di veicoli del parco circolante.

A titolo esemplificativo, in figura 3 sono rappresentate le strade statali e la classificazione delle strade comunali (ovvero la suddivisione in strade del centro o di periferia) in base alla composizione del parco circolante nel 2014 (fonte ACI).

Tenendo conto della distribuzione percentuale del parco veicolare nelle diverse tipologie di veicoli, del tipo di strada e del flusso di autovetture stimate da VISUM, sono stati calcolati - per l'anno 2014, nell'ora di punta (fascia oraria 7 ÷ 9) - i flussi veicolari associati ad ogni tronco (figura 4).

Per il 2015 e il 2017 sono stati considerati gli stessi flussi (numero di veicoli) ma le emissioni sono state calcolate "attualizzando" la composizione del parco auto al 2015 e al 2017 (dato ACI).

Infatti, i veicoli, durante il loro funzionamento, hanno emissioni inquinanti diverse che dipendono da vari fattori: la tipologia e la cilindrata del veicolo, l'anno di immatricolazione (soprattutto in relazione alle normative concernenti la riduzione dei gas di scarico), il combustibile utilizzato e il ciclo di guida del veicolo. In funzione di queste caratteristiche, i veicoli sono raggruppati in categorie, ognuna identificata da uno specifico fattore di emissione.

Il set di fattori di emissione (FE) per il calcolo delle emissioni di NOx e PM10 deriva dall'applicazione della metodologia europea CORINAIR che, per il traffico veicolare, si basa sul modello COPERT.

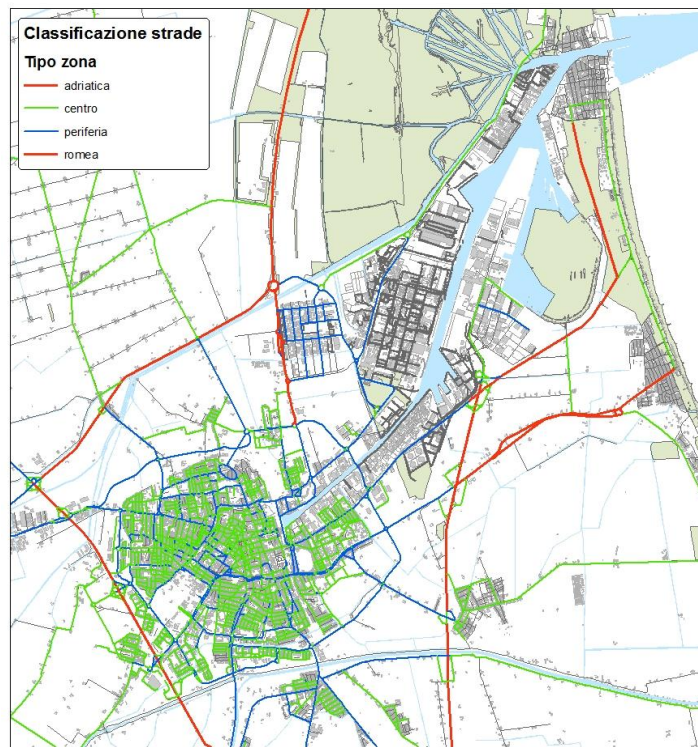


Figura 3 – Strade statali (rosse) e classificazione delle strade comunali (centro/periferia) effettuata in base alla composizione del parco circolante

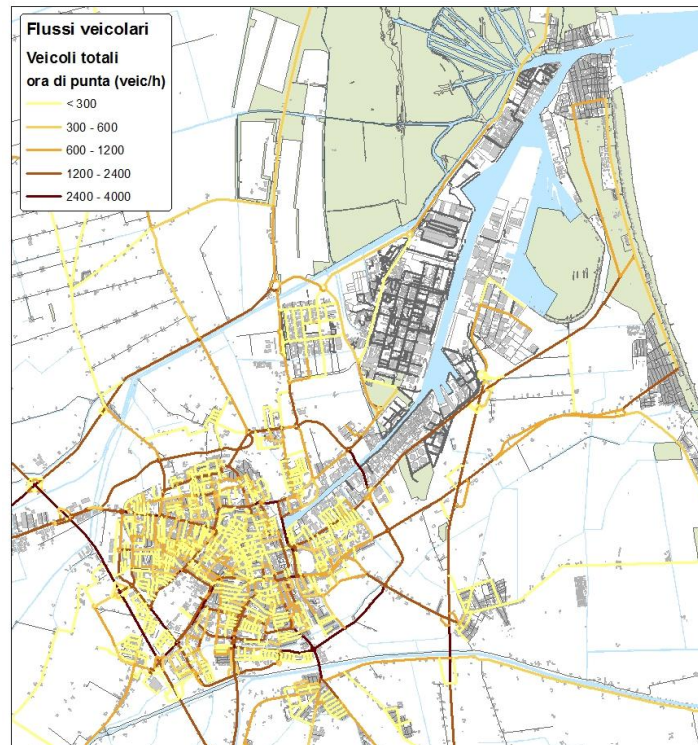


Figura 4 - Flussi veicolari nell'ora di punta (veicoli/ora)

Nell'area urbana di studio sono state classificate tre zone con possibili diverse condizioni di percorrenza (ciclo di guida) e caratterizzate da fattori di emissione differenti, classificazione che corrisponde a quella già usata nella determinazione dei flussi veicolari dei singoli archi stradali:

- Centro storico, dove sono presenti strade con velocità medie di percorrenza di 30 km/h;
- Zone periferiche, dove le velocità medie di percorrenza sono di circa 50 km/h;
- Zone extraurbane (S.S. Adriatica e S.S. Romea), con strade statali con velocità medie di percorrenza maggiori o uguali a 70 km/h.

Ad ogni arco stradale sono stati attribuiti:

- la condizione/ciclo di guida,
- il flusso di veicoli, suddiviso per categoria,

e, applicando lo specifico fattore di emissione, è stata calcolata l'emissione di PM10 e NOx nella fascia oraria di punta del mattino (ore 7 ÷ 9). Le figure 5 e 6 indicano, con diversa colorazione, le emissioni stimate per ogni arco stradale considerato.

Si sottolinea che le emissioni di PM10 sono state ottenute sommando due componenti: l'*emissione exhaust* legata alla combustione del combustibile e quella *non-exhaust* generata "meccanicamente" durante il transito dei veicoli e dovuta all'usura dei freni, dei pneumatici e del manto stradale dipendente, principalmente, dal peso del veicolo in transito.

I tronchi stradali – e le relative emissioni - sono stati inseriti nel modello ADMS–Urban come sorgenti lineari. Il modello richiede, per caratterizzare la sorgente stradale, alcune informazioni:

- portata emissiva della strada, espressa in g/s per km
- elevazione della strada
- larghezza della strada e altezza di canyon.

Una delle caratteristiche del software ADMS–Urban è la capacità di tenere conto dell'effetto *street canyon*, ovvero del "confinamento" dell'emissione stradale esercitato da edifici alti situati ai lati della strada, qualora venga fornita al modello l'altezza degli edifici che si affacciano in strada. Tale altezza, nello specifico, è stata ricavata dalla banca dati degli edifici del SIT del Comune di Ravenna, considerando gli edifici situati nella fascia di 10 m ai lati delle strade e calcolando (per ogni tronco stradale) l'altezza media degli edifici affacciati.

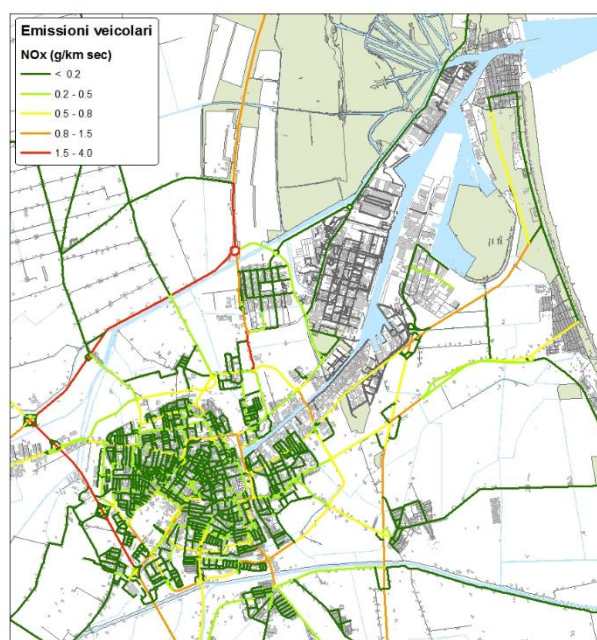


Figura 5 - Mappa di emissione di ossidi di azoto (g/s per km) – anno 2014

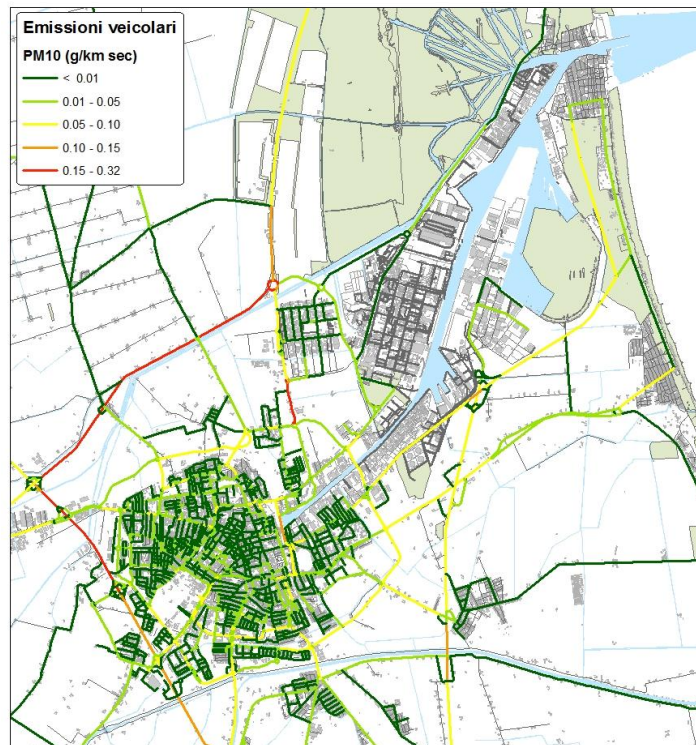


Figura 6 - Mappa di emissione di particolato PM10 (g/s per km) – anno 2014

Le curve di variabilità del flusso di traffico oraria e settimanale sono le stesse del regime di traffico di Sinatra I (figura 7) e si basano su rilievi effettuati da Arpae Ravenna (per le strade interne al centro urbano) e dalla Regione Emilia – Romagna (per le strade statali). Per le sole strade di centro e di periferia è stata ipotizzata una riduzione del traffico del 25% nei mesi estivi (da Giugno a Settembre). In particolare, la figura 7 riporta i profili del flusso veicolare orario utilizzati nel modello per le strade interne al centro urbano (grafico a sinistra) e per le statali Romea e Adriatica (grafico a destra) e relativi ai giorni tipici feriali, prefestivi e festivi.

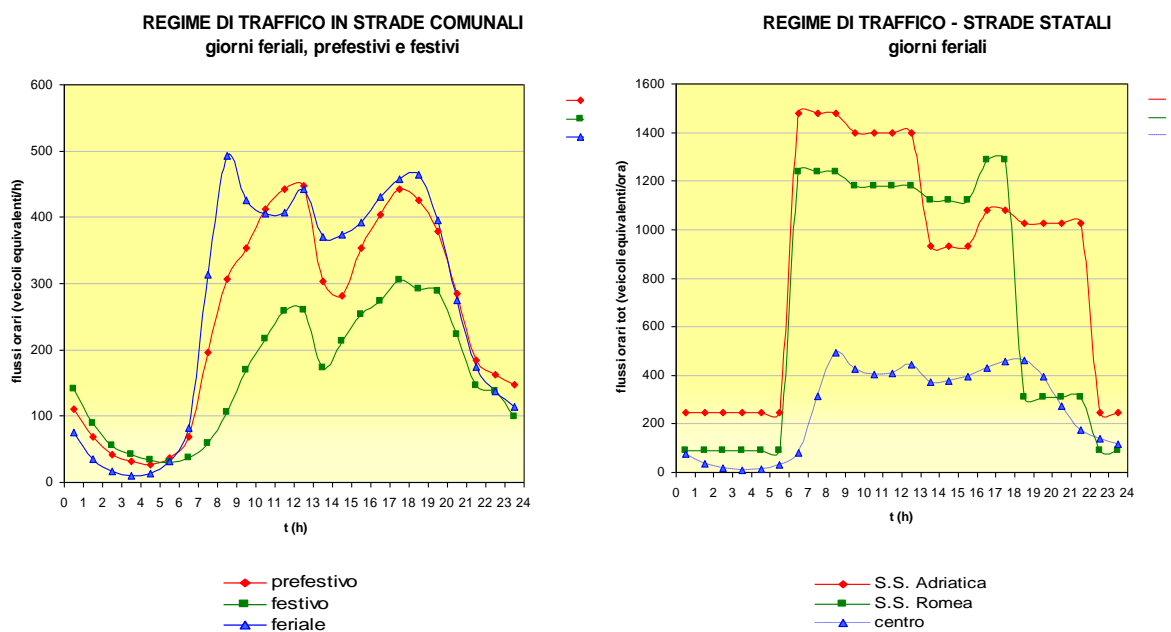


Figura 7 - Regime di traffico nelle strade comunali e statali in giorni tipici feriali, prefestivi e festivi

4.2 - Riscaldamento domestico

La stima delle emissioni relative a questo settore per gli anni 2015 e 2017 è stata effettuata a partire dalla quantità di combustibile impiegata nel Comune di Ravenna, riportata nel database INEMAR.

Nello specifico sono state considerate le emissioni derivanti dalla combustione di:

- metano,
- GPL,
- gasolio e
- biomasse (legna e similari).

L'inventario delle emissioni da riscaldamento domestico si basa sul censimento delle sorgenti emissive effettuato per il progetto di Sinatra I dove, ad ogni impianto di riscaldamento era stata associata la georeferenziazione e il tipo di combustibile utilizzato. In aggiunta, per georeferenziare le emissioni sul territorio, è stato utilizzato il file con l'ubicazione e la volumetria degli edifici presenti nell'area.

Pertanto, le sorgenti di emissione considerate sono tutte le caldaie a metano, GPL, gasolio, e biomassa censite nell'area urbana di Ravenna. I consumi di metano sono stati associati a più di 20.000 utenze ubicate all'interno della griglia di studio e rappresentano, complessivamente, circa il 60% dei civici che vi ricadono. I restanti civici (40%) corrispondono prevalentemente ad edifici non riscaldati (es. servizi, garage) e ad edifici adibiti ad attività industriali, le cui emissioni sono state considerate nel macrosettore "industria".

L'informazione relativa al riscaldamento del settore residenziale, pertanto, è ad un buon livello di completezza e rappresenta una solida banca dati che consente di effettuare considerazioni rappresentative della realtà ravennate.

Per stimare le emissioni di inquinanti da caldaie domestiche sono stati utilizzati i FE del database INEMAR (riferiti alle caldaie residenziali con potenza inferiore a 50 kW) e il combustibile consumato. Le emissioni delle singole caldaie, ricadenti in ciascuna cella di dimensioni (300 x 300) m del dominio, sono state sommate ricavando l'emissione areale totale di cella e si è considerata un'altezza media di emissione/cella di 10 m.

In tabella 1, per il 2015 e il 2017, sono riportate le emissioni comunali di PM10 ed NOx per le diverse tipologie di combustibile, mentre le figure 8 e 9 mostrano un esempio – riferito all'anno 2015 - delle mappe di emissione, ovvero delle mappe che illustrano i carichi emissivi annuali (in ton/anno) degli inquinanti considerati per ogni cella della griglia di input.

Le mappe di emissione mensile, relative ai diversi anni, sono state calcolate considerando i *gradi giorno*¹. Infatti, le emissioni di inquinanti delle caldaie domestiche variano in funzione del quantitativo di combustibile utilizzato, ovvero della richiesta di riscaldamento (fabbisogno termico) e, quindi, della temperatura ambientale esterna. La "modulazione" mensile è stata ricavata riferendosi all'andamento temporale dei gradi giorno, definiti come la somma, estesa a tutti i giorni del periodo di accensione del riscaldamento (a Ravenna 15 ottobre – 15 aprile), delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera:

$$GG = \sum_{e=1}^n (T_0 - T_e)$$

dove: n = numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento (a Ravenna 182 giorni);
T₀ = temperatura ambiente convenzionale (in Italia 20° C – DPR n.412/93)

¹ La norma UNI EN ISO 15927-6:2008 - versione ufficiale della norma europea EN ISO 15927-6 (edizione settembre 2007) - specifica la definizione, il metodo di calcolo e il metodo di presentazione dei dati relativi alle differenze di temperatura cumulate (gradi giorno), utilizzate per stimare l'energia utilizzata per il riscaldamento degli edifici. Tali dati sono generalmente espressi in gradi ora o gradi giorno ed indicati come "gradi ora di riscaldamento" o "gradi giorno di riscaldamento".

T_e = temperatura media esterna giornaliera tale per cui $T_e < T_0$

Combustibile	NOx (t/a)		PM10 (t/a)	
	2015	2017	2015	2017
Metano	123.99	87.00	0.71	0.50
GPL	0.11	0.12	0.01	0.01
Legna e similari	9.63	27.41	52.04	141.51

Tabella 1 - Emissioni comunali di PM10 ed NOx derivanti dall'impiego delle diverse tipologie di combustibile
(Fonte: INEMAR 2015 e 2017)

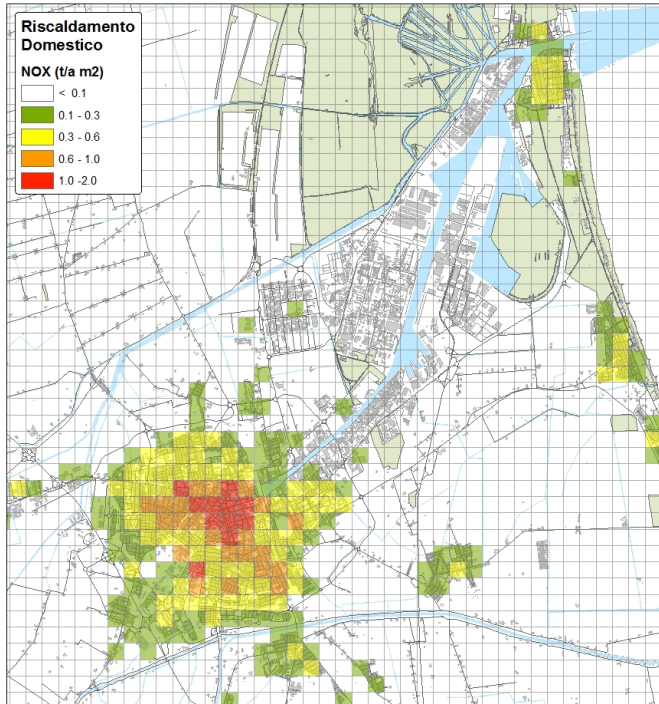


Figura 8 – Esempio di mappa di emissione degli ossidi di azoto
Anno 2015

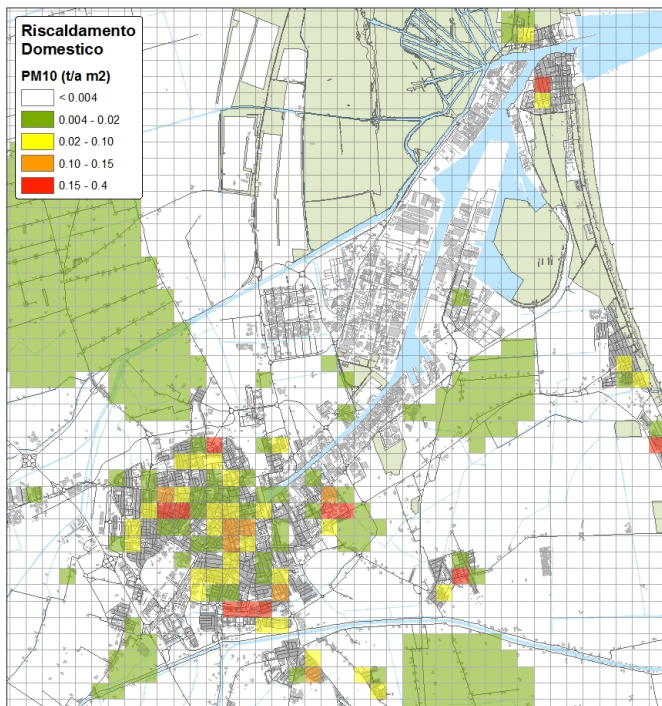


Figura 9 – Esempio di mappa di emissione del particolato PM10
Anno 2015

4.3 - Sorgenti industriali

Il settore industriale ravennate è caratterizzato da produzioni che, seppur diversificate, hanno avuto come denominatore comune la chimica, la produzione di energia e la fornitura di servizi ambientali destinati anche alle aziende stesse.

Le principali attività produttive si sviluppano in una stretta fascia a destra e a sinistra del Canale Candiano, da Ravenna città fino allo sbocco a mare.

Le emissioni industriali sono soggette all'autorizzazione da parte dell'autorità competente, autorizzazione che riporta i valori massimi di concentrazione di inquinanti che possono essere emessi, in ottemperanza alle norme vigenti, e da cui si può ricavare una stima delle massime emissioni ammissibili. Si tratta di un'informazione utile ma poco rappresentativa della realtà poiché le emissioni effettive sono molto spesso significativamente inferiori ai massimi consentiti.

Per ovviare a questo problema, è stato calcolato per ciascun inquinante un fattore correttivo ("fattore di riduzione, FR"²) caratteristico dell'attività dell'impianto, da applicare alle emissioni autorizzate. Il fattore di riduzione, applicato al dato autorizzato, consente una stima dell'emissione "ridotta" che meglio approssima la realtà.

La base dati per la stima delle emissioni industriali, autorizzate e "ridotte", è strutturata nel database GIECA (Gestione Informatica Emissioni, Controlli e Autocontrolli), un database dedicato alla sistematica raccolta dei dati contenuti nei provvedimenti autorizzativi delle aziende della Provincia di Ravenna e dei risultati dei controlli Arpa e degli autocontrolli effettuati dalle stesse Aziende³ in ottemperanza alla normativa vigente.

In particolare, nel presente studio sono state considerate le emissioni in atmosfera delle aziende a "non ridotto inquinamento atmosferico" che risultavano autorizzate negli anni 2015 e 2017.

Le emissioni convogliate sono state inserite come sorgenti puntuali e, per ognuna, sono stati indicati i parametri necessari alla loro definizione:

- coordinate del camino;
- altezza e diametro del camino;
- temperatura e velocità di uscita dei fumi;
- tassi di emissione degli inquinanti in g/s.

A titolo di esempio, nella mappa di figura 10 è riportata l'entità dell'emissione annuale di NO₂ (anno 2015) per le emissioni convogliate: i cerchi sono di dimensioni proporzionali al carico emissivo puntuale, espresso in tonnellate annue. Analogamente, nella mappa di figura 11, sono rappresentate le emissioni di PM10.

² Fattore di riduzione dell'emissione (FR_{i,j}) ottenuto come 98° percentile dei rapporti tra il flusso massico giornaliero misurato (Φ_{mMi}) e quello massico autorizzato (Φ_{mAi}), questo per ogni inquinante j: $FR_{i,j} = (\Phi_{mMi,j}) / (\Phi_{mAi,j})$

dove: $\Phi_{mMi,j}$ = Portata volumetrica misurata della emissione i * Concentrazione misurata dell'inquinante j

$\Phi_{mAi,j}$ = Portata volumetrica autorizzata della emissione i * Concentrazione autorizzata dell'inquinante j

³ La procedura di inserimento degli autocontrolli da parte delle aziende è, al momento, concordata e volontaria. E' uno strumento per analisi statistiche e non sostituisce altre procedure di registrazione previste dalla normativa.

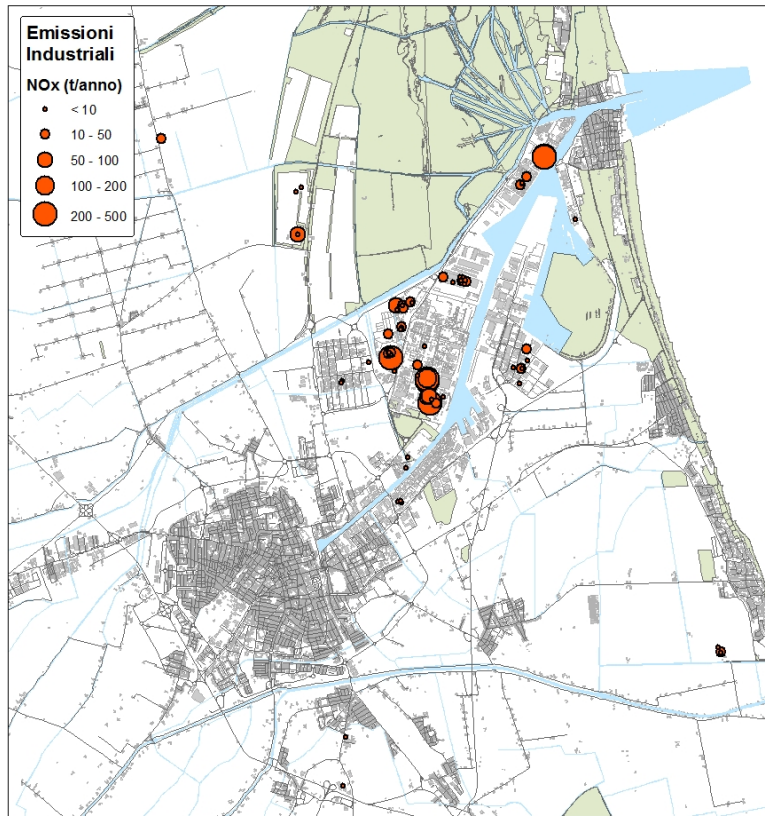


Figura 10 - Mappa di emissione di NO₂ – Anno 2015

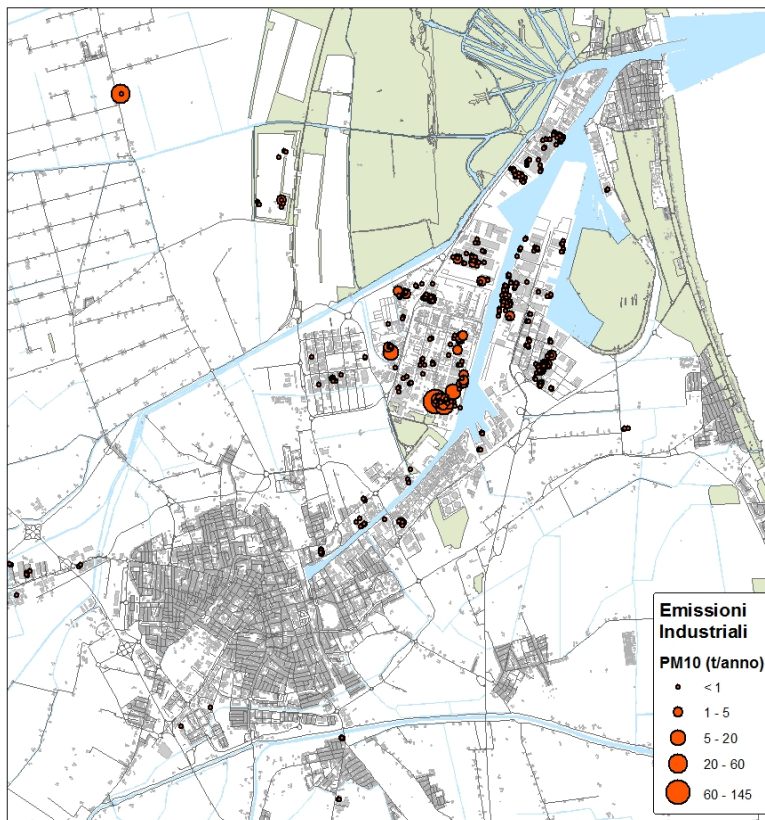


Figura 11 - Mappa di emissione di PM10 – Anno 2015

4.4 – Attività portuali

Il Porto di Ravenna penetra all'interno della città sviluppandosi per oltre 11 km di lunghezza, da Porto Corsini fino alla Darsena di città.

Nel tempo si è trasformato da porto industriale a porto prevalentemente commerciale, caratterizzandosi nello sviluppo della cantieristica navale e nel trasporto delle rinfuse solide, che costituiscono circa il 66% del traffico portuale.

Nel porto canale sono presenti 22 terminal privati, 14 km di banchine operative e dotazioni infrastrutturali importanti: la capacità complessiva dei magazzini è di oltre 600.000 metri quadri, quella dei piazzali di circa 1.324.000 metri quadri e, per serbatoi/silos, di più di 1.250.000 metri cubi.

Il porto di Ravenna, uno dei principali d'Italia, movimentata annualmente oltre 24 milioni di tonnellate di merci (quasi 26 milioni e 500.000 tonnellate all'anno nel periodo 2017-2019⁴).

L'area portuale si configura come punto di arrivo di svariate tipologie di prodotti (petroliferi, fertilizzanti, cerealicoli, liquidi chimici, alimentari, siderurgici, ecc.), trasportate poi via terra utilizzando i collegamenti ferroviari e viari.

Nei 14 chilometri di banchine sono operative le relative strutture di carico, scarico e movimentazione delle merci, nonché i piazzali e magazzini per lo stoccaggio posti anche a ridosso delle banchine.

La presenza nell'area portuale di Ravenna di un così rilevante numero di depositi di materiale all'aperto e di molte attività di scarico, trasporto, rimaneggiamento e stoccaggio di merci polverulente costituisce una sorgente importante di particolato diffuso.

Anche il traffico marittimo concorre alle emissioni in atmosfera durante le diverse modalità operative dei mezzi navali in porto: fasi di manovra, di ormeggio e le attività di traino delle navi da parte dei rimorchiatori.

Una quantità significativa di particolato atmosferico è di tipo *diffuso*: non deriva da emissioni convogliate ma dalla dispersione di materiale granulare esposto all'aria e/o sottoposto a movimentazione/rimaneggiamento. Sorgenti di particolato diffuso possono quindi essere le strade non asfaltate o poco pulite, i cumuli di stoccaggio all'aperto di materiale polverulento e le operazioni ad essi connesse. Per tali sorgenti, il processo di emissione di particolato è riconducibile principalmente

- a polverizzazione e abrasione del materiale superficiale dovuta all'applicazione di forze meccaniche (pale, ruote, ...);
- a erosione di materiale superficiale per azione di correnti turbolente d'aria.

Per censire le più significative fonti di emissione di particolato diffuso nell'area portuale sono state compilate - per gli anni 2016 e 2018 - le schede anagrafiche relative a circa 40 aziende (anche limitrofe al porto, caratterizzate da lavorazioni e/o movimentazioni di merci polverulente) che riportavano, inoltre, informazioni specifiche su:

- dotazioni strutturali, di mezzi, impianti, magazzini e sistemi di stoccaggio in numero e capacità, superfici coperte e scoperte ecc.;
- sistemi già adottati per il contenimento delle emissioni diffuse;
- lavorazione/movimentazione dei prodotti singoli o per famiglie di prodotti.

L'attività produttiva di ogni azienda è stata poi esaminata e, effettuando sopralluoghi, sono state identificate le sorgenti di emissione di particolato, con particolare attenzione alla caratterizzazione dei cumuli di materiale all'aperto. I dati, raccolti e sistematizzati, sono stati utilizzati per la stima delle emissioni di particolato diffuso emesso per effetto delle attività di stoccaggio, rimaneggiamento e

⁴ Fonte: Autorità di sistema portuale del Mare Adriatico centro-settentrionale <http://www.port.ravenna.it/statistiche-storiche-del-porto-di-ravenna/>

trasporto di materiale polverulento in ambito portuale. La metodologia utilizzata è mutuata dal manuale dell'EPA⁵, che raccoglie i fattori di emissione.

Le sorgenti di emissione considerate nell'area portuale ravennate sono:

1. le operazioni di sbarco/imbarco del carico tramite gru con benna (sorgente di tipo areale);
2. il trasporto merci con camion in ambito portuale (sorgente di tipo lineare);
3. i cumuli di stoccaggio all'aperto (sorgente di tipo areale).

1. Lo **sbarco** di un prodotto può avvenire utilizzando tecniche diverse, a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche del prodotto da scaricare, delle tecnologie disponibili e di considerazioni di carattere economico.

Nell'area portuale di Ravenna la tecnologia di sbarco più diffusa è basata sull'utilizzo di gru fisse o mobili dotate di benna. La diffusione di questa tecnologia è giustificata dalla necessità di disporre di sistemi flessibili, adatti per lo sbarco di categorie molto diverse di prodotti. Le benne, sebbene offrano i vantaggi di consentire alte rese orarie e di poter essere impiegate anche con merci soggette ad impaccamento (come farine e fertilizzanti), hanno lo svantaggio di causare notevole polverosità, sia durante il tragitto della benna da fondo stiva a banchina, sia durante lo scarico in tramoggia⁶. Inoltre, rispetto ai sistemi automatizzati, l'emissione dipende criticamente dalle modalità d'uso del sistema da parte dell'operatore addetto.

A seguito di una ordinanza dell'Autorità Portuale (N°4/08), a partire dal 2008 molte ditte si sono dotate di tramogge aspirate per lo scarico delle merci classificate come molto polverose, diminuendo così l'emissione di polveri legata a questa attività.

2. Le emissioni generate dai **veicoli in transito** su una strada dipendono dal processo di combustione che alimenta il veicolo (componente "exhaust"), dai processi di erosione ed usura dei pneumatici, dei freni e del manto stradale (componente "non exhaust") e dal quantitativo di materiale presente sul manto stradale che per effetto del transito dei veicoli viene risospeso e rimesso in circolo. Nella realtà portuale, dove la presenza di materiale polverulento sul manto stradale è significativa, questo ultimo contributo ha un peso rilevante. Nonostante alcune precauzioni adottate da alcune aziende per ridurre questo apporto (lavaggio delle ruote dei camion in uscita, pulizia delle strade interne,..), la risospensione di particolato ad opera dei camion circolanti continua ad essere un'importante fonte di emissione.

La circolazione di camion in area portuale è connessa al trasporto di materiale dalla banchina di sbarco al sito di stoccaggio, ed anche al conferimento in ingresso/uscita di materie prime e prodotti dagli impianti.

3. La presenza di **cumuli di stoccaggio all'aperto** genera polverosità nelle fasi di formazione e rimaneggiamento dei cumuli, ma anche per il transito di mezzi operativi nei pressi e sui cumuli e per l'azione di erosione del vento sui cumuli non coperti.

Le emissioni dovute alle attività di sbarco di materiale alla rinfusa e agli stoccaggi all'aperto sono state considerate, ai fini delle simulazioni modellistiche, come sorgenti di griglia (areali), mentre le strade in cui avviene il trasporto merci con camion sono state modellizzate come sorgenti di tipo lineare.

⁵ Manuale EPA - AP - 42 - V edizione, volume I, capitolo 13 "Miscellaneous sources"

⁶ La tramoggia è un contenitore a forma di tronco di piramide o di cono capovolto, munito di apertura sul fondo, utilizzato per raccogliere dall'alto materiali, per poi scaricarli verso il basso.

Le simulazioni sono state effettuate per le singole sorgenti, ognuna caratterizzata da una propria modulazione temporale (funzione degli orari in cui vengono effettuate le attività) e dalle condizioni meteorologiche dell'area (gli andamenti mensili di umidità e velocità del vento).

In particolare, le sorgenti sono state suddivise in due gruppi, simulati separatamente:

- sorgenti le cui dinamiche dipendono prevalentemente dalle variazioni di umidità e dagli orari di attività delle aziende (ne fanno parte: attività di formazione e rimaneggiamento dei cumuli e di trasporto merci);
- sorgenti le cui dinamiche dipendono prevalentemente dalle variazioni di velocità del vento e non necessariamente legate ad orari specifici di attività delle aziende (lo sbarco/imbarco di materiale e l'erosione dei cumuli).

Di seguito, a titolo di esempio, si riportano le griglie di emissione per l'anno 2016 relative alle emissioni dipendenti da umidità e temperatura (figura 12) e alle emissioni prevalentemente legate all'azione eolica (figura 13).

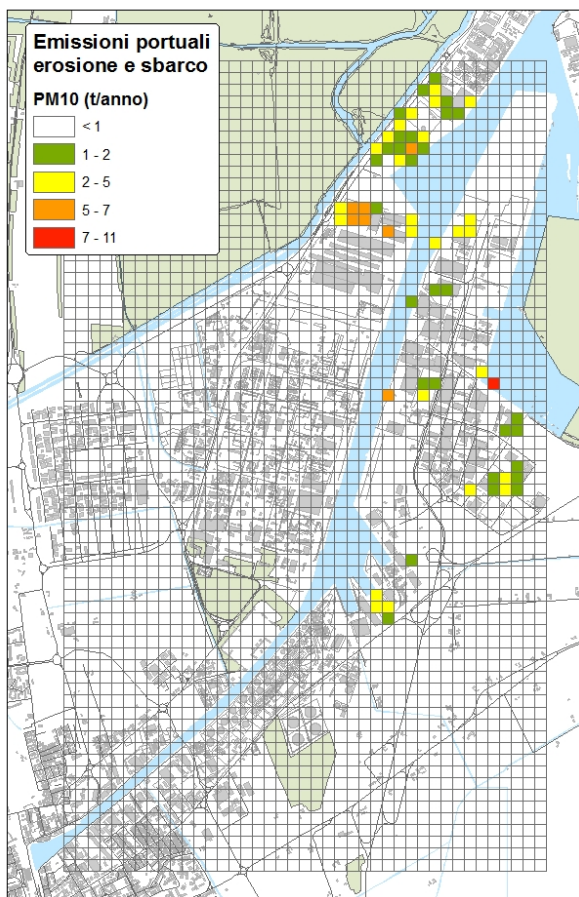


Figura 12 - Emissione annuale di PM10 da operazioni di sbarco ed erosione eolica (areale)
Anno 2016

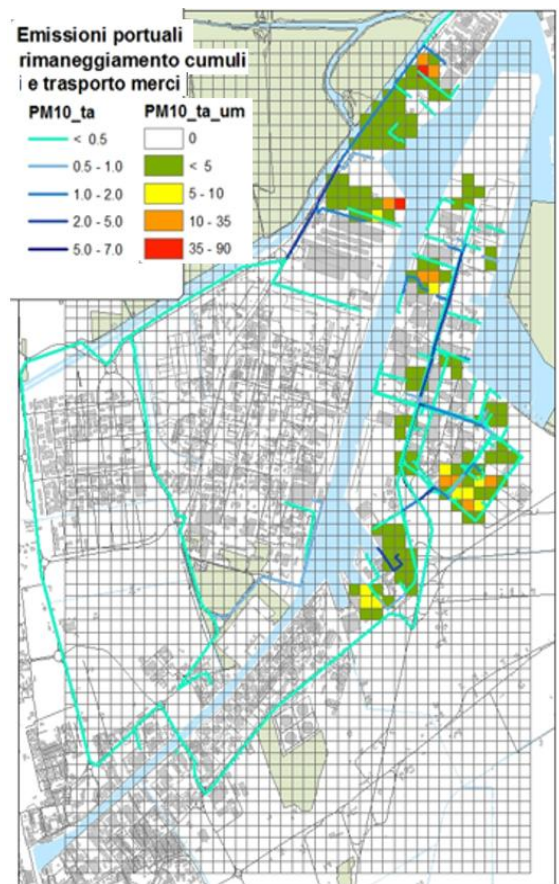


Figura 13 - Emissione annuale di PM10 da operazioni di rimaneggiamento cumuli (areale) e trasporto merci (lineare)
Anno 2016

5. METODOLOGIA PER LA “STORICIZZAZIONE” DELLE EMISSIONI PER GLI ANNI 2014 – 2019

Il prodotto finale della linea progettuale 1 sono mappe mensili di concentrazione di PM₁₀ ed NO₂ nel dominio, per le singole macrosorgenti e per tutti gli anni dal 2014 al 2019.

E' stato perciò necessario valutare le diverse emissioni (dato di input al modello di dispersione) anche per gli anni per i quali non si avevano a disposizione informazioni di tipo puntuale descritte nel capitolo precedente.

Per estendere la stima delle emissioni dagli anni di riferimento all'intero periodo in studio (storicizzazione), sono state fatte alcune assunzioni quali/quantitative utili alla valutazione delle variazioni temporali delle macrosorgenti considerate nel dominio.

Le assunzioni e le valutazioni sono basate sulle informazioni disponibili raccolte e sono di seguito richiamate.

5.1 - Traffico veicolare

Per il traffico veicolare erano disponibili:

- gli inventari, relativi agli anni 2015 e 2017, della composizione del parco veicolare del comune di Ravenna (suddiviso per cilindrata ed alimentazione);
- i flussi di traffico - anno 2014 - nei diversi tronchi del grafo stradale urbano per quanto riguarda la viabilità.

Tenendo conto che la viabilità cittadina, nel periodo 2014 - 2019, non ha subito modifiche sostanziali, i flussi di traffico applicati a tutte le annualità si riferiscono a quanto disponibile per l'anno 2014.

I dati di input al modello (cambiando la meteorologia ogni anno) sono riportati in tabella 2.

Dal 2014 al 2016	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2015
Dal 2017 al 2019	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2017

Tabella 2 - Storicizzazione traffico veicolare

5.2 - Riscaldamento domestico

Per questo settore sono stati utilizzati i consumi di combustibile riportati nel database regionale INEMAR per: metano, gasolio, GPL e biomassa per gli anni 2015 e 2017.

Per gli anni non “coperti” dai dati dell'inventario, il consumo di combustibile è stato stimato in funzione dei *gradi giorno*, parametro che influenza direttamente il consumo di combustibile per il riscaldamento degli ambienti.

La disaggregazione del consumo sul territorio è stata calcolata utilizzando una relazione empirica⁷ fra il consumo di combustibile e due parametri descrittivi del territorio: la volumetria degli edifici e la popolazione residente per cella di censimento.

Il consumo di combustibile nelle celle (300x300 m) della griglia nel periodo considerato è stata quindi ricavato utilizzando una variabile proxy, funzione di queste due grandezze, secondo la relazione:

$$\text{proxy riscaldamento} = 0.098 * P + 0.903 * V$$

dove:

P è la popolazione residente nella cella e

V la volumetria degli edifici nella stessa cella.

⁷ Studio precedente: Righi et altri, 2013

5.3 - Sorgenti industriali

Le emissioni convogliate degli impianti industriali presenti nel dominio sono state stimate calcolando i fattori di riduzione e utilizzando il catasto disponibile nel database GIECA al 31/12/2015 e al 31/12/2017.

Le emissioni industriali ottenute a partire dai due inventari di riferimento (2015 e 2017) sono state utilizzate come dati di input al modello (cambiando la meteorologia ogni anno) per i seguenti periodi:

Dal 2014 al 2016	Database 2015
Dal 2017 al 2019	Database 2017

Tabella 3 - Storicizzazione sorgenti industriali

5.4 – Attività portuali

Informazioni di dettaglio sulle emissioni di questo settore sono disponibili per gli anni 2016 e 2018, quando è stato effettuato il censimento presso le aziende dell'area.

Nella "ricostruzione" del contributo alle emissioni di PM10 di questo settore, si è tenuto conto sia della posizione delle aree di stoccaggio di materiale all'aperto, censite nel 2018 in occasione dei sopralluoghi presso le aziende, sia dei quantitativi di merci alla rinfusa in ingresso/uscita dal porto. Per gli anni diversi dal 2016 e dal 2018, il dato utilizzato è quello fornito dall'Autorità Portuale e l'emissione di PM10 di questo settore nei diversi periodi è stato valutato secondo il seguente schema (tabella 4):

Dal 2014 al 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
Dal 2016 al 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
Dal 2018 al 2019	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2018

Tabella 4 - Storicizzazione sorgenti portuali

Nella tabella 5 si riporta la **sintesi** delle assunzioni che sottendono il calcolo delle emissioni per gli anni dal 2014 al 2019, suddivise per sorgente (**in grassetto gli inventari di riferimento**).

Periodo	Traffico	Riscaldamento domestico	Sorgenti industriali	Attività portuali
2014	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2014	Stima a partire da consumi tot comunali 2015	Database 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2015	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2014	Stima a partire da consumi tot comunali 2015	Database 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2016	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2014	Stima a partire da consumi tot comunali 2015	Database 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2017	Flussi di traffico 2017 e parco veicolare 2017	Stima a partire da consumi tot comunali 2017	Database 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2018	Flussi di traffico 2017 e parco veicolare 2017	Stima a partire da consumi tot comunali 2017	Database 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2018
2019	Flussi di traffico 2017 e parco veicolare 2017	Stima a partire da consumi tot comunali 2017	Database 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2018

Tabella 5 – Inventari utilizzati per la storicizzazione delle diverse macrosorgenti emissive

6. IL MODELLO DI DISPERSIONE

Il modello di dispersione atmosferica utilizzato è ADMS-(Advanced Dispersion Modelling System)-Urban – versione 3.2, un modello analitico stazionario avanzato di tipo gaussiano (con profilo verticale di concentrazione non-gaussiano in condizioni convettive) per la stima della dispersione degli inquinanti atmosferici.

Sviluppato in Gran Bretagna da un consorzio governativo ed industriale diretto da CERC (Cambridge Environmental Research Consultant), ADMS-Urban viene utilizzato diffusamente nel Regno Unito come “regulatory model” - ovvero come strumento riconosciuto per valutare l’efficacia delle politiche di riduzione dell’inquinamento atmosferico-, oltre ad essere riconosciuto ed utilizzato anche a livello internazionale per lo studio della dispersione degli inquinanti atmosferici.

ADMS-URBAN è stato implementato per stimare la diffusione in atmosfera degli inquinanti emessi sia in fase gassosa sia in forma di aerosol dal caso più semplice, come una singola sorgente puntuale o lineare, a quello più complesso rappresentato della realtà urbana. Le sorgenti trattate possono essere di tipo industriale, civile e di traffico stradale, trattate come punti, linee, aree, volumi o griglie. Il modello si integra facilmente con i sistemi informativi territoriali (GIS), in particolare con ArcView e MapInfo e permette, quindi, una rappresentazione cartografica delle elaborazioni realizzate.

Le potenzialità del programma, che lo rendono particolarmente idoneo per studi di questo tipo, sono:

- la presenza di un preprocessore meteo che calcola i parametri caratterizzanti lo strato limite sulla base di dati meteorologici di input;
- il collegamento diretto con un processore per la stima e dell’inventario delle emissioni;
- la possibilità di trattare contemporaneamente molteplici tipologie di sorgenti: fino a 1500 sorgenti industriali (puntuali, areali e di volume), 1500 lineari e 1 griglia con un massimo di 3000 celle;
- l’utilizzo del modello avanzato di dispersione con un profilo gaussiano in condizioni stabili e neutre ed un profilo verticale non gaussiano in condizioni instabili;
- la possibilità di simulare reazioni chimiche con NO_x , O_3 , VOC;
- moduli dedicati a valutare l’effetto indotto dalla presenza di situazioni di terreno complesso, street canyon (ovvero in quelle strade molto diffuse nei centri urbani, confinate da edifici di altezza significativa da entrambi i lati), building downwash;
- l’integrazione con sistemi GIS (Arcview, Mapinfo, Spatial A.).

L’innovazione consiste nella modalità con cui viene descritta la struttura dello strato limite. Infatti, la caratterizzazione del PBL non avviene attraverso le classi di Pasquill-Gifford, ma sfrutta una fisica più aggiornata per descrivere la stabilità dello strato limite atmosferico utilizzando parametri fisici, quali l’altezza dello strato limite z_i e la lunghezza di Monin-Obukhov L che permettono una descrizione senz’altro più realistica dei fenomeni di dispersione. Inoltre, nel caso di uno strato limite convettivo, il profilo verticale di concentrazione non è gaussiano: l’altezza a cui corrisponde il valore massimo di concentrazione tende a diminuire progressivamente, mentre aumenta l’altezza media del pennacchio. La dispersione verticale σ_z in strati limite convettivi viene quindi calcolata usando algoritmi non gaussiani. Per questi motivi, il modello ADMS-URBAN viene inserito nella categoria dei modelli operativi di tipo avanzato.

Il profilo di concentrazione simulato dal modello è un pennacchio gaussiano, in cui si tiene conto della riflessione attuata dal suolo e dallo strato d’inversione. Supponendo un’emissione continua e una situazione stazionaria nel tempo, la concentrazione C di un inquinante nella posizione $P = (x, y, z)$ ad ogni istante è data dall’equazione:

$$C = \frac{Q}{2u\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \left\{ e^{-\left(\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{-\left(\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{-\left(\frac{(z+2h-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{-\left(\frac{(z-2h-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)} e^{-\left(\frac{(z-2h+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right\}$$

dove:

Q: quantità emessa di inquinante;

σ_y e σ_z : coefficienti gaussiani di dispersione orizzontali e verticali;

u: velocità del vento lungo x;

h: altezza dello strato di inversione;

H_e : altezza effettiva di rilascio.

Quando la dispersione verticale è circa uguale all'altezza di rimescolamento, dal modello di campo vicino si passa al modello di campo lontano, in cui si suppone che la variazione verticale della concentrazione sia trascurabile e che la propagazione avvenga nel solo piano orizzontale.

Il modello, con i dati di concentrazione simulati, è in grado di generare due tipi di output: concentrazioni medie (annuali e mensili) su griglia e concentrazioni medie e orarie su punti ricettore.

7. DATI METEOROLOGICI

Una variabile fondamentale per la stima delle immissioni sono i dati meteorologici del territorio. ADMS-URBAN necessita di un set di dati meteorologici di input, che rielabora, attraverso un pre-processore meteorologico interno, per ricavare i valori delle variabili meteorologiche che influenzano la dispersione degli inquinanti e che sono utilizzate negli algoritmi usati dal modello.

La presenza di un pre-processore meteorologico permette massima flessibilità nelle variabili meteorologiche di input, che possono essere caricate direttamente attraverso un'apposita finestra del modello o immesse attraverso un file già esistente. I dati minimi richiesti dal modello sono la temperatura, la velocità e la direzione del vento ed i valori di una delle seguenti variabili:

- reciproco della lunghezza di Monin-Obukhov (1/L);
- calore sensibile superficiale;
- copertura nuvolosa.

I dati meteorologici inseriti possono essere di tipo statistico (viene specificata la frequenza con la quale si verificano le condizioni meteorologiche) o di tipo sequenziale (vengono indicati i valori orari che assumono le diverse variabili).

Le calme di vento (velocità del vento uguali a 0 o prossime a 0 m/s) sono trattate in modo particolare in quanto, in tale situazione, perde di significato la direzione del vento⁸. Il modello assume come direzione di provenienza del vento il valore dell'ultimo dato con velocità superiore a 0.75 m/s (soglia fissata da ADMS-URBAN per la calma di vento) e pone la velocità uguale a 0.75 m/s.

I dati meteorologici di input utilizzati dal modello ADMS-Urban possono essere misurati direttamente da una stazione presente all'interno del dominio oppure, in mancanza di questi, dati stimati da un modello meteorologico (es. modello Calmet). Indipendentemente dall'origine del dato, la copertura deve essere omogenea per l'intero periodo di simulazione.

Per il periodo considerato sono stati utilizzati i dati meteorologici di due stazioni presenti sul territorio; la stazione urbana di Ravenna, che si trova su un tetto, in Piazza dei Caduti, a 20 m dal suolo per:

- temperatura media oraria (°C);
- radiazione visibile media oraria (W/m²);

e la stazione collocata in area portuale in corrispondenza della centralina della qualità dell'aria di Porto San Vitale per:

- velocità media oraria vettoriale (m/s);
- direzione del vento media oraria vettoriale (°).

Di seguito sono riportati gli andamenti mensili delle temperature (media, minimo e massimo) misurate nella stazione urbana di Ravenna dal 2014 al 2019 (figura 14).

In tutti gli anni le temperature hanno un andamento tipicamente stagionale, con i valori medi mensili più bassi nei mesi di gennaio e dicembre e valori più elevati in luglio e agosto. Fanno eccezione il 2018, quando il mese con le temperature più basse è stato febbraio, e il 2019 con le temperature più elevate in giugno.

⁸ Nel caso di velocità del vento uguali a 0 m/s anche l'equazione soprariportata per calcolare la concentrazione C di un inquinante è impossibile, trovandosi la velocità al denominatore.

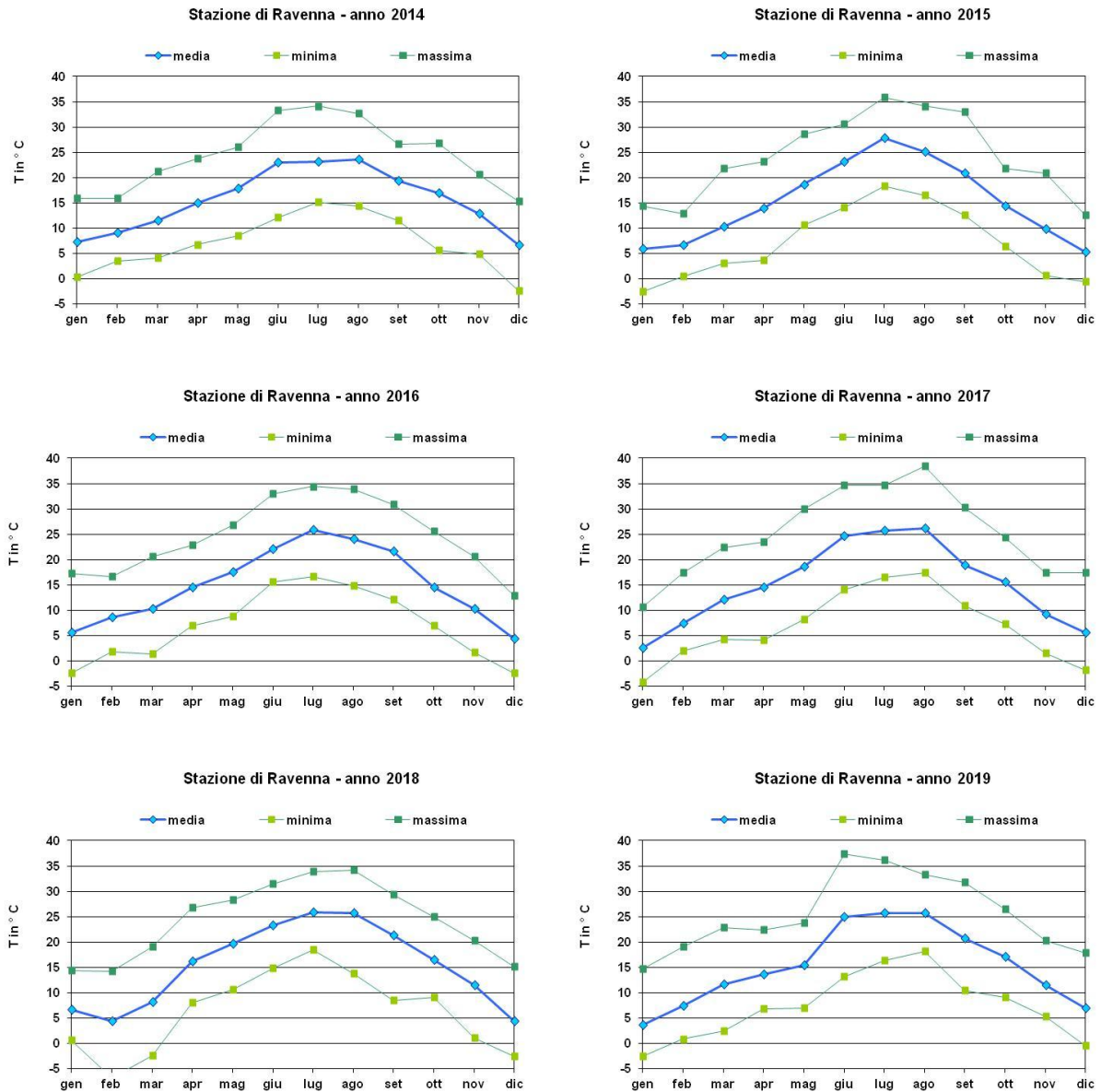


Figura 14 - Medie, minimi e massimi mensili delle temperature – Annualità 2014-2021

Nella figura 15 sono invece rappresentate le *rose del vento annuali* (dal 2014 al 2019), rappresentazioni che consentono di descrivere velocità e direzione del vento misurate, in questo caso, presso la stazione Porto San Vitale. I grafici delle rose dei venti hanno una conformazione molto simile in tutte le annualità, a riprova di una riproducibilità della direzione di provenienza del vento nel corso dell'anno, con alcune variazioni nella velocità.

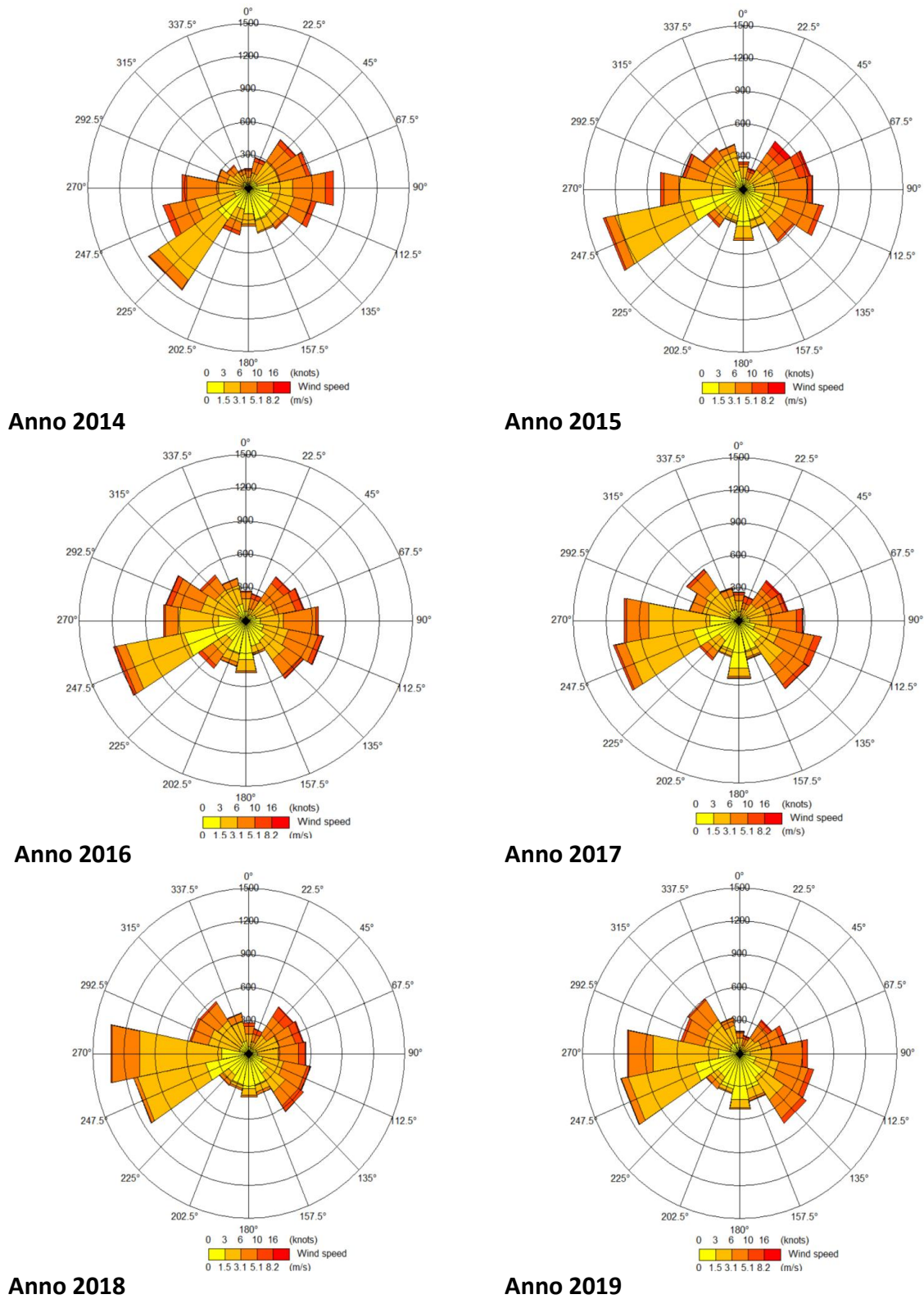


Figura 15 - Rosa dei venti annuale della stazione di Ravenna Porto San Vitale – Annualità 2014-2021

8. SIMULAZIONE DELLA DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI PER LE DIVERSE SORGENTI – MEDIE MENSILI E ANNUALI

Per ognuna delle sorgenti considerate (traffico, riscaldamento, industria e porto) sono state effettuate le simulazioni mensili per l'intero periodo considerato, in modo da ottenere, per ogni sorgente e per ogni mese, una mappa di isoconcentrazione media mensile dell'intero dominio.

Come indicato, il dato meteo in input ha frequenza oraria mentre ogni sorgente è caratterizzata da una specifica modulazione temporale che tiene conto di diversi fattori, fra cui:

- la tipologia di sorgente (lineare, puntuale o areale),
- i dati a disposizione,
- le dinamiche temporali caratteristiche di ognuna di esse.

Va inoltre sottolineato che il modello utilizzato, per le sorgenti areali gestite attraverso una griglia (riscaldamento e porto), ammette una sola modulazione temporale per l'intera griglia che deve essere modulata giornalmente e/o mensilmente in modo costante per l'intero periodo.

Le *modulazioni temporali* impostate per ciascuna macro-sorgente considerata sono le seguenti:

Traffico veicolare: l'emissione totale è stata considerata costante durante tutto l'anno, con una riduzione del 20% per i tre mesi estivi (giugno-agosto) e una modulazione giornaliera e settimanale così come descritta al capitolo 4;

Riscaldamento domestico: le emissioni hanno una modulazione mensile in funzione delle temperature esterne (gradi giorno).

Industria: emissioni costanti nel periodo, con una riduzione nel mese di agosto per tenere conto delle fermate degli impianti che solitamente sono programmate proprio in questo mese.

Porto: parte delle attività portuali, analogamente a quelle da riscaldamento, è stata distribuita su una griglia emissiva. Nello specifico, per tenere conto delle diverse caratteristiche delle sorgenti coinvolte, sono state costruite due griglie:

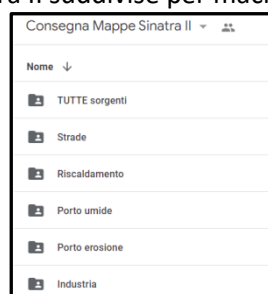
- una in cui sono state aggregate le emissioni derivanti dall'erosione eolica dei cumuli e dalle attività di sbarco del materiale, direttamente legate, come intensità, alla velocità del vento;
- l'altra in cui sono state aggregate le emissioni prodotte dalle attività di formazione e rimaneggiamento dei cumuli all'aperto, modulate mensilmente secondo le variazioni di umidità relativa e giornalmente in base agli orari lavorativi. A questa seconda griglia, e con la stessa modulazione temporale giornaliera e mensile, sono state aggiunte, nella stessa simulazione, le emissioni lineari prodotte dal traffico pesante nel porto.

A titolo esemplificativo, si riportano le *mappe di isoconcentrazione del PM10 – media mensile* riferite al mese di gennaio 2014 (figura 16), ognuna relativa ad una macro-sorgente trattata.

Il set completo di elaborazioni/mappe *di isoconcentrazione*, propedeutiche allo studio di incidenza di patologie respiratorie su una corte di nascita che copre l'arco temporale dal 2010 al 2019 (Linea di attività LA3 – a cura del AUSL) è disponibile, in formato elettronico in Google Drive, al seguente indirizzo:

<https://drive.google.com/drive/folders/14pQ5kDY7QceqEzYVT1OW4wgOeOlzIHpG>

e comprende le mappe relative sia al periodo 2010-2013 (elaborate nell'ambito di Sinatra I) sia quelle relative al periodo 2014 - 2019 di Sinatra II suddivise per macrosorgente:



Le mappe, realizzate per il periodo 2010-2019, sono relative:

- ai due inquinanti (PM 10 e NO₂);
- ad ogni macro-sorgente (traffico veicolare, riscaldamento domestico, industria e porto);
- alle quattro macro-sorgente considerate insieme;
- a ciascun mese del periodo 2010 – 2019 (medie mensili);
- a ciascun anno dello stesso periodo 2010 - 2019 (medie annuali);

per un totale di 1200 mappe, che diventeranno 2000 a fine elaborazione delle annualità 2004-2009 in itinere.

Le concentrazioni medie mensili stimate sul dominio di calcolo sono le informazioni necessarie e propedeutiche allo studio retrospettivo che ha lo scopo di valutare il grado di associazione tra insorgenza di nuovi casi di malattie respiratorie in età infantile ed esposizione ad inquinanti atmosferici, seguendo i nuovi nati per tutto il periodo di osservazione (Linea di Attività 2 e Linea di Attività 3 – Referente AUSL ROMAGNA – Dipartimento di Sanità Pubblica).

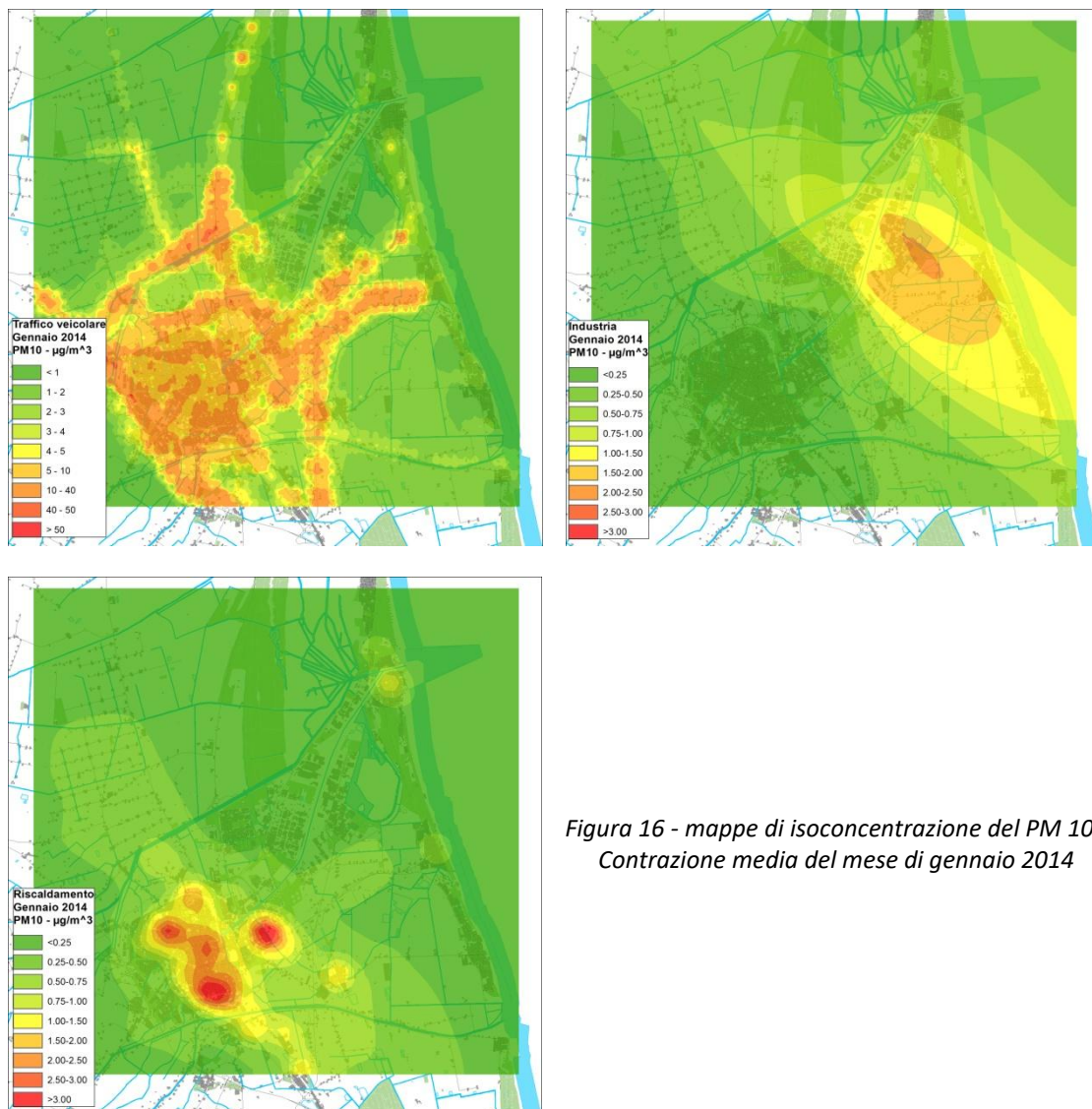
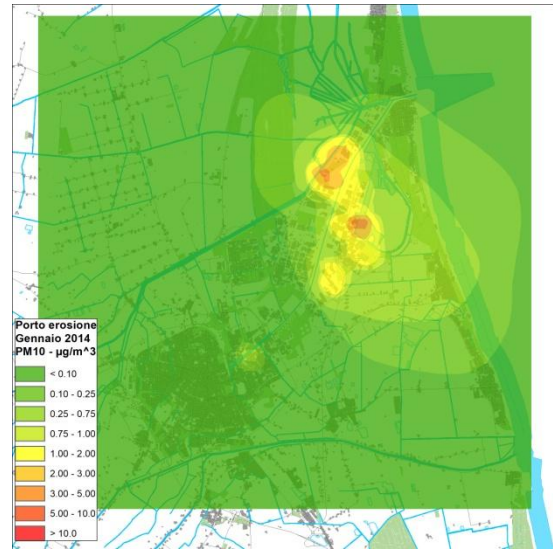
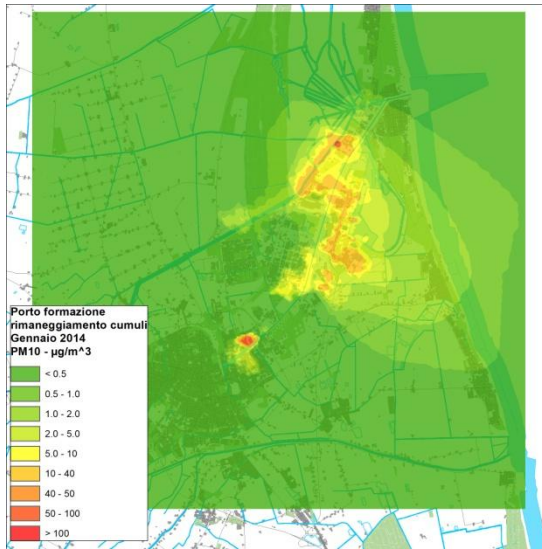


Figura 16 - mappe di isoconcentrazione del PM 10 - Contrazione media del mese di gennaio 2014



9. CONFRONTO CON I DATI MISURATI DALLE STAZIONI DI MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA E VALIDAZIONE DEL MODELLO

La simulazione è stata calibrata e validata confrontando il dato simulato dal modello con quello misurato, nello stesso arco temporale, dalla strumentazione installata nelle stazioni della rete di controllo della qualità dell'aria.

Per l'intero periodo sono state simulate, per ognuna delle sorgenti considerate, le concentrazioni medie orarie di PM₁₀ ed NO₂ in corrispondenza di punti di controllo coincidenti con le postazioni delle stazioni della rete presenti all'interno del dominio.

Per confrontare il dato simulato con quello misurato è necessario considerare le *concentrazioni di fondo*, cioè la quota di inquinamento imputabile ad altre fonti (interne e/o esterne al dominio) e quello dovuto a reazioni chimiche fra gli inquinanti in atmosfera (inquinamento secondario, non simulato) che contribuiscono, comunque, alle concentrazioni di inquinanti nell'area.

Come *concentrazioni di fondo* del dominio di studio sono state considerate le concentrazioni di PM₁₀ misurate nella stazione Agip29 e di biossido di azoto rilevato a Marina di Ravenna: due stazioni di monitoraggio interne al dominio ma in posizione periferica rispetto alle sorgenti di emissione dello studio. In corrispondenza di queste centraline, infatti, il dato simulato (quindi il contributo delle sorgenti dell'area oggetto di studio) rappresenta rispettivamente sempre meno del 6% del dato misurato di PM₁₀ ad Agip 29 e circa il 20% della concentrazione di NO₂ misurate a Marina di Ravenna. Pertanto, il confronto fra la concentrazione misurata e quella stimata in corrispondenza di ogni stazione *i* è:

$$C_{stimata\ PM10, stazione\ i} = C_{simulata\ PM10, stazione\ i} + C_{misurata\ Agip\ 29}$$

$$C_{stimata\ NO2, stazione\ i} = C_{simulata\ NO2, stazione\ i} + C_{misurata\ Marina\ RA}$$

In figura 17 sono riportate le stazioni di monitoraggio, sia pubbliche sia private, presenti all'interno del dominio ed utilizzate per la validazione del modello.

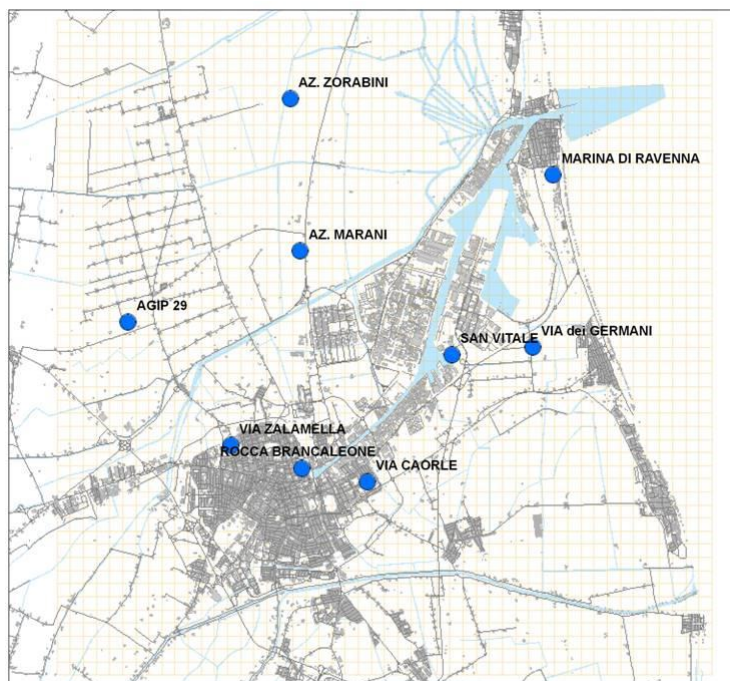


Figura 17 - Stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria all'interno del dominio

Per il confronto tra i dati simulati e quelli misurati sono stati calcolati diversi parametri statistici, descritti di seguito.

Per ogni annualità, sono state calcolate:

- media annuale simulata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- media annuale misurata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- variazione % fra dato misurato e simulato;
- efficienza della modellazione di Nash and Sutcliffe (**EF**), formulata secondo la seguente relazione:

$$EF = \frac{\sum (\text{mis}_i - \text{media}_{\text{misurata}})^2 - \sum (\text{sim}_i - \text{mis}_i)^2}{\sum (\text{mis}_i - \text{media}_{\text{misurata}})^2}$$

dove: mis_i = dato misurato i-esimo

sim_i = dato stimato i-esimo

$\text{media}_{\text{misurata}}$ = media annuale misurata nella stazione considerata

Il valore ottimale di EF è 1, cioè la sommatoria degli scarti fra dati misurati e simulati è uguale o prossima allo 0. Valori di EF prossimi o uguali a 0 indicano che le stime del modello sono accurate come la media delle osservazioni; valori di EF negativi indicano che il modello sottostima o sovrastima il misurato e tale differenza è maggiore della differenza fra dato misurato e media dei dati misurati (osservazioni).

Per ciascuna mensilità è stata calcolata, per ogni anno e per ogni stazione:

- media mensile simulata e misurata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e riportate in forma grafica per osservare l'andamento e l'accordo tra le serie di dati.

Infine, con i dati medi giornalieri di ciascun inquinante (PM10 e NO₂) sono stati calcolati gli indicatori quantitativi basilari per il confronto dei risultati della simulazione con i dati ottenuti dalle stazioni di misura indicati nell'Appendice III "Criteri per l'utilizzo dei metodi di valutazione diversi dalle misurazioni in siti fissi" del D.Lgs 155/10:

- coefficiente di correlazione R, utile a misurare il grado ed il segno di correlazione lineare tra osservato e simulato;
- Fractional Bias (FB) che indica la tendenza, in media, del modello alla sottostima o alla sovrastima, dato da:

$$FB = \frac{2 \cdot BIAS}{m_{\text{simulazione}} + m_{\text{centralina}}}$$

dove: BIAS = differenza tra i valori medi misurati dalle postazioni fisse e quelli stimati con il modello

$m_{\text{simulazione}}$ = valore medio della distribuzione dei dati di concentrazione dell'inquinante derivanti dalla simulazione ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$m_{\text{centralina}}$ = valore medio della distribuzione dei dati di concentrazione dell'inquinante misurati dalla stazione fissa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

- Root Mean Square Error (RMSE) che fornisce una stima delle dimensioni delle differenze tra i valori del modello rispetto a quelli delle misure, calcolato secondo la relazione riportata di seguito:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,\text{simulazione}} - x_{i,\text{centralina}})^2}{n}}$$

dove: $x_{i,\text{simulazione}}$ = valore (orario o giornaliero) della distribuzione dei dati di concentrazione di inquinante derivanti dalla simulazione ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$x_{i,\text{centralina}}$ = valore (orario o giornaliero) della distribuzione dei dati di concentrazione di inquinante misurati dalla stazione fissa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

n = numero di dati (orari o giornalieri) della distribuzione.

- Normalized Mean Square Error (NMSE), ulteriore stima delle differenze tra i valori osservati e quelli simulati, determinato secondo la seguente relazione:

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{i,simulazione} - x_{i,centralina})^2}{m_{simulazione} \cdot m_{centralina}}$$

dove: $x_{i,simulazione}$ = valore (orario o giornaliero) della distribuzione dei dati di concentrazione di inquinante derivanti dalla simulazione attraverso il codice di calcolo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$x_{i,centralina}$ = valore (orario o giornaliero) della distribuzione dei dati di concentrazione di inquinante derivanti dalla registrazione della stazione fissa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$m_{simulazione}$ = valore medio della distribuzione dei dati di concentrazione dell'inquinante derivanti dalla simulazione ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$m_{centralina}$ = valore medio della distribuzione dei dati di concentrazione dell'inquinante misurati dalla stazione fissa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

In tabella 6 sono sintetizzati i valori quantitativi di riferimento per ciascun indice, nonché la rispettiva prestazione ideale.

Indice	R	FB	RMSE	NMSE
Range di possibili valori assunti dall'indice	-1 ÷ 1	-2 ÷ 2	Solo positivi	Solo positivi
Prestazione ideale	1	0	0	0

Tabella 6 – Parametri statistici applicati ai dati giornalieri

9.1 – Sinatra II: confronto simulato-misurato per annualità

In tabella 7 sono riportate per il PM10, per ogni anno e per ogni stazione di monitoraggio:

- le medie annuali misurate e simulate (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- la variazione % fra medie annuali misurate e simulate;
- l'efficienza della modellazione di Nash and Sutcliffe (EF).

L'ultima colonna è riferita alla stazione di fondo (Agip 29).

	Parametri	Zalamella (urbana)	Caorle (urbana)	Rocca (Urbana/Ind)	Germani (industriale)	Marani (industriale)	San Vitale (porto)	Agip29 (fondo)
2014	Media sim	28	26	27	26	25	29	24
	Media mis	25	25	25	25	23	32	24
	Variaz.%	11	5	7	4	7	-10	1
	EF	0.5	0.7	0.7	0.6	-3.0	0.6	-1.5
2015	Media sim	35	30	33	30	33	34	29
	Media mis	29	30	30	30	28	40	29
	Variaz.%	18	1	8	1	17	-16	0
	EF	0.3	0.4	0.5	0.4	-2.6	0.2	-1.3
2016	Media sim	28	30	30	30	35	34	27
	Media mis	25	25	26	25	24	46	27
	Variaz.%	12	15	12	17	24	-34	2
	EF	0.5	0.2	0.6	0.4	-0.2	0.4	1.0
2017	Media sim	33	31	31	31	30	34	28
	Media mis	28	28	29	30	28	41	28

	Parametri	Zalamella (urbana)	Caorle (Urbana)	Rocca (Urbana/IND)	Germani (Industriale)	Marani (Industriale)	San Vitale (Porto)	Agip29 (fondo)
	Variaz.%	14	10	7	5	6	-18	1
	EF	0.8	0.8	0.8	0.6	-2.0	0.6	-1.4
2018	Media sim	30	28	29	28	27	31	25
	Media mis	26	26	27	27	25	39	25
	Variaz.%	13	7	6	4	9	-26	2
	EF	0.8	0.6	0.8	0.8	-2.9	0.3	-2.5
2019	Media sim	29	27	28	27	26	31	25
	Media mis	30	26	27	27	26	37	24
	Variaz.%	-5	4	5	3	2	-20	1
	EF	0.9	0.7	0.8	0.8	-2.0	0.4	-1.6

Tabella 7 – PM10 - Parametri statistici calcolati sulle serie annuali misurate e simulate

In generale le simulazioni risultano allineate al dato misurato per tutto il periodo considerato, con una variazione percentuale media inferiore al 10% e, comunque, inferiore al 34% nel caso peggiore (San Vitale). Germani, Caorle e Rocca sono le stazioni dove la differenza percentuale media nell'intero periodo è minore: 6 %, 7 % e 8 % rispettivamente.

Il 2016 è l'anno in cui il dato stimato e quello misurato differiscono maggiormente, con variazioni percentuali comprese fra il 12% (Rocca, Zalamella) e il 34% (Porto San Vitale).

L'indice EF risulta positivo per tutte le annualità per le stazioni della rete urbana, con valore medio compreso tra 0.6 (Zalamella e Caorle) e 0.7 (Rocca). Presso queste stazioni, il valori minimo risulta pari a 0.2, mentre quello massimo è 0.9. Le stazioni di tipo industriale, poste all'interno o in prossimità all'area industriale (San Vitale e Germani), hanno valori di EF molto simili e sempre positivi (valore medio 0.4 a San Vitale e 0.6 a Germani). Il range dei valori presso queste stazioni varia tra 0.2 e 0.8. In corrispondenza delle stazioni esterne alla rete urbana (Marani e Agip29), i valori di EF sono risultati negativi per tutte le annualità, eccetto per Agip29 nel 2016 quando il valore risulta ottimale (EF = 1).

Gli stessi parametri, calcolati per il biossido di azoto, sono riportati in tabella 8. Ad eccezione dell'anno 2016, il biossido di azoto tende ad essere sottostimato, non solo presso la stazione in area portuale, ma anche in area urbana. Presso la stazione in area portuale (San Vitale), il dato simulato è sempre sottostimato in modo ancora più consistente rispetto al particolato (con un valore medio per il periodo pari a -38% e con un range di valori compreso tra -16% e -57%). A Zalamella, il valore medio è risultato pari a -19% (range = -36% ÷ +5%). Questo risultato è sicuramente imputabile alla maggiore variabilità spaziale dell'NO₂ rispetto al PM10. Per tutte le altre stazioni, le concentrazioni di NO₂ risultano sovrastimate dal modello con valori medi del periodo compresi tra 8% (Germani) e 22% (Marina di Ra). Per l'indice EF, il valore medio dell'intero periodo risulta negativo per tutte le stazioni (con valori compresi tra -0.1 e -6.6), ad eccezione della stazione Germani dove il valore risulta pari a 0.2. Il valore di EF presso la stazione di Marina di Ra (-6.6 come valore medio del periodo) risulta fortemente influenzato dal valore assunto dall'indice nel corso del 2016 e pari a -43.4; per tutte le altre annualità, il valore dell'indice EF di Marina di Ra è risultato positivo.

	Parametri	Rocca (Urbana/Ind)	San Vitale (Porto)	Zalamella (urbana)	Caorle (Urbana)	Germani (Industriale)	Zorabini (Industriale)	Marani (Industriale)	Marina (fondo)
2014	Media sim	26	16	24	22	17	14	18	16
	Media mis	28	26	33	19	17	13	25	13
	Variatz.%	-5	-57	-36	10	0	12	-42	19
	EF	-0.3	-0.3	-0.5	-0.3	0.3	0.0	-0.8	0.7
2015	Media sim	30	24	33	24	20	17	31	19
	Media mis	31	28	37	23	21	11	24	17
	Variatz.%	-4	-16	-14	5	-7	38	13	23
	EF	0.0	0.3	0.0	0.3	0.3	-0.5	-2.2	0.8
2016	Media sim	41	20	34	33	21	18	51	21
	Media mis	24	27	33	20	17	11	20	15
	Variatz.%	42	-39	5	40	21	40	61	29
	EF	-3.3	0.0	-0.6	-1.9	-0.1	-1.2	0.3	-43.4
2017	Media sim	26	18	24	22	18	15	18	17
	Media mis	24	27	31	20	16	11	20	14
	Variatz.%	8	-49	-29	10	8	22	-8	17
	EF	-0.2	-0.2	0.1	0.1	0.4	-0.1	-0.8	0.8
2018	Media sim	26	16	24	21	17	14	17	16
	Media mis	21	23	30	19	13	12	12	12
	Variatz.%	19	-43	-25	10	22	14	30	22
	EF	-0.6	-0.2	-0.5	-0.2	0.3	-0.1	0.4	0.8
2019	Media sim	27	18	25	23	18	15	19	17
	Media mis	22	22	28	20	17	14	19	13
	Variatz.%	19	-21	-13	13	6	6	-3	21
	EF	-0.3	-0.1	-0.3	-0.2	0.2	-0.2	-0.7	0.7

Tabella 8 - NO₂- Parametri statistici calcolati sulle serie annuali misurate e simulate

9.2 – Sinatra II: confronto simulato-misurato per mese

In figura 18 sono riportati gli andamenti dei valori medi mensili simulati e misurati di PM10 nel periodo 2014-2019 in corrispondenza di ciascuna stazione.

Dalle simulazioni mensili di PM10 risulta in generale un buon accordo fra dato simulato e misurato. Alcuni modesti scostamenti (di sovrastima o di sottostima) nei valori simulati sono riscontrabili nelle seguenti postazioni:

- sottostima nei valori simulati presso la stazione San Vitale, in particolare dal 2015 al 2019;
- sovrastima presso la stazione Zalamella nel periodo 2015-2017;
- sovrastima a Marani durante le annualità 2015 e 2016;
- sovrastima a Caorle nel 2016;
- sovrastima alla Rocca durante i mesi estivi;
- sovrastima a Germani durante i mesi estivi del 2016.

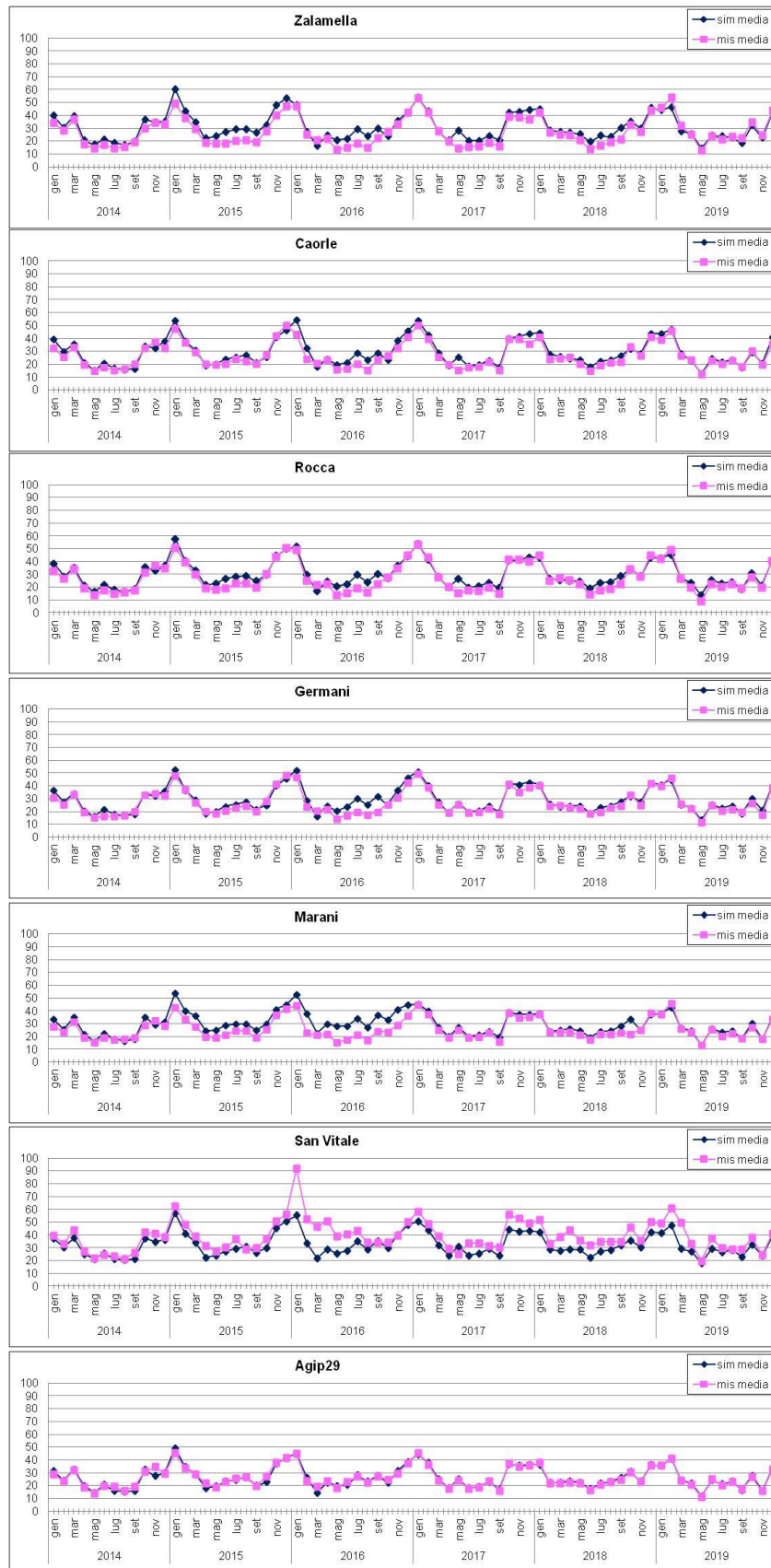
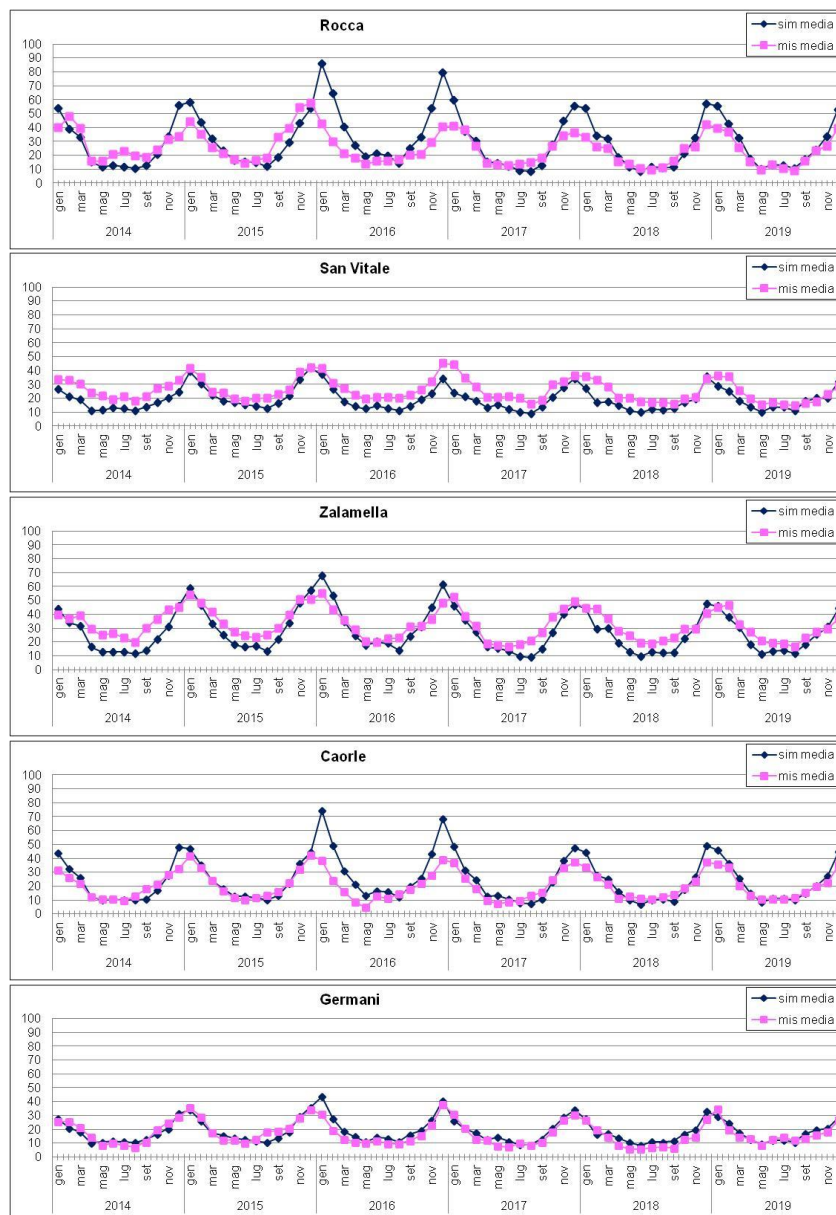


Figura 18 - Medie mensili di PM10 simulate e misurate presso ciascuna stazione della rete

Analogamente al particolato, in figura 19 sono riportati gli andamenti dei valori medi mensili simulati e misurati di NO₂ in corrispondenza di ciascuna stazione.

Anche in questo caso, è possibile osservare un generale buon accordo tra le serie di dati, con alcuni scostamenti nelle seguenti condizioni:

- in area urbana (rappresentata dalle stazioni Rocca, Caorle e Zalamella) si evidenzia una diffusa sovrastima nei mesi invernali (in particolare a gennaio e dicembre) imputabile, in particolare, al contributo del riscaldamento domestico. A Zalamella, soprattutto durante il periodo estivo, il dato simulato risulta sottostimato;
- presso le stazioni Zorabini e Marina di Ravenna si riscontra una generale modesta sovrastima nel corso della annualità 2015-2016 e 2017;
- a San Vitale, il dato simulato risulta sottostimato nella quasi totalità dei mesi, con qualche eccezione in pochi mesi invernali quando i dati misurati e quelli simulati risultano maggiormente allineati.



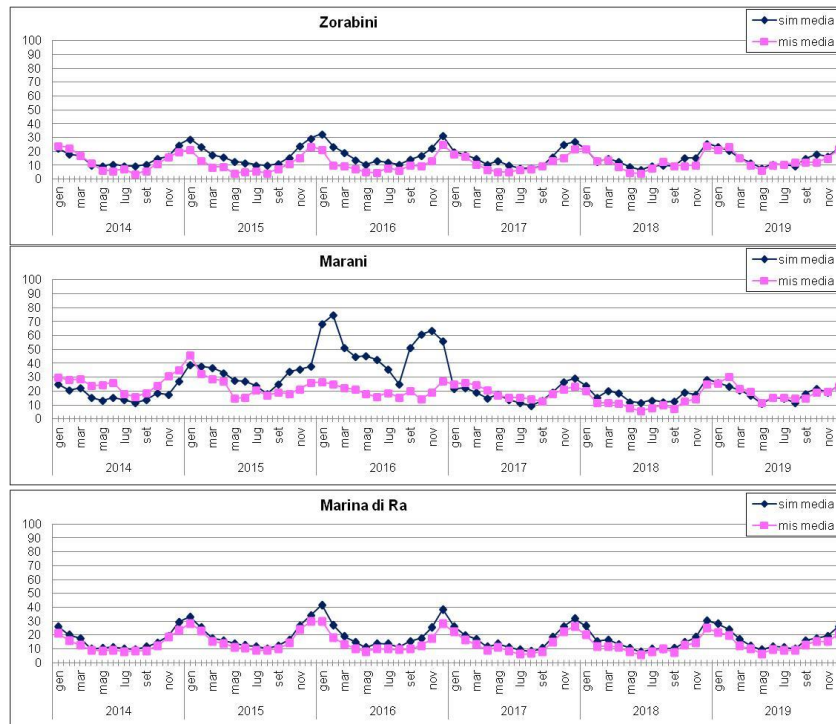


Figura 19 - Medie mensili di NO_2 simulate e misurate presso ciascuna stazione della rete

9.3 – Sinatra II: confronto simulato-misurato per giorno

In tabella 9 sono riportati, per ogni anno e per ogni stazione di monitoraggio, i dati degli indici statistici calcolati con i valori medi giornalieri misurati e simulati per il PM_{10} . L'ultima colonna è riferita alla stazione di fondo (Agip 29).

Il valore del coefficiente di correlazione R (con valore ottimale pari a 1) risulta sempre soddisfacente con valori compresi tra 0.68 (San Vitale nel 2016) e 0.95 (Caorle nel 2019). Per la stazione Agip29 il valore di R è risultato pari a 1 per tutte le annualità in quanto è la stazione utilizzata come riferimento per i valori di fondo. Per tutte le altre stazioni (Zalamella, Rocca, Germani, Marani), i valori di R risultano molto simili e stabili nel tempo. L'annualità con performance meno soddisfacenti è il 2016, con R medio per tutte le stazioni (ad esclusione di Agip29) pari a 0.81. Le annualità con risultati migliori sono il 2014 e il 2019.

Il FB (indice con valore ottimale pari a 0) risulta soddisfacente e prossimo al valore ideale per la quasi totalità delle combinazioni stazione-annualità. Tale indice ha valore positivo (indicando una sottostima del modello rispetto al dato misurato) nella maggior parte delle stazioni, ad eccezione di Zalamella nel 2014 e nel 2019 e per San Vitale in tutte le annualità, dove il valore risulta negativo (indicando una sovrastima del modello rispetto al dato misurato). Anche questo indice evidenzia come il 2016 risulti l'annualità con le performance peggiori nel confronto tra dato simulato e dato misurato, con un valore medio dell'FB pari a 0.17. Al contrario, il 2019 è risultata l'annualità migliore, con un valore pari a 0.04.

L'indice RMSE, escludendo la stazione Agip29 poiché impiegata per la determinazione dei valori di fondo, assume valori compresi tra 4.97 e 21.74. La stazione San Vitale è quella che ha il peggiore valore medio per l'RMSE (14.56), mentre Caorle è quella con valore migliore (6.86). Durante l'annualità 2016 i valori simulati e quelli misurati hanno scostamenti superiori rispetto alle altre annualità (12.75 come valore medio tra tutte le stazioni), mentre nel 2014 le performance sono le più soddisfacenti (6.83).

I valori dell'indice NMSE sono compresi tra 0.03 e 0.41, dimostrando una buona performance complessiva, soprattutto presso le stazioni Rocca e Germani (valore medio per tutte le annualità considerate pari a 0.07 in entrambe le postazioni) e nel corso di quasi tutte le annualità indagate

(valore medio pari a 0.07 nel 2014-2017-2018-2019). La condizione peggiore è riferita alla stazione San Vitale (0.19 come valore medio del periodo) e all'annualità 2016 (0.20).

Complessivamente, gli indici statistici utilizzati consentono di isolare alcuni aspetti caratterizzanti il confronto tra i dati simulati e quelli misurati:

- Caorle, Rocca e Germani sono le stazioni dove sono state ottenute le migliori performance complessive;
- In corrispondenza della centralina San Vitale, stazione interna all'area portuale e soggetta alle pressioni dovute alle attività di movimentazione e stoccaggio di materiale polverulento, i dati misurati e quelli simulati hanno una maggiore discrepanza rispetto a quanto ottenuto presso le altre stazioni;
- Il 2014 e il 2019 sono le annualità dove è stato determinato il miglior accordo tra i dati misurati e quelli simulati. Al contrario, il 2016 è l'annualità con performance peggiori rispetto a ciascun indice considerato.

	Parametri	Prestazione ideale	Zalamella (urbana)	Caorle (urbana)	Rocca (Urbana/Ind)	Germani (Industriale)	Marani (Industriale)	San Vitale (Porto)	Agip29 (fondo)
2014	R	1	0.90	0.92	0.93	0.89	0.92	0.84	1.00
	FB	0	-0.13	0.08	0.09	0.06	0.09	-0.09	0.03
	RMSE	0	7.27	6.15	5.91	6.72	5.83	9.08	1.12
	NMSE	0	0.09	0.06	0.05	0.07	0.05	0.10	0.00
2015	R	1	0.92	0.93	0.93	0.92	0.91	0.84	1.00
	FB	0	0.23	0.03	0.11	0.04	0.2	-0.12	0.02
	RMSE	0	10.23	7.01	8.18	7.38	9.51	12.79	0.86
	NMSE	0	0.12	0.11	0.06	0.07	0.06	0.10	0.00
2016	R	1	0.83	0.84	0.85	0.85	0.79	0.68	0.99
	FB	0	0.14	0.15	0.13	0.17	0.35	-0.30	0.06
	RMSE	0	10.01	9.98	10.06	10.30	14.43	21.74	2.19
	NMSE	0	0.14	0.14	0.13	0.14	0.25	0.41	0.01
2017	R	1	0.92	0.93	0.93	0.93	0.96	0.84	1.00
	FB	0	0.15	0.11	0.08	0.05	0.06	-0.16	0.03
	RMSE	0	8.91	7.87	8.05	6.82	5.22	13.79	1.04
	NMSE	0	0.09	0.07	0.07	0.05	0.03	0.13	0.00
2018	R	1	0.92	0.94	0.93	0.93	0.90	0.73	1.00
	FB	0	0.14	0.08	0.07	0.06	0.08	-0.23	0.03
	RMSE	0	6.63	4.97	5.63	5.18	5.50	14.38	1.11
	NMSE	0	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.21	0.00
2019	R	1	0.93	0.95	0.93	0.94	0.94	0.73	1.00
	FB	0	-0.04	0.05	0.06	0.05	0.03	-0.19	0.03
	RMSE	0	6.85	5.18	6.15	5.55	5.12	15.58	1.12
	NMSE	0	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.21	0.00

Tabella 9 – PM10 - Parametri statistici calcolati sulle serie giornaliere misurate e simulate

Analogamente a quanto riportato per il particolato, in tabella 10 sono riportate, per ogni anno e per ogni stazione di monitoraggio i dati degli indici statistici calcolati con i valori medi giornalieri misurati e simulati per il biossido di azoto. L'ultima colonna è riferita alla stazione di fondo (Marina di Ravenna).

Il coefficiente di correlazione R risulta soddisfacente per la maggior parte delle stazioni e delle annualità, con un valore medio di 0.7 ed un range min-max di 0.1 (in corrispondenza della stazione Marani nel 2016) e 0.9 (presso le stazioni Rocca, Caorle, Germani e Marani nel corso di varie annualità). Le annualità 2015, 2017 e 2019 hanno le performance migliori in relazione al valore assunto dall'indice R ($R = 0.8$), mentre il 2016 è in assoluto l'anno peggiore ($R = 0.6$).

Il FB risulta piuttosto soddisfacente nel suo insieme. Il valore medio, considerando tutte le stazioni e tutte le annualità è pari a 0.04. In corrispondenza della stazione Germani sono state ottenute le performance migliori (0.02 nel 2014), mentre a Marani quelle peggiori (0.79 nel 2016).

Anche in questo caso, l'anno 2016 si conferma il peggiore in termini di similarità tra dati misurati e simulati, mentre nel 2019 i confronti sono risultati i migliori dell'intero periodo.

L'RMSE assume valori compresi tra 5.84 (in corrispondenza della stazione Germani nel 2015) e 42.21 (presso Marani nel 2016), con valore medio dell'intero periodo pari a 11.03. Nel 2019 i valori simulati e quelli misurati sono risultati analoghi, con RMSE medio nell'anno pari a 8.7. Il 2016 è l'annualità con i valori maggiormente discordanti e con RMSE medio pari a 18.9.

L'NMSE ha valori compresi tra 0.08 (riferito alla stazione Germani e all'annualità 2015) e 1.54 (riferito a Marani per il 2016), con valore medio pari a 0.26. Analogamente a quanto osservato per il particolare, il 2016 risulta l'anno con le performance peggiori (con valore medio di NMSE pari a 0.6) e con le altre annualità con valore medio anno analogo e pari a 0.2.

	Parametri	Prestazione ideale	Rocca (Urbana/Ind)	San Vitale (porto)	Zalamella (urbana)	Caorle (Urbana)	Germani (Industriale)	Zorabini (Industriale)	Marani (Industriale)	Marina (fondo)
2014	R	1	0.71	0.69	0.68	0.82	0.80	0.77	0.52	0.95
	FB	0	-0.03	-0.43	-0.31	0.08	-0.02	0.12	-0.35	0.19
	RMSE	0	13.39	11.35	14.21	9.24	6.46	6.26	11.55	4.15
	NMSE	0	0.24	0.31	0.25	0.20	0.14	0.21	0.29	0.08
2015	R	1	0.78	0.83	0.77	0.88	0.87	0.82	0.40	0.96
	FB	0	-0.04	-0.17	-0.14	0.04	-0.05	0.46	0.27	0.16
	RMSE	0	11.58	8.60	12.69	7.38	5.84	8.70	16.09	4.04
	NMSE	0	0.14	0.11	0.13	0.10	0.08	0.39	0.35	0.05
2016	R	1	0.78	0.82	0.74	0.79	0.85	0.35	0.08	0.66
	FB	0	0.52	-0.32	0.04	0.50	0.23	0.12	0.79	0.26
	RMSE	0	24.97	10.27	13.49	20.25	8.06	13.14	42.21	11.18
	NMSE	0	0.65	0.19	0.16	0.63	0.18	0.55	1.54	0.36
2017	R	1	0.82	0.81	0.80	0.85	0.86	0.82	0.51	0.98
	FB	0	0.13	-0.35	-0.21	0.16	0.13	0.29	-0.05	0.23
	RMSE	0	12.12	10.51	11.30	9.56	6.36	6.67	9.01	4.37
	NMSE	0	0.24	0.23	0.18	0.22	0.15	0.27	0.23	0.08
2018	R	1	0.85	0.73	0.75	0.87	0.85	0.75	0.89	0.95
	FB	0	0.19	-0.34	-0.22	0.09	0.24	0.16	0.33	0.23
	RMSE	0	11.72	9.82	11.58	8.60	6.77	6.45	6.43	4.66
	NMSE	0	0.24	0.26	0.19	0.17	0.21	0.25	0.19	0.10
2019	R	1	0.86	0.72	0.75	0.86	0.74	0.68	0.56	0.94
	FB	0	0.21	-0.19	-0.12	0.14	0.05	0.07	-0.03	0.22
	RMSE	0	11.29	8.34	10.30	8.89	7.82	6.58	7.43	4.87
	NMSE	0	0.20	0.17	0.14	0.17	0.19	0.20	0.15	0.09

Tabella 10 – NO₂ - Parametri statistici calcolati sulle serie giornaliere misurate e simulate

10. CONTRIBUTO DELLE MACROSORGENTI ALL'INQUINAMENTO DELL'AREA

L'architettura dello studio (con una valutazione sia individuale sia sinergica del contributo delle diverse macrosorgenti emissive all'inquinamento atmosferico) consente, tra le altre cose, di stimare il contributo percentuale di ogni macrosorgente rispetto all'inquinamento totale in ciascun punto del dominio (2500 punti).

Facendo riferimento ai dati valutati in corrispondenza delle stazioni fisse (impiegate per il confronto tra dato misurato e dato simulato) è stata calcolata l'incidenza annuale % delle diverse sorgenti alle concentrazioni simulate di PM10 e di NO₂, restituita sotto forma di istogrammi nelle figure 20 e 21.

Gli istogrammi, inoltre, consentono di identificare alcune peculiarità nel contributo percentuale ed alcune variazioni occorse nel tempo. In particolare:

→ per il particolato PM10:

- il contributo dovuto al traffico veicolare è la componente predominante delle concentrazioni stimate presso le stazioni di Zalamella (stazione da traffico), Rocca e Marani, tutte posizionate in prossimità ad arterie stradali molto trafficate;
- la componente dovuta alle attività portuali risulta maggiormente significativa presso le stazioni Porto San Vitale e Germani, collocate all'interno o in prossimità dell'area portuale di Ravenna;
- l'effetto dovuto alle industrie ha un contributo rilevante soprattutto presso le stazioni Germani, Zorabini e Marina di Ra, centraline che costituiscono la rete privata di monitoraggio della qualità dell'aria a servizio dell'area industriale di Ravenna;
- il riscaldamento domestico ha un contributo evidente presso la stazione Caorle, posizionata in ambito residenziale;
- nel tempo, si evidenziano diverse variazioni dei contributi percentuali alle concentrazioni totali di PM10, in particolare:
 - presso la stazione Germani si osserva una significativa riduzione del contributo dovuto al porto nel corso dell'annualità 2016 (12% sul totale nel 2016, mentre nelle altre annualità tale valore è compreso tra 36% e 46%) ed un aumento del contributo imputato alle industrie nel corso del medesimo anno;
 - analogamente alla stazione Germani, anche presso la stazione San Vitale si osserva una riduzione della componente portuale (32% nel 2015 a fronte di un valore medio nelle altre annualità del 41%) ed un aumento del contributo industriale (dal 20% al 50% nel 2015);
 - presso la postazione Marani, il contributo % del traffico veicolare è diminuito a partire dal 2017 (64% a fronte di un contributo medio nelle altre annualità di circa l'84%), mentre sono aumentati gli apporti imputati alle industrie (dal 10% al 23%) ed al porto (dal 3% al 12%).

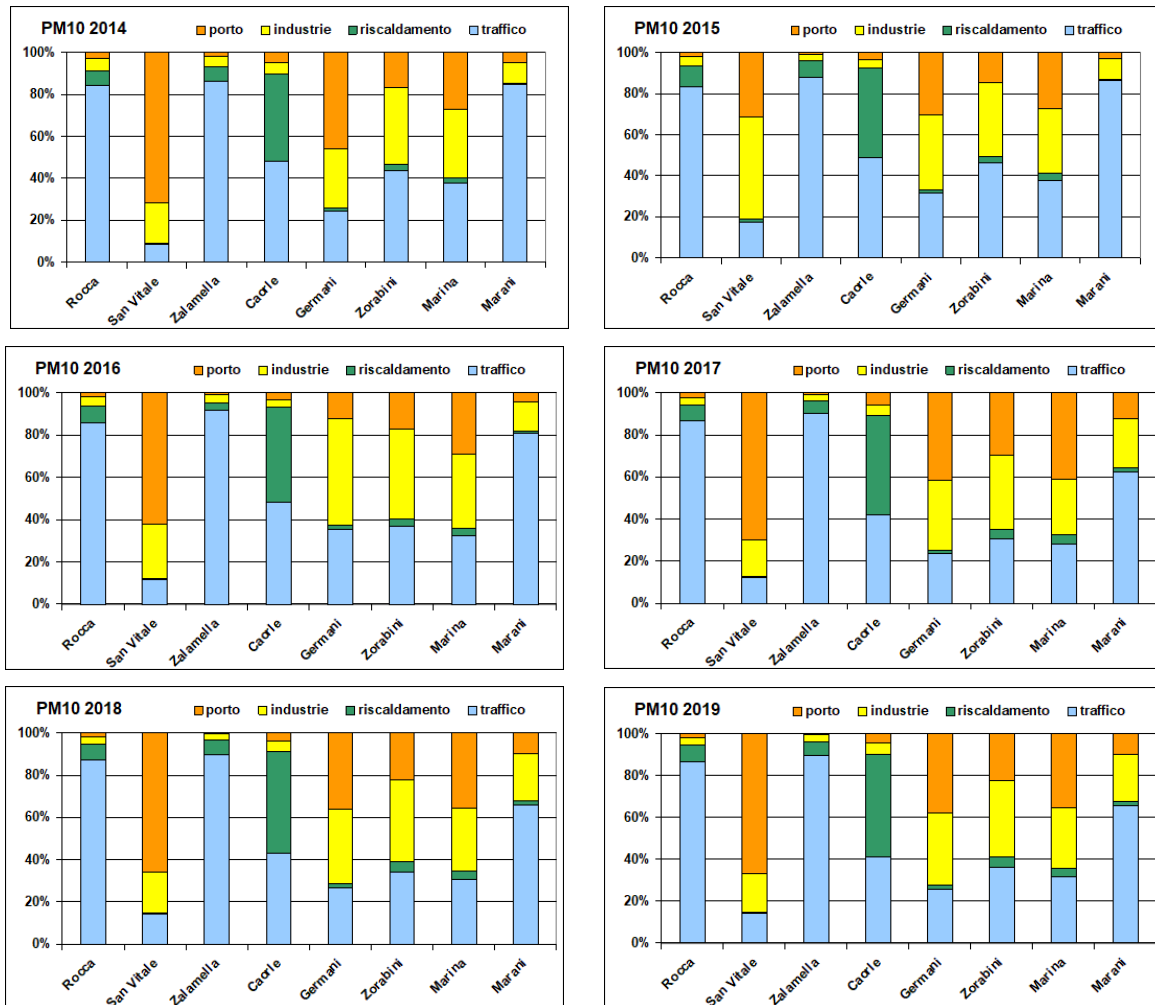


Figura 20 - PM10 - Contributo % dei quattro macrosettori in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria

→ Per il biossido di azoto (NO₂):

- il traffico veicolare è la componente predominante in tutte le stazioni nel periodo 2014-2016. Negli anni successivi, l'apporto imputato al traffico diminuisce, con un progressivo aumento del contributo % dovuto all'industria ed al riscaldamento;
- analogamente al particolato, anche per l'NO₂ l'industria ha un contributo rilevante presso le stazioni San Vitale, Germani e Zorabini, tutte di tipo industriale;
- il riscaldamento domestico ha un contributo evidente presso le stazioni Caorle, Rocca e Zalamella, tutte posizionate all'interno dell'area urbana;
- le variazioni temporali nei contributi percentuali alle concentrazioni totali di NO₂ evidenziano le seguenti condizioni:
 - presso la stazione San Vitale si osserva una significativa riduzione del contributo dovuto al traffico (dal 65% nel 2014 al 26% nel 2019) ed un incremento del contributo imputato alle industrie (dal 22% nel 2014 al 65% nel 2019);
 - presso le stazioni Germani, Zorabini, Marina e Marani a partire dal 2017 aumenta sensibilmente il contributo delle industrie (dal 10% al 62%), a fronte di una riduzione del traffico (dall'81% al 27%).

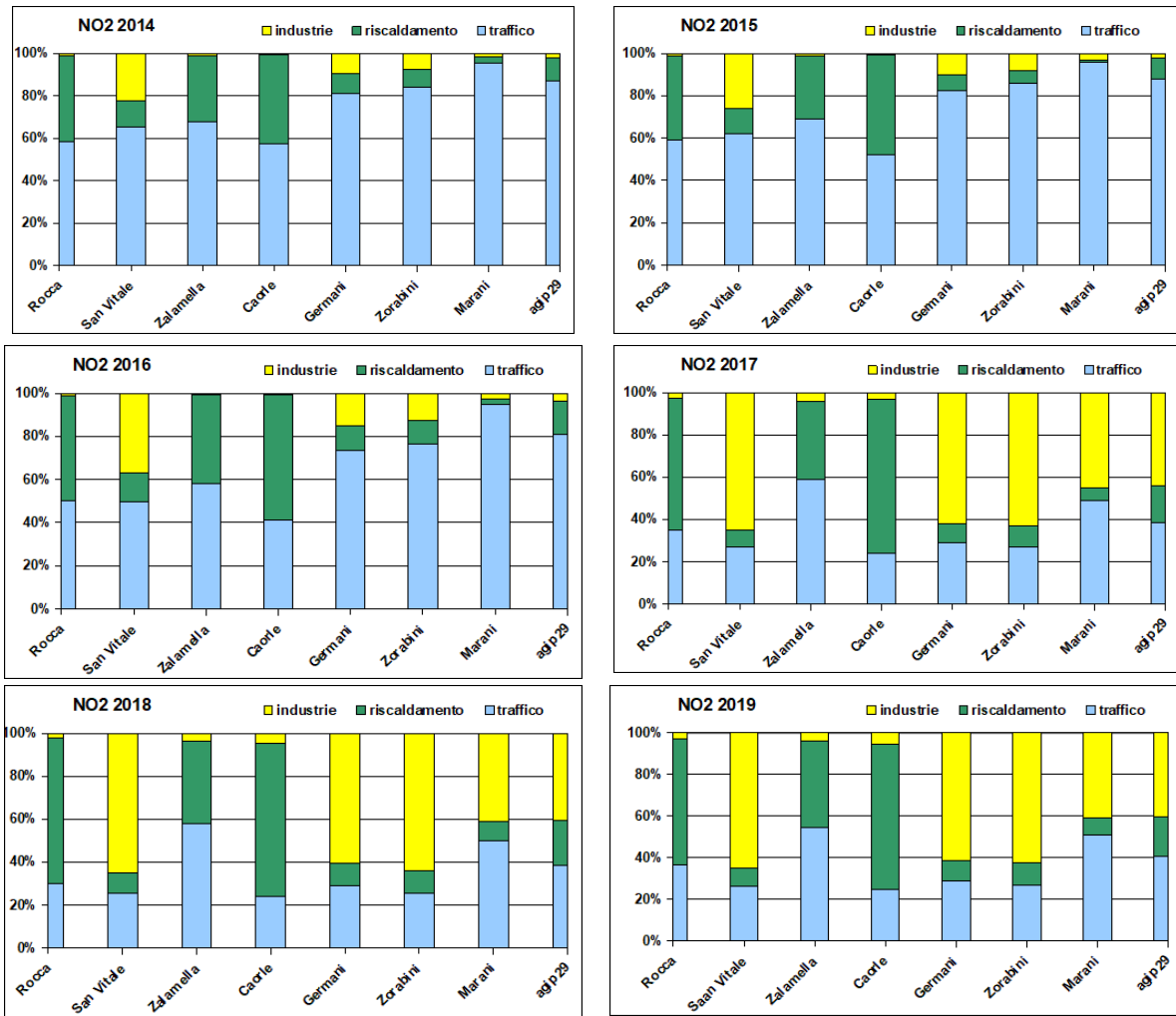


Figura 21 - NO₂ - contributo % dei tre macrosettori in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria

11. SINTESI LINEA PROGETTUALE 1 – MONITORAGGIO AMBIENTALE

Il progetto S.In.A.T.Ra., nelle due declinazioni S.In.A.T.Ra. I e S.In.A.T.Ra. II, ha come obiettivo “ambientale” la valutazione dell’impatto sull’inquinamento atmosferico delle principali sorgenti (traffico veicolare, riscaldamento domestico, industria, porto) nel periodo 2004-2019.

Tale finalità è propedeutica al conseguimento dell’obiettivo generale: la valutazione degli effetti sanitari di questi fattori di pressione sulla salute della popolazione residente nell’area urbana del comune di Ravenna.

Nell’ambito della valutazione dell’impatto ambientale, ed in particolare della linea di attività progettuale 1 in capo al SSA di APA Est di Arpa (obiettivo “ambientale”), sono state stimate le **emissioni** di PM10 e di NO₂ e le conseguenti **immissioni** all’interno di un dominio spaziale di dimensioni 15 km x 15 km (225 km²).

Per la **quantificazione delle emissioni** sono state considerate le principali sorgenti presenti all’interno del dominio di studio: traffico veicolare, riscaldamento domestico, industria e porto. Per ogni macrosettore, il contributo all’inquinamento atmosferico è stato determinato utilizzando specifici fattori di emissione e dati caratteristici del territorio in studio relativi ad alcune annualità. Per gli anni in cui non erano disponibili direttamente i dati disaggregati, sono state utilizzate opportune variabili surrogato (*variabili proxy*) per la disaggregazione spaziale e temporale delle emissioni.

Il **traffico veicolare**, circolante su una rete stradale di **circa 430 km** e suddivisa – ai fini dello studio - in oltre **2600 tronchi**, è stato caratterizzato mediante due campagne di misura dei flussi veicolari, condotte nel 2014 e nel 2017, in alcuni punti strategici distribuiti sull’intero grafo stradale. I risultati delle misure sono stati modellizzati con il software previsionale VISUM, che simula il flusso di veicoli sull’intero grafo stradale utilizzando matrici origine/destinazione. Infine, i flussi sono stati ulteriormente caratterizzati rispetto alle diverse tipologie di veicoli facendo riferimento alla composizione del parco circolante (dato ACI).

La caratterizzazione del traffico così definita ha permesso di identificare:

- aree del centro urbano con flussi circolanti nell’ora di punta fino a **3.100 veicoli/ora** e un valore medio orario di **300 veicoli/ora**;
- aree extraurbane, con un numero di veicoli circolanti fino a **4.000 veicoli/ora** e con un flusso medio orario di **1.200 veicoli/ora**.

Per ciascuno dei 2600 tronchi stradali sono state stimate le emissioni inquinanti annue di PM10 e NO₂ considerando il numero, la tipologia di veicoli circolanti e applicando i fattori di emissione sviluppati - e costantemente aggiornati - dalla metodologia europea CORINAIR che, per il traffico veicolare, si basa sul modello COPERT.

Le emissioni dovute al traffico veicolare sono state trattate, nel modello di diffusione, come sorgenti di tipo lineare.

Per la stima delle emissioni inquinanti derivanti dal **riscaldamento domestico** sono stati utilizzati i quantitativi di combustibile consumati a scopo domestico (metano, GPL, gasolio e biomasse come legna e pellet) all’interno del territorio del comune di Ravenna, secondo le stime fornite dall’inventario INEMAR. I consumi di metano sono stati associati in modo puntuale a oltre **20.000 utenze domestiche** (circa il **60% dei civici** presenti nel dominio di studio, mentre il rimanente **40%** corrisponde prevalentemente ad edifici non riscaldati), attraverso il confronto con i consumi registrati da Hera in corrispondenza dei medesimi contatori domestici. I consumi di GPL, gasolio e biomasse sono stati attribuiti principalmente a quelle porzioni di territorio, ricadenti nel dominio dello studio, non servite dalla rete del metano e/o aree extraurbane e rurali.

Per la stima delle emissioni inquinanti da caldaie domestiche sono stati utilizzati i fattori di emissione del database INEMAR (riferiti alle caldaie residenziali con potenza inferiore a 50 kW), fattori di emissione specifici per ciascuna tipologia di combustibile consumato. Per il 2015 ed il 2017 sono state stimate rispettivamente: **134 t/a** e **114 t/a** emissioni annue complessive di ossidi di azoto e **52 t/a** e **142 t/a** di particolato.

Le emissioni imputate al riscaldamento domestico sono state poi trattate come sorgenti di tipo areale attraverso l'impiego di **2100 celle di dimensioni 300 x 300 m**.

Le **sorgenti industriali** sono state censite e caratterizzate in modo puntuale facendo ricorso ai provvedimenti autorizzativi e alle attività di monitoraggio e controllo che annualmente vengono condotte dalle stesse aziende o nell'attività di vigilanza-ispezione. Poiché le autorizzazioni alle emissioni degli impianti riportano le concentrazioni massime che è consentito emettere mentre, mediamente, le concentrazioni di inquinanti emesse sono inferiori a quanto autorizzato, per ciascun inquinante e per ciascun impianto (o categoria di attività), è stato calcolato un fattore correttivo ("*fattore di riduzione, FR*") da applicare alle emissioni autorizzate. Il fattore di riduzione, applicato al dato autorizzato, consente una stima dell'emissione "ridotta" che meglio approssima la realtà. Queste informazioni risultano strutturate all'interno del database GIECA (Gestione Informatica Emissioni, Controlli e Autocontrolli), implementato da Arpa. Al fine del presente studio, sono state considerate le emissioni in atmosfera riferite alle annualità 2015 e 2017, imputate ad oltre **70 impianti industriali e oltre 600 camini** siti, in particolare, all'interno dell'area portuale ed industriale di Ravenna.

Le emissioni annuali dovute al settore industriale, rispettivamente per il 2015 ed il 2017, sono risultate pari a **2997 t/a** e **2706 t/a** per gli ossidi di azoto e di **128 t/a** e **107 t/a** per il particolato PM10.

Tali emissioni sono state trattate come sorgenti di tipo puntuale.

Le **attività portuali**, analizzate nello studio, riguardano lo scarico, il trasporto, il rimaneggiamento e lo stoccaggio di merci polverulente in depositi all'aperto. Per gli anni 2016 e 2018 sono state censite circa **40 aziende**, quali significative fonti di emissione di particolato diffuso nell'area portuale, caratterizzando le seguenti attività:

1. operazioni di sbarco/imbarco del carico tramite gru con benna (sorgente di tipo areale);
2. trasporto merci con camion in ambito portuale (sorgente di tipo lineare);
3. cumuli di stoccaggio all'aperto (sorgente di tipo areale).

Le emissioni annuali di particolato dovute alle attività portuali, rispettivamente per il 2016 ed il 2018, sono risultate pari **71.2 t/a** e **39.5 t/a**.

Tali emissioni sono state trattate come sorgenti di tipo puntuale, areale e lineare in funzione della tipologia (operazioni di sbarco, cumuli, ecc).

La stima delle emissioni dei vari macrosettori effettuata per le annualità in cui si avevano a disposizione i dati puntuali, è stata estesa agli altri anni, così da rappresentare l'intero periodo oggetto dello studio (2014 – 2019). La storicizzazione delle emissioni è stata condotta secondo lo schema riportato nella tabella 11.

Periodo	Traffico	Riscaldamento domestico	Sorgenti industriali	Attività portuali
2014	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2014	Stima a partire da consumi tot comunali 2015	Database 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2015	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2014	Stima a partire da consumi tot comunali 2015	Database 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2016	Flussi di traffico 2014 e parco veicolare 2014	Stima a partire da consumi tot comunali 2015	Database 2015	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2017	Flussi di traffico 2017 e parco veicolare 2017	Stima a partire da consumi tot comunali 2017	Database 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2016
2018	Flussi di traffico 2017 e parco veicolare 2017	Stima a partire da consumi tot comunali 2017	Database 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2018
2019	Flussi di traffico 2017 e parco veicolare 2017	Stima a partire da consumi tot comunali 2017	Database 2017	Posizione dei cumuli 2018 ed emissioni 2018

Tabella 11 – Inventari utilizzati per la storicizzazione delle diverse macrosorgenti emissive

Per la **quantificazione delle immissioni** di PM10 e di NO₂ è stato applicato il modello analitico stazionario avanzato di tipo gaussiano ADMS-Urban che, utilizzando le emissioni stimate ed i parametri meteorologici misurati in area urbana e portuale, consente di stimare sull'intera area studio le concentrazioni degli inquinanti atmosferici.

Per ciascuna sorgente e per ciascun inquinante sono state effettuate simulazioni modellistiche con risoluzione temporale mensile e annuale, ottenendo mappe mensili ed annuali delle concentrazioni totali di PM10 e NO₂ sull'area di studio. Inoltre, i contributi alle immissioni di ciascuna sorgente sono stati combinati tra loro, così da ottenere le relative mappe mensili e annuali delle concentrazioni totali di PM10 e NO₂ imputate alla presenza congiunta di tutte le sorgenti.

L'attività modellistica ed i risultati conseguiti sono riportati nelle 1200 mappe allegate, in particolare:

Traffico veicolare:	240 simulazioni mensili e 20 simulazioni annuali	→	260 mappe di isoconcentrazione
Riscaldamento:	140 simulazioni mensili e 20 simulazioni annuali	→	160 mappe di isoconcentrazione
Industria:	240 simulazioni mensili e 20 simulazioni annuali	→	260 mappe di isoconcentrazione
Porto:	240 simulazioni mensili e 20 simulazioni annuali	→	260 mappe di isoconcentrazione
Tutte le sorgenti:	Integrazione con approccio di Spatial Analyst	→	260 mappe di isoconcentrazione
TOTALE:	860 simulazioni mensili e 80 simulazioni annuali	→	1200 mappe di isoconcentrazione

L'integrazione dei contributi di ciascuna sorgente alle concentrazioni inquinanti totali è stata condotta mediante uno strumento di *Spatial Analys* applicato su una rete di **22.500 punti** equamente distribuiti sull'intero dominio di studio e distanziati tra loro **100 metri**. Questo approccio consente di disporre, per ogni punto, del contributo percentuale di ciascuna sorgente alla concentrazione totale, fornendo indicazioni circa l'incidenza delle diverse sorgenti e la progressiva evoluzione dell'inquinamento atmosferico. A titolo esemplificativo, per il particolato sono evidenti alcune variazioni nel contributo percentuale delle attività portuali ed industriali nel 2015 presso la stazione Porto San Vitale e per il traffico dal 2017 presso la stazione Marani. Per l'NO₂, si evidenzia un incremento dell'incidenza delle industrie dal 2017 a Porto San Vitale e del riscaldamento dal 2016 a Caorle, a fronte di una generale riduzione dell'effetto percentuale del traffico veicolare presso tutte le postazioni.

I risultati delle simulazioni sono stati validati attraverso indici statistici che consentono di valutare il grado di accordo tra il dato stimato dal modello ed il dato misurato dalle stazioni fisse di monitoraggio della qualità dell'aria presenti all'interno dell'area studio. La validazione è stata condotta per ciascuna annualità con i valori di concentrazione medi annui, medi mensili e medi giornalieri. La validazione ha evidenziato un buon accordo tra i dati misurati e simulati per entrambi gli inquinanti in corrispondenza della maggior parte delle stazioni.

Per il particolato, la variazione percentuale media risulta inferiore al **10%** e, comunque, inferiore al **34%** nel caso peggiore (San Vitale), mentre per l'NO₂ la variazione % risulta compresa tra **-56%** e **+61%**, rispettivamente presso le stazioni di Porto San Vitale e Marina di Ravenna. In generale, il modello tende a sottostimare le concentrazioni degli inquinanti presso la postazione di Porto San Vitale (anche per la difficoltà di caratterizzare la variabilità delle attività in area portuale), mentre evidenzia una modesta sottostima nelle altre stazioni della rete.

Il 2016 è l'anno in cui il dato stimato e quello misurato differiscono maggiormente. Per il particolato le variazioni percentuali risultano comprese tra il **12%** (Rocca, Zalamella) ed il **34%** (Porto San Vitale), mentre per l'NO₂ sono comprese tra **5%** (Caorle) e **61%** (Marina di Ravenna).

Anche la valutazione dei risultati della simulazione con i dati ottenuti dalle stazioni di misurazione mediante gli indicatori previsti dal D.Lgs 155/10 risulta soddisfacente, con valori spesso prossimi alla prestazione ideale.

Tali riscontri consentono di valutare i risultati conseguiti come attendibili per le successive elaborazioni epidemiologiche-sanitarie, oltre a costituire un utile riferimento quale quadro conoscitivo dell'origine dell'inquinamento atmosferico dell'area urbana di Ravenna.