

Proponente:



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti



ENTE NAZIONALE PER L'AVIAZIONE CIVILE

Società Aeroporto Toscano SpA

Servizio Tecnico

Il Responsabile

Ing. Pasquale Tirota

*[Signature]*



SAT S.p.A.

Aeroporto Galileo Galilei

56121 PISA (ITALIA)

Tel: 0501849 111 - Fax: 0501598097

Società Aeroporto Toscano Galileo Galilei

Direttore Tecnico e PH Progettazione e Manutenzione: Ing. Pasquale Tirota

Responsabile di Commessa e Project Manager: Ing. Federico Cecchetti

Studi Ambientali:



MANCINO STUDIO TECNICO - Pisa  
via di Tegulara, 3 - 56100 Ospedaletto PISA  
Tel./Fax: 050988 355  
w: www.MancinoStudioTecnico.TK  
e: info@MancinoStudioTecnico.TK

Dott. Arch. Marco Mancino  
Pianificatore Territoriale - G.A. - P.n. 1050

Dott. Ing. Simone Pagni  
Ingegnere Ambientale - D.I. - P.n. 1997

Studi specializzati:

MODELLAZIONE ACUSTICA

CONSORZIO DIONIGI - Torino

Dott. Ing. RafDouglas C. Tommasi  
Pr.D. TCAA - D.I. - U.D.n. 2356

MODELLAZIONE EMISSIONI ATMOSFERICHE

ARIANET - Milano

Dott. Alessandro Nanni

Ing. SIMONE PAGNI  
ORDINE INGEGNERI della Provincia di PISA  
N° 1997 Sezione A  
INGEGNERE CIVILE E AMBIENTALE  
INDUSTRIALE DELL'INFRASTRUTTURA

*Simone Pagni*



Procedimento:

Verifica di assoggettabilità a V.I.A.  
art. 20 D.lgs. 152/2006 ss.mm.ii.

MASTERPLAN 2014-2028  
Aeroporto Internazionale G. Galilei - Pisa

Oggetto:

STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE

Titolo:

Relazione simulazioni impatto atmosferico  
scenario 2028

Scala:

Cod. Elab.: 07\_AMB\_ATM\_R

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	Elaborato N°:
00	Nov. 14	07_AMB_ATM_R.pdf	Emiss.	07
Cod. progetto:		Redatto:	Verificato:	Approvato:



Studio d'impatto atmosferico del  
Piano di Sviluppo Aeroportuale  
(Masterplan) dell'aeroporto  
'Galilei' di Pisa per il periodo  
2014 - 2028

R2014.27

Novembre 2014

**Autori:** A. Nanni, C. Pozzi, P. Radice

---

## CONTENTS

<b>1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Approccio metodologico .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Caratterizzazione dell'area di indagine .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Caratterizzazione meteorologica .....</b>	<b>6</b>
4.1	Vento .....	7
4.2	Temperatura .....	9
4.3	Nuvolosità e calcolo della radiazione .....	10
4.4	Stabilità atmosferica .....	11
4.5	Altezza dello strato rimescolato .....	12
<b>5</b>	<b>Principali inquinanti atmosferici.....</b>	<b>14</b>
5.1.1	Il monossido di carbonio .....	14
5.1.2	Gli ossidi di azoto.....	14
5.1.3	Il particolato .....	15
5.1.4	Il benzene .....	15
5.1.5	Il biossido di carbonio (CO <sub>2</sub> ).....	16
5.2	Inquadramento normativo .....	16
5.2.1	Normativa europea .....	16
5.2.2	Normativa nazionale.....	16
5.3	Relazione semiempirica tra le concentrazioni in aria di NO <sub>x</sub> e NO <sub>2</sub> .....	18
5.4	Monitoraggio dell'inquinamento atmosferico nei confini del sedime aeroportuale .....	19
<b>6</b>	<b>Stima delle emissioni aeroportuali.....</b>	<b>22</b>
6.1	Approccio metodologico alla stima delle emissioni degli aerei commerciali .....	22
6.2	Attività aeroportuale di Pisa San Giusto.....	23
6.3	Tempi caratteristici di fase (TIM) .....	25
6.4	Caratterizzazione della flotta .....	26
6.5	Database ICAO dei fattori di emissione .....	27
6.6	Calcolo delle emissioni .....	27
6.6.1	Correlazione tra "smoke number" ed emissione di PM <sub>10</sub> .....	28
6.7	Contributi alle emissioni delle fasi LTO .....	30
6.8	Sorgenti emissive diverse dagli aeromobili.....	31
6.8.1	Ground Support Equipment (GSE) .....	31
6.8.2	Centrali termiche .....	32
6.8.3	Parcheggi .....	33
6.8.4	Depositi di carburante .....	35
6.8.5	Mezzi cargo .....	36
6.9	Sintesi delle emissioni simulate.....	38

<b>7</b>	<b>Simulazioni modellistiche di dispersione</b> .....	<b>39</b>
7.1	Descrizione del modello ARIA Impact.....	39
7.2	Ripartizione delle emissioni nelle sorgenti virtuali utilizzate.....	41
7.3	Descrizione delle simulazioni e risultati.....	42
7.3.1	Simulazione del periodo invernale.....	43
7.3.2	Simulazione del periodo estivo.....	52
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b> .....	<b>61</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>63</b>

# 1 Introduzione

Il presente studio modellistico ha l'obiettivo di rispondere all'esigenza della Società Aeroporto Toscano S.p.A. dell'aeroporto Galileo Galilei di Pisa di stimare l'impatto al suolo prodotto dagli inquinanti in atmosfera emessi dalle attività aeroportuali così come andranno a delinearsi nell'anno 2028 secondo il Piano di Sviluppo Aeroportuale (Masterplan) approvato da ENAC nel maggio 2014.

Questo studio si pone come uno strumento di valutazione dei contributi delle diverse fonti che saranno presenti all'interno del sedime aeroportuale: aeromobili (sia nelle fasi a terra che in quelle di decollo ed atterraggio), mezzi di supporto a terra (GSE – "Ground Support Equipment"), centrali termiche, depositi di carburante, veicoli logistici pesanti, veicoli fruitori delle aree di parcheggio.

La dispersione e la ricaduta degli inquinanti emessi sono stimate mediante modellazione matematica. L'obiettivo finale dello studio è di derivare informazioni circa la distribuzione spaziale dell'inquinamento atmosferico prodotto attualmente dal sistema aeroportuale in esame, sulla base di due periodi temporali (uno estivo ed uno invernale), della durata di qualche mese ciascuno, che coincidono con i periodi di maggior attività.

## 2 Approccio metodologico

Nella relazione verrà riportata la metodologia con la quale sono state stimate le emissioni in atmosfera, avvalendosi dei dati di attività forniti dalle stesse autorità aeroportuali, ed applicandovi fattori di emissione riconosciuti a livello internazionale.

L'uso di metodologie modellistiche diffusionali, per lo studio degli impatti sull'ambiente atmosferico d'impianti industriali o di infrastrutture per il trasporto, è ormai pratica raccomandata anche in Italia. Tale genere di studi è, anzi, richiesto sempre più spesso dall'Amministrazione Pubblica, come documento d'indagine, per il comparto ambientale, allegato al fascicolo tecnico per l'iter d'autorizzazione alla realizzazione di nuovi impianti (V.I.A.), o alla rilevante modifica di quelli già esistenti.

Le citate metodologie modellistiche consistono sostanzialmente in programmi software che simulano la dispersione degli inquinanti in atmosfera, sulla base di algoritmi dal solido fondamento scientifico e di una serie di parametrizzazioni semiempiriche, necessarie a collegare le equazioni generali della fisica dell'atmosfera alle particolari condizioni meteorologiche e geomorfologiche del sito di studio. Tramite tali parametrizzazioni, il modello matematico fornisce una soluzione numerica semplificata al complesso problema fisico di determinare, supposte note la meteorologia, la conformazione del terreno e la varietà delle emissioni inquinanti, la distribuzione spaziale e temporale sul territorio dell'inquinamento atmosferico. Tale soluzione rimane comunque in grado di fornire utilissime informazioni non solo al tecnico ambientale o al progettista ma anche all'Amministrazione chiamata a valutare l'opera a scopo pianificatorio.

La simulazione matematica del trasporto e della diffusione degli inquinanti segue differenti approcci, in base alle caratteristiche del sito in esame (costiero o continentale, piatto o complesso, con insediamenti abitativi di bassa o alta densità, ecc.) e delle emissioni (prevalentemente diffuse o concentrate in punti isolati, oppure dovute alla presenza di importanti sorgenti mobili, ecc.). Nella scelta della metodologia più appropriata, inoltre, svolgono una funzione decisiva il livello di dettaglio delle informazioni meteorologiche disponibili, le prestazioni dell'hardware e gli obiettivi delle elaborazioni.

In sintesi il problema può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- una prima fase consiste nella caratterizzazione del sito di studio da un punto di vista meteorologico;
- nella seconda fase si individuano le sorgenti inquinanti e se ne stima l'attività emissiva;
- una terza fase riguarda il calcolo della dispersione a breve e medio raggio.

### 3 Caratterizzazione dell'area di indagine

L'aeroporto di Pisa è un aeroporto militare aperto al traffico civile ed è caratterizzato da due piste

L'aeroporto di Pisa è un aeroporto militare aperto al traffico civile ed è attualmente caratterizzato da due piste lunghe rispettivamente 3000 e 2800 metri che si sviluppano su un asse Nord Est – Sud Ovest. Tra gli interventi programmati nell'ambito dello sviluppo dello scalo c'è la realizzazione di un collegamento tra le estremità sud-occidentali delle due piste con conseguente arretramento di 400m del punto di stacco in fase di decollo verso la città.

Il complesso aeroportuale infatti si trova a circa un chilometro dal centro cittadino e per questo si è ritenuto opportuno indagare a fondo circa gli eventuali impatti delle attività che vi si svolgono.

Il dominio di indagine è un'area di 10X10Km<sup>2</sup>, ad un dettaglio di 100m.

L'aeroporto di Pisa è un aeroporto militare aperto al traffico civile ed è attualmente caratterizzato da due piste lunghe rispettivamente 3000 e 2800 metri che si sviluppano su un asse Nord Est – Sud Ovest. Tra gli interventi programmati nell'ambito dello sviluppo dello scalo c'è la realizzazione di un collegamento tra le estremità sud-occidentali delle due piste con conseguente arretramento di 400m del punto di stacco in fase di decollo verso la città.

Il complesso aeroportuale infatti si trova a circa un chilometro dal centro cittadino e per questo si è ritenuto opportuno indagare a fondo circa gli eventuali impatti delle attività che vi si svolgono.

Il dominio di indagine è un'area di 10X10Km<sup>2</sup>, ad un dettaglio di 100m.

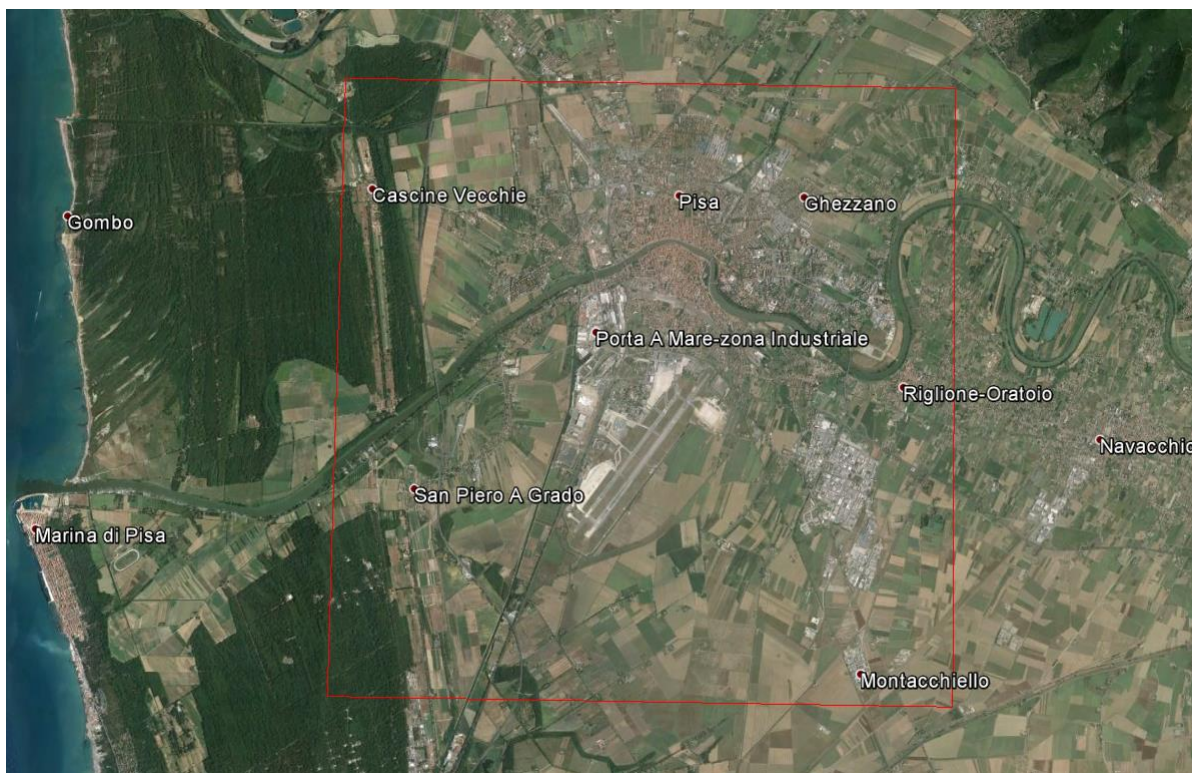


Figura 1. Area di indagine



## 4 Caratterizzazione meteoclimatica

La meteorologia riveste un ruolo fondamentale per la rappresentazione dei fenomeni di trasporto e dispersione degli inquinanti in atmosfera. Per caratterizzare la meteoclimatologia locale, sono state acquisite ed elaborate due serie meteorologiche derivanti dalla medesima stazione synop dell'aeroporto di Pisa e gestita dall'Aeronautica Militare. I dati sono stati acquisiti da UCAR (University Corporation for Atmospheric Research - <http://dss.ucar.edu/>) che ha in linea, liberamente accessibile, una base dati meteorologica con i dati di tutte le stazioni meteorologiche mondiali che afferiscono alla WMO (World Meteorological Organization).

Le due serie meteorologiche, pur corrispondenti ai medesimi sensori, sono diverse in termini di report trasmessi:

- la serie tipo synop (codice WMO: 16158) ha frequenza tri-oraria e presenta le osservazioni di velocità e direzione del vento, visibilità, tempo presente e passato, pressione al livello del mare ed alla quota stazione, temperatura dell'aria e di bulbo umido, nuvolosità totale, precipitazione cumulata su 6 ore;
- la serie tipo metar (codice WMO: LIRP) ha frequenza mezz'oraria e presenta le osservazioni di velocità e direzione del vento, visibilità, tempo presente, temperatura dell'aria e di bulbo umido.

Le due serie sono complementari, nel senso che ove la scadenza delle osservazioni coincida, esse corrispondono, altrimenti la serie metar, che come detto ha frequenza mezz'oraria, va a riempire le lacune (solo per certe variabili) presenti nella synop, tri-oraria.

L'intervallo di dati acquisito, compreso tra gennaio 2007 e gennaio 2008, presenta elevate percentuali di validità di dati synop, oscillanti tra l'88.3% della velocità del vento ed il 98.7% degli altri parametri. Per quanto riguarda la velocità del vento la percentuale di disponibilità non include gli zeri, considerati non attendibili; la disponibilità della precipitazione a 6 ore non è invece determinabile in quanto alla precipitazione nulla è assegnato il codice di dato mancante.

La disponibilità di dati validi nella serie metar risulta di nuovo piuttosto buona ed oscilla tra il 69.8% della velocità del vento ed il 97.9% della temperatura.

Questa buona copertura temporale dei dati meteorologici autorizza a colmare le lacune ancora presenti nella base dati, una volta unite le due serie temporali, mediante procedure d'interpolazione.

Tra le variabili meteorologiche a disposizione, particolare attenzione è stata posta nell'analisi di quelle direttamente coinvolte nelle simulazioni modellistiche di dispersione, ovvero:

- Vento.
- Temperatura;
- Nuvolosità;
- Categoria di stabilità atmosferica.

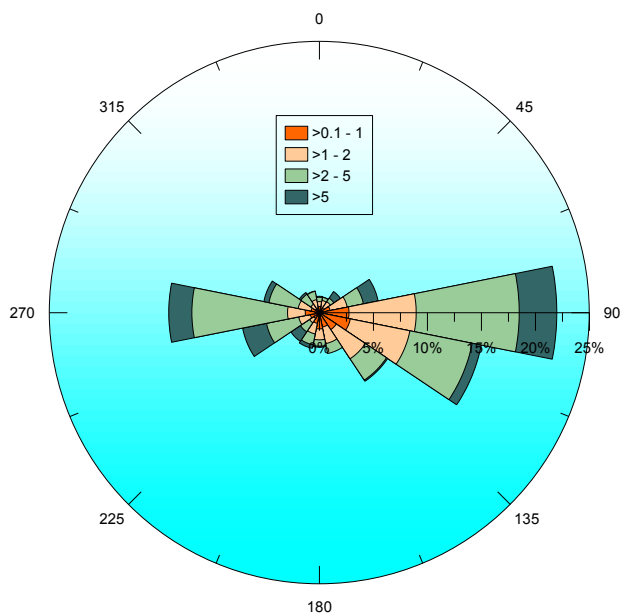
Per completezza, le statistiche meteorologiche presentate nel seguito si riferiscono sia ad un intero anno (2007) sia agli intervalli temporali utilizzati per le simulazioni, ovvero da giugno a settembre 2007 per la simulazione estiva e dicembre 2007 – gennaio 2008 per quella invernale.

#### 4.1 Vento

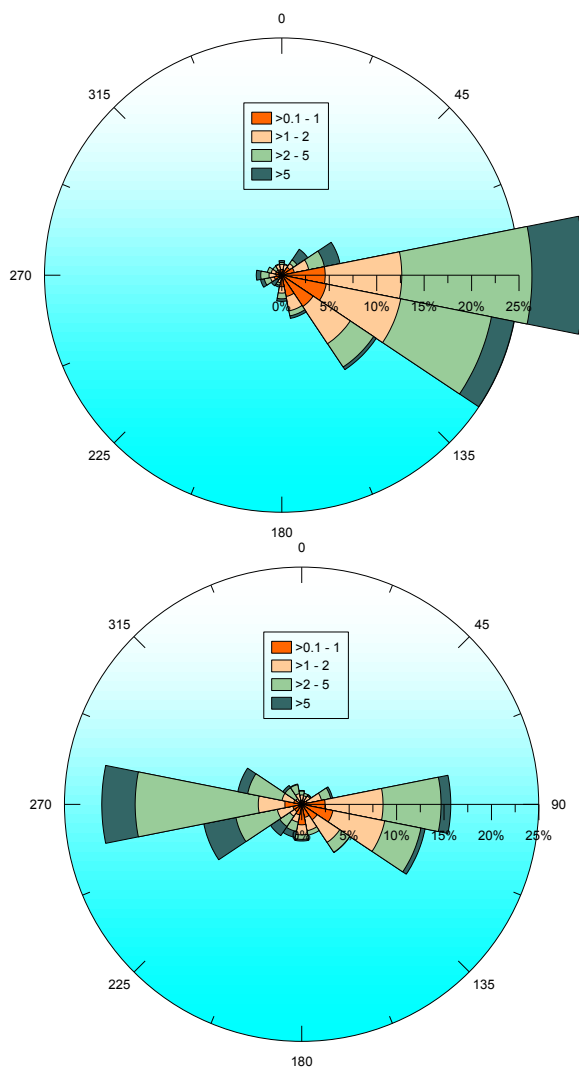
La Figura 2 presenta la rosa dei venti annuale relativa all'intero anno 2007 mentre la Figura 3 le rose relative agli intervalli temporali selezionati per i due periodi di simulazione invernale ed estivo.

A livello annuale, i venti provengono essenzialmente da est-sud-est e da ovest. Le calme di vento (velocità al di sotto di 1m/s), che rappresentano circa il 21.8% mostrano una distribuzione maggiormente polarizzata da est-sud-est.

La rosa del periodo invernale mostra una decisa prevalenza dei venti da est-sud-est e una superiore frequenza delle calme di vento (24%) mentre per il periodo estivo la direzione prevalente è comparabile con quella dell'intero anno (est-sud-est e ovest) con una frequenza di calme di vento leggermente inferiore ( 19.4%).



**Figura 2. Aeroporto di Pisa S. Giusto - Rosa dei venti anno 2007 (percentuale delle calme: 21.8%).**

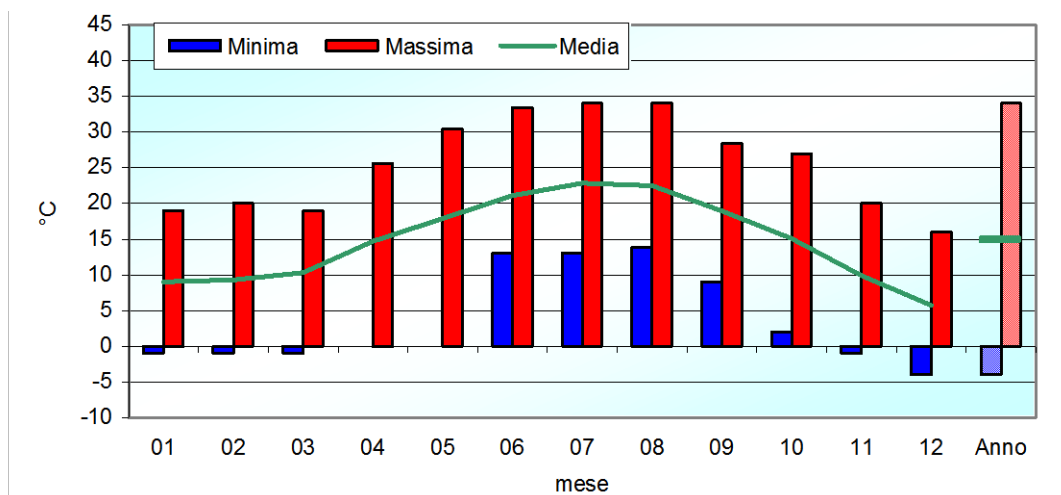


**Figura 3. Aeroporto di Pisa S. Giusto - Rose dei venti periodi dic.2007 – gen.2008 (sinistra, percentuale delle calme: 24.0%) e giu – set 2007 (destra, calme: 19.4%).**

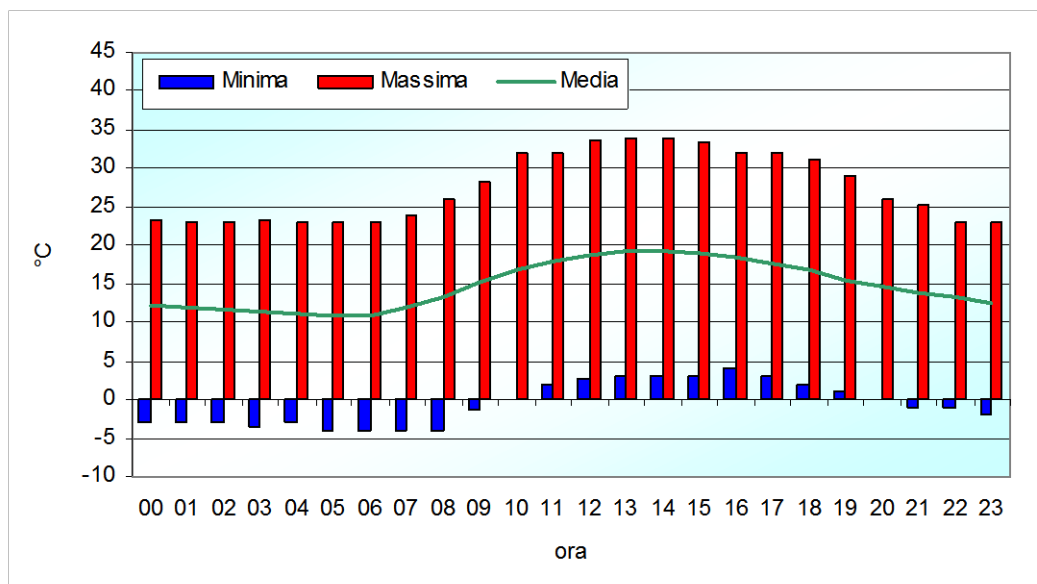
## 4.2 Temperatura

L'andamento mensile delle temperature media, minima e massima è riportato in Figura 4. A livello generale, possiamo osservare come la temperatura media calcolata su tutto l'anno presenti una escursione termica contenuta, passando da una temperatura di 5.7°C misurata nel mese di gennaio ai 22.9°C di luglio. L'escursione termica assoluta è invece stimata in circa 38°C (dal valore minimo di -4.0°C misurato a dicembre al valore massimo, pari ai 34.0°C, di luglio). L'anno presenta una trascurabile anomalia termica a marzo quando la massima è risultata inferiore rispetto a febbraio.

La Figura 5 presenta l'analogo andamento termico ora per ora. La temperatura è minima poco prima dell'alba, tra le 5 e le otto, massima tra le 13 e le 14.



**Figura 4. Andamento mensile della temperatura media, minima e massima**



**Figura 5. Andamento orario della temperatura media, minima e massima**

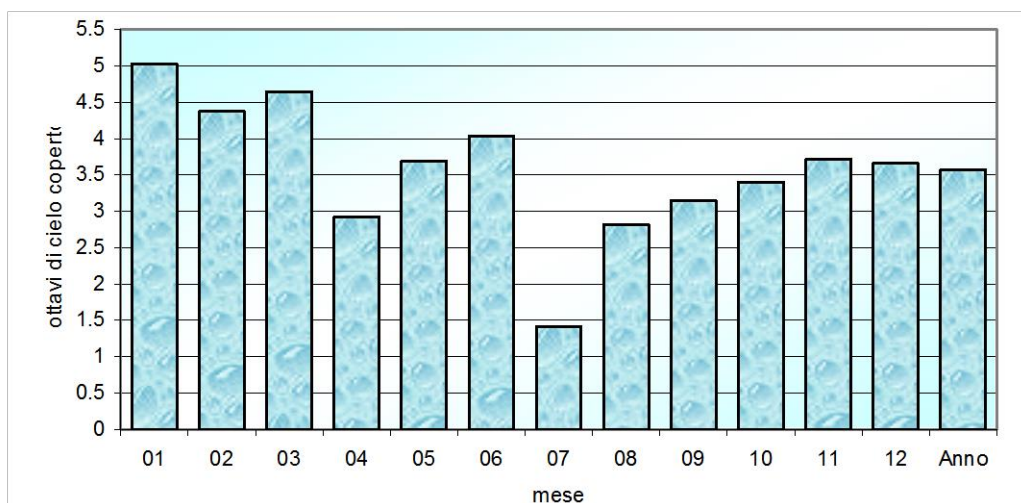
### 4.3 Nuvolosità e calcolo della radiazione

La stazione synop di Pisa fornisce i dati di nuvolosità, espressa in ottavi:

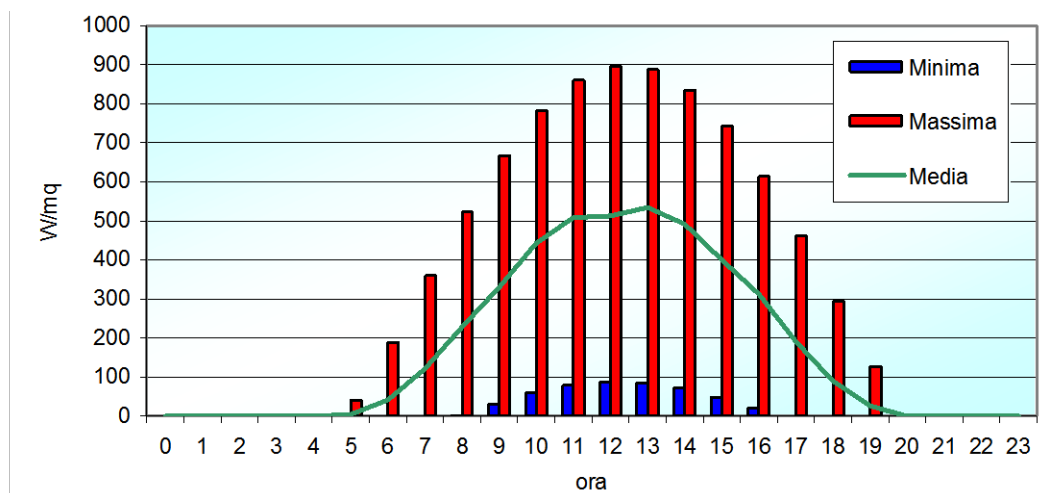
- 8 ottavi: cielo totalmente coperto senza alcuna zona di sereno (COPERTO);
- 5, 6 o 7 ottavi: cielo quasi totalmente coperto da nubi, con limitati spazi di sereno (MOLTO NUVOLOSO)
- 3 o 4 ottavi: cielo coperto da nuvolosità per circa metà superficie (NUVOLOSO)
- 1 o 2 ottavi: cielo quasi interamente sgombro di nubi (POCO NUVOLOSO)
- 0 ottavi: cielo totalmente o quasi sgombro da nubi (SERENO).

Dalla Figura 6 si evince come la nuvolosità media risulti minima in luglio e massima in gennaio, con un massimo relativo anche a maggio.

In base alla nuvolosità è possibile stimare la radiazione solare al suolo (considerando la radiazione incidente teorica che dipende dalla latitudine) necessaria per determinare la stabilità atmosferica; la Figura 7 presenta gli andamenti giornalieri medio calcolato su tutto l'anno, massimo del mese di giugno e minimo del mese di dicembre. Il massimo raggiunge mediamente nel mese di giugno un livello pari a  $896.7\text{W/m}^2$  (alle ore 12); il minimo di dicembre è pari, alla stessa ora, a  $176.8\text{W/m}^2$ . La media delle ore 12 presenta una leggera anomalia legata alla maggiore nuvolosità registrata in quell'ora.



**Figura 6. Andamento mensile della nuvolosità media**



**Figura 7. Andamento giornaliero della radiazione totale: media annuale, minima, registrata nel mese di dicembre e massima relativa a giugno.**

#### 4.4 Stabilità atmosferica

In base alla velocità del vento ed alla radiazione totale incidente, nel corso delle ore diurne, o alla copertura nuvolosa, nel corso della notte, è stata calcolata la stabilità atmosferica, parametro necessario ai fini del calcolo della turbolenza e, dunque, della dispersione degli inquinanti. La stabilità è stata parametrizzata tramite le classi di Pasquill, secondo cui:

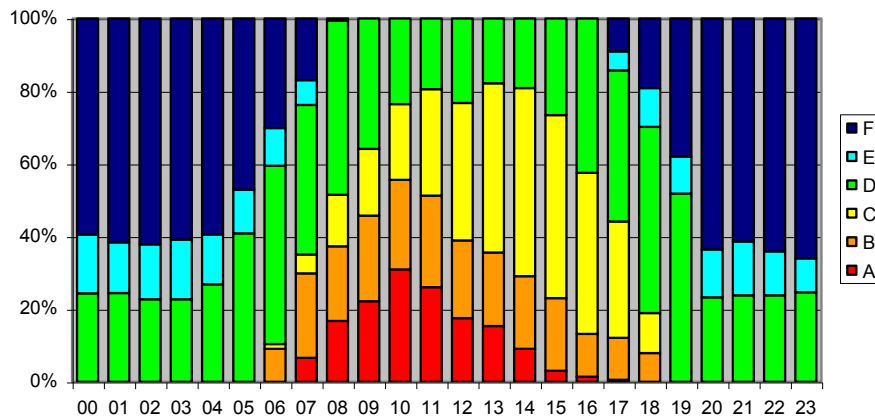
- un'atmosfera con caratteristiche prevalentemente convettive è detta instabile, e viene rappresentata con le classi di stabilità A e B;
- al diminuire della turbolenza si avranno le classi C e D diurne e D ed E notturne, che esprimono, rispettivamente, un'atmosfera debolmente instabile, neutra e moderatamente stabile;
- nei casi in cui ci si trovi in presenza di un'atmosfera particolarmente stabile, tipica delle notti con vento debole (inferiore a 2m/s) e cielo sereno, si utilizza la classe F, che può essere caratterizzata addirittura da forti gradienti verticali di inversione termica, con turbolenza praticamente assente e forte attitudine al ristagno atmosferico.

Nel caso di condizioni instabili, gli inquinanti sono facilmente dispersi in atmosfera, per effetto della turbolenza convettiva e/o meccanica. In condizioni stabili, d'altra parte, gli inquinanti tendono a rimanere confinati in uno stretto strato atmosferico, all'altezza della sorgente che li emette, a causa della scarsa capacità di diluizione. La classe D (neutra) corrisponde a situazioni sia di cielo coperto, con o senza precipitazioni, sia di vento forte (>6 m/s), con prevalenza quindi di turbolenza di natura meccanica.

L'andamento annuale (Tabella 1) mostra la massima frequenza per la categoria D (31.2%) e la F (30.0%), mentre la categoria meno rappresentata è la A (6.2%). A livello stagionale, la F non presenta grande variabilità, la D è più frequente in autunno, la C decisamente più frequente in primavera ed estate. L'andamento giornaliero della distribuzione di stabilità atmosferica è riportato in Figura 8, dove è evidente l'effetto del rinforzo pomeridiano dei venti (aumenta la frequenza della classe C, diminuisce quella della A).

**Tabella 1. Distribuzione stagionale e annuale delle classi di stabilità atmosferica**

Stagione	A	B	C	D	E	F
Inverno	4.4%	9.3%	7.4%	36.3%	13.2%	29.2%
Primavera	8.6%	13.6%	22.0%	21.3%	6.5%	28.0%
Estate	8.5%	9.6%	23.6%	22.5%	4.1%	31.8%
Autunno	3.4%	7.4%	7.4%	44.7%	6.3%	30.8%
Anno	6.2%	10.0%	15.1%	31.2%	7.5%	30.0%



**Figura 8. Andamento giornaliero della stabilità atmosferica.**

#### 4.5 Altezza dello strato rimescolato

Una grandezza meteorologica importante ai fini del calcolo modellistico della dispersione atmosferica è  $Z_i$ , altezza dello strato di rimescolamento o PBL ("Planetary Boundary Layer"), cioè di quel primo strato atmosferico a contatto con il terreno entro cui sono confinati gli inquinanti atmosferici (con un profilo verticale della concentrazione praticamente uniforme) emessi al suolo. L'altezza del PBL è determinata dall'intensità della turbolenza atmosferica innescata dagli effetti termici del riscaldamento della superficie terrestre e da quelli meccanici dovuti all'attrito dell'aria con la superficie terrestre: sarà dunque maggiore di giorno, in presenza di forte radiazione solare, o con il vento forte, minore di notte oppure in condizioni di calma di vento e suolo freddo (nebbie).

Questa grandezza non è rilevata direttamente dalle stazioni meteorologiche ma stimata indirettamente a partire da altri parametri meteorologici (i profili verticali di vento o temperatura, i flussi di calore sensibile o latente al suolo e così via).

Il metodo utilizzato nel presente studio per stimare, ora per ora,  $Z_i$  è tratto dal preprocessore meteorologico METPRO sviluppato da EPA (Paine, 1988). Questo metodo suddivide le condizioni meteorologiche in diurne e notturne.

Di notte,  $Z_i$  è determinata tramite la formula di Nieuwstadt (1981) e Zilitinkevich (1972):

$$\frac{Z_i}{L_{mo}} = \frac{0.3 u_*}{f L_{mo} \left( 1 + 1.9 \frac{Z_i}{L_{mo}} \right)}$$

dove:  $f$  è il parametro di Coriolis;

$L_{mo}$  è la lunghezza di Monin-Obukhov;

$u_*$  è la velocità di attrito.

Sempre di notte ma in condizioni neutre ( $L_{mo}$  molto grande),  $Z_i$  è determinata dalla seguente formula:

$$Z_i = \frac{0.3 u_*}{f L_{mo}}$$

Di giorno,  $Z_i$  è calcolata mediante l'equazione di bilancio termico al suolo, in base all'assunto che il riscaldamento del suolo dà vita ad uno strato adiabatico dal suolo fino a  $Z_i$ . In sostanza, la formula utilizzata è la seguente (Panofsky and Dutton, 1984):

$$Z_i = \left( \frac{2 \int_{t_0}^t H dt}{c_p \rho (\gamma_d - \gamma)} \right)^{1/2}$$

dove:  $H$  è il flusso di calore superficiale;

$t_0$  è l'ora dell'alba;

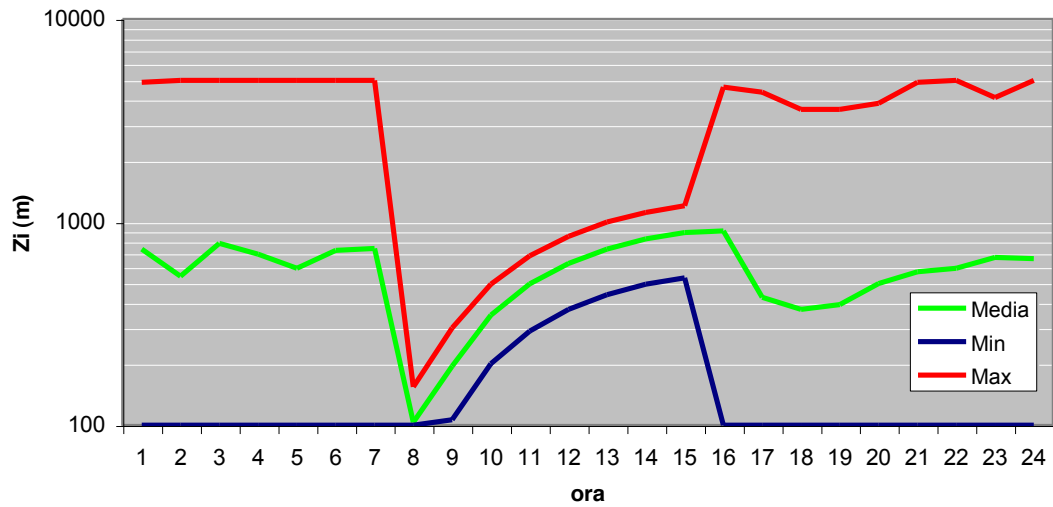
$c_p$  e  $\rho$  sono rispettivamente il calore specifico a pressione costante e la densità dell'aria;

$\gamma$  e  $\gamma_d$  sono rispettivamente i gradienti verticale di temperatura all'alba ed adiabatico.

Il calcolo di  $Z_i$  è infine limitato inferiormente a 100m e superiormente a 5000m.

La Figura 9 presenta gli andamenti orari medio, minimo e massimo di  $Z_i$  nel periodo esaminato. Si distinguono chiaramente i due regimi notturno e diurno. Gli elevati valori notturni sono legati alle

situazioni di neutralità (cielo coperto, vento forte). Mediamente, invece, i valori diurni sono superiori a quelli notturni. I massimi diurni sono legati alle situazioni instabili (vento debole, cielo sereno) così come i valori minimi notturni alle situazioni stabili.



**Figura 9. Andamento orario della altezza di rimescolamento media, minima e massima nel periodo di simulazione**



## 5 Principali inquinanti atmosferici

La presenza di un'elevata densità di attività antropiche ed emissive in un ambiente con caratteristiche di dispersione atmosferica non pronunciate, può generare variazioni significative della qualità dell'aria in ambito locale. Tipici esempi di infrastrutture in cui sono rilevabili criticità ambientali sono le aree urbane, le reti stradali e i poli industriali. Le conseguenze di un'alterazione della qualità dell'aria sono possibili rischi per la salute, danni alla vegetazione ed agli ecosistemi.

In particolare i motori degli aerei producono ossido di azoto (NO<sub>x</sub>), idrocarburi (HC), monossido di carbonio (CO), e particolato. Non ultimo causano una produzione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), che, a livello mondiale nel 2012 risultava essere circa l'1.4% delle emissioni globali.

Gli effetti legati a tali inquinanti riguardano:

- Qualità dell'aria locale (a quote basse)
- Cambiamenti climatici

Le caratteristiche degli inquinanti atmosferici considerati in questo studio sono qui di seguito descritte brevemente.

### 5.1.1 Il monossido di carbonio

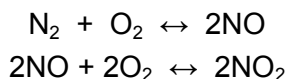
Il monossido di carbonio è un composto inodore, incolore e insapore; è gassoso a temperature superiori a -192 °C; non è apprezzabilmente solubile in acqua, ed ha un peso pari al 96,5% del peso dell'aria. La formazione di ossidi di carbonio può avvenire secondo i seguenti processi:

- combustione incompleta di carbonio o di composti contenenti carbonio
- reazione a elevata temperatura tra CO<sub>2</sub> e composti contenenti carbonio
- dissociazione ad elevate temperature di CO<sub>2</sub> in CO e O

La sorgente più importante è costituita dai mezzi di trasporto; fra questi, si distinguono gli autoveicoli a benzina; il trattamento dei rifiuti, variamente articolato sul territorio nazionale, comprende l'incenerimento di rifiuti urbani, agricoli e industriali.

### 5.1.2 Gli ossidi di azoto

In termini d'inquinamento atmosferico, gli ossidi di azoto che destano più preoccupazione sono NO ed NO<sub>2</sub>. Tali prodotti giungono dalla reazione di due gas (N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) comunemente presenti nell'aria nelle percentuali di circa 80% e 20% rispettivamente. I due gas reagiscono però solo ad elevate temperature formando monossido di azoto, il quale, ossidandosi a sua volta, forma biossido di azoto secondo le seguenti reazioni:



Ne consegue che le combustioni hanno come reazioni collaterali le due riportate sopra.

Oltre che per le sue caratteristiche di tossicità (piuttosto ridotte) NO è importante in quanto entra nel ciclo fotolitico dell'azoto. Tale fenomeno è una conseguenza diretta della interazione tra luce solare e NO<sub>2</sub>. Le fasi del ciclo sono:

- NO<sub>2</sub> assorbe energia dal sole sotto forma di luce ultravioletta;
- l'energia assorbita scinde le molecole di NO<sub>2</sub> in molecole di NO e atomi di ossigeno O; l'ossigeno atomico prodotto è molto reattivo;

- gli atomi di ossigeno atomico reagiscono con l'ossigeno atmosferico ( $O_2$ ) per produrre ozono ( $O_3$ ), un inquinante secondario;
- l'ozono reagisce con NO per dare  $NO_2$  e  $O_2$  e il ciclo si chiude.

Se il ciclo avvenisse effettivamente così,  $NO_2$  si convertirebbe in NO per convertirsi nuovamente in  $NO_2$  senza modifiche nelle concentrazioni dei due composti a regime. Ma gli idrocarburi presenti nell'atmosfera interferiscono nel ciclo permettendo che NO si converta più rapidamente in  $NO_2$  di quanto  $NO_2$  venga dissociato in NO e O, con un conseguente accumulo di  $NO_2$  e di ozono.

La maggior fonte di inquinamento da  $NO_x$  sono i trasporti. In particolare i motori diesel producono più ossidi di azoto dei motori a benzina, poiché utilizzano miscele molto povere in termini di rapporto aria-combustibile. Molto elevata è anche l'emissione dovuta a combustione in impianti fissi, specialmente impianti termoelettrici.

### 5.1.3 Il particolato

L'insieme complessivo delle particelle presenti in atmosfera prende il nome di PTS (Particolato Totale Sospeso). Con la terminologia aerosol atmosferici si intende l'insieme delle particelle la cui dimensione può variare da qualche decimo a qualche centinaio di micron ( $\mu m$ ). Particelle di diametro inferiore a  $2.5\mu m$  (generalmente indicate con la sigla PM2.5) sono dette particolato fine (fine particles), quelle di dimensione superiore genericamente polveri (coarse particles). Si definisce inoltre la classe PM10 che rappresenta la porzione di particolato con diametro inferiore ai  $10\mu m$  e sulla quale è attualmente concentrata l'attenzione in termini sia scientifici sia legislativi.

I particolati presenti in atmosfera provengono anche da processi naturali, quali le eruzioni vulcaniche e l'azione del vento sulla polvere e sul terreno, processi che solo raramente provocano vero e proprio inquinamento (tranne localmente, a fronte di eventi particolarmente intensi). La sorgente principale è infatti da ricercarsi nelle attività dell'uomo, tipicamente l'industria (costruzioni e fonderie) e i processi di combustione incompleta (fumi). Per quanto riguarda gli impianti di combustione fissi, il maggior contributo è fornito dalle centrali termoelettriche. Il traffico contribuisce all'inquinamento dell'aria da particolato sia a causa del processo di combustione, sia attraverso la lenta polverizzazione della gomma dei pneumatici, dei freni e dell'asfalto; nondimeno, anche il risollevarsi della polvere depositata al suolo dovuto al moto dei veicoli (risospensione) produce un contributo emissivo rilevante. Il diametro delle particelle in sospensione è indicativamente correlato alla fonte di provenienza, come indicato in Tabella 2.

**Tabella 2. Dimensioni ed emissioni di particolato**

Diametro	Provenienza
>10 $\mu m$	processi meccanici (es. erosione del vento, macinazione e diffusione), polverizzazione di materiali da parte di veicoli;
tra 1 $\mu m$ e 10 $\mu m$	provenienza da particolari tipi di terreno, da polveri e prodotti di combustione di determinate industrie e da sali marini in determinate località;
tra 0.1 $\mu m$ e 1 $\mu m$	combustione ed aerosol fotochimici;
< 0.1 $\mu m$	particelle non sempre identificabili chimicamente, originate apparentemente quasi del tutto da processi di combustione.

### 5.1.4 Il benzene

Fra i composti organici non metanici (NMVOC) assume particolare importanza il benzene; è un composto naturale del petrolio e dei suoi derivati, e si forma anche, come sottoprodotto, durante il ciclo di produzione delle benzine, ad opera di precursori a base aromatica e naftenica che sono naturalmente presenti nel greggio. A causa della sua naturale opposizione all'ossidazione, il benzene è rilasciato in seguito al processo di combustione, nonché a seguito dei processi evaporativi. La sorgente naturale di maggior rilievo è la combustione incontrollata di piante e di residui di agricoltura.

Il benzene è una sostanza cancerogena che può produrre, a lungo termine, una varietà di tumori che comprendono linfomi e leucemia.

Secondo le stime dell'ANPA relative agli anni 1994, 1996 e 1997, circa l'80% del contributo proviene dal traffico veicolare, il 13.4% da altre fonti mobili ed il restante 6.2% da altre attività come processi industriali e uso dei solventi.

### 5.1.5 Il biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>)

I gas serra, e tra essi la CO<sub>2</sub>, sono i gas atmosferici che assorbono la radiazione infrarossa e che per questo causano l'effetto serra lasciando passare l'energia solare e intrappolando parte del calore creato dai raggi del sole.

Circa il 30% delle radiazioni infrarosse si diffonde nello spazio. Parte dell'energia solare che raggiunge il nostro pianeta viene riflessa verso l'atmosfera sotto forma di radiazioni infrarosse, parte viene assorbita dalla Terra, parte viene intrappolata come calore e irradiata dai gas serra. Le navi che bruciano combustibile, gli aerei e le industrie che rilasciano anidride carbonica, il taglio delle foreste e il consumo di combustibili fossili aumentano l'effetto serra. Mari e oceani si riscaldano, l'acqua evapora e il calore così formato viene intrappolato dai gas serra.

L'impatto della aviazione ad alta quota è legato appunto alla produzione di anidride carbonica, che contribuisce in modo sostanziale ad intrappolare la radiazione infrarossa della luce solare, riflettendola nuovamente verso la superficie terrestre (il cosiddetto effetto serra), impedendo, così, alla Terra di raffreddarsi. Ciò provoca un rapido riscaldamento del pianeta, al quale gli ecosistemi non hanno il tempo necessario per adattarsi.

L'entità di questo effetto è ancora in discussione, ma la diffusa convinzione che stiamo in effetti attraversando una fase di riscaldamento generalizzato del clima terrestre ha portato molti Paesi del mondo a siglare il Protocollo di Kyoto, un accordo in cui si impegnano a limitare e ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>.

L'incidenza della CO<sub>2</sub> prodotta dal traffico aereo è inferiore al 2% del totale emesso in modo antropico; nell'ottica di ridurre le emissioni di gas serra la tecnologia si sta muovendo per ottenere riduzioni efficaci nell'uso del carburante.

## 5.2 Inquadramento normativo

### 5.2.1 Normativa europea

Attualmente le direttive di riferimento sono le seguenti:

- Dir 96/62/CE ("Direttiva madre") - In materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente;
- Dir 99/30/CE - Concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido d'azoto, gli ossidi d'azoto, le particelle e il piombo;
- Dir 2000/69/CE - Concernente i valori limite per il benzene e il monossido di carbonio nell'aria ambiente;
- Dir 2002/03/CE - Concernente i valori limite per l'ozono.
- Dir 2008/50/CE - Relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

### 5.2.2 Normativa nazionale

Per il caso italiano attualmente le direttive di riferimento sono:

- DPCM 28/3/1983 - Limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinanti dell'aria nell'ambiente esterno;

- DPR 203/88 (relativamente agli impianti preesistenti) ed altri decreti attuativi - Attuazione Direttive n. 80/779, 82/884, 84/360, 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria relativamente a specifici agenti inquinanti e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali ai sensi dell'art. 15 della Legge 16/4/87 n. 183;
- DM 20/5/1991 - Criteri per l'elaborazione dei piani regionali per il risanamento e la tutela della qualità dell'aria;
- DM 15/4/1994 - Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane, ai sensi degli artt. 3 e 4 del DPR 24 maggio 1988, n. 203 e dell'art. 9 del DM 20 maggio 1991;
- DM 25/11/1994 - Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti di cui al decreto ministeriale 15 aprile 1994;
- DM 16/5/1996 - Attivazione di un sistema di sorveglianza di inquinamento da ozono;
- DL 4/8/99 n. 351 - Attuazione della direttiva 96/62 in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria;
- DM 2/4/2002 n.60 - Decreto concernente i valori limite di qualità dell'ambiente per alcuni inquinanti; in particolare, in recepimento delle successive Direttive CE, abroga alcuni articoli del DPR 203/88 fissando nuovi limiti per il biossido di zolfo, gli ossidi di azoto, le particelle, il piombo, il benzene ed il monossido di carbonio;
- DM 1/10/2002 n.261 - Regolamento recante le direttive tecniche per la valutazione preliminare della qualità dell'aria ambiente, i criteri per l'elaborazione del piano e dei programmi di cui agli articoli 8 e 9 del decreto legislativo 4 agosto 1999, n. 351;
- DL 21/05/2004 n. 183 – Attuazione della direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria;
- DL 03/08/2007 n. 152 - Attuazione della direttiva 2004/107/CE concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nichel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente.
- DLGS 155/2010 - Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa;

I diversi limiti attualmente in vigore per i vari inquinanti sono riassunti in Tabella 3.

**Tabella 3. Limiti alle concentrazioni di inquinanti dell'aria indicati dal D.Lgs. 155/2010 in recepimento della dir. 2008/50/CE.**

Inquinante	Tipo di limite	Limite	Tempo di mediazione dati
<b>Biossido di azoto</b> <b>NO<sub>2</sub></b>	valore limite orario per la protezione della salute umana	200 µg/m <sup>3</sup> (da non superare più di 18 volte l'anno)	media oraria
	valore limite annuale per la protezione della salute umana	40 µg/m <sup>3</sup>	media annuale
<b>PM10</b> <b>Particolato fine</b>	valore limite giornaliero per la protezione della salute umana	50 µg/m <sup>3</sup> (da non superare più di 35 volte l'anno)	media nelle 24 ore
	valore limite annuale per la protezione della salute umana	40 µg/m <sup>3</sup>	media annuale
<b>Monossido di carbonio – CO</b>	valore limite per la protezione della salute umana	10 mg/m <sup>3</sup>	media massima giornaliera su 8 ore
<b>Benzene</b>	valore limite annuale per la protezione della salute umana	5 µg/m <sup>3</sup>	media annuale

### 5.3 Relazione semiempirica tra le concentrazioni in aria di $\text{NO}_x$ e $\text{NO}_2$

Considerando come inquinanti atmosferici gli ossidi di azoto, i limiti di legge riguardano principalmente il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ) piuttosto che la miscela complessiva degli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ); poiché le metodologie modellistiche utilizzate nello studio trattano il solo inquinamento primario, e dunque gli ossidi di azoto nel loro complesso, si pone il problema di riportare i risultati modellistici di  $\text{NO}_x$  in  $\text{NO}_2$  in modo da verificare l'impatto dell'opera in relazione ai limiti di legge.

La miscela inquinante  $\text{NO}_x$  in aria è composta in massima parte di due gas, monossido ( $\text{NO}$ ) e biossido di azoto, in misura variabile che dipende tra l'altro dal sito, dalla meteorologia e dalla distanza dalle eventuali principali sorgenti. Più in dettaglio, le reazioni fotochimiche che avvengono in atmosfera, e che portano alla trasformazione di  $\text{NO}$  in  $\text{NO}_2$  e viceversa, dipendono tra l'altro dai seguenti fattori:

- ✓ temperatura dell'aria;
- ✓ presenza ed intensità della luce solare;
- ✓ presenza di altri gas (ozono e composti organici) che interagiscono con tali trasformazioni;
- ✓ relativa composizione della miscela  $\text{NO}_x$  presente all'emissione.

La composizione degli  $\text{NO}_x$  dipende quindi fortemente dalla distanza dalle eventuali sorgenti, in quanto essi sono un prodotto della combustione ad alta temperatura, l' $\text{NO}$  è presente all'emissione in frazione preponderante (anche oltre il 90%) e tale frazione tende a diminuire velocemente mentre l'aria contenente il gas emesso è trasportata lontano, risultando all'osservazione generalmente compresa tra il 25% ed il 75%.

Una relazione semiempirica dell'andamento di tale frazione in funzione dei livelli di  $\text{NO}_x$  è stata stabilita da alcuni studi, sulla base di una curva polinomiale di quarto ordine del logaritmo in base 10 della concentrazione di  $\text{NO}_x$  (Derwent & Middleton, 1996, Dixon et al., 2000).

In sostanza, detta  $[\text{NO}_2]$  la concentrazione di biossido di azoto (misurata in ppb o in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e  $[\text{NO}_x]$  la concentrazione in aria di ossidi di azoto (misurata rispettivamente in ppb o in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$ -equivalenti), è possibile stabilire la seguente relazione:

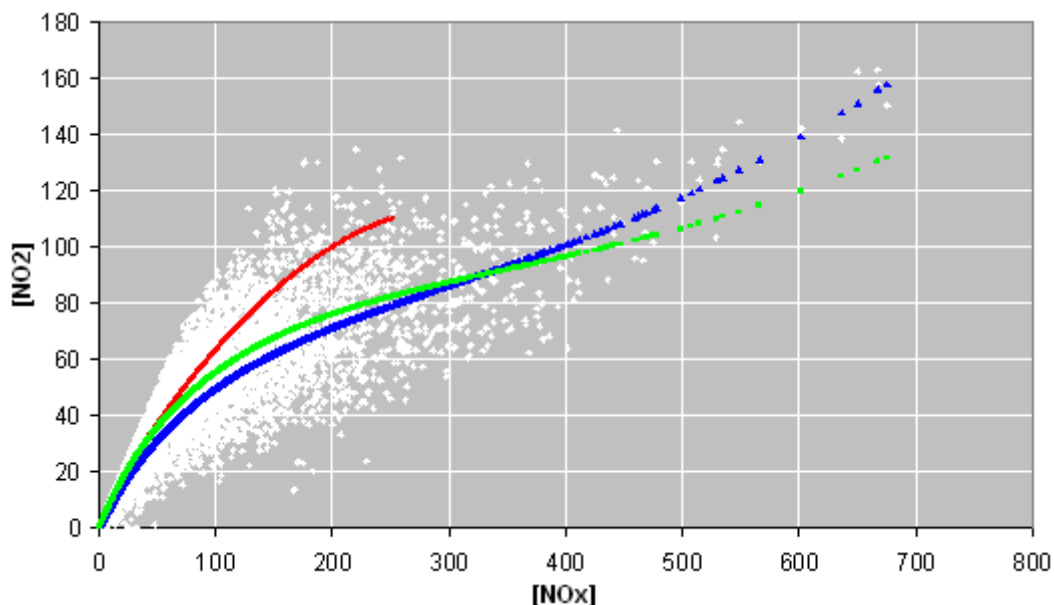
$$[\text{NO}_2]=[\text{NO}_x](a+bA+cA^2+dA^3+eA^4)$$

dove:  $A=\log_{10}([\text{NO}_x])$  ed i coefficienti  $a, b, c, d, e$  sono determinati tramite regressione statistica della funzione sui dati misurati nel sito oggetto di studio.

Per calcolare i coefficienti di regressione nel caso specifico di studio, sono stati elaborati i dati della stazione di Pisa – Borghetto (gestita da ARPAT e classificata come di fondo urbano) relativi all'anno 2007. La Figura 10 presenta le curve di regressione stimate per Pisa - Borghetto in confronto con le concentrazioni misurate, la Tabella 4 mostra i coefficienti di regressione calcolati nelle stagioni invernale ed estiva e per l'intero anno.

Per via del differente regime chimico in estate ed in inverno, la curva annuale presenta sottostime delle concentrazioni di  $\text{NO}_2$  per  $\text{NO}_x$  superiore a circa  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; per questo motivo sono state calcolate anche le due curve relative ai periodi invernale ed estivo, che mostrano adattarsi molto meglio alle evidenze sperimentali e che sono quelle effettivamente utilizzate nella stima di  $\text{NO}_2$  a partire dai calcoli modellistici di  $\text{NO}_x$ .

In estate l'atmosfera è più reattiva per le temperature più elevate e la maggiore presenza di radiazione solare: per concentrazioni di  $\text{NO}_x$  pari a  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  la frazione estiva di  $\text{NO}_2$  vale mediamente già il 50% contro il 35% dell'inverno; d'altra parte, la concentrazione massima oraria di  $\text{NO}_x$  vale  $252\mu\text{g}/\text{m}^3$  nel periodo estivo, a fronte di  $676\mu\text{g}/\text{m}^3$  nel periodo invernale. Nei massimi annuali di  $\text{NO}_x$  la frazione di  $\text{NO}_2$  risulta mediamente pari al 23% circa.



**Figura 10. Concentrazioni di NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> (µg/m<sup>3</sup>) misurate (bianco) e curve di regressione caratteristiche della stazione di Pisa – Borghetto: verde=intero anno; blu=periodo invernale; rosso=periodo estivo.**

**Tabella 4. Coefficienti di regressione calcolati per la curva di regressione NO<sub>x</sub> / NO<sub>2</sub>**

Coefficienti	Periodo invernale	Periodo estivo	Intero anno
a	0.6715	-0.0393	0.4536
b	-0.0628	3.0850	0.5265
c	0.4913	-3.2225	0.1097
d	-0.4119	1.3357	-0.3154
e	0.0801	-0.2058	0.0705

#### 5.4 Monitoraggio dell'inquinamento atmosferico nei confini del sedime aeroportuale

Per caratterizzare lo stato attuale di qualità dell'aria e gli effetti sanitari dell'inquinamento atmosferico sulla popolazione, la Regione Toscana ha incaricato ARPAT di effettuare attività di monitoraggio secondo le metodologie sviluppate da ESCAPE (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects), sia all'interno del sedime aeroportuale e area limitrofa, sia nell'area urbana della città di Pisa. In questo modo son stati quindi forniti dati significativi per descrivere l'impatto aeroportuale sulla qualità dell'aria.

Le campagne di misura si sono svolte in tre diverse stagioni dell'anno (estate, autunno, inverno) nel biennio 2011-2012 con campionamenti condotti all'interno del sedime aeroportuale (11 siti lungo le piste e nei punti di manovra ) ed in circa 54 siti distribuiti nell'area urbana. Si è poi indagato anche il contributo dell'aeroporto nell'immissione in area ambiente della frazione di particolato fine e ultrafine e dei metalli in esso contenuti. Il confronto dei dati urbani con quelli registrati nel sedime aeroportuale, ha così permesso di valutare l'apporto dato dall'attività aeroportuale alla qualità dell'aria

Gli inquinanti monitorati sono i seguenti:

- Benzene, Toluene, Etilbenzene, para-meta-orto Xilene (BTEX);
- Aldeidi;
- Biossido di Azoto – NO<sub>2</sub>;

- Polveri sottili (PM<sub>10</sub>);
- Metalli aerodispersi;

I risultati del monitoraggio sono qui presentati sinteticamente per gli inquinanti d'interesse (NO<sub>2</sub>, benzene e polveri), si rimanda agli specifici rapporti di misura per i dettagli degli altri inquinanti (ARPAT, 2013 – Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria).

Come si deduce dalla tabella sottostante i valori di NO<sub>2</sub> registrati per tutte e tre le campagne, nella parte del sedime aeroportuale lungo le piste risultano molto bassi, addirittura più bassi dei valori registrati nei siti di fondo; ciò a conferma di quanto riportato in letteratura che i maggiori effetti dell'attività aeroportuale relativamente agli NO<sub>x</sub> si registrano a quote superiori a 300 m.

NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	estate 2011	autunno 2011	inverno 2012
<b>alto traffico</b>	43	70	59
<b>fondo e basso-medio traffico</b>	17	44	37
<b>Aeroporto limitrofo</b>	17	39	34
<b>Aeroporto SAT</b>	24	46	33
<b>Aeronautica (piste)</b>	10	32	20

**Tabella 5. Medie di concentrazione di NO<sub>2</sub> aggregate per zona di campionamento nelle 3 stagioni**

Anche per il benzene le concentrazioni riscontrate all'interno del sedime aeroportuale e nelle zone limitrofe ad esso, sono sempre inferiori a quelle riscontrate nei siti urbani sia di alto traffico, che di fondo e medio-basso traffico.

C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	estate 2011	autunno 2011	inverno 2012
<b>Città</b>	-	2.8	3.4
<b>Aeroporto - limitrofo</b>	2.4	2.2	2.3

**Tabella 6. Medie di concentrazione di C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> aggregate per zona di campionamento nelle 3 stagioni**

Per quanto riguarda il particolato atmosferico campionato (PM<sub>10</sub>) si riportano graficamente gli andamenti della concentrazione rilevata nel corso delle due campagne effettuate presso l'aeroporto di Pisa (autunnale: novembre 2011, invernale: marzo 2012) suddivisi nelle fasce giorno e notte (Figura 11).

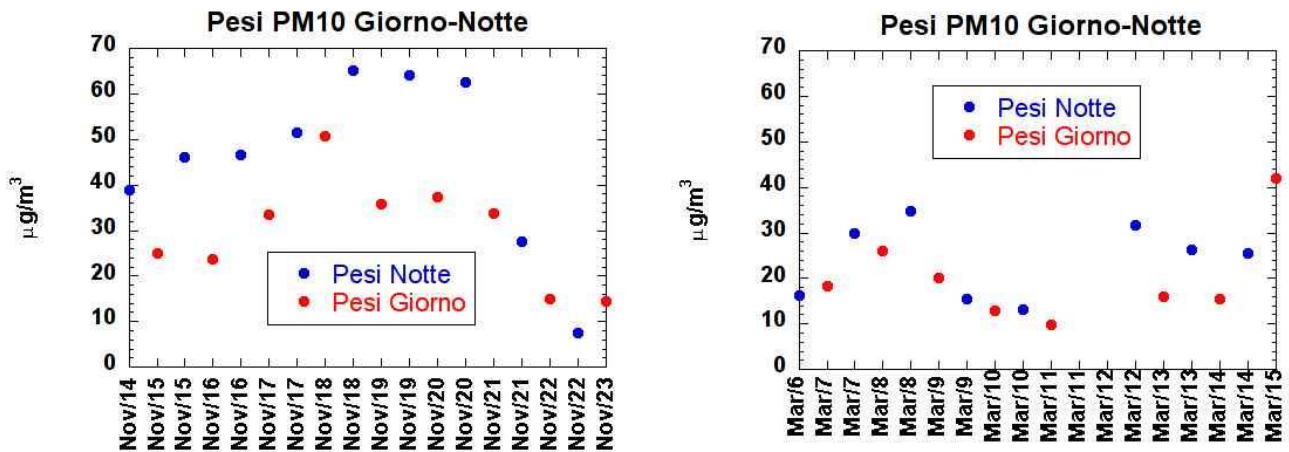


Figura 11. Profili temporali del PM<sub>10</sub> divisi per campagne di campionamento distinti tra il giorno (7-19) e la notte (19-7)

Il PM<sub>10</sub> mostra una marcata differenza stagionale (37 µg/m<sup>3</sup> media in novembre contro 22 µg/m<sup>3</sup> in marzo) nonché un netto trend giorno-notte con concentrazioni notturne superiori anche di oltre il 50% rispetto a quelle diurne (soprattutto in autunno).

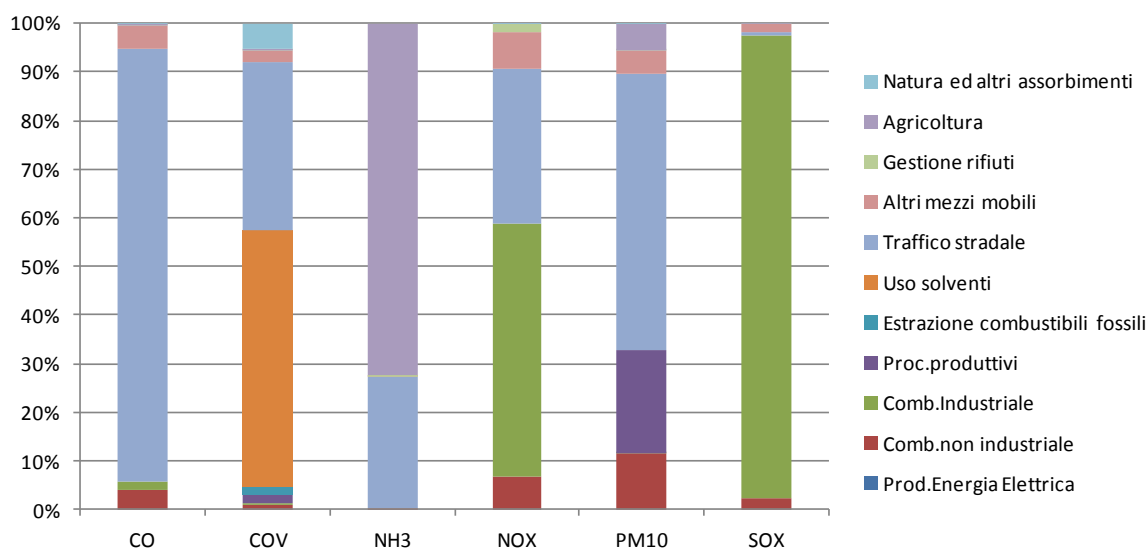
Complessivamente i livelli d'inquinamento rilevati mostrano che l'aeroporto non impatta in maniera rilevante sulla qualità dell'aria dell'ambiente urbano mentre il monitoraggio del particolato atmosferico in prossimità della pista ha consentito di evidenziare la significativa variabilità dei livelli di inquinamento in funzione dei parametri meteorologici, in quanto non è stata individuata una correlazione tra particolato e il numero dei voli.



## 6 Stima delle emissioni aeroportuali

Secondo lo studio ARPAT “L’impatto dell’attività aeroportuale sulla città di Pisa” (ARPAT 2013) le principali sorgenti emissive della città di Pisa, sono rappresentate dal traffico urbano e riscaldamento domestico a cui vanno aggiunti i contributi dei grossi impianti industriali (Saint Gobain e Gerresheimer) e quello dell’aeroporto Galileo Galilei tutti posizionati circa 2 km a sud dal centro cittadino. Gli impianti Saint Gobain e Gerresheimer sono entrambi installazioni per la produzione di vetro soggetti alla disciplina AIA (D.Lgs 3 aprile 2006, n.152 e smi parte II. Titolo III - bis).

Analizzando i dati dell’inventario delle emissioni in atmosfera della Regione Toscana relativo al 2007 si osserva come sul comune di Pisa i contributi maggiori per NOx e ossidi di zolfo provengono dai comparti industriali, mentre per quanto riguarda CO e PM10 la sorgente principale è il traffico stradale.



**Figura 12. Contributo dei diversi comparti alle emissioni totali sul comune di Pisa.**

Nell’inventario emissivo regionale il contributo delle emissioni aeroportuali (altri mezzi mobili) sul totale delle emissioni prodotte nel comune di Pisa varia tra lo 0.7% del PM10 e circa il 4.8% del CO

Analizzando le emissioni di biossido di carbonio il contributo aeroportuale è pari a poco più del 5% sul totale.

### 6.1 Approccio metodologico alla stima delle emissioni degli aerei commerciali

La forte crescita dei movimenti nell’aeroporto di Pisa S.Giusto registrata negli ultimi anni, oltre a significare un potenziale beneficio di origine economica, dall’altro pone nuove problematiche circa l’impatto che i movimenti aerei e le corrispondenti attività correlate a terra possono avere sull’ambiente.

Per il 2028, anno oggetto del presente studio, si prevede una ulteriore crescita dei volumi di traffico e, di conseguenza, delle emissioni legate agli aeromobili ed a tutte le attività connesse; in quest’ottica la Società Aeroporto Toscano S.p.A. ha fornito i dati riguardanti il traffico aereo e la composizione della flotta degli ultimi 5 anni (2009-2014) al fine di poter fare una stima di quello che saranno le emissioni aeroportuali nel 2028.

L'approccio scelto si rifà alla letteratura internazionale ed a fattori di emissione riconosciuti dall'intera comunità scientifica.

L'indicatore di attività di un aeromobile è il cosiddetto ciclo LTO (Landing and TakeOff cycle), inteso come il ciclo completo di tutti i movimenti di un aereo su uno scalo, cioè la somma del movimento di discesa a terra dell'aereo sino al raggiungimento, da parte dello stesso aereo in seguito al successivo decollo, della altitudine di crociera. Le emissioni considerate sono dunque esclusivamente quelle contenute entro lo strato di rimescolamento dell'atmosfera, quelle cioè in grado di influenzare le concentrazioni al suolo. Altre attività emissive di un aeromobile, come per esempio il volo all'altitudine di crociera, esulano dallo scopo del presente studio.

Le fasi di un LTO sono così identificabili:

- discesa e atterraggio ("approach"): fase che comprende la discesa da un'altezza di 3000ft fino al raggiungimento della pista;
- movimento a terra e attesa successivi all'atterraggio ("taxi in/idle"): percorso compiuto a terra, dall'uscita dalla fase di atterraggio vera e propria alla destinazione ai gates;
- movimento a terra e attesa precedenti il decollo ("taxi out/idle"): percorso inverso rispetto a quanto appena descritto, dai gates alla pista di decollo;
- decollo ("take off"): movimento compiuto dall'aeromobile dall'istante in cui comincia a spostarsi lungo la pista finché raggiunge una quota massima convenzionale di 1000 ft;
- salita ("climb out"): procedura di salita, si svolge completamente in atmosfera convenzionalmente tra circa 1000 e 3000ft di quota.

Ognuna di queste fasi è caratterizzata da determinati tempi di svolgimento (TIM, Time In Mode) e da specifici fattori di emissione, caratteristici anche per tipologia di motore considerato.

Gli inquinanti che vengono considerati in uno studio di questo tipo sono gli idrocarburi (con particolare rilievo posto su benzene), il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto, il biossido di zolfo ed il particolato.

In realtà le sostanze che possono rappresentare una criticità sono solo  $\text{NO}_x$ , essenzialmente legati alla potenza dei motori ed alla temperatura di combustione, e HC, che vengono emessi nelle fasi in cui l'emissione risulta poco efficiente.

In base alla metodologia EPA (vedere come riferimento, EPA 1999), dunque, una volta determinato il numero di LTO e definita la flotta di aerei presente, si associano tempi caratteristici di ciascuna fase di un LTO ai fattori di emissioni, e si stimano le emissioni in base all'attività, ai TIM ed ai tipi di motore.

## 6.2 Attività aeroportuale di Pisa San Giusto

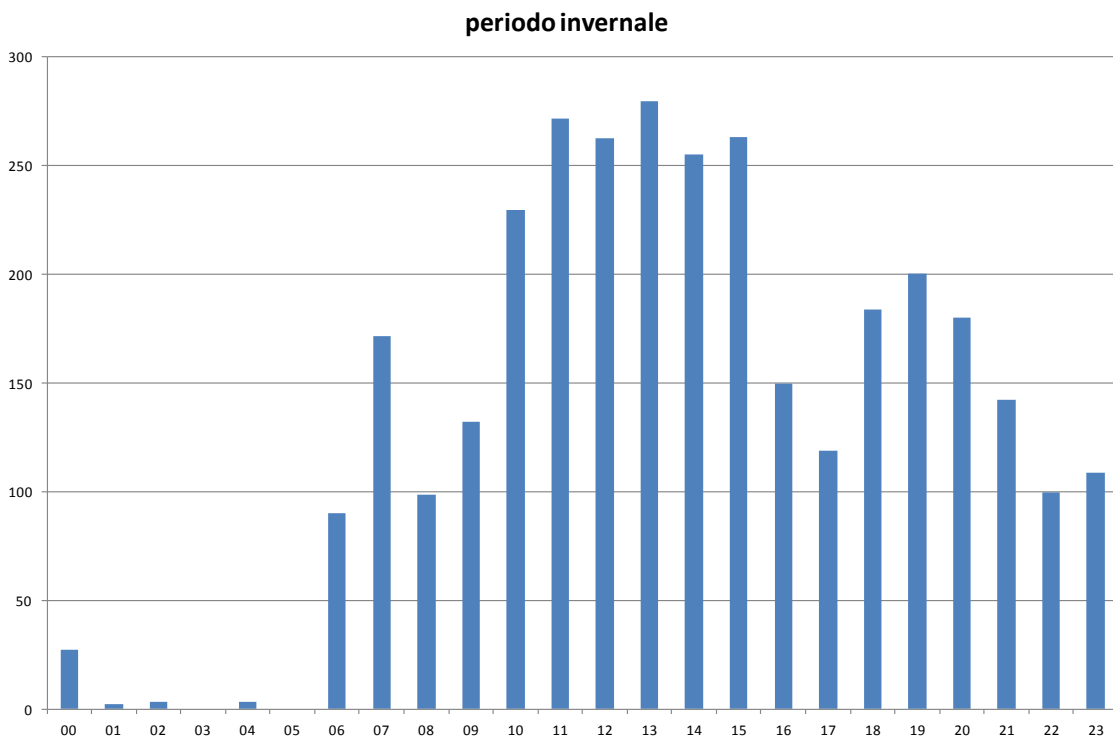
Come già descritto, il rateo di emissione di un particolare inquinante da un motore di aviogetto è direttamente legato alla sua attività. Importanti componenti dell'attività di un aviogetto sono sia la frequenza dei voli (in termini di numero di LTO) sia le fasi caratteristiche di ciascun LTO. Allo scopo di stimare le emissioni inquinanti da un sistema aeroportuale, l'attività di volo commerciale è quindi quantificata in LTO.

Per il 2028 SAT ha fornito una serie di informazioni relative al numero di voli mensili e settimanali previsti a regime, di cui si presenta di seguito un estratto e da cui si evincono le informazioni relative ai due periodi in esame.

Etichette di riga	Mese												Totale complessivo	gen+dic		giu+lug+ago+sett	
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		gen+dic	giu+lug+ago+sett		
00	36	11	17	16	28	34	39	42	61	50	25	19	379	27	44		
01	3	2		2		3	6	5	9	3	0	2	34	2	6		
02	3			0		2	3		3	2	0		13	2	2		
03				0	0		2	2	2	3	2		8	0	1		
04	3			2	3		0	2			2		11	2	0		
05	0			2	5	16	17	13	13	3	0	0	67	0	14		
06	119	127	135	260	276	274	274	287	246	243	97	61	2.399	90	270		
07	177	165	212	160	150	176	248	249	201	202	179	166	2.283	172	218		
08	88	47	67	143	138	172	182	196	183	161	88	110	1.575	99	183		
09	110	89	133	389	387	379	443	451	417	379	160	155	3.493	132	423		
10	204	207	208	398	382	426	514	509	418	379	252	255	4.154	230	467		
11	293	270	318	284	360	385	426	400	337	326	213	251	3.863	272	387		
12	257	210	307	381	414	422	348	353	393	367	266	268	3.985	262	379		
13	301	270	326	348	362	346	312	331	346	320	263	259	3.783	280	334		
14	233	248	270	266	315	301	337	338	320	293	260	277	3.458	255	324		
15	233	208	288	342	384	376	453	451	396	400	266	293	4.091	263	419		
16	108	94	157	252	310	315	326	334	304	271	158	191	2.821	150	320		
17	139	111	146	150	201	230	221	215	174	165	92	99	1.943	119	210		
18	224	223	266	183	224	221	210	213	186	201	130	144	2.426	184	208		
19	216	219	241	285	310	323	351	370	331	271	219	185	3.322	201	344		
20	168	122	154	298	337	349	407	407	329	302	191	193	3.258	180	373		
21	141	125	158	312	307	343	368	406	354	332	147	144	3.139	143	368		
22	99	97	119	196	215	233	237	263	251	208	105	100	2.123	100	246		
23	121	118	130	205	237	249	265	244	226	218	122	97	2.231	109	246		
<b>Totale comp</b>	<b>3.277</b>	<b>2.962</b>	<b>3.653</b>	<b>4.872</b>	<b>5.345</b>	<b>5.577</b>	<b>5.987</b>	<b>6.080</b>	<b>5.500</b>	<b>5.099</b>	<b>3.239</b>	<b>3.269</b>	<b>54.858</b>	<b>3.273</b>	<b>5.786</b>		

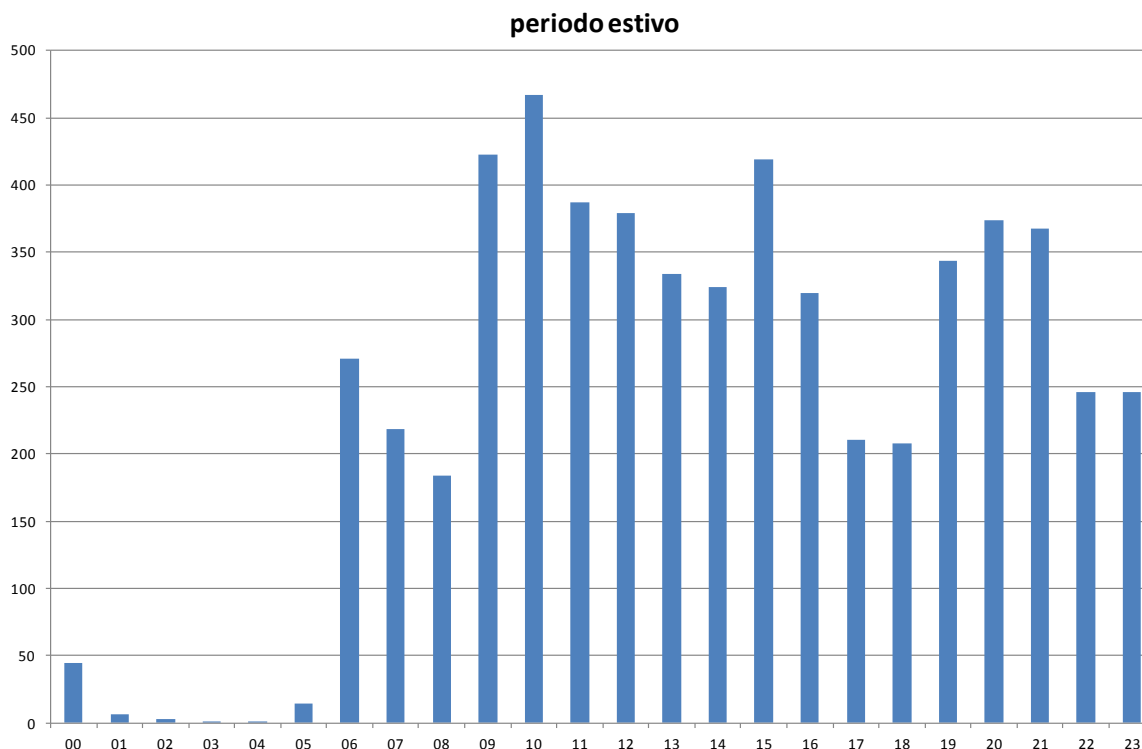
**Figura 13. Distribuzione MVT 2028 Numero medio voli mensili (fonte: Pisa International Airport)**

Durante il periodo invernale si registra una media di 106 movimenti al giorno, distribuiti così come si riporta in Figura 14; come si può osservare il picco si verifica alle ore 13 (9% dei movimenti) mentre nelle ore notturne, dalle 20 alle 5, si registrano circa il 17% dei movimenti.



**Figura 14. Movimenti giornalieri stimati per il periodo invernale considerato**

Nel periodo estivo l'andamento dei movimenti LTO è quello riportato in Figura 15; nei mesi da giugno a settembre il picco giornaliero si verifica alle ore 10, mentre nell'ore notturne la percentuale dei movimenti rispetto al totale è pari al 23%.



**Figura 15. Movimenti giornalieri stimati per il periodo estivo considerato**

### 6.3 Tempi caratteristici di fase (TIM)

Poiché i motori degli aeromobili operano a regimi praticamente standard nel corso di ogni fase di un LTO, le emissioni possono essere calcolate, con buona precisione, sulla base di specifici fattori di emissione per ciascuna fase.

Per quanto concerne i tempi di durata caratteristici di ciascuna fase, essi sono stati derivati nello specifico per Pisa San Giusto sulla base di quanto esistente in letteratura e di quanto direttamente comunicato.

Nel caso in esame sono state considerate le diverse direzioni di percorrenza della pista.

In sintesi, i tempi caratteristici adottati sono presentati come segue:

**Tabella 7. Tempi caratteristici fasi LTO**

Fase LTO	Tempo caratteristico (s)
APP	239
IDLE IN04R	300
IDLE OUT22L	300
IDLE OUT04R	480
T/O04R	96
T/O22L	96
C/O04R	26
C/O22L	26

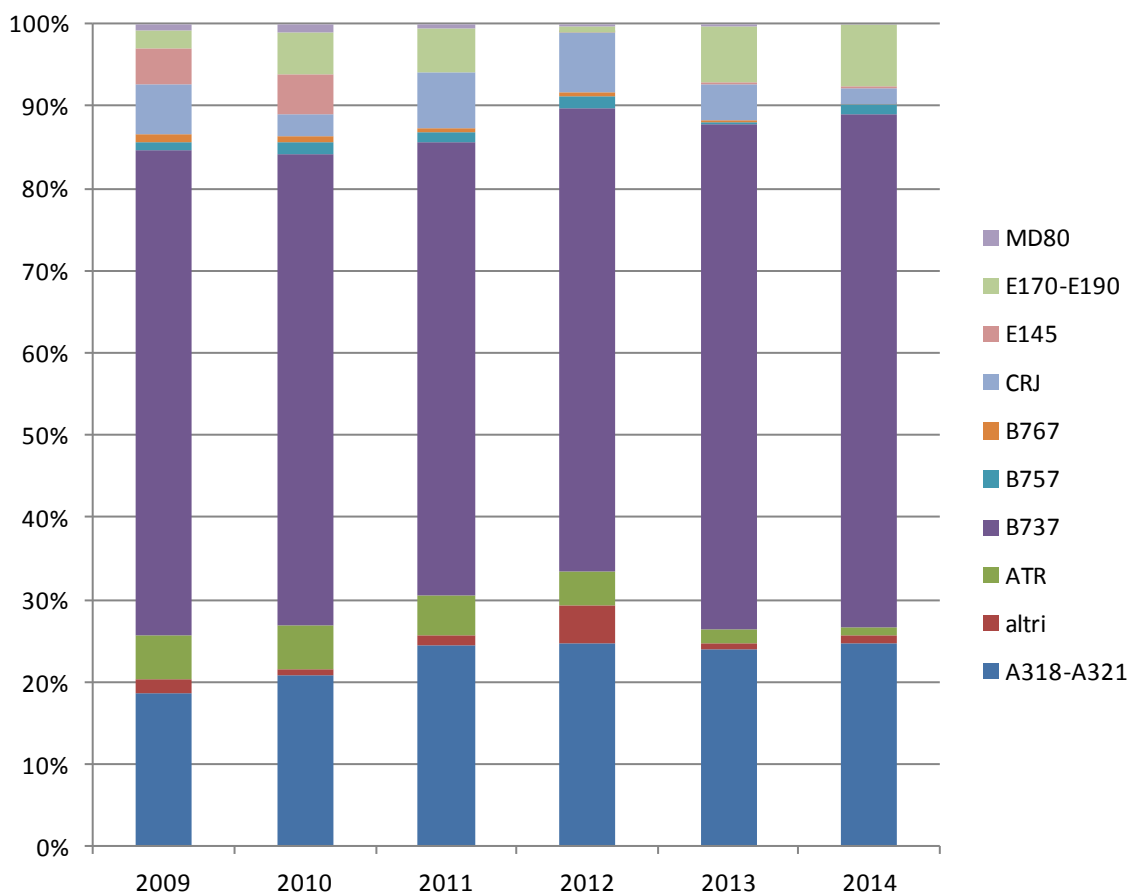
I tempi non forniti dall'autorità aeroportuale sono stati ricavati dal database EDMS ([http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/aep/models/edms\\_model/](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/models/edms_model/)) tenendo in considerazione le classi di aeromobili più rappresentative.

Durata e comportamenti nelle operazioni con aviogetto a terra dipendono considerevolmente dalle specifiche procedure di ogni aeroporto. Il tempo di decollo è invece praticamente standard per ogni tipo di apparecchio e di aeroporto, così come quello di atterraggio. Il tempo di durata della fase di salita è invece legato allo spessore dello strato di rimescolamento, parametro meteorologico indiretto (cioè non direttamente misurabile) tanto fondamentale quanto difficilmente stimabile con accuratezza. Esso varia con il tipo di suolo, la stagione, la nuvolosità e l'altezza del sole sull'orizzonte; quanto maggiore è lo spessore assunto di tale strato, tanto maggiore è la quantità di massa complessiva emessa in un ciclo LTO. Seguendo le indicazioni EPA, per lo spessore dello strato rimescolato è stato assunto un valore costante pari a 915m (3000ft), corrispondente, approssimativamente, al valore diurno estivo, in condizioni favorevoli al formarsi di elevati livelli di ozono, inquinante fotochimico secondario di cui gli NO<sub>x</sub> sono precursori. Ai fini del calcolo delle emissioni, tale valore deve intendersi quindi come conservativo.

#### 6.4 Caratterizzazione della flotta

Per l'assegnazione dei fattori di emissione più corretti, è necessario caratterizzare al meglio la flotta di aeromobili in attività.

Raggruppando gli aerei in alcune categorie rappresentative, i dati forniti da SAT sono riportati in Figura 16:



**Figura 16. Distribuzione percentuale degli aviogetti**

Come si osserva dalla Figura 16 nel corso degli anni la composizione della flotta ha subito alcune variazioni, con la diminuzione, ad esempio, dei velivoli assimilabili al modello E145 (Embraer ERJ 145). Tra i modelli che maggiormente usufruiscono dello scalo pisano ci sono il B737 (Boeing 737),

l'aereo passeggeri più prodotto nella storia dell'aviazione, e gli A318-A321 (Airbus della famiglia A320).

### 6.5 Database ICAO dei fattori di emissione

Nel 1993 l'ICAO (International Conference of Aviation Organizations) ha fissato in un protocollo gli standard per la certificazione, obbligatoria, dei propulsori per gli aeromobili per uso commerciale e civile.

In particolare il protocollo fissa i valori standard per:

- Idrocarburi;
- Ossidi di azoto;
- Monossido di carbonio;
- Smoke Number (termine adimensionale indice delle emissioni di PM10 basato sulla riflettanza di un filtro di carta misurata prima e dopo il passaggio di un campione di volume noto di fumo (<http://www.caa.co.uk/docs/702/070716%20Introduction.pdf>)).

In base alle emissioni misurate e catalogate, ed a prove in cui si valutava il consumo di combustibile per singola fase e per tipologia di motore, si è giunti a determinare, per la maggior parte dei motori in circolazione, i fattori di emissione (chiamati nel database ICAO "Emission Index") espressi in massa di inquinante prodotto (in grammi) per ogni chilogrammo di combustibile utilizzato.

Tali caratteristiche variano per numero e tipo di motore usato, e sono raccolte (e disponibili attraverso il web) nell' "ICAO engine exhaust emissions data bank"; questo archivio costituisce una delle più complete raccolte di fattori di emissione da aeromobili, ed è compilata ed aggiornata sulla base delle informazioni direttamente fornite dai principali produttori mondiali di apparecchi.

Ciò che risulta più complicata è invece l'associazione tipo di motore - aviogetto, quasi mai univoca, che ha portato a considerare le diverse tipologie di motore utilizzabili, ed ottenendo infine un valor medio per tipologia di aereo.

### 6.6 Calcolo delle emissioni

La conoscenza del numero di cicli LTO per ogni ora e della tipologia degli aeromobili che fanno scalo a Pisa, ha consentito di stimare con esattezza le emissioni orarie, suddivise per singole fasi.

Grazie ai fattori di emissione ICAO è possibile stimare CO, HC e NO<sub>x</sub>, mentre per la parte relativa al particolato, a partire dallo Smoke Number, per ottenere una stima del PM10 (che in realtà, da studi, risulta essere per la maggior parte PM2.5) si applica un'approssimazione di primo ordine che permette la correlazione dell'emissione di particolato con lo tale indice.

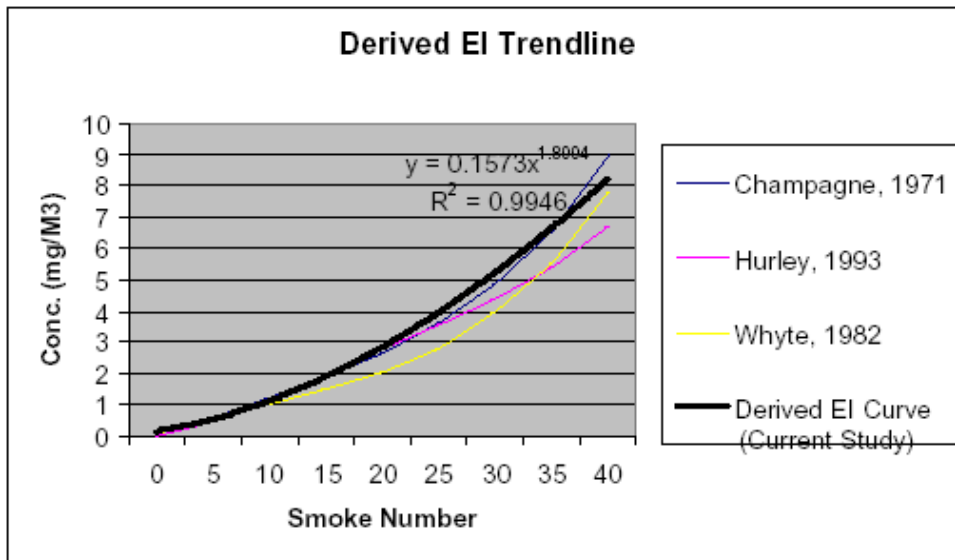
Per quanto riguarda il tipo di composti organici volatili emessi, non sono state fatte molte misure sui gas esausti prodotti dalle turbine degli aeromobili, ed il riferimento rimane lo studio di Shareef et al., (1988) riportato dal Emission Inventory Guidebook e qui riportato in Tabella 8; si può osservare come la parte di idrocarburi costituita dal benzene rappresenti circa il 2% delle emissioni totali.

**Tabella 8. Profilo di speciazione idrocarburi volatili da aeromobili (CORINAIR, 2007)**

Compound in VOC profile	Percentage of total VOC (weight)	
	Commercial aircraft	General aviation
Ethylene	17.4	15.5
Formaldehyde	15.0	14.1
C <sub>6</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub> Si <sub>3</sub>	9.1	11.8
Methane	9.6	11.0
Propene	5.2	4.6
Acetaldehyde	4.6	4.3
C <sub>8</sub> H <sub>24</sub> O <sub>4</sub> Si <sub>4</sub>	2.9	4.2
Ethyne	4.2	3.7
Acetone	2.4	2.9
Glyoxal	2.5	2.5
Acrolein	2.3	2.1
Butene	2.0	1.8
Benzene	1.9	1.8
1,3-butadiene	1.8	1.6
Methyl glyoxal	2.0	1.8
n-dodecane	1.1	1.2
Butyraldehyde	1.2	1.2
Others	< 1	< 1
Total	100.0	100.0

### 6.6.1 Correlazione tra “smoke number” ed emissione di PM10

La metodologia è una combinazione degli studi di Doppelheuer (1997, 1999, 2000), Hagen (1992, 1996, 1998), Petzold (1998, 1999) e Whitefield (2001), in cui si ipotizza la correlazione tra cambiamenti nella massa di particolato emessa e variazioni dello Smoke Number. Per determinare tale correlazione sono stati usati i dati raccolti negli studi di Champagne (1971), Whyte (1982) e Hurley (1993), i cui risultati sono riportati nella Figura 17.



**Figura 17. Curva di correlazione derivata dai diversi studi citati (fonte: Wayson R.L, et al., 2003)**

Partendo da tali considerazioni l'equazione risultante per la stima del PM prodotto da aerei commerciali e civili è la seguente:

$$ER_{j\text{Mass of PM}} = 0.6 \times (SN)^{1.8} \times (FF)$$

dove:

$ER_{j\text{Mass of PM}}$  = rateo di emissione, misurato in mg di PM emesso al secondo per tipologia (j) di motore;

SN = Smoke Number riportato nel database ICAO;

FF = flusso di combustibile misurato in chilogrammi/sec riportato nel database ICAO.

Il prodotto del fattore di emissione per il tempo relativo ad ogni singola fase può dunque seguire lo stesso approccio adottato per gli altri inquinanti; la massa totale di particolato risulterà dunque:

$$M_{\text{total}} = \sum_i \sum_j (ER_{j\text{Mass of PM}}) (N_i) (N_{ei}) (TIM_i)$$

dove:

$M_{\text{total}}$  = massa totale (mg)

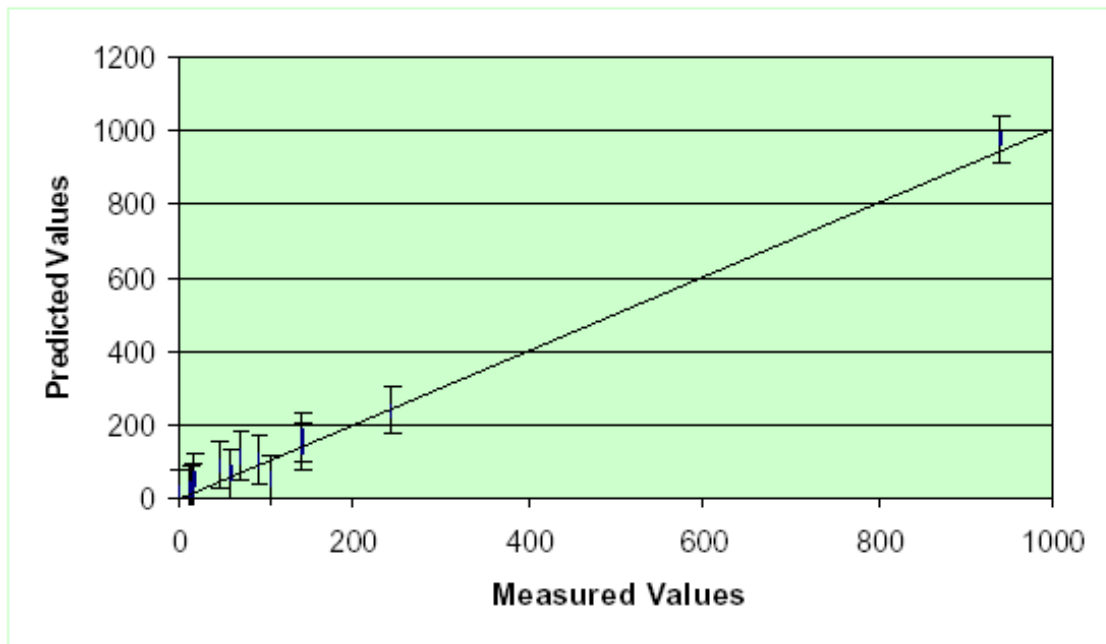
$N_i$  = numero di aerei considerati

$N_{ei}$  = numero di motori considerati per l'aereo i-esimo

$TIM_i$  = tempo per ogni fase relativa all'aereo i-esimo

In Figura 18 è riportata la comparazione della stima fatta con il metodo riportato e con 14 punti di misura; pur ricordando che si tratta di un'approssimazione di primo grado e considerando che molti miglioramenti potranno essere conseguiti con l'acquisizione di dataset più completi di misure di PM, il risultato mostrato è da considerarsi più che accettabile

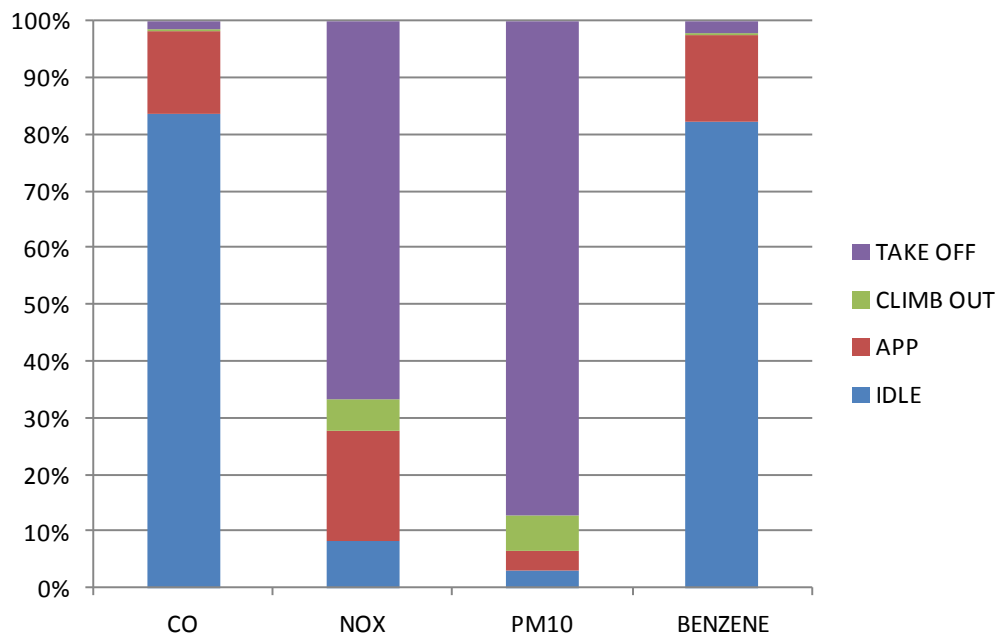




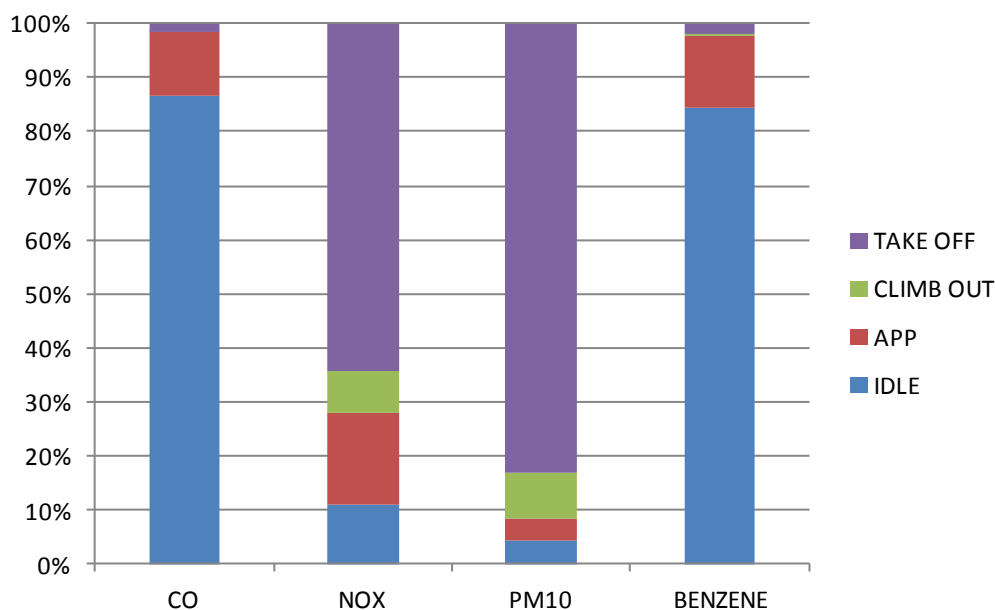
**Figura 18. Correlazione tra l'approssimazione di primo grado e i dati misurati (mg/s) (fonte: Wayson R.L, et al., 2003)**

### 6.7 Contributi alle emissioni delle fasi LTO

La Figura 19 e Figura 20 presentano i contributi delle fasi LTO all'emissione totale dei singoli inquinanti.



**Figura 19. Periodo invernale: Contributo delle diverse fasi LTO all'emissione degli inquinati considerati.**



**Figura 20. Periodo estivo: Contributo delle diverse fasi LTO all'emissione degli inquinati considerati**

Come già accennato in precedenza, la fase in cui viene emessa la maggior parte di ossidi di azoto e di particolato è il decollo (Take Off), in cui si produce, rispettivamente, il 67% ed l'64% delle emissioni totali; per gli idrocarburi ed il monossido di carbonio la fase più importante è quella di attesa (IDLE) in cui viene prodotto oltre l'80% dell'inquinante, mentre circa il 14% è prodotto durante l'atterraggio (APP).

### 6.8 Sorgenti emissive diverse dagli aeromobili

Oltre alle emissioni esauste dagli aeromobili in attività sull'aeroporto, altre sorgenti emissive sono state considerate e in particolare:

- mezzi di supporto a terra per i velivoli (detti Ground Support Equipment, GSE);
- parcheggi di autovetture di breve e lungo termine;
- centrali termiche presenti;
- deposito di carburanti;
- mezzi pesanti dedicati alla movimentazione delle merci e il trasporto dei carburanti.

#### 6.8.1 Ground Support Equipment (GSE)

All'arrivo dell'aeromobile a terra inizia una serie di operazioni che prevede la presenza di numeroso personale a terra con altrettanti mezzi in movimento. Tra i diversi interventi si possono sintetizzare i principali:

- movimentazione di scale, qualora l'aereo non sia dotato delle proprie scalette per la discesa del personale e dei passeggeri, che possono essere dotate di motori diesel (per aerei di grandi dimensioni) o portate a mano per velivoli di dimensioni minori;
- uso di autobus, solitamente diesel, per accompagnare i passeggeri da/verso i gate;
- intervento di autobotti (diesel) per il rifornimento degli aerei;
- invio di mezzi con tecnici deputati al controllo del corretto funzionamento ed altri per gli addetti alla sicurezza;

- movimentazione di nastri trasportatori e camioncini (belt loaders o baggage loaders) per i bagagli;
- presenza dei mezzi destinati a rifornire il servizio catering e per la pulizia dei servizi igienici;
- possibile uso di mezzi destinati a muovere l'aereo da e verso la definitiva posizione di parcheggio;
- ....

Il parco dei mezzi e delle attrezzature (GSE) utilizzate da SAT per le operazioni di assistenza agli aeromobili è costituito da:

- n° 64 mezzi alimentati a gasolio;
- n° 18 mezzi alimentati a benzina verde, compreso scooter;
- n° 51 mezzi alimentati elettricamente;
- n°12 trainati+barre

La stima delle emissioni atmosferiche riguarda i soli mezzi alimentati a gasolio o a benzina, elencati insieme a tutti gli altri veicoli e dettagliati per tipo, marca, modello e alimentazione (ALLEGATO B - GSE 2014.pdf).

Sulla base del tipo di veicolo è stato associato un fattore di emissione specifico per ogni mezzo attingendo al database contenuto nel modello EDMS v. 5.0.2 (g / HP\*ora) per i mezzi tipici di un aeroporto (air starter, automezzi, cestelli, mezzi anti congelamento, loader, motogeneratori, nastri, scale passeggeri, montacarichi, spazzaneve, tbl) mentre per automezzi e bus ci si è basati sui fattori di emissione (g/km) estratti dal database Copert 4 v.10.

Per i dati di attività (distanza media per i veicoli Copert e ore di funzionamento, potenza e fattore di carico per i mezzi specifici) ci si è serviti dei dati forniti da SAT per lo studio del 2008. Per tutti i mezzi di più recente introduzione è stato estrapolato un dato basandosi su attrezzature di tipo analogo. Sono quindi state calcolate le emissioni annuali relative a ciascun mezzo, associate spazialmente alla pista aeroportuale e modulate in analogia all'attività dei velivoli

## 6.8.2 Centrali termiche

L'attuale configurazione delle centrali energetiche presenti nel sedime aeroportuale è riportata in Dai documenti forniti da SAT si evince come i piani di sviluppo 2015-2018 prevedano l'ampliamento delle superfici coperte con l'inserimento di una nuova Centrale Termica (NCT), a servizio della nuova costruzione e in sostituzione della Centrale Termica dell'Aerostazione CT-A, caratterizzata da una potenzialità di 5,1 MWt. Il suo utilizzo sarà principalmente deputato alla sostituzione della CT-A per le utenze ad alta temperatura dell'attuale Aerostazione e fungerà da integrazione/emergenza per le utenze a bassa temperatura della nuova costruzione.

Nel 2028, anno di riferimento del presente studio, le centrali CTA, CTB, CTE non saranno più in funzione; l'impianto di cogenerazione (COGE) funzionerà a tenore massimo per tutti i 365 giorni dell'anno mentre la NCT funzionerà al 50% della sua potenzialità durante i 150 giorni della stagione invernale e al 25% per il restante periodo dell'anno.

Queste informazioni, insieme al consumo di metano riportato in Tabella 10, sono state usate per l'applicazione dei fattori di emissione più aggiornati (EEA, 2013).

Le emissioni delle centrali termiche sono state quindi calcolate applicando fattori di emissione di combustione del metano in centrali termiche e applicando opportune modulazioni temporali.

Tabella 9 ; le Centrali Energetiche presenti sono impiegate per il riscaldamento degli ambienti, la produzione di acqua calda per usi igienico sanitari e per l'autoproduzione di energia elettrica (Cogenerazione) e sono tutte alimentate a gas naturale.

Dai documenti forniti da SAT si evince come i piani di sviluppo 2015-2018 prevedano l'ampliamento delle superfici coperte con l'inserimento di una nuova Centrale Termica (NCT), a servizio della nuova costruzione e in sostituzione della Centrale Termica dell'Aerostazione CT-A, caratterizzata da una potenzialità di 5,1 MWt. Il suo utilizzo sarà principalmente deputato alla sostituzione della CT-A per le utenze ad alta temperatura dell'attuale Aerostazione e fungerà da integrazione/emergenza per le utenze a bassa temperatura della nuova costruzione.

Nel 2028, anno di riferimento del presente studio, le centrali CTA, CTB, CTE non saranno più in funzione; l'impianto di cogenerazione (COGE) funzionerà a tenore massimo per tutti i 365 giorni dell'anno mentre la NCT funzionerà al 50% della sua potenzialità durante i 150 giorni della stagione invernale e al 25% per il restante periodo dell'anno.

Queste informazioni, insieme al consumo di metano riportato in Tabella 10, sono state usate per l'applicazione dei fattori di emissione più aggiornati (EEA, 2013).

Le emissioni delle centrali termiche sono state quindi calcolate applicando fattori di emissione di combustione del metano in centrali termiche e applicando opportune modulazioni temporali.

**Tabella 9. Caratteristiche tecniche delle Centrali Termiche presenti in aeroporto allo stato attuale**

Punto Consegna	Utenze		Portata Nominale (m <sup>3</sup> /h)	Utilizzatore	Portata termica (kW)	Altezza camino (m)	Diametro (mm)
GMG01	CT-A	Aerostazione	220	GT1	888	12	400
				GT2	888	12	400
				GT3	448	12	300
	CT-B	Ex Merci	90	GT1	930	12	400
	CT-E	Fabbricato A	90	GT1	500	20	150
GT2				500	20	150	
GMG02	CT-C	Officina	10	GT1	105	6	250
	CT-D	Catering	18	GT2	189	5	200
		Cucina	3	-	30	-	-
GMG03	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	-	-
GMG04	CT-F	VV. FF.	30	GT1	291	8,5	300
GMG05	-	Cucina VV.F		-	10	-	-
GMG06	CT-G	Cargo village	220	GT1	750	20	300
				GT2	750	20	300
				GT3	750	20	300
GMG07	CCO	Cogenerazione	300	COG1	3000	25	300

**Tabella 10. Consumi di metano**

Codice	Denominazione	Ubicazione	Matricola Contatore	Consumi metano (m3)			
				2010	2011	2012	2013
GMG01	AEROSTAZIONE	Piazzale D'Ascanio	14455	309.489	308.808	304.658	255.460
GMG02	OFFICINA CATERING	Via di Cannicci	23996590	28.645	24.560	21.203	23.912
GMG03	AVIAZIONE MINORE	Via Cariola	24154662	(0*)	(0*)	0	0
GMG04	VVF RISCALDAMENTO	Via Cannicci	24986358	23.281	22.148	20.893	22.657
GMG05	VVF CUCINA	Via Cannicci	7138564	1.644	1.533	1.417	1.481
GMG06	CARGO VILLAGE	Via Asmara	39264019	28.876	39.126	54.917	42.662
GMG07	COGENERAZIONE	Via Cannicci		0	0	0	137.764
<b>TOTALE ANNO</b>				<b>391.935</b>	<b>396.853</b>	<b>406.102</b>	<b>483.937</b>

### 6.8.3 Parcheggi

Tra le emissioni diffuse da considerare ci sono quelle prodotte dal traffico veicolare nei parcheggi, costituito essenzialmente da mezzi privati dei passeggeri che si servono di auto privata o a noleggio e degli addetti aeroportuali. Dalle comunicazioni fornite da SAT esistono diverse aree adibite a parcheggio, localizzate in Figura 21 e raggruppate per gli scopi modellistici all'interno di un'unica sorgente emissiva.



**Figura 21. Planimetria indicativa dell'ubicazione dei parcheggi al 2028**

Dalle comunicazioni fornite da SAT per ciascun'area adibita a parcheggio, le caratteristiche di capienza e di utilizzo effettivo sono così sintetizzabili:

	posti auto	ingressi/gg	distanza From-To Est		distanza From-To Ovest	
			ingresso	uscita	ingresso	uscita
<b>P2</b>	<b>1078</b>	555	1 020	450	330	1 050
<b>P3</b>	<b>326</b>	2 467	1 070	245	380	845
<b>P4</b>	<b>3099</b>	126	1 045	1 000	1530	1 600
<b>P5 (ex Aviaz. Gener.)</b>	<b>126</b>	89	205	165	680	760
<b>P7 (area ex borgo Cariola)</b>	<b>254</b>	75	405	365	880	960
<b>P8 (Rent a Car e porzione fast park)</b>	<b>230</b>	89	235	195	710	790
<b>RENT A CAR (fast park dal 2023)</b>	<b>1803</b>	602	235	195	710	790
<b>P Addetti Aeroportuali</b>	<b>300</b>	568	905	890	215	280
<b>P6 bus</b>	<b>24</b>	8	135	95	610	690

Per calcolare le emissioni dei veicoli che insistono sui parcheggi son state considerate le seguenti informazioni:

- è stata considerata la distanza totale percorsa dai veicoli all'interno di ciascun area di parcheggio tra l'istante di ingresso e quello di uscita (la massima considerando in ogni caso gli accessi Est e Ovest);
- sono stati individuati i flussi giornalieri (ingressi/giorno) ed il numero di veicoli parcheggiati (posti auto \* percentuale di utilizzo );

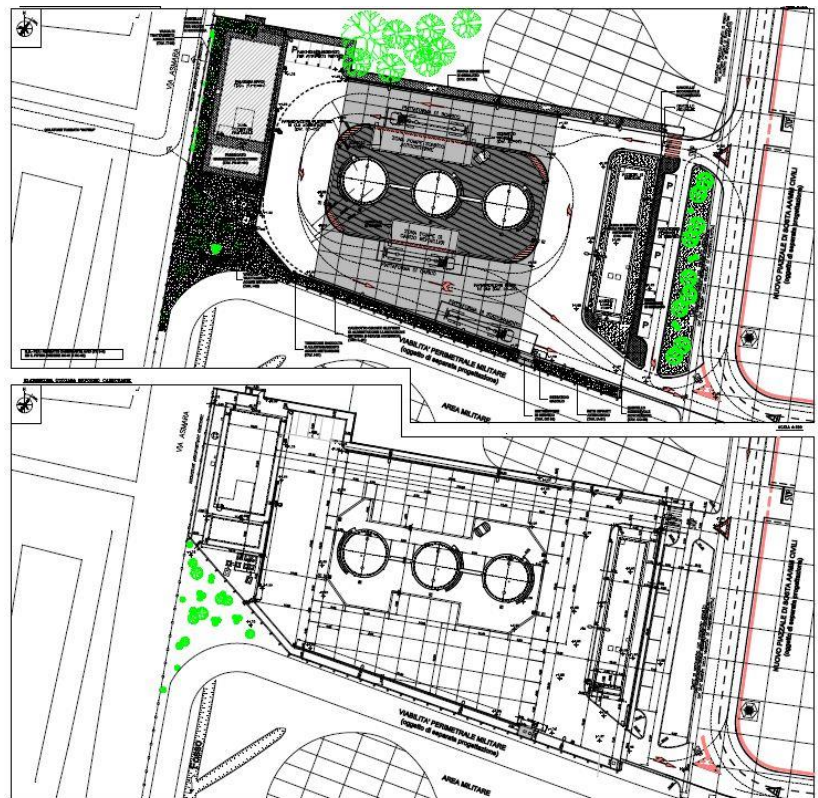
- è stata caratterizzata la flotta dei veicoli circolanti sulla base del database ACI relativo alla Regione Toscana per l'anno 2013, proiettata all'anno 2028 sulla base di un trend di rinnovo del parco; la distribuzione dei veicoli nelle varie categorie COPERT è in seguito avvenuta anche considerando la variazione di percorrenza annuale media per età dei veicoli.
- È stata introdotta una riduzione omogenea relativa all'uso del mezzo privato (-7.38 %) legata all'intervento People Mover previsto in progetto.

Percorrenze veicolari effettive, numero di mezzi in sosta e composizione della flotta, unitamente a ipotesi sulla velocità di percorrenza dei mezzi e altri parametri meteorologici sito specifici, hanno permesso di alimentare il software TREFIC che implementa la metodologia COPERT4 v.10. Questa metodologia include le emissioni dei veicoli stradali in moto e parcheggiati, in quest'ultimo caso limitate ai composti organici volatili per via di perdite evaporative. Sono quindi state calcolate le emissioni aggregate per l'area comprendente l'insieme dei parcheggi in progetto.

### 6.8.4 Depositi di carburante

Ad ogni atterraggio è necessario integrare la quantità di carburante contenuta nei serbatoi degli aeromobili (mediamente si stima un rifornimento per aeromobile pari a 5000 lt); per questo motivo c'è la necessità di disporre, nei pressi delle piazzole di sosta degli aerei, di serbatoi di combustibile, di dimensioni adeguate al numero di aerei in passaggio e dislocati in aree ad essi destinate.

Nell'anno di riferimento del presente studio, i depositi carburanti avio saranno 3 per una volumetria complessiva di 1350 mc, e saranno collocati all'estremità nord del sedime aeroportuale, così come riportato in Figura 22



**Figura 22. Planimetria dell'ubicazione dei depositi di carburante**

Il rifornimento di carburante avverrà mediante il supporto di autobotti, che percorreranno il tracciato rappresentato in Figura 23 per raggiungere i depositi provenendo dalla viabilità ordinaria.



**Figura 23. Percorso indicativo effettuato dalle autobotti per rifornire il deposito di carburante**

SAT ha fornito il numero di viaggi giornalieri per il periodo estivo, cautelativamente assunti anche per la simulazione invernale

	<b>2028 (previsione)</b>	<b>tot</b>
<b>SUMMER: giugno-agosto</b>	lunedì-venerdì	22
	sabato	19
	domenica	16

Anche per questi mezzi le emissioni son state stimate mediante l'utilizzo del programma TREFIC, associandoli come categoria emissiva a veicoli pesanti articolati di capacità 34-40 ton, classe normativa euro VI, e spazialmente associate alla sorgente lineare presentata nella figura precedente.

### 6.8.5 Mezzi cargo

Per il rifornimento di merci è prevista una flotta specifica in movimento verso / da il Cargo village, lungo il percorso rappresentato in Figura 24:





**Figura 24. Percorso indicativo effettuato dai mezzi cargo per la distribuzione delle merci.**

Anche per questi mezzi è stato fornito il numero di movimenti previsti nel 2028, qui sintetizzati come totale giornaliero ma dettagliati ora per ora nei documenti. Le tabelle riportano il dato di picco che si riscontra nel periodo estivo e cautelativamente è stato utilizzato pari dato anche per il periodo invernale.

2028	TIPOLOGIA	TOTALE giornaliero
DESCRIZIONE		
<b>voli gommati Cargo Handling</b>	autotreni	4
<b>Cargo Handling sfuso</b>	navette tipo ducato	30
<b>voli CARGO Cargo Handling</b>	autotreni	2
<b>navette Fed Ex su Cargo Handling</b>	mvt furgoni	8
<b>navette Fed Ex magazzino Fed Ex</b>	mvt furgoni	78
<b>Navette DHL magazzino DHL</b>	mvt cassonati (800kg di carico)	56
<b>veicoli operatori Cargo Village</b>	mvt auto	142

Sulla base della tipologia i mezzi son stati associati alle tipologie Copert disponibili, considerando per le auto una distribuzione analoga a quella utilizzata per i parcheggi, per i veicoli commerciali leggeri (furgoni, navette e cassonati) la classe diesel normata Euro VI e per i mezzi pesanti (autotreni) la classe di articolati con capacità 34-40 ton normati euro VI.

Come dato ulteriore di attività è stata fornita la distanza percorsa da ciascun mezzo che opera il trasporto merci (Tabella 11) utile per applicare precisamente i fattori di emissione Copert 4 v.10 (g/km).

**Tabella 11. Distanze medie percorse dai mezzi cargo per accedere all'area di carico-scarico**

2028	m
distanze coperte in INGRESSO	180
distanze coperte in USCITA	180

Le emissioni totali stimate, considerando velocità medie di percorrenza di 20 km/h nel tratto di accesso-uscita dall'area di carico-scarico, son state anche in questo caso associate alla sorgente lineare presentata nella figura precedente (Figura 24)

### 6.9 Sintesi delle emissioni simulate

A conclusione del presente capitolo, le seguenti tabelle riassumono complessivamente le emissioni degli inquinanti considerati prodotte dalle differenti tipologie di sorgenti all'interno del sedime aeroportuale.

**Tabella 12. Riepilogo delle caratteristiche emissive delle varie sorgenti presenti all'interno del sistema aeroportuale di Pisa San Giusto (kg/giorno) (periodo invernale).**

	CO	NOX	PM10	BENZENE
Stazionamento e movimento nei parcheggi	18.3	13.4	0.9	0.1
Impianti termici	24.3	55.5	0.6	0.0
Autobotti e deposito	43.6	115.7	4.8	1.8
Operazioni di supporto a terra	3.7	6.7	0.3	0.0
Cargo	0.3	0.2	0.0	0.0
Aerei in fase di attesa	626.2	74.9	0.0	1.0
Aerei in fase di decollo	11.7	604.6	1.2	0.0
Aerei in fase di salita	1.7	51.6	0.1	0.0
Aerei in fase di atterraggio	109.7	175.3	0.0	0.2
TOTALE	839.5	1097.8	8.0	3.1

**Tabella 13. Riepilogo delle caratteristiche emissive delle varie sorgenti presenti all'interno del sistema aeroportuale di Pisa San Giusto (kg/giorno) (periodo estivo).**

	CO	NOX	PM10	BENZENE
Stazionamento e movimento nei parcheggi	18.3	13.4	0.9	0.1
Impianti termici	24.3	55.5	0.6	0.0
Autobotti e deposito	43.6	115.7	4.8	1.8
Operazioni di supporto a terra	3.7	6.7	0.3	0.0
Cargo	0.3	0.2	0.0	0.0
Aerei in fase di attesa	782.2	95.9	0.0	1.5
Aerei in fase di decollo	12.6	560.9	0.9	0.0
Aerei in fase di salita	2.9	66.9	0.1	0.0
Aerei in fase di atterraggio	106.8	148.6	0.0	0.2
TOTALE	994.6	1063.8	7.8	3.7

## 7 Simulazioni modellistiche di dispersione

A partire dai dati meteorologici analizzati nel capitolo 4 e dall'insieme di emissioni sintetizzate nel paragrafo 6.9, il calcolo delle concentrazioni in aria al suolo dovute al sistema aeroportuale di Pisa San Giusto è stato effettuato utilizzando un modello matematico diffusionale di tipo gaussiano, denominato ARIA Impact, e caratterizzando opportunamente la distribuzione spaziale delle sorgenti.

La versione del software utilizzata in questo studio è la 1.8, rilasciata nel dicembre 2013.

### 7.1 Descrizione del modello ARIA Impact

**ARIA Impact** è composto da un modulo amichevole d'interfaccia a finestre grafiche e di un modello gaussiano coerente con le raccomandazioni della US E.P.A. (Environmental Protection Agency).

Le equazioni di base del modello gaussiano sono quelle classiche che descrivono la dispersione rettilinea di un pennacchio in condizioni stazionarie. Tali equazioni, con alcune modifiche, sono usate per trattare diverse tipologie di sorgenti, classificabili in tre categorie principali: sorgenti di tipo puntiforme, sorgenti di tipo areale e sorgenti di tipo lineare.

L'equazione gaussiana di base, relativa ad una sorgente puntiforme con pennacchio stazionario, utilizzata per il calcolo della concentrazione media oraria ad una distanza sottovento  $x$  e ad una distanza laterale  $y$ , è la seguente:

$$\chi = \frac{QKV D}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2}$$

dove:

$\chi$	concentrazione oraria	(massa per unità di volume)
$Q$	rateo di emissione	(massa per unità di tempo)
$K$	coefficiente per trasformazione le concentrazioni nelle unità di misura desiderate	
$V$	termine di dispersione verticale	
$D$	termine di decadimento	
$\sigma_y$	deviazione standard della distribuzione laterale delle concentrazioni	(m)
$\sigma_z$	deviazione standard della distribuzione verticale delle concentrazioni	(m)
$u_s$	velocità del vento media alla quota di rilascio	(m/s)

Il termine di dispersione verticale  $V$ , include gli effetti dovuti all'altezza fisica del camino, all'innalzamento del pennacchio (Briggs, 1975), alla quota dei recettori, allo strato di rimescolamento, alla deposizione secca, ecc.

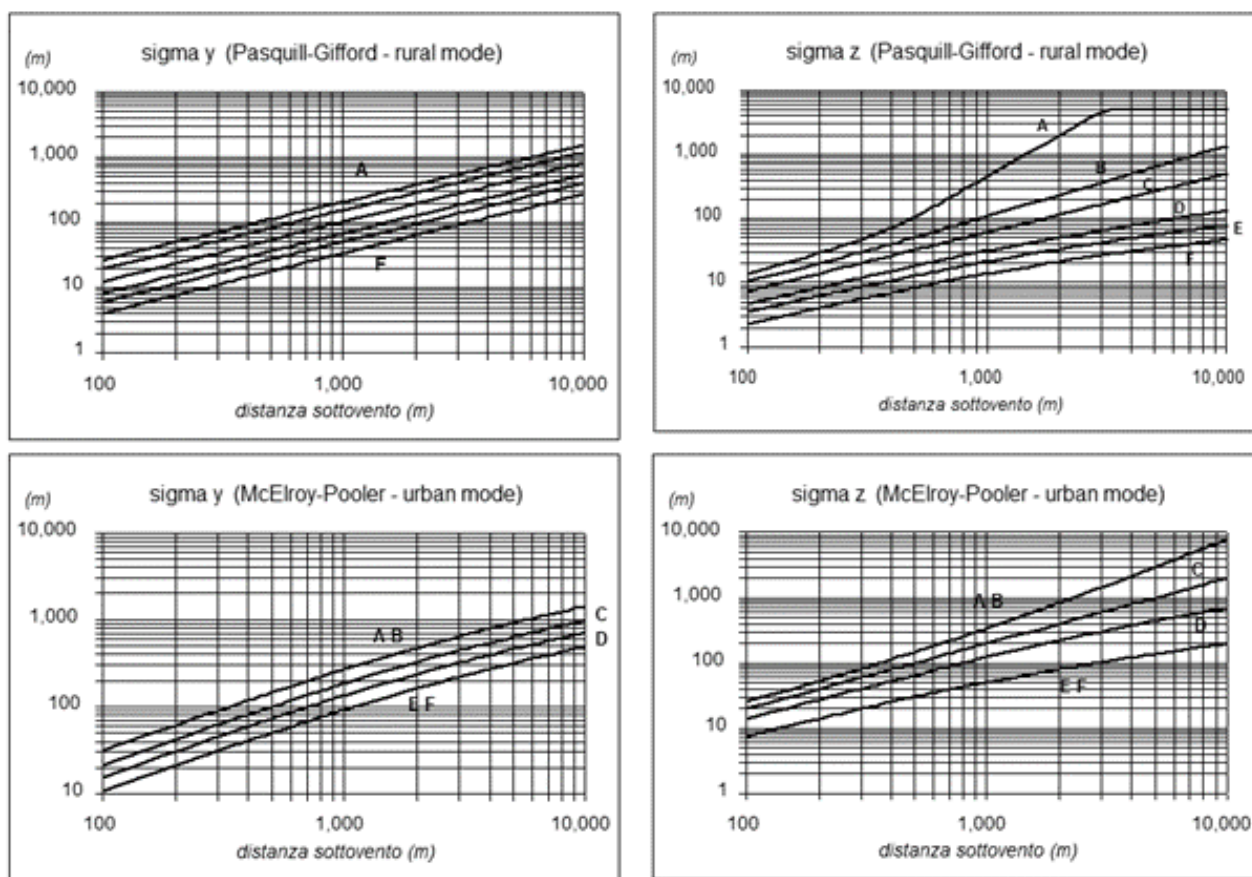
Dalla formula si può comprendere come, per basse velocità del vento, la concentrazione calcolata assuma valori molto elevati; la letteratura ha evidenziato che per  $u_s < 1$  m/s tali valori sono sovrastimati. Per questo motivo, ARIA Impact include un algoritmo di calcolo specifico (della classe dei modelli "a puff") per basse velocità del vento, in grado di migliorare il valore calcolato, in cui sostanzialmente la velocità del vento  $u_s$  viene sostituita con un coefficiente di dispersione longitudinale  $\sigma_x$ .

La velocità del vento, se necessario, viene estrapolata alla quota di emissione secondo la seguente legge di potenza:

$$u_s = u_m \left( \frac{h_s}{z_m} \right)^p$$

dove  $u_m$  è la velocità del vento misurata alla quota  $z_m$ , mentre all'esponente  $p$ , in mancanza di informazioni fornite dall'utente, vengono assegnati dal modello valori standard funzione della categoria di stabilità.

I parametri di dispersione orizzontale e verticale del pennacchio per una sorgente puntiforme, sono rappresentati nei grafici seguenti in funzione della distanza sottovento, della categoria di stabilità secondo Pasquill o McElroy e dell'opzione "rural" o "urban" mode. In Figura 25 sono riportate curve classiche dei coefficienti di dispersione orizzontale e verticale.



**Figura 25. Parametri di dispersione orizzontale e verticale**

Il modello gaussiano adottato è un modello analitico, determina cioè in maniera esatta la concentrazione d'inquinante al suolo sulla base della formula presentata. Non avendo quindi da risolvere numericamente equazioni differenziali in un dominio discreto, non è affetto dall'incertezza numerica che deriva, nel caso di modelli avanzati, dalla risoluzione del dominio discreto adottato. Tuttavia, la risoluzione del grigliato di calcolo delle concentrazioni e la dimensione delle sorgenti influenzano le concentrazioni massime calcolate, in quanto introducono una distanza minima recettore - sorgente tanto maggiore quanto maggiore è il passo di griglia: in questo senso, permane una incertezza numerica nel calcolo delle concentrazioni massime, incertezza che si riduce rapidamente con la distanza dalla sorgente.

Nel caso di venti deboli, in luogo del modello a pennacchio viene, come detto, utilizzata una formulazione a puff gaussiani. Il sovrainnalzamento viene calcolato utilizzando la formula di

Holland e l'emissione viene poi discretizzata tramite la generazione a cadenza regolare (tipicamente dell'ordine delle decine di secondi, in funzione della velocità del vento, per assicurare la continuità del pennacchio) di un certo numero di puff. La simulazione della dispersione avviene mediante il calcolo delle traiettorie dei loro centri di massa (trasporto da parte del vento) e della diffusione attorno ad essi. La velocità orizzontale utilizzata corrisponde a quella in corrispondenza del baricentro del puff; la velocità verticale nel caso di particolati è data invece dalla combinazione della componente verticale del vento e della velocità di sedimentazione, funzione della granulometria.

La concentrazione dei puff intorno ai loro centri di massa è assunta di tipo gaussiano, con distribuzione caratterizzata dagli scarti orizzontale e verticale. Tali scarti evolvono nel tempo, per simulare la diffusione del pennacchio nell'atmosfera circostante, sulla base delle formule dei coefficienti di dispersione. Il calcolo è effettuato in funzione della stabilità atmosferica e della distanza percorsa dal puff a partire dal suo rilascio in corrispondenza della sorgente.

La modellizzazione a puff coincide con quella a pennacchio rettilineo quando il vento è uniforme su tutto il dominio di calcolo, la velocità verticale è nulla, il terreno è pianeggiante ed il flusso d'uscita al camino è costante.

## 7.2 Ripartizione delle emissioni nelle sorgenti virtuali utilizzate

Il set di sorgenti virtuali simulate è stato scelto, in tipo, numerosità e dimensioni, sulla base dell'entità delle emissioni stimate, disaggregate per fase LTO, e delle rotte di decollo/atterraggio previste.

Le rotte sono state seguite grosso modo fino all'uscita degli aviogetti dallo strato rimescolato, fissato a 915m (3000ft); una novità rispetto alle versioni precedenti è che è caduto il limite sull'altezza delle sorgenti a 500m.

Per quanto riguarda il loro percorso, l'atterraggio è stato sempre considerato da sud, mentre i decolli sono suddivisi nelle due direzioni in base ai dati forniti.

Tutte le rotte sono state considerate rettilinee e con gradiente di salita costante pari al minimo stabilito nelle procedure anti-rumore. In particolare, in conformità con quanto previsto del piano di mitigazione dell'impatto acustico sulla città di Pisa, le sorgenti in cui sono state discretizzate le emissioni atmosferiche inquinanti degli aeromobili in fase di decollo (TO - Take Off) e salita (CO - Climb Out) verso la città (direzione 04) seguono il profilo di salita "ICAO A" più ripido rispetto a quello standard contenuto nella AIP (Aeronautical Information Publication); il gradiente di salita utilizzato più che doppio rispetto all'AIP è stato determinato considerando che, secondo il profilo ICAO A, l'altezza di 1000m (convenzionalmente pari allo spessore del PBL nella metodologia ICAO di stima delle emissioni atmosferiche) è raggiunta a una distanza orizzontale di circa 6km.

La tabella seguente riassume i parametri caratteristici delle varie rotte

**Tabella 14. Parametri caratteristici delle rotte durante il periodo invernale**

Periodo	Rotta	Atterraggio/Decollo	Direzione del moto	Ripartizione voli	Gradiente di salita/discesa
invernale	04R	A	NE	100%	5.1%
	04R	D	NE	46%	16.7%
	22L	D	SW	54%	5.5%
estivo	04R	A	NE	100%	5.1%
	04R	D	NE	57%	16.7%
	22L	D	SW	43%	5.5%

Ogni rotta è stata suddivisa in un numero opportuno di sorgenti volumetriche, in modo che la distanza tra due baricentri successivi fosse pari alla risoluzione della griglia di calcolo (100m). La

Figura 26 mostra una rappresentazione della proiezione orizzontale sul dominio di calcolo delle sorgenti utilizzate:

- I cerchi rosa e mattone rappresentano la discretizzazione delle rotte di decollo e salita in sorgenti volumetriche;
- I quadrati blu rappresentano la discretizzazione della rotta di atterraggio;
- I cerchi verdi localizzano i camini delle centrali termiche;
- L'area rossa rappresenta la sorgente parcheggi;
- L'area azzurra rappresenta la sorgente che include le attività a terra (fasi di taxi in e out), mezzi di supporto, depositi di carburante e attività di rifornimento;
- Le linee gialle e verdi rappresentano i percorsi rispettivamente dei mezzi pesanti di trasporto verso l'area cargo e delle autobotti.

Le due sorgenti areali sono state considerate al suolo.



**Figura 26. Mappa 2D delle sorgenti simulate**

### 7.3 Descrizione delle simulazioni e risultati

Ogni periodo meteorologico d'interesse è stato simulato a parte, calcolando ogni volta la media di periodo ed il massimo orario o giornaliero per tutti gli inquinanti esaminati. Le emissioni, assegnate in valore orario a ciascuna sorgente, sono quelle determinate come descritto nel corso della seconda fase del presente studio. Tali emissioni sono state disaggregate sia temporalmente sia spazialmente sulle rotte considerate, sulla base degli effettivi passaggi di aeromobili, così come derivato dai dati SAT.

### 7.3.1 Simulazione del periodo invernale

Alle sorgenti sono stati applicati dei profili di disaggregazione temporale ottenuti sulla base del traffico previsto sull'aeroporto dal Masterplan (Figura 27); si è scelto di mantenere modulazioni differenti nei due mesi considerati poiché in essi non è stata riscontrata una periodicità marcata ed in questo modo si è cercato di rappresentare al meglio l'effettiva attività dello scalo.

In base a tali modulazioni, alle condizioni meteorologiche ed alle caratteristiche emissive, sono state fatte le simulazioni, i cui risultati sono riportati dalla Figura 28 alla Figura 35 mentre in Tabella 15 sono sintetizzati i massimi di griglia ed i valori registrati presso la centralina nell'area merci dell'aeroporto. Per completezza è presentato anche l'inquinante NO<sub>x</sub>

Le mappe d'isoconcentrazione ottenute non presentano, nel complesso, criticità, soprattutto per quanto riguarda le ricadute sull'abitato della città di Pisa.

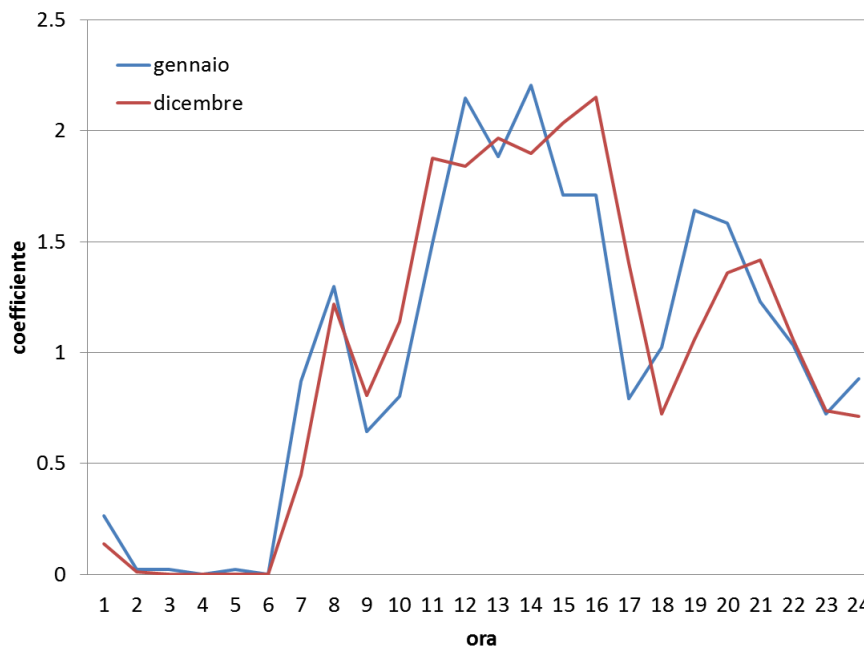


Figura 27. Profili temporali di modulazione utilizzati nei due mesi

Tabella 15. Sintesi delle concentrazioni stimate dal modello (µg/m3)

Inquinante	Parametro	Massimo di griglia	Aeroporto Edificio principale
NO <sub>x</sub>	media	13.6	1.9
	massimo	305.5	74.0
NO <sub>2</sub>	media	10.4	1.3
	massimo	86.5	41.3
Benzene	media	0.007	0.003
CO	massimo	135.6	33.4
PM10	media	0.1	0.03
	massimo	0.4	0.09

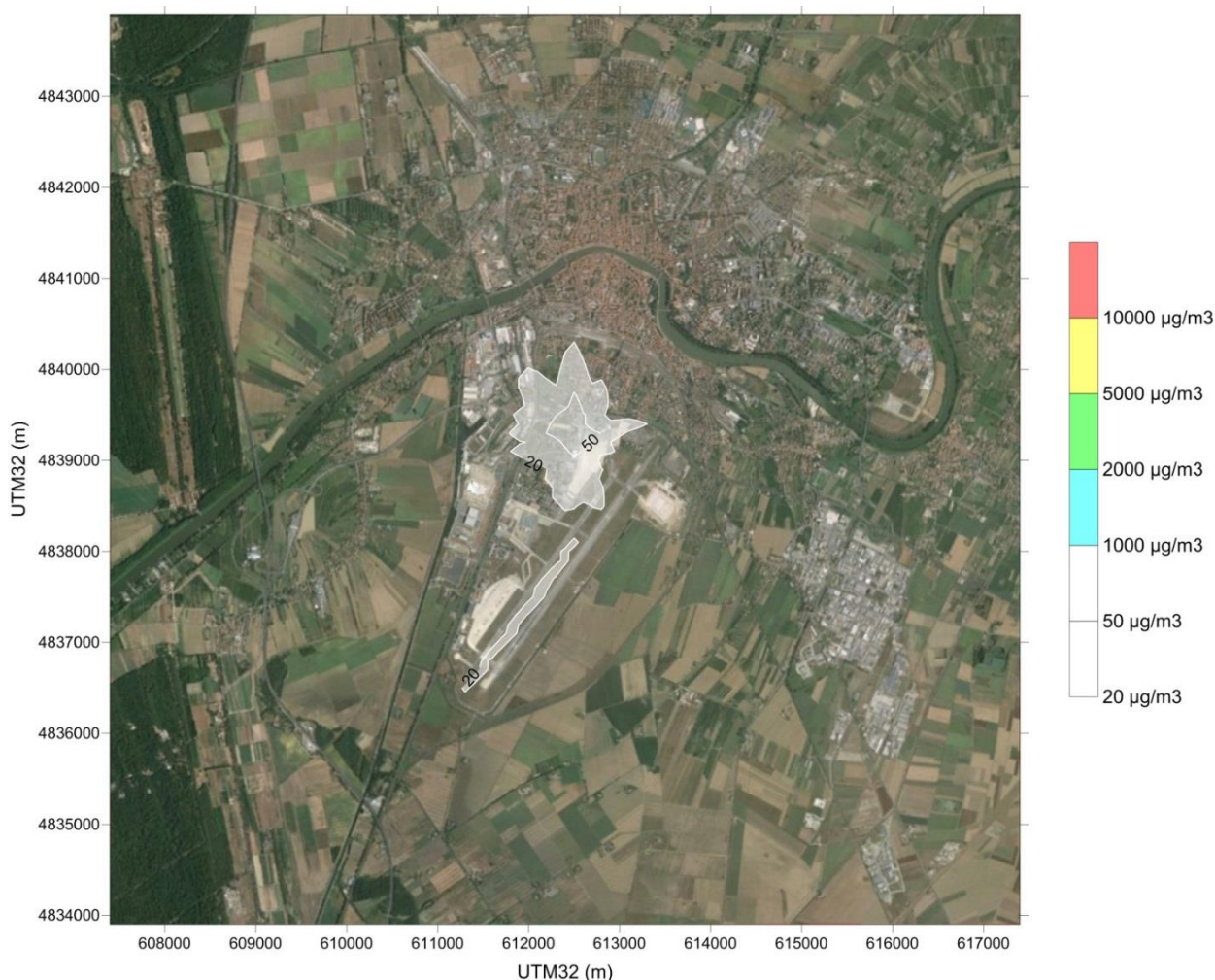
Nonostante l'aver considerato i valori mediati sull'ora anziché su otto ore, come previsto dal D.Lgs. 155/2010, le concentrazioni calcolate di CO risultano assai basse (raggiungendo un massimo di griglia pari a 135.6µg/m3) e tali da non impensierire rispetto ai livelli limite (Figura 28). I livelli relativamente più elevati si concentrano attorno ai punti di emissione delle centrali termiche.

Anche la media annuale di NO<sub>2</sub> (Figura 31) non presenta alcun tipo di criticità, raggiungendo un massimo di griglia, in corrispondenza delle piste, pari a 10.4µg/m<sup>3</sup>. Per via della particolare orientazione dei venti nel periodo invernale esaminato, le isolinee si estendono in particolar modo verso ovest-nord-ovest. Si può osservare di nuovo come siano responsabili dell'impronta d'impatto principale le centrali termiche, dotate di emissioni di NO<sub>x</sub> non irrilevanti (5% delle emissioni calcolate per l'aeroporto) concentrate in camini di piccole dimensioni, tipologia di sorgente che il modello intrinsecamente tratta in maniera molto conservativa (la concentrazione tende all'infinito al tendere a zero della distanza dalla sorgente).

La mappa del 100° percentile del biossido di azoto (Figura 32) presenta un'impronta d'impatto ancora influenzata dalle centrali termiche, con concentrazioni che raggiungono valori pari a 86.5µg/m<sup>3</sup>, non superando dunque il limite di legge di 200µg/m<sup>3</sup> stabilito per il percentile annuale 99.8 delle concentrazioni orarie di NO<sub>2</sub>). Lambiscono la città livelli attorno a 10µg/m<sup>3</sup>.

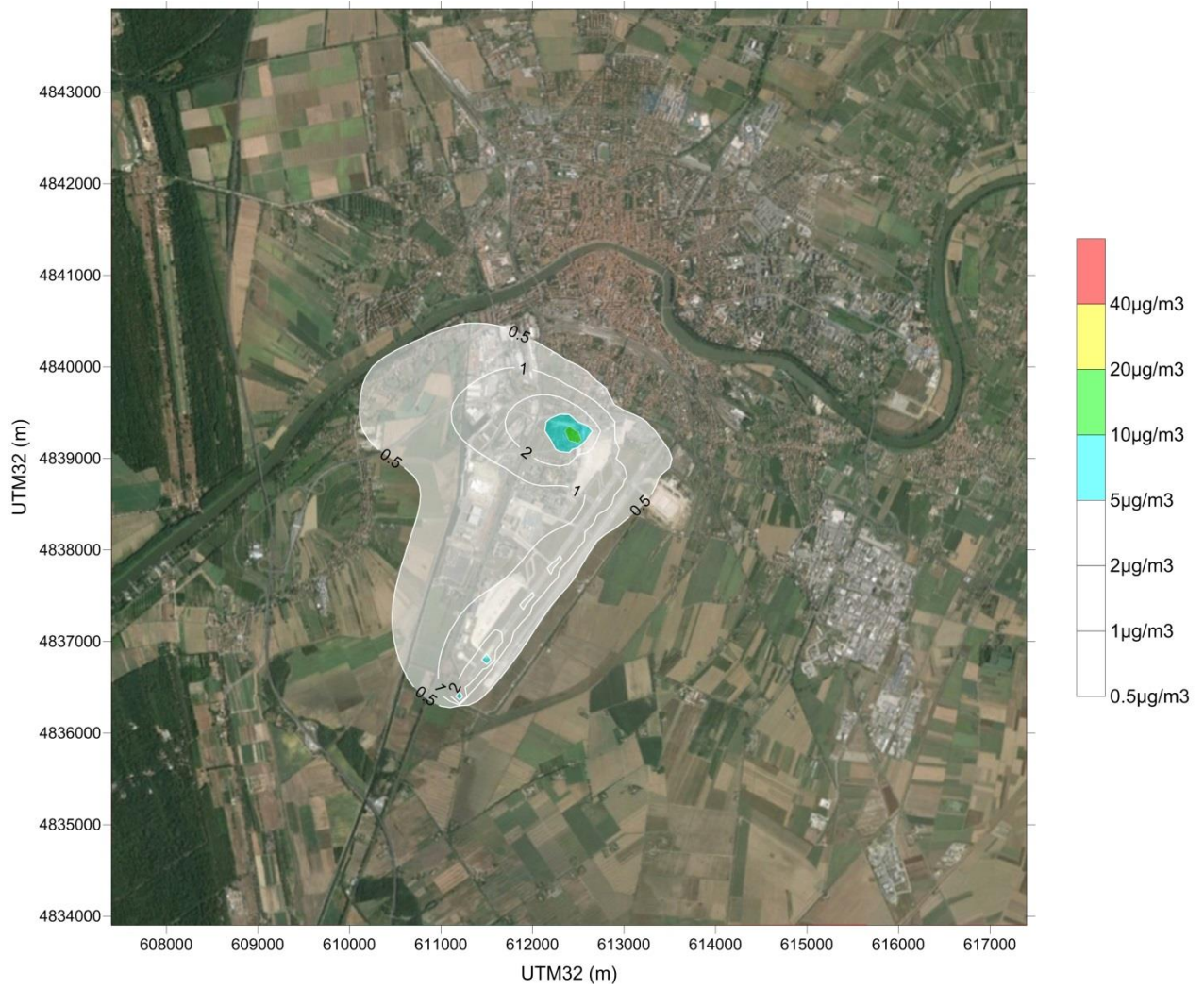
Per quanto riguarda le concentrazioni di particolato, i valori medi simulati sono inferiori a 0.1µg/m<sup>3</sup> e si concentrano nei pressi del sedime aeroportuale (Figura 33), come del resto i valori massimi, che raggiungono un massimo di 0.4µg/m<sup>3</sup> (Figura 34).

Il benzene, emesso per la maggior parte durante la fase di attesa degli aeromobili e di refilling dei depositi di carburante da parte delle autobotti, raggiunge un massimo delle medie orarie sul periodo pari a 0.007µg/m<sup>3</sup> (Figura 35), e mostra una distribuzione pressoché omogenea entro il perimetro dell'aeroporto.

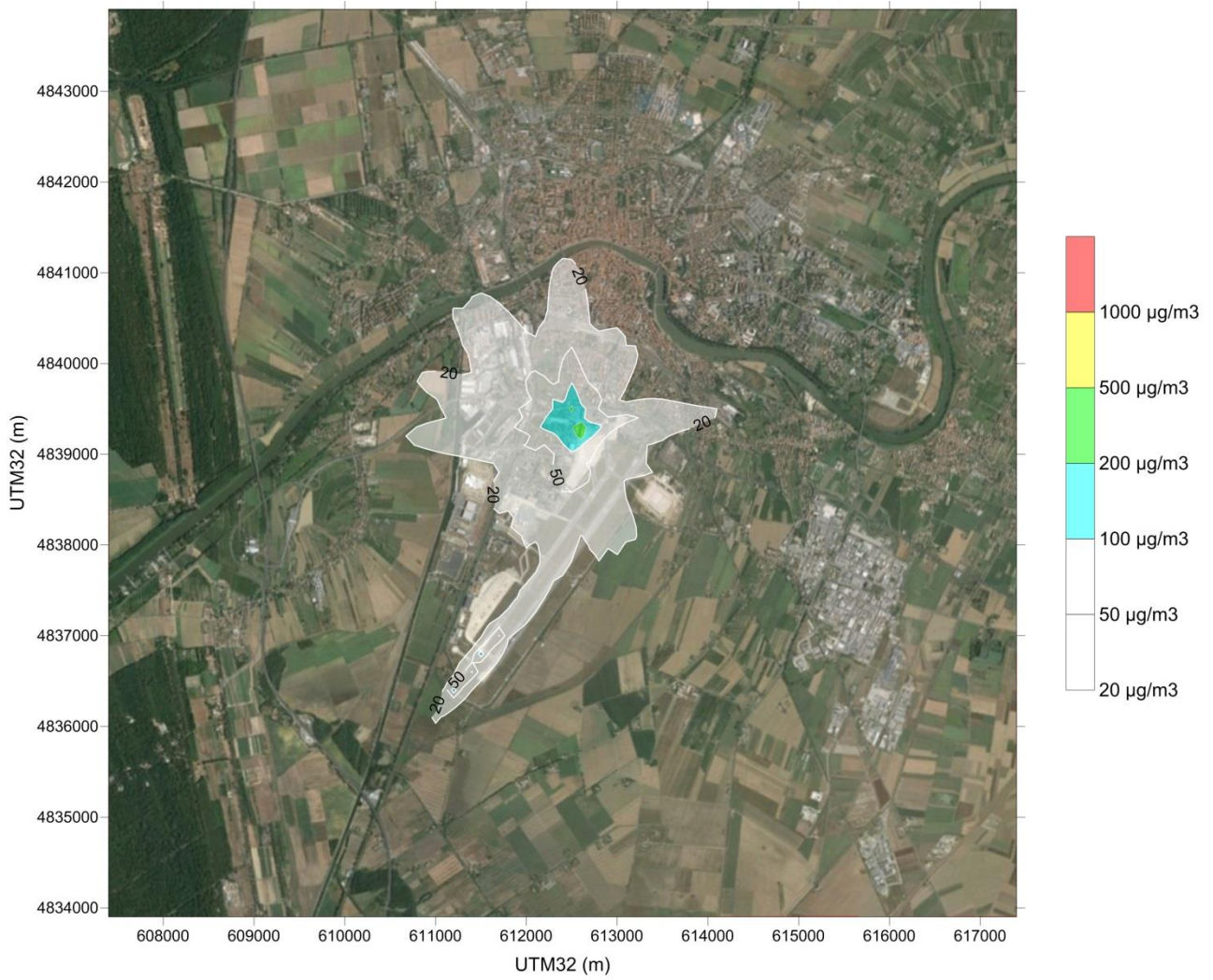


**Figura 28. 100° percentile di CO (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**

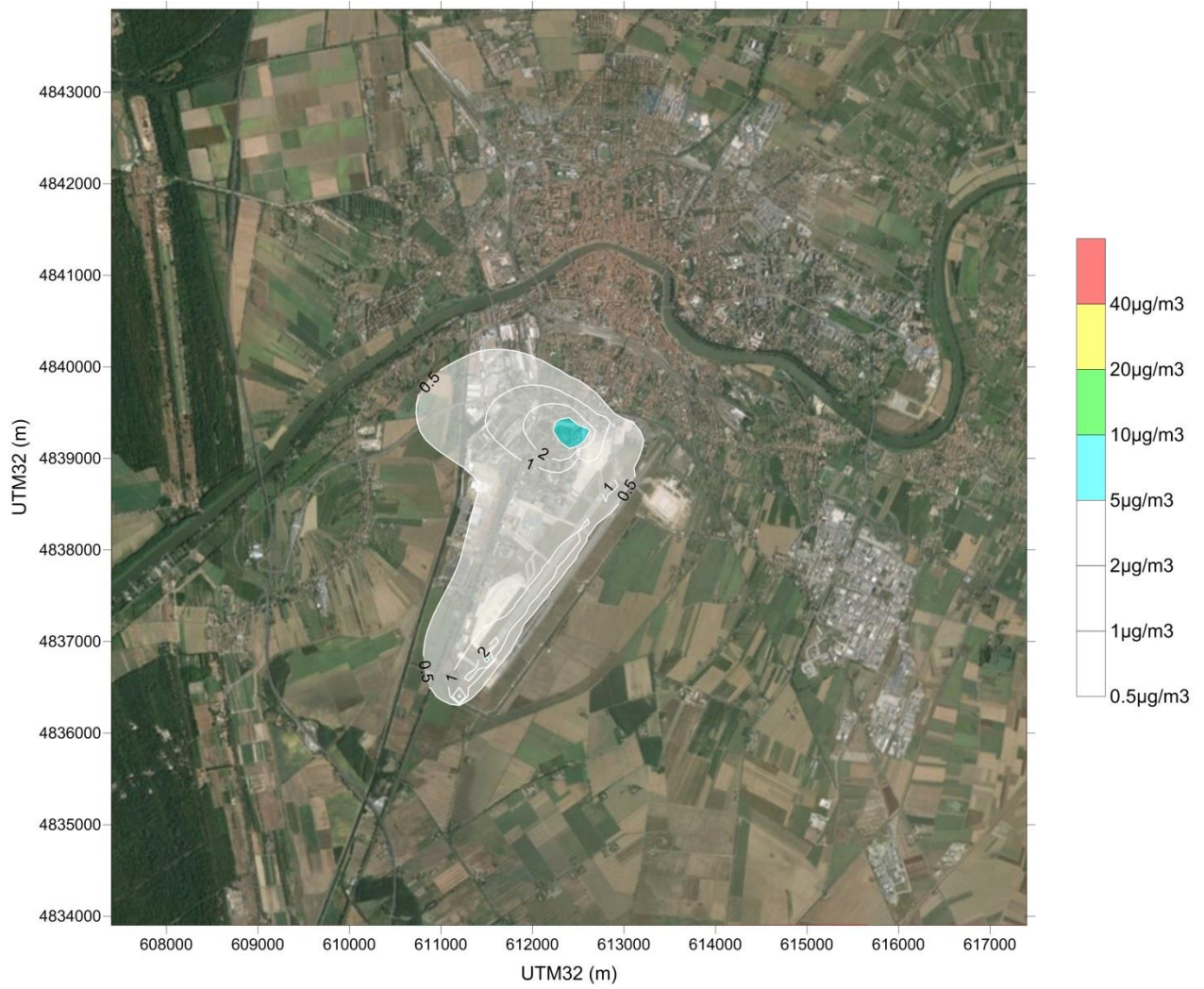




**Figura 29. Media di periodo di NO<sub>x</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



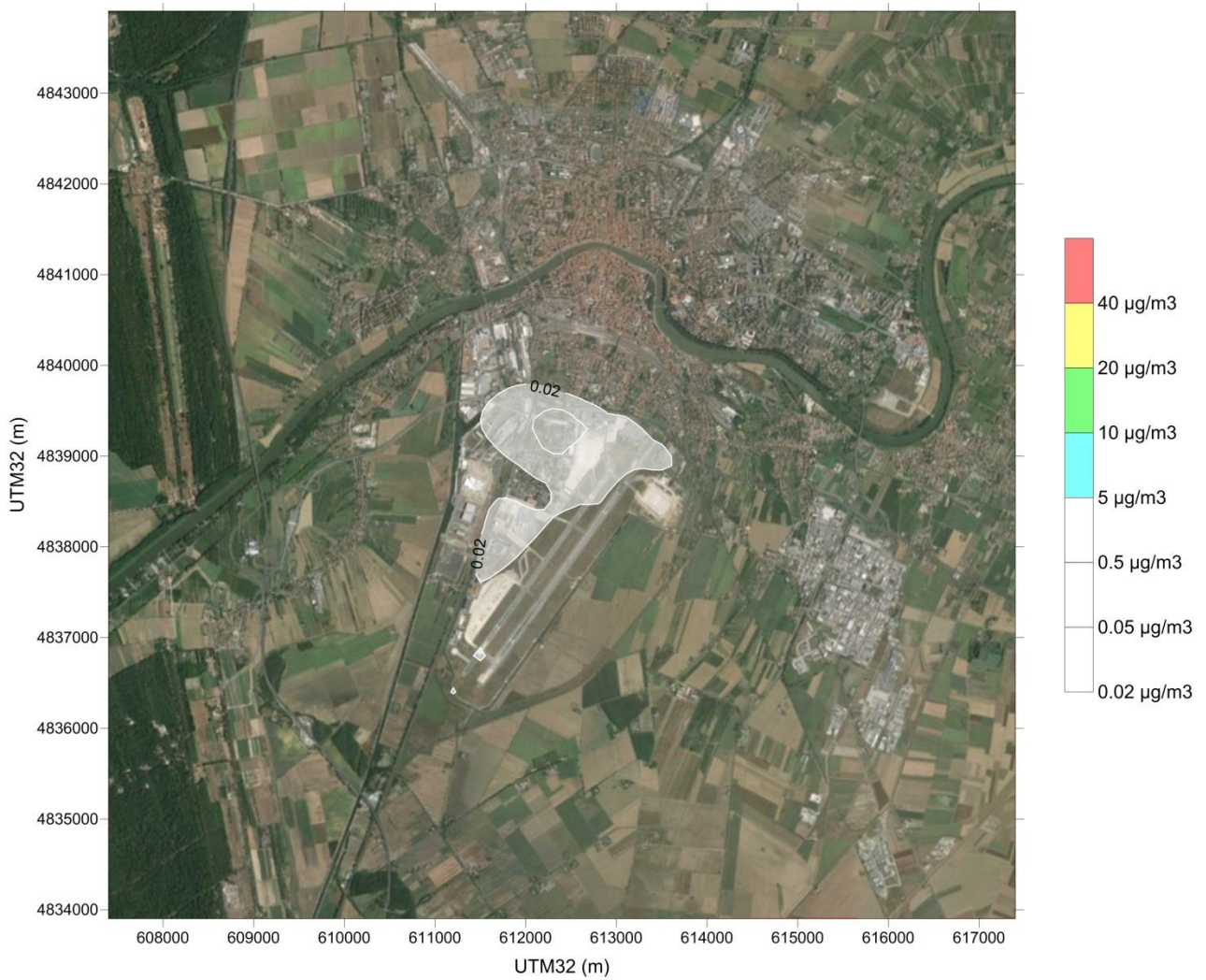
**Figura 30. 100° percentile di NO<sub>x</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



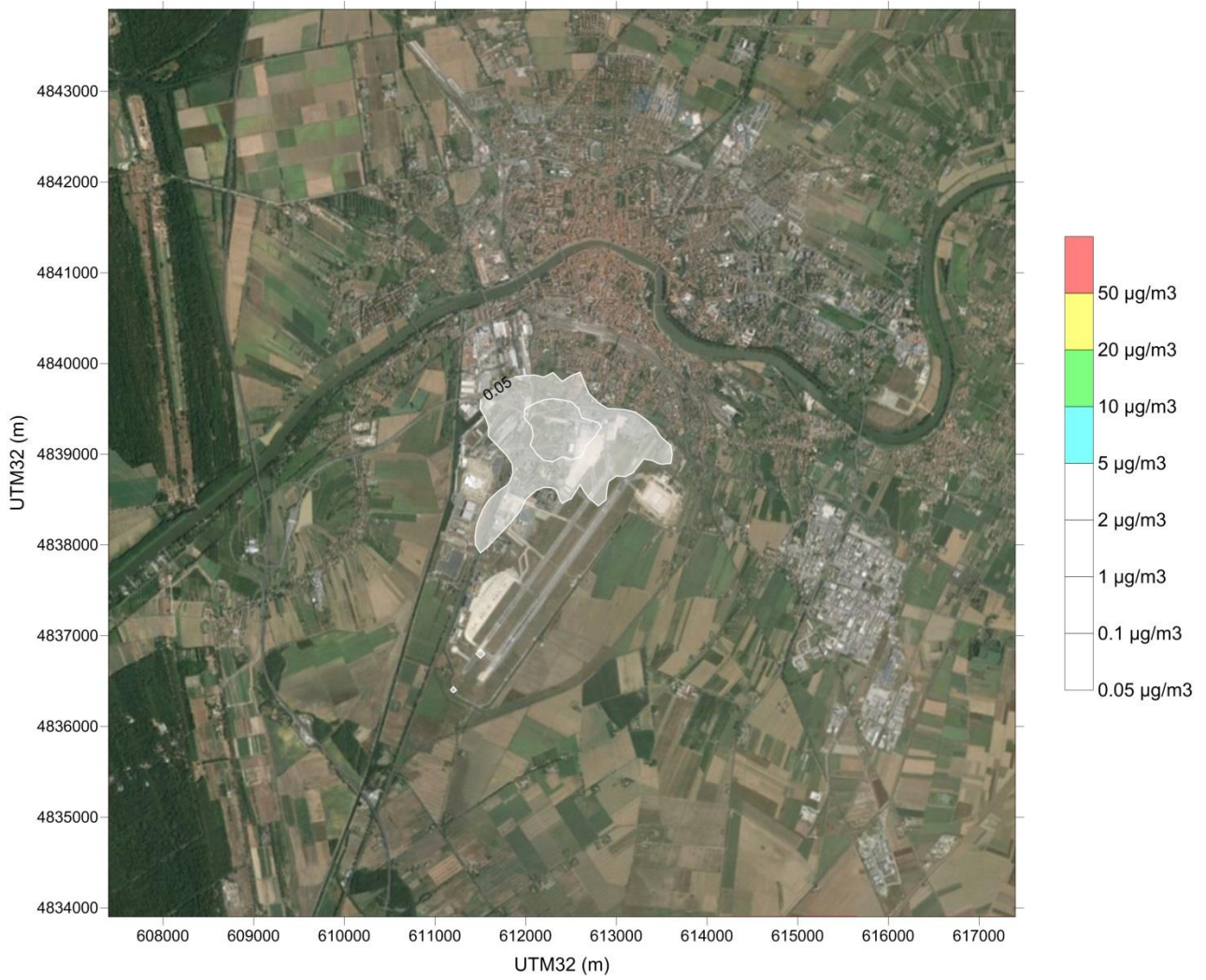
**Figura 31. Media di periodo di NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



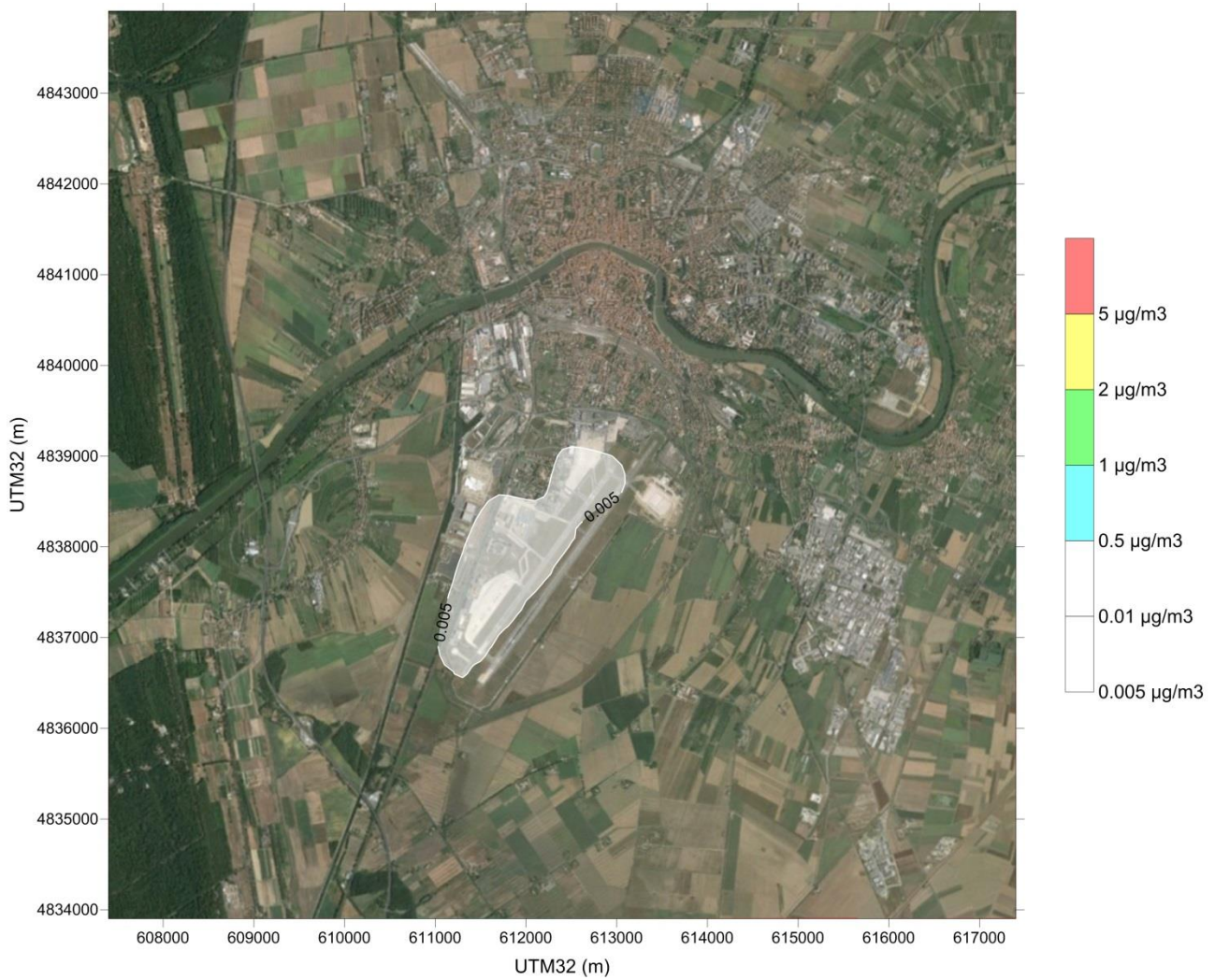
**Figura 32. 100° percentile di NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



**Figura 33. Media di periodo di PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



**Figura 34. 100° percentile di PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**

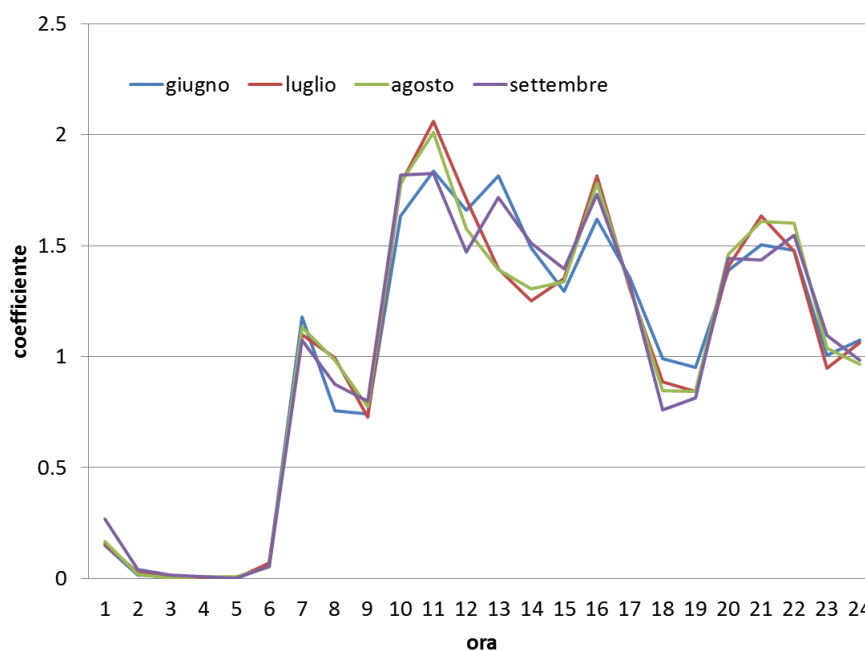


**Figura 35. Media di periodo di benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**

### 7.3.2 Simulazione del periodo estivo

Analogamente a quanto fatto per il periodo invernale, al caso estivo sono state associate modulazioni temporali specifiche calcolate in base al traffico effettivo previsto nei mesi di giugno, luglio, agosto e settembre. In base a quanto previsto nel Masterplan si sono osservati andamenti differenti nei diversi mesi, pertanto si è deciso di mantenere modulazioni distinte (Figura 36). Le principali differenze rispetto ai mesi invernali sono l'anticipo di due ore dei picchi di traffico a metà giornata e il ritardo sempre di due ore di quelli serali.

In base a tali modulazioni, alle condizioni meteorologiche e alle caratteristiche emissive, sono state effettuate le simulazioni, i cui risultati sono riportati dalla Figura 37 alla Figura 44, mentre in Tabella 16 sono sintetizzati i massimi di griglia ed i valori registrati presso la centralina nell'area merci dell'aeroporto.



**Figura 36. Profili temporali di modulazione utilizzati nei 4 mesi estivi**

**Tabella 16. Sintesi delle concentrazioni stimate dal modello ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).**

Inquinante	Parametro	Massimo di griglia	Aeroporto Edificio principale
NO <sub>x</sub>	media	6.9	1.6
	massimo	218.1	52.1
NO <sub>2</sub>	media	6.7	0.7
	massimo	104.5	38.0
Benzene	media	0.007	0.002
CO	massimo	80.2	23.2
PM10	media	0.06	0.03
	massimo	0.2	0.06

Anche durante il periodo estivo, pur tenendo conto di un incremento delle attività aeroportuali, non si registrano particolari criticità; le concentrazioni di CO calcolate dal modello raggiungono un massimo di griglia pari a  $80.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pertanto non in grado di impensierire rispetto ai livelli limite (Figura 37). I livelli si estendono maggiormente verso nord per la presenza delle centrali termiche, mentre lungo la pista l'impatto degli aeromobili è più evidente verso l'estremità SW perché

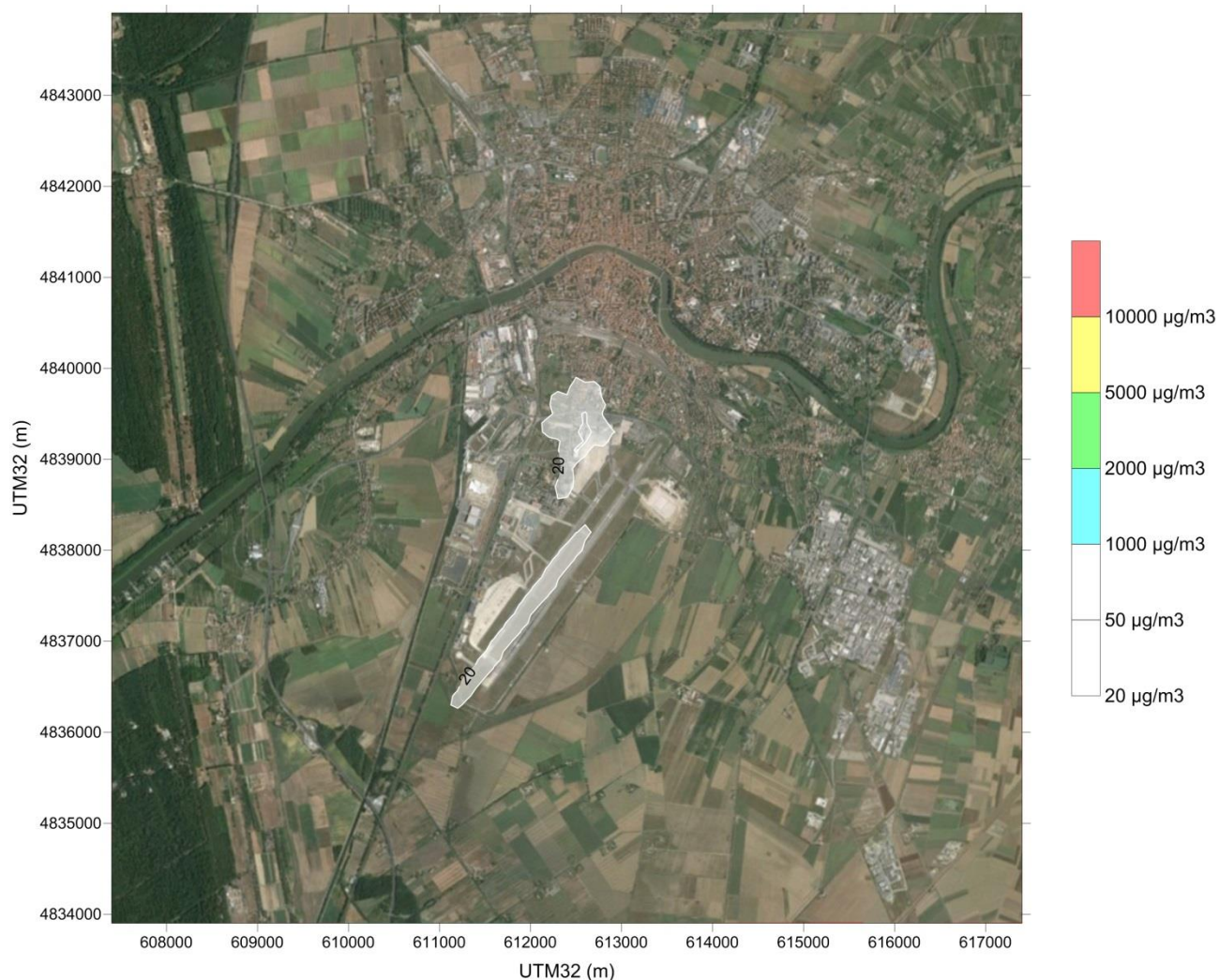


influenzata dagli atterraggi (che sono stati assegnati per il 100% da quella direzione) e i decolli (che verso quella direzione sono stati associati a un gradiente di salita inferiore).

Per quanto riguarda il biossido di azoto non si segnalano criticità né per la media (massimo di griglia pari a  $6.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Figura 38) né per i massimi (valore più elevato in griglia  $104.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Figura 39); durante l'estate i contributi di aeromobili e centrali termiche appaiono simili.

I valori medi delle concentrazioni di particolato hanno un massimo pari a  $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$  e si concentrano nella parte nord del sedime aeroportuale (Figura 42) mentre i valori massimi raggiungono un massimo di  $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 43).

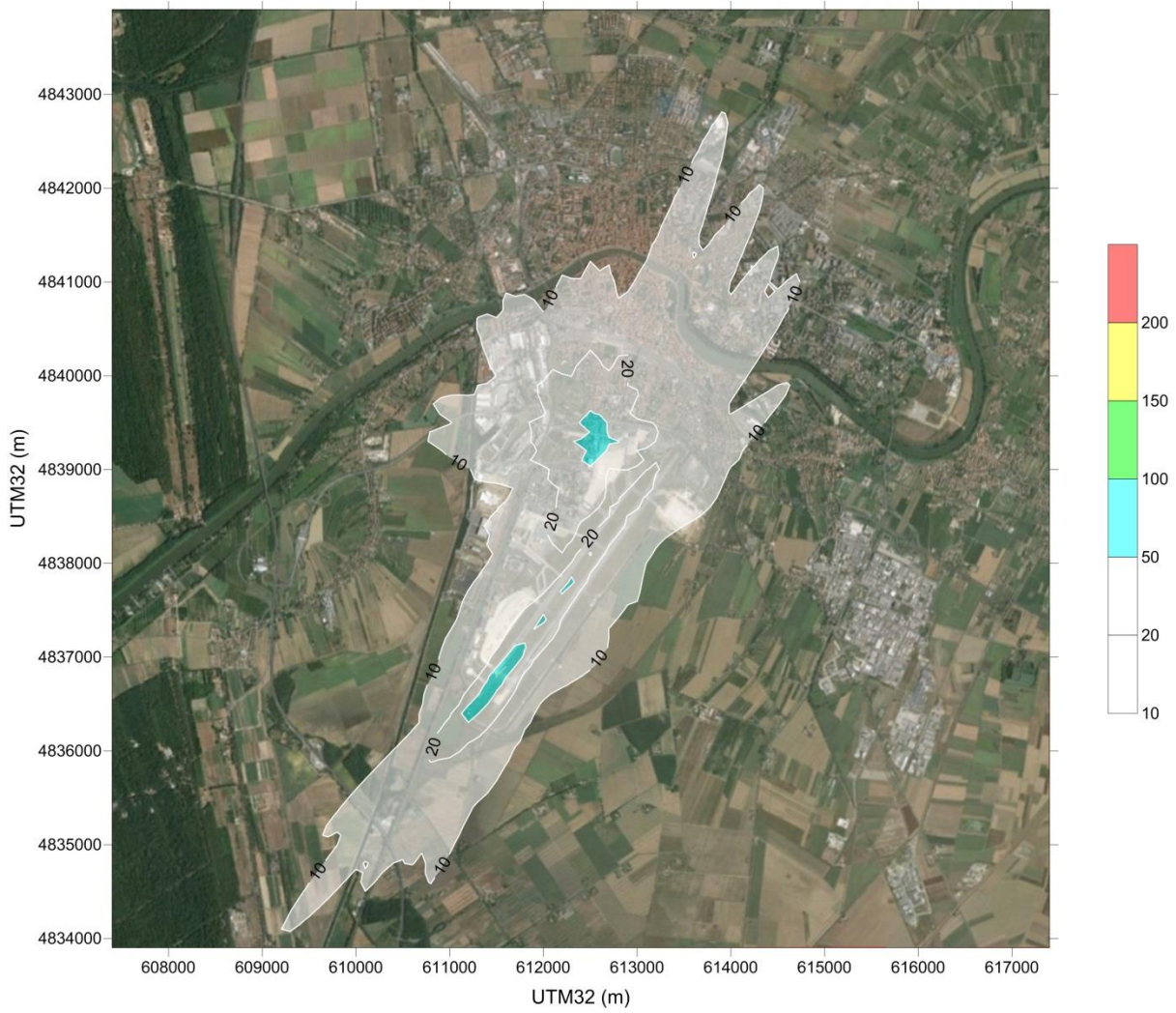
Il benzene presenta concentrazioni trascurabili (Figura 44).



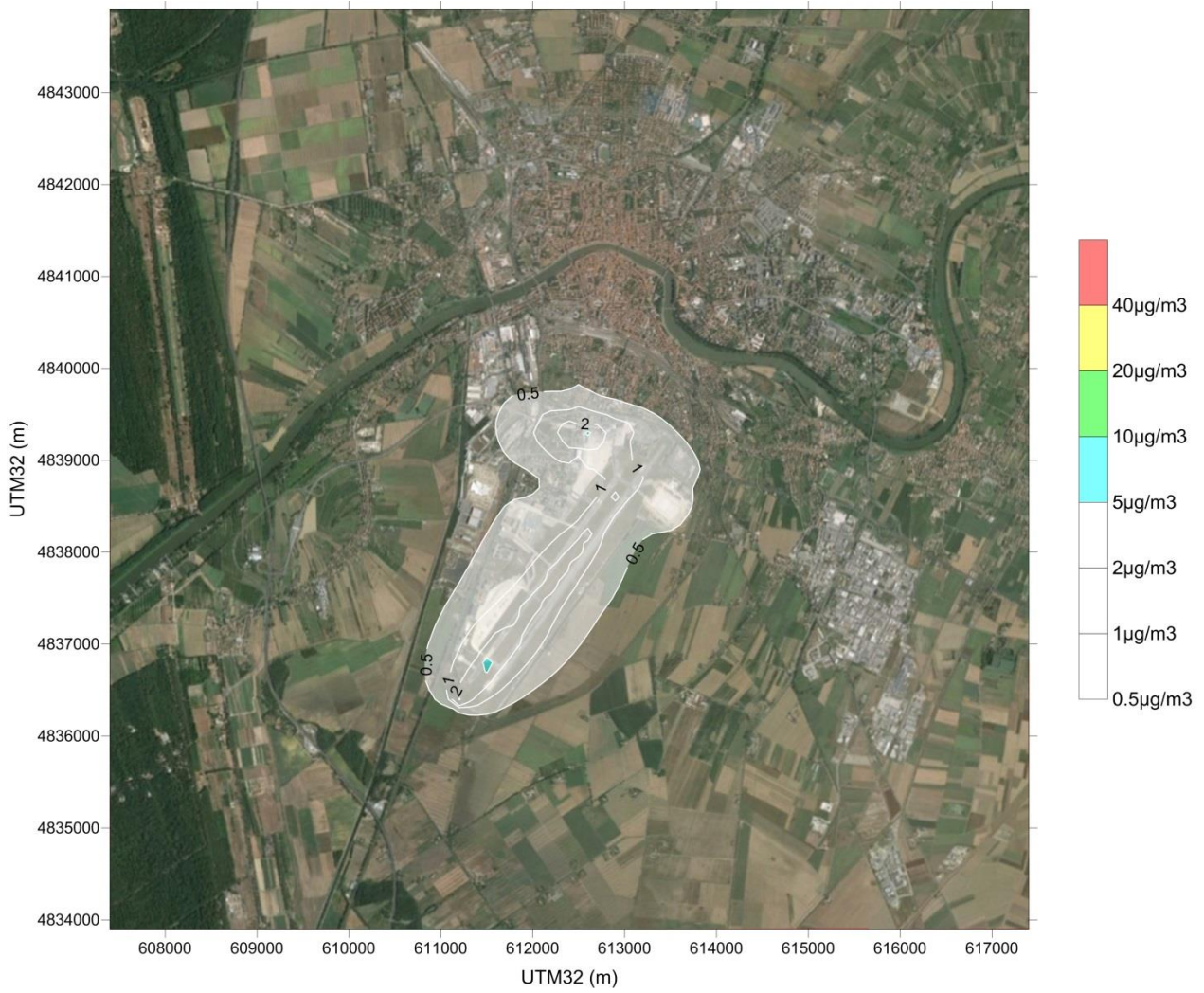
**Figura 37. 100° percentile di CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



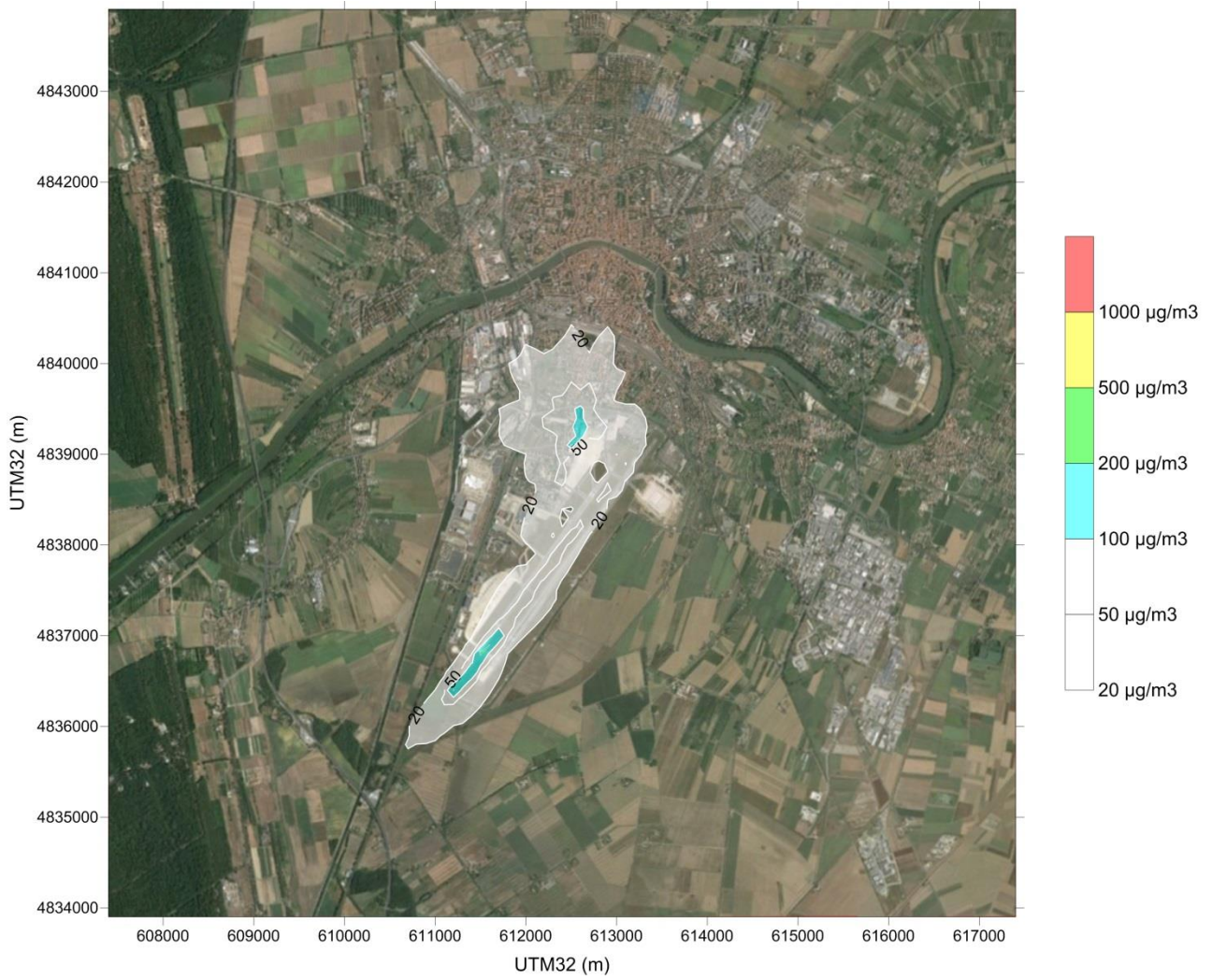
**Figura 38. Media di periodo di NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



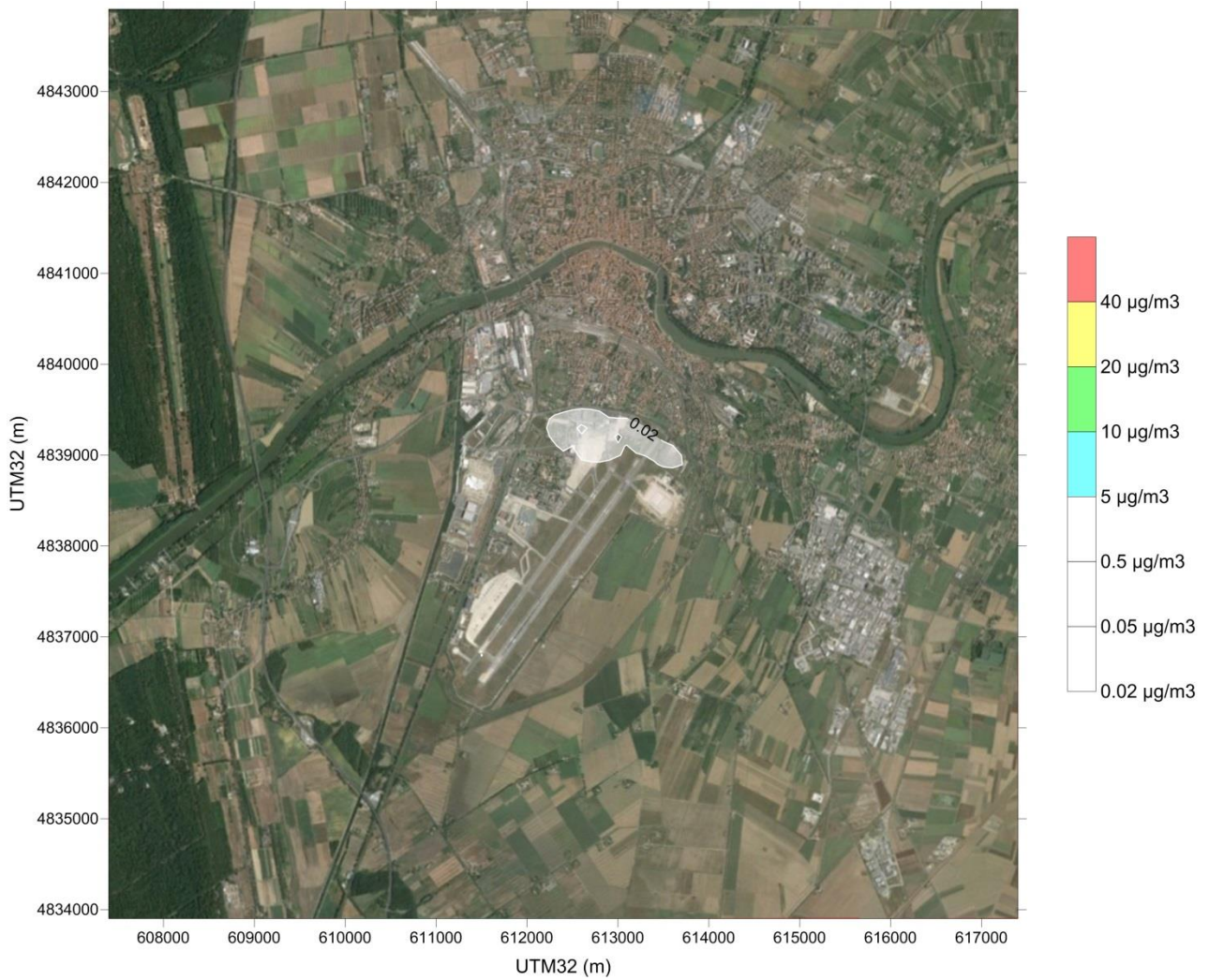
**Figura 39. 100° percentile di NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



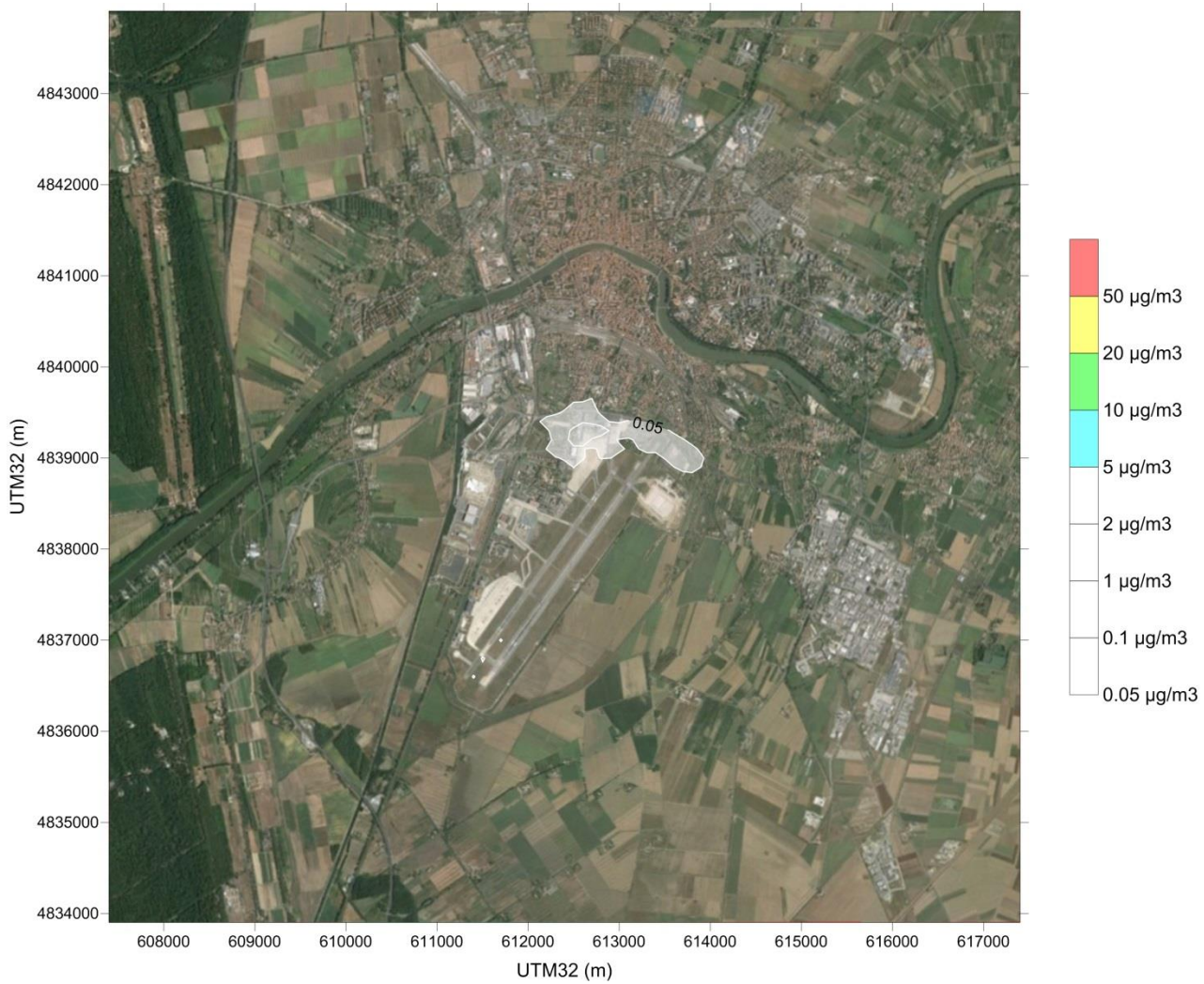
**Figura 40. Media di periodo di NOx ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



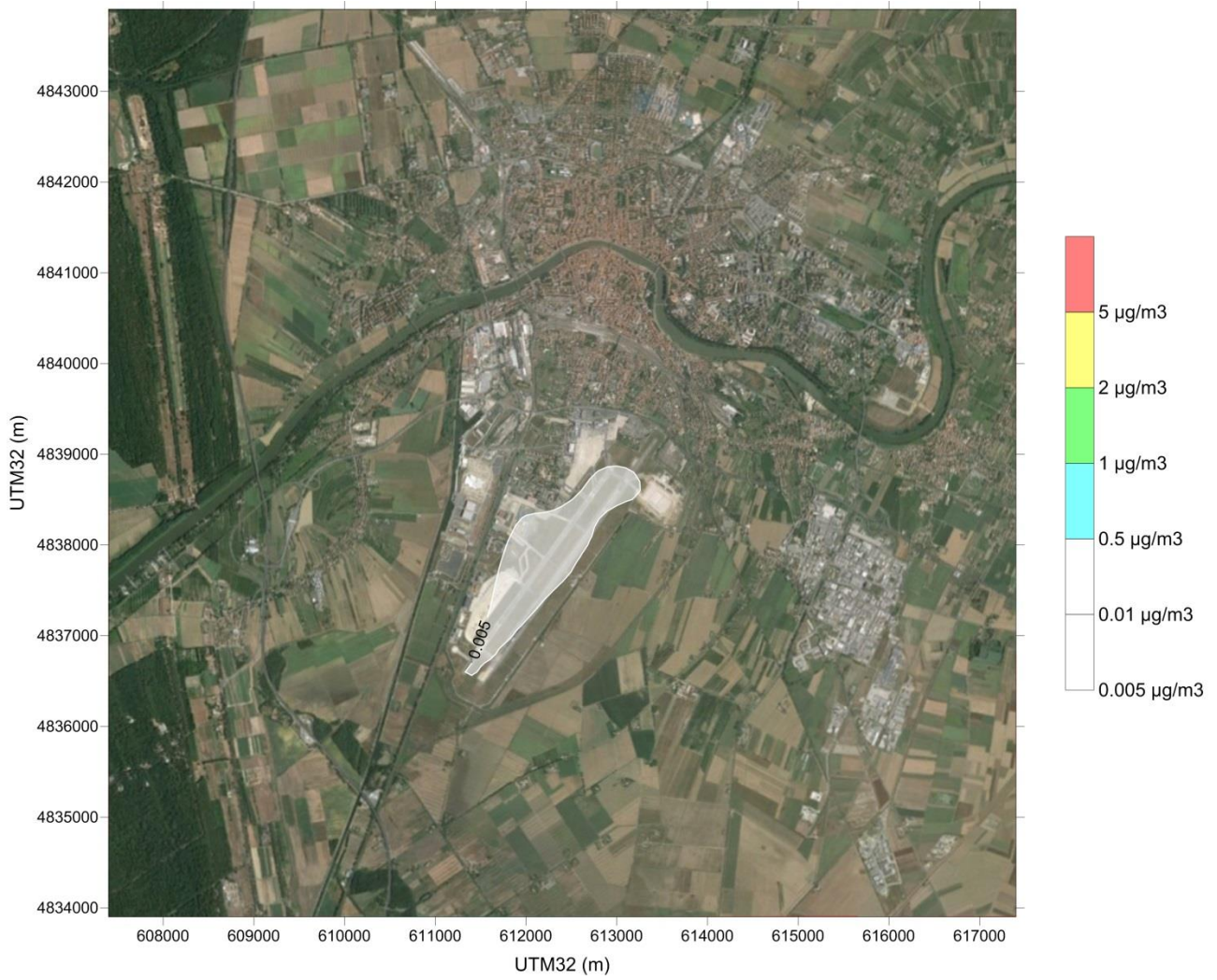
**Figura 41. 100° percentile di NO<sub>x</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



**Figura 42. Media di periodo di PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



**Figura 43. 100° percentile di PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



**Figura 44. Media di periodo di benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) emesso dall'insieme delle sorgenti considerate**



## 8 Stima del contributo aeroportuale alle emissioni di gas climalteranti

A completamento dell'analisi del progetto di evoluzione dell'aeroporto (Masterplan 2028) dal punto di vista delle emissioni atmosferiche, sono state stimate le emissioni di gas climalteranti attribuibili all'aeroporto nello scenario futuro e confrontate con quelle contenute nell'inventario regionale IRSE 2007.

In generale (Tabella 17) le emissioni aeroportuali a livello provinciale costituiscono poco più del 5% di quelle complessive e si attestano a 31.9 kt di CO<sub>2</sub> equivalente. Al 2028 le emissioni di gas climalteranti sono stimate pari a 171.4 kt di CO<sub>2</sub> equivalente, la maggior parte attribuibile alle attività degli aeromobili.

**Tabella 17. Emissioni annuali di gas climalteranti della provincia di Pisa in tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (Fonte: IRSE 2007).**

Settore	CO <sub>2</sub> (kt)
Prod.Energia Elettrica	0.0
Comb.non industriale	112.1
Comb.Industriale	160.8
Proc.produttivi	51.4
Estrazione combustibili fossili	0.0
Uso solventi	0.0
Traffico stradale	194.0
Altri mezzi mobili (aeroporti)	42.7 (31.9)
Gestione rifiuti	39.8
Agricoltura	0.0
Natura ed altri assorbimenti	0.1
<b>Totale</b>	<b>600.8</b>

**Tabella 18. Emissioni annuali di gas climalteranti stimate per l'aeroporto in tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (Scenario: Masterplan 2028).**

Attività	CO <sub>2</sub> (kt)
LTO aeromobili	156.3
Centrali termiche	13.3
mezzi pesanti / parcheggi	0.6
GSE	1.3
<b>Totale</b>	<b>171.4</b>

## 9 Conclusioni

L'aeroporto di Pisa è un aeroporto militare aperto al traffico civile. Il complesso aeroportuale si trova a circa un chilometro dal centro cittadino e per questo si è ritenuto opportuno indagare l'impatto atmosferico delle attività correlate, in accordo con gli sviluppi futuri previsti (anno di riferimento 2028). Il dominio di indagine ha riguardato un'area quadrata di lato 10km.

Per valutare l'impatto atmosferico aeroportuale è stato applicato un modello dispersivo di tipo gaussiano.

In sintesi il lavoro è stato suddiviso nelle seguenti fasi:

1. caratterizzazione del sito di studio da un punto di vista meteorologico;
2. individuazione delle sorgenti inquinanti e stima dell'attività emissiva;
3. calcolo della dispersione atmosferica delle sorgenti individuate.

Per caratterizzare la meteorologia locale, sono stati elaborati i dati meteorologici della stazione dell'aeroporto di Pisa gestita dall'Aeronautica Militare, la cui disponibilità è risultata molto buona. Tra le variabili meteorologiche a disposizione, particolare attenzione è stata posta nell'analisi di quelle direttamente coinvolte nelle simulazioni modellistiche di dispersione, ovvero vento, temperatura, nuvolosità, categoria di stabilità atmosferica.

L'impatto sulla locale qualità dell'aria al suolo prodotto dalle emissioni inquinanti emesse dalle attività aeroportuali è stato calcolato prendendo come riferimento l'anno 2028, secondo il Piano di Sviluppo Aeroportuale (Masterplan) approvato da ENAC nel maggio 2014; lo studio ha preso in considerazione un periodo di 8 settimane relative ai mesi invernali di dicembre e gennaio ed uno relativo ai mesi di giugno, luglio, agosto e settembre.

Oltre alle emissioni degli aeromobili, in tutte le fasi del ciclo LTO ("Landing/Take Off cycle"), sono state considerate anche le altre diverse fonti che saranno presenti all'interno del sedime aeroportuale: mezzi di supporto a terra (GSE – "Ground Support Equipment"), centrali termiche, depositi di carburante, veicoli logistici pesanti, veicoli fruitori delle aree di parcheggio.

Per quanto riguarda le quattro fasi che caratterizzano i cicli di atterraggio/decollo degli aeromobili, il decollo apporta i contributi prevalenti alle emissioni di ossidi di azoto (67%) e polveri (87%) mentre l'attesa (fasi a terra dell'aeromobile) produce i contributi prevalenti di monossido di carbonio (84%) e idrocarburi (82%).

A livello complessivo, le emissioni degli aeromobili incidono (sugli ossidi di azoto presi come riferimento) per circa l'83% in entrambi i periodi considerati; altre sorgenti rilevanti sono le attività di deposito e trasporto del carburante (circa il 10%) e le centrali termiche (5%).

Dalle mappe di isoconcentrazione ottenute non si evince, nel complesso, alcuna criticità, in generale e soprattutto per quanto riguarda le ricadute sull'abitato della città di Pisa.

Durante il periodo invernale l'impatto principale sia per gli ossidi di azoto che per il monossido di carbonio è prodotto dalle emissioni delle centrali termiche, probabilmente a causa sia dell'entità della concentrazione stessa, sia a seguito delle caratteristiche fisiche dei punti di emissione (il modello tende a trattare in modo molto conservativo i camini di piccole dimensioni come queste in esame).

L'unica relativa criticità riscontrabile si registra per le concentrazioni di biossido di azoto, i cui valori massimi orari estivi raggiungono in un punto del dominio circa la metà del valore limite annuale fissato come percentile 99.8.

## BIBLIOGRAFIA

- ARIA Technologies (2012). General design and user's manual – ARIA Impact v1.7. Rapport  
ARIANET-R2002.06 - Studio di impatto sulla locale qualità dell'aria del sistema aeroportuale di Malpensa
- ARPAT (2013). Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria.
- Briggs G. A. (1969): "Plume Rise", U.S. Atomic Energy Commission Critical Review Series, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Report NTIS TID-25075.
- Briggs, G. A. (1974): "Diffusion estimation on small emission", U.S. Atomic Energy Commission Critical, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Rep. USAEC ATDL-106.
- Briggs, G. A. (1975): "Plume rise prediction. Lectures on air pollution pollution and environmental impact analyses", American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 59-111.
- Comune Pisa (2007) Rapporto Annuale sulla Qualità dell'Aria
- Derwent R.G. et Middleton D.R. (1996). An empirical function for the ratio  $\text{NO}_2:\text{NO}_x$ . Clean Air, vol. 26, No. 3/4, p 57.
- Dixon J, Middleton D R and Derwent R G (2000). Using measurements of nitrogen oxides to estimate the emission controls required to meet the UK nitrogen dioxide standard. Presented at Second International Conference on Urban Air Quality, Madrid Spain, March 1999. Published in Environmental Monitoring and Assessment Vol. 65, pp. 3-11
- Doppelheuer, A.,(1997) - "Berechnung der Produkte unvollständiger Verbrennung aus Luftfahrttriebwerken, IB-325-09-97, Inst. Fur Antriebstechnik, Dtsch. Zentrum fur luft- u. Raumfahrt, Koln, Germany.
- Doppelheuer, A. and M. Lecht.(1999) – "Influence of Engine Performance on Emission Characteristics", RTO Meeting Proceedings14 on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels, RTO-MP-14, NATO, Cedex, France, June, 1999.
- Doppelheuer, A. and C. Wahl (2000) – "Determination of Quantities and Properties of Aircraft Engine Generated Soot, Inst. fur Antriebstechnik, Dtsch Zentrum fur Luft- und Raumfahrt.
- EEA (2013) Emission Inventory Guidebook
- EEA (2013) TRENDS IN GLOBAL CO2 EMISSIONS: 2013 Report
- EMEP/CORINAIR (2007). Atmospheric Emission Inventory Guidebook. <http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR5/en/page002.html>
- EPA, 1999. Evaluation of air pollutant emissions from subsonic commercial jet aircraft. EPA420-R-99-013.
- EPA, 1985. Compilation of air pollutant emission factors, volume II: mobile sources, AP-42.
- FAA, 1997. Air quality procedures for civilian airports and air forces bases. FAA-AEE-97-03 AL/EQ-TR-1996-0017.
- Finzi G. e Brusasca G. (1991) - La qualità dell'aria. Modelli previsionali e gestionali - Masson, Milano, pp 346.
- Finzi G., G. Pirovano, M., Volta L. (2001) – Gestione della qualità dell'aria – McGraw-Hill Milano, pp 409.
- Hagen, D.E., M.B. Trueblood, and P.D. Whitefield (1992) - A Field Sampling of Jet Exhaust Aerosols, Particulate Science and Technology, 10:53-63
- Hagen, D.E. and P.D. Whitefield (1996) – "Particulate emissions in the exhaust plume from commercial jet aircraft under cruise conditions, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, D14, August 27, 1996, pgs. 19,551 – 19,557.
- Hagen, D.E., P. Whitefield, J. Paladino, and M. Trueblood (1998) – "Particle sizing and emission indexes for a jet engine exhaust sampled at cruise, Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 10, May 15, 1998, pgs. 1681-1684.
- ICAO (2008) Engine Exhaust Emissions Data Bank, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646- AN/943
- ICAO, 1993. Annex 16 "International standards and recommended practices, Environmental protection", Volume II "Aircraft engine emissions", 2nd ed.
- IPCC (1999) [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2\\_5\\_Aircraft.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_5_Aircraft.pdf)
- Istituto Prometeo (2008). Società Aeroporto Toscano S.p.a. - Aeroporto G. Galilei – Pisa - Valutazione dell'impatto prodotto dal complesso delle attività aeroportuali sulla qualità dell'aria. Campagna di monitoraggio Febbraio 2008.

- Istituto Prometeo (2008). Società Aeroporto Toscano S.p.a. - Aeroporto G. Galilei – Pisa - Valutazione dell'impatto prodotto dal complesso delle attività aeroportuali sulla qualità dell'aria. Campagna di monitoraggio Settembre 2008.
- Odman M.T.(2008) – “Air Quality Impacts from Airport Related Emissions:Atlanta Case Study”
- Pehrson J.R. et al (2005) – “Aircraft Particulate Matter Emissions“ Transportation Research Board 84<sup>th</sup> annual meeting
- Petzold, A. and A. Doppelheuer (1998) – “Reexamination of Black Carbon Mass Emission indexes of a Jet Engine”, Aerosol Science and Technology, 29:355-356, 1998.
- Petzold, A., A. Doppelheuer, C.A. Brock, and F. Schroder (1999) – “In situ observations and model calculations of black carbon emission by aircraft at cruise altitude”, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. D18, September 27, 1999, pgs.22.171 – 22.181.
- Punto Energia (2001). Pressione ambientale di Malpensa 2000 sul territorio circostante.
- Unal A. et al. (2005) – “Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport” , Atmospheric Environment, Vol.39, Issue 32, October 2005, Pages 5787-5798
- U.S. EPA (1986): "Guideline on air quality models (Revised)", Rep. EPA-450/2-78-027R.
- U.S. EPA (1995): AP-42 “A compilation of air pollutants emission factors”. Fifth edition. (available from GPO – Government Printing Office and NTIS).
- Wayson R.L, Fleming G.G., Kim B., Draper J (2003) – “Derivation of A First Order Approximation of Particulate Matter From Aircraft”, 96 th Annual Conference and Exhibition of the Air & Waste Management Association, San Diego , CA , June 22-26, 2003
- Whitfield, P.D., D.E. Hagen, G. Siple, J. Pehrson (2001) – “Estimation of Particulate Emission indexes as a Function of Size for the LTO Cycle for Commercial Jet Engines”, Proceedings of the Air & Waste Management Association Annual Meeting Orlando, Florida, June, 2001.