

# **Stima delle deposizioni al suolo di PCDD/F dovute alle emissioni presenti nell'area industriale di Ospedaletto (Pisa)**

Settore Modellistica previsionale  
Area Vasta Centro

Aprile 2017

REPORT

ARIA 

# **Stima delle deposizioni al suolo di PCDD/F dovute alle emissioni presenti nell'area industriale di Ospedaletto (Pisa)**

a cura di **Franco Giovannini**, Settore Modellistica previsionale

con la collaborazione tecnica di:

**Andrea Lupi**, Settore Modellistica previsionale

**Andrea Villani**, Settore Supporto tecnico del Dipartimento di Pisa

coordinamento e supervisione:

**Antongiulio Barbaro**, Responsabile Settore Modellistica previsionale

Si ringrazia:

- **Consorzio LaMMA**, per la fornitura dei dati meteorologici stimati con il modello ad area limitata WRF
- **Alessandro Nerelli**, proprietario e gestore della stazione “Meteopisa”, per la fornitura dei dati meteorologici osservati
- **Rosanna Battini**, del Settore Comunicazione, Informazione e Documentazione, per il supporto documentale

Aprile 2017

## Indice

1. Introduzione	1
2. Inquadramento geografico e territoriale, dati meteorologici utilizzati	1
3. Predisposizione dei dati meteorologici per l'utilizzo dei modelli di dispersione	2
4. Scenario emissivo attuale simulato	6
5. Metodologia di stima delle concentrazioni e deposizioni di PCDD/F	8
5.1 Caratteristiche delle emissioni di PCDD/F	9
5.1.1 Parametri chimico-fisici richiesti	11
5.2 Distribuzione granulometrica/dimensionale del particolato	11
6. Impostazione delle simulazioni	13
7. Simulazioni effettuate e risultati ottenuti	14
8. Considerazioni sull'interpretazione dei dati provenienti dai campionamenti di terreno nell'area di Ospedaletto	20
8.1 Ipotesi di scenario emissivo passato	20
8.1.1 Fattori di emissione	20
8.1.2 Fattori di attività	21
8.1.3 Scenario emissivo	21
8.2 Evoluzione nel tempo delle concentrazioni di PCDD/F nel terreno	22
9. Confronto con i dati ottenuti dai campionamenti del terreno	23
10. Sintesi conclusiva	25
Bibliografia	26
Appendice A: Calcolo dei valori per il parametro “rcl”	29
Appendice B: Risultati relativi alle concentrazioni in aria di PCDD/F	31
Appendice C: Risultati relativi alle deposizioni cumulate totali al suolo di PCDD/F per lo scenario emissivo attuale	36
Appendice D: Raffronto tra i dati stimati con l'ipotesi di scenario passato e i dati di misura ottenuti nei campionamenti del terreno	42



## Stima delle deposizioni al suolo di PCDD/F dovute alle emissioni presenti nell'area industriale di Ospedaletto (Pisa)

Nel corso del 2016 il Dipartimento ARPAT di Pisa ha chiesto al Settore Modellistica previsionale di effettuare uno studio di dispersione degli inquinanti in atmosfera specificamente indirizzato a valutare l'apporto in termini di deposizioni al suolo di diossine e furani (PCDD/F), attribuibile ad alcune sorgenti presenti nell'area industriale di Ospedaletto (Pisa): lo stabilimento CARLO COLOMBO spa<sup>1</sup>, lo stabilimento ALL.CO spa e l'impianto GEOFOR spa.

Lo studio è finalizzato ad orientare la realizzazione di una campagna mirata di prelievi ambientali *in situ*, tramite la quale ottenere informazioni quanto più circostanziate possibile sullo stato delle matrici ambientali (i terreni circostanti le sorgenti) esposte alle emissioni in questione.

La presente relazione sintetizza le tecniche e le metodiche di simulazione utilizzate nello studio ed i risultati ottenuti.

### 1. Introduzione

In seguito alla richiesta ed alle informazioni fornite dal Dipartimento ARPAT di Pisa, il Settore Modellistica previsionale ha sviluppato una serie di simulazioni modellistiche aventi l'obiettivo di stimare le deposizioni cumulate annue al suolo di PCDD/F attribuibili alle emissioni degli impianti CARLO COLOMBO (produzione di rame e semilavorati, d'ora in poi indicata semplicemente come COLOMBO), ALL.CO (produzione di alluminio) e GEOFOR (termotrattamento di rifiuti solidi urbani).

Per la stima è stata impiegata la catena modellistica<sup>2</sup> costituita dal codice di dispersione AERMOD (versione 15181)<sup>3</sup> e dai pre-processori AERMAP, territoriale (versione 11103), e AERMET meteorologico (versione 15181)<sup>4</sup>. Come in precedenti casi aventi oggetto i microinquinanti organici PCDD/F, per effettuare le simulazioni sono state seguite ed in parte adattate le indicazioni presenti nel documento dell'US-EPA "Human Health Risk Assessment Protocol (HHRAP) for Hazardous Waste Combustion Facilities, Final" [HHRAP 2005], in realtà specifiche per l'impiego del modello dell'US-EPA ISC3ST<sup>5</sup>, il quale dal 2005 non è più incluso tra i "modelli preferiti" dell'U-EPA<sup>6</sup>. Tenuto conto delle incertezze presenti nelle stime, dovute ai numerosi parametri ed informazioni richieste dagli algoritmi di calcolo della deposizione, nel presente studio si è preferito sviluppare anche alcune simulazioni di controllo con il modello ISC3ST.

### 2. Inquadramento geografico e territoriale, dati meteorologici utilizzati

L'area sulla quale sono state effettuate le simulazioni è costituita da una porzione di territorio di 10 km x 10 km, sulla quale è stato inserito un reticolo di recettori con maglia quadrata e passo 100 m (il punto nell'angolo sudovest corrisponde alle coordinate 610550 m est, 4831550 m nord in UTM, WGS48 fuso 32). L'area è rappresentata nella successiva Figura 1 ed è approssimativamente delimitata a nord dal corso dell'Arno ed a sud da quello del Canale Scolmatore. L'area copre la zona industriale di Ospedaletto all'interno della quale sono presenti gli impianti produttivi oggetto dello studio, l'aeroporto "Galileo Galilei" di Pisa San Giusto, la parte meridionale dell'area urbana della città di Pisa, fino a ricomprendere verso est l'abitato di Navacchio (nel territorio del Comune di Cascina).

Il territorio si presenta come sostanzialmente pianeggiante; nella parte meridionale è costituito

1 Questo impianto ha cessato le attività nel corso dell'anno 2016.

2 Inserita nella lista dei "modelli preferiti" dall'US-Environmental Protection Agency (US-EPA) [US-EPA 2005].

3 Per la relativa documentazione ed il download del codice si veda:

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>.

4 Per la relativa documentazione ed il download del codice si veda:

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-related-model-support-programs>.

5 Per la relativa documentazione ed il download del codice si veda:

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models>.

6 ISC3 è invece ora inserito nella lista dei modelli "alternativi".

prevalentemente da suoli agricoli, in quella settentrionale da ambiente urbano e suburbano. Mediante il processore AERMAP sono state individuate le altezze orografiche e di scala per ciascuno dei recettori presenti nel reticolo di calcolo. Questi dati sono stati ottenuti mediante l'impiego del file orografico `srtm_39_04.tif`, derivante dai dati rilevati dalla NASA nel corso della Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), messi a disposizione dall'US-Geological Survey (US-GS)<sup>7</sup>. Inoltre, in seguito ad un apposito sopralluogo effettuato dal personale ARPAT, sono state raccolte informazioni ed effettuate misure delle dimensioni e delle altezze degli edifici in cui sono articolati gli impianti di interesse, di quelli limitrofi e delle stesse sorgenti<sup>8</sup>.

I dati meteorologici impiegati sono quelli rilevati presso la stazione dell'Aeroporto "Galileo Galilei" (identificativo LIRP, di seguito indicata come "Pisa San Giusto"), e presso una stazione privata denominata "Meteopisa"<sup>9</sup>. I codici richiedono inoltre l'utilizzo di dati meteorologici di profilo verticale, generalmente non disponibili; sono quindi stati acquisiti i dati meteorologici di profilo verticale prodotti da LaMMA con il modello meteorologico WRF (con risoluzione orizzontale 3 km) relativi ad un punto di calcolo all'interno dell'area di interesse. Inoltre per controllo sono stati acquisiti i dati pluviometrici della stazione di Pisa Facoltà di Agraria (identificativo TOS01000544) appartenente alla rete gestita dal Settore Idrologico della Regione Toscana<sup>10</sup>.

I dati meteorologici e le simulazioni si riferiscono agli anni 2014 e 2015.

### 3. Predisposizione dei dati meteorologici per l'utilizzo dei modelli di dispersione

I dati meteorologici della stazione di "Pisa San Giusto"<sup>11</sup> corrispondono alle osservazioni aeronautiche METAR<sup>12</sup> effettuate con frequenza di 30', integrate con quelle SYNOP (con frequenza 3 ore); di queste sono stati utilizzati i valori relativi alla direzione di provenienza del vento (espressa in settori prefissati di ampiezza 10°), alla sua intensità (i dati in origine sono espressi in nodi, *knots*), alla temperatura dell'aria (°C), all'umidità relativa (%), alla pressione atmosferica (hPa); inoltre sono stati impiegati i descrittivi delle condizioni meteorologiche per ottenere una stima del grado di copertura nuvolosa.

I dati meteorologici della stazione "Meteopisa" vengono prodotti su intervalli di 5' e corrispondono oltre che a velocità e direzione del vento (espressa come settore prefissato standard di ampiezza 22.5°), temperatura ed umidità relativa, a pressione atmosferica, radiazione globale (W/m<sup>2</sup>) e rateo di precipitazione.

I dati raccolti sono stati analizzati e valutati, quindi sono stati elaborati per ottenere valori di sintesi riferiti al tempo di mediazione orario, che costituisce l'intervallo di riferimento dei modelli di dispersione utilizzati<sup>13</sup>. Questa operazione è particolarmente importante per le grandezze anemometriche, per le quali viene effettuato il calcolo della media vettoriale dei campioni sub-orari (definiti dalla direzione di provenienza e dalla rispettiva velocità come modulo) all'interno di ogni ora; la direzione del vettore medio è stata scelta come la direzione di provenienza del vento da assegnare all'ora, mentre per l'intensità è stata scelta la media aritmetica dei campioni sub-orari di velocità presenti nell'ora.

7 Si veda all'indirizzo: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>.

8 Sopralluogo effettuato in data 5 aprile 2016.

9 La strumentazione è posta su un terrazzo alla sommità di un edificio, a partire da una quota di circa 7 m dal suolo; la strumentazione anemometrica risulta pertanto ad un'altezza di circa 10 m (<http://www.meteopisa.it/>).

10 Dal Dipartimento ARPAT di Pisa sono stati acquisiti anche i dati meteorologici registrati dalla stazione attiva presso l'impianto di GEOFOR; tuttavia questi dati non sono stati utilizzati perché caratterizzati da numerose lacune e soprattutto perché la stazione è posizionata sull'edificio della sezione termica dell'impianto, risultando coperta aerodinamicamente dal prospiciente edificio principale, assai più elevato.

11 I dati sono ottenuti dal sito Wunderground all'indirizzo: <https://www.wunderground.com/history/station/16158>.

12 Per la descrizione del tracciato record METAR si veda: [http://www.meteoam.it/help\\_metar](http://www.meteoam.it/help_metar).

13 Per la riduzione all'intervallo orario e per la predisposizione dei file di input al pre-processore AERMET sono stati sviluppati per l'occasione alcuni specifici software (in ambiente Visual Basic).



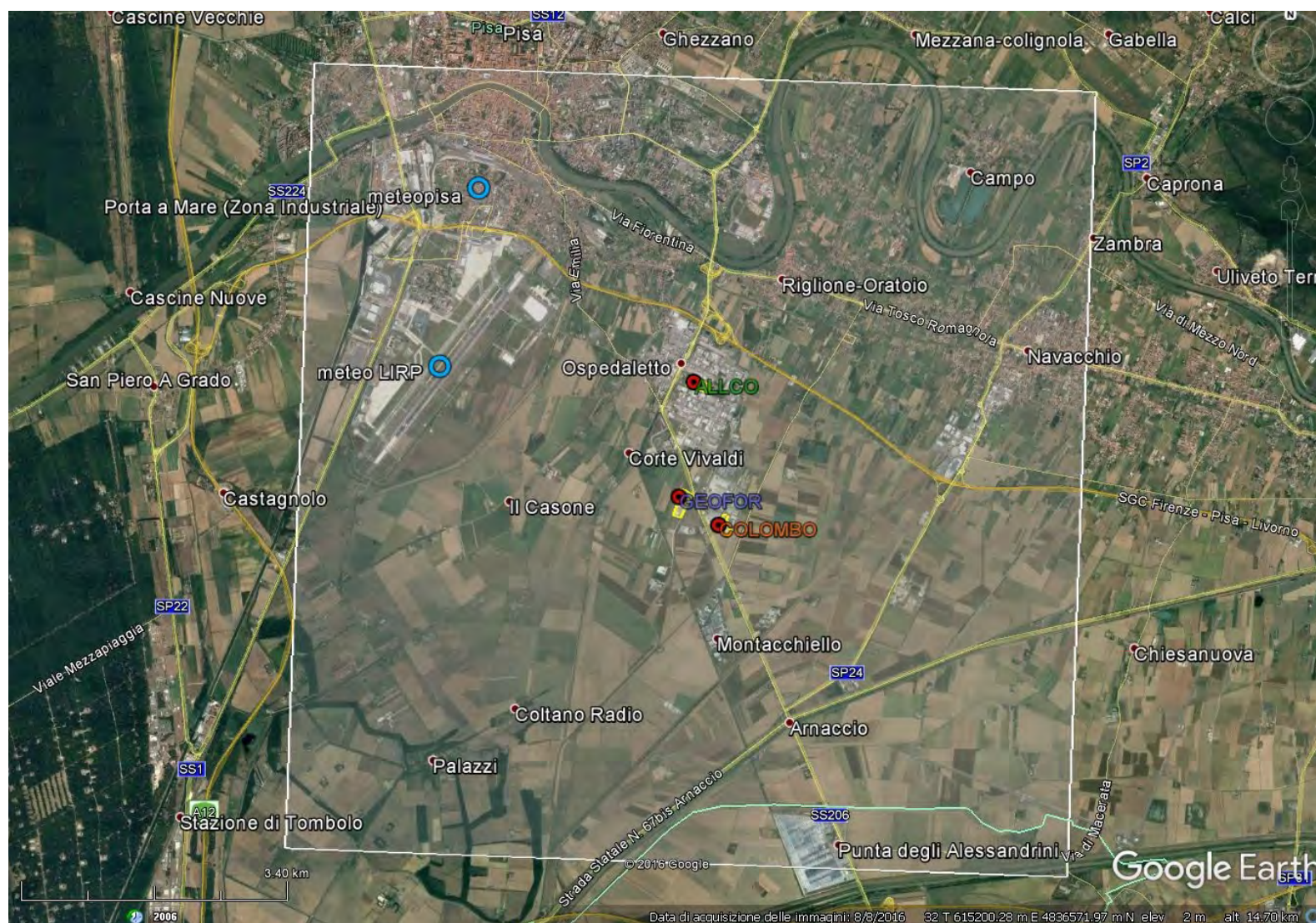


Figura 1: immagine satellitare (Google Earth ©) dell'area interessata dalle simulazioni (riquadro bianco, 10 km x 10 km) al cui interno sono riportate le posizioni degli impianti di interesse (punti rossi) e quelle delle stazioni meteorologiche utilizzate nello studio: “Pisa San Giusto”, indicata come LIRP, e “Meteopisa” (cerchi azzurri).

Tabella 1: dati meteo orari non validi o assenti, dopo l'elaborazione e la riduzione all'intervallo orario.

Dataset	Temperatura	Umidità relativa	Velocità del vento	Direzione del vento	Copertura nuvolosa	Pressione atmosferica	Radiazione globale	Precipitazione
Pisa San Giusto 2014	53	53	125	125	56	53	Non presente	Non presente
Pisa San Giusto 2015	2	2	5	5	39	2	Non presente	Non presente
Meteopisa 2014	0	0	102	102	Non presente	0	0	0
Meteopisa 2015	0	0	35	35	Non presente	0	0	0

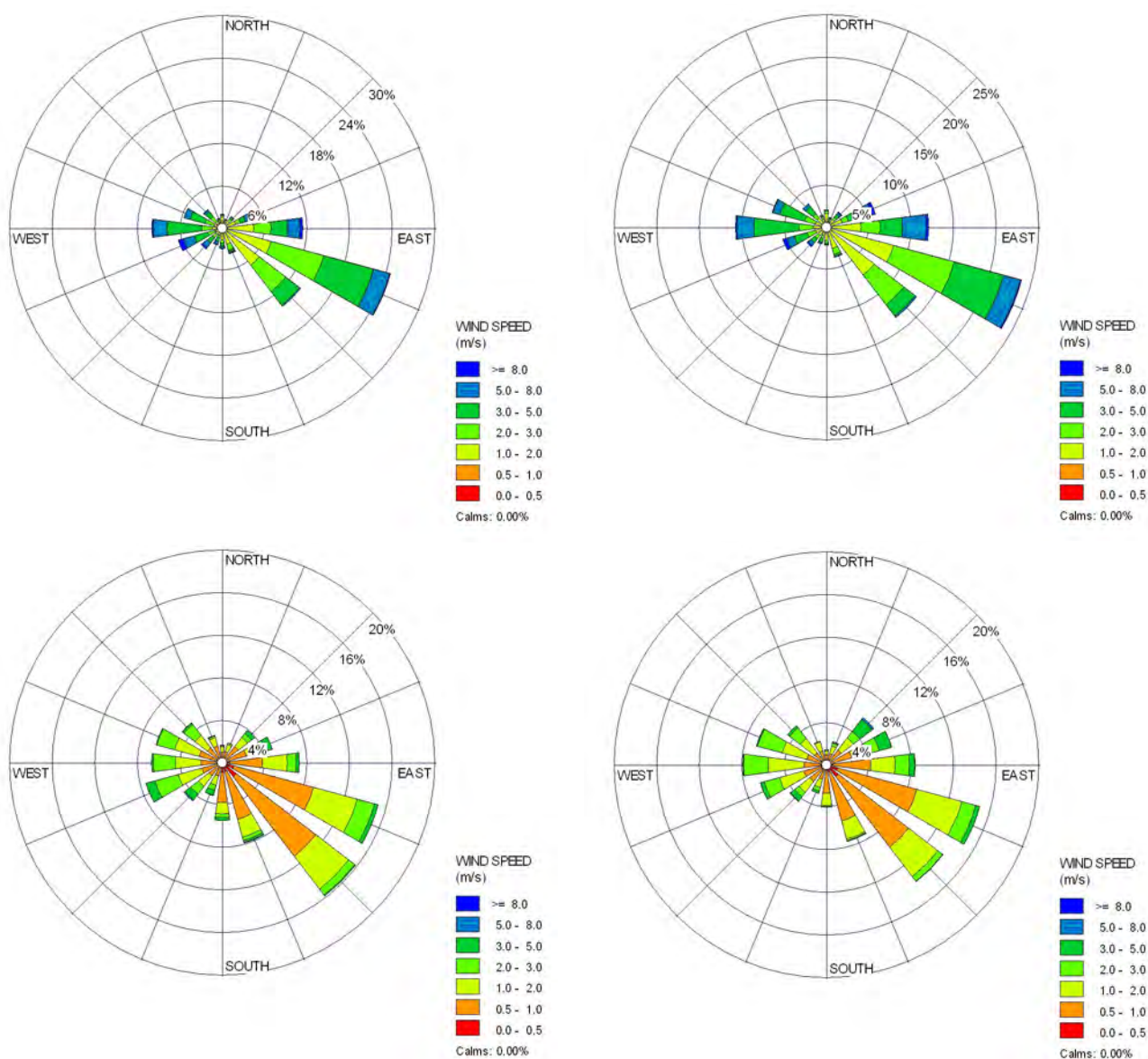


Figura 2: rappresentazione mediante rose dei venti dei dati anemologici: in alto quelli rilevati dalla stazione “Pisa San Giusto” negli anni 2014 (a sinistra) e 2015 (a destra) dopo aver effettuato la sintesi oraria; in basso analoga rappresentazione per quelli rilevati della stazione “Meteopisa” negli stessi anni.



Nella Tabella 1 viene riportato il numero dei dati mancanti o non validi presenti nei diversi *dataset* meteorologici con passo orario, dopo l'elaborazione effettuata; nella Figura 2 sono rappresentate, sotto forma di rose dei venti, le statistiche annuali dei dati anemologici relativi alle due stazioni, sia per l'anno 2014 che per l'anno 2015.

Si può osservare che le lacune nei dati risultano di modesta entità e non incidono in maniera rilevante sulla rappresentatività annuale dei dati stessi.

Le rose dei venti relative alle due stazioni mostrano un notevole accordo indicando una decisa prevalenza dei venti provenienti dai quadranti est-sud-est e sud-est, insieme ad una componente (di minore entità) associata ai quadranti occidentali. Quindi, come atteso in relazione alla vicinanza del mare, l'anemologia è sostanzialmente dominata dalle brezze mare-terra, o ovest-est. Si può osservare anche come, in virtù della differente collocazione delle due stazioni, le intensità della velocità del vento siano decisamente superiori per il sito aeroportuale, assai più libero da ostacoli rispetto a quello suburbano di “Meteopisa”, posto all'interno di un'area edificata.

I valori di precipitazione cumulata annua registrati dalla stazione “Meteopisa” (1207 mm per l'anno 2014 e circa 850.2 mm per l'anno 2015) risultano in buon accordo con quelli rilevati presso la stazione di Pisa Facoltà di Agraria del Settore Idrologico della Regione Toscana (1359.2 mm per il 2014 e 887.6 mm per il 2015): di conseguenza sono stati considerati rappresentativi delle precipitazioni sull'area d'interesse nel periodo di simulazione.

Ricorrendo alle consuete tecniche di trattamento dei dati mancanti<sup>14</sup> (mediazione e/o sostituzione con dati precedenti o posteriori) sono state eliminate dai dati alcune delle lacune presenti.

Per l'impiego del pre-processore AERMET sono stati quindi predisposti i file di input necessari, costituiti da dati superficiali e dati di profilo. In particolare sono stati preparati i seguenti file:

- file dati superficiali “*on site*” con passo orario per l'anno 2014 e per l'anno 2015, con valori di velocità del vento, direzione del vento, copertura nuvolosa, temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione atmosferica, originati da quelli della stazione “Pisa San Giusto”, e precipitazione (cumulata oraria) registrata dalla stazione “Meteopisa”;
- file dati superficiali “*on site*” con passo orario per l'anno 2014 e per l'anno 2015, con valori di velocità del vento, direzione del vento, temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione atmosferica e radiazione globale, precipitazione (cumulata oraria), originati da quelli della stazione “Meteopisa” e copertura nuvolosa derivante da quelli di “Pisa San Giusto”;
- file di profilo verticale “*upper*” in formato FSL Radiosonde database (Forecast Systems Laboratory)<sup>15</sup> con passo orario, per gli anni 2014 e 2015, impiegando i valori di pressione atmosferica, temperatura dell'aria, punto di rugiada (*dew point*)<sup>16</sup>, direzione e velocità del vento, relativi ai livelli alle quote di 20, 40, 60, 80, 100, 130, 180, 262, 400, 610, 923, 1345, 1864, 3105, 4468 m dal suolo, ottenuti dal modello WRF di LaMMA.

A partire da tali file il codice AERMET produce i file superficiali (pi\_sg014.sfc e pi\_sg015.sfc, pi\_mp014.sfc e pi\_mp015.sfc) e quelli di profilo (pi\_sg014.pfl e pi\_sg015.pfl, pi\_mp014.pfl e pi\_mp015.pfl), indicati nel seguito come meteo relativi a “Pisa San Giusto” ed a “Meteopisa”, impiegati direttamente dal codice AERMOD per la stima della dispersione.

L'impiego del pre-processore AERMET richiede la definizione delle principali caratteristiche superficiali associate all'uso del suolo, quali albedo, rapporto di Bowen e rugosità superficiale. I valori di queste grandezze possono essere fatti variare nel corso del tempo (periodo annuale) e/o in relazione alle caratteristiche del suolo intorno al punto di misura. Nel caso specifico la stazione “Pisa San Giusto” corrisponde ad un sito aeroportuale e quindi i valori da assegnare sono esplicitamente definiti in

14 Si veda [US-EPA 2000a] e [US-EPA 2000b]: <https://www.epa.gov/scram/air-modeling-meteorological-guidance>.

15 Si veda in sito internet del NOAA: [https://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/fsl\\_format-new.cgi](https://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/fsl_format-new.cgi).

16 Nei dati originali forniti da LaMMA è presente l'umidità relativa, dalla quale con la temperatura dell'aria viene calcolato il *dew point*.

[AERSURFACE 2008]<sup>17</sup>; per il sito di misura “Meteopisa”, praticamente circondato da edifici residenziali si è optato per i valori in [AERSURFACE 2008] corrispondenti alla categoria di uso del suolo *Low Intensity Residential* senza variazioni spaziali, considerando invece le variazioni periodiche stagionali<sup>18</sup>.

Per l'impiego del codice ISC3ST è stata stimata per ogni ora dell'anno 2014 la classe di stabilità atmosferica<sup>19</sup> (poi inserita nei file meteorologici preparati), utilizzando la velocità del vento (dati relativi a “Pisa San Giusto”), la radiazione globale (“Meteopisa”), presenza di precipitazione (“Meteopisa”), la lunghezza di Monin-Obukhov (ottenuta dai file superficiali prodotti da AERMET) ed utilizzando la lunghezza di rugosità; in questo caso sono richiesti due file di input meteorologico aventi tracciati record leggermente distinti da impiegare nelle simulazioni per gli inquinanti in forma di gas ed in forma di particolato [ISC3 1995a], [ARPAT 2012]. In tali file sono inoltre inseriti i valori ottenuti con AERMET relativi all'altezza di miscelamento e alla velocità d'attrito.

#### 4. Scenario emissivo attuale simulato

Per gli obiettivi dello studio le emissioni attribuite nelle simulazioni alle differenti sorgenti, schematizzate come “puntuali”, sono state scelte cercando di ottenere una rappresentazione realistica o almeno verosimile dei vari contributi. Pertanto sono stati adottati dei valori di flusso di massa e dei parametri dell'emissione corrispondenti sostanzialmente ai flussi di massa misurati nel corso degli autocontrolli e dei controlli effettuati da ARPAT negli ultimi anni.

In Tabella 2 sono riportate le caratteristiche delle emissioni come derivate dagli atti di autorizzazione e dai rapporti di prova dei controlli ed autocontrolli effettuati nell'anno 2014. Si osserva in generale la differenza tra i valori tabellati in autorizzazione ed i valori registrati ai controlli, nonché la variabilità nei dati rilevati in occasione dei controlli dovuta alle normali variazioni nei processi di produzione.

Si segnala in particolare il caso dello stabilimento COLOMBO per il quale in autorizzazione non erano presenti limiti alle emissioni per PCDD/F, mentre in fase di controllo ne sono state registrate concentrazioni e flussi di massa rilevanti e assai superiori a quelli di GEOFOR e ALL.CO.

Per l'impianto GEOFOR le concentrazioni all'emissione ottenute nei controlli riportati in Tabella 2 risultano assai inferiori ai valori limite dell'autorizzazione; tale evidenza è ancora più accentuata per le emissioni dello stabilimento ALL.CO.

Per effettuare le simulazioni occorre fornire al modello di dispersione le caratteristiche fisiche e geometriche dei punti di emissione, i rispettivi ratei di emissione (o flussi di massa) con i relativi periodi di attività<sup>20</sup>. Quelli adottati nello studio sono riportati nella successiva Tabella 3 e corrispondono ai valori dei controlli, ritenuti maggiormente rappresentativi delle condizioni di esercizio rispetto ai valori limite.

Si osserva che per le emissioni E1 ed E2 di GEOFOR, trattandosi di due sezioni di sbocco estremamente ravvicinate in uscita dallo stesso camino fisico, si è scelto di effettuare le simulazioni ipotizzando un'unica sorgente puntuale equivalente. Si può infatti ritenere che le due emissioni ravvicinate si influenzino e quindi producano un effetto di innalzamento dei fumi analogo a quello che si produrrebbe con una singola emissione. La singola sorgente simulata per essere equivalente deve avere caratteristiche fisiche e geometriche che garantiscano un flusso di massa corrispondente alla somma dei flussi di massa delle due singole sorgenti che sostituisce ed una portata volumetrica corrispondente: ciò si ottiene utilizzando un valore del diametro della singola sorgente che conduce alla stessa portata complessiva dei due camini effettivi, assumendo che le velocità di sbocco e le temperature dei fumi siano uguali (ipotesi sostanzialmente confermata dai dati in Tabella 2).

17 In [AERSURFACE 2008] le Tabelle A-1 (albedo), A-2 (Bowen) e A-3 (lunghezza di rugosità superficiale) indicano valori specifici per un sito aeroportuale che rientra nella classe 23 *Commercial/Industrial/Transportation* della classificazione USGS NLCD92 *Land Cover Categories*.

18 In entrambi i casi si è considerata la condizione *wet* tenuto conto della vicinanza dal mare.

19 Si sono impiegate tra l'altro le note relazioni definite da [Golder, 1972].

20 Eventualmente le caratteristiche di emissione come velocità dei fumi, temperatura, rateo emissivo possono essere variate per ciascuna ora dell'anno.

Tabella 2: dati delle emissioni desunti dagli atti di autorizzazione e dai rapporti di prova dell'anno 2014.

Documento	Codice emissione	Portata normalizzata (Nm³/h)	Sezione (m²)	Diametro (m)	Velocità (m/s)	Temperatura (°C)	Altezza (m)	Durata		PCDD/F	
								h/g	g/a	concentrazione (ng I-TEQ/Nm³)	flusso di massa (ng I-TEQ/s) *
COLOMBO											
autorizzazione: D.D.P. Pisa n. 3457/2011	FF1	75000	1.32	1.296	16	140	20	24	280	NP	
autocontrollo 12.9.2014 (RdP 21404457/1)	FF1	53000	1.43	1.349	14.4	96.7	20	/	/	0.574	8.451
controllo 4.6.2014 (RdP 2014-7607/6532-5/6025-6/5685)	E01	48007	1.43	1.349	13	85	20	/	/	nd	
GEOFOR											
autorizzazione: D.D.P. Pisa n. 637/2011	E1/E2	35000	0.785	1.0	17.38	110	40	24	320	0.1	0.972
controllo ARPAT 30.10.2014 (RdP 2014-11220)	E1	31588	0.785	1.0	19.3	127.7	40	/	/	0.017	0.149
controllo ARPAT 18.12.2014 (RdP 2015-194)	E2	30770	0.785	1.0	18.8	122	40	/	/	0.039	0.333
ALL.CO											
autorizzazione: D.D.P. Pisa n. 1055/2012	E00-AF1	80000	2.54	1.8	11.4	165	20	24	220	0.1	2.222
autocontrollo 4.2.2014 (RdP 21500537/1)	E00-AF1	96662	2.54	1.8	nd	nd	nd	/	/	0.0064	0.172
autocontrollo 25.2.2014 (RdP 21400837/1-2)	E00-AF1	91100	2.54	1.8	13.8	96	18 §	/	/	0.0048	0.121

\* valori ottenuti dal prodotto della concentrazione per la portata normalizzata.

NP l'autorizzazione non ha imposto limite a PCDD/F.

nd parametro non determinato o non disponibile.

§ l'altezza del camino riportata nel RdP (18 m) è stata verificata durante apposito sopralluogo (5.4.2016), risultando pari a 20 m.

Per quanto riguarda la durata temporale delle emissioni, si è effettuata la scelta di mantenere attivo il contributo GEOFOR per tutte le ore di ogni giorno dell'anno (8760 ore di emissione), mentre per COLOMBO e ALL.CO si sono impostate emissioni sulle 24 ore del giorno escludendo i giorni di sabato e domenica, le altre giornate festive ed il mese di agosto, ciò per entrambi gli anni oggetto delle simulazioni; in pratica per questi due impianti sono state simulate emissioni per 232 giorni (5568 ore nell'anno).

Tabella 3: caratteristiche fisiche, geometriche e ratei di emissione di PCDD/F adottati nelle simulazioni.

Stabilimento o impianto	Diametro camino (m)	Velocità di uscita fumi (m/s)	Temperatura fumi in uscita (K)	Altezza camino (m)	PCDD/F	
					Concentrazione (ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	Flusso di massa (ng I-TEQ/s)
COLOMBO	1.349	14.4	369.9	20	0.556	8.451
GEOFOR <sup>(21)</sup>	1.414	19.1	398.0	40	0.023	0.483
ALL.CO	1.800	13.8	369.2	20	0.006	0.147

Con queste scelte e impostazioni si osserva che l'emissione oraria attribuita a COLOMBO risulta più di 17 volte superiore a quella di GEOFOR e oltre 57 volte superiore a quella attribuita ad ALL.CO. Questo stesso rapporto si mantiene tra le emissioni complessive annue attribuite a COLOMBO e ALL.CO mentre rispetto a quelle di GEOFOR il totale annuo di COLOMBO risulta 11 volte superiore.

## 5. Metodologia di stima delle concentrazioni e deposizioni di PCDD/F

I composti diossine e furani di interesse ambientale/sanitario sono costituiti da 17 congeneri per i quali sono definiti (secondo varie scale: quella utilizzata per le emissioni è la I-TEQ)<sup>22</sup> i pesi in tossicità equivalente (TEQ) rispetto al congenere ritenuto maggiormente tossico, la 2,3,7,8-TCDD (tetraclorodibenzodiossina).

Ciascuno di questi congeneri ha caratteristiche chimico-fisiche proprie, ed in particolare può trovarsi nei fumi emessi dai camini sia in forma di vapore/gas che in forma particellare, come vera e propria particella o adeso alla superficie del particolato.

In [HHRAP 2005] le stime delle concentrazioni e delle deposizioni di PCDD/F vengono valutate trattando singolarmente ciascuna sostanza, e suddividendola in parte gas e particellare in corrispondenza della propria frazione di vapore a temperatura ambiente (Fv). Ciò poiché i processi ed i fenomeni di dispersione e - soprattutto - di deposizione agiscono in modo differenziato sulle componenti gas o particolato.

In realtà l'azione della deposizione sul particolato può essere considerata indipendente dalle particolari caratteristiche dei congeneri: di conseguenza per questa componente non è necessario effettuare simulazioni specifiche per ciascun congenere. Ciò risulta vero anche per la componente gas qualora i fenomeni di deposizione non dipendano da qualche particolare caratteristica della sostanza; ad esempio quando la velocità di deposizione con la quale viene schematizzato il fenomeno è assunta costante ovvero comune per tutti i congeneri. Questo è il caso suggerito in [HHRAP 2005] in mancanza di informazioni specifiche sulla distribuzione dei congeneri. Con tali posizioni è possibile simulare la dispersione dei PCDD/F operando una singola simulazione per la componente gas e le simulazioni per le componenti di particolato<sup>23</sup>.

Per la componente di PCDD/F sotto forma di particelle, in [HHRAP 2005] viene indicato di suddividere la parte che si può ritenere costituita da particolato vero e proprio da quella dei composti che invece sono assorbiti sulla superficie delle particelle. La componente pura di particolato (di seguito indicata come PM)

21 Parametri di emissione riferiti al singolo camino equivalente.

22 I fattori di tossicità equivalente dei singoli congeneri sono riportati nell'Allegato 1, Titolo III-bis alla Parte Quarta del D.Lgs. 152/2006.

23 Si veda l'appendice della Parte B di [ARPAT, 2012].



viene simulata impostando una distribuzione della massa di PCDD/F corrispondente a quella granulometrica/dimensionale effettiva delle particelle; l'altra componente (di seguito indicata come *particle bound* o PMB) invece dipenderà dalla superficie disponibile e quindi è distribuita rispetto alla superficie del particolato (con l'assunzione semplificatrice che le particelle siano sferiche). Secondo [HHRAP 2005] concorrono a definire la massa di PCDD/F della componente PM i congeneri aventi frazione di vapore inferiore al 5%, mentre gli altri concorrono per la loro parte non vapore alla massa assegnata alla componente di particolato PMB.

Nella successiva Tabella 4 per ciascun congenere d'interesse sono riportati i fattori di peso I-TEQ, le frazioni di vapore assegnate secondo [HHRAP 2005] e la corrispondente attribuzione alle componenti PM o PMB del particolato.

Tabella 4: Congeneri tossici PCDD/F, pesi I-TEQ, frazione di vapore e attribuzione alla componente particolato.

congenere	I-TEQ	Frazione di vapore a temperatura ambiente Fv (HHRAP)	Particolato come:
2,3,7,8-TCDD	1	0.664	PMB
1,2,3,7,8-PCDD	0.5	0.117	PMB
1,2,3,4,7,8-ExCDD	0.1	0.024	PM
1,2,3,6,7,8-ExCDD	0.1	0.029	PM
1,2,3,7,8,9-ExCDD	0.1	0.016	PM
1,2,3,4,6,7,8-EpCDD	0.01	0.003	PM
OCDD	0.001	0.002	PM
2,3,7,8-TCDF	0.1	0.770	PMB
2,3,4,7,8-PCDF	0.5	0.221	PMB
1,2,3,7,8-PCDF	0.05	0.268	PMB
1,2,3,4,7,8-ExCDF	0.1	0.049	PM
1,2,3,6,7,8-ExCDF	0.1	0.052	PMB
1,2,3,7,8,9-ExCDF	0.1	0.090	PMB
2,3,4,6,7,8-ExCDF	0.1	0.055	PMB
1,2,3,4,6,7,8-EpCDF	0.01	0.003	PM
1,2,3,4,7,8,9-EpCDF	0.01	0.057	PMB
OCDF	0.001	0.002	PM

Per poter adottare la metodologia [HHRAP 2005] sopra sintetizzata occorre pertanto disporre di informazioni sulla distribuzione dei congeneri PCDD/F (in genere differente per ciascuna sorgente) e sulla distribuzione granulometrica del particolato (anch'essa in generale distinta per il tipo di sorgente/origine dell'emissione).

### 5.1 Caratteristiche delle emissioni di PCDD/F

Nei rapporti di prova dei controlli al camino sono presenti per tutte le sorgenti d'interesse i dati relativi ai singoli congeneri e quindi le distribuzioni di PCDD/F da adottare. In Tabella 5 sono riportati questi valori in termini di concentrazione assoluta (ovvero non pesata I-TEQ), nonché le rispettive proporzioni complessive da assegnare alle componenti gas, PM e PMB dopo la pesatura I-TEQ; inoltre sono mostrate anche le proporzioni I-TEQ della componente gas dei singoli congeneri.

Nelle simulazioni, o meglio in fase di post-elaborazione dei risultati delle simulazioni, vengono assunte le

proporzioni tra le componenti gas e particolato ottenute da questi campionamenti. Per GEOFOR viene utilizzato il valore medio tra i due disponibili (si veda la successiva Tabella 7).

Per l'utilizzo del codice ISC3ST nelle simulazioni relative alla componente gas, come suggerito in [HHRAP 2005], è possibile impostare una singola velocità di deposizione secca scegliendo quella associata al congenere 2,3,7,8-TCDD, indicata pari a 0.005 cm/s. Per la deposizione umida da [ISC3 1995b] si sono scelti dei valori del coefficiente di rimozione (o *scavenging ratio*) corrispondenti ad un particolato di dimensione molto fine (0.1  $\mu\text{m}$ ), pari a  $0.7 \times 10^{-5} \text{ (s-mm/h)}^{-1}$  per la precipitazione liquida<sup>24</sup>.

Tabella 5: risultati dei campionamenti di PCDD/F al camino nei controlli alle emissioni. Sono riportati i valori assoluti in  $\text{ng/Nm}^3$  (non pesati I-TEQ) per ciascun congenere, la proporzione della componente vapore pesata I-TEQ, nonché i valori complessivi (medie pesate) delle componenti vapore e particolato (scorporata in PM e PMB).

Congenere	COLOMBO 12.9.2014		GEOFOR 30.10.2014		GEOFOR 18.12.2014		ALL.CO 25.2.2014	
	$\text{ng/Nm}^3$	% I-TEQ *	$\text{ng/Nm}^3$	% I-TEQ *	$\text{ng/Nm}^3$	% I-TEQ *	$\text{ng/Nm}^3$	% I-TEQ *
2,3,7,8-TCDD	0.0278	15.5%	0.0007	18.7%	0.0007	7.7%	0.0006	36.6%
1,2,3,7,8-PCDD	0.1750	8.6%	0.0041	9.7%	0.0158	15.3%	0.0015	8.1%
1,2,3,4,7,8-ExCDD	0.0820	0.2%	0.0056	0.5%	0.0177	0.7%	0.0016	0.4%
1,2,3,6,7,8-ExCDD	0.0920	0.2%	0.0190	2.2%	0.0081	0.4%	0.0022	0.6%
1,2,3,7,8,9-ExCDD	0.0600	0.1%	0.0094	0.6%	0.0104	0.3%	0.0016	0.2%
1,2,3,4,6,7,8-EpCDD	0.2050	0.0%	0.1300	0.2%	0.1780	0.1%	0.0071	0.0%
OCDD	0.0626	0.0%	0.2100	0.0%	0.2550	0.0%	0.0072	0.0%
2,3,7,8-TCDF	0.2180	14.1%	0.0056	17.4%	0.0030	3.8%	0.0018	12.7%
2,3,4,7,8-PCDF	0.5690	52.8%	0.0088	39.2%	0.0350	63.9%	0.0034	34.5%
1,2,3,7,8-PCDF	0.3130	3.5%	0.0038	2.1%	0.0120	2.7%	0.0014	1.7%
1,2,3,4,7,8-ExCDF	0.3670	1.5%	0.0074	1.5%	0.0110	0.9%	0.0022	1.0%
1,2,3,6,7,8-ExCDF	0.3530	1.5%	0.0110	2.3%	0.0200	1.7%	0.0027	1.3%
1,2,3,7,8,9-ExCDF	0.0978	0.7%	0.0035	1.3%	0.0014	0.2%	0.0013	1.1%
2,3,4,6,7,8-ExCDF	0.2450	1.1%	0.0190	4.2%	0.0260	2.4%	0.0033	1.7%
1,2,3,4,6,7,8-EpCDF	0.4420	0.0%	0.0380	0.0%	0.0610	0.0%	0.0044	0.0%
1,2,3,4,7,8,9-EpCDF	0.0362	0.0%	0.0096	0.2%	0.0029	0.0%	0.0012	0.1%
OCDF	0.0190	0.0%	0.0130	0.0%	0.0300	0.0%	0.0046	0.0%
Totale I-TEQ ( $\text{ng/Nm}^3$ )	0.5738		0.0170		0.0390		0.0048	
in forma vapore	20.7%		14.3%		15.5%		22.1%	
in forma PM	79.3%		85.7%		84.5%		77.9%	
dei quali PMB (PMB)	85.9% (14.1%)		60.3% (39.7%)		78.1% (21.9%)		77.5% (22.5%)	

\* in forma di vapore.

<sup>24</sup> Per la precipitazione solida (neve o grandine) si sceglie un valore pari ad un terzo di quello assegnato alla precipitazione liquida [ISC3 1995a]; tuttavia questo dato non viene impiegato perché nei file di input meteorologico tutte le precipitazioni sono state considerate liquide, ovvero è stato assegnato loro un codice corrispondente solo a eventi di pioggia.

Questa semplificazione non può essere adottata quando si impiega il codice AERMOD: in questo caso se viene fissata direttamente la velocità di deposizione secca del gas non vengono attivati i meccanismi di rimozione umida [AERMOD 2015] e viene pertanto perduto il contributo *wet* alla deposizione.

Per l'impiego di AERMOD occorre fornire al modello i dati in ingresso necessari a stimare le velocità di deposizione ed i coefficienti di *scavenging* direttamente per ogni ora di simulazione. Questi parametri dipendono dalle particolari sostanze (ovvero dalle loro caratteristiche chimico-fisiche) e dalle particolarità del territorio o del suolo sul quale avviene il fenomeno (ad esempio: interazione con la vegetazione).

- per GEOFOR per i settori 1, 2, 35 e 36 (da intendersi in senso orario a partire da nord) si è scelta la categoria relativa all'edificato urbano senza vegetazione, mentre ai rimanenti 32 settori è stata attribuita la categoria corrispondente alle aree agricole coltivate;

Per quanto attiene a quest'ultimo aspetto, occorre suddividere il territorio in settori di ampiezza 10° in cui definire la particolare categoria di uso del suolo. Dall'esame delle immagini satellitari sono state individuate le seguenti caratteristiche rilevanti<sup>25</sup>:

- per COLOMBO è stata invece assegnata ai primi 33 settori la categoria corrispondente alle aree agricole e nei rimanenti 3 settori quella dell'edificato urbano;
- per ALL.CO si è scelta la categoria delle aree urbane senza vegetazione come predominante, alternata per qualche settore a quella delle aree suburbane con prati.

### 5.1.1 Parametri chimico-fisici richiesti

Per quanto riguarda invece le caratteristiche delle sostanze (i congeneri PCDD/F) che sono inserite nella schematizzazione dei fenomeni, in [AERMOD 2015] vengono richiesti i valori per i seguenti parametri:

- diffusività in acqua dell'inquinante ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $D_w$ ;
- diffusività in aria dell'inquinante ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $D_a$ ;
- costante di Henry ( $\text{Pa m}^3/\text{mol}$ ),  $H$ ;
- resistenza cuticolare<sup>26</sup> ( $\text{s}/\text{cm}$ ),  $\text{rcl}$ .

In [AERMOD 2015] viene indicato che i valori di questi parametri possono essere ottenuti dal documento [ANL 2002]. L'esame dei contenuti di [ANL 2002] ha evidenziato come non siano presenti al suo interno i valori richiesti per tutti i 17 congeneri di interesse.

Per quanto riguarda i parametri di diffusività ( $D_a$  e  $D_w$ ) e la costante di Henry, i valori per tutti i congeneri sono invece presenti nel database associato ad [HHRAP 2005]; in questo tuttavia non sono riportati valori per il parametro "rcl". Si è pertanto scelto di ricalcolare i valori di "rcl" per tutti i congeneri secondo le espressioni riportate in [ANL 2002].

In Appendice A vengono descritti in dettaglio il processo di calcolo, i risultati ottenuti, le incertezze ed incongruenze rilevate e le scelte operate. I valori adottati nelle simulazioni sono quelli riportati nell'ultima colonna della Tabella A1 di Appendice A.

## 5.2 Distribuzione granulometrica/dimensionale del particolato

Tra le informazioni da fornire al codice di dispersione per la stima della deposizione della componente PCDD/F espressa come particolato occorre indicare la distribuzione dimensionale delle particelle.

Impiegando il codice ISC3ST le differenti classi dimensionali sono individuate attraverso il diametro equivalente rappresentativo della classe, calcolato come indicato in [HHRAP 2005]; per ciascuna classe dimensionale viene quindi assegnata la proporzione in massa ad essa corrispondente, la densità, ed il coefficiente di rimozione per le precipitazioni (liquide e solide) i cui valori sono ottenibili sempre da [ISC3 1995b].

Per l'impiego del codice AERMOD sono disponibili due metodi differenti, uno analogo a quello di ISC3ST (*method 1*) per il quale vanno quindi inseriti diametro della classe di particelle, frazione di massa

<sup>25</sup> Sono inoltre state definite le categorie stagionali dei differenti mesi assegnando quelle di default. Si veda [AERMOD 2015]

<sup>26</sup> Il parametro "rcl" è definito come: "the cuticular resistance to uptake by lipids for individual leaves".

a questa attribuibile e densità corrispondente; un secondo metodo, semplificato e consigliato in mancanza di informazioni specifiche, per il quale deve essere fornita la proporzione di massa da assegnare alla frazione fine del particolato (PM<sub>2.5</sub>) ed il diametro medio o rappresentativo di questa frazione fine.

Nel caso presente sono stati impiegati entrambi i metodi: un primo set di simulazioni è stato effettuato applicando il metodo semplificato il quale, definendo una unica classe di particolato, non richiede di sviluppare due differenti simulazioni per la componente PM e per quella PMB delle PCDD/F. Seguendo quanto indicato in [ANL 2002] (appendice B) relativamente ai PCDD/F, si è perciò impostata una proporzione di particolato fine pari al 90% ed un diametro rappresentativo di 0.1 µm (distribuzione in seguito indicata anche come C01).

Per l'applicazione del *method 1* si sono invece ricercate informazioni sulla granulometria del particolato, specifiche per le tre differenti sorgenti.

In Appendix B.2 di [AP-42] sono riportate alcune distribuzioni dimensionali del particolato in emissione suggerite per varie tipologie di impianti in assenza di sistemi di abbattimento (*uncontrolled*) ed i fattori di riduzione da applicare a tali distribuzioni in presenza di impianti di abbattimento.

Per le fonderie di rame, il caso dello stabilimento COLOMBO, si può applicare la distribuzione di “*Category 8 (Melting, Smelting, Refining)*”; l'utilizzo di questa distribuzione tuttavia è escluso esplicitamente per il caso delle fonderie di alluminio, come lo stabilimento ALL.CO. Per tale tipologia di impianti si rimanda al Chapter 12.8 di [AP-42] nel quale sono presenti due differenti distribuzioni dimensionali del particolato emesso, associate alle attività indicate come “*Chlorine Demagging*” e “*Refining*”. Nel presente caso si è scelto di impiegare la distribuzione relativa alla seconda tipologia di attività.

Applicando quindi riduzioni (efficienze dei sistemi di abbattimento) comprese tra lo 0.999 per la classe più grossolana e lo 0.990 per quella più fine, vengono ottenute le distribuzioni in massa del particolato rispetto alle categorie dimensionali riferite ai diametri equivalenti o rappresentativi<sup>27</sup> di 1.57 µm, 6.92 µm e 21.54 µm. Secondo quanto suggerito in [HHRAP 2005], da queste sono state nuovamente calcolate le distribuzioni rispetto alla superficie.

Per l'impianto GEOFOR sono state invece adottate le distribuzioni dimensionali già utilizzate in precedenza per un inceneritore di rifiuti [ARPAT 2012] e derivate da quelle effettivamente misurate all'inceneritore di Bologna [MONITER 2010].

In Tabella 6 sono riportati i diversi dati impiegati e quelli impostati nelle simulazioni.

Tabella 6: distribuzioni dimensionali del particolato adottate nelle simulazioni con AERMOD (*method 1*) e con ISC3ST (in seguito indicate come Caso C02).

Stabilimento o impianto	Classe dimensionale (µm)	Diametro rappresentativo (µm)	% massa (PM)		% superficie (PMB)
			<i>uncontrolled</i>	<i>controlled</i>	
COLOMBO	< 2.5	1.57	82	93.4	97.2
	2.5 ÷ 6	6.92	7	5.7	2.7
	6 ÷ 10		3		
	> 10	21.54	8	0.9	0.1
GEOFOR	< 2.5	1.57		87.0	95.9
	2.5 ÷ 10	6.92		6.0	3.0
	> 10	21.54		7.0	1.1
ALL.CO	< 2.5	1.57	50	84.7	94.6
	2.5 ÷ 6	6.92	3.4	8.5	4.3
	6 ÷ 10		6.6		
	> 10	21.54	40	6.8	1.1

<sup>27</sup> Per il calcolo dei valori dei diametri rappresentativi delle classi dimensionali del particolato si veda [HHRAP 2005].



## 6. Impostazione delle simulazioni

Quanto precedentemente sintetizzato ha permesso di predisporre e di rendere disponibili i dati necessari per effettuare le simulazioni. Queste sono poi state effettivamente implementate tenendo conto dei seguenti ulteriori aspetti.

- Ciascuna sorgente è collocata all'interno di uno stabilimento industriale costituito da una serie di edifici ed ha comunque in prossimità vari edifici e manufatti. Inoltre si deve segnalare che le altezze dei camini di emissione appaiono in generale modeste (si vedano i dati riportati in Tabella 2 e Tabella 3) ed è quindi presumibile che gli edifici posti in prossimità dei camini possano produrre un effetto sul flusso libero del vento (*building downwash*) in grado di influenzare la dispersione degli inquinanti. Per tale motivo, in occasione di uno specifico sopralluogo<sup>28</sup>, sono stati raccolti i dati relativi alle dimensioni di ingombro e di altezza di questi edifici; tali dati, insieme alle coordinate dei vari vertici ottenute attraverso Google Earth ©, sono stati impiegati nei software BPIPPRM (per AERMOD) e BPIP (per ISC3ST)<sup>29</sup> per ottenere le grandezze e dimensioni di scala necessarie agli algoritmi di stima dell'effetto *building downwash* sulla dispersione degli inquinanti. Quindi nelle simulazioni sono stati inseriti i dati necessari per tener conto del fenomeno.
- Per ottenere risultati più coerenti, nelle simulazioni sono stati attivati i meccanismi di rimozione dell'inquinante nel pennacchio dei fumi dovuti agli effetti della deposizione (sia secca che umida).
- Le particolarità e specificità introdotte nei dati relativi alle singole emissioni (caratteristiche di uso del suolo, distribuzioni dimensionali del particolato e dei congeneri PCDD/F), nonché la stessa impostazione suggerita in [HHRAP 2005] (l'impiego di un rateo unitario e la successiva post elaborazione dei risultati), fanno ovviamente propendere per l'esecuzione di simulazioni riferite alle singole sorgenti, anziché effettuare simulazioni con le tre sorgenti insieme. Questa strategia, pur maggiormente onerosa perché richiede nel complesso un maggior numero di simulazioni e *run* dei codici, permette di ottenere direttamente i contributi di ciascuna sorgente alle concentrazioni in aria ambiente ed alle deposizioni al suolo; questi risultati possono essere utilizzati anche in futuro per scopi differenti da quelli del presente studio.
- Osservando le proporzioni dei differenti congeneri nella fase gas come risulta dall'analisi delle emissioni (Tabella 5) si può evidenziare come per tutti gli impianti siano predominanti uno o al più due congeneri rispetto agli altri (in particolare la 2,3,4,7,8-PCDF). Si è ritenuto pertanto plausibile effettuare singole simulazioni relative alla componente gas, anziché ripetere le simulazioni relative a questa componente per tutti i 17 congeneri. Per tale singola e specifica simulazione con AERMOD si assumono dei valori per i parametri chimico-fisici richiesti ( $Da$ ,  $Dw$ ,  $H$  e  $rcl$ ) ponderati tra tutti i congeneri (in base al peso delle singole proporzioni in forma di gas e I-TEQ)<sup>29</sup>. In Tabella 7 sono riportati i valori effettivamente impiegati nelle simulazioni con AERMOD.

Tabella 7: valori dei parametri chimico fisici utilizzati nelle simulazioni per la componente gas.

Stabilimento o impianto	$Da$ ( $cm^2/s$ )	$Dw$ ( $cm^2/s$ )	$rcl$ ( $s/m$ )	$H$ ( $Pa\ m^3/mol$ )
COLOMBO	0.040	0.0000073	6.22	1.09
GEOFOR	0.043	0.0000076	5.40	0.90
ALL.CO	0.060	0.0000069	8.08	1.68

<sup>28</sup> Per BPIPPRM e BPIP Si veda il sito internet US-EPA:

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-related-model-support-programs>.

<sup>29</sup> In alternativa potevano essere utilizzati i valori relativi al congenere predominante nella fase gas (I-TEQ).

Infine in Tabella 8 sono riepilogati i fattori con i quali sono ottenute le stime di PCDD/F in termini di concentrazioni e deposizioni (secche ed umide) a partire dai risultati effettivi delle simulazioni (*run* dei modelli) effettuate con ratei di emissione unitari.

Tabella 8: riepilogo dei ratei di emissione PCDD/F e delle rispettive proporzioni assegnate alle componenti gas e particolato (ripartite nelle componenti PM e PMB).

Stabilimento o impianto	Rateo emissivo (ng I-TEQ/s)	Proporzione gas	Proporzione particolato	
			PM	PMB
COLOMBO	8.451	0.207	0.793	
			0.112	0.681
GEOFOR	0.483	0.151	0.849	
			0.337	0.512
ALL.CO	0.147	0.221	0.779	
			0.175	0.604

## 7. Simulazioni effettuate e risultati ottenuti

Tenuto conto di quanto precedentemente sintetizzato, sono state effettuate le simulazioni della dispersione, con le quali sono state ottenute le stime delle concentrazioni e delle deposizioni di PCDD/F per ciascuna singola sorgente, con le caratteristiche riportate nella Tabella 9. Quelle relative alla distribuzione del particolato indicata come C01 corrispondono in realtà a 2 *run* del modello, uno per la parte gas e l'altro per la componente particolato; quelle relative alla distribuzione del particolato indicata con C02 corrispondono a 3 *run* del modello, uno per la parte gas, uno per la componente particolato PM ed uno per la componente particolato PMB.

Tabella 9: elenco delle simulazioni complete effettuate con le loro caratteristiche.

Modello	Stazione meteo	Anno meteorologico	Distribuzione particolato
AERMOD	Pisa San Giusto	2014	C01
AERMOD	Pisa San Giusto	2014	C02
ISC3ST	Pisa San Giusto	2014	C01
ISC3ST	Pisa San Giusto	2014	C02
AERMOD	Pisa San Giusto	2015	C01
AERMOD	Pisa San Giusto	2015	C02
AERMOD	Meteopisa	2014	C01
AERMOD	Meteopisa	2015	C01
AERMOD	Meteopisa	2014	C02

Pertanto sono state ottenute stime relative a 5 simulazioni con la distribuzione del particolato C01 e 4 con la distribuzione C02, 6 simulazioni relative all'anno meteorologico 2014 e 3 all'anno 2015, 7 simulazioni effettuate con il modello AERMOD e 2 con ISC3ST, 6 simulazioni con riferimento meteo "Pisa San Giusto" e 3 riferite a "Meteopisa".

L'esame dettagliato della mole dei risultati ottenuti esula dagli obiettivi specifici dello studio, in quanto risponde anche allo scopo di testare il sistema modellistico basato sul codice AERMOD e caratterizzarne le peculiarità e le variazioni rispetto al precedente modello ISC3ST. Tuttavia la possibilità di valutare le stime ottenute variando i dati meteorologici di riferimento o di tenere conto delle incertezze legate alla

distribuzione del particolato o ancora della variabilità meteorologica interannuale (seppur limitata a sole due annualità), permette di rendere inusualmente robuste tali stime.

Secondo gli obiettivi dello studio sulla base dei risultati ottenuti sono stati individuati alcuni punti del territorio in prossimità delle sorgenti (in particolare vicini agli impianti COLOMBO e GEOFOR) sui quali effettuare il campionamento dei suoli per valutare la presenza dei microinquinanti PCDD/F. Questi punti (indicati nelle successive figure come p1-p12) rispondono in primo luogo all'esigenza di individuare le aree di massima ricaduta e successivamente di determinare le aree gradualmente meno interessate dal fenomeno, secondo le stime modellistiche disponibili.

Nella successiva Figura 3 vengono mostrati in campo esteso i valori delle deposizioni cumulate annue di PCDD/F totali (ovvero sommando il contributo dei tre impianti) espresse in ng I-TEQ/m<sup>2</sup>, ottenute con la simulazione condotta con il modello AERMOD, i dati meteorologici "Pisa San Giusto" relativi all'anno 2014, e la distribuzione del particolato indicata come C02.

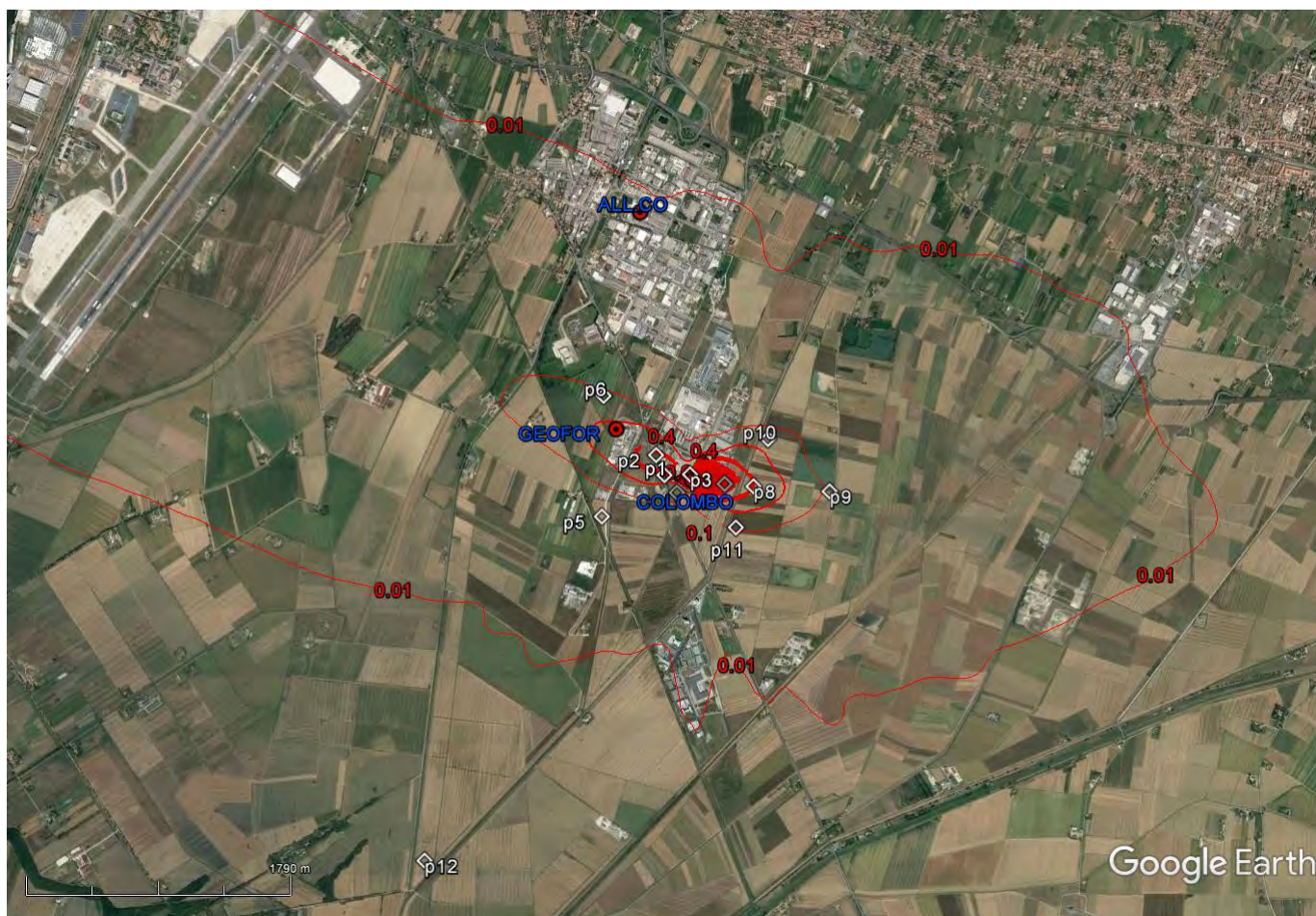


Figura 3: rappresentazione mediante isolivelli delle deposizioni cumulate annue di PCDD/F (ng I-TEQ/m<sup>2</sup>), relative alla simulazione condotta con il modello AERMOD, i dati meteorologici "Pisa San Giusto" relativi all'anno 2014, e la distribuzione del particolato indicata come C02. Sono visibili le posizioni dei punti recettori individuati come possibili punti di prelievo per i campioni di terreno (p1-p12).

In primo luogo si può osservare, sia dalla Figura 3 che dalle successive Figure 4 e 5 di maggior dettaglio, come i valori più elevati delle deposizioni cumulate annue totali siano decisamente addensati nell'area intorno allo stabilimento COLOMBO, e sostanzialmente da attribuirsi alla sua emissione di PCDD/F. Ciò era evidentemente atteso considerato da un lato i flussi di massa (sia orari che annui) attribuiti alle emissioni incluse nello studio (si veda il precedente paragrafo 4), dall'altro le caratteristiche della deposizione che tende ad essere preminente in prossimità della sorgente quando il pennacchio dei fumi è



maggiormente concentrato. Si osserva inoltre come intorno allo stabilimento ALL.CO non siano presenti tracce di deposizione di PCDD/F distinguibili dal contributo dovuto agli altri impianti. Gli isolivelli riportati nella successiva Figura 4 permettono anche di considerare poco significativo il contributo dell'impianto GEOFOR rispetto a quello dello stabilimento COLOMBO.

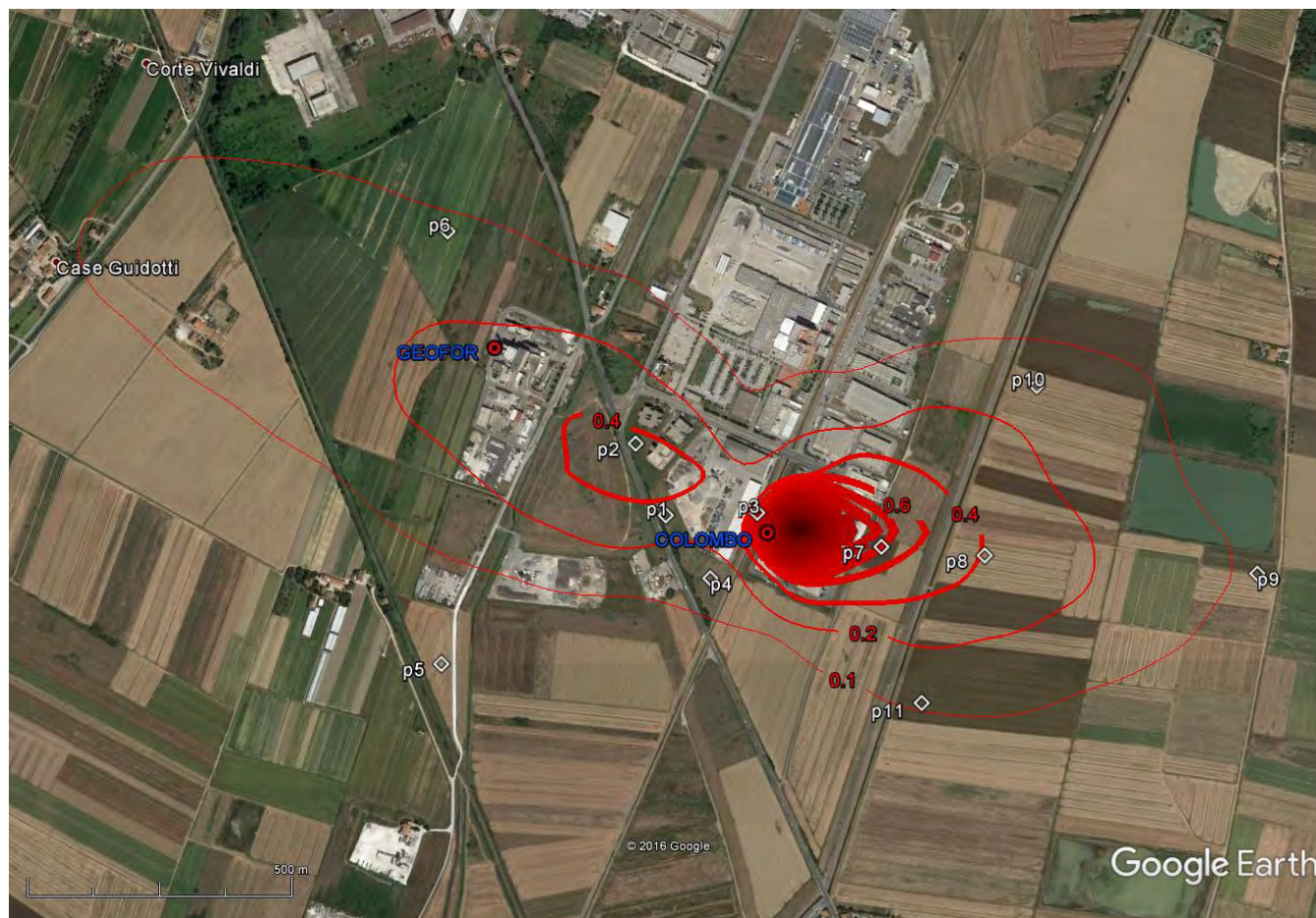


Figura 4: dettaglio della rappresentazione mediante isolivelli delle deposizioni cumulate annue di PCDD/F (ng I-TEQ/m²) relative alla simulazione effettuata con il modello AERMOD, i dati meteorologici “Pisa San Giusto” relativi all'anno 2014, e la distribuzione del particolato indicata come C02. Sono visibili le posizioni dei punti recettori individuati come possibili punti di prelievo per i campioni di terreno (p1-p12).

In termini qualitativi si può ancora osservare che le deposizioni più elevate sono stimate entro il perimetro dello stabilimento COLOMBO: ciò è in gran parte dovuto all'effetto *building downwash*<sup>30</sup>. Infatti, nonostante i venti dai quadranti orientali abbiano una frequenza maggiore e quindi sia plausibile attendersi valori della deposizione più elevati ad ovest dell'emissione, le simulazioni effettuate con AERMOD (Figura 4 e Figura 5 in alto) forniscono valori più elevati proprio ad est del camino. Viceversa si trovano effettivamente a ovest del camino le aree a maggiore deposizione previste con l'impiego del modello ISC3ST (Figura 5 in basso) nel quale la modellizzazione del fenomeno *building downwash* segue schemi e algoritmi differenti<sup>31</sup> da quelli impiegati in AERMOD.

30 Sono state effettuate simulazioni specifiche ipotizzando l'assenza degli edifici e quindi del fenomeno *building downwash*, dai risultati delle quali si evidenzia il picco delle deposizioni posto ad ovest del camino COLOMBO, come sarebbe atteso dalle frequenze delle direzioni del vento.

31 In AERMOD [AERMOD 2004] è infatti inserito lo schema PRIME (Plume Rise Model Enhancements), mentre la versione di ISC3ST impiegata utilizza ancora le precedenti schematizzazioni dell'US-EPA [ISC3 1995b]. Si veda la documentazione disponibile all'indirizzo: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models>.





Figura 5: deposizioni cumulate annue di PCDD/F (ng I-TEQ/m<sup>2</sup>), meteo "Pisa San Giusto" anno 2014. In alto i risultati ottenuti con AERMOD e distribuzione C01, in basso quelli ottenuti con ISC3ST e distribuzione C02.



Occorre comunque osservare che le rappresentazioni grafiche riportate nelle precedenti figure sono in parte un artefatto del programma di calcolo che ricostruisce gli isolivelli di deposizione cumulata annua: nelle aree di massima ricaduta (disegnate con colore più scuro) sono ricompresi pochi punti recettori.

Le precedenti considerazioni possono essere quantificate valutando i contributi alla deposizione cumulata annua totale dovuti alle singole sorgenti (COLOMBO, GEOFOR e ALL.CO) sui punti indicati per il campionamento dei terreni; a titolo esemplificativo nella successiva Tabella 10 sono riportati i valori di deposizione cumulata annua stimati su tali punti con la simulazione che impiega AERMOD, la distribuzione C02, meteo "Pisa San Giusto" dell'anno 2014. Nella Tabella 10 sono riportati i valori minimi e massimi delle stime relative ai punti recettori del reticolo di calcolo posti ad una distanza inferiore a 100 m dal previsto punto di campionamento; ciò permette anche di valutare almeno indirettamente il gradiente spaziale delle stime.

Tabella 10: valori di deposizione cumulata annua di PCDD/F (ng I-TEQ/m<sup>2</sup>) stimati sui punti indicati per il campionamento dei terreni (sono riportati i valori minimo e massimo stimati entro 100 m di distanza dal punto).

Posizioni per il campionamento	COLOMBO		GEOFOR		ALL.CO		Totale	
	minimo	massimo	minimo	massimo	minimo	massimo	minimo	massimo
p1	0.2293	0.5476	0.0048	0.0089	0.0001	0.0002	0.2342	0.5566
p2	0.3507	0.5476	0.0066	0.0094	0.0002	0.0002	0.3575	0.5572
p3	0.2099	4.2476	0.0070	0.0099	0.0001	0.0001	0.2170	4.2577
p4	0.0983	0.1878	0.0044	0.0047	0.0001	0.0001	0.1028	0.1927
p5	0.0361	0.0567	0.0019	0.0025	0.0001	0.0001	0.0381	0.0593
p6	0.0843	0.1225	0.0051	0.0104	0.0002	0.0002	0.0896	0.1331
p7	0.4884	1.3166	0.0050	0.0068	0.0001	0.0001	0.4936	1.3235
p8	0.3069	0.4654	0.0043	0.0057	0.0001	0.0001	0.3113	0.4713
p9	0.0784	0.0997	0.0029	0.0033	0.0001	0.0001	0.0814	0.1030
p10	0.1157	0.1948	0.0066	0.0082	0.0001	0.0002	0.1224	0.2031
p11	0.0705	0.1179	0.0022	0.0030	0.0001	0.0001	0.0728	0.1210
p12	0.0025	0.0027	0.0004	0.0004	0.0001	0.0001	0.0029	0.0032

Come si può notare dalla Tabella 10, il contributo assolutamente predominante è dovuto all'emissione dello stabilimento COLOMBO (dal 92% ad oltre il 99% per i recettori p1-p11) che scende al di sotto del 90% del totale soltanto per il recettore p12, il quale rappresenta una specie di punto di "bianco" essendo molto lontano da tutte le sorgenti<sup>32</sup>. Il contributo GEOFOR risulta in genere assai inferiore al 10% del totale mentre raggiunge il 13% per il recettore p12; il contributo ALL.CO è in genere inferiore all'1% e raggiunge quasi il 2% per il recettore p12.

In mancanza di specifici limiti fissati dalla normativa italiana o europea, per valutare gli impatti sull'ambiente dovuti alle PCDD/F emesse si adottano soglie di riferimento nazionali ed internazionali o di letteratura. Questi sono espressi in termini di soglie di azione definite in genere prendendo in considerazione gli effetti sulla salute umana, le vie di contaminazione e le caratteristiche di bioaccumulo degli inquinanti, ed aventi l'obiettivo di limitare l'assunzione complessiva (dovuta a inalazione, ingestione, assorbimento dermico) nell'arco della vita. L'Organizzazione Mondiale della Sanità [WHO 2000] e l'Unione Europea [EC 1999] hanno individuato una dose giornaliera ritenuta ammissibile (TDI: *tolerable daily intake*) nell'intervallo 1-4 pg TEQ/day kg(BW)<sup>33</sup>.

32 Il punto di campionamento p12 è collocato a circa 3000 m in direzione sudovest dallo stabilimento COLOMBO.

33 Quantità di PCDD/F (espressa in tossicità equivalente) assunta quotidianamente, rispetto al peso corporeo [kg(BW)].

Considerando che la maggior parte di PCDD/F viene assunta per via alimentare e che a queste contribuiscono in modo più significativo le quantità di PCDD/F depositate al suolo, rispetto ad esempio a quelle presenti in atmosfera, l'Agenzia per l'ambiente delle Fiandre (VMM) [Van Lieshout et al. 2001] ha individuato alcune soglie di azione espresse in termini di deposizione al suolo: considerando esposizioni su tempi lunghi (base annua), viene indicato che un TDI pari a 4 pg TEQ/day kg(BW) può essere garantito da un valore soglia di 14 pg TEQ/m<sup>2</sup>day, mentre 3 pg TEQ/day kg(BW) corrispondono a 10 pg TEQ/m<sup>2</sup>day ed 1 pg TEQ/day kg(BW) corrisponde a 3.4 pg TEQ/m<sup>2</sup>day. In mancanza di indicazioni alternative, tali soglie possono rappresentare i livelli di riferimento in base ai quali valutare l'entità delle deposizioni di PCDD/F stimate con le simulazioni effettuate, provvedendo a trasformare i valori cumulati annui in medie giornaliere.

I valori di deposizione cumulata annua di PCDD/F variano per ogni recettore al variare della simulazione effettuata: tuttavia, ad eccezione di pochi punti in prossimità dello stabilimento COLOMBO, si mantengono ampiamente inferiori ai livelli di azione sopra riportati.

Ad esempio, il valore massimo assoluto stimato con la simulazione cui fanno riferimento gli isolivelli di Figura 4 (quella effettuata con AERMOD e la distribuzione C02, meteorologia di "Pisa San Giusto" dell'anno 2014) risulta di circa 4.26 ng I-TEQ/m<sup>2</sup> cumulati in un anno, e corrisponde quindi ad un valore medio giornaliero di 11.7 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day, che risulta inferiore alla soglia di 14 pg TEQ/m<sup>2</sup>day associata ad un TDI di 4 pg TEQ/day kg(BW). Inoltre, il valore massimo assoluto stimato con la simulazione cui fanno riferimento gli isolivelli di Figura 5 (quella effettuata con AERMOD e la distribuzione C01, meteorologia di "Pisa San Giusto" dell'anno 2014) risulta di circa 8.30 ng I-TEQ/m<sup>2</sup> corrispondente ad una media giornaliera di 22.7 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day; il secondo valore più elevato è circa 2.83 ng I-TEQ/m<sup>2</sup> ovvero circa 7.8 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day di media giornaliera; il terzo valore più elevato è circa 1.55 ng I-TEQ/m<sup>2</sup> ovvero 4.2 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day di una media giornaliera.

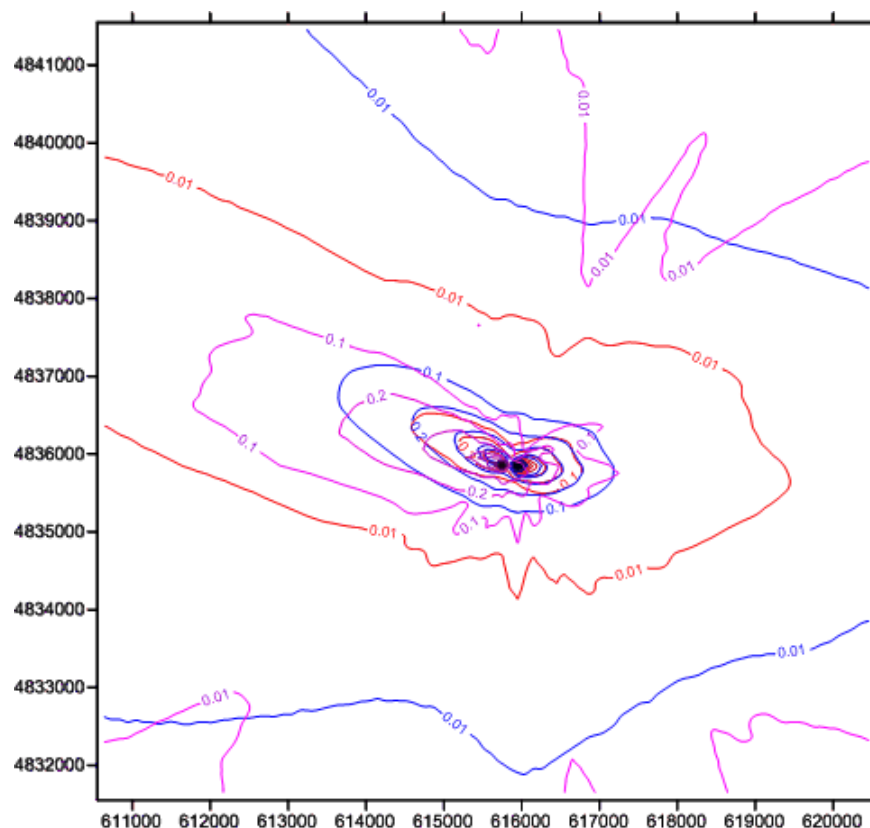


Figura 6: isolivelli delle deposizioni cumulate annue di PCDD/F (ng I-TEQ/m<sup>2</sup>) relativi alle simulazioni effettuate con AERMOD e distribuzione C01 (**blu**), con AERMOD e distribuzione C02 (**rosso**), con ISC3ST e distribuzione C02 (**fucsia**); per tutte la meteorologia è quella relativa a "Pisa San Giusto" dell'anno 2014.

Come è ben visibile dagli isolivelli di deposizione cumulata annua riportati nella Figura 6, le stime riferite al territorio oltre le aree prossime allo stabilimento COLOMBO si mantengono su livelli inferiori a 0.4 ng I-TEQ/m<sup>2</sup> ovvero a valori medi giornalieri inferiori a 1 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day.

Tali osservazioni si mantengono valide anche considerando i valori delle deposizioni cumulate ottenuti con le altre simulazioni effettuate (si vedano i grafici riportati in Appendice C).

Anche per quanto riguarda le stime delle concentrazioni medie annue in aria ambiente, si deve osservare che i valori ottenuti risultano per la quasi totalità dei recettori e delle simulazioni inferiori al “livello di azione” pari a 40 fg I-TEQ/m<sup>3</sup> indicato dall’Istituto Superiore di Sanità [ISS 1988], e pertanto tali da far presupporre l'assenza di situazioni di rischio per l'ambiente; per un maggiore dettaglio si vedano i grafici riportati in Appendice B.

## **8. Considerazioni sull'interpretazione dei dati provenienti dai campionamenti di terreno nell'area di Ospedaletto**

Quanto precedentemente osservato si riferisce ai risultati delle simulazioni relative allo scenario emissivo attuale, o comunque riferibile agli anni 2014-2015. Gli stabilimenti COLOMBO e ALL.CO nonché l'impianto GEOFOR sono presenti sul territorio da molti anni: la loro tecnologia, nonché i loro livelli di emissione (e gli eventuali limiti assegnati) si è evidentemente evoluta/modificata nel corso del tempo. Perciò è presumibile che le emissioni siano state in passato anche molto differenti e assai superiori rispetto a quelle attuali.

Le quantità di PCDD/F emesse da questi impianti nel corso del tempo avranno originato delle deposizioni sulla superficie del terreno e si saranno in parte accumulate nei terreni.

Poiché la finalità del presente studio è quella di orientare la scelta delle posizioni dove effettuare campionamenti per determinare la presenza degli inquinanti (in particolare PCDD/F) nei terreni, l'attribuzione delle responsabilità o dell'origine di quanto ottenuto non può essere effettuata soltanto sulla base dei risultati delle simulazioni precedentemente mostrati, bensì richiede di effettuare una valutazione - ancorché approssimata - degli apporti verificatisi nel corso del tempo.

Un tale percorso può essere effettuato definendo un ipotetico scenario emissivo passato, e tenendo in opportuna considerazione i processi di rimozione degli inquinanti nei terreni [ARPAT 2014]. Per ottenere una valutazione ancora più verosimile e realistica occorrerebbe inoltre ripetere le simulazioni con la meteorologia e soprattutto con le caratteristiche fisiche e geometriche delle emissioni del passato; tuttavia mentre è possibile considerare in qualche modo i primi due aspetti, l'ultimo richiede la conoscenza di informazioni che non sembrano attualmente disponibili.

### **8.1 Ipotesi di scenario emissivo passato**

Secondo le informazioni raccolte dal Dipartimento ARPAT di Pisa, le attività dell'impianto GEOFOR hanno avuto inizio intorno al 1980, quelle dello stabilimento ALL.CO nella prima metà degli anni '80, quelle dello stabilimento COLOMBO<sup>34</sup> agli inizi degli anni '90. Di conseguenza per valutare l'eventuale presenza di PCDD/F nei terreni dovuta alle emissioni del passato occorre ricostruire uno scenario emissivo che risalga agli anni '80.

#### **8.1.1 Fattori di emissione**

Alcuni fattori di emissione di PCDD/F relativi alle fonderie di rame e alluminio sono presenti in [EMEP-EEA 2016] (cap. 2.C.7a e cap. 2.C.3), riferiti ad impianti senza sistema di abbattimento; in particolare per le fonderie di rame è indicato un valore di 50 µg I-TEQ/Mg di prodotto (con intervallo 0.03-800 e fonte [UNEP 2005]), mentre per quelle di alluminio è indicato un valore di 35 µg I-TEQ/Mg (con intervallo 0.5-150 e fonte [UNEP 2005]). Questi fattori di emissione possono essere impiegati per

<sup>34</sup> Lo stabilimento COLOMBO in precedenza era denominato Colata Continua Pisana.



impianti del passato considerati privi di sistemi di abbattimento o con impianti di abbattimento obsoleti o poco efficienti.

Per quanto riguarda l'impianto GEOFOR almeno per il primo periodo di attività la stima delle emissioni può essere effettuata riprendendo i dati impiegati per il vecchio impianto di incenerimento di Falascaia [ARPAT 2012], ovvero ipotizzando una concentrazione di PCDD/F all'emissione pari a 50 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>. In [Viviano e Settimo 2009] sono riportate le seguenti informazioni relative alle emissioni degli inceneritori di RSU:

- anni '80, concentrazioni al camino comprese nell'intervallo 2-60 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>;
- negli anni '90-'91, concentrazioni al camino comprese nell'intervallo 0.04-80 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>;
- viene poi ricordato che nel D.M. 19.11.1997 compare per la prima volta il limite all'emissione di 0.1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>.

Infine nell'inventario delle emissioni di PCDD/F predisposto dalla Commissione Europea [EC 2001] riferendosi agli anni '93-'95 vengono indicati i seguenti fattori di emissione:

- 90 µg I-TEQ/Mg, senza abbattimento;
- 15 µg I-TEQ/Mg, con abbattimento medio;
- 1.5 µg I-TEQ/Mg, con abbattimento elevato.

### 8.1.2 Fattori di attività

Relativamente allo stabilimento COLOMBO nella documentazione presentata in ambito AIA nel 2010 viene riportato che nell'anno 2009 le attività di produzione si sono protratte per soli 170 giorni, anziché i 220 giorni previsti. Nella Scheda C "Capacità produttiva" per l'anno 2009 è indicata una produzione pari a 116000 Mg. Si può quindi stimare una produzione giornaliera di 682.35 Mg. Considerando che la produzione avviene per 24 ore al giorno, si ottiene una produzione oraria di 28.43 Mg/h.

Per l'impianto GEOFOR in [Merico 2013] viene indicata una potenzialità dell'impianto di trattamento dei rifiuti di circa 160-190 Mg/day, corrispondente quindi a 6.7-7.9 Mg/h.

Per lo stabilimento ALL.CO in una relazione annuale AIA sul monitoraggio (riferita all'anno 2013) viene riportata una produzione complessiva annua di circa 46000 Mg. Considerando l'attività su 220 giorni (come riportata nel quadro emissivo) si ottiene una stima di 209.09 Mg/day, da cui considerando l'attività per 24 ore al giorno si ottiene un valore di 8.71 Mg/h.

Pur essendo questi dati riferiti ad un periodo specifico di attività e pertanto relativi ad una certa configurazione impiantistica, considerando gli obiettivi semplicemente indicativi delle valutazioni si è ritenuto di impiegarli ed estenderli all'intera durata delle attività di questi stabilimenti/impianti.

### 8.1.3 Scenario emissivo

Con le precedenti informazioni (e attribuendo se necessario le portate attuali agli impianti del passato), si è pervenuti a definire uno scenario emissivo di PCDD/F relativo al passato per i tre impianti di interesse. I dettagli ed i ratei emissivi ottenuti con gli anni per i quali questi sono stati considerati validi sono riportati nella successiva Tabella 11 e resi in forma grafica nella Figura 7.

In particolare per l'impianto GEOFOR si è optato per suddividere il periodo di attività in 5 sotto-periodi, il primo tra l'anno 1980 ed il 1985 caratterizzato da emissioni di PCDD/F dell'ordine di 50 µg I-TEQ/Nm<sup>3</sup> (ed assumendo una portata di 50000 Nm<sup>3</sup>/h), che conduce quindi ad un rateo di 694 ng I-TEQ/s; nei successivi 3 periodi (dal 1986 al 1990, dal 1991 al 1995 e dal 1996 al 2000) sono stati impiegati i fattori di emissione riportati in [EC 2001], con un fattore di attività intermedio di circa 175 Mg/day; nell'ultimo periodo, a partire dall'anno 2001, si è assunta un'emissione corrispondente a quella impiegata nelle simulazioni effettuate.

Per gli altri due stabilimenti il periodo di attività è stato più semplicemente suddiviso in due sotto-periodi, l'ultimo dei quali con emissioni corrispondenti a quelle utilizzate nelle simulazioni.

Tabella 11: ipotesi di scenario emissivo passato per PCDD/F.

Stabilimento o impianto	Periodo di attività				
	1980-1985	1986-1991	1992-2000		2001-2015
COLOMBO			(50 µg I-TEQ/Mg, 116000 Mg/y in 170 day, 24 h) <b>395 ng I-TEQ/s</b>		<b>8.451 ng I-TEQ/s</b>
	1980-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2015
GEOFOR	(50000 Nm³/h, 50 µg I-TEQ/Nm³) <b>694 ng I-TEQ/s</b>	(90 µg I-TEQ/Mg, 160-190 Mg/day 365 day, 24 h) <b>180 ng I-TEQ/s</b>	(15 µg I-TEQ/Mg, 160-190 Mg/day 365 day, 24 h) <b>30 ng I-TEQ/s</b>	(1.5 µg I-TEQ/Mg, 160-190 Mg/day 365 day, 24 h) <b>3 ng I-TEQ/s</b>	<b>0.483 ng I-TEQ/s</b>
ALL.CO		(35 µg I-TEQ/Mg, 46000 Mg/y in 220 day, 24 h) <b>85 ng I-TEQ/s</b>			<b>0.147 ng I-TEQ/s</b>

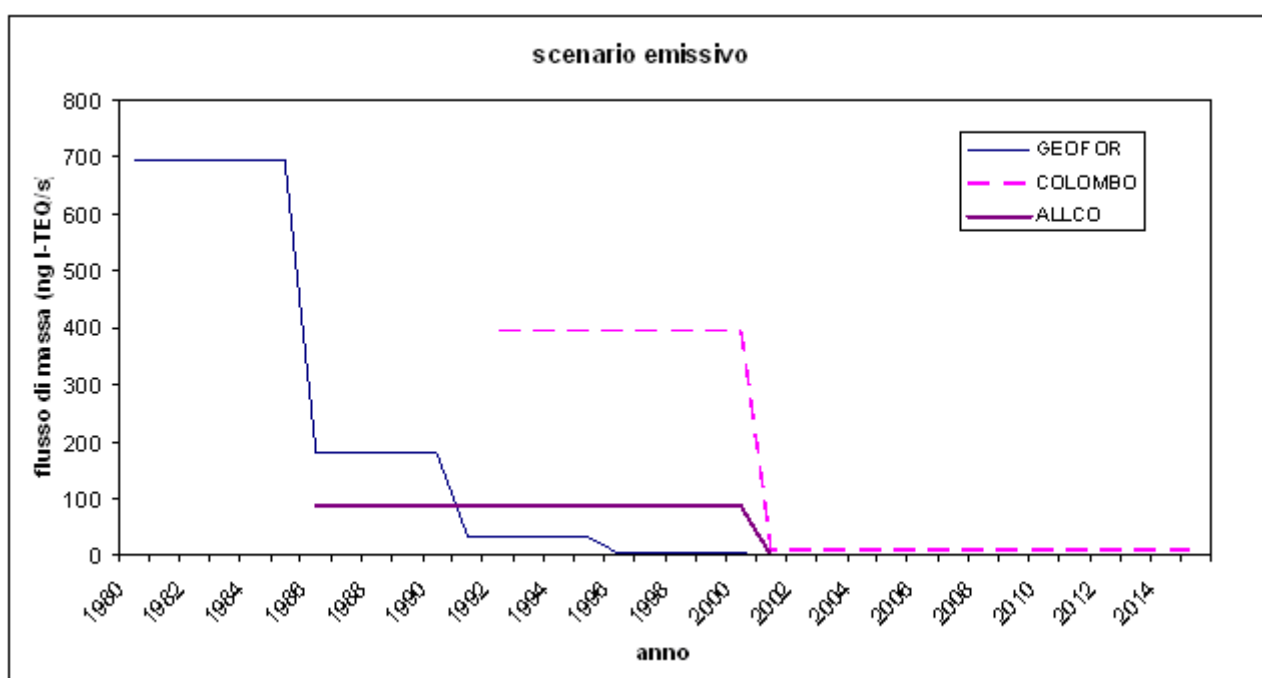


Figura 7: Andamento temporale dei ratei di emissione nell'ipotesi di scenario emissivo passato per i PCDD/F.

Come si può osservare dal grafico di Figura 7, con i fattori di emissione e di attività scelti i ratei emissivi assegnati all'impianto GEOFOR nei primi anni di attività sono per vari ordini di grandezza superiori a quelli attuali sia di GEOFOR che dello stabilimento COLOMBO. Ciò conferma la necessità di provvedere ad una stima dell'evoluzione nel tempo del contenuto di PCDD/F nei terreni per poter comprendere ed interpretare gli eventuali risultati dei campionamenti.

## 8.2 Evoluzione nel tempo delle concentrazioni di PCDD/F nel terreno

Le quantità di PCDD/F depositate al suolo e quindi trasferite nel terreno sottostante sono soggette ad un effetto medio di riduzione della loro concentrazione dovuto a normali fenomeni di rimozione. In [Mackay et al. 2006] per ciascuno dei congeneri tossici che compongono la miscela di PCDD/F vengono riportate varie stime dei tempi di vita (media o emivita) dei composti nei suoli. Più semplicemente in [APAT 2006] viene indicato per PCDD/F un intervallo di emivita (ovvero tempo di dimezzamento della concentrazione) nel terreno compreso tra 9 e 15 anni: tali valori sono stati impiegati nelle successive stime.

Assumendo un semplice modello con un tasso di riduzione/decadimento costante nel tempo ed una variazione proporzionale alla concentrazione, si ottiene un andamento temporale decrescente di tipo esponenziale per la concentrazione nel terreno delle sostanze presenti [ARPAT 2014]. Seguendo quanto sviluppato in [ARPAT 2014], e tenendo quindi in considerazione sia il decadimento di PCDD/F presenti nel suolo che l'apporto dovuto alle nuove deposizioni, si possono valutare le quantità di PCDD/F che rimangono nel terreno al variare del tempo.

A titolo esemplificativo si può vedere che la quantità di inquinante deposta al suolo e quindi nel terreno in un certo anno (ad esempio nel 1980), risulta 36 anni dopo (ovvero nell'anno 2016) ridotta del 94% (nel caso di emivita pari a 9 anni) o dell'81% (nel caso di emivita pari a 15 anni); quindi nel 2016, dopo 36 anni rimane nel terreno il 6% o il 19% di quanto depositato al suolo nel 1980. Si capisce pertanto che se quanto emesso nel 1980 è 100 volte superiore a quanto emesso nel 2016, il contenuto di PCDD/F nei terreni può essere dovuto assai più probabilmente alle emissioni del 1980 rispetto a quanto emesso nel 2016.

Mantenendo inalterate le stime di deposizione cumulata annua riferite all'emissione unitaria (1 ng I-TEQ/s) per le tre sorgenti<sup>35</sup>, utilizzando i ratei di emissione per ciascun anno di attività (secondo quanto mostrato in Figura 7) riportati in Tabella 11 e tenendo conto dell'evoluzione temporale determinata dai tempi di dimezzamento di 9 e 15 anni, sono stati stimati i contenuti di PCDD/F nel terreno corrispondenti ai 12 punti di prelievo proposti. I risultati sono riportati sinteticamente nel paragrafo successivo (in maggiore dettaglio nell'Appendice D).

## 9. Confronto con i dati ottenuti dai campionamenti del terreno

Per poter essere confrontate con i dati ottenuti nei campionamenti, le quantità cumulate di PCDD/F stimate nei terreni durante l'intero periodo temporale delle attività degli impianti secondo lo scenario emissivo ipotizzato (ovvero a partire dall'anno 1980) devono essere riportate in unità opportune, ovvero riferite alla massa complessiva del campione di suolo. Si assume pertanto una densità dell'ordine di 1650 kg/m<sup>3</sup> e si considera che il campione venga effettuato prelevando il terreno fino ad una profondità di 20 cm. Con tali assunzioni e riferendosi alle deposizioni cumulate annue stimate nelle differenti simulazioni effettuate, per ciascun punto di prelievo vengono ottenuti i valori presentati nelle Tabelle D1, D2, D3, D4 in Appendice D.

Per semplicità riunendo i risultati di tutte le simulazioni e considerando i due differenti tempi di emivita precedentemente indicati, nella Figura 8 è mostrato in forma grafica il confronto tra le stime relative allo scenario emissivo ipotizzato e le misure ottenute nei campioni di terreno<sup>36</sup>.

La Figura 8 mostra innanzitutto l'ampia variabilità cui sono soggette alcune delle stime; in particolare quelle relative ai punti di campionamento p1, p3 e p7, cui corrispondono anche i valori più elevati delle stime.

Si possono inoltre effettuare alcune osservazioni qualitative (per le quali è utile riferirsi anche alla Figura 9 che ripresenta l'area d'interesse in dettaglio e le posizioni dei punti di campionamento):

- il valore più elevato ottenuto nei campioni di suolo corrisponde effettivamente al punto in cui sono stimati mediamente contenuti di PCDD/F più alti rispetto a tutti gli altri punti;
- anche le stime relative al punto p1, posto tra lo stabilimento COLOMBO e l'impianto GEOFOR, appaiono essere in accordo con le misure;
- secondo le stime ai punti p2 e p7 dovrebbero corrispondere valori elevati, mentre le misure risultano sotto il livello di rilevanza; un netto disaccordo si ha anche per il punto p9 con un campionamento che produce un valore assai elevato mentre le stime indicherebbero valori ben più modesti;

<sup>35</sup> Ciò corrisponde ad aver considerato gli effetti della dispersione costanti nel tempo, senza modificare le caratteristiche dell'emissione né la meteorologia.

<sup>36</sup> I prelievi dei campioni di terreno sono stati effettuati il 20.10.2016, dopo la realizzazione delle simulazioni (verbale n. 315/20161020-00915-1, PI.01.25.27/364.1).

- le stime assegnano al punto p4 valori modesti ma non così ridotti come i valori sotto la soglia di rilevabilità ottenuti con il campionamento;
- nei punti p5, p6 e p11 si hanno delle sottostime rispetto alle misure, con valori previsti sostanzialmente allineati tra loro (intorno a 0.02-0.4 ng I-TEQ/kg s.s.) così come lo sono le misure (superiori a 0.4 ng I-TEQ/kg s.s.);
- nel punto p10 e nel punto p8 si ottiene un buon accordo tra stime e misure, su valori molto modesti, vicini al limite di rilevabilità, così come appaiono in accordo stime e misure del punto di “bianco” p12, lontano dall'area delle sorgenti.

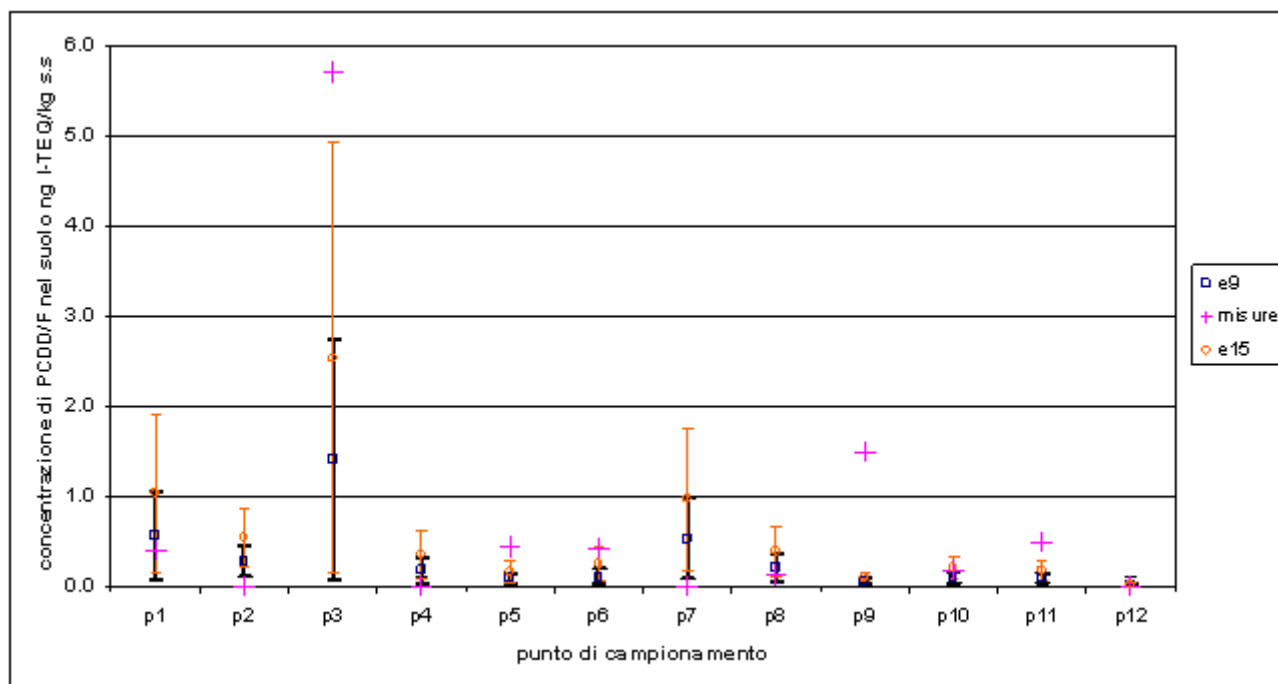


Figura 8: Confronto tra stime modellistiche del contenuto di PCDD/F nei terreni e valori ottenuti dalle misure, nei 12 punti di campionamento. Per le stime si riportano due intervalli di variazione (minimo-massimo) ottenuti considerando i risultati di tutte le simulazioni, distinti in base al tempo di emivita (“e9” 9 anni, “e15” 15 anni).



Figura 9: immagine satellitare (Google Earth ©) di dettaglio dell'area dei punti di prelievo e delle sorgenti.



Occorre evidentemente segnalare che nel lungo periodo di tempo considerato (36 anni) possano essersi succeduti sui terreni interventi di varia natura (ad esempio per effetto delle ordinarie attività agricole), in grado di alterare il contenuto di PCDD/F. Questo tipo di eventi potrebbe essere alla base delle notevoli incongruenze tra stime modellistiche e misure rilevate per i punti di campionamento p2 e p7 (in particolare quest'ultimo punto risulta in area agricola), in quanto tendenti a determinare una riduzione di PCDD/F. Viceversa l'incongruenza segnalata per il punto p9 non si può che interpretare come dovuta a un evento o sorgente (probabilmente localizzata) diversa dalle emissioni considerate nello studio.

Si osserva per concludere che una volta esclusi questi casi (p2, p7 e p9), i rimanenti punti di campionamento mostrano un accordo accettabile tra stime modellistiche e determinazioni analitiche, tenuto conto del carattere preminentemente indicativo/qualitativo dello scenario emissivo passato ipotizzato e delle approssimazioni effettuate nelle stime. Le differenze osservate su questi punti sembrano anche indicare in modo sufficientemente univoco che lo scenario emissivo ipotizzato possa essere stato leggermente ottimistico rispetto alla realtà.

## 10. Sintesi conclusiva

Il presente studio ha descritto le tecniche ed i dati impiegati per sviluppare le simulazioni della dispersione di PCDD/F emesse da due stabilimenti ed un impianto attivi nell'area industriale di Ospedaletto, richieste per individuare le aree più appropriate nelle quali effettuare i campionamenti del terreno e le conseguenti determinazioni analitiche.

Per effettuare le stime sono stati impiegati due codici di calcolo accreditati da US-EPA (AERMOD e ISC3ST), i dati emissivi caratteristici delle sorgenti di interesse (COLOMBO, GEOFOR, ALL.CO), i dati meteorologici locali rilevati o stimati nel 2014 e nel 2015.

In base ai risultati ottenuti è stato possibile:

- definire le aree soggette alle più elevate deposizioni associate alle emissioni recenti (2014) degli impianti e stabilimenti considerati; queste corrispondono sostanzialmente alle zone più prossime all'area occupata dallo stabilimento COLOMBO;
- con i risultati ottenuti ed ipotizzando uno scenario emissivo riferito al passato (a partire dal 1980) sono stati definiti degli intervalli di valori attesi per le concentrazioni di PCDD/F in 12 punti individuati sul territorio in cui effettuare il campionamento del terreno; il confronto con i dati effettivamente misurati ha indicato un livello di accordo accettabile, tenuto conto delle incertezze presenti nelle stime indicative ottenute dall'applicazione modellistica;
- ciò avvalorava ancor più i risultati relativi alla deposizioni cumulate annue al suolo ed alle concentrazioni medie annue in aria ambiente di PCDD/F stimate con le simulazioni sul territorio di interesse; tali stime hanno evidenziato, nelle condizioni emissive attuali, l'assenza di livelli di impatto significativi;
- l'esame dei risultati ottenuti con le differenti simulazioni effettuate variando il codice calcolo, la meteorologia e alcune caratteristiche delle emissioni (in particolare la distribuzione del particolato) hanno permesso di evidenziare le variabilità delle stime associate a tali fattori.

## Bibliografia

[AERMOD 2004] “AERMOD: Description of Model Formulation”, EPA-454/R-03-004, US-EPA, 2004.  
[https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf)

[AERMOD 2015] “Addendum - User's guide for the AMS/EPA regulatory model – AERMOD”, US-EPA, 2015.  
[https://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion\\_prefrec.htm#aermod](https://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#aermod)

[AERSURFACE 2008] “AERSURFACE User's Guide”, US-EPA 2008.  
<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-related-model-support-programs>

[ANL 2002] “Deposition Parameterizations for the Industrial Source Complex (ISC3) Model”, M.L. Wesely, P.V. Doskey, and J.D. Shannon, Environmental Research Division, Argonne National Laboratory, ANL/ER/TR-01/003, 2002.  
<https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/driscdep.zip>

[AP-42] “AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources”, US-EPA.  
<https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors>

[APAT 2006] “Diossine Furani e PCB”, APAT, 2006.  
<http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/quaderni/laboratorio/diossine-furani-e-pcb>

[ARPAT 2012] “Stima della dispersione delle sostanze inquinanti emesse in atmosfera da parte dell'impianto di termodistruzione dei rifiuti solidi urbani in località Falascaia, Pietrasanta (LU)”, ARPAT, 2012.  
<http://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2012/244-12/244-12-studio-arpat-sulimpianto-di-falascaia>

[ARPAT 2014] “Impianto di termotrattamento dei rifiuti attivo a Falascaia tra il 1974 e il 1988: stima del contenuto di PCDD/F nei suoli”, ARPAT, 2014.  
<http://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2014/127-14/127-14-un-approfondimento-comparativo-degli-studi-arp-at-su-falascaia-lucca>

[DEP\_AERMOD 2004] “AERMOD Deposition Algorithms – Science Document (Revised Draft)”, US-EPA, 2004.  
[https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/aer\\_scid.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/aer_scid.pdf)

[EC 1999] “Compilation of EU Dioxin Exposure and Health Data – Summary Report”, European Commission DG Environment and UK Department of the Environment Transports and the Regions, AEAT/EEQC/0016, 1999.  
<http://ec.europa.eu/environment/archives/dioxin/download.htm>

[EC 2001] “European Dioxin Inventory – Results 090201 Incineration of domestic or municipal wastes”, European Commission, 2001.  
<http://ec.europa.eu/environment/archives/dioxin/download.htm#stage2>

[EMEP-EEA 2016] “EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook – 2016”, European Environment Agency, 2016.  
<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>

[Golder 1972] “Relations among stability parameters in the surface layer”, D. Golder, Boundary Layer Meteorology, 3, 1972, pag. 47-58.  
<http://link.springer.com/article/10.1007/BF00769106>

**[HHRAP 2005]** “Human Health Risk Assessment Protocol (HHRAP) for Hazardous Waste Combustion Facilities”, EPA-530-R-05-006, US-EPA, 2005.

<https://www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-RCRA-1998-0022-0063>

**[ISC3 1995a]** “User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume I - User Instructions”, EPA-454/B-95-003a, US-EPA, 1995 (e Addendum 2000).

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models>

**[ISC3 1995b]** “User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II - Description of Model Algorithms”, EPA-454/B-95-003b, US-EPA, 1995 (e Addendum 1999).

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models>

**[ISS 1988]** “Orientamenti per la definizione di livelli d'azione ambientali per policlorodibenzodiossine (PCDD) e policlorodibenzofurani (PCDF)”, A. Di Domenico, ISTISAN 88/3, Roma, 1988.

<http://www.iss.it/publ/?lang=1>

**[Mackay et al. 2006]** “Handbook of Physics-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemical” second edition, D. Mackay, W.Y. Shiu, K.C. Ma, S.C. Lee, CRC Edition, 2006.

<https://www.crcpress.com/Handbook-of-Physical-Chemical-Properties-and-Environmental-Fate-for-Organic/Mackay-Shiu-Ma-Lee/p/book/9781566706872>

**[Merico 2013]** “Il recupero energetico derivante dalla raccolta dei rifiuti urbani: la termovalorizzazione e il compostaggio anaerobico”, G. Merico, presentato a “Green City Energy” Pisa IV Edizione, 4-5 luglio 2013, Pisa.

<http://greencityenergy.it/pisa/files/5-Giuseppe-Merico.pdf>

**[MONITER 2010]** “Caratterizzazione del materiale particolato emesso dagli inceneritori - Il caso del Frullo”, V. Biancolini, Relazione conclusiva LP1 Monitor, ARPA Emilia-Romagna, 2010.

[https://www.arpae.it/pubblicazioni/moniter/generale\\_1526.asp](https://www.arpae.it/pubblicazioni/moniter/generale_1526.asp)

**[UNEP 2005]** “Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases. Edition 2.1”, UNEP Chemical, Geneva, Switzerland, 2005.

[www.pops.int/documents/guidance/toolkit/ver2\\_1/toolkit-2005\\_2-1\\_en.pdf](http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/ver2_1/toolkit-2005_2-1_en.pdf)

**[US-EPA 2000a]** “Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications”, EPA-454/R-99-005, US-EPA, 2000.

<https://www.epa.gov/scram/air-modeling-meteorological-guidance>

**[US-EPA 2000b]** “Missing Data Procedures for Substituting Values for Missing NWS Meteorological Data for Use in Regulatory Air Quality Models”, US-EPA, 2000.

<https://www.epa.gov/scram/air-modeling-meteorological-guidance>

**[US-EPA 2005]** “Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) - Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule”, 40 CFR Part 51, Federal Register, Vol. 70, No. 216, US-EPA, 2005.

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>

**[Van Lieshout et al. 2001]** “Deposition of dioxins in Flanders (Belgium) and a proposition for guide values”, L. Van Lieshout, M. Desmedt et al., Atmospheric Environment 35 suppl. n° 1, 2001, pag. s83-s90.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231001000942>

**[Viviano e Settimo 2009]** “Incenerimento di rifiuti sanitari: la situazione italiana”, G. Viviano e G. Settimo, III Conferenza Naz.le sulla gestione dei rifiuti sanitari, “Ecomondo”, Rimini, 29 ottobre 2009.

[http://newweb.riminifiera.it/upload\\_ist/allegatiprogrammaeventi/giuseppe\\_viviano\\_gaetano\\_settimo\\_1587899.pdf](http://newweb.riminifiera.it/upload_ist/allegatiprogrammaeventi/giuseppe_viviano_gaetano_settimo_1587899.pdf)

**[WHO 2000]** “Air Quality Guidelines for Europe, second edition”, WHO Regional Office for Europe, WHO Regional Publications European series, n. 91, Copenhagen, 2000.

<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/air-quality-guidelines-for-europe>



## Appendice A: Calcolo dei valori per il parametro “rcl”

Per effettuare la stima delle deposizioni di un inquinante gassoso mediante AERMOD viene richiesto di fornire al modello i valori dei seguenti parametri chimico-fisici:

- diffusività in aria dell'inquinante ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $D_a$ ;
- diffusività in acqua dell'inquinante ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $D_w$ ;
- costante di Henry ( $\text{Pa m}^3/\text{mol}$ ),  $H$ ;
- resistenza cuticolare<sup>37</sup> ( $\text{s/cm}$ ),  $r_{cl}$ .

Secondo [AERMOD, 2015] tali valori sono riportati nell'Appendice D del documento [ANL 2002]. L'esame dei contenuti di [ANL 2002] ha evidenziato come non siano presenti al suo interno i valori richiesti per tutti i 17 congeneri PCDD/F di interesse.

Per quanto riguarda i parametri di diffusività ( $D_a$  e  $D_w$ ) e la costante di Henry, i valori per tutti i congeneri sono invece presenti nel database associato ad [HHRAP 2005]. In questo tuttavia non sono riportati valori per il parametro “rcl”; si è pertanto deciso di ricalcolare i valori di “rcl” per tutti i congeneri secondo l'espressione seguente (ottenibile con qualche sostituzione nelle formule riportate in [ANL 2002]):

$$r_{cl} = \frac{H}{RT \cdot (2.5)^2 \cdot \exp \left[ \frac{238}{V_m} (0.973 \cdot \log K_{ow} + 0.045) - 12.48 \right]} \quad (a)$$

nella quale  $R$  è la costante dei gas ( $8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $T$  la temperatura ambiente (assegnata pari a  $298.2 \text{ K}$ ),  $H$  la costante di Henry,  $V_m$  corrisponde al volume molare della sostanza al punto normale di ebollizione (in  $\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ , derivato col metodo di stima di Le Bas),  $K_{ow}$  è il coefficiente di partizione della miscela “octanol-water” (adimensionale) i cui valori sono disponibili per tutti i congeneri d'interesse [HHRAP 2005]. I valori del volume molare  $V_m$  calcolati secondo il metodo di Le Bas sono stati ottenuti da [Mackay et al. 2002].

Da quanto riportato in [ANL 2002], i valori ottenuti utilizzando l'espressione (a) hanno unità di misura  $\text{s/m}$ ; infatti differiscono di circa due ordini di grandezza da quelli presenti nella Tabella D di [ANL 2002] espressi in  $\text{s/cm}$  (per i congeneri per i quali sono disponibili).

Nella colonna 9 della successiva Tabella A1 sono riportati i valori “rcl” presenti in [ANL 2002] ed in colonna 10 i valori calcolati con l'espressione (a) impiegando i valori dei parametri presenti in [ANL 2002] stesso. In colonna 11 sono calcolati i valori “rcl” per tutti i congeneri con l'espressione (a) utilizzando tutti i dati raccolti (in [HHRAP 2005] e [Mackay et al. 2006]), i quali sono quindi riportati in unità  $\text{s/cm}$  in colonna 12. Si può osservare che è per la 2,3,7,8-TCDD che si hanno le differenze maggiori tra i valori calcolati e quelli riportati in [ANL 2002].

Si osserva che la documentazione di AERMOD presenta scarsa chiarezza sulle unità di misura e quindi sui valori da attribuire al parametro “rcl”. Infatti in [AERMOD 2015]<sup>38</sup> è dichiarato che “rcl” deve essere riportato in  $\text{s/cm}$ , mentre in [DEP\_AERMOD 2004]<sup>39</sup> viene indicato di impiegare per “rcl” un valore espresso in  $\text{s/m}$ , facendo comunque riferimento a quelli di [ANL 2002].

Dopo aver effettuato queste verifiche si è scelto di adottare per il parametro “rcl” i valori riportati nell'ultima colonna della Tabella 6 (espressi quindi in  $\text{s/cm}$ ).

37 Il parametro “rcl” è così definito: “is the cuticular resistance to uptake by lipids for individual leaves”.

38 Si veda a pag. 37 in [AERMOD 2015].

39 Si veda quanto riportato a pag. 9 in [DEP\_AERMOD 2004].

Tabella A1: verifiche e calcoli per determinare i valori “rcl” per tutti i congeneri PCDD/F di interesse.

Congenere	Cas n.	H		log K <sub>ow</sub>		V <sub>m</sub>		rcl			
		Pa m³/mol				m³/mol		s/cm	s/m	s/m	s/cm
		ANL	HHRAP	ANL	HHRAP	ANL	[Mackay et al. 2006]	ANL (valori in Tabella D)	Verifica ANL, calcolo con (a)	HHRAP, calcolo con (a)	
Diossine											
2,3,7,8-TCDD	1746-01-6	3.34	3.344	6.8	6.8	267.8	260.6	7.84	0.1522	0.1294	12.94
1,2,3,7,8-PCDD	40321-76-4		0.263		6.64		281.2			0.0182	1.82
1,2,3,4,7,8-HexCDD	39227-28-6	0.451	1.115	7.8	7.8	309.6		1.2	0.0216	0.0535*	5.35
1,2,3,6,7,8-HexCDD	57653-85-7		1.115		7.3		302.4			0.0682	6.82
1,2,3,7,8,9-HexCDD	19408-74-3		1.115		7.3		301.4			0.0669	6.69
1,2,3,4,6,7,8-HepCDD	35822-46-9	0.133	1.216	8	8	330.5	323.3	0.597	0.0080	0.0648	6.48
OCDD	3268-87-9	0.684	0.689	8.2	8.2	351.4		4.94	0.0507	0.0510*	5.10
Furani											
2,3,7,8-TCDF	51207-31-9	1.46	1.419	6.1	6.1	260.3	260.3	9.67	0.1045	0.1016	10.16
1,2,3,7,8-PCDF	57117-41-6		0.507		6.79		281.2			0.0309	3.09
2,3,4,7,8-PCDF	51207-31-4	0.505	0.507	6.5	6.5	281.2	281.2	3.99	0.0391	0.0392	3.92
1,2,3,4,7,8-HexCDF	70658-26-9	1.45	1.419	7	7	302.1	302.1	11.1	0.1110	0.1086	10.86
1,2,3,6,7,8-HexCDF	57117-44-9	0.741	0.740		7		302.1			0.0566	5.66
1,2,3,7,8,9-HexCDF	72918-21-9		1.115		7		302.1			0.0853	8.53
2,3,4,6,7,8-HexCDF	60851-34-5		1.115		7		302.1			0.0853	8.53
1,2,3,4,6,7,8-HepCDF	67462-39-4	1.43	1.419	7.4	7.4	323	323	12.7	0.1165	0.1156	11.56
1,2,3,4,7,8,9-HepCDF	55673-89-7		1.419		7.4		323			0.1156	11.56
OCDF	39001-02-0	0.191	0.193	8	8	343.9	343.9	1.42	0.0144	0.0145	1.45

\* calcolati con i valori V<sub>m</sub> riportati in [ANL 2002].

## Appendice B: Risultati relativi alle concentrazioni in aria di PCDD/F

Nelle successive figure sono riportati e confrontati i valori delle concentrazioni in aria ambiente di PCDD/F ottenuti in ciascun punto recettore con le diverse simulazioni effettuate.

In tutti i grafici (escluso l'ultimo) i valori sull'asse delle ascisse si riferiscono alle concentrazioni medie annue di PCDD/F stimate nella simulazione effettuata con il modello AERMOD, la meteorologia “Pisa San Giusto” dell'anno 2014 e la distribuzione del particolato indicata come C02, assunta come riferimento; sull'asse delle ordinate sono di volta in volta riportati i valori ottenuti con le altre simulazioni. L'ultimo grafico (Figura B9) propone il confronto tra i risultati ottenuti con il modello ISC3ST al variare della distribuzione del particolato. Le concentrazioni sono espresse in fg I-TEQ/m<sup>3</sup>.

L'esame dei grafici porta tra l'altro ad effettuare le seguenti osservazioni sintetiche:

- cambiando la distribuzione del particolato (tra C02 e C01) non si osservano variazioni significative nelle concentrazioni in aria ambiente (con l'impiego di AERMOD si arriva a variazioni dell'ordine del 10%, con ISC3ST inferiori al 2%);
- anche modificando l'anno cui è riferita la meteorologia si ottengono comunque variazioni nelle concentrazioni piuttosto modeste;
- il cambiamento nella stazione meteo di riferimento passando da “Pisa San Giusto” a “Meteopisa” comporta differenze più rilevanti, con il secondo set di dati meteorologici che produce concentrazioni inferiori, per molti recettori anche dimezzate;
- differenze rilevanti si osservano variando il modello utilizzato, cioè passando da AERMOD ad ISC3ST; tuttavia queste differenze non sono univoche, ovvero risultano positive o negative a seconda del recettore;
- in ogni caso si osserva che per un solo recettore le stime delle concentrazioni medie annue risultano superiori al “livello di azione” pari a 40 fg I-TEQ/m<sup>3</sup> [ISS 1988].

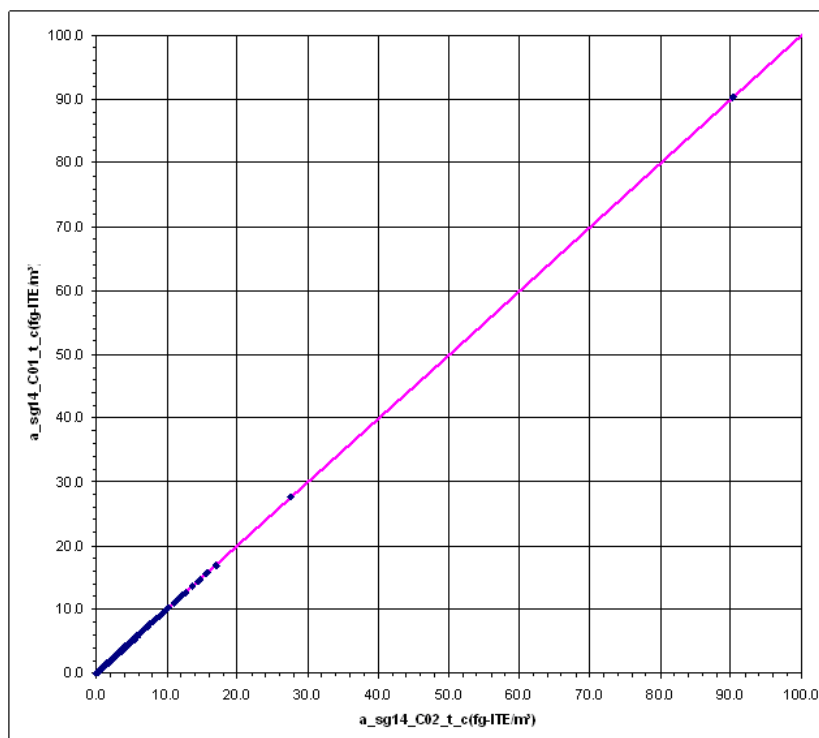


Figura B1: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento (modello AERMOD, meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014, distribuzione del particolato C02) e quella analoga (modello AERMOD, meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014) nella quale è stata impostata la distribuzione del particolato C01.

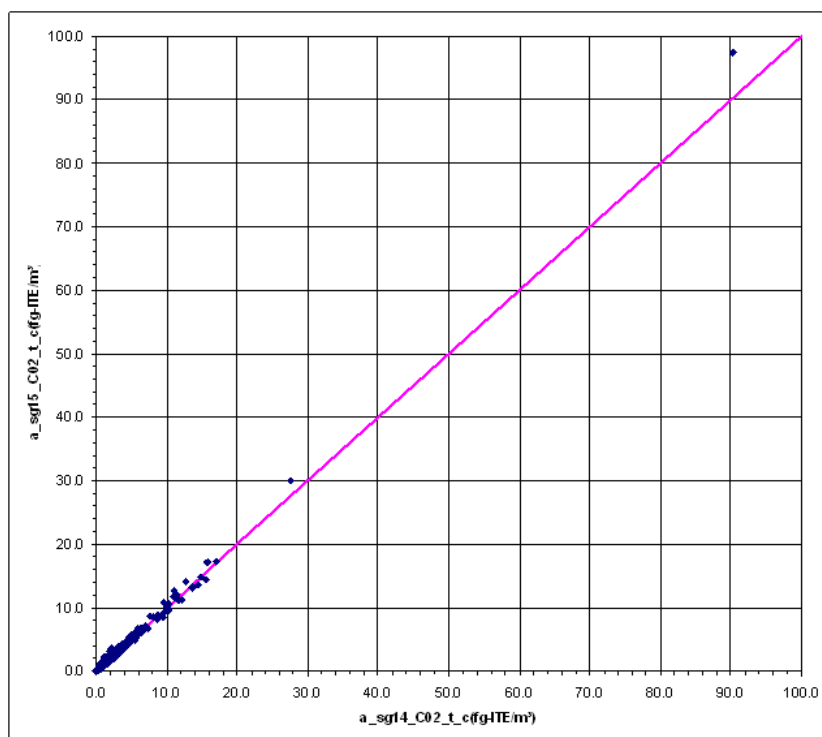


Figura B2: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella analoga ma relativa all'anno 2015.

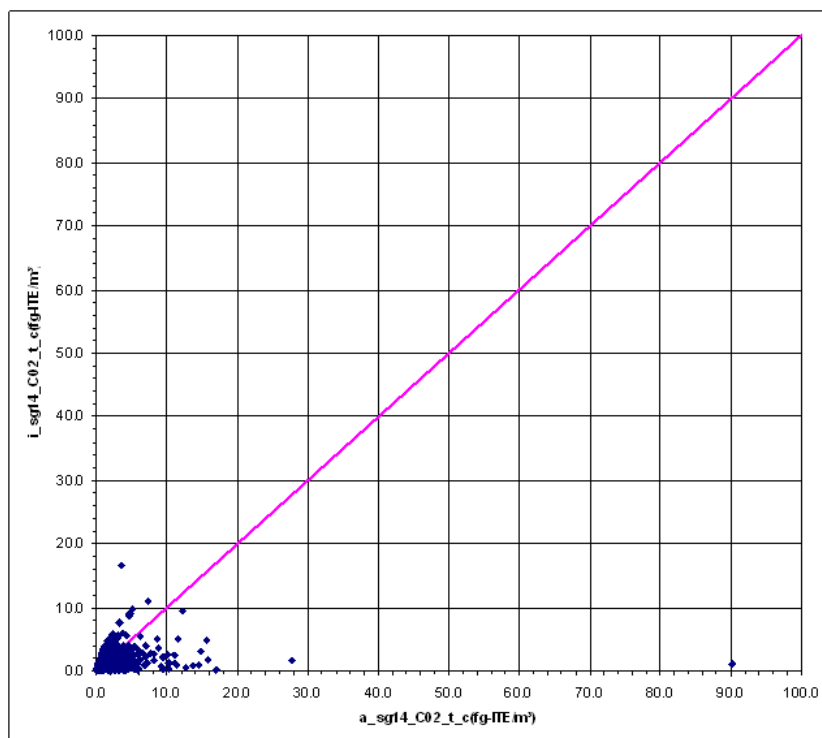


Figura B3: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella analoga (meteorologia "Pisa San Giusto", anno 2014, distribuzione del particolato C02) utilizzando il modello ISC3ST.



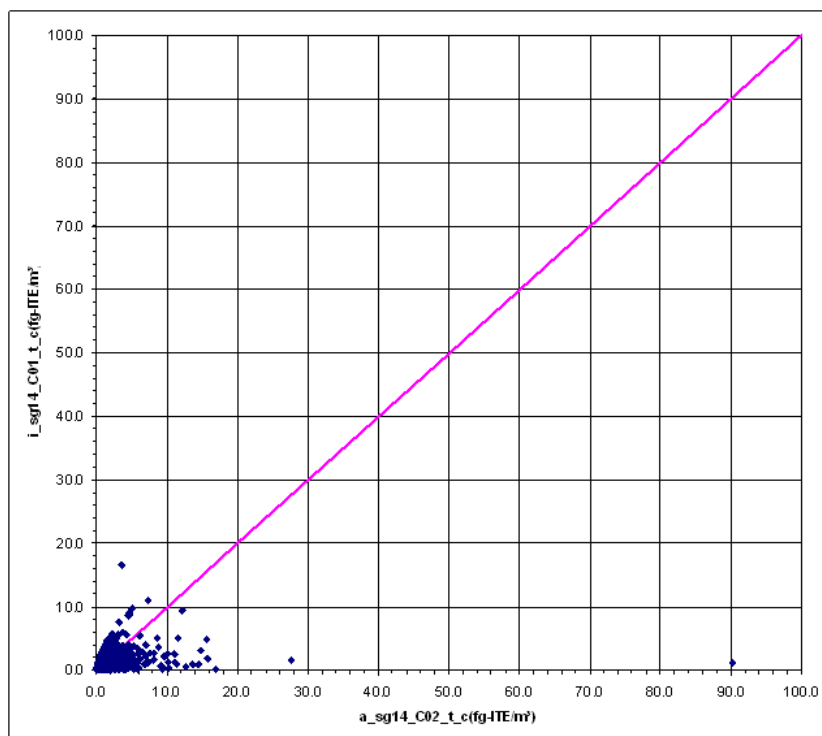


Figura B4: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento (asse orizzontale) e quella utilizzando il modello ISC3ST (meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014, distribuzione del particolato C01).

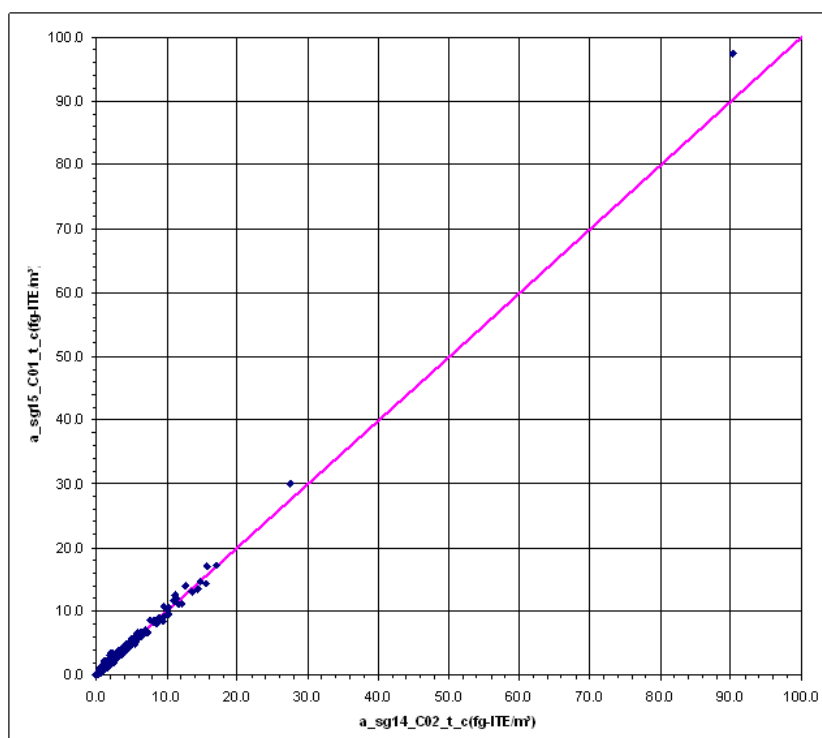


Figura B5: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento (asse orizzontale) e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2015, distribuzione del particolato C01).

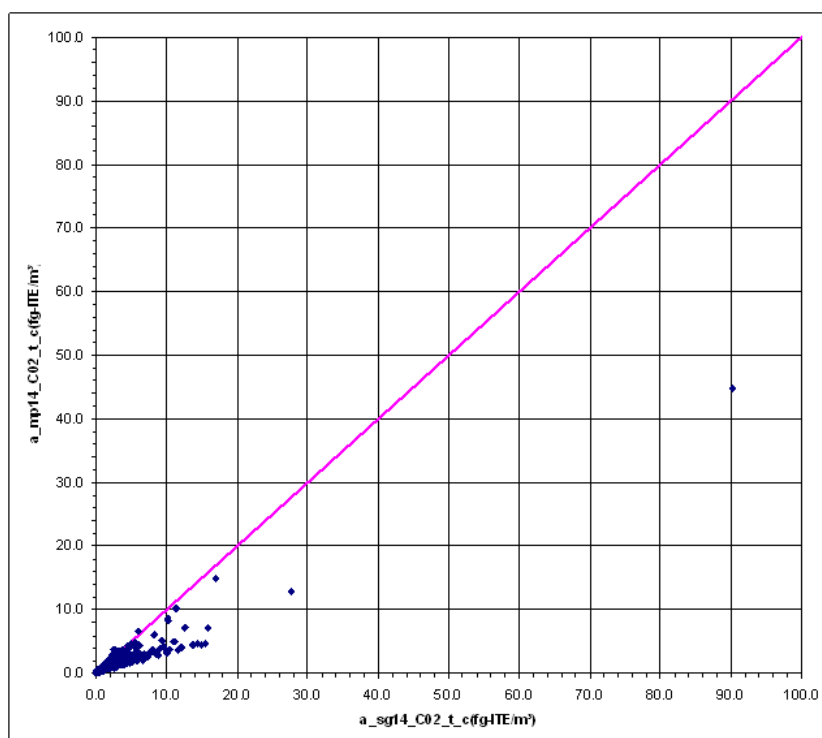


Figura B6: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Meteopisa”, anno 2014, distribuzione del particolato C02).

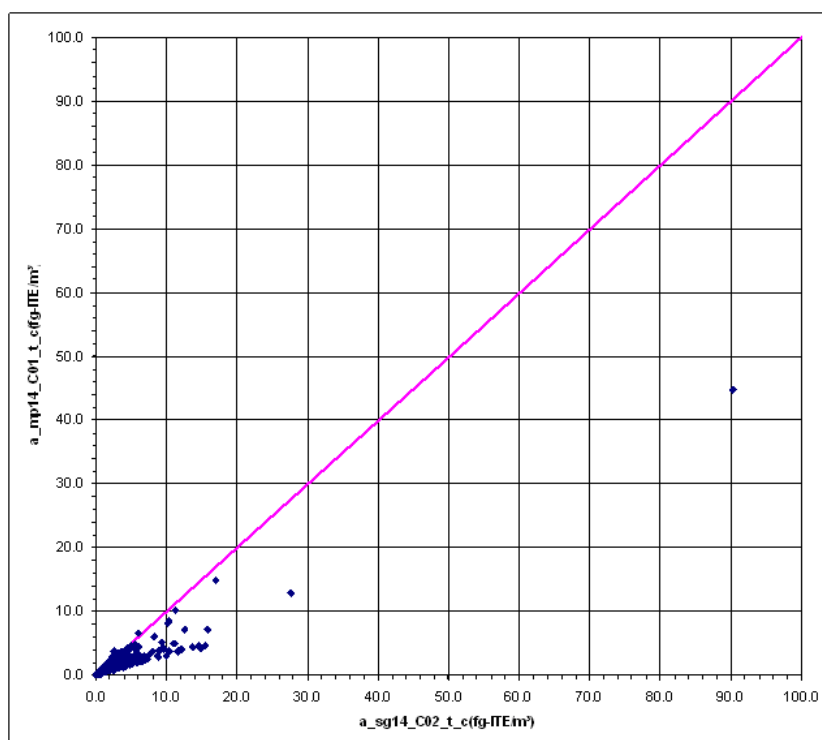


Figura B7: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Meteopisa”, anno 2014, distribuzione del particolato C01).

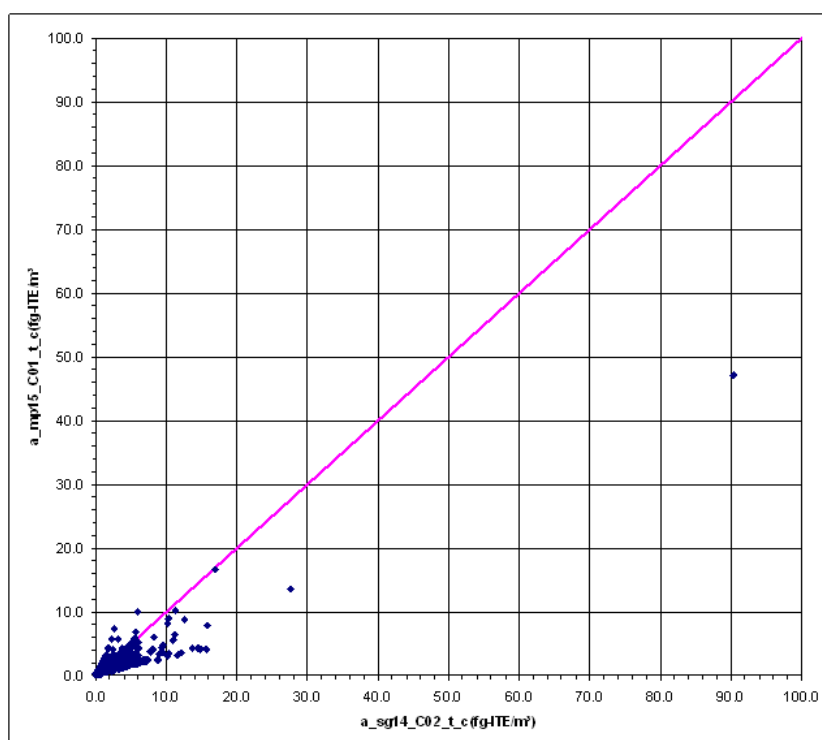


Figura B8: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Meteopisa”, anno 2015, distribuzione del particolato C01).

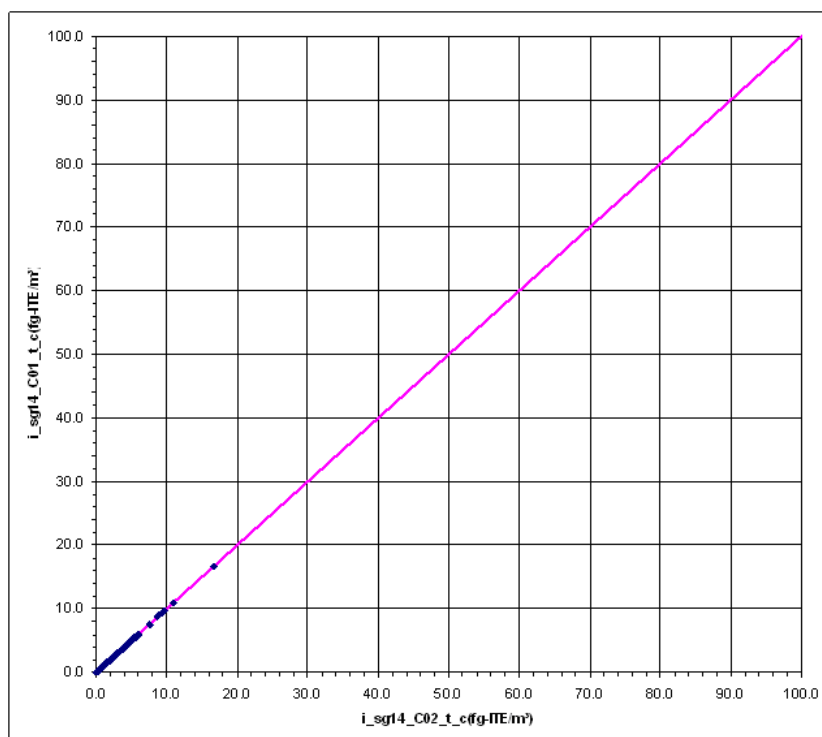


Figura B9: confronto tra i valori delle concentrazioni medie annue ottenuti con le simulazioni che impiegano il modello ISC3ST con la meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014 e distribuzione del particolato C02 sull'asse orizzontale, con la distribuzione del particolato C01 sull'asse verticale.

## Appendice C: Risultati relativi alle deposizioni cumulate totali al suolo di PCDD/F per lo scenario emissivo attuale

Nelle successive figure sono riportati e confrontati i valori delle deposizioni cumulate annue totali al suolo di PCDD/F (somma di quelle secche e di quelle umide), ottenute in ciascun punto recettore con le diverse simulazioni effettuate.

In tutti i grafici (escluso l'ultimo) i valori sull'asse delle ascisse si riferiscono alle deposizioni cumulate annue di PCDD/F stimate nella simulazione effettuata con il modello AERMOD, la meteorologia "Pisa San Giusto" dell'anno 2014 e la distribuzione del particolato indicata come C02, assunta come riferimento; mentre sull'asse delle ordinate sono di volta in volta riportati i valori ottenuti con le altre simulazioni. L'ultimo grafico (Figura C9) propone il confronto tra i risultati ottenuti con il modello ISC3ST al variare della distribuzione del particolato. Le deposizioni sono espresse in ng I-TEQ/m<sup>2</sup>.

L'esame dei grafici porta tra l'altro ad effettuare le seguenti osservazioni sintetiche:

- diversamente da quanto avviene per le concentrazioni in aria (si veda l'Appendice B) cambiando la distribuzione del particolato tra quella indicata con C02 (in qualche modo adattata e specifica per le sorgenti d'interesse) a quella indicata con C01 (semplificata e caratterizzata da particolato estremamente fine) si osservano variazioni significative nelle deposizioni al suolo di PCDD/F. Le variazioni sono maggiori quando si impiega AERMOD (le deposizioni che si ottengono con C01 sono circa il doppio di quelle che si ottengono con C02); mentre impiegando ISC3ST si sono ottenute variazioni dell'ordine del 30% (le deposizioni che si ottengono con C01 sono circa il 30% superiori a quelle che si ottengono con C02);
- modificando l'anno cui è riferita la meteorologia si ottengono variazioni nelle deposizioni cumulate al suolo piuttosto modeste, nonostante le precipitazioni relative ai due anni siano notevolmente diverse (la precipitazione cumulata per l'anno 2014 risulta pari a circa 1200 mm, quella dell'anno 2015 pari a circa 850 mm);
- in analogia con quanto osservato per le concentrazioni, anche per le deposizioni il cambiamento nella stazione meteorologica di riferimento passando da "Pisa San Giusto" a "Meteopisa" produce per molti recettori valori inferiori;
- differenze rilevanti si osservano variando il modello, cioè passando da AERMOD ad ISC3ST; anche in questo caso, come per le concentrazioni, queste differenze non sono univoche, ovvero risultano positive o negative a seconda del recettore;
- i valori massimi assoluti risultano leggermente inferiori a 10 ng I-TEQ/m<sup>2</sup>y e quindi (riportandosi a medie giornaliere) dell'ordine di 25 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day. Risulta presente un solo recettore al quale corrisponderebbe una media giornaliera superiore ai 14 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day, ovvero alla soglia di valutazione superiore indicata in [Van Lieshout et al. 2001]. Anche considerando il valore soglia più cautelativo, ovvero 3.4 pg I-TEQ/m<sup>2</sup>day, considerando tutte le simulazioni effettuate, a ben pochi recettori (in numero di 13) corrispondono stime della deposizione media giornaliera di PCDD/F più elevate. Occorre pertanto segnalare che dai risultati delle simulazioni non sembrano emergere situazioni di effettivo rischio per l'ambiente.



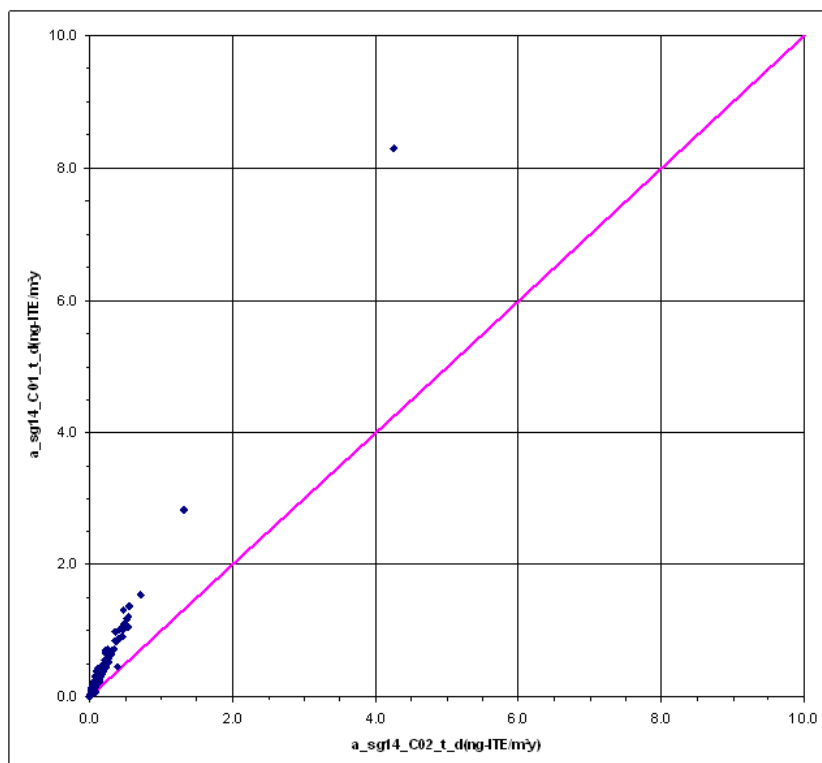


Figura C1: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue di PCDD/F ottenuti con la simulazione di riferimento (modello AERMOD, meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014, distribuzione del particolato C02) e quella analoga (modello AERMOD, meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014) nella quale è stata impostata la distribuzione del particolato C01.

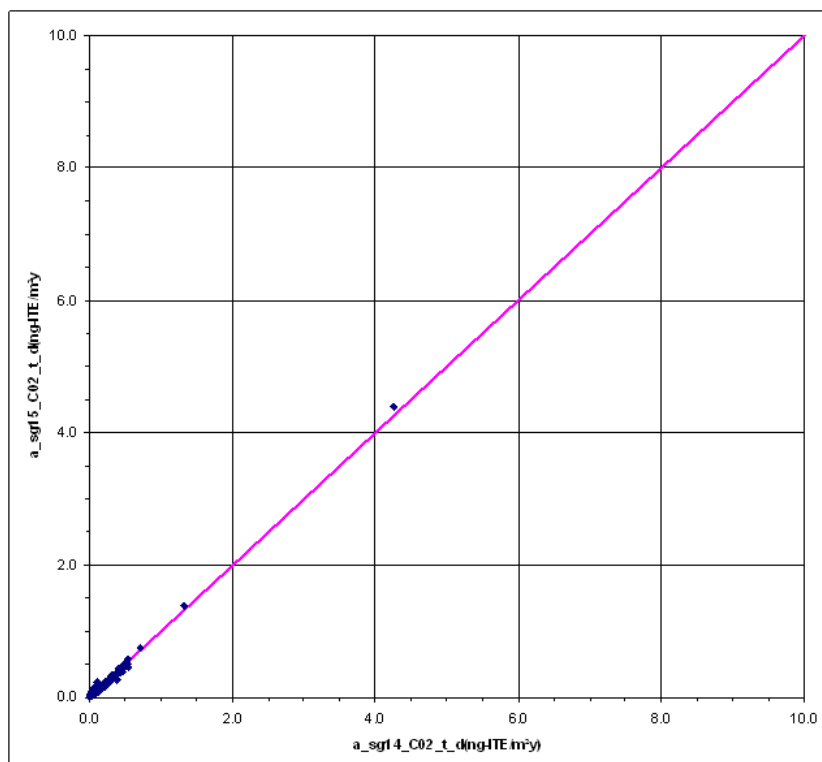


Figura C2: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella analoga ma relativa all'anno 2015.

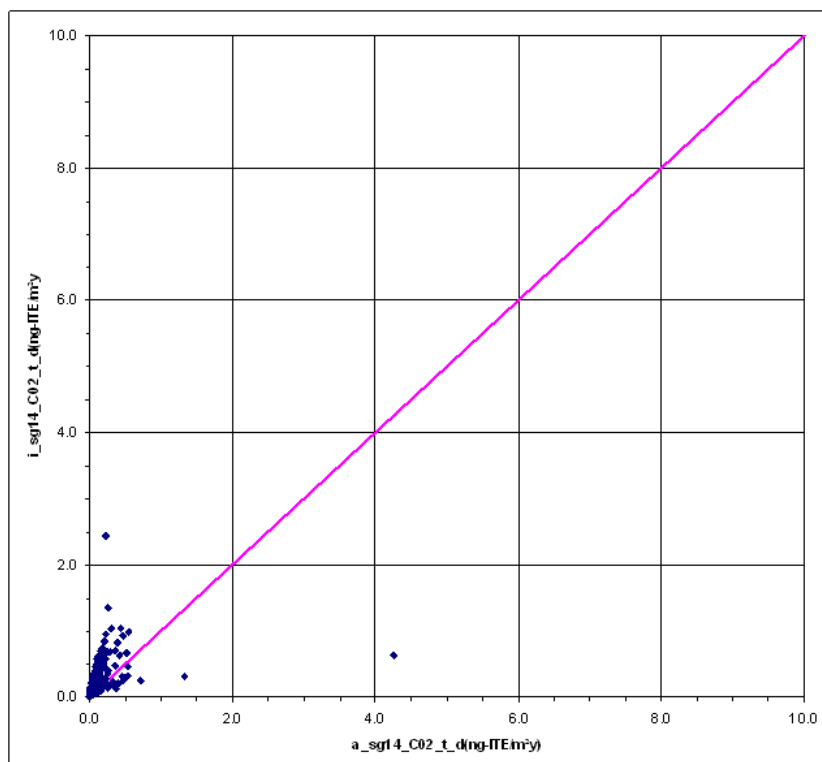


Figura C3: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella analoga (meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014, distribuzione del particolato C02) utilizzando il modello ISC3ST.

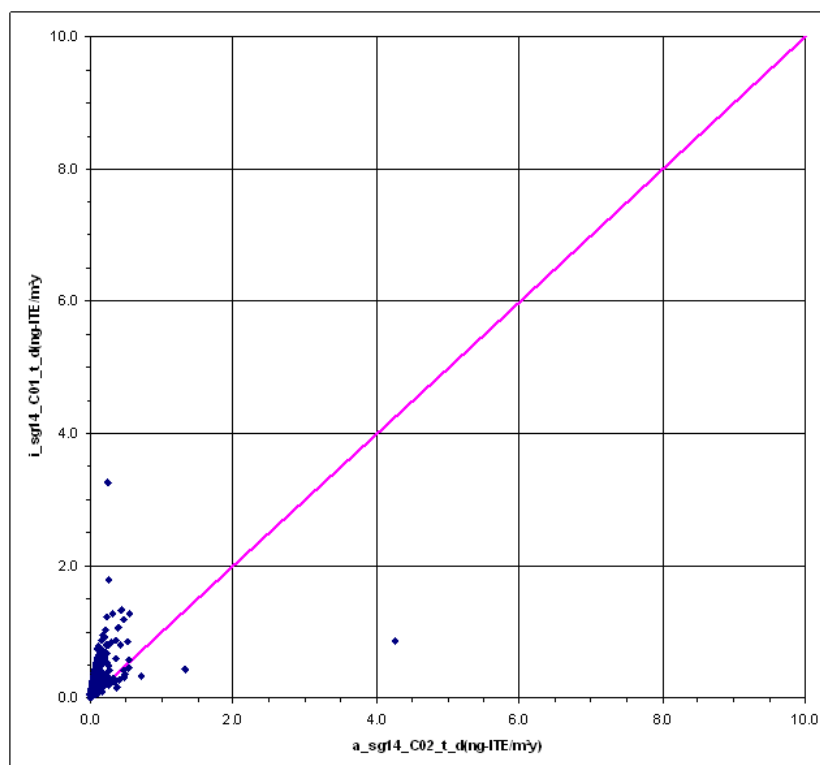


Figura C4: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento (asse orizzontale) e quella utilizzando il modello ISC3ST (meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014, distribuzione del particolato C01).

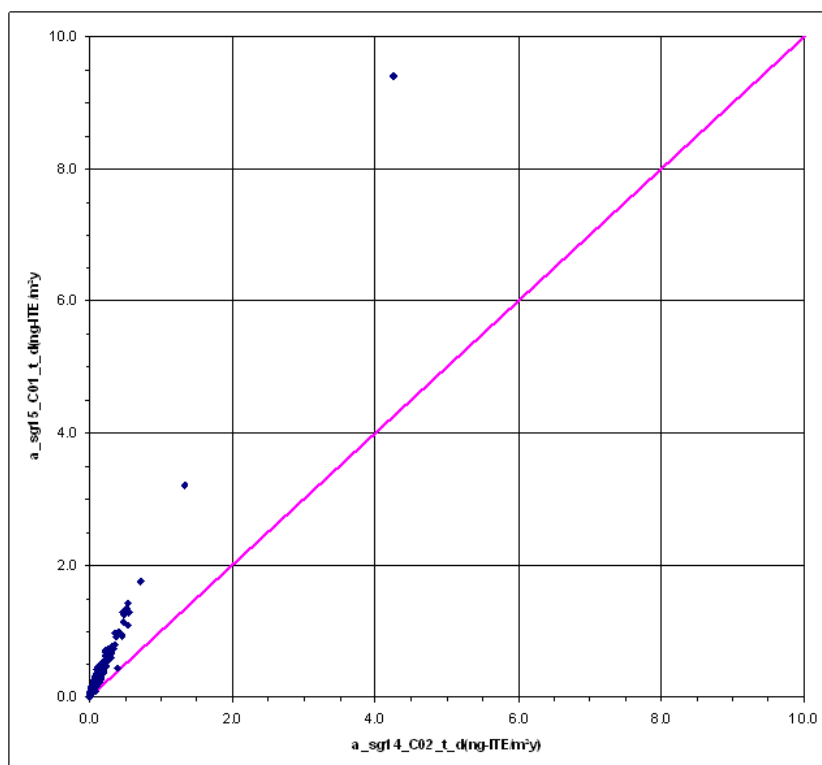


Figura C5: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento (asse orizzontale) e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2015, distribuzione del particolato C01).

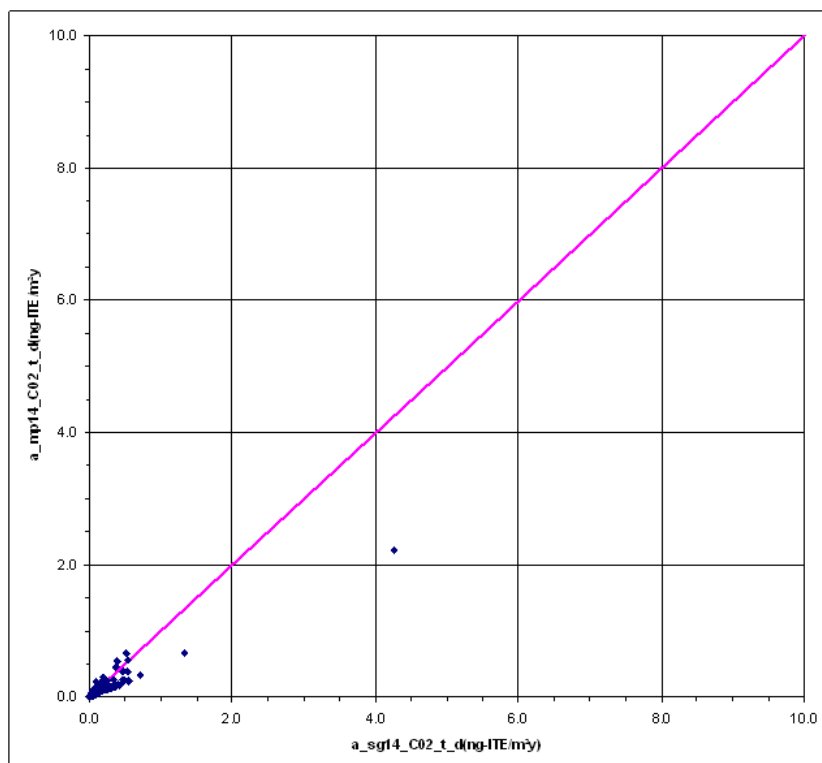


Figura C6: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Meteopisa”, anno 2014, distribuzione del particolato C02).

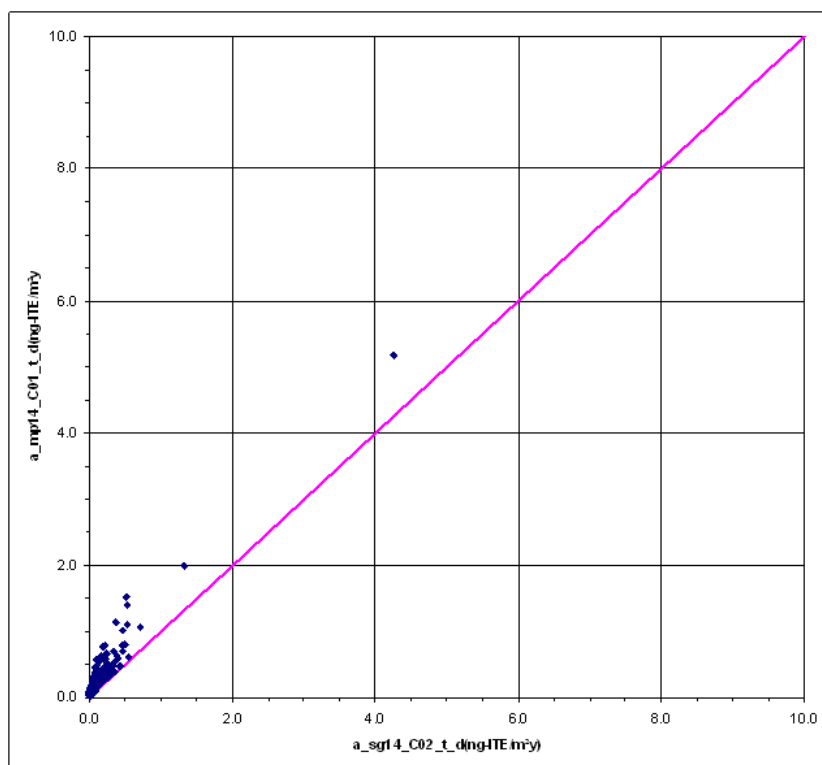


Figura C7: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Meteopisa”, anno 2014, distribuzione del particolato C01).

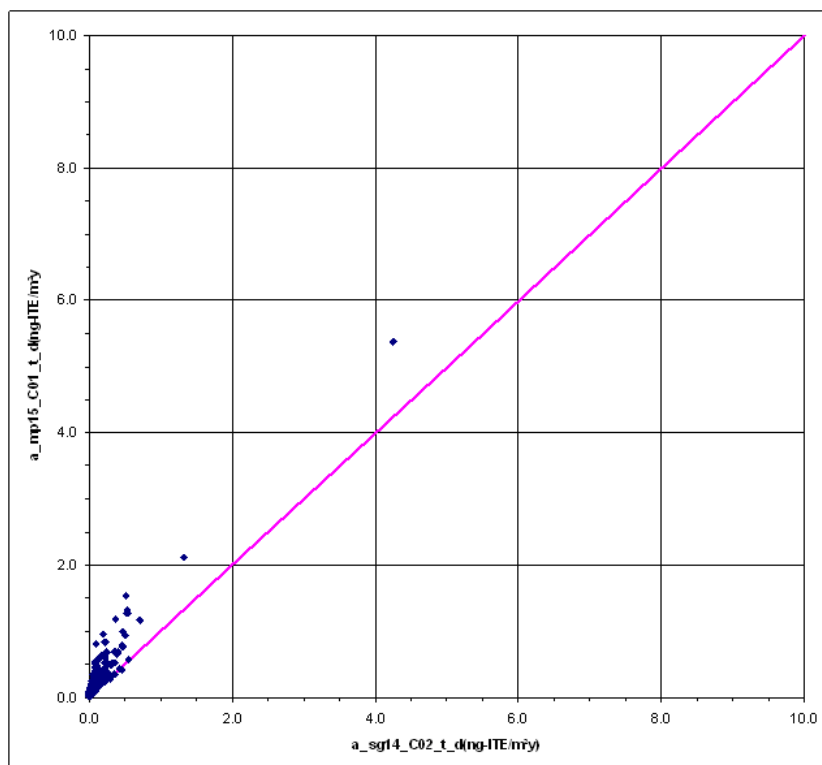


Figura C8: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con la simulazione di riferimento e quella che impiega il modello AERMOD (meteorologia “Meteopisa”, anno 2015, distribuzione del particolato C01).



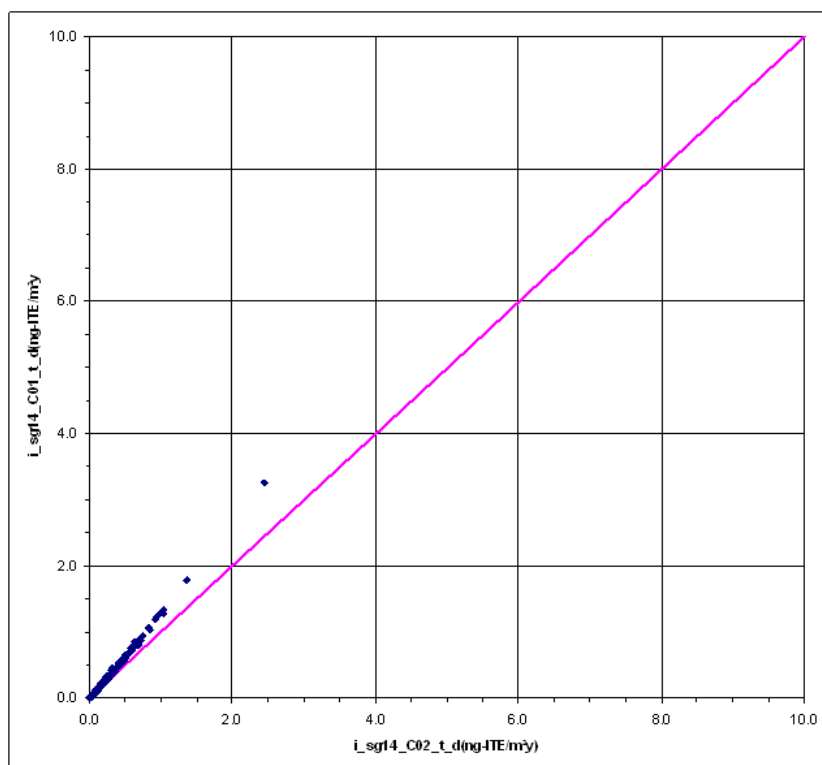


Figura C9: confronto tra i valori delle deposizioni cumulate annue ottenuti con le simulazioni che impiegano il modello ISC3ST con la meteorologia “Pisa San Giusto”, anno 2014 e distribuzione del particolato C02 sull'asse orizzontale, con la distribuzione del particolato C01 sull'asse verticale.

## Appendice D: Raffronto tra i dati stimati con l'ipotesi di scenario passato e i dati di misura ottenuti nei campionamenti del terreno

Nelle successive tabelle e figure sono riportati i valori delle stime del contenuto di PCDD/F nel terreno relative allo scenario emissivo passato ipotizzato, ottenuti con le diverse simulazioni. Le stime sono confrontate con le misure effettuate sui campioni, corrispondenti ai 12 punti di prelievo indicati.

Tabella D1: stime (emivita 9 anni) e misure del contenuto di PCDD/F nel terreno (ng I-TEQ/kg s.s.).

Punti di prelievo	AERMOD c01 "Pisa San Giusto" 2014		AERMOD c02 "Pisa San Giusto" 2014		AERMOD c02 "Pisa San Giusto" 2015		ISC3ST c02 "Pisa San Giusto" 2014		Misure
	min	max	min	max	min	max	min	max	
p1	0.240	0.450	0.084	0.193	0.077	0.162	0.303	0.790	0.4
p2	0.329	0.459	0.126	0.195	0.112	0.163	0.177	0.358	<0.1
p3	0.164	2.564	0.085	1.323	0.068	1.362	0.157	0.288	5.7
p4	0.140	0.170	0.043	0.071	0.054	0.067	0.195	0.240	<0.1
p5	0.049	0.069	0.017	0.025	0.030	0.046	0.087	0.118	0.43
p6	0.103	0.156	0.041	0.068	0.031	0.057	0.079	0.177	0.42
p7	0.352	0.886	0.164	0.421	0.175	0.437	0.101	0.169	<0.1
p8	0.216	0.330	0.106	0.159	0.114	0.166	0.087	0.100	0.13
p9	0.062	0.076	0.033	0.040	0.034	0.043	0.056	0.066	1.5
p10	0.089	0.141	0.057	0.085	0.056	0.088	0.082	0.109	0.18
p11	0.064	0.095	0.028	0.045	0.028	0.049	0.041	0.065	0.49
p12	0.006	0.006	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.010	<0.1

Tabella D2: stime (emivita 15 anni) e misure del contenuto di PCDD/F nei terreni (ng I-TEQ/kg s.s.).

Punti di prelievo	AERMOD c01 "Pisa San Giusto" 2014		AERMOD c02 "Pisa San Giusto" 2014		AERMOD c02 "Pisa San Giusto" 2015		ISC3ST c02 "Pisa San Giusto" 2014		Misure
	min	max	min	max	min	max	min	max	
p1	0.450	0.831	0.162	0.365	0.150	0.311	0.559	1.443	0.4
p2	0.614	0.855	0.241	0.369	0.216	0.314	0.346	0.685	<0.1
p3	0.315	4.592	0.168	2.376	0.139	2.449	0.309	0.546	5.7
p4	0.266	0.319	0.087	0.138	0.108	0.131	0.363	0.444	<0.1
p5	0.099	0.137	0.035	0.051	0.057	0.088	0.173	0.238	0.43
p6	0.212	0.327	0.086	0.146	0.063	0.121	0.170	0.402	0.42
p7	0.643	1.597	0.303	0.765	0.324	0.796	0.202	0.327	<0.1
p8	0.398	0.604	0.199	0.296	0.214	0.311	0.174	0.200	0.13
p9	0.119	0.145	0.065	0.080	0.068	0.086	0.113	0.134	1.5
p10	0.178	0.274	0.118	0.172	0.104	0.165	0.174	0.226	0.18
p11	0.122	0.180	0.056	0.087	0.056	0.094	0.084	0.133	0.49
p12	0.013	0.013	0.005	0.005	0.004	0.005	0.020	0.022	<0.1

Tabella D3: stime (emivita 9 anni ) e misure del contenuto di PCDD/F nel terreno (ng I-TEQ/kg s.s.).

Punti di prelievo	AERMOD c01 "Pisa San Giusto" 2015		AERMOD c01 "Meteopisa" 2014		AERMOD c01 "Meteopisa" 2015		AERMOD c02 "Meteopisa" 2014		ISC3ST c01 "Pisa San Giusto" 2014		Misure
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
p1	0.260	0.452	0.212	0.319	0.212	0.328	0.088	0.125	0.399	1.047	0.4
p2	0.338	0.447	0.231	0.273	0.234	0.275	0.101	0.126	0.199	0.432	<0.1
p3	0.163	2.742	0.237	1.608	0.240	1.687	0.098	0.712	0.194	0.360	5.7
p4	0.160	0.180	0.226	0.279	0.272	0.322	0.092	0.116	0.248	0.302	<0.1
p5	0.059	0.083	0.076	0.093	0.077	0.092	0.028	0.036	0.102	0.141	0.43
p6	0.104	0.157	0.140	0.167	0.138	0.163	0.063	0.091	0.088	0.194	0.42
p7	0.381	0.975	0.282	0.667	0.329	0.715	0.095	0.223	0.123	0.204	<0.1
p8	0.227	0.358	0.161	0.249	0.180	0.276	0.056	0.084	0.101	0.119	0.13
p9	0.064	0.079	0.066	0.074	0.069	0.079	0.022	0.025	0.063	0.075	1.5
p10	0.088	0.135	0.114	0.164	0.112	0.161	0.047	0.068	0.038	0.043	0.18
p11	0.071	0.108	0.101	0.141	0.101	0.147	0.040	0.059	0.046	0.073	0.49
p12	0.007	0.007	0.019	0.019	0.016	0.017	0.007	0.007	0.010	0.010	<0.1

Tabella D4: stime (emivita 15 anni ) e misure del contenuto di PCDD/F nel terreno (ng I-TEQ/kg s.s.).

Punti di prelievo	AERMOD c01 "Pisa San Giusto" 2015		AERMOD c01 "Meteopisa" 2014		AERMOD c01 "Meteopisa" 2015		AERMOD c02 "Meteopisa" 2014		ISC3ST c01 "Pisa San Giusto" 2014		Misure
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
p1	0.489	0.842	0.417	0.620	0.419	0.641	0.186	0.261	0.741	1.910	0.4
p2	0.637	0.841	0.463	0.554	0.473	0.568	0.219	0.272	0.373	0.806	<0.1
p3	0.317	4.912	0.457	2.904	0.465	3.051	0.197	1.296	0.371	0.671	5.7
p4	0.304	0.340	0.433	0.529	0.518	0.606	0.186	0.229	0.456	0.553	<0.1
p5	0.117	0.163	0.158	0.190	0.157	0.188	0.061	0.078	0.200	0.279	0.43
p6	0.216	0.333	0.305	0.366	0.302	0.361	0.150	0.219	0.186	0.435	0.42
p7	0.696	1.758	0.527	1.217	0.612	1.305	0.183	0.415	0.239	0.385	<0.1
p8	0.419	0.658	0.308	0.468	0.344	0.518	0.112	0.163	0.196	0.230	0.13
p9	0.124	0.152	0.131	0.148	0.138	0.157	0.046	0.053	0.123	0.146	1.5
p10	0.178	0.265	0.225	0.317	0.224	0.315	0.096	0.136	0.089	0.102	0.18
p11	0.136	0.204	0.198	0.272	0.198	0.283	0.081	0.117	0.092	0.146	0.49
p12	0.015	0.015	0.039	0.040	0.034	0.036	0.015	0.016	0.021	0.022	<0.1

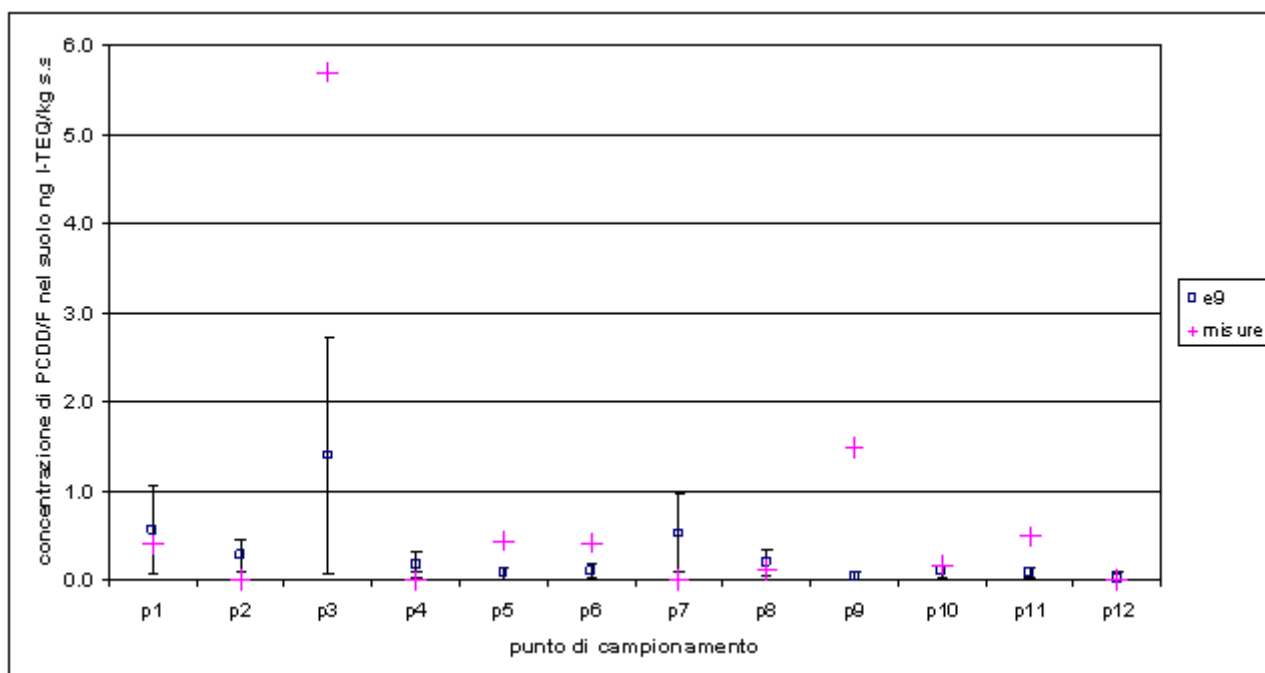


Figura D1: Confronto tra stime modellistiche del contenuto di PCDD/F nei suoli nei punti di campionamento, e valori effettivi ottenuti dalle misure. Per le stime si riportano gli intervalli di variazione (minimo-massimo) ottenuti considerando i risultati di tutte le simulazioni effettuate. Nei calcoli dell'evoluzione temporale dei PCDD/F nei suoli è stato adottato un tempo di emivita di 9 anni ("e9").

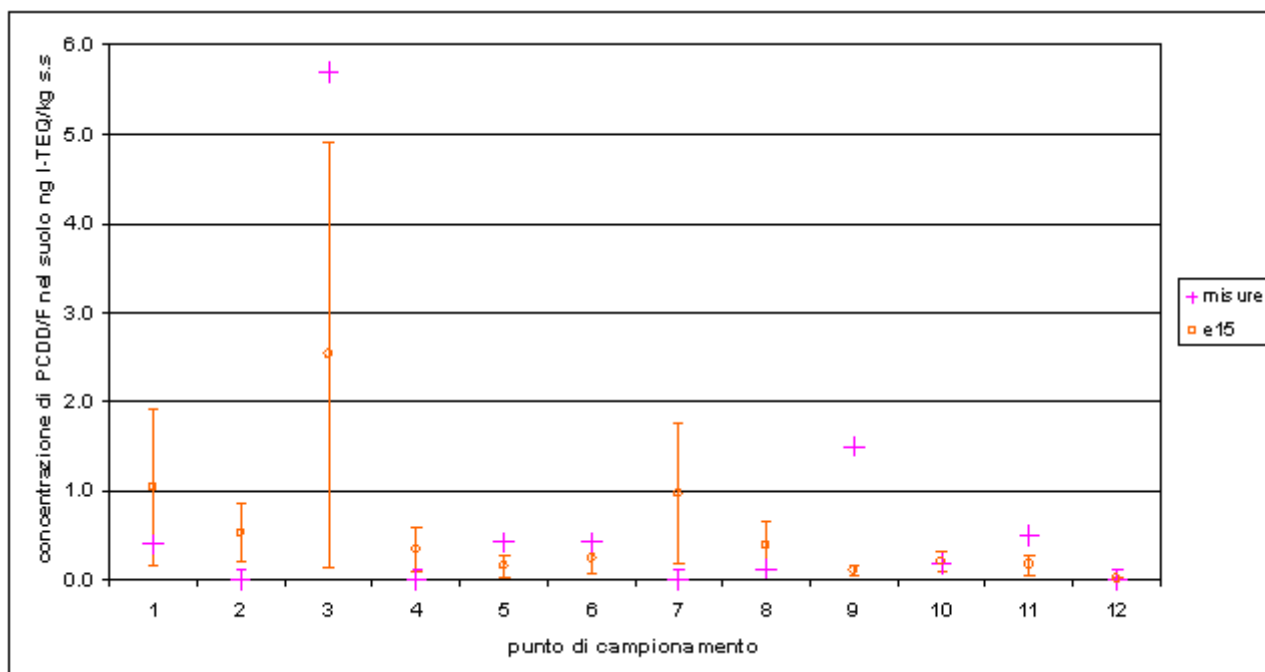


Figura D2: Confronto tra stime modellistiche del contenuto di PCDD/F nei suoli nei punti di campionamento, e valori effettivi ottenuti dalle misure. Per le stime si riportano gli intervalli di variazione (minimo-massimo) ottenuti considerando i risultati di tutte le simulazioni effettuate. Nei calcoli dell'evoluzione temporale dei PCDD/F nei suoli è stato adottato un tempo di emivita di 15 anni ("e15").