



**quaderni**  
di Monitor  
04>11

# I risultati del progetto Monitor

**Gli effetti degli inceneritori  
sull'ambiente e la salute  
in Emilia-Romagna**

inceneritori  
monitoraggio, ambiente, salute, comunicazione



Monitoraggio degli inceneritori nel territorio dell'Emilia-Romagna



## LINEA PROGETTUALE 2

Organizzazione e realizzazione  
della sorveglianza ambientale  
nelle aree di indagine

**Responsabile: Mauro Rossi, Arpa Emilia-Romagna**

**Azione 1** - Linee guida per la realizzazione della sorveglianza ambientale  
Responsabili: Mauro Rossi, Vanes Poluzzi (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 2** - Realizzazione del quadro conoscitivo delle emissioni in atmosfera relativo alle diverse sorgenti presenti sul territorio oggetto di studio  
Responsabili: Cristina Regazzi, Mauro Rossi (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 3** - Applicazione del modello ADMS Urban alle aree della regione Emilia-Romagna interessate dagli impatti degli inceneritori di RSU  
Responsabile: Mauro Rossi (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 4** - Sviluppo di sistemi modellistici avanzati per la valutazione di situazioni complesse  
Responsabile: Marco Deserti (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 5** - Campionamento di aerosol per la speciazione e il conteggio del numero di particelle rispetto alle loro dimensioni  
Responsabile: Mauro Rossi (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 6** - Analisi chimico-fisiche relative ai campioni di aerosol  
Responsabile: Mauro Rossi (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 7** - Analisi ed elaborazione dati e reportistica  
Responsabile: Mauro Rossi (Arpa Emilia-Romagna)

**Azione 8** - Micrometeorologia e profili di concentrazione  
Responsabili: Franco Prodi, Franco Belosi (ISAC-CNR)

**Azione 9** - Monitoraggio avanzato relativo al contenuto in metalli pesanti e microelementi nel sistema acqua-suolo-pianta  
Responsabile: Gilmo Vianello (Università di Bologna-DISTA)

### **Enti coinvolti:**

Arpa Emilia-Romagna (Sezioni provinciali, Servizio IdroMeteoClima, Direzione tecnica, Centro tematico regionale Ambiente e salute)

Università Ca' Foscari di Venezia, Dipartimento di Chimica Fisica

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture viarie, Rilievamento (DIIAR)

Università di Bologna, Dipartimento di Chimica

Università di Bologna, Dipartimento di Chimica Fisica e Inorganica

Università di Bologna, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali (DISTA)

Università di Ferrara, Dipartimento di Chimica

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC)

### Risultati Linea progettuale 2 Fase I

Sono state redatte le Linee Guida per la Realizzazione della Sorveglianza Ambientale, sono stati studiati e redatti i catasti delle emissioni per i domini comprendenti gli inceneritori dell'Emilia-Romagna e sono state eseguite le simulazioni modellistiche sia per gli anni recenti che per i periodi storici degli impianti. *Questi ultimi hanno mostrato un trend temporale decrescente della ricaduta sul territorio, mano a mano che le tecnologie di abbattimento aumentavano di efficacia.*

### Risultati Linea progettuale 2 Fase II

Sono state eseguite molte campagne di monitoraggio, sia chimiche che fisiche. Le **analisi chimiche sul particolato** hanno mostrato che, per quanto riguarda il dominio del Frullo, i microinquinanti organici sono più caratterizzanti delle diverse Stazioni di prelievo, rispetto agli inquinanti inorganici, per quanto riguarda il particolato PM2.5 e PM1. Gli inquinanti pericolosi come diossine, pcb, mercurio, mostrano valori simili sia nel sito di massima ricaduta dell'inceneritore (Frullo Est-MXW) sia nel sito di controllo (Calamosco-CTW), *con concentrazioni tipiche di un fondo suburbano.* Le **indagini fisiche** indicano che l'inquinamento (particelle e ossidi di azoto) mostra tipiche caratteristiche antropogeniche con un pattern giornaliero significativamente diverso fra i giorni festivi e feriali compatibile con le emissioni delle attività urbane ed in particolare con il traffico veicolare. Le **indagini chimiche sul terreno e sui vegetali** hanno mostrato che il suolo superficiale è moderatamente contaminato di piombo immobilizzato nel terreno, compatibilmente con il passato uso di benzine al piombo, e che non ci sono differenze *statisticamente significative fra i vari siti di prelievo*, anche considerando il monitoraggio di ricaduta su suolo e vegetali di controllo.

## Introduzione

Nella Delibera Regionale (Seconda Edizione, 2008 - pagina 17) le attività della LP2 sono raccolte in due macrocontenitori:

Fase I: Interessa tutte le aree della regione Emilia-Romagna in cui sono presenti impianti di incenerimento RSU. *[A questa Fase fanno riferimento le Azioni 1-2-3].*

Fase II: [È] relativa ad attività sperimentale realizzata per acquisire conoscenze sulla qualità dell'aria e sulla matrice suolo in prossimità di inceneritori e per valutare aspetti meno noti del particolato atmosferico, anche con il contributo delle altre Linee Progettuali.

La Fase II ha dunque il preciso compito di essere un grande “esperimento pilota” sul campo, per aumentare la conoscenza sulla qualità dell'aria nelle zone circostanti gli impianti di incenerimento, attraverso la ricerca di inquinanti e microinquinanti non normati per legge e dunque solitamente non investigati nelle attività routinarie dell'Agenzia. La Fase II è stata attuata su un unico inceneritore: l'impianto del “Frullo” di Granarolo dell'Emilia (BO). Volendo gettare “il cuore oltre l'ostacolo” sono state tentate alcune interpretazioni sulla pressione ambientale dell'inceneritore esaminato, ma si deve ricordare che lo spirito del Progetto Monitor investiva nella LP 2 uno sforzo conoscitivo importante per creare un tesoretto di conoscenze e approfondimenti da cui trarre non solo conclusioni «generiche, immediate e risolutive» ma soprattutto «conoscenze applicative» per la realtà dell'Agenzia stessa e fornire delle solide Linee Guida, testate sul campo, da utilizzare in Emilia-Romagna per tutte le variegate realtà ambientali che circondano gli impianti di incenerimento.

### Azione 1. Linee Guida per la realizzazione della sorveglianza ambientale

Lo scopo delle Linee Guida è quello di fornire uno strumento utile per chi vuole effettuare il monitoraggio di un'area all'interno della quale sia presente un impianto di termovalorizzazione. Il focus principale è stato orientato alle analisi delle polveri atmosferiche ma sono presenti anche indicazioni su come effettuare un campionamento di suolo.

Per quanto riguarda il campionamento di aerosol, questo può essere sintetizzato nelle seguenti fasi:

- scelta dei punti di massimo impatto e di controllo, utilizzando programmi di simulazione modellistica che tengano conto delle emissioni del termovalorizzatore, e delle emissioni delle altre sorgenti inquinanti (puntuali e diffuse);
- scelta dei migliori periodi di monitoraggio, tenendo conto delle condizioni meteorologiche e delle diverse distribuzioni degli inquinanti a seconda delle ore della giornata e dei mesi dell'anno;
- come effettuare effettivamente il monitoraggio, avendo cura di effettuare prelievi contemporanei nei punti di massimo impatto e di controllo, e come gestire le eventuali necessità di prolungamento/modifica di prelievo a seconda delle condizioni meteo reali riscontrate;
- come interpretare i risultati ottenuti, tramite l'utilizzo a posteriori di simulazioni modellistiche.

Quanto brevemente riassunto più sopra è schematizzato nella seguente traccia:



Nella figura le quattro fasi di cui si è detto sono rappresentate dalle caselle verdi; nelle caselle bianche sono esplicitati i dettagli dell'intera procedura; l'inizio della procedura e le simulazioni modellistiche sono evidenziate in rosso.

## Azione 2. Realizzazione del quadro conoscitivo delle emissioni in atmosfera relativo alle diverse sorgenti presenti sul territorio oggetto di studio.

### Obiettivi

- reperimento dei dati dagli inventari provinciali o regionali
- costruzione di un inventario locale, relativamente al dominio di calcolo ADMS-Urban, il più possibile esaustivo e omogeneo nelle metodologie di stima delle emissioni.

### Descrizione delle attività e conclusioni

Le attività di questa Azione sono state concordate in stretta collaborazione con i Responsabili della Azione 2 della LP3 (Valutazione dell'esposizione). Una volta definito la porzione di territorio di interesse, altrimenti definito "area di studio" o "dominio delle simulazioni ADMS-Urban", si è provveduto al reperimento dei dati emissivi relativamente alle sorgenti di seguito indicate come macrosettori (M) con riferimento alla classificazione SNAP 97:

- M1 Combustione energia ed industria della trasformazione;
- M2 Combustione non industriale;
- M3 Combustione nell'industria;
- M4 Processi produttivi;
- M7 Trasporto su strada;
- M8 Altre sorgenti mobili;
- M9 Trattamento e smaltimento rifiuti;
- M10 Agricoltura.

I criteri di raccolta ed elaborazione dati sono stati discussi e condivisi sia da tutti gli operatori provinciali che hanno prodotto le rispettive basi dati (db) dei domini di loro competenza, sia dai Responsabili (all'epoca, anno 2007, il responsabile di Linea 2 era V. Poluzzi). La produzione dei db è stata resa **omogenea nella procedura** e, relativamente alla qualità del dato, il criterio cardine scelto è stato quello di fornire, **per ogni dominio, la migliore conoscenza delle emissioni** relativamente ai macrosettori di interesse.

La stima delle emissioni relative a territori in studio sono state realizzate utilizzando le informazioni più dettagliate disponibili. Nonostante ciò, per taluni settori è stato necessario effettuare diverse assunzioni e stimare le emissioni

dei domini di studio utilizzando variabili proxy. Gli inquinanti scelti per questo progetto sono stati PM10 e NOx e su questi sono stati costruiti i db.

Nelle tabelle seguenti vengono riportati, in maniera riassuntiva, i catasti relativi alle aree di interesse degli studi Monitor (t/a=tonnellate/anno).

| NOX t/a            | PC     | RE     | MO     | BO     | FE     | FC     | RA     | RN     |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Produzione Energia | 925,0  | 188,7  | 0,0    | 0,0    | 1113,0 | 0,0    | 1943,3 | 0,0    |
| Riscaldamento      | 173,4  | 211,4  | 202,7  | 131,9  | 142,1  | 131,8  | 64,2   | 108,2  |
| Industria          | 1908,3 | 312,0  | 33,4   | 91,7   | 1940,6 | 31,7   | 2018,3 | 49,2   |
| Traffico           | 1330,2 | 1081,0 | 644,0  | 1935,8 | 830,2  | 1062,2 | 63,8   | 1422,9 |
| Mezzi Agricoli     | 59,7   | 31,8   | 34,0   | 59,7   | 73,2   | 35,0   | 48,4   | 49,7   |
| Porto              | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| Termovalorizzatore | 84,8   | 60,0   | 138,3  | 122,3  | 62,6   | 51,8   | 59,1   | 93,7   |
| Allevamenti        | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    | 0,0    |
| TOT                | 4481,5 | 1884,9 | 1052,4 | 2341,4 | 4161,7 | 1312,4 | 4197,1 | 1724,0 |

| PM10 t/a           | PC     | RE     | MO     | BO     | FE     | FC     | RA    | RN    |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Produzione Energia | 0,00   | 0,81   | 0,00   | 0,00   | 44,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  |
| Riscaldamento      | 9,37   | 7,30   | 7,60   | 5,12   | 5,70   | 11,46  | 0,52  | 12,91 |
| Industria          | 48,0   | 44,0   | 35,4   | 62,0   | 140,9  | 15,0   | 451,7 | 3,84  |
| Traffico           | 127,1  | 101,8  | 60,1   | 168,4  | 76,7   | 99,2   | 6,0   | 77,7  |
| Mezzi Agricoli     | 7,80   | 4,00   | 4,20   | 9,42   | 9,05   | 4,33   | 6,0   | 7,82  |
| Porto              | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 35,5  | 0,00  |
| Termovalorizzatore | 0,29   | 0,32   | 0,98   | 1,81   | 0,46   | 1,76   | 0,44  | 1,01  |
| Allevamenti        | 0,00   | 0,50   | 2,00   | 0,00   | 0,30   | 6,10   | 0,00  | 0,00  |
| TOT                | 192,54 | 158,73 | 110,28 | 246,69 | 277,14 | 137,79 | 500,1 | 103,2 |

**È possibile dunque asserire che entrambi gli obiettivi A e B della Azione 2 siano stati pienamente raggiunti.** Ciononostante, allo scopo di rendere ancora più esaustivo il lavoro di produzione dei catasti emissivi, è stato

prodotto un ulteriore lavoro extra-specifiche della Delibera Regionale (Seconda Edizione, anno 2008) che è consistito in uno studio per la valutazione dell'incertezza sulle emissioni nei domini di calcolo ADMS-Urban. I risultati di questo lavoro aggiuntivo sono i seguenti:

### M1-M9

Per quanto riguarda gli impianti di termodistruzione dei rifiuti (M9) e i grandi impianti di produzione di energia (M1) ricadenti nei domini di studio sono stati utilizzati i dati dei controlli in continuo. L'incertezza stimata per la media annuale è intorno al 5%.

### M2

Le stime delle emissioni relative al macrosettore 2 sono state realizzate mediante l'utilizzo di dati sui consumi stimati di combustibile (metano, GPL, gasolio, legna) e fattori di emissione di letteratura.

La principale fonte di incertezza parrebbe legata al fattore di emissione (in particolare per PM10 da combustione della legna), ma occorre considerare che gli indicatori di attività sono dati di vendita dei combustibili a livello regionale o provinciale (assunti pari ai dati di consumo), che sono stati ripartiti sulla scala locale utilizzando il dato delle superfici abitative riscaldate con le varie tipologie di combustibili (fonte ISTAT). In un dominio territoriale piccolo, dunque, le stime dei consumi dei combustibili sono nettamente più incerte rispetto al dato di partenza. Si valuta che l'incertezza sulla stima dei consumi, relativamente bassa sulla scala regionale, possa arrivare per alcuni combustibili al 50% a scala comunale e a valori superiori su domini più piccoli.

**M3-M4**

Le emissioni produttive sono state valutate secondo il seguente schema a piramide:



Le stime delle emissioni dal settore produttivo sono state realizzate utilizzando i dati contenuti nei catasti delle autorizzazioni ed applicando al dato autorizzato opportuni *Fattori Correttivi (FC)* (tali fattori sono stati ottenuti elaborando statisticamente l'insieme dei dati relativi al rapporto "misurato/autorizzato" per singolo Settore SNAP97). In questo tipo di procedimento le incertezze si concentrano sulla classificazione corretta delle singole Attività secondo la codifica SNAP97 e sulla variabilità/affidabilità del FC adottato (la sua rappresentatività è funzione della numerosità dei dati di controllo/autocontrollo utilizzati per il suo calcolo, e quindi varia da inquinante a inquinante). È stato possibile solo assegnare un codice di qualità del dato (da 1, dato migliore, a 5, dato peggiore) per ogni singolo dato emissivo ma non è stato possibile quantificare correttamente un errore percentuale sul valore di emissione.

**M7**

La valutazione delle emissioni da traffico veicolare sono state effettuate utilizzando il sistema INEMAR che implementa la metodologia di calcolo messa a

punto nel modello COPERT (COMputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) nell'ambito del progetto CORINAIR (Coordination Information AIR).

Tale metodologia si basa su specifici fattori di emissione espressi in funzione della categoria veicolare, del tipo di combustibile utilizzato e della velocità di viaggio.

Nell'ambito di Monitor le emissioni da questo settore sono state considerate lineari. Le emissioni lineari sono le emissioni derivanti dal traffico che si verifica su tratti stradali definiti e vengono stimate sulla base del numero di passaggi veicolari sui diversi archi della rete (o grafo). Le incertezze riguardano la ricostruzione del parco veicolare circolante, i fattori di emissione, le velocità. Secondo il giudizio di esperti di settore le incertezze per queste tipologie di modelli si attestano attorno al 30%.

In aggiunta va però considerata l'incertezza relativa alla reale conoscenza del traffico in un dominio di piccole dimensioni, che rende difficile la stima dell'incertezza composta. Inoltre, i flussi di traffico per i diversi domini, utilizzati per il calcolo delle emissioni, sono stati forniti da diversi Enti e sono di diversa natura (esempio: misure dirette su vari archi temporali, output di modelli di viabilità, ecc.) ma non ci sono state fornite indicazioni di incertezza sugli stessi.

**M8**

Per il settore M8 **sono state considerate unicamente le emissioni dovute ai mezzi agricoli**. Poiché il dato dei consumi a livello provinciale è abbastanza certo (fonte dati ufficio regionale "Servizio aiuti alle imprese") le maggiori incertezze derivano dall'utilizzo di proxy per la distribuzione spaziale delle emissioni nei domini locali e ai fattori di emissione. Non è stato possibile valutare quantitativamente tale incertezza ma, da colloqui con esperti del settore, è presumibile che si possa attestare a valori elevati (probabilmente in classe D rispetto alla scala da A-E dell'Atmospheric Emission Inventory Guidebook (EEA, 1999) con tipici intervalli di errore che possono raggiungere il 300%).

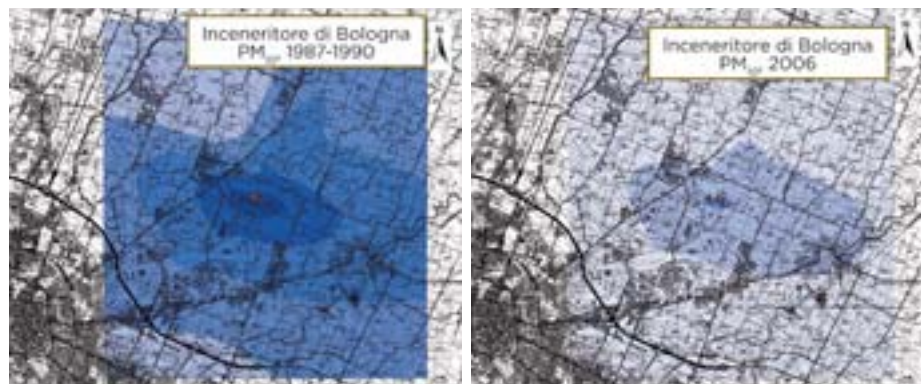
**M10**

Per il settore M10 **sono stati valutati unicamente gli allevamenti animali**. Non è stato possibile quantificare un valore di incertezza su tali emissioni.

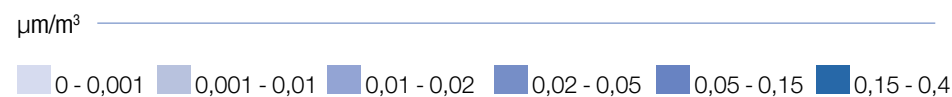
### Azione 3. Applicazione del modello ADMS-Urban alle aree della regione Emilia-Romagna interessate dagli impatti degli inceneritori RSU

Per questo lavoro è stato effettuato un uso “non convenzionale” della modellistica.

Infatti, solitamente Adms-Urban viene utilizzato per valutare differenti scenari ambientali del tipo “what if” e per valutare lo stato ambientale di specifiche zone urbane, previa “taratura” del modello, cercando cioè di assicurare il più possibile l’uguaglianza fra i valori simulati e quelli misurati da rilevazioni ambientali.



**Mappe di ricaduta degli inquinanti.** Le mappe mostrano i valori medi annuali di ricaduta al suolo del  $PM_{10}$  emesso dall’inceneritore del Frullo di Granarolo dell’Emilia (BO), nel periodo 1987-1990 (a sinistra) e nel 2006 (a destra), in seguito al rinnovamento dell’impianto.



Gli obiettivi di questa azione sono i seguenti:

- realizzazione delle simulazioni modellistiche nelle aree prossime agli inceneritori, relativamente a tutte le fonti le cui emissioni sono state studiate nella Az.2; inquinanti modellizzati:  $NO_x$  e  $PM_{10}$  (si assume “polveri totali”= $PM_{10}$ );
- realizzazione delle simulazioni modellistiche delle ricadute degli inceneritori (solo camino) presenti negli anni recenti in Emilia-Romagna; inquinanti mo-

dellizzati:  $NO_x$  e  $PM_{10}$  (si assume “polveri totali”= $PM_{10}$ );

- realizzazione delle simulazioni modellistiche delle ricadute degli inceneritori (solo camino) presenti in passato nella regione Emilia-Romagna; inquinanti modellizzati  $PM_{10}$  (si assume “polveri totali”= $PM_{10}$ ).

La scelta dell’inquinante “polveri” è dovuta alla difficoltà di reperimento dei dati di diverse specie chimiche per tutte le fonti del dominio e al fatto che tale inquinante può essere considerato come tracciante di altre sostanze che vengono in massima parte ritrovate sul particolato (molti metalli e sostanze organiche pericolose per la salute).

Lo scopo delle simulazioni è stato quello di avere un quadro geografico delle ricadute degli inquinanti, in un dominio di una estensione tale da includere al suo interno un quadrato di 8 Km di lato, centrato sul camino dell’inceneritore. La circonferenza di raggio 4 km, inscritta in tale quadrato, sarà l’area di interesse epidemiologico (LP3-LP4). La definizione del dominio di calcolo ADMS-Urban si appoggia sui seguenti criteri operativi:

- inclusione delle aree industriali, autostrade e strade di grande viabilità;
- inclusione delle aree urbane (in particolare siti sensibili quali ospedali, scuole, residenze per anziani, parchi giochi, ecc);
- esclusione di ampie aree disabitate (mare);
- esclusione di aree a orografia complessa, compatibilmente con le potenzialità del modello di dispersione utilizzato;
- maggiore estensione delle direzioni prevalenti notturne del vento, capaci di generare più di sovente fenomeni di pennacchio “piatto”.

L’Azione 3 è stata in stretta comunicazione a doppio senso con l’Azione 2, in quanto il raffinamento della qualità delle mappe è collegato al grado di qualità di conoscenza delle emissioni del dominio di calcolo modellistico.

Sono stati studiati i migliori criteri di rappresentazione delle emissioni all’interno del modello, con particolare riguardo alla geometria degli emettitori e alla modulazione temporale delle emissioni stesse.

Inoltre è stato definito quale input meteorologico si dovesse utilizzare per la migliore rappresentatività della simulazione, soprattutto per le simulazioni del passato, per le quali non erano disponibili serie storiche di dati orari meteorologici. A questo riguardo è stato scelto di mantenere scollegato il database meteo dal database emissivo e sono stati utilizzati database formati da 12 mesi consecutivi liberi da eventi “anomali” e provenienti dalla migliore fonte

di dati, disponibili per i diversi territori di studio. Le fonti di dati meteorologici sono state: il preprocessore Calmet, il dataset Lama o le centraline meteo sul territorio.

Per gli studi epidemiologici sono state eseguite circa 200 mappe di simulazione sulle quali sono state evidenziate le aree di ricaduta degli inquinanti emessi in periodi diversi durante le attività degli impianti. **Lo scopo primario della Azione 3, in concerto con l’Azione 2**, è stato quello di assicurare criteri omogenei di modellizzazione per tutti gli inceneritori e di consegnare agli epidemiologi una base sulla quale effettuare le loro valutazioni.

*L’analisi delle mappe del solo inceneritore ha mostrato un trend temporale decrescente della ricaduta sul territorio, mano a mano che le tecnologie di abbattimento aumentavano di efficacia.*

#### Azione 4. Sviluppo di sistemi modellistici avanzati per la valutazione di situazioni complesse.

##### Obiettivi

- Messa a punto di uno strumento modellistico per lo studio delle ricadute di inquinanti primari in prossimità di una sorgente emissiva, anche in condizioni orograficamente e meteorologicamente complesse.
- Supporto all’interpretazione dei dati ottenuti dal monitoraggio del *Frullo* (Granarolo, BO).

##### Descrizione delle attività

L’azione si articola nelle seguenti attività: (1) rassegna dei modelli esistenti e selezione del modello; (2) acquisizione e sviluppo del modello; (3) sviluppo dell’interfaccia meteo; (4) formazione degli operatori ARPA per l’applicazione del modello. Infine si è anche effettuata l’applicazione del modello all’inceneritore del *Frullo*, a supporto dell’interpretazione dei dati misurati (supporto Azione 7).

Prendendo come riferimento la rassegna di modelli resa disponibile dal progetto COST 728 (progetto europeo di coordinamento tecnico-scientifico per il miglioramento dei modelli meteorologici a mesoscala, orientato ad applicazioni sulla dispersione di inquinanti in atmosfera) e alcune indicazioni avute

da tecnici e ricercatori, si è stilata una lista di strumenti modellistici candidati. Di ciascuno dei modelli è stata valutata l’adeguatezza per i nostri scopi, cioè il rispetto dei seguenti requisiti:

- focus sull’area di ricaduta in prossimità della sorgente emissiva (0,1 ÷ 10 km);
- capacità di simulare accuratamente le ricadute in condizioni meteo non stazionarie e con calme di vento;
- disponibilità di una versione di test.

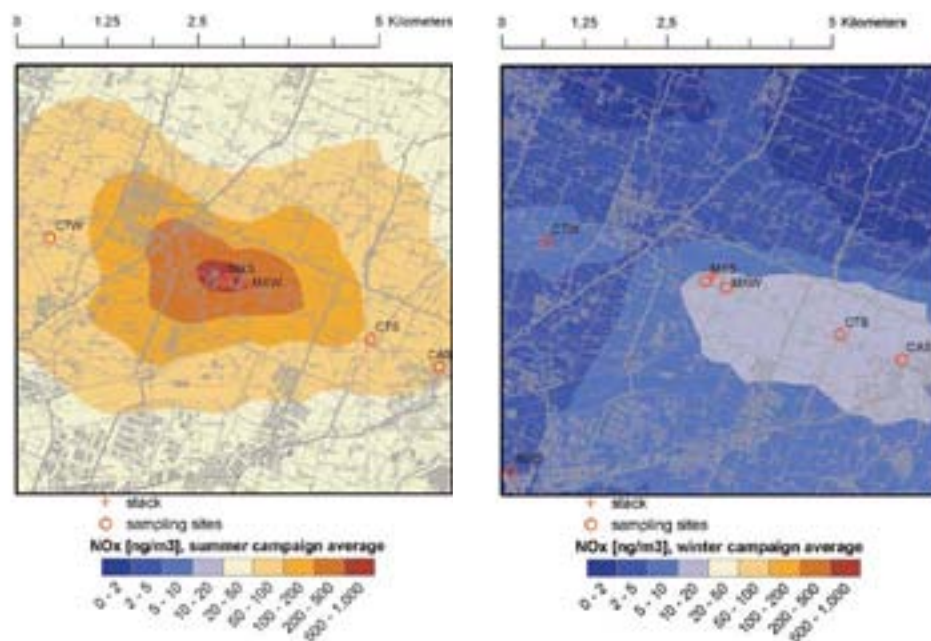
Dalla rassegna è stato scelto il modello Lapmod, che è un modello lagrangiano a particelle, tridimensionale e non stazionario. Ciò significa che l’emissione inquinante viene frammentata in una serie di porzioni dette “particelle”, di ciascuna delle quali viene seguito il percorso nell’atmosfera, determinato dai venti e dalla turbolenza che essa incontra nel proprio percorso. Lapmod è utilizzato da JRC-UE e ISPRA per la gestione delle emergenze nucleari.

##### Applicazione al caso dell’inceneritore del *Frullo*

Sono stati simulati solo effluenti gassosi e non polveri, per i periodi delle campagne (in quanto, a queste scale, il comportamento degli aerosol, in termini diffusivi, può essere assimilato a quello di un gas). Il dato emissivo, di velocità e di temperatura dei fumi è su base semioraria ed è stato ottenuto a partire dai valori di controllo SME.

##### La simulazione estiva

Le isolinee di concentrazione media hanno una forma leggermente allungata secondo le direzioni prevalenti dei venti, cioè parallelo all’asse appenninico. Tuttavia vi sono anche ricadute associabili a venti provenienti dalla pianura a nord e dalla collina a sud. La zona di massima ricaduta include l’impianto stesso. Ciò suggerisce che le concentrazioni più elevate al suolo corrispondano a condizioni atmosferiche di vivace rimescolamento verticale e venti deboli, o calma di vento.



Concentrazioni medie di NO<sub>x</sub> calcolate per il periodo della campagna estiva (a sinistra) e per il periodo della campagna invernale (a destra), calcolate in prossimità dell'impianto di incenerimento.

### La simulazione invernale

Come in estate, anche in inverno le isolinee di concentrazione assumono una forma oblunga parallela all'asse appenninico. In questo caso prevalgono però le ricadute associate ai venti provenienti dai quadranti occidentali, rispetto alle ricadute associate ai venti orientali. L'area di massima ricaduta include l'impianto stesso, ma stavolta si allunga fino a lambire l'insediamento urbano di Castenaso. Si nota la quasi totale assenza di ricadute nella pianura a nord e nord-est dell'impianto, associabili a venti provenienti dalla collina.

### Conclusioni

Gli obiettivi dell'azione, scelta e messa a punto del modello, formazione del personale Arpa, sono stati raggiunti.

Il modello lagrangiano è stato poi applicato alle campagne di misura Monitor, per simulare le ricadute dell'inceneritore del Frullo. I risultati confermano le conoscenze ottenute in via preliminare dal modello ADMS-Urban, ovvero che

gli impatti più marcati (in termini di concentrazioni in atmosfera) sono in prossimità dell'impianto, nella stagione estiva, nelle ore centrali della giornata. Inoltre l'analisi delle correlazioni tra gli andamenti simulati da Lapmod nei diversi punti di campionamento, conferma la bontà della scelta dei Siti di prelievo precedentemente effettuata mediante ADMS-Urban.

**Azione 5. Campionamento di aerosol per la speciazione e il conteggio del numero di particelle rispetto alle loro dimensioni**

**Azione 6. Analisi chimico-fisiche relative ai campioni di aerosol**

**Azione 7. Analisi ed elaborazione dati e reportistica**

### Campionamento ed analisi

Le campagne di monitoraggio ambientale sono state due: la campagna estiva che chiameremo S (da Summer) e la campagna invernale che chiameremo W (da Winter). Ogni campagna in realtà è costituita da diverse campagne sovrapposte. PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>1</sub> costituiscono il nucleo centrale delle campagne stesse, in quanto sono stati raccolti un numero considerevole di campioni, sia per la valutazione gravimetrica che per le svariate valutazioni chimiche (illustrate nel dettaglio più avanti) che hanno portato alla speciazione chimica del particolato. A queste campagne, che chiameremo "principali", si sono affiancate parallelamente altre campagne "minori" per numero di campioni, ma ugualmente importanti. L'analisi dei dati è stata condotta con criteri differenti per le campagne "principali" rispetto alle campagne "minori" in quanto il flusso di dati era notevolmente differente: per le campagne principali i dati sono stati analizzati sia con metodi univariati che con metodi multivariati.

Di seguito sono elencati i punti di monitoraggio. Max1 e Max2 e i relativi controlli sono stati definiti secondo la metodologia descritta nella Linea Guida elaborata tramite l'Azione 1. I Punti di prelievo "massimo del dominio" e "minimo del dominio" si riferiscono a zone definite come tali dalla simulazione ADMS "tutte le fonti". I periodi di campionamento sono stati: 2 giugno - 24 luglio 2008 e 14 gennaio - 13 marzo 2009.

| Punto di indagine      | Tipologia di campioni prelevati | Comune    | Nome breve | Tipologia del sito di prelievo          |
|------------------------|---------------------------------|-----------|------------|---|
| 1 Frullo Est Supersite | PTS-Puf, PM2.5, PM1             | Granarolo | MXW        | zona massimo ricaduta inceneritore-max1 |
| 2 Calamosco            | PTS-Puf, PM2.5, PM1             | Bologna   | CTW        | controllo del max1                      |
| 3 Pianeta              | PTS-Puf, PM2.5, PM1             | Bologna   | MXD        | zona massimo del dominio                |
| 4 Margherita           | PM2.5                           | Bologna   | GMA        | area urbana                             |
| 5 Veduro               | PM2.5                           | Castenaso | MND        | zona minimo del dominio                 |
| 6 Frullo Ovest         | PM2.5                           | Granarolo | MXS        | zona massimo ricaduta inceneritore-max2 |
| 7 Frullo 19 – F19      | PM2.5                           | Castenaso | CTS        | controllo del max2                      |
| 8 Castenaso            | PM2.5                           | Castenaso | CAS        | area suburbana                          |
| 9 S. Pietro Capofiume  | PM2.5                           | Molinella | SPC        | area rurale                             |

PTS=Particolato Totale Sospeso; PUF=spugna poliuretana (vedi poi); PMx=Particolato di dimensione inferiore a x µm

I campioni sono stati raccolti utilizzando strumenti Skypost per i PM 2.5 e PM 1 (filtro 47mm, fibra di quarzo) e strumenti EchoHiVol ad alto volume (filtro 102 mm, fibra di vetro e PUF). I campioni Skypost sono tutti di 24 h e una volta effettuata la gravimetria, le indagini chimico-analitiche sono state condotte su due campioni di 24 h (48 h consecutive), a parte i campioni PM2.5 provenienti da MXW, che sono stati invece analizzati su singoli filtri di 24h. I campioni di alto volume sono stati orientati alle analisi dei soli microinquinanti organici Diossine e PCB. Durante le due campagne, sono stati raccolti in totale 771 campioni. Per PM1 e PM2.5, i campioni sono stati divisi in quattro aliquote, destinate ad analisi, secondo il seguente schema:

1. Arpa: metalli totali
2. Arpa: microinquinanti organici.
3. Unibo (Univ. di Bologna) Facoltà di Chimica Industriale: carbonio totale e idrosolubile
4. Unibo Facoltà di Scienze (Chimica): dissoluzione in acqua, analisi anioni e cationi, invio aliquota di soluzione a Unife (Università di Ferrara) Facoltà di

Scienze (Chimica) per metalli (frazione idro-solubile) e microinquinanti organici polari.

Per PTS-PUF i campioni sono stati inviati allo stesso laboratorio Arpa dei microinquinanti organici per le analisi di diossine e policlorobifenili.

### Elaborazione dei dati sperimentali

Lo scopo delle campagne di monitoraggio è stato quello di verificare se vi siano differenze significative fra i valori analitici registrati nelle differenti Stazioni, sia a livello quantitativo, misurando i diversi valori di polveri di diversa dimensione presente nelle nove stazioni, sia a livello quali/quantitativo, effettuando analisi di speciazione delle sostanze presenti sul particolato raccolto.

### Gravimetrie

Per valutare la significatività delle differenze tra i siti, si è utilizzato il t-test per dati appaiati tra tutte le coppie di siti. Intervallo di confidenza scelto: 95%.

A conclusione di queste analisi statistiche possiamo dire che i siti sono tutti non significativamente dissimili, dal punto di vista della polverosità PM2.5, tranne il sito Giardini Margherita (GMA) che nella prima campagna (S) si differenzia solo dal sito Frullo Est (MXW), mentre nella seconda campagna (W) si differenzia da tutti i siti di monitoraggio. Frullo Est (MXW) ha il valore medio massimo, e Giardini Margherita ha il valore medio minimo, per entrambe le campagne. Sono da sottolineare gli alti valori di coefficiente di correlazione fra tutti i siti, segno anch'esso del fatto che gli andamenti di concentrazione di polveri potrebbero essere in massima parte guidati da eventi di scala più elevata rispetto a quella delle campagne. Il fatto che GMA mantenga valori mediamente più bassi, seppur ben correlati con tutti gli altri siti, fa pensare che sia sotto l'influenza di una micrometeorologia peculiare, capace di diluire il tenore di polverosità.

La campagna invernale (W) registra valori medi di polverosità più elevati rispetto la campagna estiva (S), e questo è un comportamento atteso, in quanto l'inquinamento da polveri è più critico nella stagione fredda. Per quanto riguarda il PM1 non si possono distinguere con certezza i diversi siti. Gli indizi porterebbero a identificare il sito Pianeta (MXD) come più impattato di polveri fini per la stagione invernale, ma non è stato possibile evidenziare con l'indagine gravimetrica una qualsiasi differenza per questa granulometria.

## Speciazioni chimiche

Per valutare le differenze dei tipi di inquinanti presenti sul particolato raccolto, sono stati condotti studi sia con la statistica univariata, sia ricercando eventuali correlazioni con la ricaduta dell'inceneritore calcolata per via modellistica (Lapmod, ADMS). Le conclusioni di queste indagini risultano però non del tutto risolutive. Occorre infatti tenere presente che la quantità di polveri in uscita dall'inceneritore è talmente bassa da aver costretto la Linea Progettuale 1 a collezionare campioni di 48h consecutive direttamente in uscita al camino, per potere raccogliere campione sufficiente alle analisi chimiche. Per quanto riguarda l'aria ambiente esiste il problema di collezionare campioni che sono la somma di svariate sorgenti, non ultime le polveri che viaggiano da lontano e/o contribuiscono alla polverosità di fondo, polveri che hanno subito trasformazioni chimico-fisiche durante il tragitto sorgente-recettore, polveri generate chimicamente da reazioni in atmosfera.

Per approfondire ulteriormente il problema sono state quindi adottate tecniche statistiche multivariate: analisi delle componenti principali (PCA), del clustering K-means nello spazio delle componenti principali e del Source Apportionment sul sito MXW.

I gruppi di variabili analizzati separatamente in PCA sono stati:

- Metalli idrosolubili
- Ioni, carbonio totale e solubile
- Alcani a catena lineare
- IPA e nitro-IPA

Per tutti i gruppi sopra menzionati, le variabili originali prese in considerazione sono state quelle sufficientemente popolate di dati: sono stati inclusi nella analisi statistica solo quegli analiti che presentavano un numero di analisi eccedenti il LOD (Limit of Detection) non inferiore al 75% dei campioni analizzati. Seguono: una veloce carrellata descrittiva degli inquinanti analizzati per le campagne principali e le conclusioni di queste campagne nel loro complesso.

### Metalli idrosolubili

I metalli idrosolubili presi in considerazione sono elencati nella successiva tabella. Per quanto riguarda il vanadio (V), nella campagna invernale (W) esso non era presente in un numero sufficiente di analisi superiori al LOD; il cromo (Cr)

è stato invece scartato per la campagna estiva (S) in quanto un lotto di filtri è risultato differente da tutti gli altri e contaminato proprio da questo elemento.

| Variabile | S | W | Possibili sorgenti generiche (da letteratura)                        |
|-----------|---|---|--|
| Ni        | X | X | Processi incenerimento, emissioni autoveicoli                        |
| Cu        | X | X | varie sorgenti tra cui incenerimento                                 |
| Mn        | X | X |  |
| Cd        | X | X | Processi industriali   |
| Pb        | X | X |  |
| Al        | X | X |  |
| Fe        | X | X | Erosione suoli, uso combustibili fossili<br>produzione leghe ferrose |
| Sb        | X | X |  |
| V         | X |   | Emissioni autoveicoli  |
| As        | X | X |  |
| Sr        | X | X |  |
| Cr        |   | X | Processi industriali   |

Lista delle variabili dei metalli costituenti il particolato ed estratti in acqua pura, considerate per le due campagne Estiva (S) ed Invernale (W). Il simbolo X definisce la presenza dell'analita nella elaborazione dei dati per la rispettiva campagna.

Le sorgenti di questi inquinanti potrebbero anche essere in località esterne al territorio da noi considerato e trovarsi su polveri trasportate da fuori dominio dei siti di raccolta. Esiste infine una grande molteplicità di differenti sorgenti che possono contribuire alla presenza di uno stesso metallo.

### Ioni, carbonio totale e idrosolubile

Le variabili di partenza prese in considerazione per questo gruppo sono i seguenti: ione ammonio, ione potassio, ione cloruro, ioni nitrito e nitrato, ione solfato, succinato, ossalato. Carbonio Totale e Carbonio Totale idrosolubile.

Analogamente a quanto è stato fatto per i metalli solubili, anche in questo caso è stato applicato il criterio generale per il quale si sono considerate solo quelle variabili presenti in elevata percentuale al di sopra del LOD, in tutti i siti esaminati. Per questo motivo non è stato preso in considerazione per la campagna W

l'anione succinato. Il carbonio organico idrosolubile è solitamente correlato alla combustione delle biomasse, ma alla sua presenza possono anche contribuire fenomeni secondari non ancora ben chiari dalla letteratura di settore.

### Alcani a catena lineare

Gli alcani sono composti organici costituiti solamente da carbonio e idrogeno e hanno la seguente formula bruta:  $C_nH_{(2n + 2)}$ .

Nell'ambito del Progetto sono stati studiati solo gli alcani lineari o normali alcani (n-alcani), che per semplicità vengono identificati dalla sola lunghezza della catena di atomi di carbonio, indicati con l'etichetta  $C_n$ .

Queste sostanze, di origine primaria, sono solitamente presenti in atmosfera nell'intervallo  $C_{14}$ - $C_{35}$  e si possono trovare sia in fase gassosa che adese al particolato. Sono composti molto stabili dal punto di vista chimico, non sono tossici, ma sono comunque studiati in quanto possono fornire indicazioni sul grado di naturalità del sito di prelievo. Infatti possono derivare sia da sorgenti antropiche (principalmente da emissioni di autoveicoli o, più in generale, da combustioni incomplete), sia da sorgenti naturali (ad es. cere di piante vascolari, fonti microbiche, ecc.).

Di seguito sono riportate le classificazioni della provenienza biogenica (B), antropogenica (A) o mista (M) degli alcani presenti sul particolato proveniente dai diversi Siti di prelievo.

| Stazione | Particolato | S          | W |
|----------|-------------|------------|---|
|          |             | CONTRIBUTO |   |
| MXW      | PM2.5       | M          | M |
|          | PM1         | M          | M |
| MXS      | PM2.5       | M          | M |
| CAS      | PM2.5       | M          | A |
| CTS      | PM2.5       | M          | M |
| MXD      | PM2.5       | M          | M |
|          | PM1         | M          | M |
| CTW      | PM2.5       | B          | M |
|          | PM1         | M          | M |
| MND      | PM2.5       | M          | M |
| GMA      | PM2.5       | M          | B |

### Idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e Nitro-IPA (N-IPA)

Il termine IPA sta ad indicare una classe di composti organici formati da carbonio e idrogeno, caratterizzati dalla presenza di due o più anelli "aromatici" condensati fra loro. L'IPA più semplice di tutti è il naftalene, formato da due soli anelli aromatici condensati.

Gli IPA sono suddivisi genericamente in "leggeri" e "pesanti" in funzione del loro peso molecolare o, più semplicemente, dal numero di anelli che li costituiscono. Gli IPA si trovano nel carbone e, in generale, in tutti i prodotti petroliferi, soprattutto nelle frazioni più pesanti di distillazione del petrolio, come il gasolio e l'olio combustibile, ma sono sostanze che possono essere prodotte in tutte le combustioni incomplete dei composti organici. Le principali sorgenti di IPA in atmosfera sono le caldaie alimentate con combustibili solidi come le biomasse o con olii pesanti, gli autoveicoli a benzina e gasolio, alcune attività industriali come la lavorazione del carbon fossile, della grafite e le cokerie. Insieme agli IPA sono stati analizzati anche alcuni nitro-derivati, chiamati Nitro-IPA (N-IPA). Queste molecole sono caratterizzate dalla presenza di un gruppo nitro  $-NO_2$  legato ad un atomo di carbonio. Sono molecole che possono essere immesse direttamente in atmosfera durante una combustione o formarsi per via fotochimica a partire da ossidi di azoto, IPA e radiazioni solari.

Gli IPA e i N-IPA sono tossici e implicati nella formazione di svariati tumori.

Per le campagne Monitor sono stati analizzati sulle polveri 27 IPA e 12 N-IPA differenti, tra cui anche i principali riconosciuti da IARC come sicuramente o probabilmente cancerogeni.

Sono inoltre state effettuate alcune simulazioni *ad hoc* per stimare le quantità di questi composti rilasciate al suolo dall'inceneritore, a partire dalle misure al camino effettuate dalla Linea Progettuale 1. Il confronto fra la concentrazione misurata in aria e quella stimata dal suolo dal modello ADMS-Urban, relativamente allo stesso periodo temporale, porterebbe ad una stima del contributo dovuto al camino dell'impianto del tutto trascurabile, inferiore al 2%.

### Conclusioni campagne "principali"

In entrambe le campagne, il sito urbano di **Margherita** sembra avere quantità minori di inquinanti rispetto agli altri siti; durante l'inverno, però, si contraddistingue per livelli superiori alla media di alcani a catena corta  $<C_{20}$ , di probabile origine antropica (traffico veicolare).

**Veduro** nella campagna estiva si distingue dagli altri per quanto riguarda gli organici: ha valori minori di carbonio totale, alcani e IPA quindi si conferma in tal senso come minimo del dominio.

Al contrario, in inverno, l'unica classe di composti che lo contraddistingue è quella degli alcani: concentrazioni superiori alla media di alcani a catena lunga suggeriscono fattori legati al riscaldamento.

Nella campagna estiva, elevate concentrazioni di carbonio organico contraddistinguono Pianeta e **Frullo Est**: nel primo sito, sono importanti gli IPA, mentre nel secondo gli alcani. Nella campagna invernale, **Pianeta** è sempre raggruppato insieme ad altri siti, senza mai mostrare caratteristiche peculiari che lo contraddistinguono come massimo del dominio.

Nella campagna invernale, in **Calamosco** si sono misurati livelli di Idrocarburi Policiclici Aromatici maggiori rispetto tutti gli altri siti, soprattutto nel PM2.5 in cui prevalgono gli IPA più pesanti, mentre nel PM1 quelli più leggeri. Nessuno di questi aspetti è emerso nell'elaborazione dei dati della campagna estiva.

Nella campagna invernale, Frullo Est (PM1) nella maggioranza dei casi registra concentrazioni superiori alla media di diversi IPA ed alcani di media lunghezza (C21-C23).

Nel Supersito Frullo Est (PM2.5) durante l'estate si registrano i livelli massimi di carbonio totale, di alcani a catena lunga, e di alcuni IPA, qui presenti in concentrazioni maggiori rispetto gli altri siti ad esclusione di **Frullo Ovest**, che presenta comunque concentrazioni di N-IPA inferiori. Durante l'inverno, **Frullo Est** (PM2.5) è ancora il massimo per quanto riguarda il contenuto di carbonio, ma gli altri analiti sopra menzionati registrano concentrazioni comparabili con quelle misurate altrove; anche in Frullo Ovest le concentrazioni invernali di NIPA sono simili agli altri siti.

Riassumendo ulteriormente, possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- In generale, i siti che più spesso hanno mostrato caratteristiche peculiari rispetto agli altri sono Giardini Margherita e Veduro in entrambe le stagioni, ai quali si aggiungono Pianeta e Frullo Est (PM2.5) nella sola campagna estiva, Calamosco e Frullo Est (PM1) nella sola campagna invernale;
- nella campagna invernale, a Calamosco sono presenti in maggiori quantità, rispetto al sito Frullo Est (PM2.5) analiti organici rispetto a quanto osservato nella campagna estiva.

Considerando l'intero arco temporale di campionamento (2 giugno - 24 luglio 2008 e 14 gennaio - 13 marzo 2009), le sorgenti di emissione del particolato PM2.5 raccolto a Frullo Est sono state classificate, in ordine decrescente di importanza:

- solfato e nitrato di ammonio e di potassio → particolato secondario inorganico
- composti organici soprattutto IPA → origine veicolare
- carbonio organico solubile → fenomeni ossidativi di composti organici

### Diossine, furani e policlorobifenili

Diossine, furani e policlorobifenili (PCB) sono stati analizzati sul particolato totale sospeso (PTS) anziché sulle frazioni PM2.5 e PM1, utilizzando i campionatori ad alto volume. Questa scelta è stata dettata dall'esigenza di raccogliere una quantità più elevata di campione da trattare per la chimica analitica strumentale e riuscire a quantificare anche piccole quantità di questi composti. Il campionamento è stato effettuato su filtri di diametro 102 mm a valle dei quali è stata posta una cartuccia di vetro con all'interno un PUF, cioè un cilindro di schiuma poliuretana, per assicurare la cattura dei vapori organici.

### Diossine e furani

Il termine generico "diossine" è riferito a 210 composti organici aromatici clorurati contenenti ossigeno, divisi in due famiglie: PCDD o poli-cloro-dibenzo-diossine (le diossine propriamente dette) e PCDF o poli-cloro-dibenzo-furani, altrimenti chiamati "furani".

Poiché le diossine hanno diversa tossicità, ma producono effetti tossici simili, è stato introdotto il concetto di tossicità equivalente (TEF). I TEF vengono calcolati come valori relativi al congenere più tossico.

In generale, le diossine sono sostanze chimicamente molto stabili e liposolubili: esse tendono, nel tempo, ad accumularsi nei tessuti degli organismi viventi.

È importante rimarcare che le diossine che si trovano in ambiente **non vengono prodotte deliberatamente** ma sono particolari sottoprodotti di alcuni processi chimici e/o di combustione.

Di seguito si riportano i risultati delle campagne Monitor e in particolare alcuni indicatori statistici delle analisi chimiche effettuate. I valori di concentrazione sono espressi sia in I-TEQ che in TEQ-WHO-2005 e le analisi sono state effettuate su tutti i 17 congeneri maggiormente tossici.

| PCDD/DF[fg/m <sup>3</sup> ] |   | I-TEQ   |        |       | WHO-2005 |        |       |
|-----------------------------|---|---------|--------|-------|----------|--------|-------|
|                             |   | Massimo | Minimo | Media | Massimo  | Minimo | Media |
| Frullo Est (MXW)            | S | 24.89   | 3.70   | 7.84  | 27.19    | 4.06   | 8.41  |
| Pianeta (MXD)               | S | 13.91   | 3.53   | 6.99  | 14.90    | 3.51   | 7.64  |
| Calamosco (CTW)             | S | 15.34   | 5.24   | 8.12  | 15.61    | 5.78   | 8.74  |
| Frullo Est (MXW)            | W | 28.06   | 4.83   | 10.61 | 28.21    | 4.88   | 10.86 |
| Pianeta (MXD)               | W | 51.55   | 4.24   | 17.27 | 41.72    | 4.30   | 16.29 |
| Calamosco (CTW)             | W | 50.66   | 4.40   | 15.64 | 50.86    | 4.60   | 16.12 |

Parametri statistici di PCDD/PCDF misurati sui campioni Monitor per le due campagne S e W

Per una corretta valutazione dei dati, si ricorda che OMS ha rilevato una concentrazione media europea, nelle aree urbane, di circa 100 fg/m<sup>3</sup>-TEQ.

Concentrazioni superiori a 300 fg/m<sup>3</sup>-TEQ sono un indicatore di fonti di emissioni locali che devono essere identificate e controllate (Air Quality Guidelines for Europe - WHO (2000)). Considerati i valori indicati dall'OMS, i valori registrati durante le due campagne Monitor si possono giudicare bassi.

Il principale costituente della miscela di diossine analizzate è OCDD, una delle meno pericolose (in alcuni campioni supera il 76%). Secondo la letteratura questo congenere è tipico di un processo generico di combustione, come la combustione del legno e delle biomasse.

Dall'analisi in emissione e/o dalla classificazione di letteratura dei profili di contaminazione<sup>1</sup> di PCDD/PCDF si possono ottenere potenziali informazioni sulle sorgenti. Tali profili non possono essere considerati come "rappresentazioni esatte" a causa delle naturali variabilità associate alle sorgenti di contaminazione.

Pur tenendo in considerazione queste limitazioni, osservando i profili di contaminazione nei diversi siti si giunge alla conclusione che le tre stazioni sono tra di loro molto simili e con profili non molto diversi né da quello emissivo dell'inceneritore né da quello del traffico dei veicoli a benzina.

## Policlorobifenili

Sugli stessi campioni (PTS-PUF) sono stati ricercati anche i Poli-Cloro-Bifenili (PCB). Questa classe di composti, a differenza delle diossine, sono molecole deliberatamente sintetizzate dall'uomo durante il secolo scorso, per vari scopi industriali. I PCB sono anch'essi composti aromatici e in particolare sono bifenili (due anelli benzenici collegati da un legame carbonio-carbonio), che hanno in comune alle diossine il fatto di essere variamente clorurati. In base alle posizioni del cloro nella molecola di bifenile si possono ottenere 209 congeneri, numerati da #1 a #209.

In Italia è stato regolamentato il commercio e l'uso dei PCB a partire dagli anni '80 e nel 2001 la Convenzione di Stoccolma ha vietato la produzione, l'uso e il rilascio di tutti i POPs (Persistent Organic Pollutants). Ciononostante queste molecole continuano a fare parte della nostra vita in quanto ne restano ancora grossi quantitativi in apparecchiature elettriche, in alcune plastiche, nei materiali da costruzione utilizzati negli edifici del secolo scorso e, ovviamente, nell'ambiente come inquinamento diffuso.

Tra i 209 congeneri dei PCB ne sono stati individuati 12 (inizialmente 13), le cui proprietà tossicologiche sono simili ai 17 congeneri delle diossine e per questo motivo vengono chiamati "diossinosimili", o PCB-DL.

È possibile dunque calcolare un TEF per PCB compatibile a quello delle diossine e valutare complessivamente la tossicità e il rischio.

Per quanto riguarda le analisi effettuate sui campioni Monitor, sono stati ricercati tutti i 12 PCB-DL, sui quali è stato possibile effettuare il calcolo del TEQ WHO-2005; inoltre sono stati ricercati anche altri congeneri PCB-NDL (non-DL) per una caratterizzazione ambientale più completa, per un totale di 28 congeneri. I congeneri più tossici, #126 e #169, non sono stati rilevati in nessun campione, mentre i congeneri più concentrati e ritrovati in tutti i campioni sono risultati il #118 e il #180. Nella tabella seguente sono riportati i parametri statistici delle concentrazioni rilevate nelle tre Stazioni oggetto di questo studio, per entrambe le campagne.

1. Il profilo di contaminazione è dato dal rapporto tra la concentrazione del congenere e quella del congenere a concentrazione più alta, normalizzato a 100.

| PCB totali [fg/m <sup>3</sup> ]<br>TEQ WHO (2005) |   | PCB-DL  |        |       | PCB-DL+NDL |        |       |
|---|---|---------|--------|-------|------------|--------|-------|
|   |   | Massimo | Minimo | Media | Massimo    | Minimo | media |
| Frullo Est (MXW)                                  | S | 0.43    | 0.10   | 0.21  | 119.6      | 17.0   | 59.4  |
| Pianeta (MXD)                                     | S | 0.39    | 0.09   | 0.21  | 110.1      | 17.0   | 50.0  |
| Calamosco (CTW)                                   | S | 0.29    | 0.06   | 0.20  | 89.7       | 15.2   | 42.3  |
| Frullo Est (MXW)                                  | W | 0.82    | 0.04   | 0.4   | 259.5      | 11.4   | 108.8 |
| Pianeta (MXD)                                     | W | 1.09    | 0.04   | 0.34  | 330.9      | 13.8   | 117.2 |
| Calamosco (CTW)                                   | W | 1.10    | 0.04   | 0.41  | 334.9      | 22.0   | 120.6 |

Parametri statistici di PCB misurati sui campioni Monitor per le due campagne S e W

Dai risultati delle analisi possiamo dire che i valori dei PCB-DL sono bassi e simili a quelli riscontrati per un fondo remoto italiano. I valori riscontrati nei tre siti non indicano rilevanti differenze sia nella campagna estiva che in quella invernale.

La differenza è invece fra le due campagne, in quanto i valori invernali sono più elevati di quelli estivi, un dato che ricalca l'andamento stagionale della concentrazione delle polveri atmosferiche.

Dall'osservazione dei profili di contaminazione si può concludere che per entrambe le campagne ed entrambi i tipi di profili (DL e DL+NDL) vi è un pattern molto simile, anche se la Stazione di Calamosco (CTW), per la sola stagione invernale, sembra essere leggermente differente.

Il profilo di contaminazione dei PCB è sostanzialmente simile per tutte le Stazioni e leggermente differente per quanto riguarda le emissioni dell'inceneritore.

## Mercurio

Il mercurio è presente in atmosfera principalmente in forma gassosa come mercurio elementare Hg(0) con valori di fondo che possono variare da 10<sup>-2</sup> a pochi ng/m<sup>3</sup>. L'insieme di tutte le forme gassose viene indicato come "Mercurio Totale Gassoso" (TGM).

Lo scopo di questa campagna di monitoraggio è stato quello di misurare i valori ambientali di TGM e confrontarli con i valori di fondo noti in contesti territoriali simili, per verificare se in prossimità dei nostri siti di misura fosse presente una sorgente rilevante di mercurio.

Sono state condotte due campagne di tre giorni ciascuna. La prima è stata eseguita in concomitanza al periodo della campagna polveri S, e la seconda nel periodo W, posizionando lo strumento di misura nelle tre Stazioni MXW, CTW e MXD per circa 24h per sito. Lo strumento utilizzato aveva un limite di rilevabilità pari a 10<sup>-1</sup> ng/m<sup>3</sup>.

Nelle tabelle seguenti sono riportati, in ordine, i parametri statistici descrittivi delle concentrazioni medie rilevate nella campagna S e nella campagna W ed infine alcune misure in territorio urbano, di fondo urbano, rurale-urbano e remoto (Dati DIIAR 2003-08), per confronto.

| Campagna estiva [ng/m <sup>3</sup> ] | Frullo Est (MXW) | Calamosco (CTW) | Pianeta (MXD) |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|---------------|
| Data                                 | 21/07/08         | 22/07/08        | 23/07/08      |
| n. ore                               | 23               | 24              | 23            |
| Media                                | 1.7              | 3.0             | 1.4           |
| Dev. Standard                        | 0.5              | 1.5             | 0.4           |
| Minimo                               | 1.2              | 1.3             | 0.9           |
| Massimo                              | 3.2              | 7.5             | 3.0           |

Statistica descrittiva delle misure di TGM della campagna S

| Campagna estiva [ng/m <sup>3</sup> ] | Frullo Est (MXW) | Calamosco (CTW) | Pianeta (MXD) |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|---------------|
| Data                                 | 19/02/09         | 18/02/09        | 20/02/09      |
| n. ore                               | 24               | 23              | 24            |
| Media                                | 3.6              | 3.6             | 4.0           |
| Dev. Standard                        | 1.7              | 0.5             | 0.7           |
| Minimo                               | 2.1              | 2.7             | 3.0           |
| Massimo                              | 9.3              | 4.9             | 6.6           |

Statistica descrittiva delle misure di TGM della campagna W

| Campagna [ng/m <sup>3</sup> ] | Primavera | Estate | Autunno | Inverno |
|-------------------------------|-----------|--------|---------|---------|
| MI - fondo urbano             | 4.0       | 1.7    | 3.7     | 6.3     |
| MI - nord ovest               | 3.8       | 1.5    | 3.7     | 4.4     |
| Val Posina (A)                | -         | 1.5    | -       | -       |
| Schio zona ind (B)            | -         | -      | -       | 3.3     |
| Schio                         | 1.7       | 2.0    | 3.0     | 3.7     |
| Monitor (C)                   | -         | 2.0    | -       | 3.7     |

Confronto tra i valori di Milano nord-ovest e Milano fondo urbano, Schio (VI) e Val Posina (VI), concentrazioni medie stagionali espresse in ng/m<sup>3</sup>. (A) sito remoto, (B) periodo festivo natalizio (2004), (C) valori medi sulle tre postazioni di misura del Progetto Monitor.

## SEM e TEM

Alcuni campioni di PM<sub>2.5</sub> sono stati analizzati in microscopia elettronica a scansione SEM-EDS dalla Sezione di Reggio Emilia di Arpa e in microscopia elettronica a trasmissione TEM dall'Università Ca' Foscari di Venezia. I campioni sono stati raccolti su filtri di policarbonato dall'Università di Bologna per mezzo di un Hydra a doppia testa (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>).

Lo scopo di questa indagine era conoscere la morfologia e la composizione elementare media delle particelle dell'aria ambiente nel sito MXW.

Il metodo di funzionamento, gli ingrandimenti e i campi di visione dei due strumenti sono alquanto differenti; gli strumenti osservano dunque particelle di differente dimensione geometrica e perciò i risultati verranno discussi separatamente, sebbene derivino dagli stessi campioni.

È da evidenziare invece, come aspetto comune alle due tecniche, la limitata porzione di filtro analizzata che implica una limitata rappresentatività e un aspetto puramente qualitativo delle analisi.

Il microscopio elettronico a scansione registra, nei campioni estivi, una alta percentuale di particelle inorganiche rispetto alle organiche; la dimensione prevalente di tutte le particelle osservate ha dimensione compresa fra 400 e 800 nm; nel caso delle particelle inorganiche è stato trovato, in aggiunta, un numero rilevante di particelle con dimensioni comprese fra 1000 e 1200 nm.

La campagna invernale mostra ancora una volta una predominanza di particelle inorganiche, seppur lieve. La maggior parte delle particelle è compresa, come nella campagna precedente, nel range di 400÷800 nm, ma contrariamente alla precedente campagna non sono presenti con la stessa frequenza le particelle con dimensioni comprese fra 1000 e 1200 nm.

Il microscopio elettronico a trasmissione ha la capacità di osservare particelle di dimensione molto inferiore al SEM. Per le due campagne, le indagini effettuate al TEM si sono basate complessivamente sul conteggio di 1550 particelle negli otto campioni S e 1270 negli otto campioni W. È doveroso segnalare che l'area ispezionata è di circa 1300 μm<sup>2</sup> (ovverosia  $1,3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>) e dunque le considerazioni non possono essere estese a tutto il campione. Infatti lo scopo di una analisi TEM non è la determinazione della densità delle particelle, bensì l'identificazione delle nanoparticelle che possono sfuggire al SEM o altre tecniche di indagine.

Le aree dei diversi campioni osservati con il TEM sono risultati nel complesso

abbastanza omogenee fra loro e anche fra le due campagne, con la differenza che nella campagna W l'unico metallo pesante trovato è stato il ferro, sotto forma principalmente di nanoparticelle o loro agglomerati, mentre per la campagna S in alcuni campioni si sono riscontrati anche nanoparticelle di cerio e rame. Soprattutto le particelle metalliche sono state rilevate in alcuni campioni sotto forma di nanoparticelle, per lo più al di sotto di 50 nm, o loro agglomerati.

## Acidi organici e zuccheri idrosolubili

### Campagna estiva

Nei siti MXD e CTS ci sono i composti più leggeri, tra C<sub>3</sub> e C<sub>9</sub>, segno di sorgenti primarie antropogeniche come i **mezzi di trasporto**. Invece in luglio si ha una concentrazione maggiore delle specie più pesanti, correlabili a **sorgenti biogeniche**.

Nel sito MND vi è una incidenza predominante dei composti più pesanti, legati a sorgenti biogeniche.

Nel sito MXW, si ha un andamento simile a quello del sito MND, inoltre si ha una crescita delle concentrazioni dei composti più pesanti, ed in particolare del Levoglucosano durante la fine del mese di luglio, probabilmente dovuto a fenomeni di **wood burning**, cioè incendi di sterpaglie.

### Campagna invernale

In generale le concentrazioni sono più elevate che in estate (circa il triplo).

Il sito MXD è quello che mostra la maggior concentrazione, ed in particolare delle componenti più leggere, probabilmente a causa della maggior presenza di fonti primarie, come il **traffico**.

Infatti in inverno aumentano in maniera sensibile i C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub> ed acido ftalico: l'aumento di concentrazione del C<sub>4</sub> indica un incremento dell'effetto del traffico veicolare (l'acido succinico è un prodotto di ossidazione di precursori derivanti dai combustibili fossili). Il levoglucosano, ritrovato anche nei campioni del periodo estivo, è un indicatore della combustione della vegetazione; nel periodo invernale diventa un **marker per il riscaldamento civile**: i siti urbani infatti mostrano in inverno un contributo decisamente maggiore di questo composto, rispetto al periodo estivo. Al contrario i siti rurali, dove in estate era stato rilevato il picco, durante il periodo invernale mostrano i valori minimi di levoglucosano.

### Monitoraggio del numero di particelle di aerosol

Nell'ambito della LP2 è stata studiata anche la distribuzione e la formazione di particelle ultrafini, definite come il particolato che ha dimensioni inferiori a 100 nanometri. Per la precisione sono state studiate la distribuzione dimensionale e la concentrazione numerica di particelle di aerosol atmosferico comprese tra 5.6 e 560 nm (particelle ultrafini (UFP) sono quelle comprese tra 5.6 e 99.6 nm; particelle non ultrafini (NoUFP) sono quelle comprese tra 99.7 e 560 nm).

È stato utilizzato uno spettrometro ad alta risoluzione per l'analisi dimensionale del particolato, che permette di ottenere una distribuzione dimensionale dell'aerosol sulla base della mobilità elettrica delle particelle.

Il monitoraggio è stato effettuato in cinque delle nove postazioni individuate per il Progetto, in periodi tra loro consecutivi e non del tutto sovrapposti alle campagne "principali". La postazione Pianeta (MXD) ha registrato la maggiore concentrazione di particelle per entrambe le campagne, mentre San Pietro Capofiume (SPC) e Giardini Margherita (GMA) i valori più bassi. Inoltre la distribuzione della concentrazione numerica di particolato nelle due frazioni dimensionali, presenta percentuali di UFP che vanno dal 77 al 92% del totale, con una concentrazione numerica media di particelle maggiore nei giorni lavorativi rispetto ai giorni di fine settimana. Infine, nelle postazioni Frullo Est (MXW), Calamosco (CTW) e Giardini Margherita (GMA) sono stati monitorati, contemporaneamente alla concentrazione numerica delle particelle, anche i valori di concentrazione in massa del particolato PM1 e PM2.5. I due set di dati sono stati messi in correlazione tra loro e il risultato è che per le particelle non ultrafini (NoUFP) si ha correlazione piuttosto elevata con l'andamento delle medie giornaliere del particolato, mentre la stessa cosa non succede con le particelle ultrafini (UFP). Si può quindi ipotizzare che le particelle non ultrafini possano avere una origine comune al particolato PM1 e PM2.5, simili meccanismi di accumulo e trasporto in atmosfera, e che su di esse possano agire allo stesso modo le variabili chimico fisiche dell'atmosfera. È stato possibile verificare la formazione di numerosi eventi di crescita, alcuni dei quali presumibilmente riconducibili ad effettivi episodi di formazione di nuovo particolato (nucleazione); tali fenomeni si sono osservati di frequente nel periodo estivo/primaverile con elevate temperature, maggiore radiazione solare e miglior rimescolamento dell'aria.

### Azione 8. Micrometeorologia e profili di concentrazione

In questo studio sperimentale sono state utilizzate tecniche avanzate per il controllo della qualità dell'aria integrando misure *in-situ* con misure remote sensing permettendo di ottenere una dettagliata analisi della distribuzione degli inquinanti sulle diverse scale spaziali e temporali.

Per quanto riguarda **le misure *in-situ*** l'analisi dei dati raccolti mostra la presenza di un significativo contributo antropico alle concentrazioni di particelle ultrafini ed ossidi di azoto. Si è osservato un andamento stagionale con concentrazioni maggiori durante la campagna invernale sia per quanto riguarda gli ossidi di azoto sia per quanto riguarda il numero di particelle. Sia le particelle sia gli ossidi di azoto hanno concentrazioni medie maggiori nei giorni feriali rispetto ai giorni festivi e sono caratterizzate dalla presenza di un pattern giornaliero con dei massimi la mattina presto (6-7) e la sera tardi (circa le 20), soprattutto per gli ossidi di azoto. Si osserva una certa variabilità del massimo serale, che è talvolta spostato verso la notte tardi ed in questo possono giocare un ruolo combinato sia le emissioni serali sia l'intrappolamento degli inquinanti nello strato limite stabile notturno. Il pattern giornaliero è significativamente diverso nei giorni festivi in cui si ha l'assenza della struttura di picchi appena menzionata. *Questo tipo di trend è compatibile con le emissioni delle attività urbane ed in particolare del traffico veicolare.*

Per quanto riguarda le misure **remote-sensing** il metodo applicato ha fornito mappe sulla distribuzione della concentrazione degli aerosol, all'interno del pennacchio, in tempi relativamente brevi e tali da essere più confidenti con le scale di turbolenza tipiche dell'atmosfera per le distanze prese in esame. SCOPO di questa attività era quello di parametrizzare la figura di dispersione del pennacchio della ciminiera dell'inceneritore, in termini di polveri, usando un MiniLIDAR (Light Detection And Ranging), una apparecchiatura che consente di ottenere la distribuzione spazio-temporale di diversi parametri atmosferici ai fini di studi meteorologici, climatologici ed ambientali. In associazione al MiniLIDAR è stato utilizzato uno spettrometro DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) che, raccogliendo la radiazione solare diffusa lungo diversi angoli di zenit, ha fornito set di misure da cui poter ricostruire la struttura del pennacchio in termini di spessori ottici dei gas.

La combinazione di entrambe le metodologie sperimentali (*in-situ* e remote-

sensing) con le simulazioni ottenute con il modello Lapmod ha permesso di evidenziare alcuni possibili contributi dall'impianto durante la stagione estiva.

*L'analisi delle condizioni di stabilità/instabilità dell'atmosfera ha evidenziato che tali episodi si verificano in periodi di instabilità, con un pennacchio soggetto a fasi discendenti ed ascendenti in accordo con la direzione dei flussi verticali turbolenti delle particelle ultrafini.*

Per quanto riguarda la campagna invernale i riscontri con le simulazioni Lapmod sono assenti e si hanno solo due possibili eventi di trasporto di inquinanti dall'impianto con un riscontro fra le misure di particelle ultrafini e misure di ossidi di azoto con la tecnica DOAS.

### Azione 9. Monitoraggio avanzato relativo al contenuto di metalli pesanti e microelementi nel sistema acqua-suolo-pianta

**Obiettivo** dell'azione era quello di valutare la ricaduta di Elementi Potenzialmente Tossici (EPT) sul suolo e su alcune specie vegetali, durante un periodo di monitoraggio di due anni, in alcuni dei punti di indagine già individuati: CTW (Calamosco), MXW (Supersito), GMA (Giardini Maragherita), MXD (Pianeta), MND (Veduro).

Per fare questo sono state condotte due attività in parallelo: la prima finalizzata a determinare la biodisponibilità degli EPT in un sistema suolo/pianta naturale; la seconda ad evidenziare l'effettiva ricaduta di EPT in un sistema suolo/pianta confinato.

*Attività 1:* sono stati effettuati campioni di suolo in profondità (70/80 cm) e campioni di suolo superficiali per poter ricavare l'indice di arricchimento superficiale degli inquinanti. Inoltre nei campioni superficiali sono stati determinati anche i parametri diossine e furani.

*Attività 2:* sono stati effettuati campioni di suolo e di vegetali "confinati" ogni sei mesi per due anni (per un totale di quattro repliche), in modo tale da poter valutare la ricaduta in ambiente di EPT.

Le due attività hanno portato ai **seguenti risultati:**

*Attività 1:* per ogni sito è stato calcolato l'indice di geoaccumulo (Igeo) tra i valori di background (concentrazioni di inquinanti in suoli preindustriali) e i valori rilevati nei campioni di suolo superficiale nei siti di interesse. L'indice Igeo ha messo in evidenza una qualità del suolo che va da "non contaminato" a "moderata-

mente contaminato" per tutti i siti e quasi tutti gli elementi indagati. Il Piombo è l'elemento che presenta l'indice Igeo più elevato. Appare evidente come le emissioni da parte del traffico veicolare abbiano contribuito nel tempo alla concentrazione di Piombo parzialmente immobilizzato nella parte superficiale del suolo. D'altra parte le analisi di biodisponibilità di EPT nel suolo hanno mostrato che i valori degli elementi indagati nei siti di interesse sono inferiori ai valori riportati in letteratura, il che evidenzia una bassa frazione di EPT disponibile nel suolo e quindi assimilata dalle piante. Le analisi di diossine e furani hanno messo in evidenza che non esistono emergenze di accumulo di tali microinquinanti.

*Attività 2:* per quanto riguarda l'esposizione del suolo "tecnologico" (appositamente preparato per effettuare uno studio su un ambiente confinato), si è notato un incremento di alcuni EPT in tutti i siti, rispetto al tempo zero. L'analisi statistica non ha messo in evidenza nessuna differenza significativa tra i diversi siti e i diversi tempi di campionamento: sono invece stati evidenziati diversi apporti di EPT in base alla localizzazione, visto che nei diversi siti sono stati evidenziati accumuli di inquinanti leggermente differenziati. Per questa seconda Attività è stato eseguito anche il biomonitoraggio mediante l'analisi di muschi appositamente messi a dimora nei terreni "tecnologici", in maniera tale da poter calcolare l'indice di arricchimento (EF): la concentrazione di un Elemento Potenzialmente Tossico presente nel muschio viene messa a confronto con la concentrazione dello stesso elemento presente nel terreno di riferimento, dopo aver proceduto a fare una normalizzazione. La maggiore frequenza degli indici di arricchimento nei tessuti dei muschi è risultata nel sito MXW, con valori estremamente alti di Cd e Pb. L'indice di arricchimento di Pb è estremamente alto e diffuso in tutti i siti, con un peggioramento da "moderato" a "severo" della qualità ambientale.

Anche in questo caso, dopo 18 mesi di esposizione, i campioni di terreno "tecnologico" sono stati sottoposti a determinazione di diossine e furani, e **i risultati hanno messo in evidenza che rispetto al tempo zero non ci sono state variazioni significative e che i valori riscontrati sono ben al di sotto dei valori limite indicati dalla legislazione, per tutti i siti.**