



Regione Toscana

Consorzio LaMMA



Convenzione tra Regione Toscana e Consorzio  
LaMMA per l'applicazione di modelli  
meteodiffusionali nell'ambito del Progetto  
"PATOS 2"

Trasporto di polvere minerale dal Sahara:  
applicazione del sistema modellistico  
RAMS-DUSTEM-CAMx

Autori:

Caterina Busillo  
Francesca Calastrini  
Francesca Guarnieri  
Massimiliano Pasqui

10 Giugno 2010

# Indice

Rigraziamenti	3
Introduzione	4
1. Il sistema di modelli RAMS-DUSTEM-CAMx	5
1.1 Il modello meteorologico RAMS	5
1.1.1 Configurazione del modello RAMS	7
1.2 Il modello emissivo DUSTEM	8
1.2.1 Configurazione del modello DUSTEM	12
1.3 Il modello di trasporto e deposizione CAMx	14
1.3.1 Implementazione di pre/postprocessori per CAMx	16
1.3.2 Configurazione del modello CAMx	17
2. Analisi meteorologica	21
2.1 Situazione sinottica	22
2.2 Campi di vento	25
3. Trasporto e deposizione di polvere sahariana nel Mediterraneo	29
3.1 Analisi dell'episodio - giugno 2006	29
3.2 Concentrazione della polvere sahariana in Toscana	38
3.3 Confronto stime-misure	41
Conclusioni	48
Bibliografia	49

## Ringraziamenti

Per la realizzazione di questo studio si ringraziano i gruppi di ricerca di Fisica (Prof. Lucarelli) e di Chimica (Prof. Udisti) dell'Università di Firenze, che hanno collaborato al presente studio nella fase di confronto tra le stime modellistiche e le misure di concentrazione di elementi traccianti riconducibili alla sorgente naturale in esame, la polvere del deserto, effettuate nell'ambito del progetto PATOS1.

## Introduzione

Le intrusioni di polvere minerale di origine sahariana nel bacino del Mediterraneo possono provocare un anomalo innalzamento dei valori di concentrazione del  $PM_{10}$ , e in alcuni casi contribuire al superamento dei valori limite previsti dalla normativa, pari a  $50 \mu g/m^3$  come media giornaliera. Tuttavia, nel caso in cui i superamenti siano causati da contributi naturali, questi possono venire esclusi dal conteggio.

E' importante quindi identificare il contributo derivante da sorgenti naturali, ed in particolare dalle polveri sahariane, che hanno un impatto non del tutto trascurabile anche sul territorio regionale toscano.

Nell'ambito del progetto regionale PATOS2, accanto alle analisi fisiche e chimiche dei campioni misurati per l'identificazione dei contributi naturali, è stato proposto lo sviluppo di un sistema modellistico, finalizzato alla ricostruzione delle dinamiche evolutive dell'inquinamento da polvere del deserto.

In particolare, in questo lavoro verrà descritto il sistema modellistico RAMS-DUSTEM-CAMx e la sua applicazione ad un episodio connesso al trasporto di polvere dal Sahara, individuato nel periodo di campionamento ottobre 2005 – settembre 2006, relativo alla campagna di misure svolta per il progetto PATOS1.

## 1. Il sistema di modelli RAMS-DUSTEM-CAMx

E' stato implementato un sistema modellistico finalizzato a ricostruire le dinamiche evolutive della polvere minerale proveniente dal deserto. La catena modellistica si basa sulle stime prodotte dal modello prognostico RAMS (campi meteorologici) e dal modello emissivo DUSTEM (emissioni di polvere minerale delle aree desertiche), che rappresentano gli input al modello CAMx, con cui viene simulato il trasporto e la deposizione della polvere del deserto.

Il sistema modellistico RAMS-DUSTEM-CAMx, messo a punto nell'ambito di un progetto finalizzato alla simulazione di alcuni importanti episodi di trasporto di sabbia dal deserto di Alashan su Pechino [Pasqui M. et al. 2007, Bottai L. et al. 2008], è stato opportunamente modificato e riconfigurato per stimare l'apporto di polvere minerale del deserto del Sahara sul bacino del Mediterraneo.

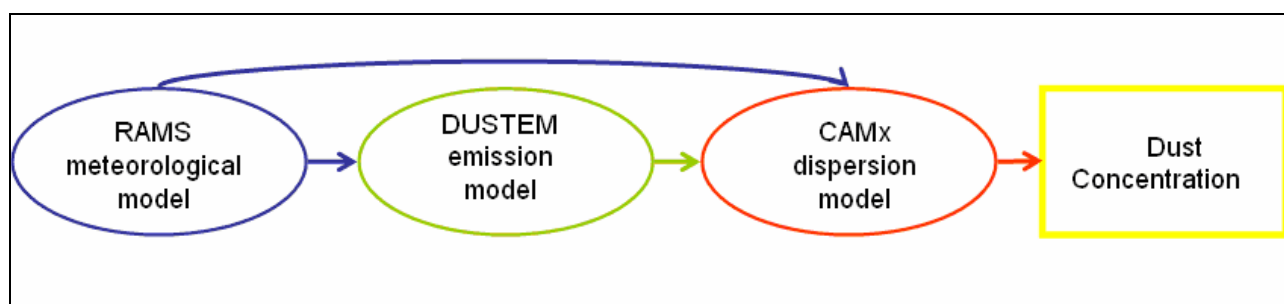


Fig. 1 - Schema a blocchi del sistema di modelli RAMS-DUSTEM-CAMx

### 1.1 Il modello meteorologico RAMS

Un fattore importante da valutare, quando si sviluppano ed utilizzano modelli meteorologici numerici, è la scala spaziale su cui operano, comunemente indicata come grid - spacing. Esistono modelli meteorologici numerici formulati per simulare lo stato e l'evoluzione dell'atmosfera alla scala globale (l'intero pianeta) e modelli che operano su domini limitati.

Mentre i modelli globali necessitano delle sole condizioni iniziali per procedere alla risoluzione delle equazioni dell'atmosfera, i modelli ad area limitata necessitano anche delle condizioni di contorno del proprio dominio di calcolo durante l'intero arco temporale di simulazione. Tali condizioni possono essere fornite sia dalle osservazioni dirette che da modelli a scala più grande.

Le potenzialità predittive e l'attendibilità di un modello dipendono fortemente dalla tipologia e dalla qualità dei dati utilizzati per fornire le condizioni al contorno e

l'informazione sullo stato iniziale da cui l'integrazione numerica deve partire, nonché dal modo stesso in cui tali dati vengono forniti al modello. Ai campi atmosferici forniti dai modelli a grande scala, si va ad aggiungere anche l'assimilazione diretta di osservazioni fatte principalmente da satellite dei campi di temperatura superficiale del mare.

I modelli ad area limitata si differenziano, inoltre, per la risoluzione spaziale. Esiste una limitazione pratica all'uso di risoluzioni spaziali molto elevate su domini di calcolo dell'ordine delle migliaia di chilometri che risiede nel drastico aumento dei tempi di calcolo, a causa dell'incremento del numero di punti di griglia su cui vengono integrate tutte le equazioni del moto e le parametrizzazioni dei processi fisici descritti. È questo il motivo per cui generalmente modelli ad alta risoluzione spaziale sono utilizzati su aree di dimensioni relativamente piccole. Nel presente progetto si è decisa una strategia basata su una griglia innestata, in modalità unidirezionale passiva, ovvero un forcing unidirezionale dai campi dei modelli globali a minor risoluzione spaziale verso quella a maggiore risoluzione spaziale. In particolare è stato configurato il modello numerico meteorologico Regional Atmospheric Modelling System (RAMS) il cui codice sorgente è liberamente disponibile presso il ATMET.COM.

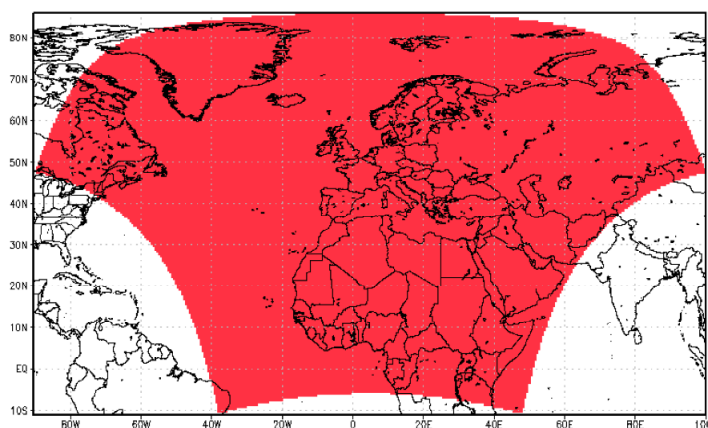


Fig. 2 - Dominio di calcolo del modello RAMS utilizzato per le simulazioni.

In sintesi il modello RAMS è costituito da:

- 1) Risolutore delle equazioni fluido dinamiche le cui caratteristiche sono:
  - equazioni di Navier-Stokes non idrostatiche per fluido compressibile;
  - sistema di coordinate verticali ibrido: "terrain-following";
  - griglia staggerata Arakawa C-grid;
  - propagazione orizzontale con schema "Forward-backward";

- propagazione verticale delle onde sonore con "Implicit Scheme";
- avvezione orizzontale e verticale conservative (fino ai termini del secondo ordine);
- diffusione laterale e verticale. La diffusione verticale nel Boundary Layer e nell'atmosfera libera si esplicita attraverso lo schema del terreno e lo schema "Mellor-Yamada". Quella laterale è formulata attraverso l'approccio non lineare di Smagorinsky (con parametro di controllo pari al quadrato della costante di Smagorinsky).

2) Le parametrizzazioni principali dei modelli fisici interagenti con il risolutore RAMS sono:

- schema microfisico completamente accoppiato con lo schema della radiazione;
- schema radiativo a onda lunga;
- schema radiativo a onda corta;
- parametrizzazione fenomeni convettivi;
- modello di interazione con la superficie.

3) Inizializzazione standard delle condizioni iniziali ed al contorno da datasets provenienti da modelli globali Reanalysis – Doe (Refs).

### 1.1.1 Configurazione del modello RAMS

Il modello RAMS è stato implementato presso il LaMMA nella versione 6.02 sulla struttura di calcolo parallela denominata PIKEPEAKS. Il dominio di integrazione utilizzato copre una vasta zona dell'emisfero nord, questo per garantire la completa descrizione di tutti i meccanismi dinamici interessati nell'evento.

- i dataset globali hanno una risoluzione di 2.5x2.5 gradi di risoluzione spaziale orizzontale e sono denominati Reanalysis – DOE. Tali dati del modello globale vengono utilizzati per inizializzare il RAMS e per fornire le condizioni al contorno con cadenza esadaria durante l'intero arco temporale della simulazione di durata complessiva 30 giorni dal 1 al 30 giugno 2006.

La configurazione utilizzata prevede l'impiego di una griglia di calcolo con le seguenti caratteristiche di configurazione:

- 200 x 80 punti griglia, 32 livelli verticali, 11 livelli di suolo;
- risoluzione spaziale orizzontale: 60 km;
- risoluzione spaziale verticale variabile su livelli in coordinate sigma con un fattore di stretching verticale che permette una risoluzione maggiore

in prossimità del suolo e comunque dello strato limite planetario, mentre diviene meno risolta al di sopra dei 2000m di altezza;

- risoluzione temporale output: 1h;
- time-step: 120 sec;
- parametrizzazione convettiva Kain-Fritsch attivata;

La configurazione dei domini di calcolo qui utilizzata è stata realizzata dopo numerose prove di test, e si ritiene ragionevolmente stabile e robusta rispetto al tipo di instabilità numeriche. A titolo di esempio degli output delle simulazioni del modello per questa simulazione si riporta di seguito il campo di temperatura ad 850hPa e il campo delle stream – lines (linee di flusso della circolazione) sempre ad 850hPa per il giorno 1 giugno 2006, 12:00 UTC.

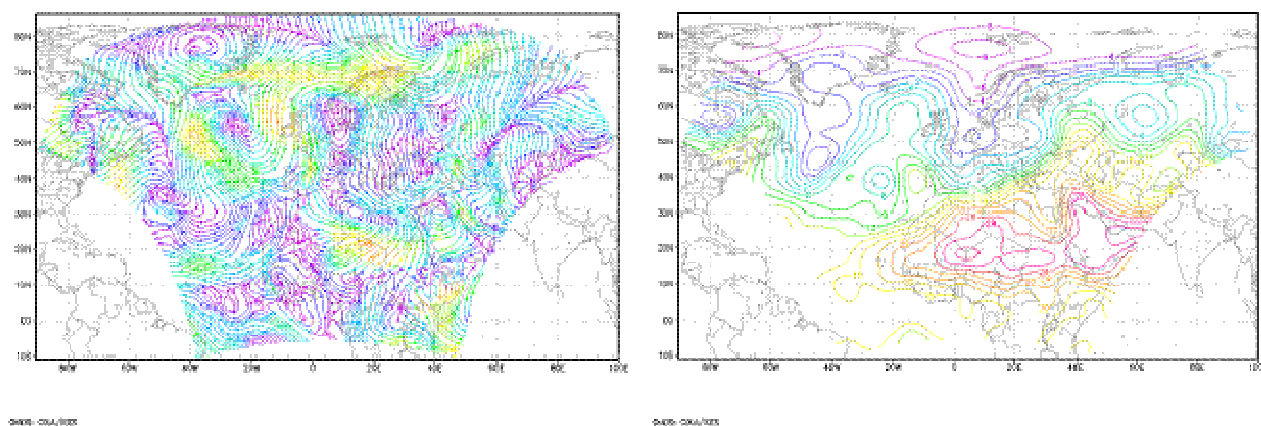


Fig. 3 - Uscite di esempio dei campi del modello RAMS per le 12:00 UTC del giorno 10 giugno 2006. A sinistra geopotenziale ad 850hPa e precipitazione riferite al dominio ad alta risoluzione. A destra streamlines ad 850hPa riferite al dominio a bassa risoluzione.

## 1.2 Il modello emissivo DUSTEM

Sulla base di una accurata ricerca bibliografica, sono stati presi in esame alcuni dei principali lavori che rappresentano lo stato dell'arte nello studio della produzione, del trasporto e dei meccanismi di rimozione della polvere del deserto in atmosfera [Gillette 1980, Gillette 1980, Gong et al. 2003, Marticorena and Bergametti 1995, Qian et al. 2001, Qian et al. 2004, Zhang et al. 1997, Tegen and Fung 1994].

In particolare, la messa a punto di uno specifico modello di emissione di polvere del deserto, DUSTEM, si è basato sul modello DREAM, sviluppato da Insular Coastal Dynamics, MALTA (ICoD) e illustrato dettagliatamente in "A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere" di Nickovic et al. (2010).



Il modello di emissione adottato prende in esame quattro classi dimensionali per la polvere minerale (clay, silt small, silt large, sand), di cui sono riportate in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. le principali caratteristiche [Nickovic et al., 2010; Tegen and Fung, 1994]. Di seguito le quattro classi dimensionali saranno identificate da CCR1, corrispondente alla prima classe, caratterizzata da un diametro aerodinamico compreso tra 1  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$ ; CCR2, con diametro aerodinamico compreso tra 2  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ ; CCR3, corrispondente a un diametro aerodinamico compreso tra 20  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$ ; CCR4, con diametro aerodinamico compreso tra 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ .

Tab. 1 - Classi dimensionali di polvere minerale e loro principali caratteristiche.

Tipo k	ID	Diametro aerodinamico ( $\mu\text{m}$ )	Raggio tipo $R_k$ ( $\mu\text{m}$ )	Densità ( $\text{g/cm}^3$ )	Fattore di produzione $\gamma_k$	$A_k$
Clay	CCR1	1 - 2	0.73	2.50	0.08	1
Silt, small	CCR2	2 - 20	6.10	2.65	1.00	0.7
Silt, large	CCR3	20 - 50	18.00	2.65	1.00	0.4
Sand	CCR4	50 - 100	38.00	2.65	0.12	0.25

I fattori determinanti per la produzione di polvere minerale sono legati, oltre che alla tipologia del terreno, alla copertura vegetale, all'umidità del suolo, alla turbolenza superficiale e del boundary layer.

Poiché la copertura vegetale riduce il tasso di erosione del suolo, per ottenere una stima della localizzazione delle potenziali sorgenti di polvere minerale è stata elaborata una mappa di uso del suolo incrociando le informazioni del "GLC2000 land cover" a 1 km di risoluzione [<http://www.gvm.jrc.it/glc2000>, Bartholomé and Belward, 2005] e della "FAO Texture Map" a 8 km di risoluzione [[http://www.fao.org/gtos/tems/variable\\_show.jsp](http://www.fao.org/gtos/tems/variable_show.jsp)]. La mappa risultante ad 1 km di risoluzione, in cui sono state evidenziate le zone di suolo nudo, è mostrata in Fig. 4.

Per ciascun pixel è stato determinato il fattore  $\alpha$ , che può assumere i valori 0 o 1, a seconda che si tratti, rispettivamente, di terreno vegetato o di suolo nudo. Infine, alle classi del "GLC2000 land cover" relative al suolo nudo sono state associate le corrispondenti sette classi della "Zobler Texture Classes" [<http://www-cger.nies.go.jp/grid-e/griddoc/zoblere.html>].

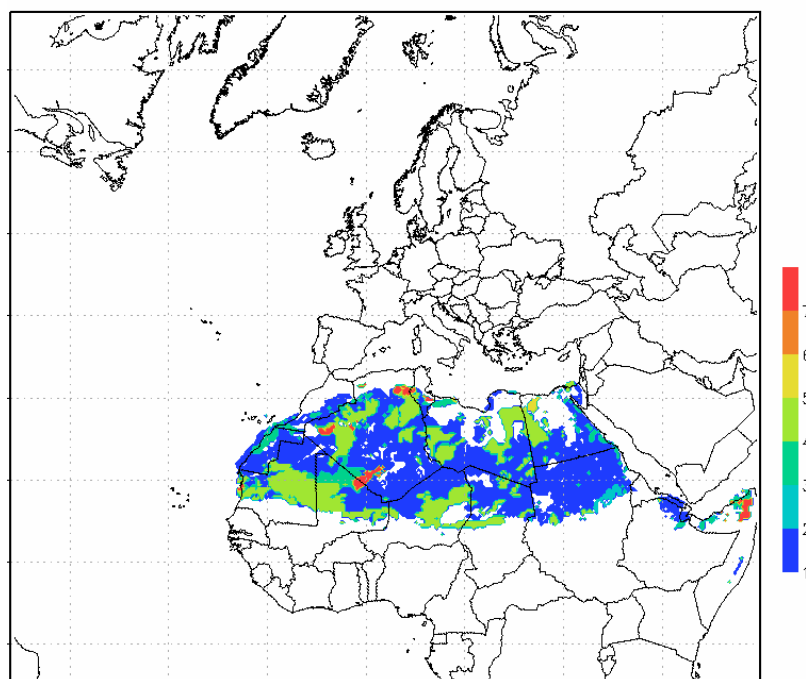


Fig. 4 - Mappa di tessitura del suolo, identificata sulle zone di suolo nudo del GCL2000.

Le classi della "Zobler Texture Classes" sono potenzialmente interessate alla produzione di polvere minerale, ciascuna con un diverso contributo  $\beta_k$ , a seconda della frazione di argilla, limo, sabbia presenti, come riportato in

Tab. 2.

Inoltre, per ciascuno dei sette tipi di texture, è riportata la massima umidità assorbita dal suolo  $w'$  [Nickovic et al. 2001], che cresce al crescere della quantità di argilla presente nel terreno. L'umidità del suolo, infatti, è da tenere in considerazione, poiché aumenta la frizione e quindi riduce il sollevamento di polvere.

Tab. 2 - Associazione tra tipi di suolo e i coefficienti  $\beta$ , e percentuale di umidità massima assorbita dal suolo.

Tipo di suolo	Clay $\beta_1$	Silt, small $\beta_2$	Silt, large $\beta_3$	Sand $\beta_4$	$w'$ (%)
1	0.12	0.08	0.08	0.80	2.5
2	0.34	0.56	0.56	0.10	6.8
3	0.45	0.30	0.30	0.25	11.5
4	0.12	0.18	0.18	0.70	2.5
5	0.40	0.10	0.10	0.50	10.0
6	0.34	0.36	0.36	0.30	6.8
7	0.22	0.18	0.18	0.60	3.5

Oltre ai parametri correlati alla struttura e allo stato del suolo, il meccanismo di produzione di polvere minerale dipende dai parametri che descrivono la turbolenza nei bassi strati dell'atmosfera ed in particolare dalla velocità di frizione.

Nel modello emissivo preso in esame il flusso di polvere  $F_{sk}$  viene calcolata sulla base della seguente formula:

$$F_{sk} = c_1 \times \delta_k u_*^2 \left[ 1 - \left( \frac{u_{*Tk}}{u_*} \right)^2 \right] \quad \text{per } u_* > u_{Tk}$$

Il parametro  $u_*$  è la velocità di frizione e  $u_{*Tk}$  è la soglia per la velocità di frizione sotto la quale non avviene il sollevamento di polvere. La soglia  $u_{*Tk}$  dipende, oltre che dalla classe dimensionale  $k$ , dall'umidità del suolo  $w$  e da  $w'$ , secondo la formula:

$$u_{*Tk} = \begin{cases} A_k \sqrt{2gR_k \frac{\rho_{pk} - \rho_a}{\rho_a}}, & w \leq w' \\ A_k \sqrt{2gR_k \frac{\rho_{pk} - \rho_a}{\rho_a}} \cdot \sqrt{1 + 1.21(w - w')}, & w > w' \end{cases}$$

$A_k$  è una costante che dipende dalla classe dimensionale,  $\rho_{pk}$  è la densità e  $R_k$  il raggio rappresentativi della classe dimensionale  $k$ -esima (Tab. 1),  $\rho_a$  è la densità dell'aria,  $g$  è l'accelerazione di gravità.

Nel calcolo di  $F_{sk}$ , per tener conto della produttività dei differenti tipi di suolo, è definita la costante  $\delta_k$ , come:

$$\delta_k = \alpha \beta_k \gamma_k$$

dove, come abbiamo visto,  $\alpha$  tiene conto della copertura vegetale,  $\beta_k$  rappresenta la frazione di argilla, limo, sabbia nel tipo di suolo,  $\gamma_k$  è il fattore di produzione di polvere minerale per ciascuna delle quattro classi dimensionali (vedi Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.).

La costante dimensionale  $c_1$  è pari a  $2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-5} \text{ kg s}^2$  ed è stata determinata empiricamente [Nickovic et al. 2001].

Il modello DUSTEM, che è stato adottato in prima battuta per simulare alcuni episodi di trasporto di polvere dal deserto di Alashan su Pechino, tiene conto anche della copertura nevosa che in tali zone è presente e che riduce la proprietà emissiva del

suolo. Nelle simulazioni di episodi di trasporto di polvere sahariana ovviamente questa opzione non viene utilizzata, per cui si omette una descrizione di dettaglio.

Nella figura seguente è riportato lo schema a blocchi del modello di emissione DUSTEM: dalle informazioni del "GLC2000 land cover" e della "FAO Textural Map" si ottiene la mappa delle zone di suolo nudo che, insieme alle stime su base oraria di umidità del suolo  $w$  e di velocità di frizione  $u^*$  fornite dal modello RAMS, ed eventualmente alla copertura nevosa, costituisce l'input al modello emissivo.

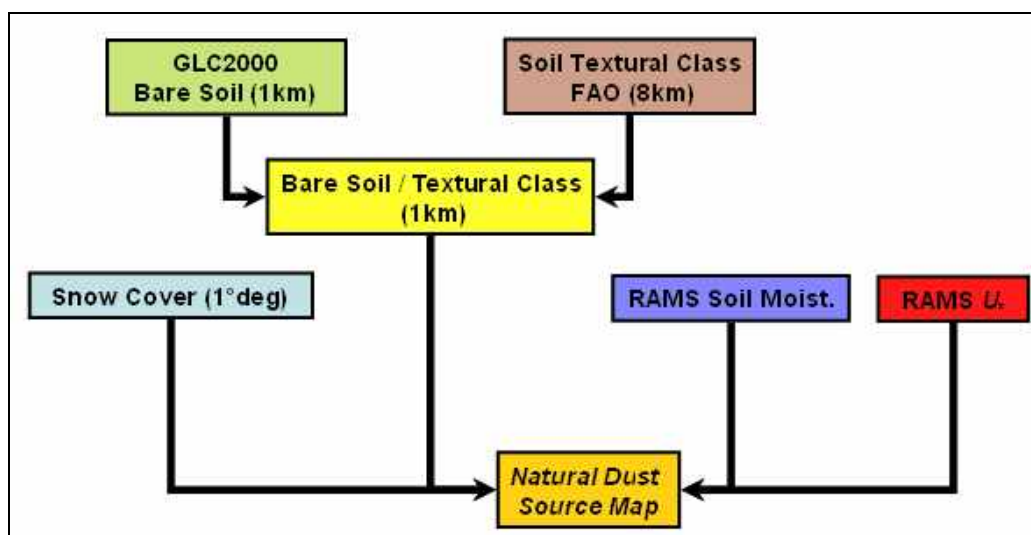


Fig. 5 - Schema a blocchi del modello di emissione DUSTEM

### 1.2.1 Configurazione del modello DUSTEM

Per il presente caso studio, con il modello DUSTEM è stato simulato il rateo emissivo di polvere minerale per ciascuna delle quattro classi dimensionali, su base oraria, per il mese di giugno 2006.

Dal momento che i files relativi alle emissioni devono avere la stessa risoluzione spaziale di quella adottata nella configurazione del modello di trasporto e deposizione CAMx, pari a 30 km, si è reso necessario ricampionare opportunamente gli input territoriali e meteorologici utilizzati da DUSTEM.

In particolare, la mappa di "suolo nudo" con risoluzione a 1 Km è stata ricampionata a 30 Km, scegliendo come classe rappresentativa della cella di 30 km, quella che si presenta con più alta frequenza all'interno della cella stessa, con l'utilizzo del software ARCMAP [www.esri.com].

Le stime orarie delle variabili meteorologiche ottenute dal modello RAMS, l'umidità del suolo  $w$  e la velocità di frizione  $u^*$ , sono state interpolate in modo da passare da 60 a 30 Km di risoluzione.

I files in uscita da Dustem sono stati ritagliati e proiettati in coordinate polari stereografiche oblique con GDAL [Geospatial Data Abstraction Library - <http://www.gdal.org/>], in modo da corrispondere esattamente al dominio di studio e al tipo di georeferenziazione utilizzati dal modello di trasporto e deposizione. GDAL è un tool open-source che permette di operare delle trasformazioni su dati raster georiferiti.

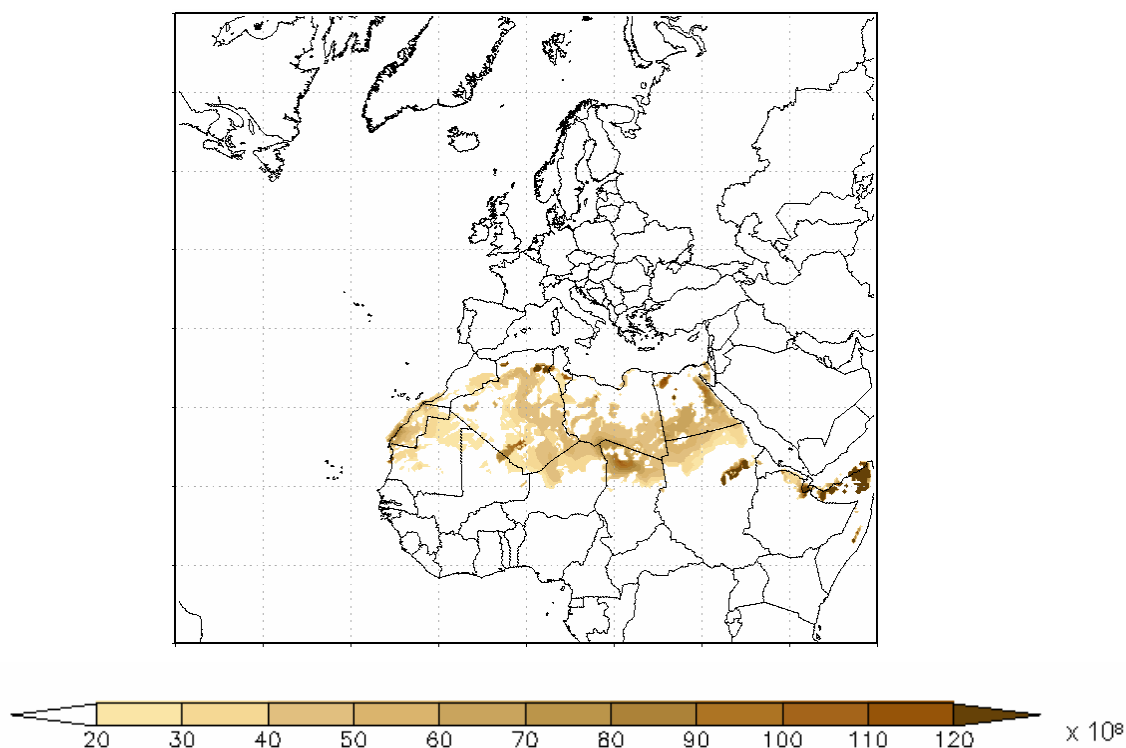


Fig. 6 - Rateo emissivo cumulato (espresso in  $10^8\text{g/h}$ ) sul periodo 01-30 giugno 2006 per CCR1.

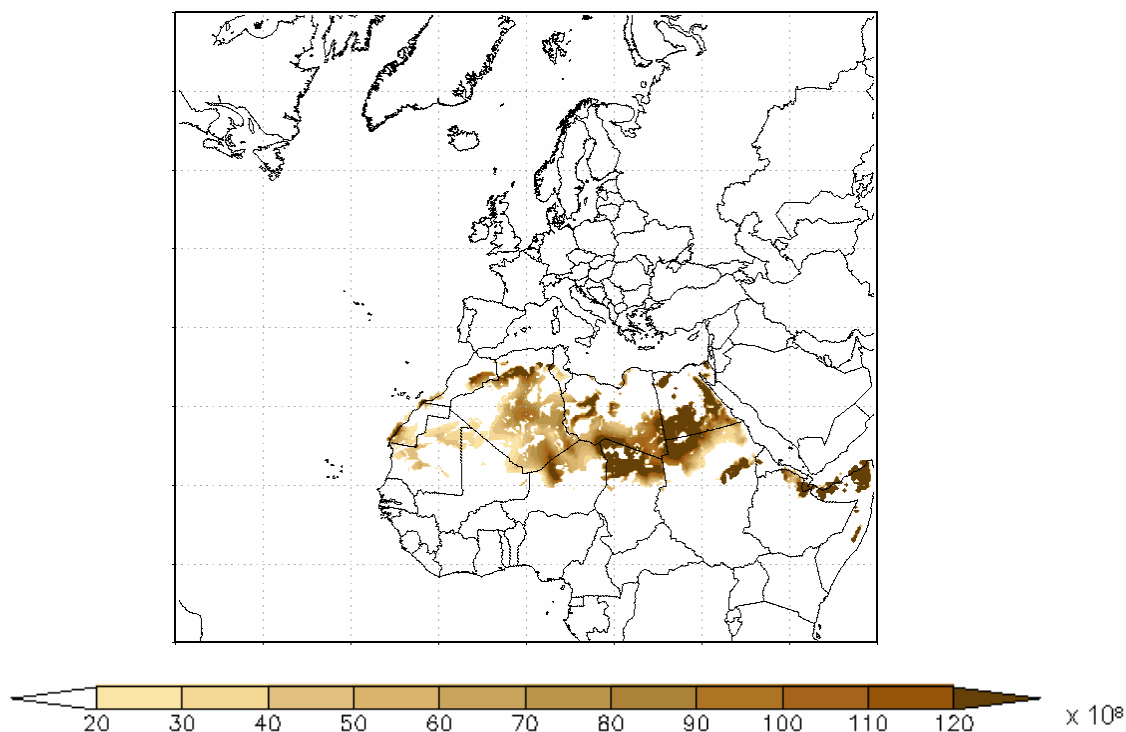


Fig. 7- Rateo emissivo cumulato (espresso in  $10^8\text{g/h}$ ) sul periodo 01-30 giugno 2006 per CCR2.

A titolo di esempio, sono riportate (Fig. 6 e Fig. 7) le mappe relative al rateo emissivo, cumulato su tutto il periodo della simulazione, per la prima e la seconda classe dimensionale.

### 1.3 Il modello di trasporto e deposizione CAMx

Il modello dispersione CAMx, Comprehensive Air quality Model with extensions, sviluppato da ENVIRON International Corporation (<http://www.camx.com/>), è un modello di dispersione fotochimico euleriano a griglia.

Il modello si basa sull'equazione generale del trasporto, o di continuità, riferita ad un sistema di coordinate fisso o euleriano. Questa equazione, in coordinate verticali terrain following, è espressa nella seguente forma:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla_H \cdot V_H \cdot c_i + \left[ \frac{\partial(c_i \cdot \eta)}{\partial z} - c_i \frac{\partial \eta}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) \right] + \nabla \cdot K \cdot \left( \frac{c_i}{\eta} \right) + \left[ \frac{\partial c_i}{\partial t} \right]_{\text{Chemistry}} + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{\text{Emission}} + \frac{\partial c_i}{\partial t} \Big|_{\text{Removal}}$$

dove  $V_H$  è il vettore del vento orizzontale,  $\eta$  è l'entrainment rate netto verticale definito come  $\eta = \delta h / \delta t - w$ ,  $h$  è l'altezza dello strato di interfaccia,  $\rho$  è la densità dell'atmosfera,  $K$  è il coefficiente di diffusività/turbolenza.

La variazione nel tempo della concentrazione, in ogni punto griglia e per ogni specie considerata, è espressa come la somma dei contributi dovuti alla avvezione

orizzontale, al trasporto verticale, alla diffusione orizzontale e verticale dovuta alla turbolenza, alla chimica, che dipende dal meccanismo scelto, all'emissione delle sorgenti presenti, alla rimozione dovuta alla deposizione secca e umida.

L'equazione di continuità è risolta con un metodo numerico che, separando i termini dell'equazione in moduli - tecnica dello splitting - ne computa in serie il singolo contributo ad ogni passo temporale. In prima battuta viene valutato il contributo alle emissioni da tutte le sorgenti, poi il trasporto orizzontale, il trasporto verticale, la diffusione verticale, la diffusione orizzontale, la deposizione umida, la chimica. La deposizione secca è trattata calcolando per ogni specie una velocità di deposizione, funzione del land use e delle condizioni meteorologiche locali, ed è inclusa nel calcolo della diffusione verticale. In particolare, per quanto riguarda l'aerosol, la deposizione secca avviene per diffusione, impatto e deposizione gravitazionale e viene stimata utilizzando l'approccio di Slinn e Slinn (1980); la dimensione delle particelle rappresenta la variabile dominante in questo processo. Per quanto riguarda la deposizione umida, viene utilizzato l'approccio di Seinfeld e Pandis (1998).

Ad ogni passo temporale si ottiene quindi la concentrazione delle specie prese in esame in ciascuna cella del dominio tridimensionale.

Per sfruttare al meglio le risorse di calcolo, il modello offre la possibilità di effettuare simulazioni su griglie telescopiche innestate, allo scopo di ottenere su domini più piccoli una maggiore risoluzione.

Il modello permette di simulare il trasporto e le trasformazioni chimiche in fase gassosa sulla base di meccanismi chimici ridotti (CB4, SAPRC99); inoltre è possibile includere la chimica del particolato sia organico che inorganico, indicandone la granulometria. E' possibile effettuare simulazioni in modalità inerte, escludendo il modulo chimico.

Il modello necessita di input meteorologici (campi tridimensionali di vento, di temperatura, di pressione, dei coefficienti di diffusione verticale, della concentrazione media di vapor d'acqua, copertura nuvolosa, pioggia), di input emissivi (emissioni da sorgenti puntuali, areali, lineari), di concentrazioni iniziali e al contorno, del meccanismo chimico (eventualmente deve essere specifico se inerte).

Relativamente all'input meteorologico, occorre sottolineare che il modello è stato progettato per essere associato ad un modello prognostico (RAMS, MM5, WRF-ARV) in grado di fornire tutti i campi richiesti con elevata qualità.

E' possibile implementare il modello secondo varie configurazioni e, di conseguenza, non tutti gli input sono obbligatori. Nel file di controllo CAMx.in devono essere

specificate tutte le informazioni necessarie al programma: dominio temporale, dimensione e risoluzione della griglia, tipo e origine del sistema di coordinate, specie da simulare, moduli attivati/disattivati, path dei files di input/output.

Il modello fornisce in uscita le stime di concentrazione media oraria, nonché le quantità depositate al suolo, relative alla rimozione secca ed alla rimozione umida, per ogni specie inquinante simulata.

### 1.3.1 Implementazione di pre/postprocessori per CAMx

Data la complessità e la mole di dati necessari come input al modello, la realizzazione di questi file ha richiesto l'utilizzo di una serie di preprocessori. Alcuni sono forniti direttamente da ENVIRON International Corporation, altri sono stati appositamente implementati per la messa a punto della catena modellistica RAMS–DUSTEM–CAMx.

Relativamente all'input meteorologico, è stato utilizzato il processore `rams-camx_v4.6`, che estrae e formatta i campi meteorologici ottenuti dal modello RAMS in inputs per CAMx. Il modulo è stato configurato tramite l'utilizzo di un file di input (`ramscamx.namelist`) nel quale sono riportate le informazioni relative al dominio spaziale e temporale: sono state introdotte alcune modifiche per la gestione di periodi temporali estesi.

L'input emissivo fornito dal modello DUSTEM è stato opportunamente formattato attraverso l'utilizzo di un modulo fortran, `EMIS_ASCBIN`, appositamente implementato nell'ambito di questo lavoro.

Per le condizioni al contorno e iniziali è stato utilizzato il modulo `ICBC` fornito dalla ENVIRON.

Per la realizzazione del file di land use è stato adoperato il data set Global Land Cover 2000 (GLC2000), disponibile gratuitamente alla risoluzione di 1 km in formato ESRI GRID al sito <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>.

Tale data set è stato elaborato con ARCMAP producendo un file proiettato in coordinate polari stereografiche oblique, ritagliato sul dominio di studio, ricampionato alla risoluzione spaziale analoga a quella della simulazione ed infine decodificato secondo le categorie di land use implementate nel modello CAMx. Il file ascii così ottenuto è stato quindi rielaborato con un processore sviluppato appositamente (`Land_format`), al fine di renderlo compatibile con i formati previsti dal modello CAMx. Il processore `Land_format` produce due file, uno binario contenente dati di land use e uno ascii contenente i valori di albedo, visibilità e ozono (`AHO.bin`).



E' stato predisposto il file ascii chemparam, in cui vengono riportate alcune specifiche della simulazione, tra cui il diametro aerodinamico, la densità e altri parametri caratteristici del particolato in esame; inoltre è necessario specificare che nelle simulazioni non viene richiamato alcun meccanismo chimico, ma viene effettuata una trattazione in modalità inerte.

Infine, sono stati messi a punto alcuni postprocessori per la gestione degli output del modello CAMx. In particolare, sono stati implementati alcuni moduli fortran, GRADS\_CONC, GRADS\_DEP, che rendono le uscite del modello, rispettivamente files di concentrazione e deposizione, direttamente interfacciabili con il software grafico GrADS, Grid Analysis and Display System (<http://www.iges.org/grads/>). GrADS è un tool interattivo sviluppato in ambiente linux che consente, attraverso script personalizzati, la gestione e la visualizzazione di grandi quantità di dati.

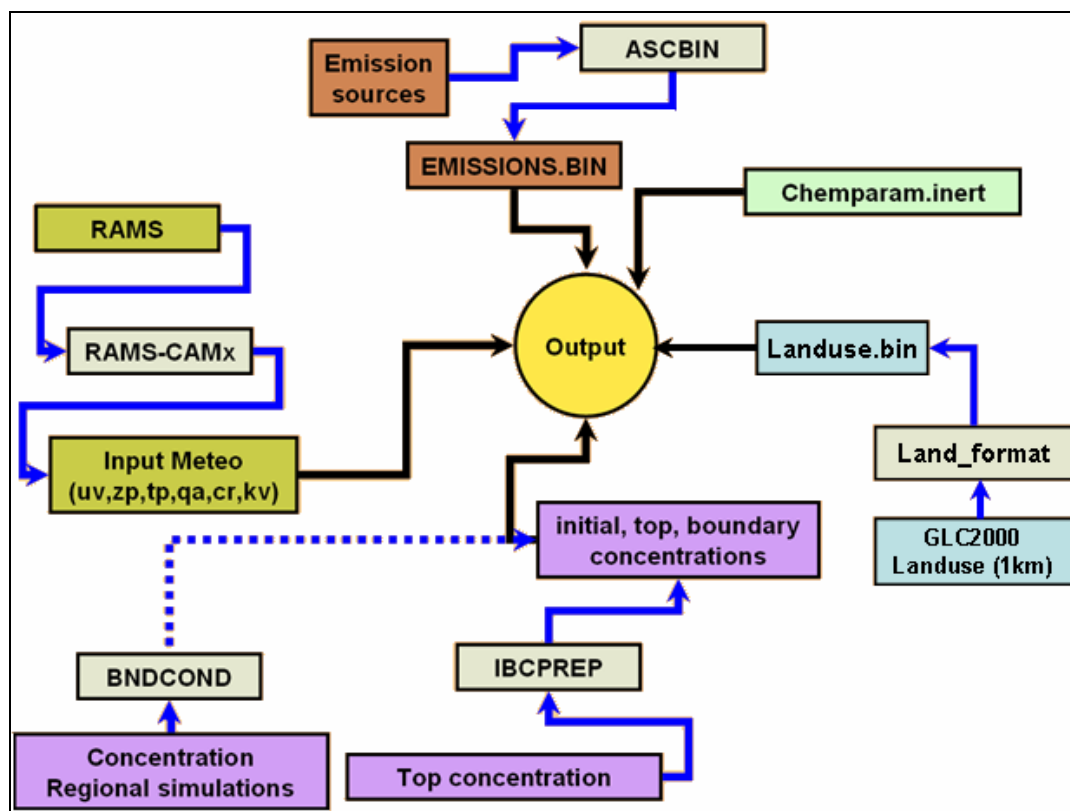


Fig. 8 - diagramma di flusso dei preprocessori implementati

### 1.3.2 Configurazione del modello CAMx

Nell'ambito di questo lavoro, CAMx è stato configurato su di un dominio di calcolo di poco inferiore a quello relativo al modello meteo RAMS (vedi fig. 2), con una estensione di 11400x10200 Km<sup>2</sup>. Il dominio di calcolo, in coordinate polari stereografiche oblique (polo lat 40°, lon 5°), è costituito da 380 per 340 celle

quadrate di 30 Km di lato. Nella simulazione sono stati considerati 18 livelli verticali, da 10 m a 10500 m, con una risoluzione più alta in prossimità del suolo.

I files che costituiscono l'input meteorologico, forniti da RAMS, sono stati interpolati (da circa 60 Km a 30 Km), proiettati in coordinate polari stereografiche oblique e opportunamente formattati utilizzando il processore rams-camx\_v4.6. Ciascun file contiene le stime orarie delle variabili per ogni giorno della simulazione.

I files di emissione, forniti dal modello DUSTEM, anch'essi proiettati in coordinate polari stereografiche oblique con una risoluzione di 30 km, sono riferiti alle stime orarie delle emissioni per ogni giorno della simulazione e per ognuna delle quattro classi dimensionali.

Per simulare il trasporto e la deposizione della polvere minerale in modalità inerte è stato escluso il modulo chimico. In particolare, è stata eseguita una run del modello per ciascuna delle quattro classi dimensionali.

Per attivare i moduli corrispondenti alla deposizione secca e umida è stato necessario elaborare due files, il primo relativo al land use del dominio di calcolo alla risoluzione di 30 Km e il secondo contenente dati relativi all'albedo, visibilità e alla concentrazione di ozono.

Infine, i files relativi alle concentrazioni iniziali e al contorno, considerate pari a zero, sono stati elaborati con il preprocessore ICBC.

Con questa configurazione sono stati eseguite quattro run, relative a ciascuna classe dimensionale di polvere minerale, per l'intero mese di giugno 2006; nella tabella sono riportate le principali caratteristiche delle simulazioni eseguite.

Tab. 3 - Principali caratteristiche delle simulazioni eseguite.

Modello	CAMx versione 4.31
Periodo	01/06/2006 – 30/06/2006
Risoluzione temporale	oraria (720 ore)
Dominio di calcolo	Dimensioni: 11400x10200 Km <sup>2</sup> ; 380 x 340 celle Risoluzione spaziale: 30 Km Coordinate: polari stereografiche oblique Polo: lat 40° - lon 5°
Livelli verticali	18 livelli; da 10 m a 10500 m
Input meteo	RAMS; variabili su base oraria, risoluzione 60 Km, con interpolazione 30 Km
Deposizione secca	Attivata - Slinn e Slinn (1980)

Deposizione umida	Attivata - Seinfeld e Pandis (1998)
Chimica	Disattivata/modalità inerte
Concentrazioni iniziali e al contorno	nulle
Emissioni areali	DUSTEM; variabili su base oraria; risoluzione 30 Km aerosol, 4 classi dimensionali
Diametro aerodinamico delle classi dimensionali	CCR1 : 1 $\mu\text{m}$ - 2 $\mu\text{m}$ CCR2 : 2 $\mu\text{m}$ - 20 $\mu\text{m}$ CCR3 : 20 $\mu\text{m}$ - 50 $\mu\text{m}$ CCR4 : 50 $\mu\text{m}$ - 100 $\mu\text{m}$
Run eseguite	4 run, una per ogni classe dimensionale
Output	Concentrazioni medie orarie (file.avg) Quantità depositate al suolo su base oraria (file.dep)

Le uscite numeriche del modello, corrispondenti alle concentrazioni e alle quantità depositate di polvere, sono state elaborate, in modo da ottenere le mappe georeferite e le serie temporali dei valori di concentrazione e di deposizione.

In pratica, solo le due prime classi dimensionali, CCR1 e CCR2, sono significative nell'ambito del trasporto su grandi distanze, in quanto il particolato di dimensioni superiori ha una velocità di sedimentazione maggiore e, di conseguenza, viene rimosso dall'atmosfera in prossimità delle sorgenti emmissive [Tegen and Fung 1994]. Per questo motivo di seguito verranno analizzati solo i risultati relativi alle prime due classi e, complessivamente, alle concentrazioni e alle deposizioni del particolato con diametro aerodinamico compreso tra 1  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$  (CCR1+CCR2). In tabella 4 sono elencati i tipi di elaborati grafici ottenuti dalle simulazioni, riportati nel terzo capitolo e in appendice (in neretto).

Tab. 4- Elaborati grafici ottenuti dalle simulazioni.

Concentrazione media giornaliera della somma di CCR1 e CCR2, integrata su tutti i livelli verticali (10 – 10500 m); 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )
Concentrazione media oraria della somma di CCR1 e CCR2; primo livello (10 m); 720 immagini; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Concentrazione media giornaliera della somma di CCR1 e CCR2; primo livello (10 m); 30 immagini; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Concentrazione media giornaliera di CCR1; primo livello (10 m); 30 immagini; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Concentrazione media giornaliera di CCR2; primo livello (10 m); 30 immagini; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media giornaliera della somma di CCR1 e CCR2, alla latitudine di Firenze; 30 immagini; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media giornaliera della somma di CCR1 e CCR2, alla longitudine di Firenze; 30 immagini; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Grafici della serie temporale della concentrazione media oraria di CCR1 e CCR2 nei siti recettori di Firenze, Lucca, Grosseto; 3 grafici; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Grafici della serie temporale della concentrazione media oraria della somma di CCR1 e CCR2 nei siti recettori di Firenze, Lucca, Grosseto; 3 grafici; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Grafici della serie temporale della concentrazione media giornaliera di CCR1 + CCR2 nei siti recettori di Firenze, Lucca, Grosseto; 3 grafici; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Grafici della sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media oraria di CCR1 e di CCR2, nei siti recettori di Firenze, Lucca, Grosseto; 3 gruppi di 720 grafici; ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Grafici della sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media giornaliera di CCR1 e di CCR2, nei siti recettori di Firenze, Lucca, Grosseto; 3 gruppi di 16 grafici (dal 15 al 30 giugno); ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Quantità di polvere depositata al suolo, cumulata giornaliera, relativa alla rimozione secca, della somma di CCR1 e CCR2; 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )
Quantità di polvere depositata al suolo, cumulata giornaliera, relativa alla rimozione secca, di CCR1; 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )
Quantità di polvere depositata al suolo, cumulata giornaliera, relativa alla rimozione secca, di CCR2; 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )
Quantità di polvere depositata al suolo, cumulata giornaliera, relativa alla rimozione umida, della somma di CCR1 e CCR2; 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )
Quantità di polvere depositata al suolo, cumulata giornaliera, relativa alla rimozione umida, di CCR1; 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )
Quantità di polvere depositata al suolo, cumulata giornaliera, relativa alla rimozione umida, di CCR2; 30 immagini; ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )

## 2. Analisi meteorologica

In numerosi lavori scientifici e programmi internazionali quali MEIDEX l'emissione, il trasporto e la deposizione dell'aerosol naturale proveniente dal deserto del Sahara nel Mediterraneo sono stati ampiamente studiati. Dei tre meccanismi indicati quello di emissione è sicuramente il meno noto. Ciononostante le condizioni sinottiche atmosferiche e lo stato del suolo favorevoli all'immissione delle polveri in atmosfera sono ben note, insieme a quelle necessarie per il trasporto nel bacino del Mediterraneo. In particolare l'emissione è sempre accompagnata da una irruzione di una massa d'aria relativamente proveniente dal nord Europa o dai Balcani che si insinua, attraverso la Algeria, Libia o l'Egitto fin dentro il Ciad. Queste masse d'aria sono caratterizzate da venti tesi e costanti nei bassi strati con gradienti termici di alcuni gradi sia positive che negative. Queste intrusioni profonde sono relativamente poco frequenti durante il semestre primavera – estate, circa 6 per anno [Vizy & Cook, 2006]. Ciò nonostante riescono a mobilitare notevoli quantità di polveri che rimangono sollevate, al di sopra del boundary layer sahariano in attesa che altri meccanismi atmosferici li sospingano lontano dalle zone di emissione quali la depressione di Bodele [Washington et al, 2006]. Il gradiente termico dell'aria alla superficie poi ha due importanti effetti nello stimolare l'emissione: il primo è di tipo atmosferico, cioè in corrispondenza del fronte della massa d'aria il vento termico ortogonale alla direzione di spostamento della massa d'aria stessa, viene accelerato alla superficie aumentando di conseguenza la frizione al suolo e quindi l'energia a disposizione per il sollevamento della polvere. Situazioni orografiche particolari poi amplificano, per effetto venturi, tali condizioni meteo. Il gradiente termico superficiale positivo ha però un secondo aspetto importante: compattare la crosta superficiale del suolo sabbioso, riducendone il contenuto di umidità, rendendola più propensa all'emissione. Tale effetto è stato studiato in alcuni deserti mondiali come quello del Gobi in Cina. Dopo che la polvere è stata mobilitata e si trova sospesa al di sopra del boundary layer è necessaria una circolazione compatta e persistente in quota, tra 850 e 700 hPa, che possa trasportarla altrove. In questo caso le direzioni prevalenti sono tipicamente due: la prima è legata al flusso delle cosiddette African Easterly Waves (AEWs) tropicali, che nel loro moto occidentale sospingono le polveri sull'Atlantico raggiungendo a volte anche la zona Caraibica. La seconda direzione, quella che punta direttamente nel Mediterraneo ed in Europa, necessita di un sistema di circolazione ciclonico semi stazionario posizionato sulla penisola Iberica e/o sulla Francia. In questo caso solamente se è presente una circolazione anticiclonica

posizionata sul nord africa, tra Marocco e Algeria, si costituisce un tubo di flusso compatto ed esteso che da una parte impedisce alle polveri di disperdersi orizzontalmente e dall'altro compiere alcune migliaia di chilometri in poco tempo. In questo caso si hanno i veri e propri getti di polveri chiamati "dust – plumes".

Infine la deposizione delle polveri dipende sia dai meccanismi di rimozione secca, ovvero la ricaduta a terra per gravità laddove la circolazione atmosferica non riesce più a mantenere in volo il particolato, sia per effetto di moti convettivi ad esempio legati alla precipitazione.

## 2.1 Situazione sinottica

L'evento analizzato in questo progetto si articola in un'estensione temporale di circa 20 giorni, almeno per quanto riguarda la componente atmosferica. Per sintetizzare esaurientemente i vari meccanismi dinamici sia sulla superficie che in quota è utile definire due regioni per il calcolo di grandezze medie esplicative, in particolare sono presentati grafici denominati di Howmuller, latitudine – tempo, dove le grandezze sono mediate lungo la longitudine negli intervalli relativi. Nella figura seguente è riportato, per la regione 15°E – 40°E la differenza di temperatura in quota ad 850hPa, tra la media termica del mese di giugno 2006 e il valore giornaliero. E' evidente a partire dal 4 giugno una imponente discesa di aria, di origine nord Europea fino a latitudini basse (25°N) che, pur cambiando caratteristiche termodinamiche, si estingue solo il 15 giugno. Anche nel settore 10°W – 10°E è interessato da una fase intensa di discesa di aria relativamente più fresca durante i primi giorni di giugno. Durante lo stesso periodo analizzando i campi di vento superficiale, separatamente per le componenti zonale  $u$  e meridionale  $v$ , è evidente l'intensità e la persistenza del flusso responsabile del sollevamento della polvere desertica nei vari comparti analizzati.

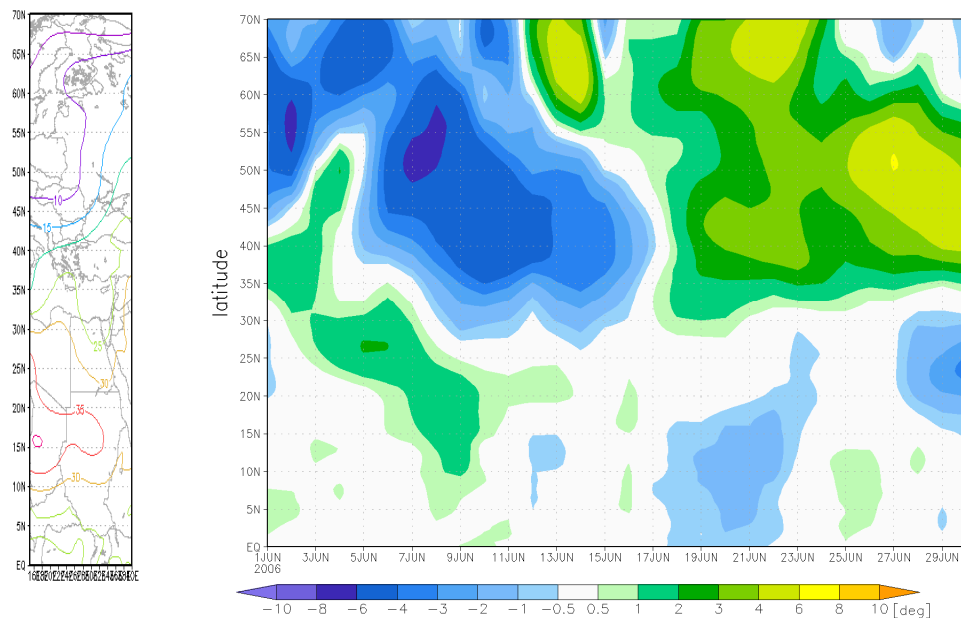


Fig.9 - Diagramma latitudine – tempo dell'anomalia di temperatura in quota a 850hPa, mediata lungo le longitudini nell'intervallo 15°E – 40°E.

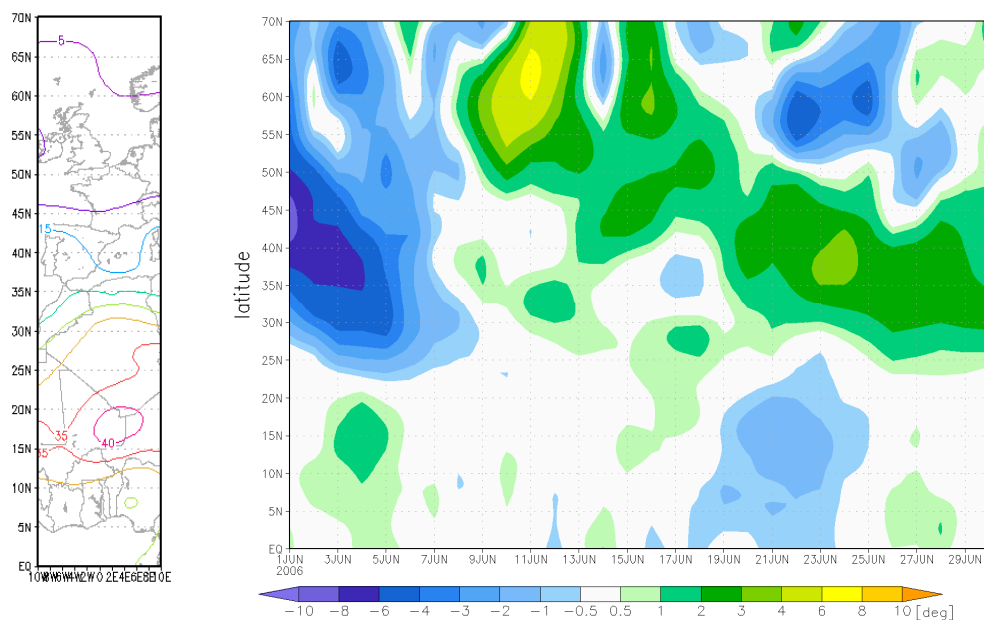


Fig.10 - Diagramma latitudine – tempo dell'anomalia di temperatura in quota a 850hPa, mediata lungo le longitudini nell'intervallo 10°W – 10°E

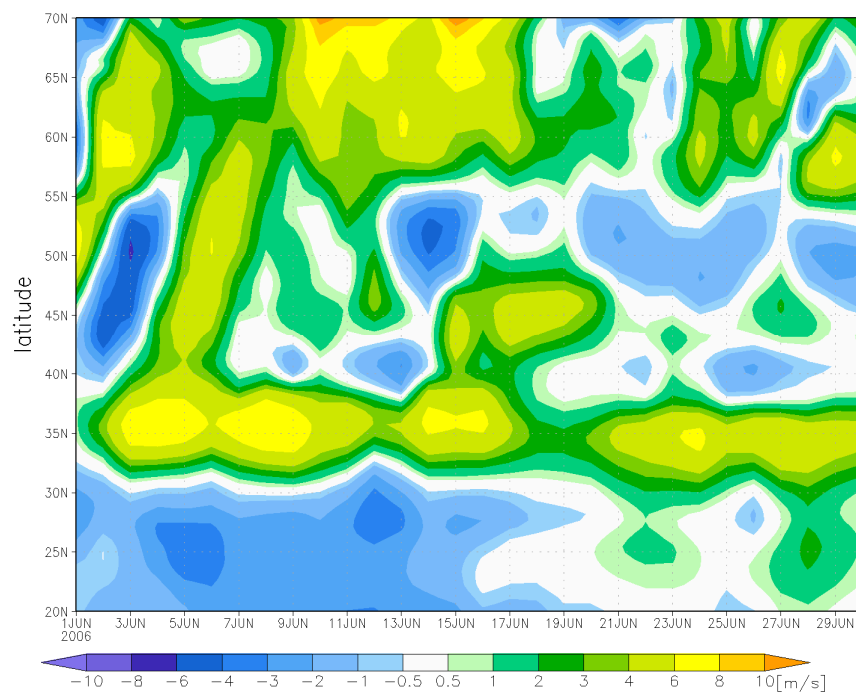


Fig.11- Diagramma latitudine – tempo della componente zonale del vento settore Est (15°E – 40°E).

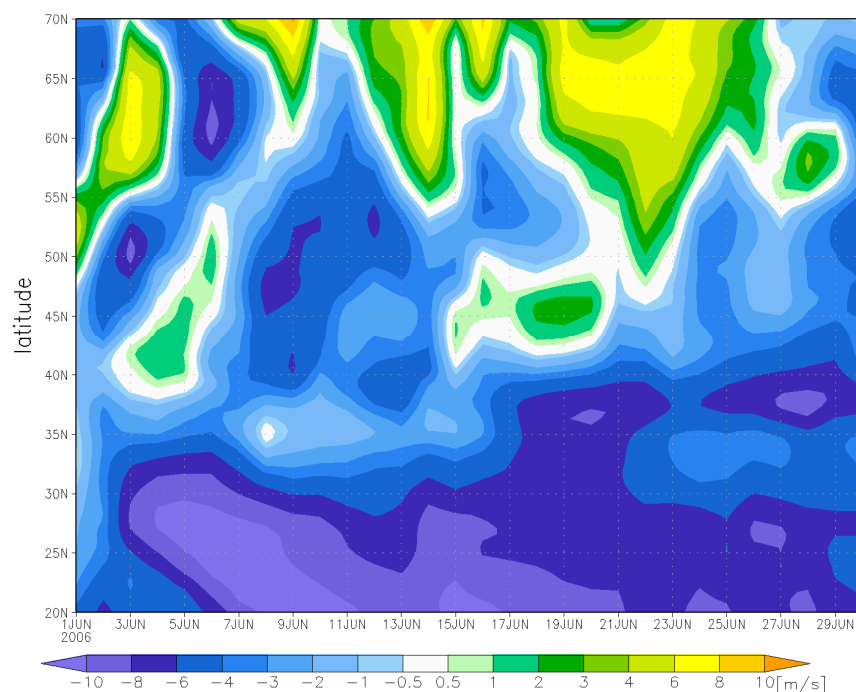


Fig.12 - Diagramma latitudine – tempo della componente meridionale del vento settore Est (15°E – 40°E)

Dall'analisi dei campi di vento è evidente come la fase di propagazione occidentale alla latitudini 20° - 35°N permanga per il periodo 4 – 17 giugno nel settore est, mentre



la propagazione meridionale sia ben più estesa alle medesime latitudini, sebbene la fase più intensa si concluda verso il 21 giugno. Alle latitudini più settentrionali proprio sul Mediterraneo e sull'Italia in particolare è evidente il cambio di direzione proprio dopo il 15 giugno. Dal 15 al 20 giugno infatti la circolazione è a prevalenza sud occidentale – occidentale favorendo in questo modo l'arrivo delle polveri sul nostro paese.

Le successive immagini riportano il campo di geopotenziale ad 850hPa mediato sempre sulle due zone di riferimento per l'intero mese di giugno. Appare evidente come il meccanismo che scatena i flussi superficiali e poi li mantiene attivi per alcuni giorni sia inizialmente l'alta pressione che si sviluppa sul Marocco ed Algeria probabilmente generata dal cosiddetto Heat Low sistem ovvero la bassa pressione al suolo per espansione adiabatica dell'aria riscaldata sopra la zona desertica a sud della catena dell'Atlante. Tale fenomeno che è indicato da molti come parte integrante del sistema monsonico dell'Africa occidentale tropicale, proprio in questo periodo acquisisce vigore. La sua stazionarietà così come l'intensità associata però cambia molto e dipende sia dal riscaldamento dell'aria come detto ma anche dal regime dei flussi Atlantici.

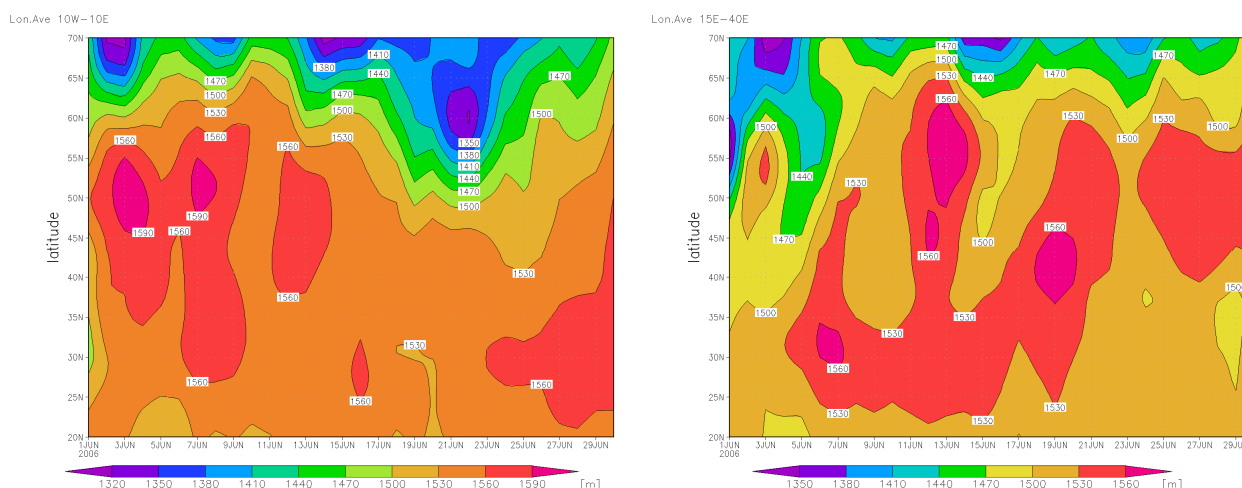


Fig.13 - Diagramma latitudine – tempo della del geopotenziale ad 850hPa sia per il settore Ovest (10°W – 10°E) a sinistra sia per quello Est (15°E – 40°E).

## 2.2 Campi di vento

L'evoluzione dei campi di vento alla superficie evidenzia l'azione di stimolazione dell'emissione dalla superficie dovuta all'afflusso di masse d'aria mobilitate dalla genesi di un massimo relativo di pressione sulla Libia che svolge il ruolo di modulatore della circolazione sul Mediterraneo durante l'intero mese di giugno e che forza sia i meccanismi di sollevamento che di trasporto delle polveri.

Per quanto riguarda l'emissione ed il sollevamento è interessante osservare i primi giorni di giugno 2006 nella seguente figura.

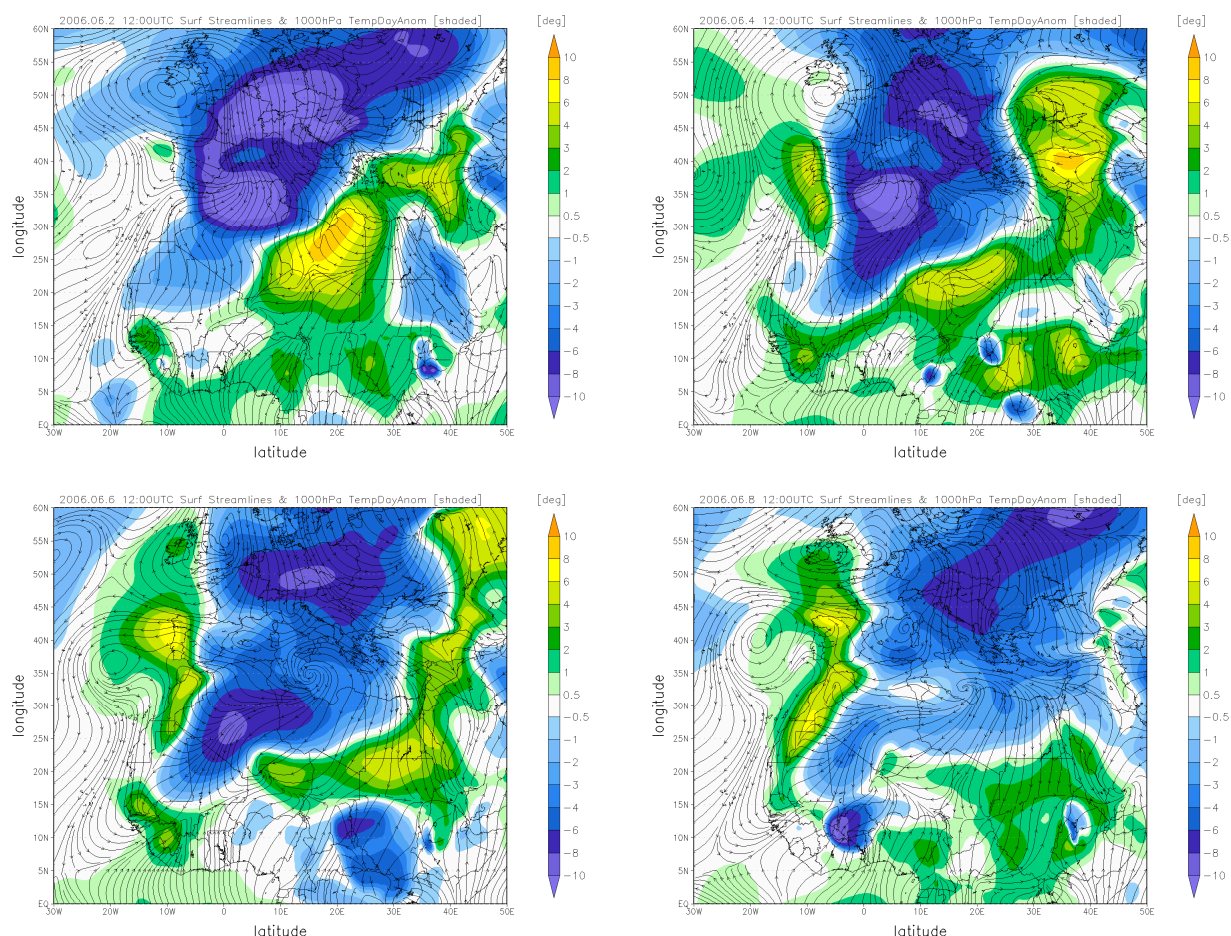


Fig.14 - Campi di linee di flusso alla superficie ed anomalia giornaliera a 1000hPa per le ore 12:00 UTC per i giorni, in senso orario, 2, 4, 6, 8 giugno 2006.

In essa sono riportate, per quattro scadenze differenti, il campo delle linee di flusso alla superficie e di anomalia termica alla quota di 850hPa. È ben evidente la compattezza dei flussi superficiali sia le caratteristiche termodinamiche della massa d'aria stessa definita dalla differenza tra il valore mensile mediato e il valore giornaliero della temperatura. Nella figura successiva è mostrato il campo di velocità del vento che esprime la forza applicata dal vento alla superficie per le stesse scadenze temporali. E' di nuovo evidente quanto sia intenso l'evento emissivo descritto durante il giugno 2006. Tre sono le zone di maggiore stress superficiale a partire da est: regione Sudan – Ciad, poi Algeria – Mali – Mauritania ed infine la costa Marocchina. I venti, in particolare quelli nord orientali che spirano sul Sudan – Ciad, sono conosciuti come Harmattan e svolgono un ruolo preponderante nella dinamica atmosferica tropicale del Monsone

Africano estivo. Durante la prima decade del giugno 2006 il pattern atmosferico alla superficie rimane intenso e compatto garantendo una continua emissione di polveri dalle zone interessate.

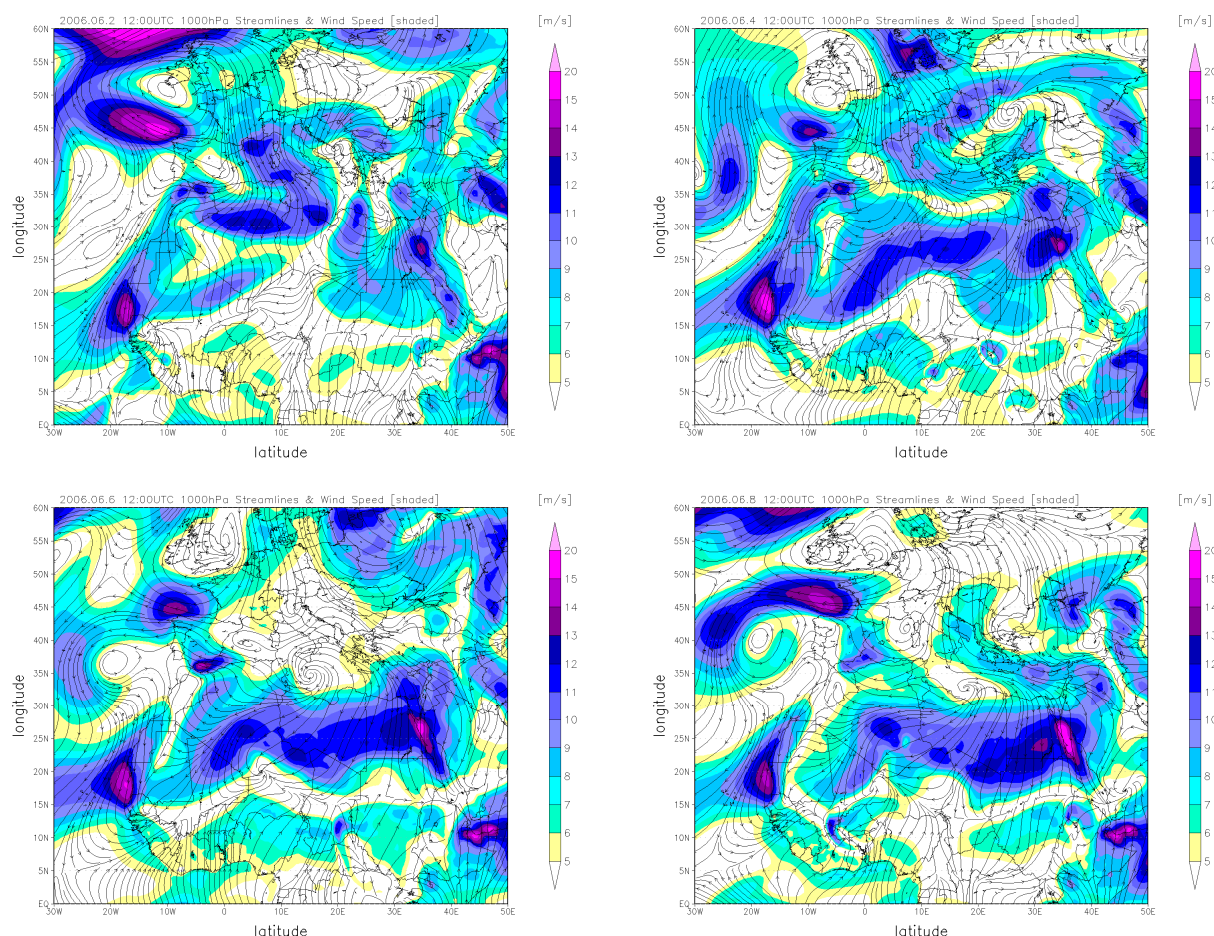


Fig.15 - Campi di linee di flusso ed intensità del vento alla superficie per le ore 12:00 UTC per i giorni, in senso orario, 2, 4, 6, 8 giugno 2006.

Durante la seconda e terza decade del mese infine la situazione atmosferica in quota, favorita dall'espansione dell'anticiclone posizionato sulla Libia, diviene favorevole al trasporto degli aerosols verso il mediterraneo centrale e l'Italia in particolare.

Analizzando le immagini mostrate nella figura successiva si vede come già dal 16 giugno 2006 si sia instaurato un flusso costante di notevole spessore barico, da 850hPa a 500hPa, diretto dall'Algeria verso l'Italia. Con qualche modifica tale configurazione, mantenuta dalla stazionarietà dell'alta pressione Libica, permane fino a fine mese. Da sottolineare che intorno al 23 giugno una perturbazione Atlantica, riesce a lambire il Mediterraneo Centrale. A questa perturbazione sono associate anche delle deboli precipitazioni che sia per effetto della precipitazione che dei moti di rimescolamento



verticale in quota dell'aria indeboliscono il flusso sud occidentale responsabile del trasporto delle polveri sull'Italia senza però interromperlo del tutto. Dal 26 giugno infine il campo di alta pressione torna nuovamente ad espandersi e garantire la continuità del trasporto degli aerosols.

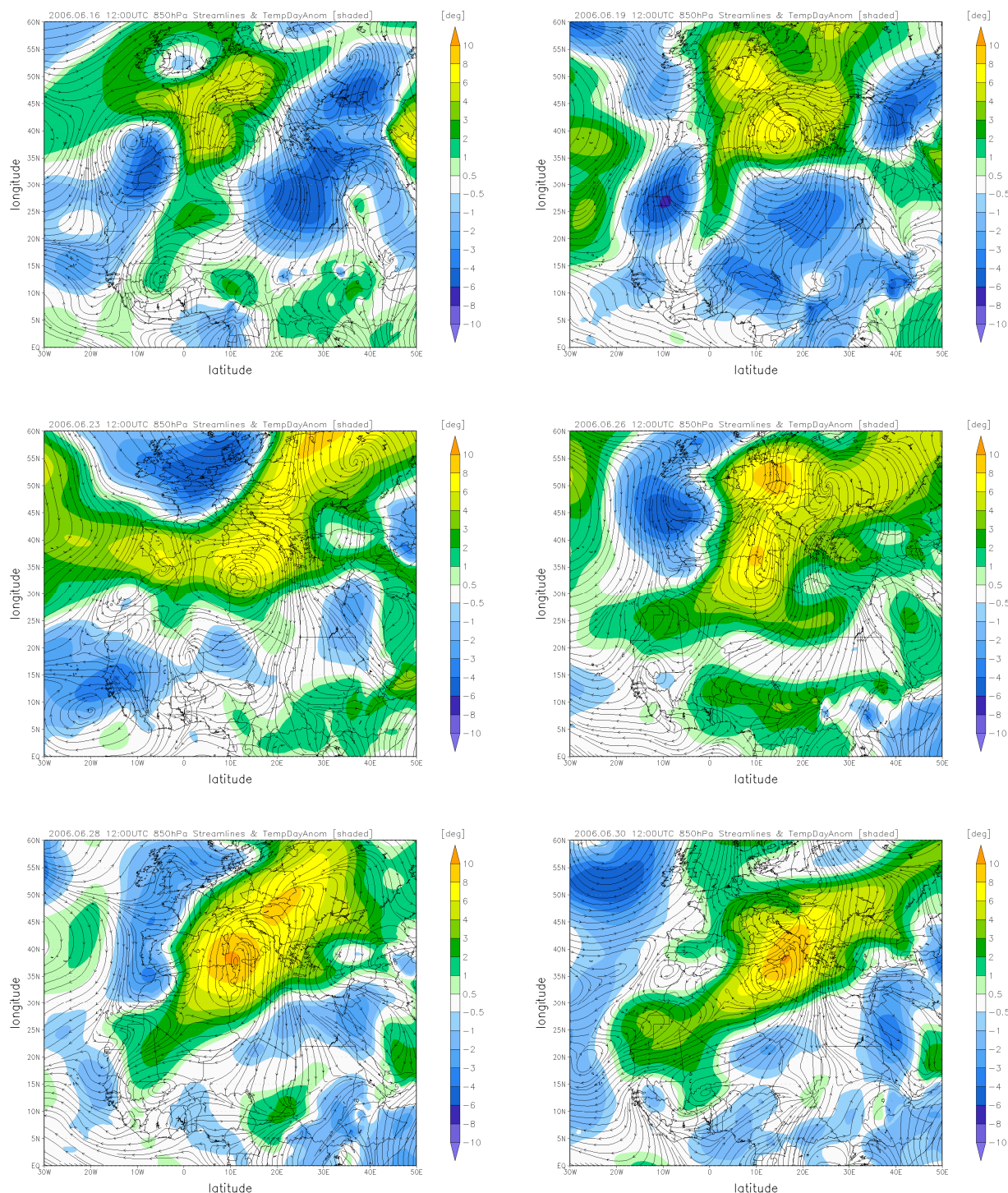


Fig.16 - Campi di linee di flusso ed intensità del vento alla quota di 850hPa e anomalie giornaliere di temperatura per le ore 12:00 UTC per i giorni, in senso orario, 16, 19, 23, 26, 28, 30, giugno 2006.

### 3. Trasporto e deposizione di polvere sahariana nel Mediterraneo

I risultati ottenuti nelle due simulazioni, relativi alle prime due classi dimensionali di particolato, sono costituiti dalla concentrazione e deposizioni su base oraria di polvere minerale, su un dominio di calcolo molto esteso, 380x340 celle di 30 Km per 18 livelli verticali, da 10 m a 10500 m.

Le mappe e i grafici elaborati sono moltissimi, dalle mappe di concentrazione al primo livello su base oraria, o giornaliera, per le due frazioni granulometriche e per la somma delle due, alla concentrazione media giornaliera integrata su tutti i livelli, alle sezioni verticali della concentrazione media giornaliera, alle deposizioni cumulate giornaliere, ai grafici di concentrazione nei tre siti recettori, Firenze, Lucca, Grosseto (vedi tab. ). Solo una piccola parte degli elaborati grafici è stata inserita nel report, mentre la parte più cospicua è riportata in appendice.

In questo capitolo è stata elaborata una sintesi dei risultati volta a evidenziare i meccanismi di trasporto e deposizione della polvere minerale dal deserto del Sahara sull'Europa, con particolare attenzione all'Italia e alla Toscana. Le analisi di dettaglio nei tre siti recettori ed il confronto con le misure effettuate durante la campagna di PATOS1, oltre a completare il quadro, costituiscono una sorta di validazione dell'approccio modellistico adottato.

#### 3.1 Analisi dell'episodio - giugno 2006

Le mappe della concentrazione media giornaliera al primo livello, come somma delle due frazioni (fig. 17 , appendice pagg. 10-15), mostrano il primo ingresso della polvere minerale sulla penisola Iberica il 6 giugno come diretto interessamento della circolazione anticiclonica in quota sul Marocco. Nei giorni successivi la polvere raggiunge il nord Europa (Francia, UK, Norvegia), per spostarsi poi verso nord-est, est e interessare, dal 16 giugno, anche il nord Italia, sospinta per espansione dell'alta pressione Libica. Nei giorni 17 e 18 si presentano le concentrazioni più alte in Spagna, Francia, Svizzera, Germania, Italia e penisola Balcanica. Nei giorni successivi, fino al 30 giugno, una vasta area che va dal Mediterraneo occidentale al nord Europa (penisola Scandinava e Russia) è investita dalla polvere del deserto, sia in quota che nei livelli più bassi. Nei giorni 24 e 25 giugno sull'Italia centro-settentrionale si nota una sostanziale diminuzione della concentrazione, dovuta all'ingresso di una perturbazione ciclonica di origine Atlantica che interrompe momentaneamente il flusso sud-occidentale sull'Italia.

Nei giorni successivi anche questa area viene di nuovo interessata dalla polvere del deserto, e il meccanismo di trasporto diretto dal nord Africa riprende proseguendo fino al 30 giugno.

Le mappe di concentrazione media giornaliera integrata sull'intera colonna d'aria verticale (appendice, pagg. 4-9) mostrano nei giorni 24 e 25 una diminuzione meno marcata, segno della presenza di polvere in quota: questo evidenzia come l'intrusione di aria da nord-ovest interessi principalmente i bassi strati dell'atmosfera per effetto del fronte freddo, associato alla perturbazione Atlantica. Considerando l'intero mese di giugno, le mappe della concentrazione integrata su 18 livelli sono in sostanziale accordo con le mappe relative al primo livello, ma mostrano, soprattutto sull'Atlantico, la presenza di polvere in quota su un'area più estesa rispetto all'area interessata dalla polvere nello strato più basso. Queste mappe forniscono una informazione analoga a quella che si ottiene dalle immagini TOMS (Total Ozone Mapping System); non è possibile tuttavia un semplice confronto, in quanto l'aerosol index, ottenuto con un metodo che utilizza l'assorbimento dell'aerosol nel campo dell'infrarosso, non è direttamente correlabile alla stima della concentrazione di polvere del modello. A titolo di esempio, in fig. 18 sono riportate le mappe ottenute dalle stime modellistiche e le immagini TOMS, relative ai giorni 26 e 27 giugno.

In appendice sono riportate anche le mappe della concentrazione media giornaliera, al primo livello, delle due frazioni granulometriche, CCR1 e CCR2 (appendice, pagg. 16–21; pagg. 22-27). Si nota che la concentrazione della frazione più grossa trasportata sull'Europa è generalmente più alta della frazione fine, mentre nell'ultimo periodo, dal 26 al 30 giugno, la concentrazione delle due frazioni è circa uguale.

Per quanto riguarda la deposizione secca su base giornaliera (appendice, pagg. 55-60; pagg. 61-66), le quantità relative alla frazione più grossa sono sempre molto maggiori rispetto a quelle della frazione fine. La deposizione umida (appendice, pagg. 67–72), invece, interessa esclusivamente la fascia equatoriale, dove sono attivi i sistemi convettivi profondi associati al Monsone Africano Occidentale. A titolo di esempio nella fig. 19 sono riportate le mappe dei giorni 16, 17, 18 giugno, relative alla deposizione secca e umida.

Per avere maggiori informazioni riguardo alla distribuzione verticale della polvere, sono stati elaborati i grafici relativi alla sezione verticale della concentrazione media giornaliera della somma delle due frazioni; sono stati elaborati due tipi di mappe, le cui sezioni sono relative alla latitudine o alla longitudine di Firenze (LAT 43.78°, LON

11.28°). Sull'asse delle x sono indicate le principali città alla latitudine/longitudine di Firenze, mentre sull'asse delle y è riportata la quota in metri (10 – 10500 m).

La prima serie di mappe (fig. 20, appendice, pagg. 28–33), relative alla sezione LAT 43.78°, mostrano dal 6 giugno l'ingresso della polvere sulla Spagna (La Coruna) e poi sulla Francia (Toulouse) con una distribuzione in quota che riguarda sia livelli più bassi che quote alte, fino a 5000-7000 m. Il giorno 15 giugno su Firenze si evidenzia la presenza di polvere a quote molto alte, tra 4000 e 9000 m, che però non interessa il livello più basso. Dal 16 al 22 giugno sull'Europa e anche, in particolare, su Firenze la concentrazione di polvere è molto alta, soprattutto tra 1000 e 8000-10000 m, mentre nel livello più vicino al suolo i valori di concentrazione sono notevolmente più bassi, di oltre un ordine di grandezza ( $30\text{-}40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  vs  $200\text{-}500\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Dal 23 giugno su Firenze la concentrazione diminuisce in maniera drastica; il 24 si verifica un intervallo, la concentrazione è praticamente nulla, mentre già dal giorno successivo nei livelli più alti, sopra 1000 m, si notano concentrazioni rilevanti. Dal 26 al 30 giugno Firenze è interessata da significativi livelli di concentrazione di polvere, che si sviluppano fino a quote superiori ai 9000 m e hanno un massimo intorno a 3000-4000 m: le concentrazioni in quota sono comunque più basse rispetto al periodo 16-22 giugno.

Analogamente (fig. 21, appendice, pagg. 34–39), i grafici della sezione verticale relativi alla longitudine di Firenze (LON 11.28) mostrano lo stesso fenomeno lungo la direzione sud – nord, partendo da Yoounde (Cameroon) a Lilestron (Norvegia). Osservando le mappe dei giorni 14 e 15 è interessante notare come le polveri arrivino su Firenze sia da sud che da nord; anche in questo caso sono evidenti le alte concentrazioni in quota nel periodo 16-22 giugno, l'intervallo con assenza di polveri dal 23 al 24, la loro presenza in quota il 25 e di nuovo il fenomeno dell'intrusione sahariana dal 26 al 30, con una intensità sicuramente inferiore ai giorni precedenti nelle quote più alte.



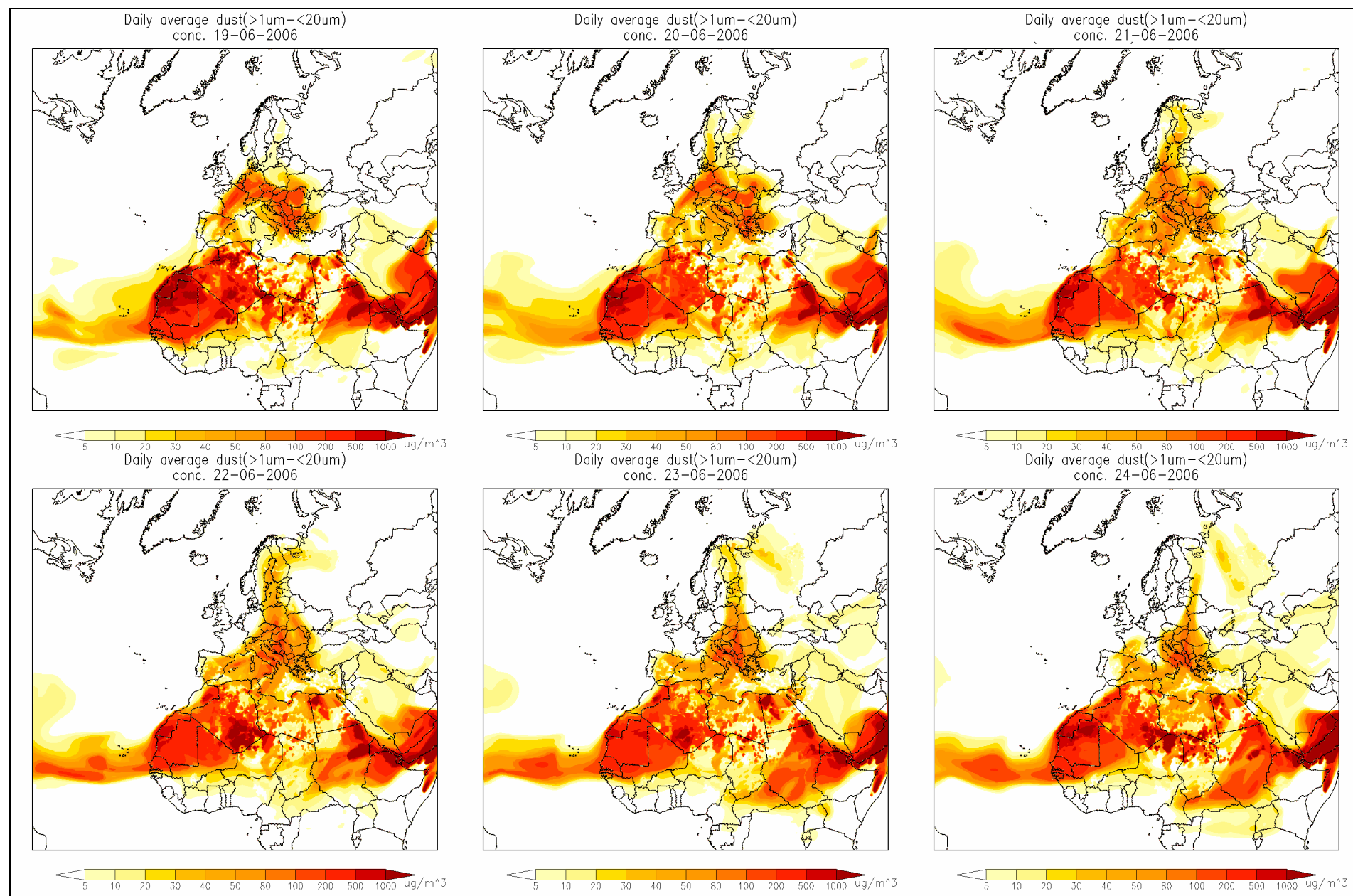


Fig. 17 – Mappe delle concentrazioni medie giornaliere di polvere minerale (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con diametro aerodinamico compreso tra 1 e 20  $\mu\text{m}$ , al primo livello (10 m), stimate da CAMx.



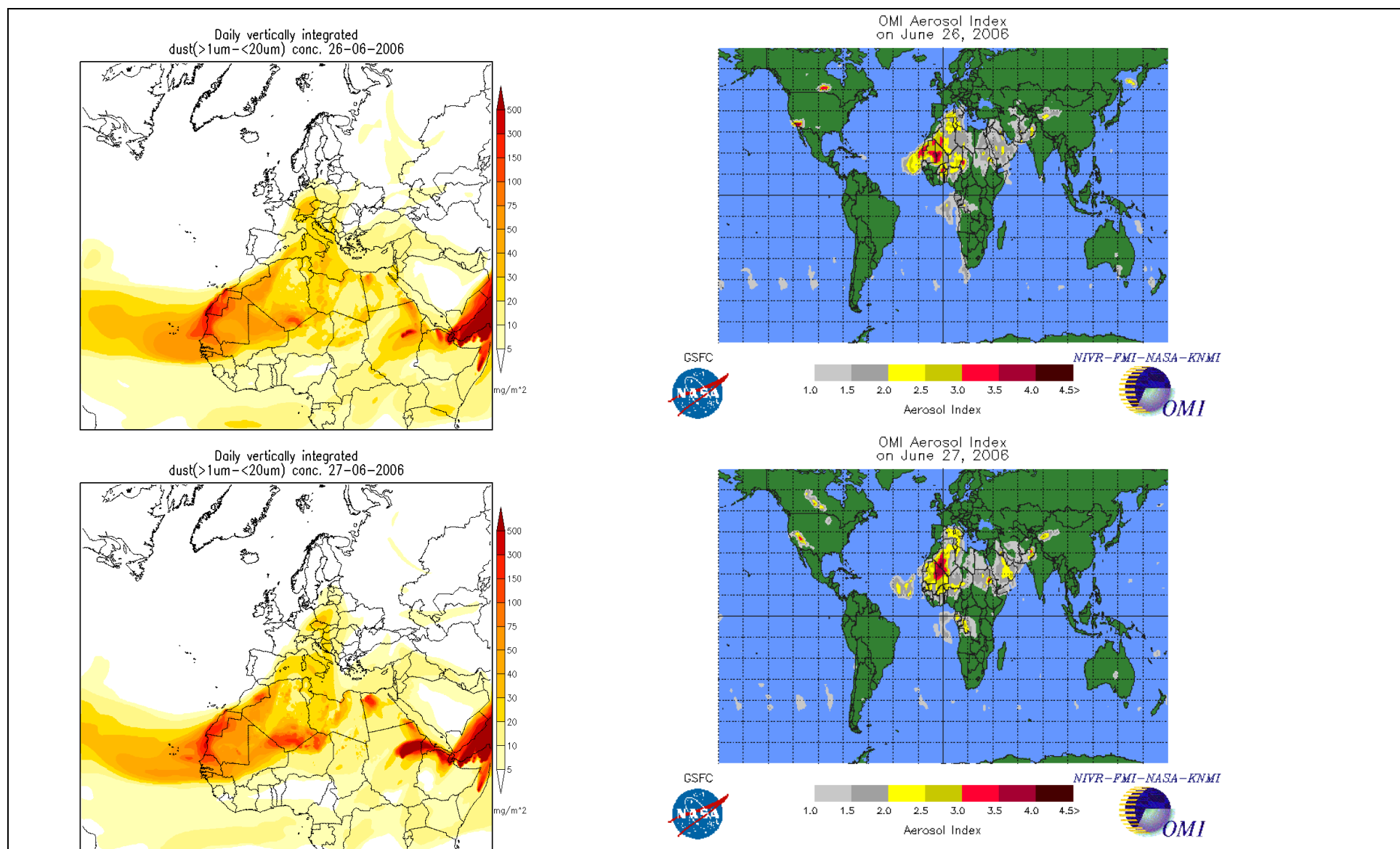


Fig. 18 – Mappe delle concentrazioni medie giornaliere di polvere minerale (in  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) con diametro aerodinamico compreso tra 1 e 20  $\mu\text{m}$ , integrate sui livelli verticali (sinistra), mappe TOMS (destra), nei giorni 26 e 27 giugno.

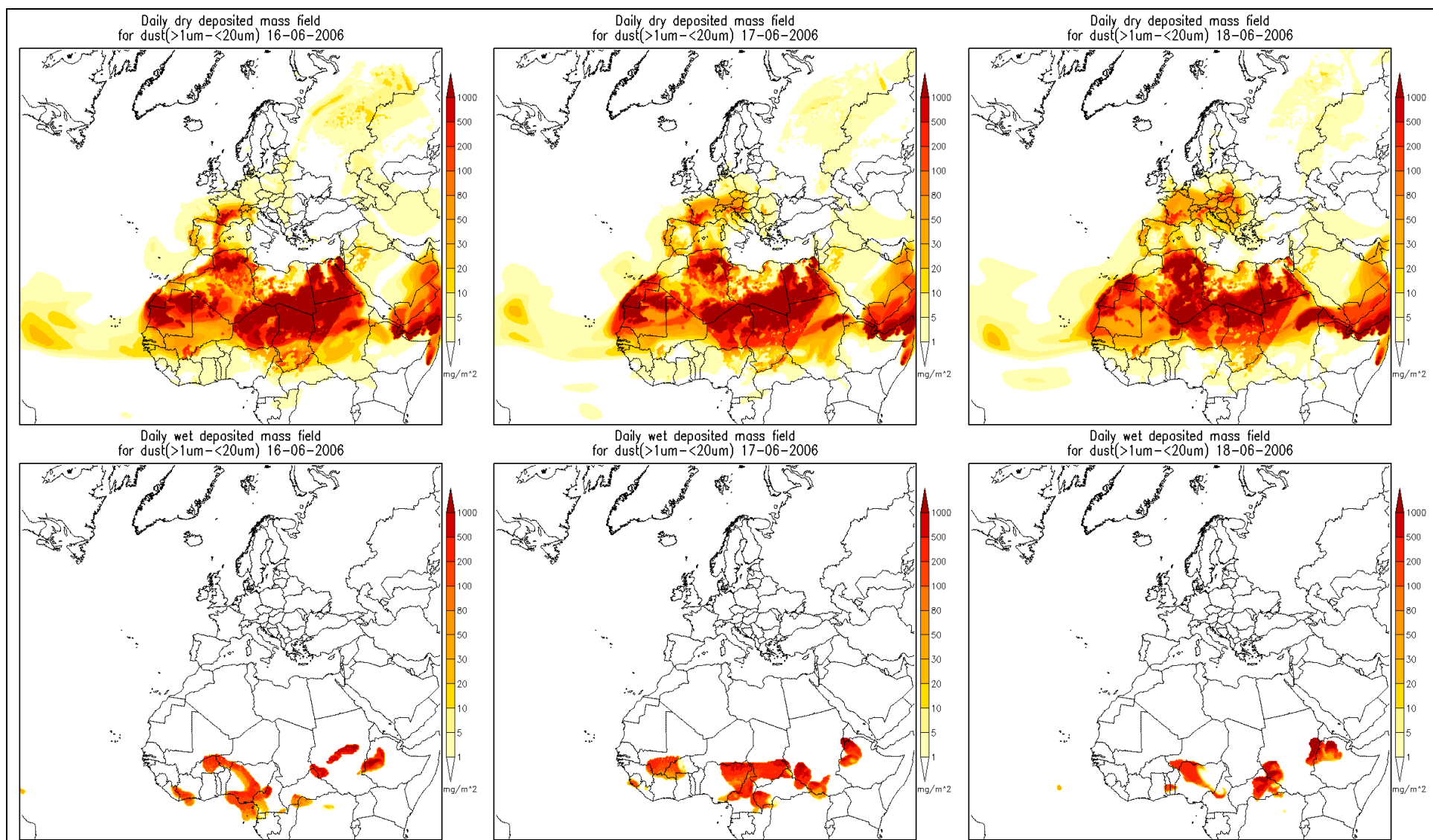


Fig. 19 – – Mappe della deposizione media giornaliera di polvere minerale (in  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) con diametro aerodinamico compreso tra 1 e 20  $\mu\text{m}$ , dal 16 al 18 giugno; deposizione secca (sopra), deposizione umida (sotto).

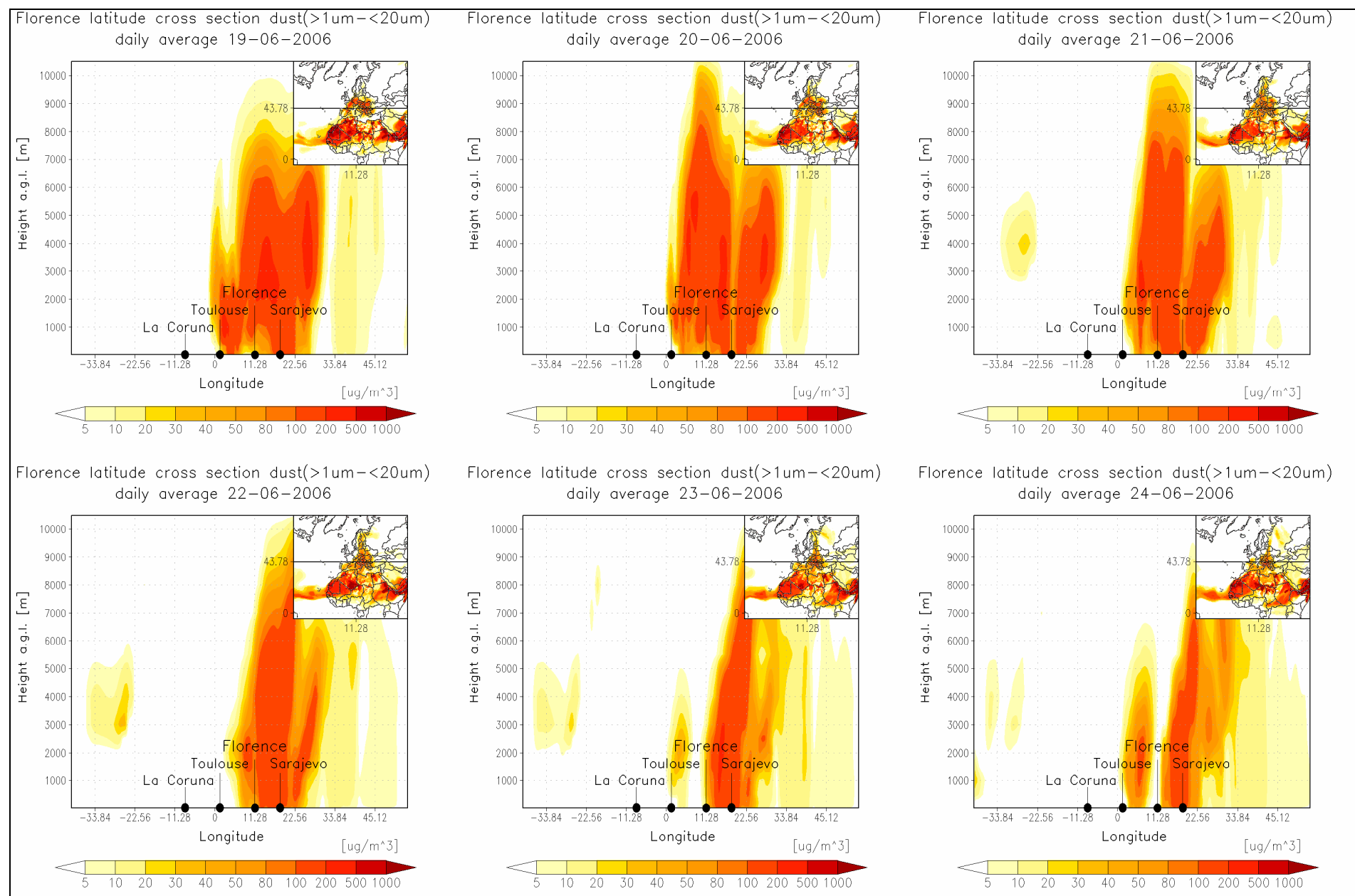


Fig. 20 –Sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media giornaliera della somma di CCR1 e CCR2, alla latitudine di Firenze, ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), dal 19 al 24 giugno.

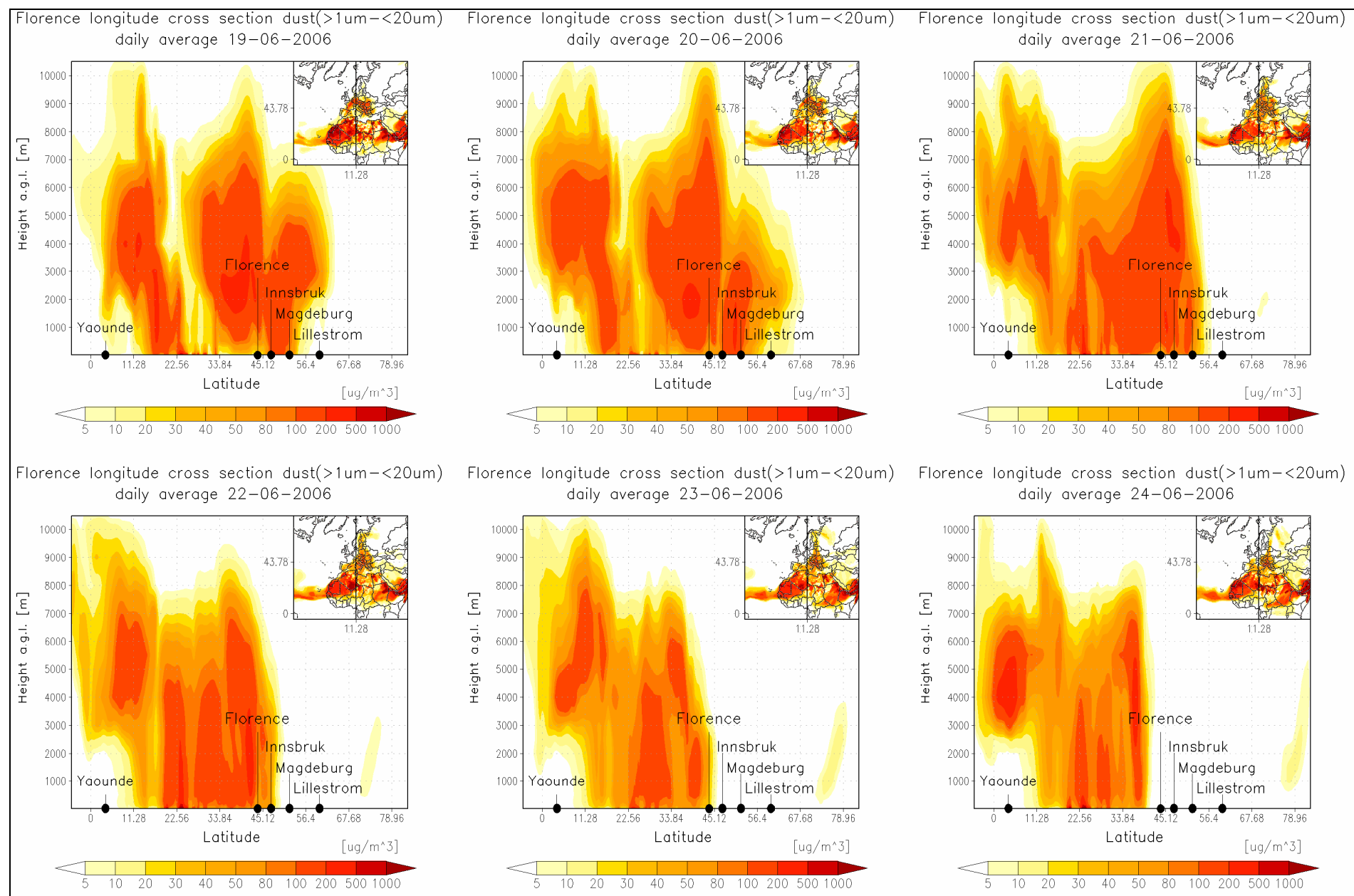


Fig. 21 – Sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media giornaliera della somma di CCR1 e CCR2, alla longitudine di Firenze, ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), dal 19 al 24 giugno.

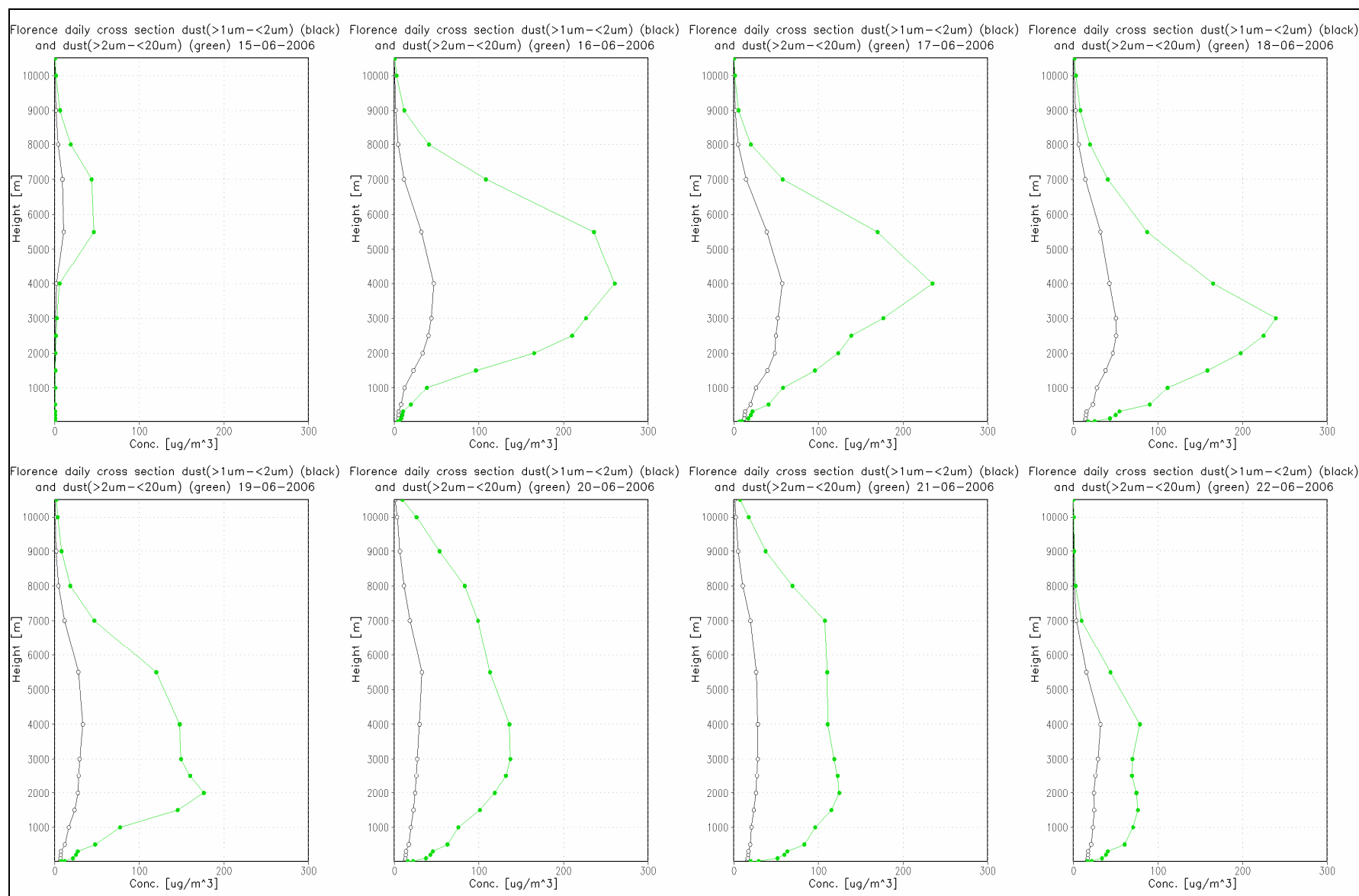


Fig. 22 – Sezione verticale (10 – 10500 m) della concentrazione media giornaliera di CCR1 e CCR2, nel sito recettore di Firenze, ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), dal 15 al 22 giugno..

### 3.2 Concentrazione della polvere sahariana in Toscana

Nel periodo in cui si è verificato l'episodio di trasporto di polvere sahariana erano attivi i campionatori di PM<sub>10</sub> presso i siti di Firenze (via Bassi), Grosseto (via URSS), Lucca (Capannori). In corrispondenza di questi siti (Tab.) sono state elaborate le serie storiche relative alle stime delle concentrazioni orarie di polvere minerale per il periodo che va dal 1° al 30 giugno.

Tab.5 – Siti di campionamento in corrispondenza dei quali sono state elaborate le serie storiche delle stime delle concentrazioni di polvere minerale.

Siti di campionamento:					
Nome	Località	Provincia	Ubicazione	Coordinate UTM Fuso 32	
				X (Km)	Y (Km)
FI BASSI	Firenze	FI	Via Bassi	683.896	4850.571
LU CAPANNORI	Capannori	LU	Via Piaggia	626.504	4855.534
GR URSS	Grosseto	GR	Via URSS	672.665	4738.424

Osservando il grafico della concentrazione oraria relativa alla somma delle due frazioni, PM<sub>20</sub> (fig. 23), si nota un andamento caratterizzato da picchi giornalieri molto marcati nel primo periodo, dal 16 al 23 giugno – escursioni tra 10 µg/m<sup>3</sup> e 90 µg/m<sup>3</sup> – una drastica riduzione con valori prossimi a zero il 24 e 25 giugno, e di nuovo la presenza di picchi dal 26 al 30 giugno, per i tre siti. Nel sito di Grosseto vengono stimati generalmente valori più bassi rispetto a i valori di Firenze e Lucca, soprattutto tra il 16 e il 20 giugno.

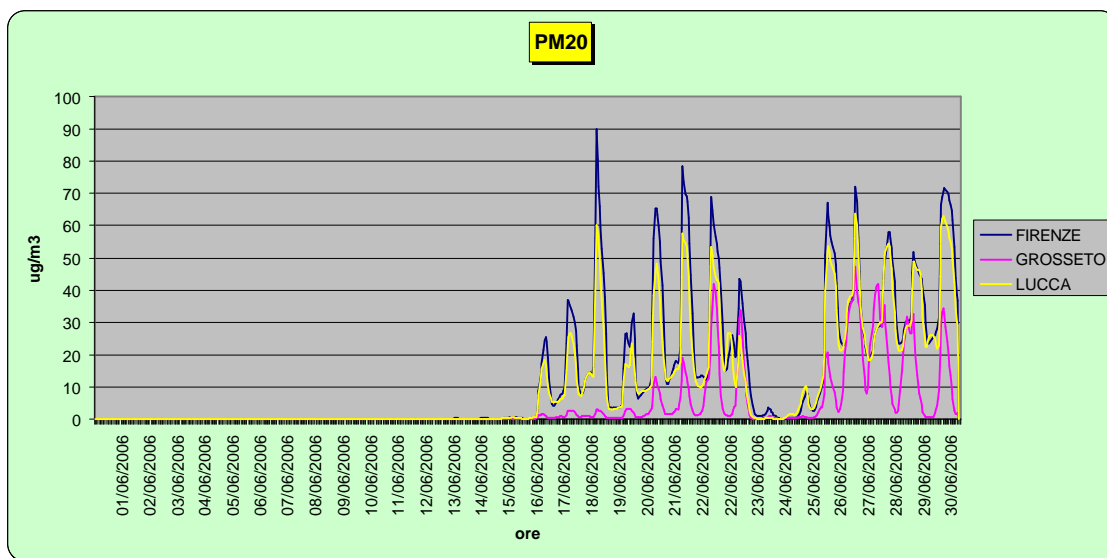


Fig. 23-Grafico della serie temporale della concentrazione media oraria della somma di CCR1 e CCR2 nei siti recettori di Firenze, Grosseto e Lucca

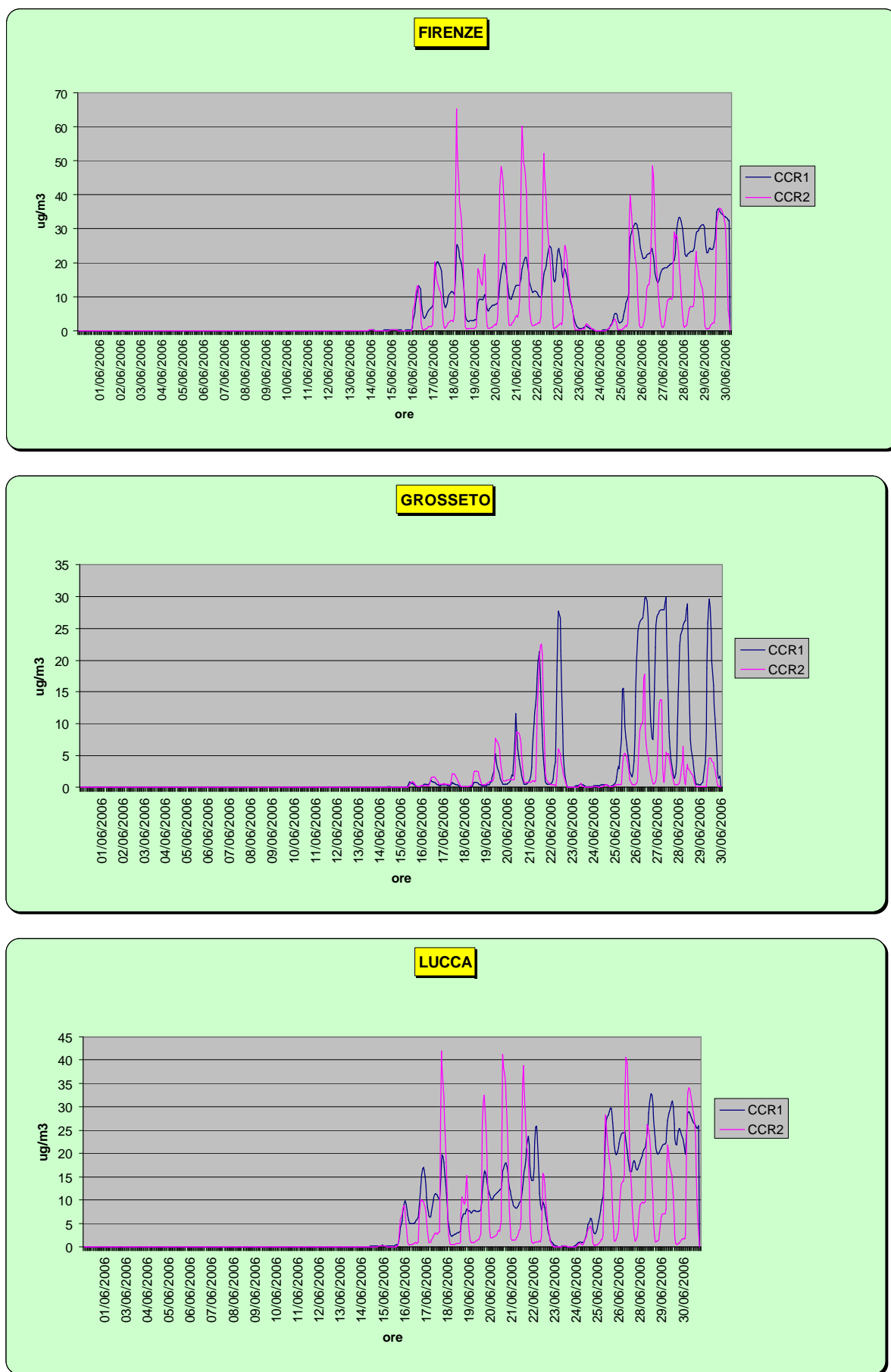


Fig. 24-Grafici della serie temporale della concentrazione media oraria di CCR1 e CCR2 nei siti recettori di Firenze, Grosseto e Lucca



Nei grafici in fig. 24 sono contrapposti, sito per sito, l'andamento temporale delle due frazioni ( $1-2\ \mu\text{m}$ ;  $2-20\ \mu\text{m}$ ). Nei siti di Firenze e Lucca le concentrazioni della frazione grossolana sono caratterizzate da picchi giornalieri marcati che passano da valori molto alti a valori prossimi a zero nell'arco di poche ore, mentre la concentrazione della frazione fine mostra picchi non molto alti che si staccano da un plateau. Nel sito di Grosseto, invece, le concentrazioni delle due frazioni hanno un andamento analogo, con picchi molto marcati, nei giorni 20-22 giugno, con valori più alti nella frazione fine rispetto alla frazione grossa nei giorni 23, 26-30 giugno.

Confrontando l'andamento orario della concentrazione di polvere e dell'altezza dello strato di rimescolamento, Hmix, si osserva una notevole correlazione (fig.25): in realtà i picchi di concentrazione della frazione grossa anticipano di qualche ora i valori massimi di Hmix, raggiunti intorno alle ore 15. Questo fenomeno potrebbe essere spiegato considerando che la concentrazione maggiore della polvere minerale si trova al di sopra dello strato limite: quando, nell'arco della giornata, Hmix cresce e raggiunge quote dell'ordine di 1000 m o superiori le polveri entrano nello strato più vicino al suolo. La frazione più fine resta in sospensione per un tempo maggiore e si accumula (plateau), mentre la frazione grossolana si deposita più rapidamente, dando origine ad un andamento temporale delle concentrazioni molto simile a quello di Hmix, ma anticipato di qualche ora.

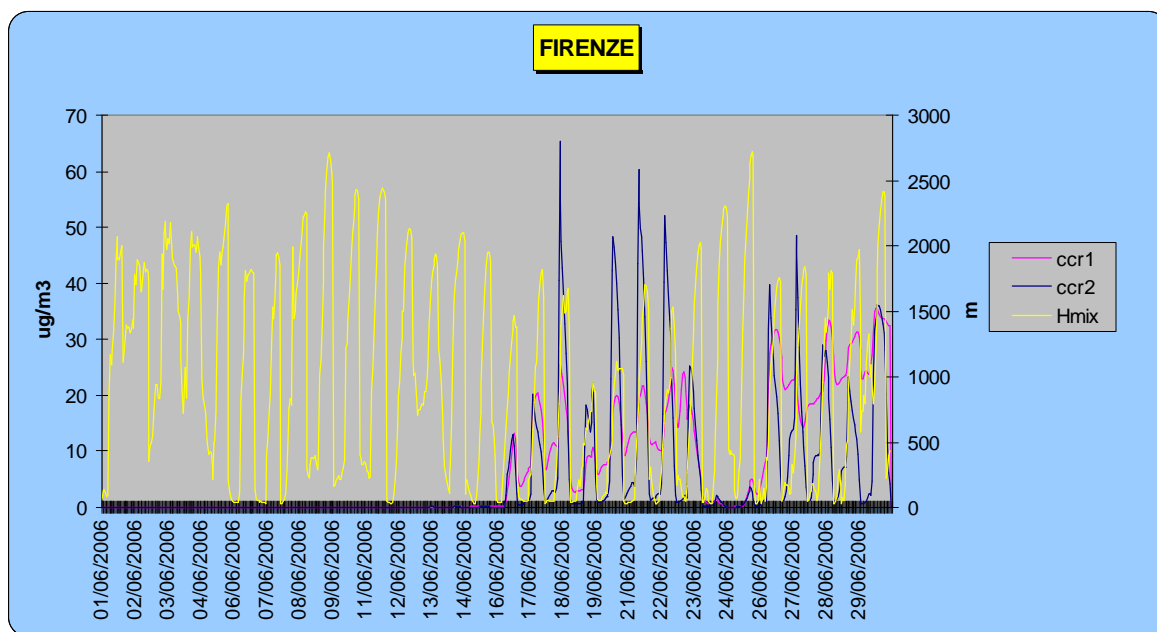


Fig. 25-Grafico della serie temporale della concentrazione media oraria di CCR1 e CCR2 nel sito di Firenze e della corrispondente serie temporale di Hmix.

Il diverso comportamento del sito di Grosseto, e in particolare i valori più bassi di concentrazione, si potrebbero spiegare considerando che l'altezza di rimescolamento



stimata dai modelli RAMS-CAMx è mediamente più bassa rispetto a quella stimata nei siti Firenze e Lucca, a causa della vicinanza del mare (le celle di calcolo sono 30x30 Km<sup>2</sup>). In alcuni giorni Hmix stimato raggiunge valori massimi dell'ordine di 500 m, limitando così l'intrusione di polvere dalle quote più alte allo strato vicino al suolo, come avviene nei due siti dell'entroterra.

Anche i grafici che riproducono il profilo verticale della concentrazione di polvere, nelle due frazioni fine e grossa (fig. 22, appendice pagg. 40-48) mostrano che la concentrazione maggiore si trova a quote alte: la frazione grossolana presenta valori elevati (16-18 giugno) a quote tra 1000 e 5000 m, mentre la frazione fine, pur aumentando con la quota, mostra sempre valori più contenuti. Da notare come i profili verticali della concentrazione siano analoghi nei tre siti, che avvalorano l'ipotesi di un diverso comportamento delle concentrazioni nello strato più basso a causa di Hmix.

### 3.3 Confronto stime-misure

Per effettuare un confronto tra stime modellistiche e misure, i valori medi giornalieri di concentrazione di polvere minerale simulati sono stati riportati in grafico con le misure effettuate nell'ambito del progetto PATOS<sup>1</sup>.

In particolare, sono state prese in esame le misure su base giornaliera di PM<sub>10</sub> effettuate dal 15 al 28 giugno nei tre siti, Firenze, Grosseto, Lucca. Oltre alle misure gravimetriche, i gruppi di ricerca di Fisica (Prof. Lucarelli) e di Chimica (Prof. Udisti) dell'Università di Firenze hanno utilizzato specifiche tecniche di analisi (es. tecnica PIXE, Particle Induced X-ray Emission) per rivelare gli elementi caratteristici della componente crostale (Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr, Zr). Questi elementi possono essere utilizzati come indicatori nella quantificazione dell'impatto dovuto al trasporto di polvere sahariana; in particolare, l'analisi del cambiamento nei rapporti elementari permette di distinguere fra polvere crostale locale e polvere desertica trasportata [ref. Luc, Borbély et al. 2004]. Una volta identificato il periodo interessato dall'episodio di trasporto di polvere sahariana tramite l'analisi dei rapporti elementari, è stato stimato il contributo assoluto (in µg/m<sup>3</sup>) al PM<sub>10</sub> derivante dalla frazione crostale, sia locale che trasportata [Portarena S. 2006/2007]<sup>1</sup>.

Nelle figure sono riportate, per i tre siti, le concentrazioni medie giornaliere stimate dal modello (PM<sub>20</sub>-dust) contrapposte alle misure gravimetriche di PM<sub>10</sub> (figg. 26, 28, 30)

---

<sup>1</sup> Questa parte del lavoro è stata svolta interamente dall'Università di Firenze, per cui si omette una descrizione di dettaglio.

e al solo contributo crostale (indicato come  $CRU_{10}$ , frazione crostale del  $PM_{10}$ ; figg. 27, 29, 31).

Si tratta di un confronto solo qualitativo, dato che le stime modellistiche della polvere sahariana sono riferite alla frazione 1-20  $\mu m$ , le misure gravimetriche al  $PM_{10}$  totale, mentre la stima della componente crostale del  $PM_{10}$  misurato è riferita sia al contributo locale che sahariano.

Nei siti di Firenze e Lucca i valori simulati diventano significativi dal 16 giugno, con una crescita importante il 18, una diminuzione il 19 e una repentina crescita fino al 22, una rapida diminuzione il 23, valori quasi nulli il 24 e 25 e una successiva nuova crescita dal 26 fino al 30 giugno. I valori sono compresi tra 10 e 40  $\mu g/m^3$  a Firenze (escluso il valore 50  $\mu g/m^3$  il 30 giugno, in cui non ci sono misure per il confronto) e tra 10 e 30  $\mu g/m^3$  a Lucca (analogamente il 30 giugno è stimato un valore di 45  $\mu g/m^3$ ).

A Grosseto invece i valori simulati, molto bassi fino al 20 giugno, mostrano due picchi, il primo il 22 giugno, seguito da una rapida discesa con valori prossimi a zero il 24 e il 25, e il secondo il 27 giugno; i valori sono generalmente più bassi rispetto agli altri siti, tra 5 e 25  $\mu g/m^3$ .

Per quanto riguarda le misure, il contributo crostale nei tre siti rappresenta circa la metà dei valori di concentrazione di  $PM_{10}$  totale e mostra, nei siti di Firenze e di Lucca, un andamento diverso, con una crescita fino al 22, una decrescita con valori bassi (23-25 a Firenze, 24-26 a Lucca), una nuova salita fino al 28 giugno. Nel  $PM_{10}$  totale, invece, non si evidenzia una diminuzione, anzi nel sito di Lucca si riscontra un aumento nei giorni 24 e 25 giugno. Nel sito di Grosseto le concentrazioni della componente crostale e del  $PM_{10}$  totale mostrano un andamento del tutto analogo, con un picco il 22 giugno, una marcata diminuzione il 24 e 25 giugno una rapida crescita fino al 28 giugno.

Il confronto stime-misure mostra un miglior accordo con la frazione crostale nei siti di Firenze e Lucca, soprattutto per la diminuzione del 24-25, che non si evidenzia nel  $PM_{10}$  totale. In questi due siti però la simulazione indica un picco il giorno 18, che non si riscontra nelle misure. A livello quantitativo, nei due siti dell'entroterra, si nota come la frazione  $PM_{20}$  della polvere desertica sia poco meno del doppio rispetto alle misure della componente crostale del  $PM_{10}$ , mentre a Grosseto le stime sono addirittura inferiori ai valori misurati. Non è nota però quale sia la frazione di polvere desertica nel  $PM_{20}$  rispetto a quella del  $PM_{10}$ , quindi possiamo solo constatare che l'ordine di grandezza della concentrazione di polvere sahariana simulata da modello è ragionevole.

In prospettiva, sarebbe utile confrontare la frazione fine simulata (1-2  $\mu\text{m}$ ) con la componente crostale del  $\text{PM}_{2.5}$  (anche in questo caso non c'è una completa sovrapposizione).

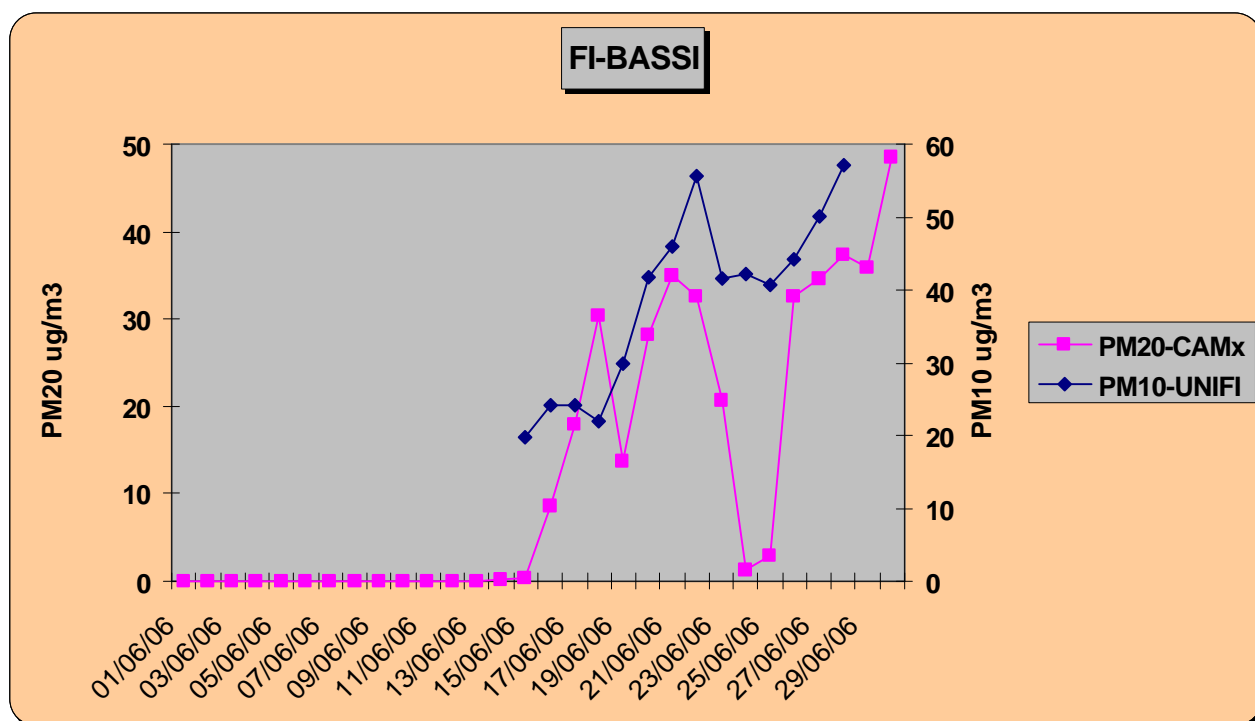


Fig. 26-Grafico della concentrazione media giornaliera di polvere sahariana simulata da CAMx (PM20-dust) e del PM10 totale misurato nel sito recettore di Firenze.

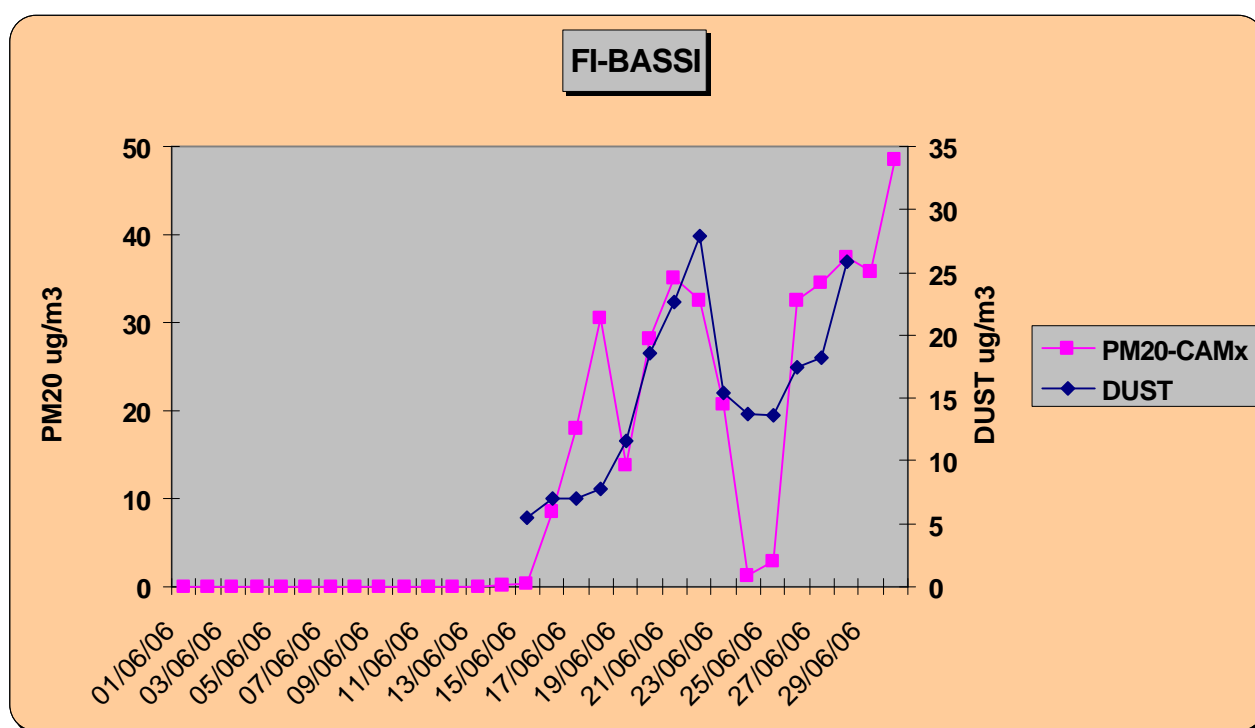


Fig. 27-Grafico della concentrazione media giornaliera di polvere sahariana simulata da CAMx (PM20-dust) e della componente crostale del PM10 misurato nel sito recettore di Firenze.

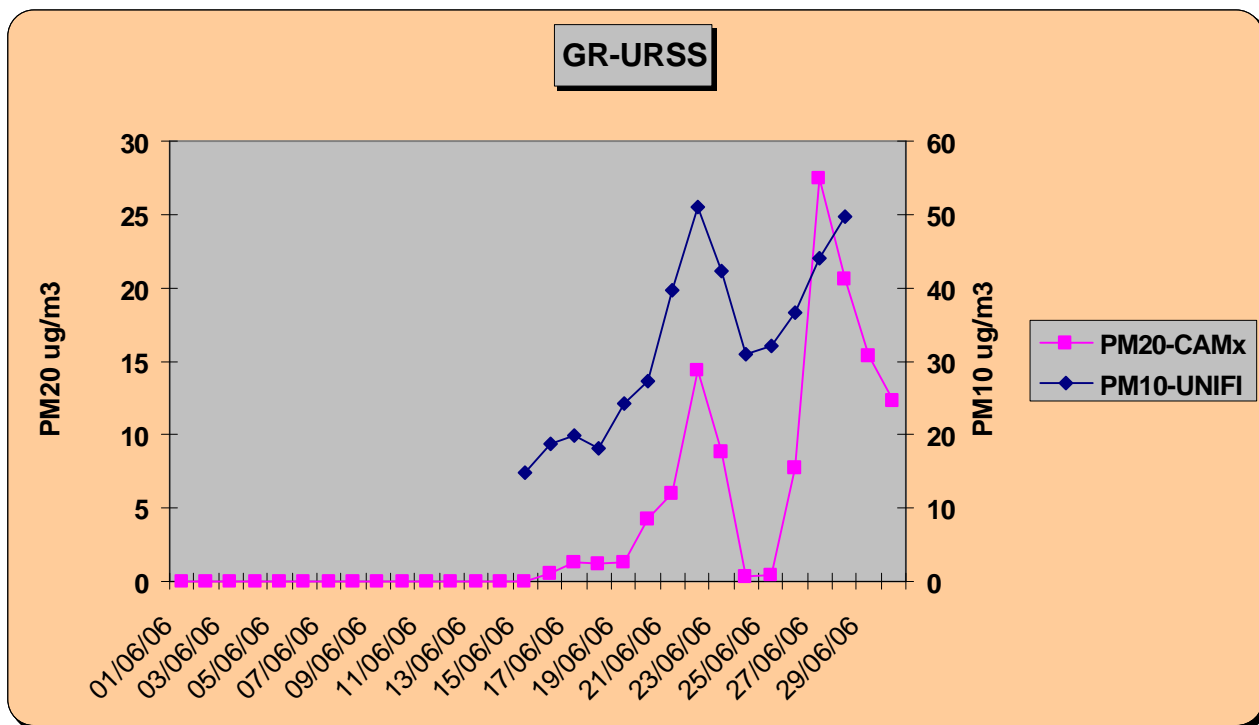


Fig. 28-Grafico della concentrazione media giornaliera di polvere sahariana simulata da CAMx (PM20-dust) e del PM10 totale misurato nel sito recettore di Grosseto.

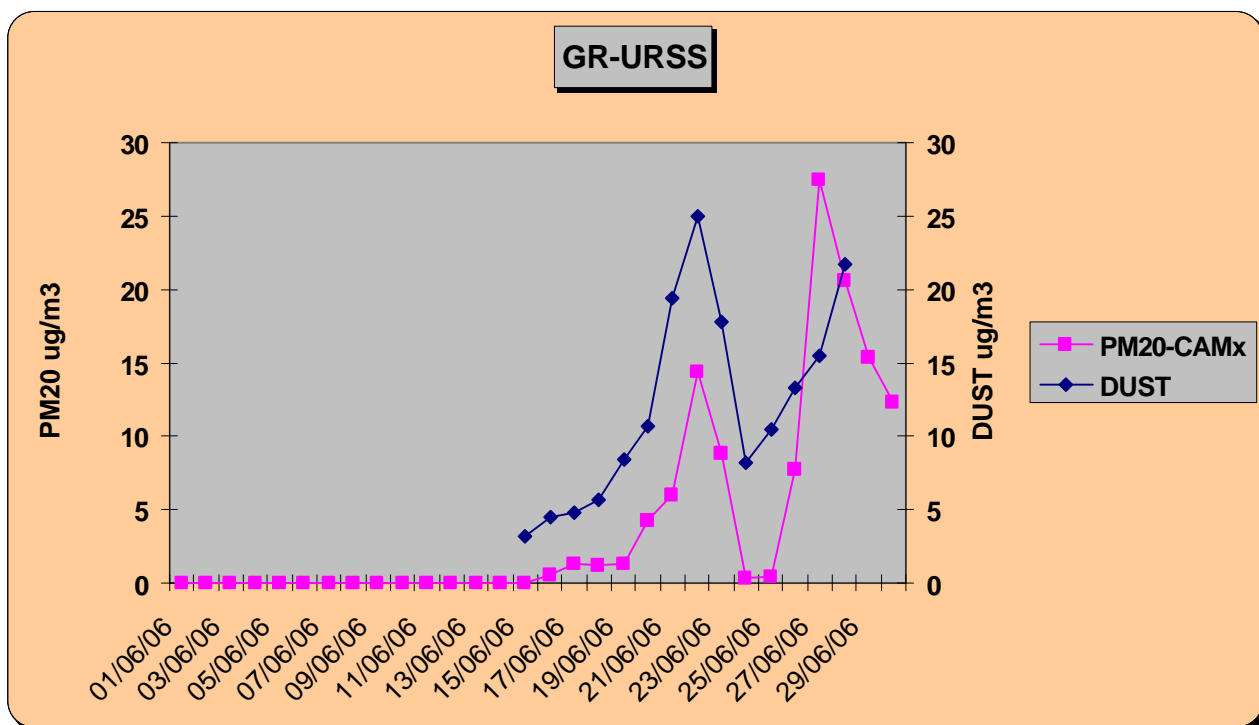


Fig. 29-Grafico della concentrazione media giornaliera di polvere sahariana simulata da CAMx (PM20-dust) e della componente crostale del PM10 misurato nel sito recettore di Grosseto.

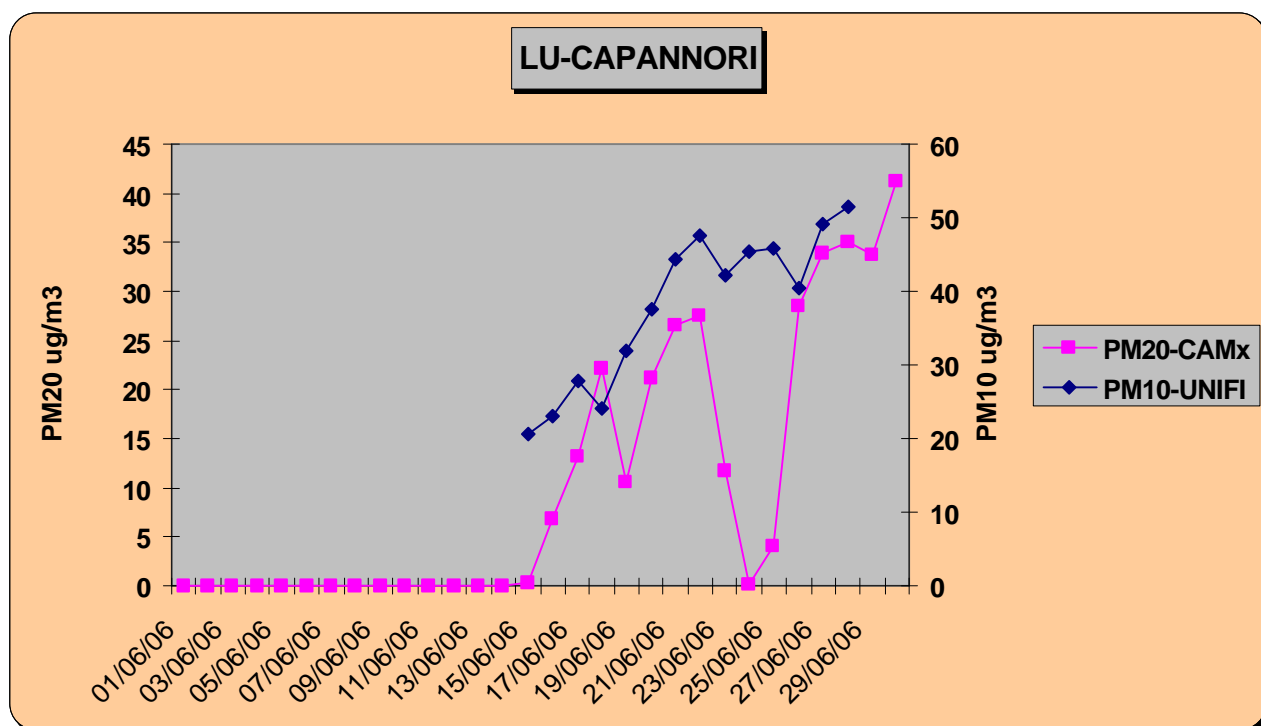


Fig. 30-Grafico della concentrazione media giornaliera di polvere sahariana simulata da CAMx (PM20-dust) e del PM10 totale misurato nel sito recettore di Lucca.

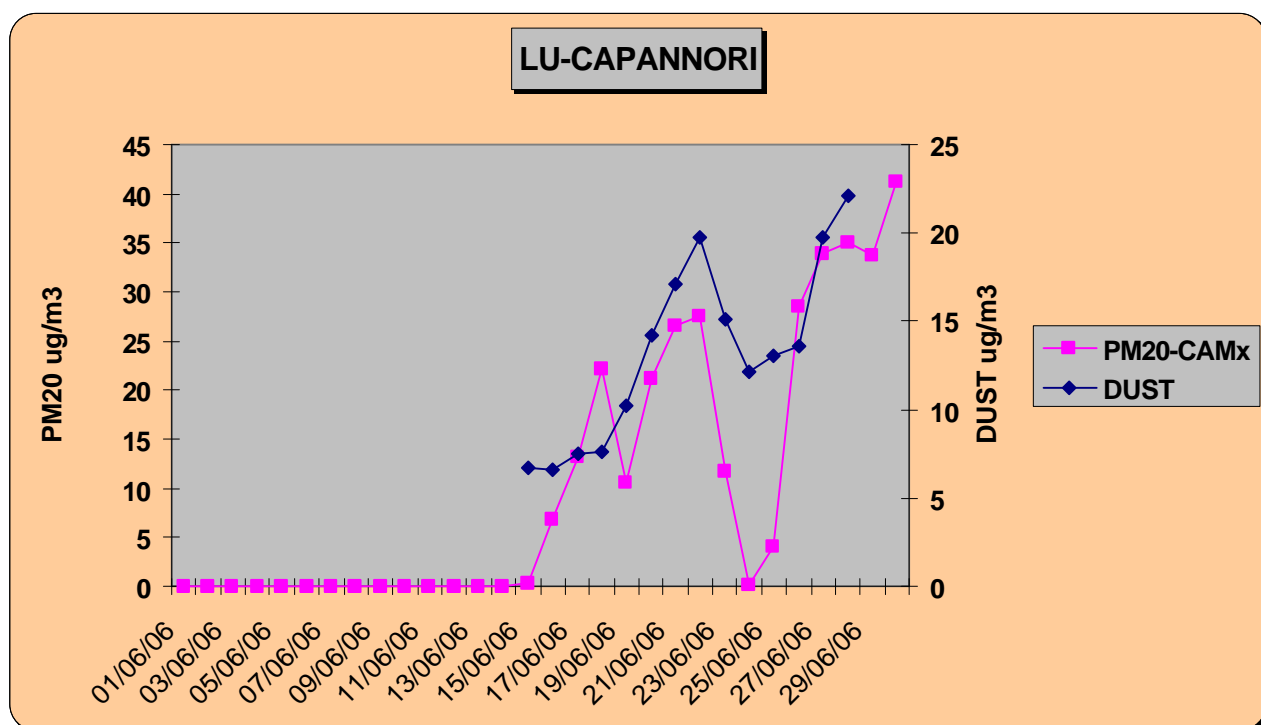


Fig. 31-Grafico della concentrazione media giornaliera di polvere sahariana simulata da CAMx (PM20-dust) e della componente crostale del PM10 misurato nel sito recettore di Lucca.

In sintesi, il confronto stime-misure (in particolare con la componente crostale del  $PM_{10}$ ) evidenzia un sostanziale buon accordo, con l'individuazione dei periodi caratterizzati da concentrazioni alte e della significativa diminuzione del 24-25 giugno.

Tuttavia, il modello sovrastima, nei siti di Firenze e Lucca, la concentrazione nei giorni 16, 17 e 18 giugno, mentre sottostima, per tutto l'evento, i valori relativi al sito di Grosseto. Una possibile spiegazione potrebbe riguardare la stima dell'altezza di rimescolamento che, nel caso dei siti dell'entroterra potrebbe essere sovrastimata nel primo periodo, mentre nel sito costiero potrebbe essere sempre sottostimata, limitando così l'ingresso delle polveri trasportate sopra il boundary layer. Si deve ricordare che il modello meteorologico, data la notevole estensione del dominio di calcolo, ha una risoluzione di 60 Km (e una corrispondente descrizione dei livelli verticali), che, in prospettiva, potrebbe essere affinata introducendo una griglia di calcolo ad una risoluzione più alta solo nell'area target, ad esempio sull'Italia centrale. In questo modo potremmo ottenere una descrizione più dettagliata delle intrusioni di polvere sahariana nello strato più vicino al suolo.

## Conclusioni

Scopo di questo studio è stato quello di valutare le potenzialità dell'approccio modellistico nella ricostruzione delle dinamiche evolutive della polvere minerale proveniente dal deserto.

E' stato quindi implementato un sistema modellistico basato sulle stime prodotte dal modello meteorologico RAMS, dal modello emissivo DUSTEM e dal modello CAMx, con cui viene simulato il trasporto e la deposizione della polvere del deserto.

Il sistema modellistico RAMS-DUSTEM-CAMx è stato opportunamente configurato per stimare l'apporto di polvere minerale del deserto del Sahara sul bacino del Mediterraneo durante l'episodio che si è verificato nel mese di giugno del 2006.

I risultati ottenuti nelle simulazioni, relative alle classi dimensionali di particolato compreso tra 1 e 20  $\mu\text{m}$ , sono costituiti dalla concentrazione e deposizioni su base oraria di polvere minerale, su un dominio di calcolo di 380x340 celle di 30 Km per 18 livelli verticali, da 10 m a 10500 m.

In particolare, sono state discusse nel dettaglio le condizioni meteorologiche che sono all'origine del sollevamento, trasporto e deposizione della polvere desertica sul bacino del Mediterraneo. Inoltre è stata elaborata una sintesi dei risultati modellistici relativi alla stima della concentrazione e deposizione della polvere minerale sull'Europa, con particolare attenzione all'Italia e alla Toscana. Le analisi di dettaglio in tre siti recettori ed il confronto con le misure effettuate durante la campagna di PATOS1, oltre a completare il quadro, costituiscono una sorta di validazione dell'approccio modellistico adottato.

In sintesi, il confronto stime-misure evidenzia un sostanziale buon accordo, con l'individuazione dei periodi caratterizzati da concentrazioni alte e della significativa diminuzione del 24-25 giugno.

Tuttavia, il modello in alcuni casi può sottostimare o sovrastimare. Una possibile spiegazione potrebbe riguardare la valutazione quantitativa dell'altezza di rimescolamento che, nel caso dei siti dell'entroterra potrebbe essere sovrastimata nel primo periodo (16-19 giugno), mentre nel sito costiero potrebbe essere sempre sottostimata, limitando così l'ingresso delle polveri trasportate sopra il boundary layer.

In prospettiva, il sistema modellistico potrebbe essere affinato introducendo una griglia di calcolo ad una risoluzione più alta solo nell'area target, ad esempio sull'Italia centrale. In questo modo potremmo ottenere una descrizione più dettagliata delle intrusioni di polvere sahariana nello strato più vicino al suolo.



## Bibliografia

1. Nickovic.S., Kallos G., Papadopoulos A., Kakaliagou O. (2001): A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *J. of Geophys. Res.*, 106, 18,113–18,129.
2. Tegen I., Fung I. (1994): Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, (D11), 22897-22914.
3. Fecan, F., B. Marticorena, and G. Bergametti, (1999): Parameterization of the increase of the Aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid area, *Annales Geophysicae*, 17, 149-157.
4. Gillette D.A. (1981): Production of dust that may be carried great distances. In *Desert Dust: Origin, Characteristics, and Effect on Man*, edited by Pewe; Spec. Pap. Geol. Soc. Am. 186, 11-26.
5. Gillette D.A. (1980): "Major Contributions of Natural Primary Continental Aerosols: Source Mechanisms", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 338, pp. 348-358.
6. Gong S.L., Zhang X.Y., Zhao T.L., Mckendry I.G., Jaffe D.A., Lu N.M. (2003): Characterization of soil dust aerosol in China and its transport/distribution during 2001 ACE-Asia, 2. Model Simulation and Validation. *J. Geophys. Res.* 108, 4262, doi:10.1029/2002JD002633.
7. Marticorena B. and G. Bergametti, (1995): Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil derived dust emission scheme. *J. Geophys. Res.*, 100(D8), 16415-16430.
8. Qian W., X. Tang, L. Quan, (2004): Regional characteristics of dust storms in China. *Elsevier*, doi:10.106/j.atmosenv.2004.05.038.
9. Qian W., L. Quan, S. Shi, (2001): Variations of the Dust Storm in China and its Climatic Control. *J. of C.*, 15, 1216-1228
10. Zhang, X. Y., R. Arimoto, and Z. S. An, (1997): Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research* 102 (D23): 28041–47.
11. Bartholomé E., A. S. Belward (2005): GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1959–1977.
12. Pasqui M., L. Bottai, C. Busillo, F. Calastrini, G. Gualtieri, F. Guarnieri, P. Scalas, and L. Torriano, "Dust sandstorm dynamics analysis in Northern China by means of atmospheric, emission, dispersion modeling"; 87th AMS Annual Meeting, Ninth Conference on Atmospheric Chemistry; San Antonio, 2007.
13. Bottai L., M. Pasqui C. Busillo, F. Calastrini, G. Gualtieri, F. Guarnieri, A. Taramelli, C. Small, M. Martinelli, "Dust sandstorm dynamics analysis in Northern China by means of atmospheric, emission, dispersion modeling"; EGU General Assembly 2008.

14. Borbély-Kiss, I; Kiss, A. Z; Koltay, E.; Szabó, Gy; Bozó, L. (2004). *J. Aerosol Science*, 35, 1205-1224
15. Portarena Silvia, Studio degli aerosol naturali tramite le tecniche IBA, Tesi di Laurea in Fisica, Università di Firenze, Relatore Franco Lucarelli, Anno Accademico 2006/2007.
16. M. Chiari, F. Lucarelli, F. Mazzei, S. Nava, L. Paperetti, P. Prati, G. Valli, R. Vecchi, Characterization of airborne particulate matter in an industrial district near Florence by PIXE and PESA, *X-Ray Spectrom.* 2005; 34: 323–329, Published online 9 March 2005 in Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)). DOI: 10.1002/xrs.825.
17. Vizi, E. K., and K. H. Cook, 2009: A mechanism for African monsoon breaks: Mediterranean cold air surges. *J. Geophys. Res.*, 114, D01104, doi:10.1029/2008JD010654.
18. Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631-1643