

**Cliente** ENEL SPA GEM

**Oggetto** Centrale di Brindisi – Sintesi dei risultati ottenuti dalle applicazioni modellistiche

**Ordine** Contratto per la fornitura di prodotti e servizi fra Enel Produzione e CESI AQ 6000010956  
Attingimento Nr.4000142173 del 08/03/2007 – *C.LE BRINDISI “FEDERICO II” – Emissioni da punti secondari (L52803L)*

**Note** Rev. 0

PUBBLICATO A7007286 (PAD - 899782)

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

**N. pagine** 22

**N. pagine fuori testo** -

**Data** 14/03/2007

**Elaborato** Pertot Cesare (CESI-AMB)  
A7007286 3640 A1UT

**Verificato** Carboni Gabriele (CESI-AMB)  
A7007286 3709 VER

**Approvato** Fiore Antonio (CESI-AMB)  
A7007286 3743 APP

Mod. RAPP v. 01

*Indice*

<b>1</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>RIFERIMENTI NORMATIVI .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>APPLICAZIONI MODELLISTICHE PER LA VALUTAZIONE DELLE RICADUTE DI POLVERI DALLA CENTRALE.....</b>	<b>4</b>
3.1	La catena modellistica atmosferica CALMET-CALPUFF .....	4
3.2	Risultati delle simulazioni modellistiche.....	16
3.2.1	Campagna invernale-primaverile 2006 .....	16
3.2.2	Campagna estiva 2006.....	21
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>22</b>

## STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	14/03/2007	A7007286	Prima emissione

## 1 ABSTRACT

Al fine di valutare l'incidenza sul territorio delle ricadute delle emissioni aerodisperse della centrale termoelettrica "Federico II" di Brindisi, Enel ha commissionato nel corso del 2006 uno studio articolato in due campagne sperimentali per la caratterizzazione dell'inquinamento atmosferico e applicazioni modellistiche i cui input (meteorologici ed emissivi) fossero quelli effettivi del periodo considerato anziché quelli di taglia e/o di letteratura; la descrizione delle attività e dei risultati ottenuti sono riportati nei seguenti documenti:

- rapporto Cesi A6014592 "Centrale Enel di Brindisi "Federico II": valutazione delle ricadute di polveri primarie e secondarie nel comprensorio brindisino" riferito al periodo invernale-primaverile 2006
- rapporto Cesi A6034557 "Studio della polverosità presso il sito di Torchiarolo – Caso Estivo" riferito al periodo estivo 2006

Nel presente documento si riporta la descrizione dello strumento modellistico impiegato e la sintesi dei risultati ottenuti con particolare riferimento alle seguenti tematiche (per quelle non espressamente riportate si rimanda ai rapporti sopra citati):

- valutazione dell'incidenza delle ricadute della centrale sul territorio rispetto ai limiti applicabili alla qualità dell'aria ambiente
- valutazione delle ricadute di particolato secondario generato dalle emissioni gassose della centrale.

## 2 RIFERIMENTI NORMATIVI

La normativa vigente (DM 2.4.02. n° 60) prevede i seguenti limiti applicabili agli inquinanti gassosi "convenzionali", riconducibili (completamente o in parte) alle attività di combustione:

Parametro	Limite	Periodo di mediazione	Valore limite	Data di applicazione del limite
SO <sub>2</sub>	Valore limite orario per la protezione della salute umana	1 ora	350 µg/m <sup>3</sup> da non superare più di 24 volte per anno civile	Dal 01/01/2005
	Valore limite di 24 ore per la protezione della salute umana	24 ore	125 µg/m <sup>3</sup> da non superare più di 3 volte per anno civile	Dal 01/01/2005
	Valore limite per la protezione degli ecosistemi	Anno civile e inverno (1.10÷31.03)	20 µg/m <sup>3</sup>	Dal 19/07/2001
NO <sub>2</sub>	Valore limite orario per la protezione della salute umana	1 ora	200 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> da non superare più di 18 volte per anno civile	Dal 01/01/2010
			240 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> da non superare più di 18 volte per anno civile	Dal 01/01/2006 al 31/12/2006
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	40 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> 48 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub>	Dal 01/01/2010 Dal 01/01/2006 al 31/12/2006

Parametro	Limite	Periodo di mediazione	Valore limite	Data di applicazione del limite
NOx	Valore limite annuale per la protezione della vegetazione	Anno civile	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO <sub>x</sub>	Dal 19/07/2001
PM10	Valore limite di 24 ore per la protezione della salute umana	24 ore	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM <sub>10</sub> da non superare più di 35 volte per anno civile	Dal 01/01/2005
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM <sub>10</sub>	Dal 01/01/2005

### 3 APPLICAZIONI MODELLISTICHE PER LA VALUTAZIONE DELLE RICADUTE DI POLVERI DALLA CENTRALE

#### 3.1 La catena modellistica atmosferica CALMET-CALPUFF

Il modello di dispersione CALPUFF ed i relativi processori e modelli, incluso il modello meteorologico CALMET, sono sviluppati, inizialmente da Sigma Research Corporation ora parte di Earth Tech Inc., con l'obiettivo di realizzare un sistema modellistico per la modellistica atmosferica non stazionario.

Originariamente le specifiche del progetto includevano la capacità di trattare sorgenti areali e puntuali dalle emissioni variabili nel tempo, in domini di calcolo ad orografia complessa con estensioni da decine di metri a centinaia di chilometri dalla sorgente, per predire concentrazioni orarie in aria ambiente di inquinanti inerti o soggetti a meccanismi di deposizione o trasformazione chimica lineari.

Già dalle prime versioni degli anni novanta, il sistema modellistico si è configurato in tre moduli:

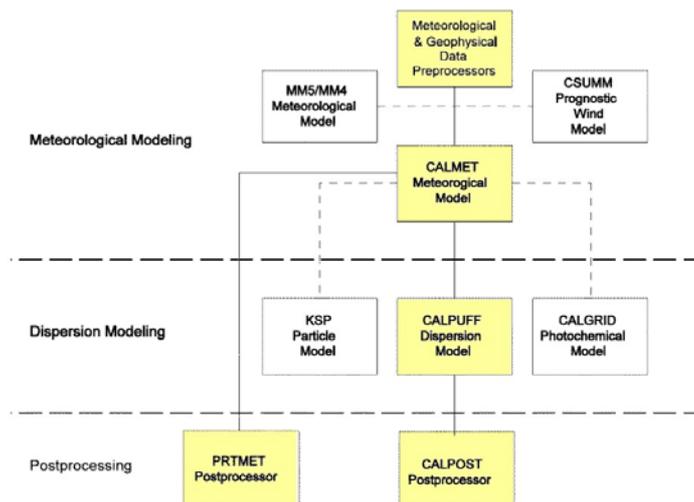
- un ricostruttore di campi bi- e tri-dimensionali di variabili meteorologiche
- un modello di dispersione lagrangiano a puff contenente algoritmi per la trasformazione chimica, deposizione secca ed umida, interazione con orografia complessa, building downwash, fumigazione e tutti gli effetti che possono influenzare la diffusione delle emissioni in atmosfera
- un postprocessore per l'elaborazione dei campi di concentrazione e deposizione prodotti, nonché per il calcolo di statistiche

Tutti i codici di calcolo hanno subito un costante processo di aggiornamento, revisione ed ampliamento delle capacità complessive della catena modellistica, il cui utilizzo è segnalato nelle raccomandazioni di differenti autorità statunitensi tra cui l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente US-EPA (US-EPA, 1998; US-EPA, 2003) che ha proposto l'utilizzo del sistema modellistico CALPUFF nelle linee guida per la modellistica atmosferica per il trasporto a grande distanza e per applicazioni a scala locale dove vi siano rilevanti effetti non stazionari (variabilità spaziale della meteorologia, calme di vento, fumigazione, stagnazione, regimi di brezze ed interfaccia terra-mare). A livello nazionale il sistema modellistico CALMET/CALPUFF è stato inserito nell'elenco dei modelli idonei per trattare sorgenti puntiformi. Tale elenco è disponibile nella "Guida alla scelta dei modelli di dispersione nella valutazione della qualità dell'aria" reperibile sul sito web dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT). La scelta del sistema modellistico, oltre che dettata dalla necessità di affrontare la ricostruzione anche della componente secondaria del particolato atmosferico, risulta allineata anche alle indicazioni del DM 1 ottobre 2002, n. 26 "Regolamento recante le direttive tecniche per la valutazione preliminare della qualità dell'aria ambiente, i criteri per l'elaborazione del piano e dei programmi di cui agli articoli 8 e 9 del decreto legislativo 4 agosto 1999, n. 351" che nell'allegato 1, *Direttive tecniche concernenti la valutazione preliminare fornisce importanti indicazioni sulle caratteristiche generali dei modelli matematici* recita:

*"La valutazione della complessità dell'area su cui si effettua la valutazione deve tenere conto delle caratteristiche orografiche del territorio, di disomogeneità superficiali (discontinuità terra-mare, città-campagna, acque interne) e condizioni meteo-diffusive non omogenee (calma di vento negli strati bassi della troposfera, inversioni termiche eventualmente associate a regimi di brezza); l'uso di modelli*

*analitici (gaussiani e non) si considera generalmente appropriato nel caso di siti non complessi, mentre qualora le disomogeneità spaziali e temporali siano rilevanti per la dispersione, è opportuno ricorrere all'uso di modelli numerici tridimensionali, articolati in un preprocessore meteorologico (dedicato principalmente alla ricostruzione del campo di vento) e in un modello di diffusione.”*

Il seguente diagramma riporta la struttura completa del sistema modellistico sviluppato da Earth Tech. I moduli utilizzati in questo studio sono evidenziati in giallo.



### 3.1.1.1 CALMET 6.209

CALMET (versione 6.209, livello: 060331) (Scire et al., 2000a) è un modello meteorologico diagnostico che produce campi orari tridimensionali di vento e bidimensionali di diverse variabili meteorologiche a partire da dati osservati (al suolo e di profilo) e da dati geofisici (orografia, uso del suolo). CALMET è costituito da un modulo diagnostico per la ricostruzione del campo di vento e da moduli micrometeorologici per la caratterizzazione dello strato limite di rimescolamento sia sul suolo sia sull'acqua.

Il modulo diagnostico del campo di vento utilizza una procedura a due step per la costruzione del campo. Il primo passo crea un campo iniziale, basato sui venti sinottici, e lo corregge in modo da tenere conto degli effetti del terreno sui flussi e dei venti di pendio. In questa fase, dapprima il modello utilizza i venti sinottici per calcolare una velocità verticale forzata dal terreno e soggetta ad una funzione esponenziale di smorzamento dipendente dalla classe di stabilità atmosferica. In secondo luogo, sono introdotti gli effetti dell'orografia sulle componenti orizzontali del vento mediante l'applicazione iterativa di uno schema di minimizzazione della divergenza sul campo tridimensionale fino al soddisfacimento del vincolo di minima divergenza. Dopo aver introdotto i venti di pendio e gli effetti termodinamici, il campo, a questo punto detto di primo passo, passa alla seconda fase procedurale che introduce i dati osservati, al suolo ed in quota, in modo da ottenere il campo nella sua versione finale. L'introduzione dei dati osservati è effettuata tramite una procedura d'analisi oggettiva. L'attribuzione di pesi inversamente proporzionali alla distanza tra punto e stazione di misura, garantisce l'ottenimento di un campo che riflette maggiormente le osservazioni in prossimità dei punti di misura e che è dominato dal campo di primo passo nelle zone prive d'osservazioni.

Infine, il campo risultante è sottoposto ad un'operazione di smoothing e di ulteriore minimizzazione della divergenza.

CALMET richiede come dati di input misure orarie al suolo di direzione e velocità del vento, temperatura, copertura nuvolosa, altezza della base delle nuvole, pressione atmosferica, umidità relativa e precipitazione, nonché profili verticali di direzione e velocità del vento, temperatura e pressione atmosferica. Algoritmi specifici trattano la dinamica atmosferica sopra superfici acquose e la loro interfaccia con le superfici terrestri. Recentemente è stata introdotta la possibilità di utilizzare campi di

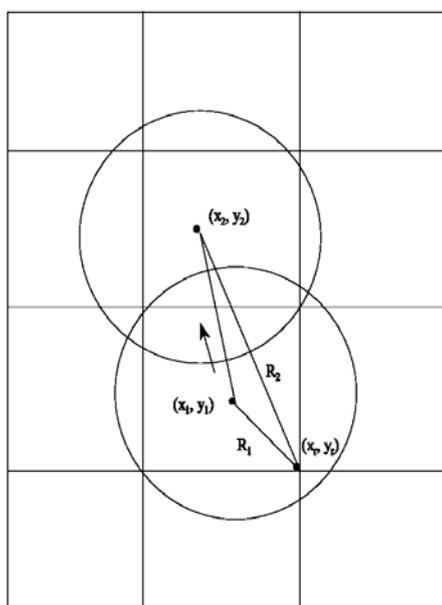
vento generati da modelli meteorologici prognostici (quali ad esempio MM5, RAMs...) come campi d'inizializzazione.

### 3.1.1.2 CALPUFF 6.111

CALPUFF versione 6.111, livello 060329 (Scire J.S. et Al., 2000a) è un modello di dispersione non stazionario multi-strato multi-specie con cui è possibile simulare gli effetti di condizioni meteorologiche variabili nel tempo e nello spazio sul trasporto, trasformazione e rimozione degli inquinanti in atmosfera. Pur potendo essere guidato da meteorologie puntuali semplici (con formati compatibili con quelli dei più comuni modelli gaussiani stazionari (ISCST3, AUSPLUME, CTDMPPLUS), CALPUFF consente di utilizzare a pieno tutte le potenzialità del codice se guidato da campi meteorologici tridimensionali generati da CALMET. CALPUFF implementa algoritmi per la trattazione di effetti prossimi alla sorgente (building downwash, fumigazione, sovrainnalzamento progressivo, penetrazione parziale dello strato rimescolato, interazioni con elementi orografici non risolti dalla griglia orografica), oltre che di deposizione secca ed umida, trasformazioni chimiche, avvezione su suolo ed acque ed interazioni all'interfaccia terra/mare. Il modello può trattare sorgenti emissive puntuali, lineari, areali e volumetriche, dall'emissione variabile in modo arbitrario nel tempo.

CALPUFF utilizza due domini tridimensionali distinti: la griglia meteorologica e quella di calcolo. La prima definisce l'estensione orizzontale del dominio, le dimensioni delle celle, il numero e lo spessore degli strati verticali. Questa coincide con la griglia utilizzata da CALMET e ad essa sono associati i dati meteorologici e geofisici. La griglia computazionale è un sotto insieme, al più coincidente, della griglia meteorologica ed è il dominio in cui sono fatti evolvere i puff ed in cui possono essere calcolate le concentrazioni.

Le emissioni sono schematizzate come un continuo rilascio di sbuffi (puff) d'inquinante rilasciati in atmosfera. Al variare della direzione ed intensità del vento nello spazio e nel tempo la traiettoria d'ogni puff cambia in modo da seguire la nuova direzione del vento.

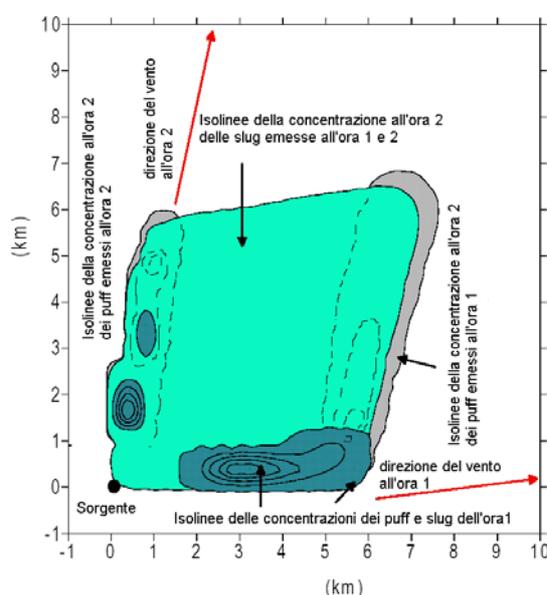


**Movimento del puff  $(x_t, y_t)$  per effetto del vento (freccia) nel passo temporale  $t$  e la conseguente distanza  $R_t$  dal recettore  $(x_r, y_r)$ .**

La diffusione dei puff è gaussiana, inizialmente funzione della distanza dalla sorgente (analogamente ad ISCST-3) e successivamente funzione del tempo (in modo che ad un eventuale riavvicinamento dell'inquinante verso la sorgente, in seguito ad un'inversione della direzione del vento, non segua una contrazione del puff). La concentrazione stimata in un dato recettore è data dalla somma dei contributi di tutti i puff sufficientemente vicini a questo. La garanzia della corretta riproduzione del pennacchio inquinante è data dall'elevato numero di puff rilasciato ogni ora, numero calcolato dal modello in

funzione delle caratteristiche meteorologiche di quell'ora (di default il massimo numero orario di puff per sorgente è 99).

La formulazione originaria a puff, adatta per simulazioni di mesoscala, mostrava delle inefficienze nelle applicazioni a scala locale. Per eliminarle è stata in seguito implementata la trattazione dell'emissione tramite slug, speciali puff allungati secondo la direzione del vento di una data ora che sono poi diffusi per tutta la loro lunghezza nella direzione del vento dell'ora successiva, migliorando la ricostruzione delle concentrazioni in prossimità della sorgente. Uno slug può essere immaginato come una serie di puff circolari sovrapposti separati da una distanza minima. Nello slug, la massa d'inquinante presente nell'ora è distribuita uniformemente in tutta la sua estensione. Se in una data ora, non tutto lo slug orario è passato su di un recettore, le concentrazioni sono ridotte proporzionalmente alla massa non ancora transitata. Quando la dispersione laterale ( $s_y$ ) dello slug diventa di dimensioni paragonabili alla sua lunghezza, cosa che avviene ad una certa distanza dalla sorgente, CALPUFF converte lo slug in un puff equivalente, aumentando l'efficienza di calcolo. La trattazione slug non ha quindi particolari benefici e vantaggi dopo una certa distanza dalla sorgente.



**Isolinee di concentrazione oraria per un periodo di due ore con una rotazione di 70° del vento. La trattazione a puff, in grigio, mostra delle "lacune" non presenti nella trattazione a slug (in verde).**

La trattazione di calme di vento non richiede l'utilizzo di moduli specifici ma solo d'alcuni accorgimenti ai normali algoritmi, consistenti con il modello concettuale in cui le emissioni contemporanee alla calma di vento salgono virtualmente sulla verticale della sorgente, mentre quelle preesistenti ristagnano sulla loro posizione, tutte disperdendosi in funzione del tempo, poiché si assume che questo sbandieri attorno ad una media nulla.

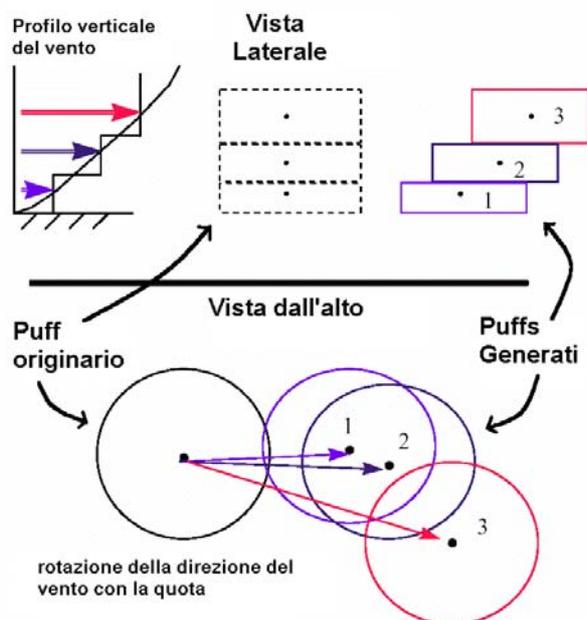
Il calcolo delle componenti della turbolenza atmosferica ( $s_{yt}$  e  $s_{zt}$ ) può essere effettuato mediante cinque possibilità:

1. parametri di turbolenza ( $s_v$  e  $s_w$ ) misurati
2. parametri di turbolenza ( $s_v$  e  $s_w$ ) calcolati tramite i campi CALMET delle variabili micrometeorologiche ( $L$ ,  $u^*$ ,  $w^*$ , ecc.)
3. coefficienti di dispersione Pasquill-Gifford-Turner (PGT) in aree rurali (con una formulazione approssimante le equazioni di ISCST-3), e coefficienti di Mc Elroy-Pooler in aree urbane
4. come al punto precedente ma con i coefficienti PGT stimati con le equazioni del modello MESOPUFF II
5. sigma del modello CTDM per condizioni stabili e neutre e come al punto tre per le condizioni instabili

Nel modello è possibile trattare con appositi algoritmi la dispersione al di sopra di superfici coperte da acqua (mari e laghi), ed all'interfaccia terra - mare.

Nel computo della dispersione dell'inquinante è possibile comprendere, o escludere, l'effetto dovuto al progressivo sovra innalzamento termico e meccanico del pennacchio a diverse distanze sottovento al camino (*transitional plume rise*), l'effetto scia dovuto alla presenza di edifici nelle vicinanze del camini (*building downwash*), e la parziale penetrazione del pennacchio sopra il limite dello strato convettivo (*partial plume penetration*). Un'ulteriore opzione di avvezione e dispersione dei puff (*splitting*) consente la ripartizione in due o più puff distinti, di puff "vecchi", la cui emissione sia avvenuta sufficientemente indietro nel tempo perché essi abbiano acquisito una certa dimensione. La suddivisione avviene per sezioni orizzontali ed ha lo scopo di permettere l'avvezione di ogni nuovo puff generato secondo la direzione e l'intensità del vento alla quota corrispondente.

### CALPUFF PUFF-SPLITTING



#### Suddivisione del puff dovuta all'opzione "puff splitting".

Le traiettorie dei puff in presenza di terreno complesso sono modificate, rispetto alla situazione di terreno pianeggiante, in funzione di:

1. Adattamento del campo di vento in funzione delle strutture orografiche principali in CALMET
2. Trattamento semplificato dell'interazione tra puff ed elementi sia di grande scala sia di scala locale

Il campo di vento generato da CALMET, presenta nei livelli prossimi al suolo gli effetti dovuti alle strutture orografiche principali dell'area. Di conseguenza essi racchiudono già al loro interno il primo effetto dell'orografia sul trasporto e la diffusione degli inquinanti.

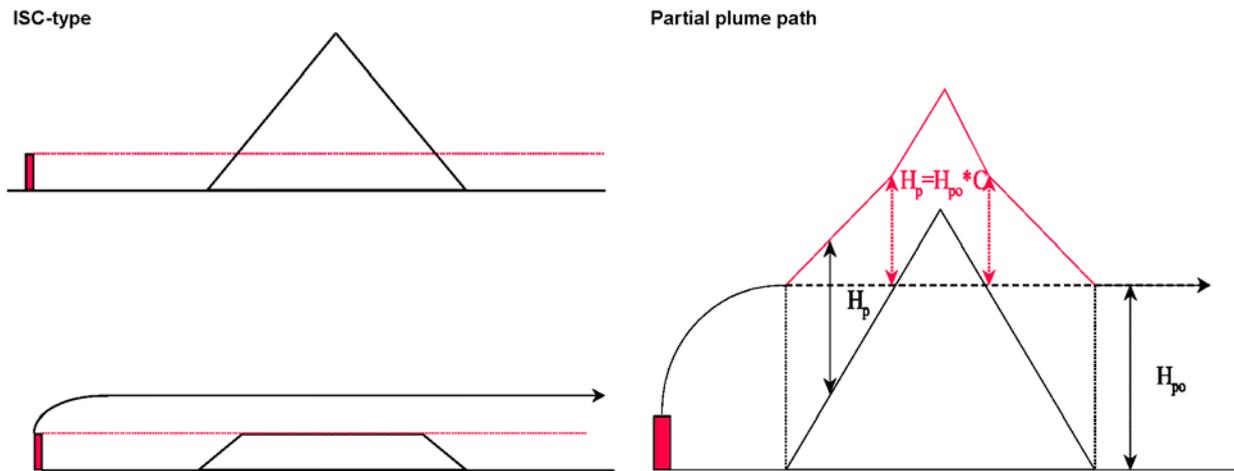
Il secondo punto dell'elenco precedente introduce un'ulteriore interazione tra orografia ed inquinante, in aggiunta all'informazione contenuta nei campi meteo, attraverso una modifica dell'altezza effettiva del puff sopra il suolo. Il calcolo di tale variazione può essere effettuato tramite tre opzioni (oltre a quella banale di non effettuare variazioni, nel caso di terreno piatto).

Nella prima opzione, definita nel manuale di CALPUFF "ISC-type" (sebbene essa non corrisponda completamente all'algoritmo implementato in ISCST-3), tutte le quote maggiori a quella della sezione di sbocco del camino sono abbassate a cinque millimetri sotto di questa. La quota del puff e le quote del terreno inferiori alla quota della sezione di sbocco del camino restano inalterate.

L'opzione "*partial plume path*" consente al puff d'elevarsi sopra il terreno ma ad un'altezza,  $H_p$ , ridotta in funzione della classe di stabilità, della quota del suolo nel punto rispetto alla base della sorgente ed

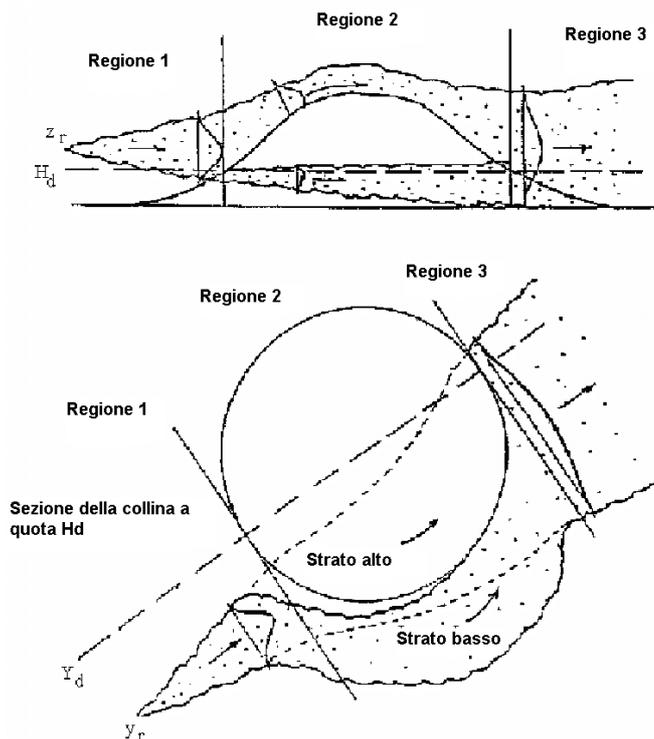
all'altezza originale del puff  $H_{p0}$ . In ore non stabili, l'altezza del puff è dimezzata ( $C=0.5$ ), mentre ancora maggiore è la riduzione in classi stabili ( $C=0.35$ ).

Infine, l'opzione "*Calpuff terrain adjustment scheme*", modifica l'estensione verticale del puff, e non la quota del suo baricentro, secondo una teoria CTSG semplificata.



#### Trattazione del terreno complesso ISC-type (a sinistra) e Partial plume path (a destra).

Un ulteriore approfondimento è disponibile nel caso in cui sia necessaria una trattazione dettagliata dell'interazione tra il pennacchio ed un elemento orografico singolo (ad esempio una collina isolata, la cui schematizzazione va inserita in input), è possibile utilizzare la procedura CTSG (*Complex Terrain algorithm for Sub-Grid scale features*) già implementata nel modello CTDM (*Complex Terrain Dispersion Model*). Rimandando al manuale tecnico per maggiori dettagli, ci si limita qui a descrivere tale metodologia per sommi capi. L'interazione tra pennacchio ed elemento orografico è schematizzata in tre regioni. Nella prima, il pennacchio raggiunge la collina ed è diviso in uno strato alto ed in uno strato basso alla quota  $H_d$ , in cui l'energia cinetica del flusso bilancia l'energia potenziale necessaria al raggiungimento della quota alla vetta. Nella seconda regione, lo strato alto scavalca la collina con una distribuzione d'inquinante che aumenta la concentrazione al suolo, lo strato basso devia aggirando la collina in un flusso bidimensionale. Superato l'ostacolo, i flussi si ricongiungono nella terza regione.



### Schema concettuale della procedura CTSG.

La deposizione secca di gas e particelle è trattata attraverso un modello a resistenze basato su proprietà dell'inquinante (diametro molecolare, forma, densità, diffusività, solubilità, reattività), caratteristiche della superficie (rugosità superficiale, tipo di vegetazione) e variabili atmosferiche (classe di stabilità, turbolenza). L'algoritmo determina la velocità di deposizione come l'inverso della somma di resistenze (che rappresentano le diverse forze in opposizione al trasporto dell'inquinante dall'atmosfera al suolo) a cui si aggiunge, per le sole particelle, un termine di deposizione gravitazionale. L'atmosfera è in schematizzata attraverso cinque strati (*layer*) che caratterizzano le differenti proprietà fluidodinamiche dell'atmosfera alle differenti distanze dal suolo. Lo strato a quota maggiore "Layer aloft" è la regione al di sopra dello strato rimescolato. Gli inquinanti vi sono presenti o perché immessi direttamente da camini alti o per penetrazione turbolenta dal basso. Per la scarsa interazione con il suolo, la massa inquinante non è soggetta a deposizione secca finché non rientra al di sotto dello strato limite.

Al di sotto del Layer Aloft vi è lo strato rimescolato "Mixed Layer" che si estende verso il basso fino a qualche decina di metri dal suolo. Il rimescolamento degli inquinanti è dominato da processi turbolenti. In condizioni convettive, gli inquinanti contenuti in questo strato diventano rapidamente uniformemente distribuiti lungo la direzione verticale. La resistenza alla deposizione è funzione della diffusività complessiva e parametrizzata in termini di variabili micrometeorologiche.

Al di sotto dello strato precedente si trova lo strato superficiale "Surface Layer" di spessore molto modesto (circa 10 m) e dipendente dal tipo di superficie sottostante. I flussi verticali sono sostanzialmente costanti e le caratteristiche della superficie ne governano la deposizione.

Infine vi è lo strato della vegetazione, dove sono rimosse importanti quantità di inquinanti solubili e reattivi gassosi. I primi entrano in soluzione all'interno delle foglie dopo essere passati attraverso gli stomi; i secondi reagiscono con la cuticola foliare. L'efficienza complessiva del processo dipende da fattori esterni (umidità, radiazione solare...), dal tipo di vegetazione, dal suo stato vegetativo e dal suo stato di stress.

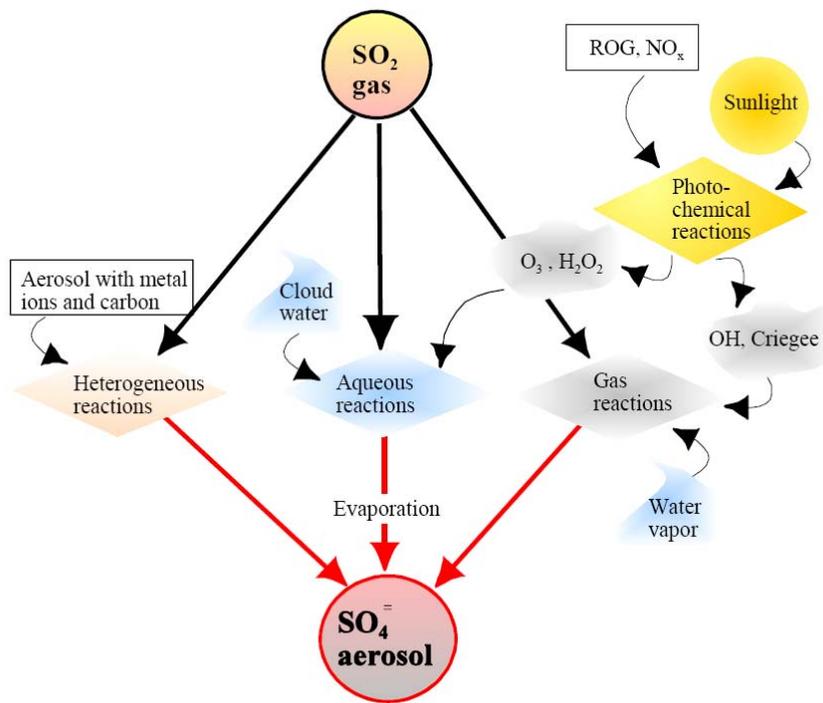
LAYER	RESISTANCE	TYPICAL DEPTH (M)	HEIGHT (M)
(A) Layer Aloft	$C_u$	$10^4$	$h_s$
(B) Atmospheric Boundary Layer (Mixed-Layer)	$C_m$	$10^2-10^3$	$z_s$
(C) Surface-Layer (Constant-Flux Layer)	$C_s$ $r_a$	$10^1-10^2$	$z_d$
(D) Deposition Layer (Quasi-Laminar Layer)	$C_d$ $r_d$	$v/u^*$	$0$
(E) Vegetation Layer	$C_o$ $r_c$		
	$C_m$		

La deposizione umida è calcolata tramite un semplice algoritmo, efficace soprattutto su lungo periodo, basato su coefficienti di rimozione empirici dipendenti dalla natura dell'inquinante e della precipitazione.

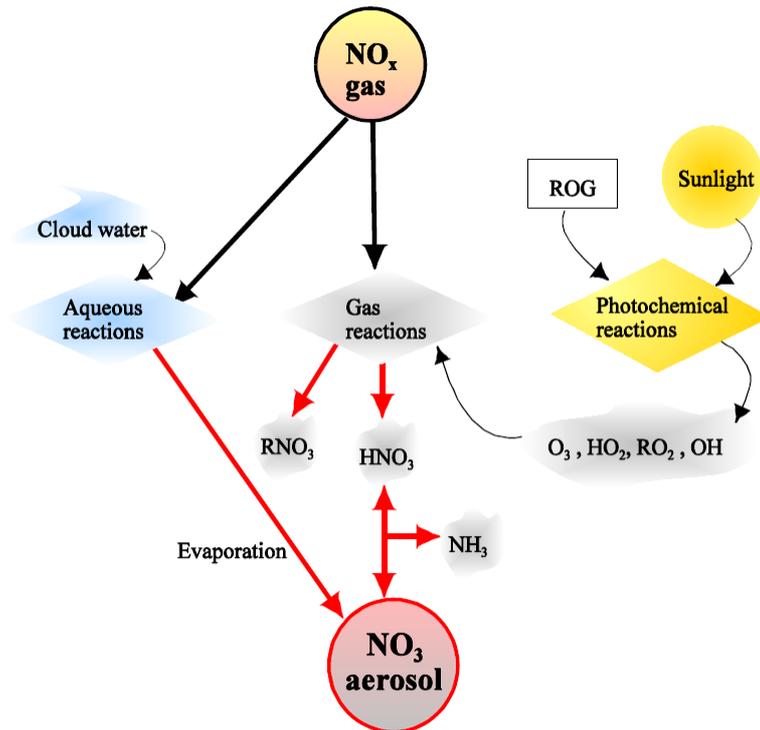
Oltre alla trattazione d'inquinanti inerti, CALPUFF può simulare l'interazione chimica tra alcune specie attraverso differenti schemi chimici progettati per la ricostruzione delle deposizioni acide e l'evoluzione degli ossidi d'azoto. Gli schemi consentono di calcolare l'evoluzione di inquinanti gassosi e la formazione di aerosol (particolato secondario) in termini di solfato (SO<sub>4</sub>), nitrato (NO<sub>3</sub>) ed aerosol organico (SOA).

Il primo algoritmo, basato sullo schema di trasformazione chimica implementato nel modello MESOPUFF II (Scire et al., 1984), è un meccanismo del primo ordine per la conversione del biossido di zolfo a solfato e degli ossidi d'azoto in nitrato, in fase sia gassosa sia liquida. Esso incorpora le principali dipendenze delle costanti cinetiche delle reazioni dalle grandezze meteorologiche variabili nello spazio e nel tempo.

Lo schema include cinque specie d'inquinanti (SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NO<sub>x</sub>, HNO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Il computo avviene assumendo in ingresso concentrazioni di fondo di O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ed NH<sub>3</sub> costanti in tutto il dominio, ma variabili nel tempo. L'ammoniaca è indispensabile per il calcolo dell'equilibrio tra acido nitrico e nitrato d'ammonio. L'ozono e l'intensità di radiazione sono invece utilizzati come surrogati della concentrazione del radicale ossidrile, assunzione valida solo durante le ore diurne. Nelle ore notturne, la ridotta attività d'ossidazione di SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> è trattata attraverso due ulteriori ratei impostati di default rispettivamente a 0.2% e 2.0%.



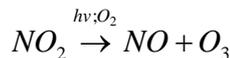
ossidazione del biossido di zolfo



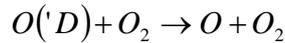
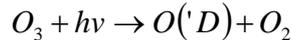
**ossidazione degli ossidi di azoto**

Il secondo meccanismo disponibile è lo schema, anch'esso del primo ordine, RIVAD/ARM3 (Morris et al., 1988). L'assunzione di basse concentrazioni di fondo di composti organici volatili lo rende particolarmente adatto ad applicazioni in aree non urbane. Questo schema comprende:

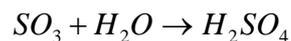
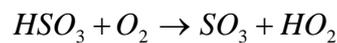
- l'equilibrio fotochimico degli ossidi d'azoto:



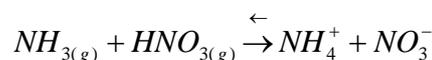
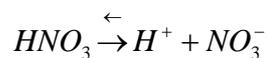
- il calcolo della concentrazione stazionaria del radicale ossidrilico:



- l'ossidazione di SO<sub>2</sub> in solfato:



- l'ossidazione di NO<sub>2</sub> in nitrato:



Il rateo di produzione di solfati e nitrati è stimato quindi in base al calcolo della concentrazione stazionaria del radicale ossidrilico, OH<sup>-</sup>, principale ossidante di SO<sub>2</sub> ed NO<sub>2</sub>. Tale concentrazione è stimata

all'inizio di ogni passo temporale, e per ogni puff, tramite le reazioni (dalla dinamica veloce, tale che il sistema sia sempre all'equilibrio  $d[OH\cdot]/dt=0$ ) di produzione dell'ossigeno atomico nella forma reattiva O(D) per foto dissociazione dell'ozono, e sua rimozione a produrre acqua (eq. 1), e produzione del radicale ossidrilico dalla reazione tra O(D) ed H<sub>2</sub>O, e sua rimozione per reazione con SO<sub>2</sub> ed NO<sub>2</sub> (eq. 3).

$$[O(^1D)] = \frac{k_{34}(h\nu)[O_3]}{k_{35} + k_{36}[H_2O]} \quad (1)$$

$$\frac{d[OH\cdot]}{dt} = 2 K_{36}[O(^1D)][H_2O] - K_{37}[OH\cdot][SO_2] - K_{38}[OH\cdot][NO_2] \quad (2)$$

$$[OH\cdot] = \frac{2 K_{36}[O(^1D)][H_2O]}{K_{37}[SO_2] + K_{38}[NO_2]} \quad (3)$$

La concentrazione stazionaria di radicale ossidrilico così calcolata, è utilizzata per determinare i ratei di conversione SO<sub>2</sub>-SO<sub>4</sub> ed NO<sub>2</sub>-(HNO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>) come:

$$-\frac{1}{[SO_2]} \frac{d[SO_2]}{dt} = K_{37}[OH\cdot] \quad (4)$$

$$-\frac{1}{[NO_2]} \frac{d[NO_2]}{dt} = K_{38}[OH\cdot] \quad (5)$$

in cui:

$$K_{34} = 1.3 \times 10^{-3} (\cos Z_s)^{2.74} \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

$$k_{35} = 4.45 \times 10^{10} \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

$$k_{36} = 3.4 \times 10^5 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

$$k_{37} = 2.0 \times 10^3 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

L'equilibrio tra acido nitrico, ammoniaca e nitrato d'ammonio è determinato attraverso lo schema MESOPUFF II. Come nel caso precedente l'ozono e la concentrazione di fondo dell'ammoniaca sono forniti variabili nel tempo ma non nello spazio. Il meccanismo non contiene esplicitamente l'ossidazione in fase liquida del biossido di zolfo in solfato e assume un rateo d'ossidazione eterogenea oraria costante pari a 0.2% in aggiunta al rateo d'ossidazione omogenea.

Lo schema relativo alla formazione di particolato secondario organico (SOA) dovuto all'emissione di composti organici volatili gassosi (VOC) è basato anch'esso sull'approccio MESOPUFF II. Lo schema prevede la ripartizione dei composti organici volatili in due classi di aromatici e due classi di biogenici:

- "toluene", composti aromatici a bassa produttività
- "xilene", composti aromatici ad alta produttività
- "beta-pinene", monoterpeni biogenici
- "alfa-pinene", monoterpeni biogenici

Il rateo di consumo dei composti organici, e la corrispondente formazione di aerosol organico secondario, è calcolato in funzione delle concentrazioni di ozono, radicale ossidrilico e nitrato ed è inoltre dipendente da alcuni parametri dell'atmosfera quali temperatura dell'aria e rapporto VOC/NOx. Ad ogni time step d'integrazione, la quantità rimossa di ogni composto organico è valutata tramite un'esponenziale della forma:

$$dVOC = [VOC] * (1 - e^{-vdt})$$

Tale quantità, moltiplicata per un opportuno fattore di produzione (*ylds*) consente di valutare la corrispondente produzione di SOA:

$$dSOA = dVOC * ylds$$

Il fattore di produzione *ylds* è funzione della specie chimica e della radiazione solare, della temperatura atmosferica, della concentrazione di aerosol presente e del rapporto VOC/NOx. Il rateo di perdita *v* dipende dalla temperatura atmosferica, dalla concentrazione di O<sub>3</sub> e da quelle dei radicali OH<sup>-</sup> ed NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, secondo formulazioni diverse per le specie aromatiche e quelle terpeniche. La concentrazione d'ozono è una variabile esogena ed è fornita in input dall'utente; essa è utilizzata anche per determinare le concentrazioni di OH<sup>-</sup> ed NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in funzione di parametri meteorologici quali la classe di stabilità atmosferica, la temperatura atmosferica, la radiazione solare e la densità dell'aria.

$$[OH] = 0.36 * [O_3]^{0.71} * \frac{1}{pgt^{1.29}} * rad^{0.55} * \frac{1}{60 * r_{OH}}$$

in cui le concentrazioni sono espresse in ppm e:

*pgt* = classe di stabilità di Pasquill-Gifford

*rad* = radiazione solare in kW/m<sup>2</sup>

*r<sub>OH</sub>* = rateo di reazione a 330 °K e 1 atm pari a 2000 (valore di riferimento della metodologia CBIV)

$$[NO_3] = \left( \frac{c2}{c1} \right) * \frac{[O_3]}{[VOC] / [NO_x]}$$

$$c1 = 1E^{-15} * r$$

$$c2 = 176 * e^{-2450/T}$$

In cui *r* è un fattore legato alla conversione da ppm a molecole/cm<sup>3</sup> e *T* è la temperatura espressa in °K. Durante le ore notturne la concentrazione di OH è assunta costante e pari a 1.0E<sup>-11</sup> ppm. Il radicale nitrato, durante le ore diurne, è posto pari a 1.0E<sup>-10</sup> poiché la fotolisi ne riduce drasticamente la formazione.

### 3.2 Risultati delle simulazioni modellistiche

Nel seguito si riportano i principali risultati modellistici ottenuti nelle due campagne stagionali durante le quali l'incidenza della Centrale è risultata differente a causa sia delle diverse condizioni meteorologiche e sia del diverso livello emissivo della Centrale; infatti, nel periodo estivo, l'impianto è stato mediamente mantenuto a potenze maggiori rispetto a quello invernale.

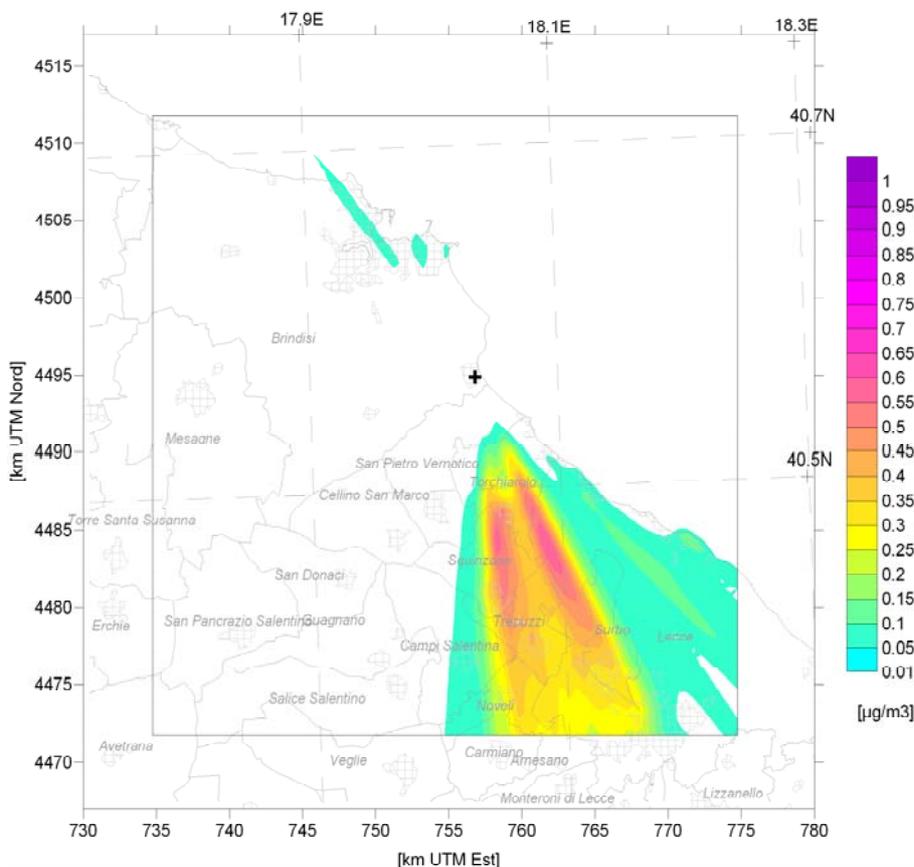
#### 3.2.1 Campagna invernale-primaverile 2006

Nelle seguenti figure si riportano le tre mappe relative alle concentrazioni medie per NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e PM elaborate a partire dalle serie orarie dei campi di concentrazione al suolo prodotte dal modello per il periodo simulato (dal 08 marzo al 20 aprile 2006).

Oltre ai confini comunali, nelle mappe sono riportate anche le aree urbane (retinatura grigia a quadri); per quanto riguarda le polveri, il valore del modello è quello ottenuto come somma della frazione primaria e delle frazioni secondarie di solfati, nitrati ed organici.

In generale, il modello individua due principali aree di ricaduta, la più estesa a SE dell'impianto, l'altra a Nord Ovest più contenuta nelle dimensioni e nei livelli di concentrazione raggiunti. A differenza dell'area a SE, l'area a NW non presenta criticità in termini di valori medi di lungo periodo, ma è soggetta ad occasionali episodi di breve durata.

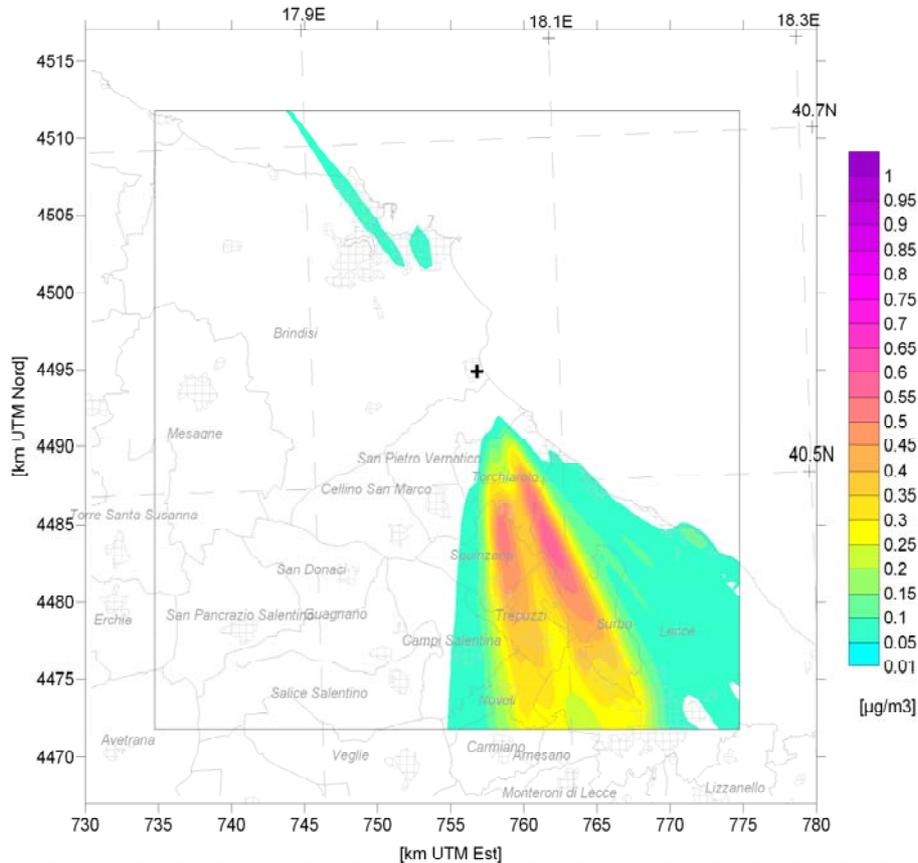
Per quanto riguarda il biossido di zolfo, CALPUFF identifica per l'area di maggiore impatto della centrale (tra Lindinuso e Surbo) un contributo di circa 0.6 µg/m<sup>3</sup> che risulta inferiore di circa 30 volte il limite applicabile sul lungo periodo (pari a 20 µg/m<sup>3</sup> e riferito all'anno civile).



**SO<sub>2</sub> concentrazione media dal 08/03/2006 al 20/04/2006**

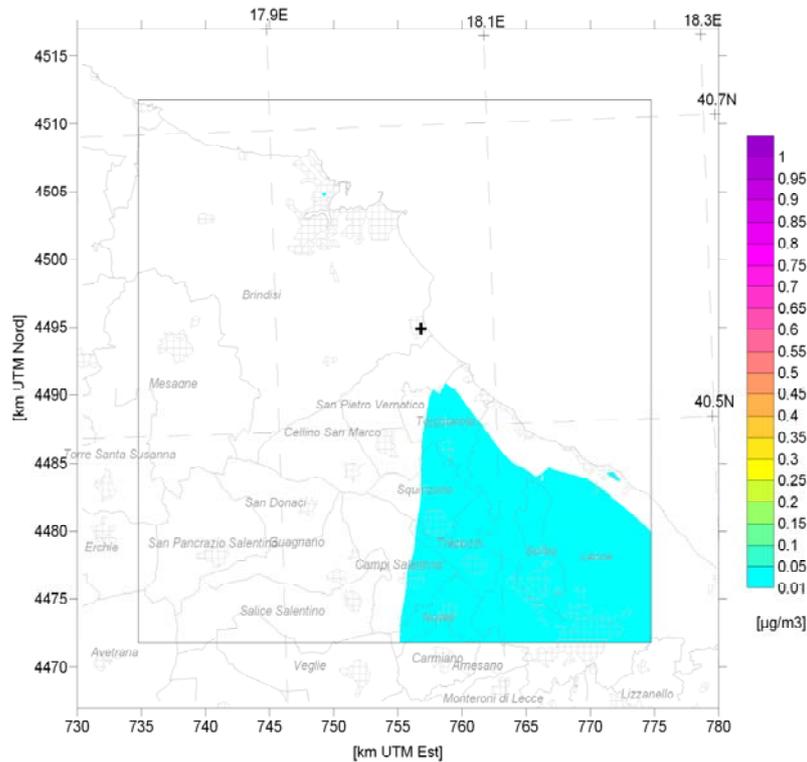
Analoghe considerazioni possono essere fatte in merito alla mappa di concentrazione media di periodo per il biossido d'azoto; i livelli di concentrazione stimata dal modello, la relativa distribuzione spaziale e

la contenuta entità delle ricadute rispetto ai limiti applicabili ( $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  contro il limite medio annuo di  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) risultano infatti paragonabili a quelli dell'inquinante precedente.



**NO<sub>2</sub> concentrazione media dal 08/03/2006 al 20/04/2006**

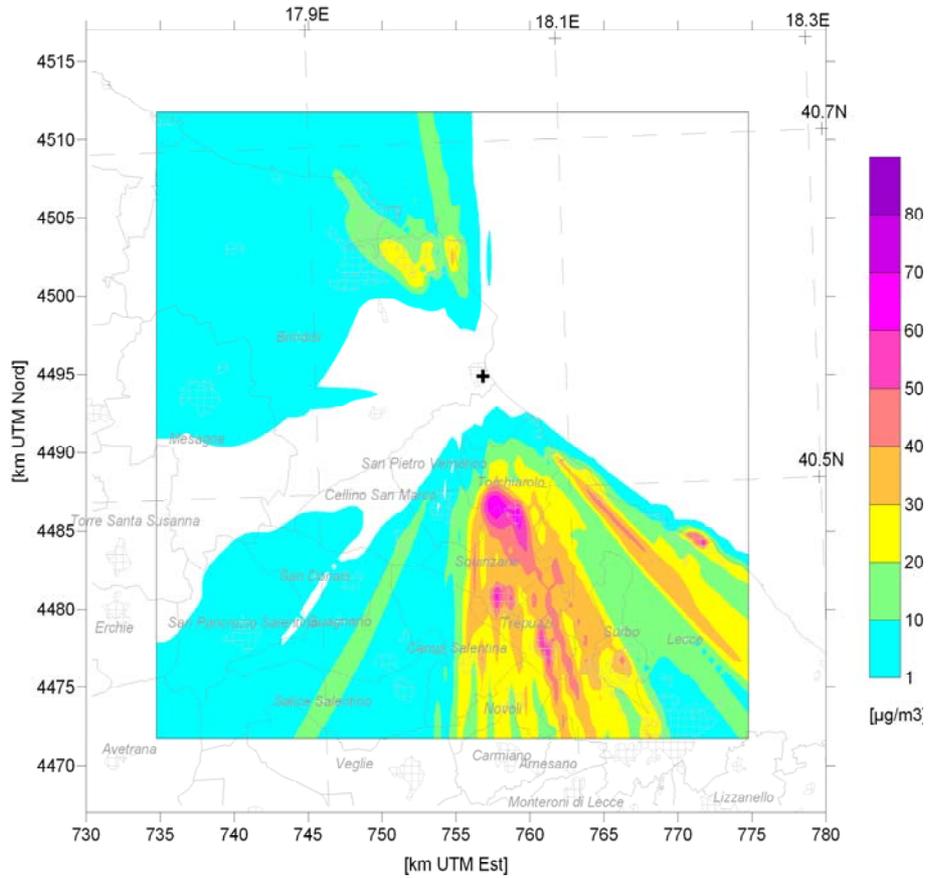
Prendendo in considerazione la figura relativa alla concentrazione media annua di particolato, si evidenzia che le ricadute dalla centrale risultano inferiori a quelle degli altri inquinanti (in termini di media sul periodo sono pari al massimo a  $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e al valore limite annuale previsto dalla normativa ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



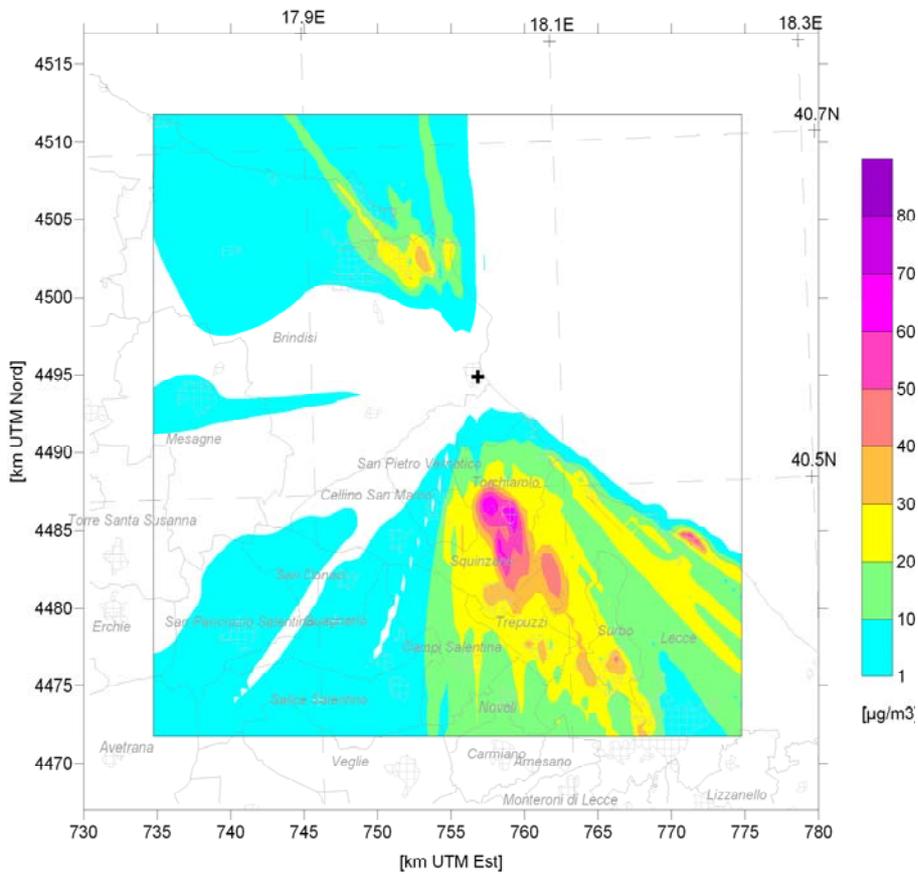
**PM concentrazione media dal 08/03/2006 al 20/04/2006**

Le seguenti mappe consentono di ripetere l'analisi cambiando statistica di confronto, ossia sostituendo alla statistica media di periodo (molto robusta), la massima concentrazione oraria. Nonostante tale grandezza sia soggetta a maggiori incertezze, essa consente di valutare comunque l'ampiezza delle dinamiche degli inquinanti. sia per il biossido di zolfo e sia per il biossido di azoto il modello ricostruisce episodi anche molto elevati, in tutti i casi inferiori ai limiti applicabili alle medie orarie.

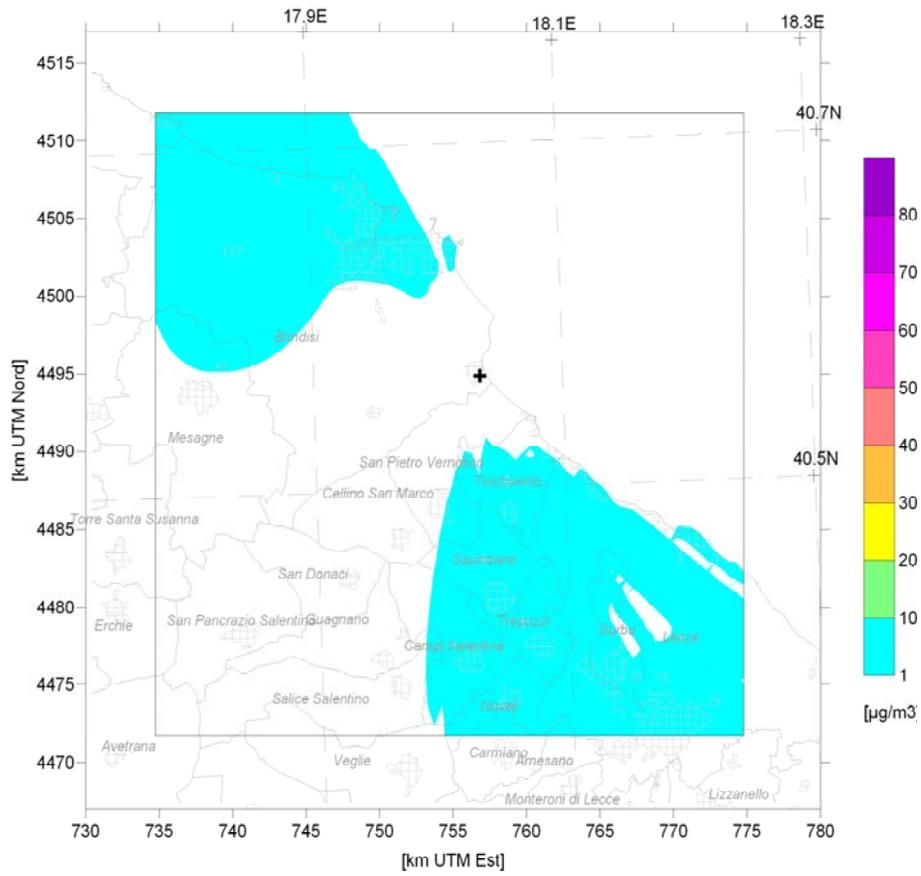
Prendendo in considerazione la mappa delle concentrazioni massime orarie relative al particolato atmosferico, appare ancora più evidente la sostanziale marginalità dei contributi della centrale all'inquinamento del comprensorio; infatti il valore massimo della ricaduta media oraria è sempre inferiore al limite applicabile alla media giornaliera.



**SO<sub>2</sub> concentrazione massima oraria dal 08/03/2006 al 20/04/2006**



**NO<sub>2</sub> concentrazione massima oraria dal 08/03/2006 al 20/04/2006**

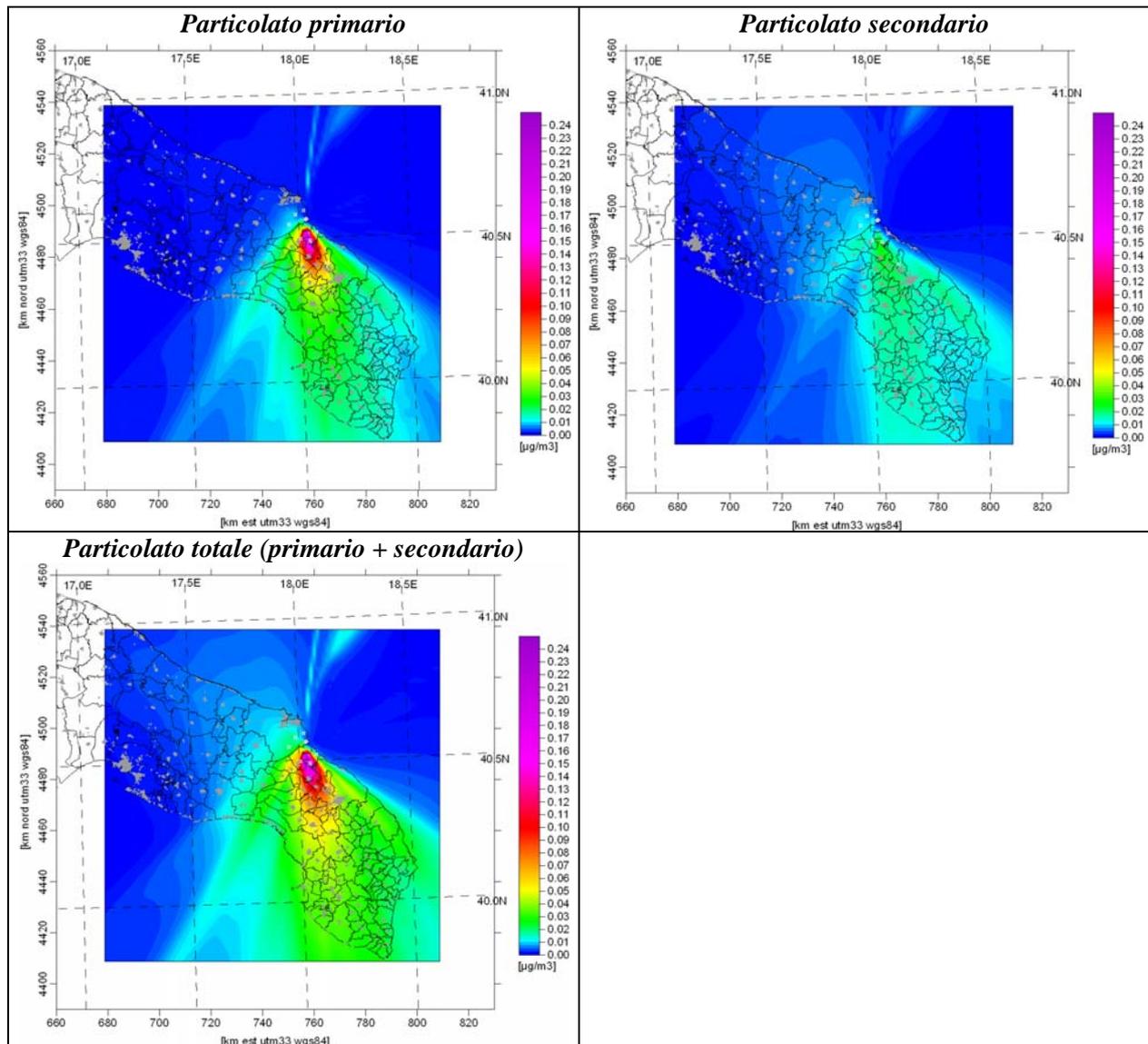


**PM concentrazione massima oraria dal 08/03/2006 al 20/04/2006**

### 3.2.2 Campagna estiva 2006

In questo ambito è stato approfondito la ricaduta delle polveri riconducibili alle emissioni della centrale “Federico II” con la suddivisione tra particolato primario e secondario.

Nei grafici seguenti si riportano quindi le mappe di ricaduta delle polveri riconducibili alle emissioni della centrale “Federico II”, in quanto direttamente emesse come particolato primario o generate in ambiente per reazioni chimiche dei precursori gassosi (particolato primario + secondario). I grafici sono pertanto tre: ricadute di particolato primario, di particolato secondario e ricadute totali di polveri riconducibili alla centrale (primario + secondario).



Si conferma che le massime ricadute di polveri sono nell'area a sud della centrale, più frequentemente sottovento. In questa area le concentrazioni medie sono di  $0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  che risultano superiori a quelle elaborate per il periodo invernale e comunque inferiori al limite applicabile per la valutazione della qualità dell'aria.

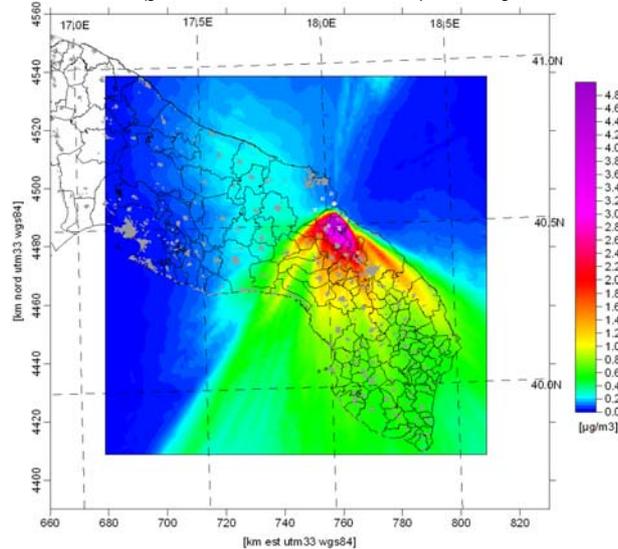
Per quanto riguarda il particolato secondario la ricaduta risulta essere più omogenea ed estesa ad un'area maggiore; comunque le concentrazioni massime sono ampiamente inferiori a quelle attribuibili al particolato primario.

Dal confronto delle mappe di ricaduta si evince inoltre che in prossimità della centrale il particolato secondario rappresenta al massimo il 10% del particolato totale riconducibile alla centrale; nella restante

parte della penisola salentina tale frazione aumenta fino al 40% circa, coerentemente con il procedere della produzione di particolato secondario e la maggiore diluizione del particolato primario.

Sulla base dei risultati delle elaborazioni modellistiche, nella figura seguente sono stati analizzati i picchi delle ricadute di polveri totali in termini di valori orari, espressi come 99° percentile del trimestre.

***Particolato totale (primario + secondario) - 99° percentile orario***



Dall'analisi dei grafici è possibile osservare che il valore massimo del 99° percentile di particolato totale è pari a 5 µg/m<sup>3</sup> che, pur non essendo direttamente confrontabile, risulta comunque inferiore rispetto al limite giornaliero di 40 µg/m<sup>3</sup>.

## 4 CONCLUSIONI

Al fine di valutare l'incidenza sul territorio delle ricadute delle emissioni aerodisperse della centrale termoelettrica "Federico II" di Brindisi, Enel ha commissionato al Cesi uno studio articolato in due campagne di indagine sperimentali ed applicazioni modellistiche nel corso del 2006.

Dall'analisi dei dati acquisiti è stato verificato che le ricadute dalla centrale di inquinanti convenzionali (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e polveri) risultano inferiori ai limiti applicabili. Per tutti gli inquinanti le massime ricadute sono nell'area a sud della centrale, più frequentemente sottovento.

Dall'analisi dei risultati si evince inoltre che l'incidenza della ricaduta di particolato secondario è maggiore all'aumentare della distanza dalla centrale fino a rappresentare il 40% circa del particolato totale nella parte meridionale della penisola salentina, coerentemente con il procedere della produzione di particolato secondario e la maggiore diluizione di quello primario.