

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI PALERMO

SEMINARIO

IMPATTO AMBIENTALE DELLE EMISSIONI IN ATMOSFERA

**Modelli e valutazione della dispersione
di inquinanti in atmosfera
con il codice CALPUFF**

Mariarosa Giardina

LAUREA INGEGNERIA DELL'ENERGIA

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE

**DEIM - DIPARTIMENTO DI ENERGIA, INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE, E
MODELLI MATEMATICI, UNIVERSITA' DI PALERMO**

Premessa

La maggiore attenzione rivolta alla valutazione della qualità dell'aria ambiente e la necessità del controllo e monitoraggio dei limiti imposti alle sorgenti esistenti hanno evidenziato negli ultimi anni l'esigenza di affiancare alle normali tecniche di rilevamento e misurazione modelli matematici per il calcolo della dispersione degli inquinanti, utili a ottenere informazioni in quelle aree in cui è difficile acquisire dati.

Ciò è dovuto all'impossibilità, il più delle volte, di una adeguata copertura spazio-temporale da parte delle stazioni di monitoraggio, che rende le misure dei parametri ambientali insufficienti per la verifica del rispetto dei limiti normativi imposti .

Quindi, diventa necessaria l'adozione di strumenti aggiuntivi in grado di colmare le lacune esistenti.

Premessa

Ad oggi, l'elevato dettaglio con i quali i modelli matematici, disponibili in letteratura, considerano le variazioni spazio-temporali delle emissioni e delle condizioni meteorologiche e la capacità di distinguere i diversi contributi degli inquinanti rendono questi modelli capaci di:

- supportare, ai fini decisionali, gli enti di coordinamento e controllo dell'emergenza;
- individuare le strategie ambientali più efficaci.

Approccio analitico per la valutazione

della dispersione degli inquinanti in atmosfera

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{-\nabla(vC)}_{\text{Trasporto}} + \underbrace{\nabla \cdot (K \cdot \nabla C) + \nabla \cdot (D \cdot \nabla C)}_{\text{Diffusione}} - R + S$$

C = concentrazione d'inquinante [g/m^3]

v = vettore della velocità del vento all'altezza di riferimento [m/s]

D = coefficiente di diffusione molecolare [m^2/s]

K = coefficiente di diffusione turbolenta [m^2/s]

R = fattore di rimozione [$\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]

S = fattore sorgente [$\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]

DATI NECESSARI

Sono richieste essenzialmente quattro passaggi fondamentali:

- la determinazione della meteorologia del periodo preso in considerazione;
- La definizione delle caratteristiche geomorfologiche del territorio considerato;
- la conoscenza dello scenario emissivo per il periodo e il territorio considerati;
- l'applicazione di uno dei modelli matematici validi per lo studio della dispersione, scelto sulla base del tipo di analisi da effettuare.



Criteri per l'applicabilità dei modelli

- **Classificazione spaziale**
- **Classificazione temporale**
- **Classificazione del territorio**
- **Tipologia di sorgente**
- **Tipologia di inquinante**

Classificazione spaziale

Alcuni dei modelli sono in grado di riprodurre l'andamento degli inquinanti atmosferici su differenti scale spaziali e temporali.

La scala spaziale:

- microscala (100 m ÷ 1 km),
- scala locale (1 km ÷ 100 km),
- mesoscala (100 km ÷ 500 km),
- scala regionale o nazionale (500 km ÷ 1000 km)
- scala globale (tutta la superficie terrestre).

Classificazione temporale

Scala Temporale:

- applicazioni di breve periodo o short-term (per lo studio di episodi critici e per situazioni di emergenza);
- applicazioni di lungo periodo o long-term (per lo studio di esposizioni cumulative e la determinazione del rischio per la salute umana).

Analisi dispersione su grande scala

Per un adeguato modello valido su ampia scala, sono necessari dati di input che devono consentire di trattare i seguenti aspetti:

- campi tridimensionali per descrivere la complessa orografia e l'uso del suolo,
- campi tridimensionali che ricoprono tutto il dominio di applicazione, idonei a descrivere almeno le proprietà dello strato limite planetario (PBL), cioè lo strato più basso della troposfera, dove il vento risente dell'attrito della superficie terrestre.

Potrebbe essere necessario ricorrere ad diversi input ottenuti applicando pre-processor meteorologici diagnostici o modelli meteorologici prognostici.

Algoritmi di calcolo

Gli algoritmi per il calcolo si distinguono in tre classi (in ordine di complessità crescente):

- Gaussiani

Soluzione analitica, adatti per scala spaziale locale $< \sim 20$ km.

- Euleriani

Fanno riferimento ad un sistema di coordinate fisse al camino, adatti per scala spaziale da locale a continentale. Necessitano di un pre-processore meteorologico esterno compatibile.

- Lagrangiani

Fanno riferimento ad un sistema di coordinate mobile che segue gli spostamenti delle masse d'aria di cui si vuole riprodurre il comportamento. Adatti per scala spaziale da locale a regionale. Necessitano di un pre-processore meteorologico esterno compatibile.

Environmental Protection Agency, U.S.

Nel 1999 l'Environmental Protection Agency (EPA), US, getta le prime basi per la realizzazione di una piattaforma software capace di supportare le valutazioni della dispersione in aria su piccola, media e grande scala, applicabile in ambito autorizzativo.

Tra gli scopi principali:

- Implementazione di un approccio tecnico-scientifico che integrasse le differenti componenti modellistiche (meteorologia, effetti orografici, modelli di dispersione, studio delle matrici ambientali, valutazione degli impatti);
- Sviluppo di uno strumento capace di utilizzare tale piattaforma a supporto delle attività di controllo e regolamentazione.

CALPUFF



CALPUFF* è formalmente proposto dall'EPA, come modello regolatorio per lo studio del trasporto di inquinanti in atmosfera per long-range e in condizioni non stazionarie ed è inserito nell'elenco dei modelli consigliati da APAT (Agenzia Italiana per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici) per la valutazione e gestione della qualità dell'aria.

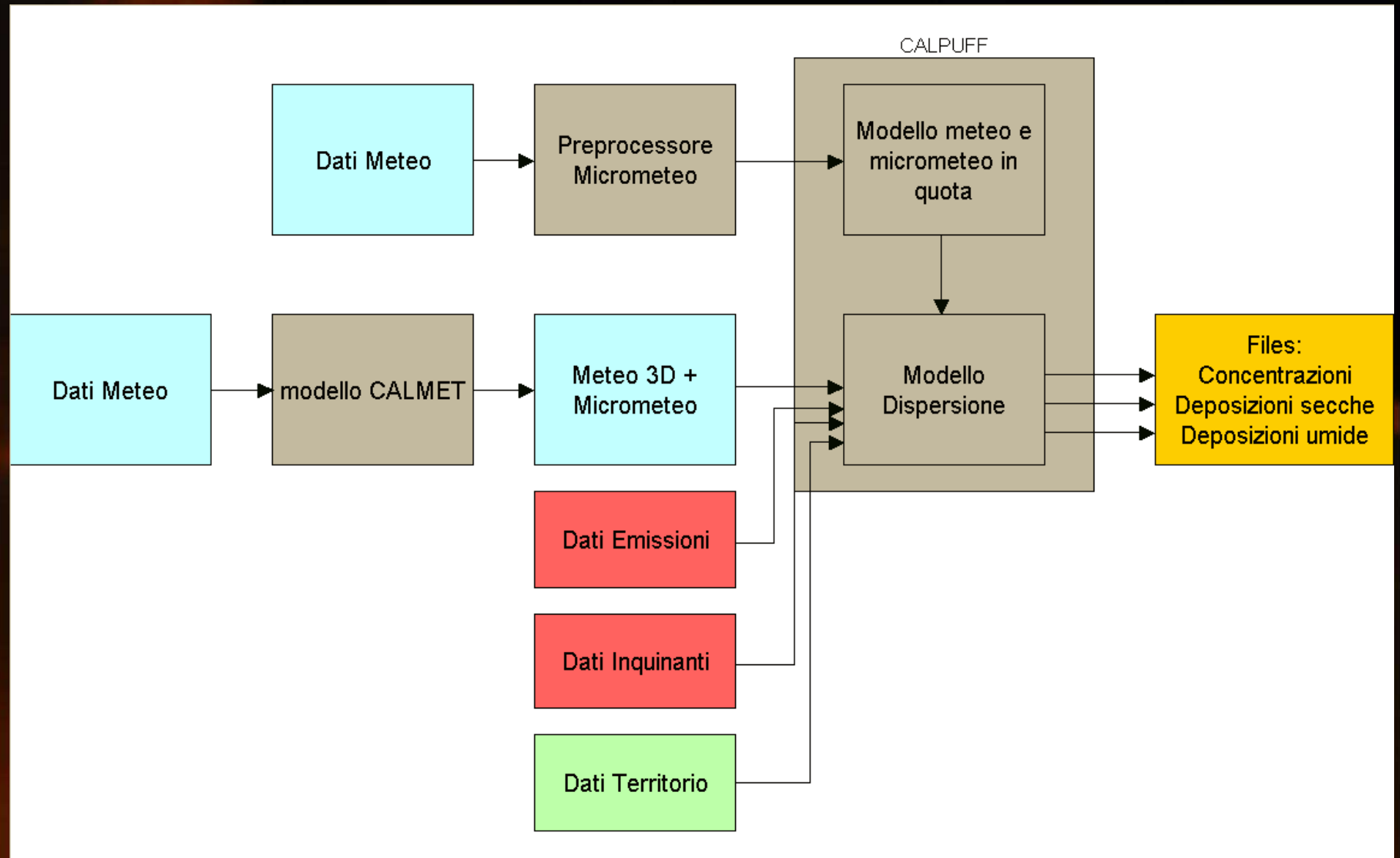
Il CALPUFF lavora con il pre-processore meteorologico CALMET (California Meteorological Model), indicato dall'EPA come strumento di calcolo di riferimento per applicazioni con condizioni meteorologiche complesse.

Per il campo tridimensionale di vento e temperatura a scala regionale o nazionale potrebbe essere necessario ricorrere al modello meteorologico a mesoscala MM5.**

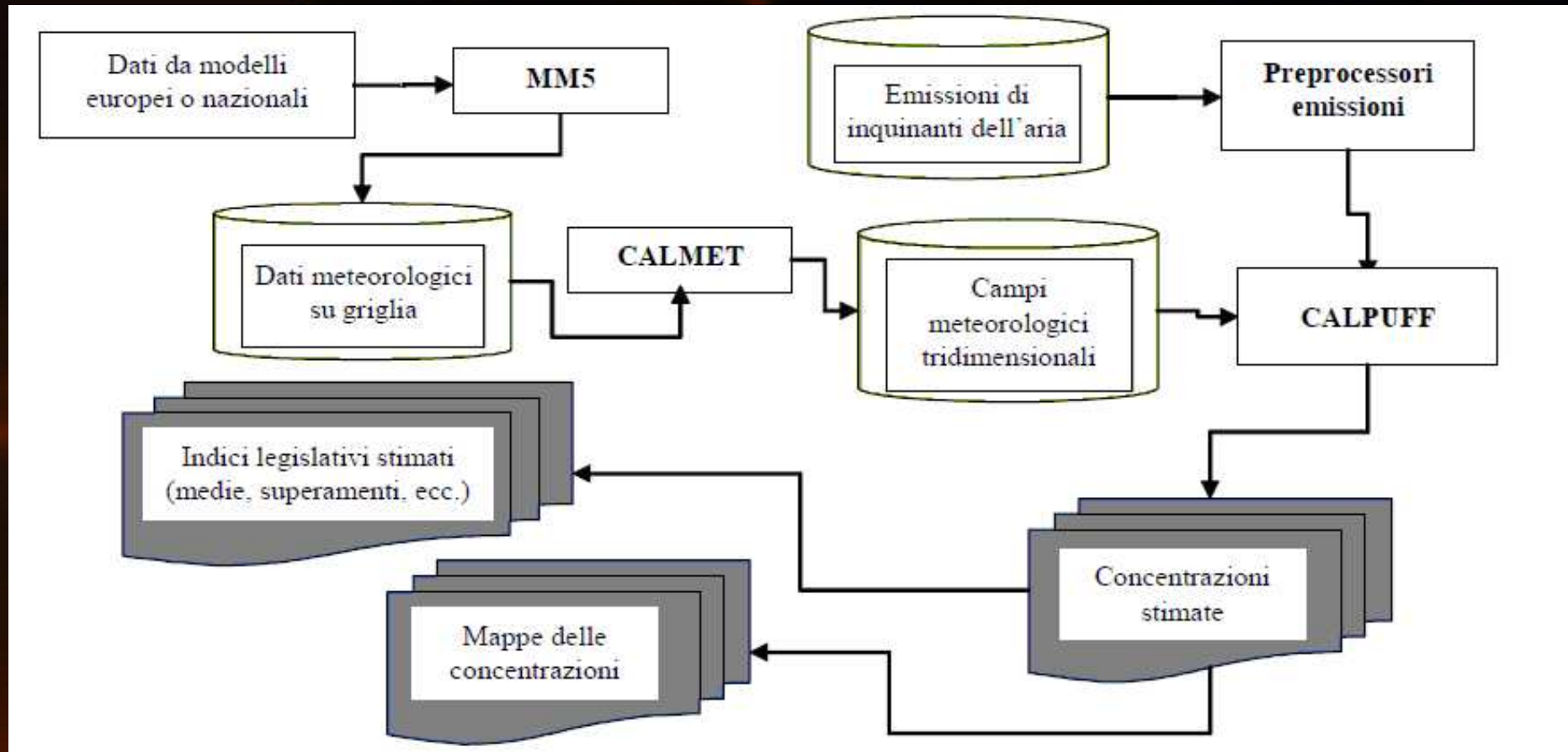
* www.src.com

** <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/mm5-desc-doc.html>.

Diagramma di flusso del codice CALPUFF



PIATTAFORMA SOFTWARE MM5-CALPUFF-CALMET



CALPUFF

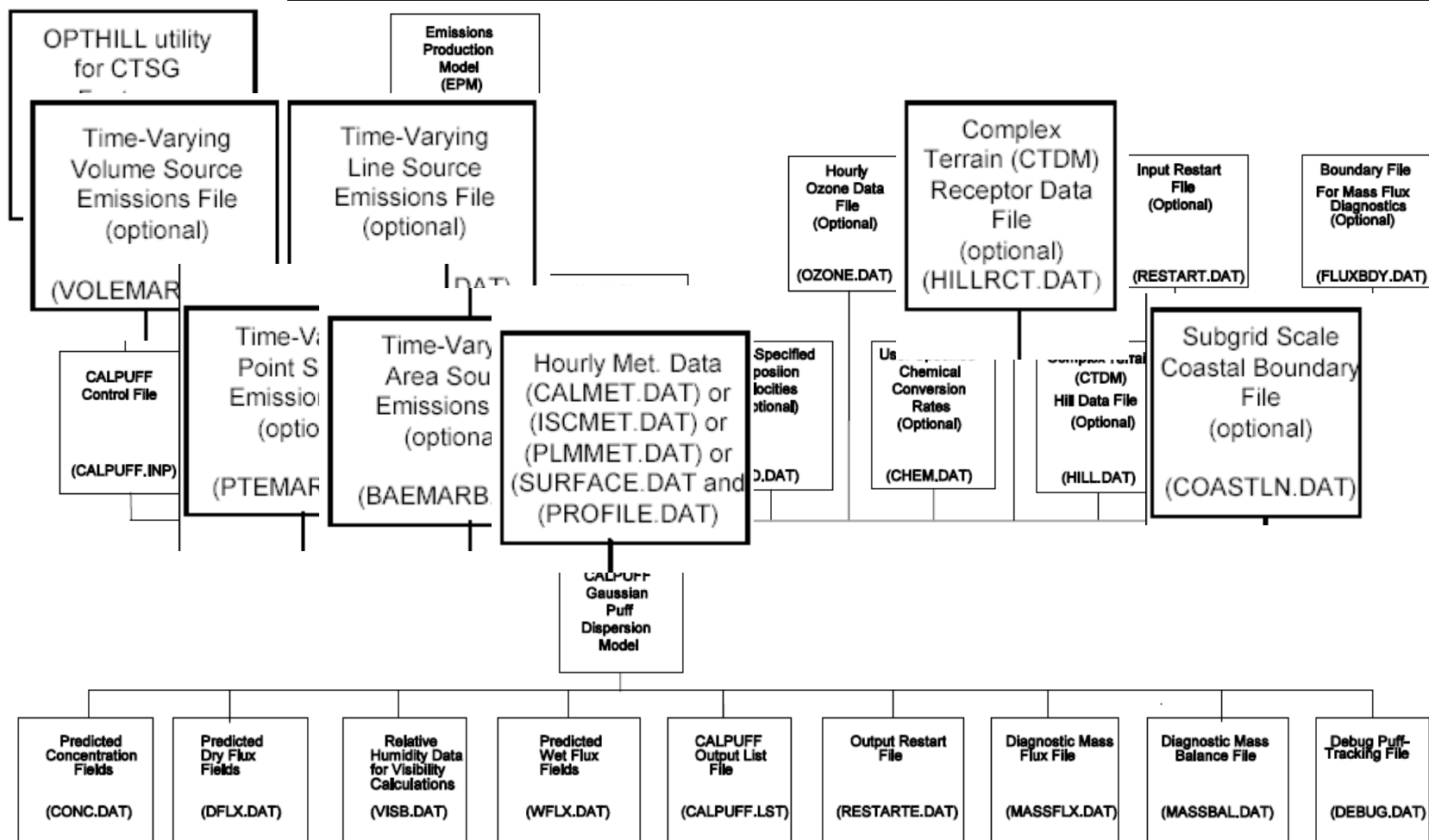


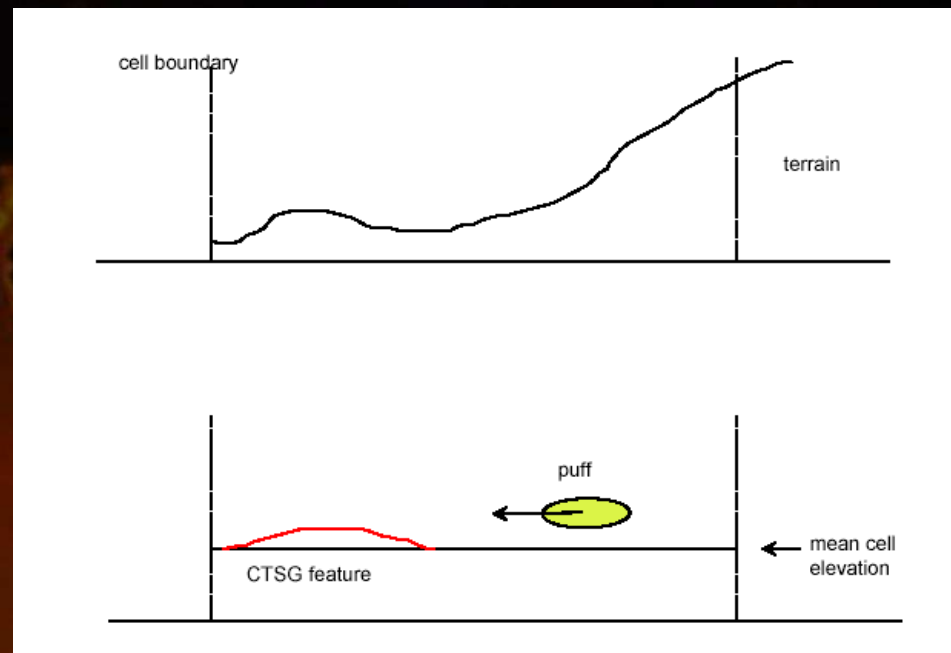
Figure 1-3. Dispersion Modeling: CALPUFF modeling flow diagram.

Orografia complessa

Interazione tra «puff» e terreno

Su grande scala si fa riferimento alla schematizzazione a griglia del terreno effettuata con CALMET.

Per la scala più piccola si fa riferimento ad una distinta subroutine del modello CTSG (*Complex Terrain algorithm for SubGrid scale features*) in cui viene impiegato l'algoritmo Complex Terrain Dispersion Model (CTDM).

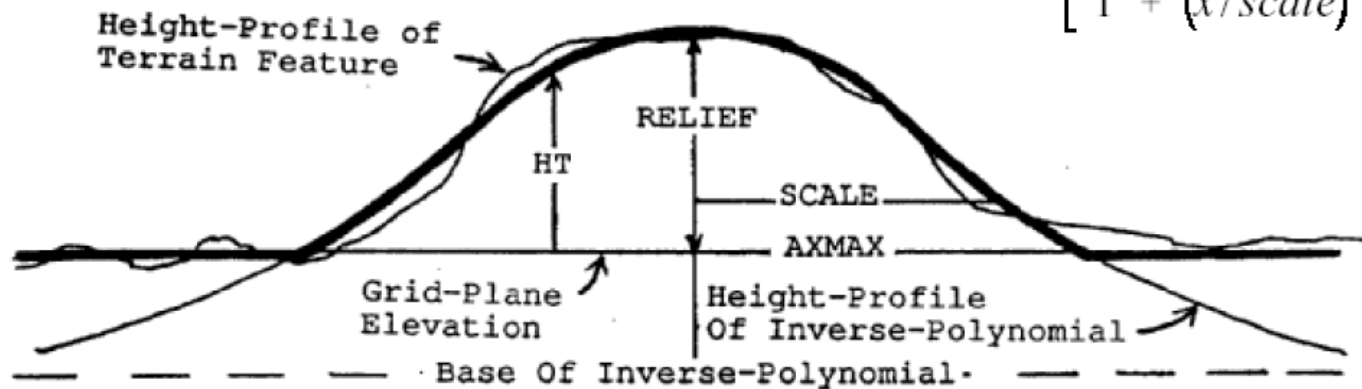


OPHILL

L'algoritmo per la definizione del suolo richiede informazioni sull'orientamento, dimensione, forma di ciascuna cella del terreno, dati utilizzati dal modello CTDM. Ciò viene fatto facendo ricorso al programma OPHILL che calcola l'esponente «expo» e il parametro «scale» dell'eq. (1), in cui HT è l'altezza del profilo del terreno. Il calcolo viene effettuato facendo ricorso a procedure di «best-fit inverse polynomial function».

$$ht(x) = \left[\frac{1 - (x/axmax)^{expo}}{1 + (x/scale)^{expo}} \right] * relief$$

Eq. (1)

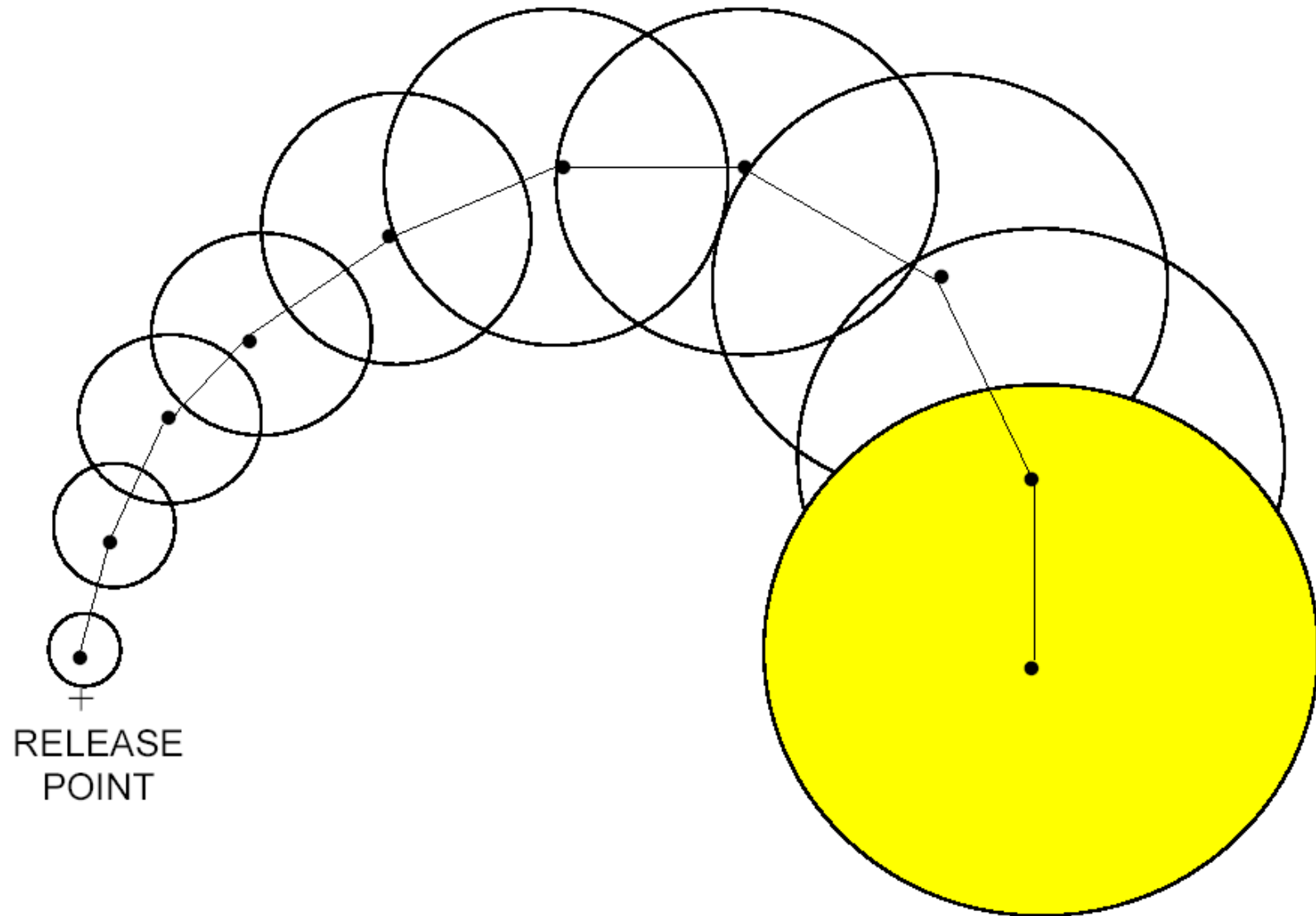


Modello di dispersione CALPUFF

Basato sul modello Lagrangiano Gaussiano, non stazionario di tipo «puff», con dispersione e rimozione di inquinanti multi-specie, al variare delle condizioni meteorologiche.

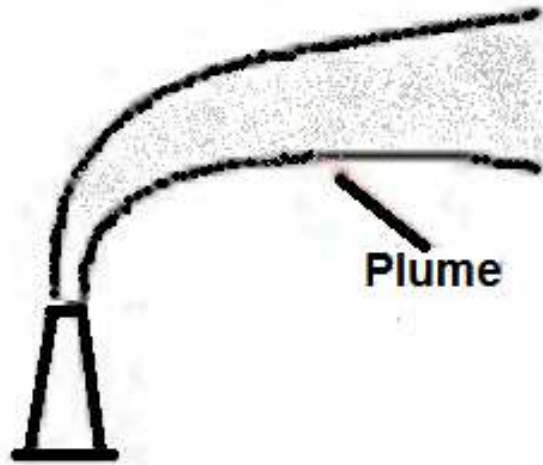
Parametri	Descrizione
Dominio ed intervallo di tempo	100-500 km dalla sorgente con un intervallo temporale da 1 h
Building Downwash	Settato tramite apposito modulo dall'operatore
Tipologia di sorgenti	Puntuali, lineari, areali, volumetriche
Campo di vento e meteorologia	Campo di vento 3D con dati orari superficiali, in quota e dati di precipitazione e/o dati prognostici (Calmet o MM5)
Tipologie di rilascio/emissione	Buoyant plumes con emissioni sia di esercizio che incidentali
Chimica	Reazioni chimiche con tassi di trasformazione definiti dall'operatore
Effetti globali	Brezze marine, interazioni mare-costa

PUFF MODELING



IL CODICE CALPUFF

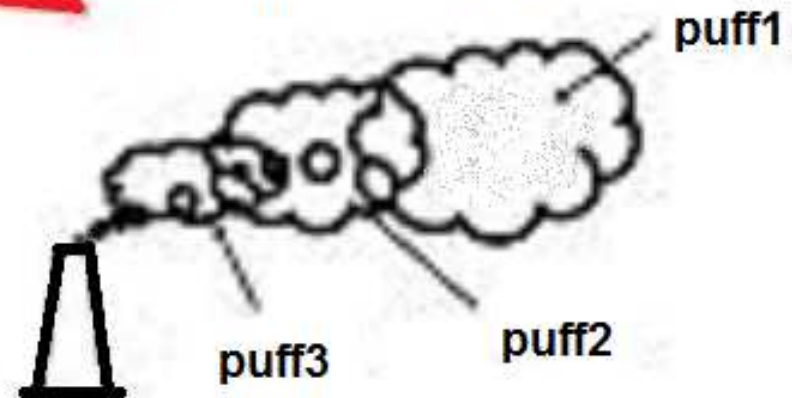
Nell'approccio usato dal CALPUFF, il "puff" emesso nell'intervallo t_1 cambia direzione nell'intervallo successivo



Pennacchio Gaussiano:
Effetto medio della
variabilità meteorologica



Puff lagrangiano:
Effetto complesso della
variabilità istantanea della
meteorologia

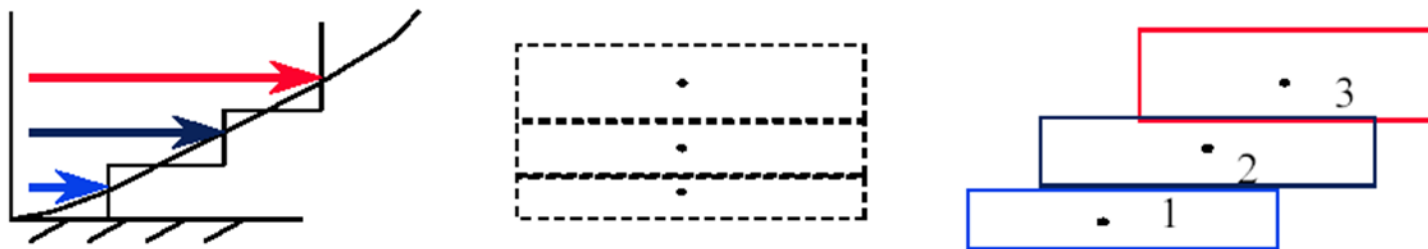


in uscita dal camino a cambiare direzione insieme al vento.
Modello di trasporto a puff utilizzato dal codice CALPUFF.

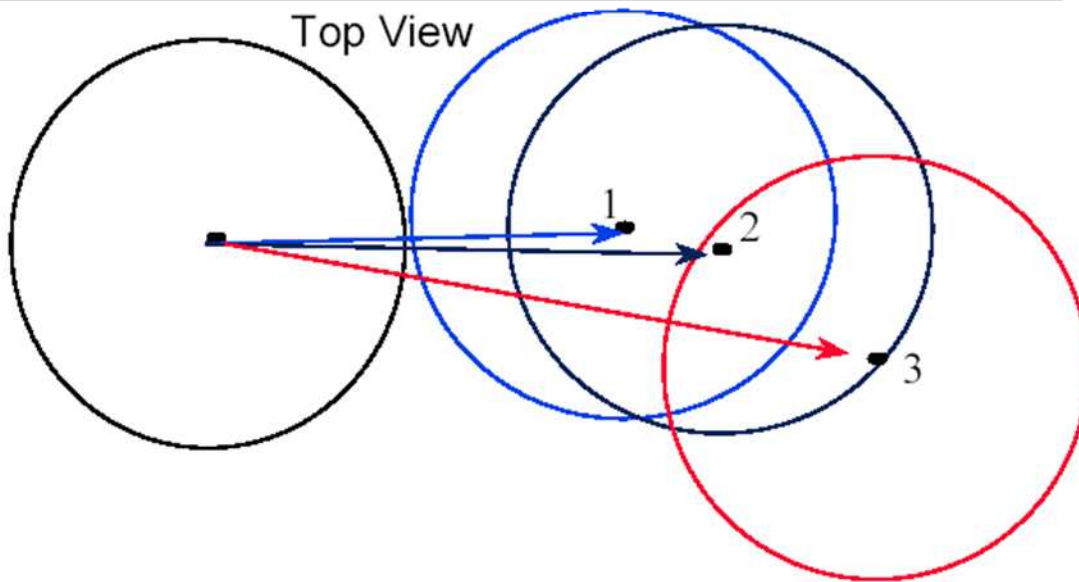
PUFF SPLITTING

CALPUFF PUFF-SPLITTING

Side View



Top View



Nel
split
in p
tem
baric

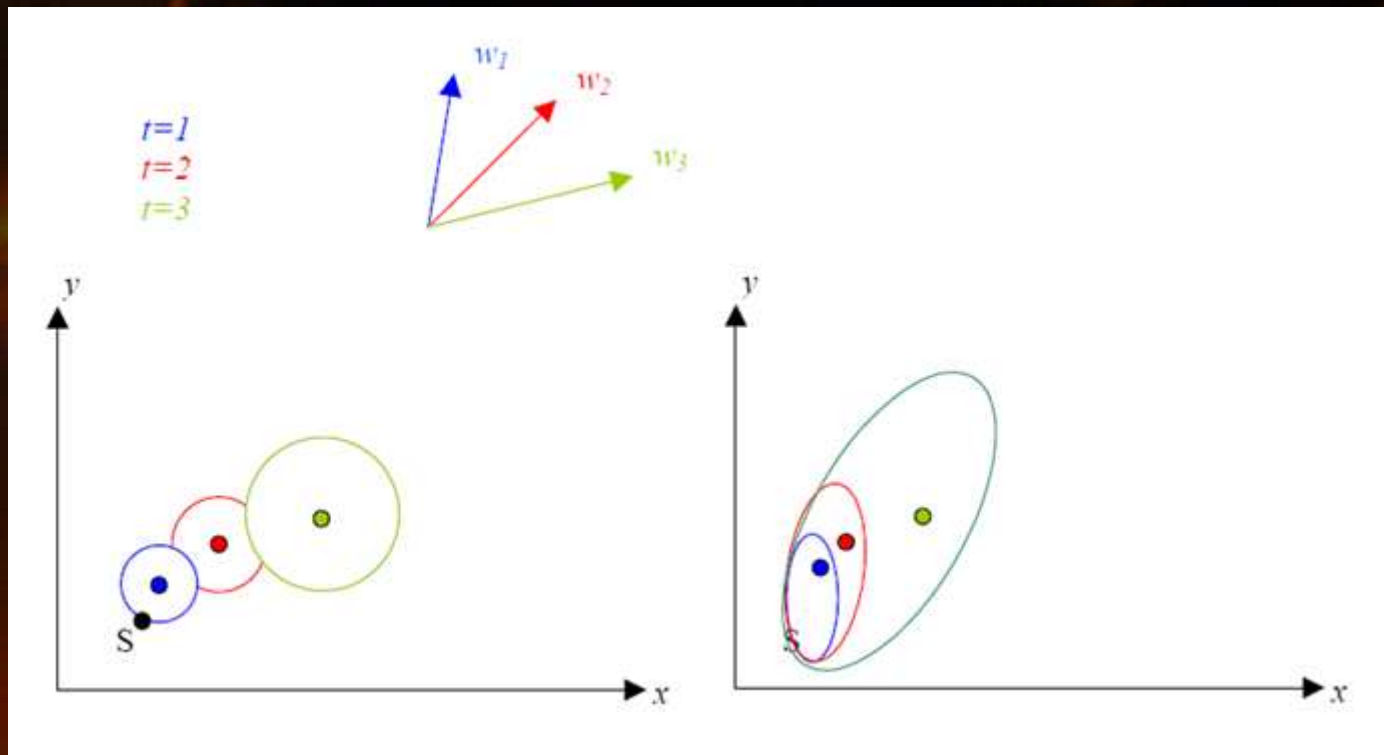
Que
i pu
varia
quor
dell'

baricentro perde validità.

IL CODICE CALPUFF

In CALPUFF sono presenti due opzioni per la rappresentazione dei “pacchetti” di inquinante:

- Puff: elementi gaussiani radiali-simmetrici
- Slug: elementi non circolari allungati nella direzione del vento.



Differenza fra dispersione a puff (sinistra) e a slug (destra)

IL CODICE CALPUFF

CALPUFF permette non solo di scegliere tra questi due schemi ma consente anche un uso “ibrido”, che sfrutta

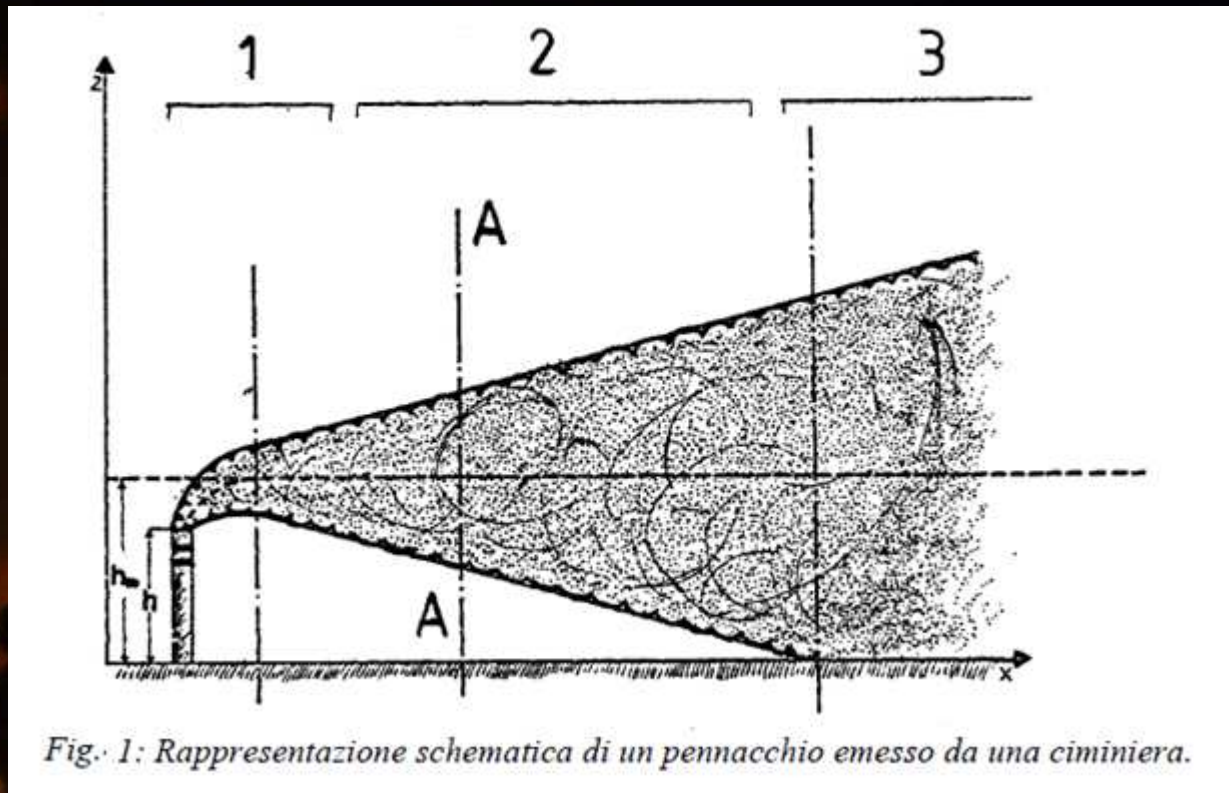
- i vantaggi del modello a slug vicino la sorgente,
- quelli del modello a puff in zone più distanti.

IL CODICE CALPUFF

Ad intervalli di tempo regolari (sampling step), ogni puff viene “congelato” e viene calcolato il suo contributo alla concentrazione.

La concentrazione complessiva in un recettore è calcolata come sommatoria del contributo di tutti gli elementi vicini, considerando la media di tutti gli intervalli temporali (sampling step) contenuti nel periodo di base (basic time step), in genere equivalente ad un'ora.

Zona ascensionale del pennacchio



Zona 1:

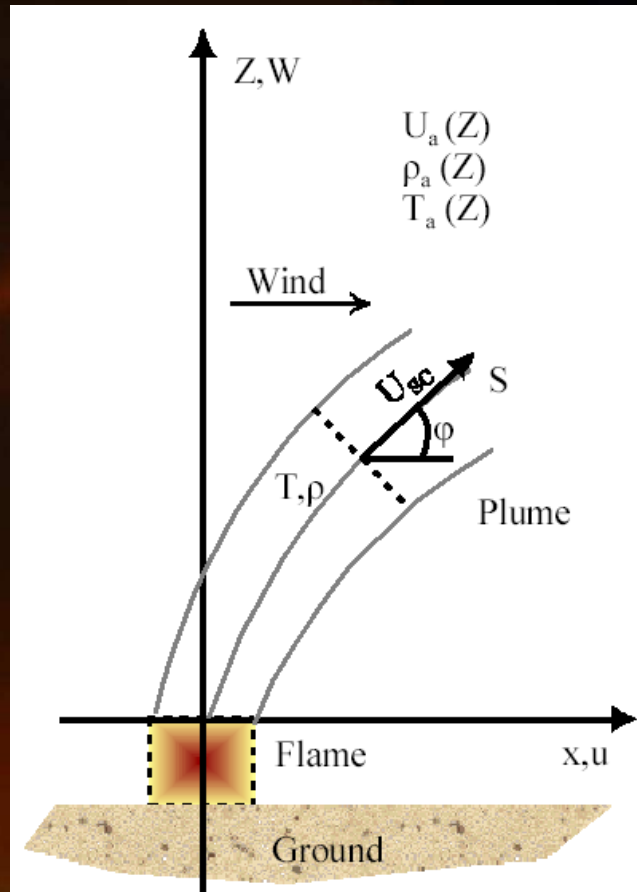
il *plume* di fumo sale in *verticale* e progressivamente si *piega* nella direzione sottovento fino a livellare orizzontalmente il proprio baricentro (h_m).

Questa *fase* termina normalmente ad una distanza sottovento vicina alla ciminiera (tipicamente $100 \div 300$ m).

Si definisce *plume rise*.

Plume Rise

Una delle caratteristiche principali della CALPUFF è la capacità di trattare le fenomenologie per il caso di sorgenti particolarmente calde (presenza di incendi). Utilizzando un data-file che contiene tutte le informazioni relative alla sorgente, il codice risolve le tre equazioni fondamentali di conservazione della massa, momento e energia.



Il sistema di equazione è*:

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2) = 2r\alpha\rho_a |U_{sc} - U_a \cos \varphi| + 2r\beta\rho_a |U_a \sin \varphi|$$

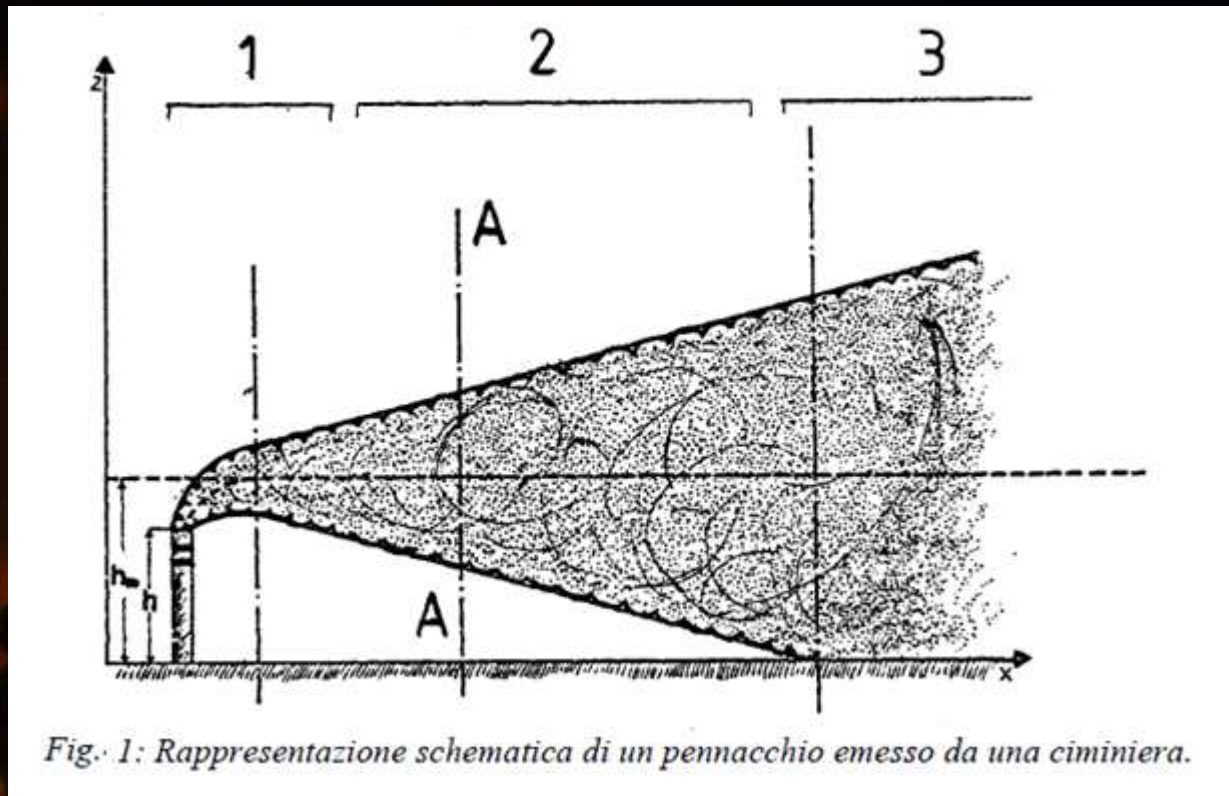
$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2 (u - U_a)) = -r^2 \rho_w \frac{dU_a}{dz}$$

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2 w) = gr^2(\rho_a - \rho)$$

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2 (T - T_a)) = \rho \frac{d\eta_a}{dz} wr^2 + \frac{Q}{c_p} r^2$$

* Weil 1988

Zona di trasporto senza interazione col suolo



Zona 2:

una volta raggiunta la quota h_m , il pennacchio si allarga (più o meno, a seconda della turbolenza atmosferica) senza raggiungere il suolo. In questa zona l'interazione tra *plume* e suolo è trascurabile ed il *plume*, in pratica, è libero di espandersi nello spazio in modo indisturbato, pilotato solo dalla turbolenza atmosferica

Equazione di base

Costruzione del modello semiempirico (zona 2, zona3)

(x_p, y_p, z_p) = puff
coordinate [m]

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-\frac{(x-x_p)^2}{(2\sigma_x^2)}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_p)^2}{(2\sigma_y^2)}\right]$$

Q is the *material mass* in the puff and is a function of the sampling interval. Its variations are due to removal and to chemical processes.

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_z} \sum_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{[z-(z_p+2nh)]^2}{(2\sigma_z^2)}\right\}$$

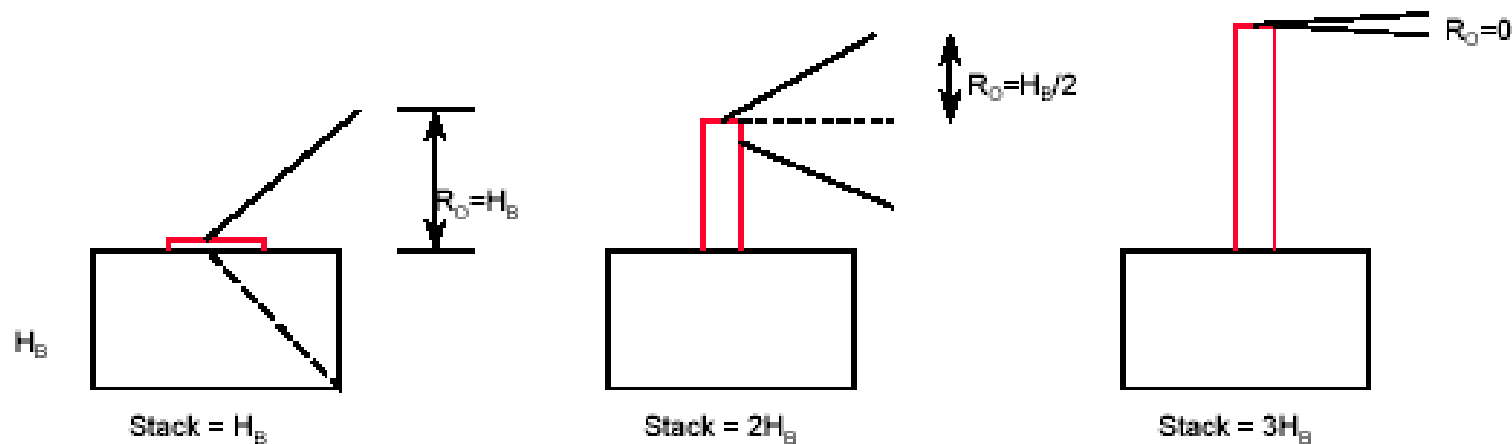
It is the *vertical term* of the Gaussian distribution. It takes account for the vertical diffusion due to the mixing lid and plume buoyancy and is a function of the distance from the source.

The *sigmas* are the horizontal Gaussian dispersion coefficients and are functions of the sampling interval.

They include effects of atmospheric turbulence, plume buoyancy and lateral (crosswind) scale of an area-source.

Zona di trasporto senza interazione col suolo

ISC^{*}-METHOD BUILDING DOWNWASH - R_0



H_s è elevazione dell'edificio in cui si trova il camino.

L'algoritmo che consente di valutare gli effetti sul recettore dei fenomeno building downwash è il pacchetto nominato «DWSIGS».

* ISC Industrial Source Complex dispersion model

Coefficienti di dispersione

CALPUFF propone diverse opzioni per la determinazione dei coefficienti di dispersione:

- misura diretta di turbolenza, per esempio, con un anemometro sonico;

- utilizzo dei parametri di scala micrometeorologici (lunghezza di Monin-Obukhov, attrito, velocità di scala convettiva, altezza dello strato limite);

- valori elaborati da MESOPUFFII.

- uso dei coefficienti di dispersione:

 - ❖ Pasquill-Gifford (PG) coefficients (rural)

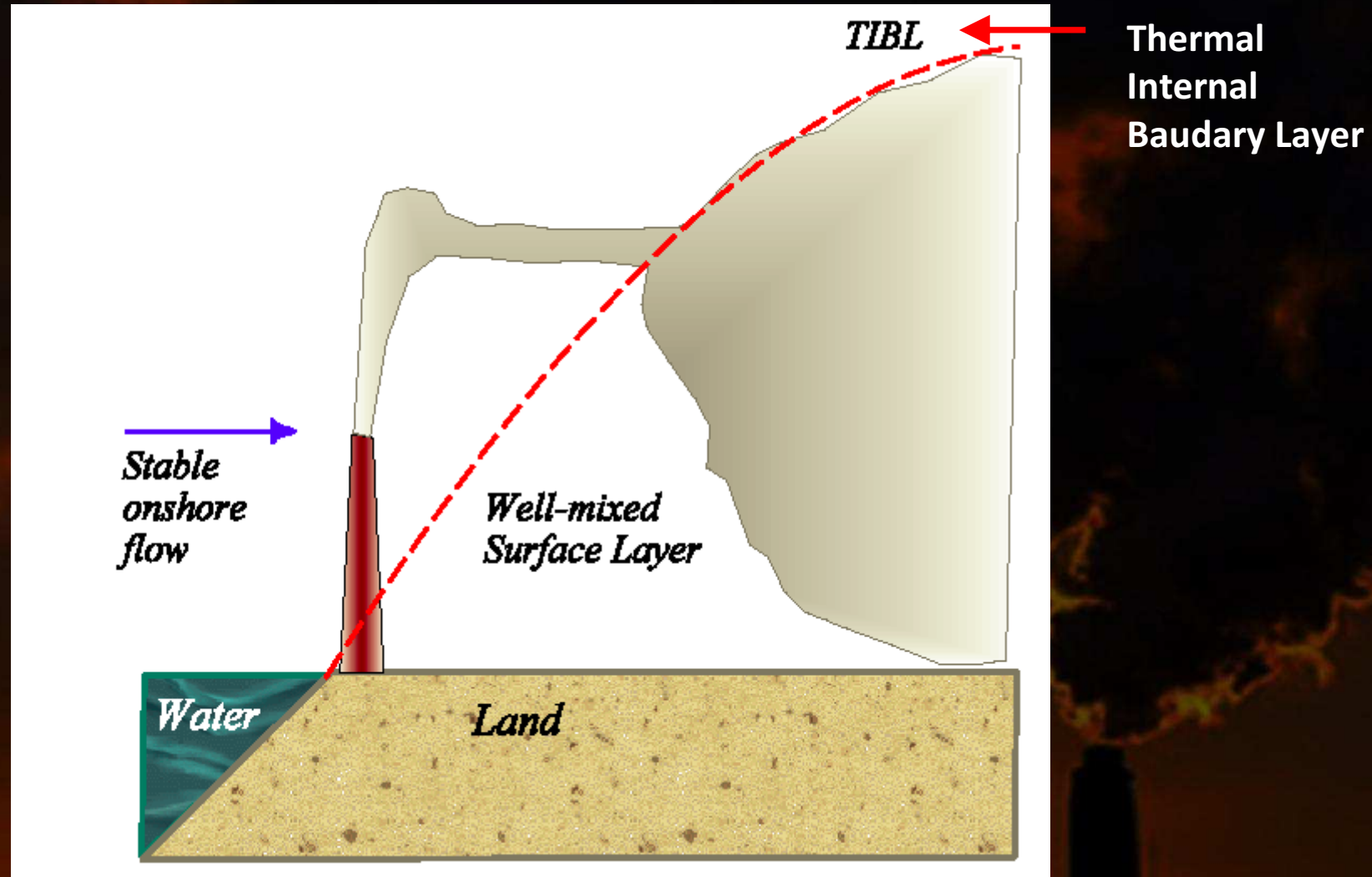
 - ❖ McElroy-Pooler (MP) coefficients (urban)

The background of the slide features a sunset scene with a dark, silhouetted industrial facility in the foreground. Three tall chimneys are visible, each emitting a plume of smoke or steam that rises into the sky. The sky is a mix of dark blues and oranges, with a bright sun partially obscured by clouds on the right side. The overall atmosphere is dramatic and somewhat somber, suggesting the environmental impact of industry.

Deposizione a secco o umida

- **Deposizione a secco:** il modello prevede diversi livelli di dettaglio nel trattare il fenomeno della deposizione secca (la variazione spazio-temporale del flusso di deposizione può essere calcolata per esempio inserendo la velocità di deposizione nelle 24 ore).
- **Rimozione ad umido:** la rimozione ad umido è rappresentata come funzione del tasso di rimozione λ che dipende sia dalle caratteristiche dell'inquinante (solubilità, reattività, ..) sia dalla natura della precipitazione (liquida o solida).

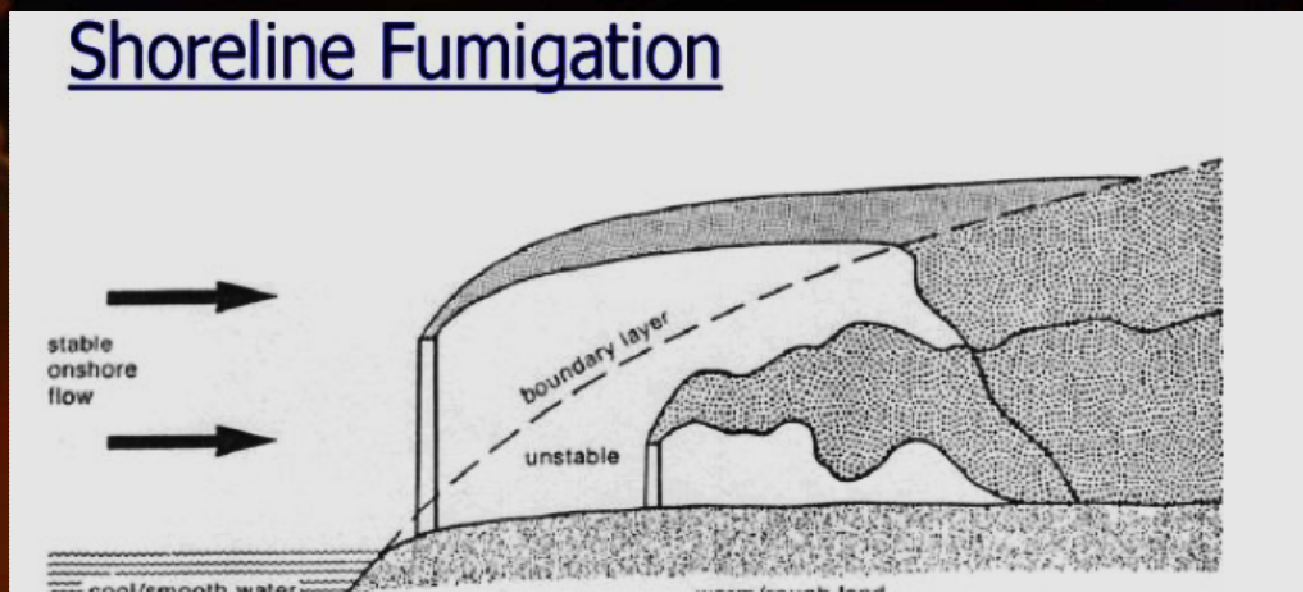
Shoreline fumigation



Il pennacchio stretto, che si sviluppa nello strato superficiale stabile sopra la zona marina, aumenta le sue dimensioni a causa della presenza della Thermal Internal Boundary Layer (TIBL) nella regione interna della costa.

La formazione e crescita del TIBL è associato al riscaldamento solare della superficie terrestre. L'instaurarsi di moti convettivi porta ad un abbattimento dell'inquinante, causando concentrazioni significative a livello del terreno.

Viene utilizzato un Modulo di calcolo TIBL che, sulla base di una SUB-GRID (SGTIBL) effettuata all'interno delle griglie che schematizzano l'area di costa (COASTLINE.DAT), impiega opportuni algoritmi che tengono in considerazione i fenomeni di fumigazione (Shoreline Dispersion Model, SDM).



Il Modello meteorologico CALMET



- **Dominio di calcolo**
 - Scala spaziale: descrizione geografica del territorio con il modello digitale del terreno (DTM che comprende il «digital elevation model», DEM, e il «land use land cover», LULC), descrizione della griglia di calcolo (GRID.DAT), e classificazione di uso del suolo per la definizione del file GEO.DAT
 - è necessario anche definire gli effetti cinematici del terreno sul campo di vento, che viene modificato tramite l'aggiunta di componenti verticali indotte dall'orografia complessa

Il Modello CALMET



- **Dati meteorologici**
 - elaborare il file delle variabili meteo se rilevate da stazioni a terra (SURF.DAT contiene i dati velocità e direzione vento, copertura nubi, temperatura, pressione, umidità relativa, etc..)
 - elaborare il file delle variabili meteo delle stazioni profilometriche per ricavare le informazioni meteorologiche in quota (UP.dat),
 - elaborare il file del campo tridimensionale di vento e temperatura (MM5.dat), che deve essere fornito da un modello meteorologico di tipo prognostico come il pacchetto MM5.

CALMET

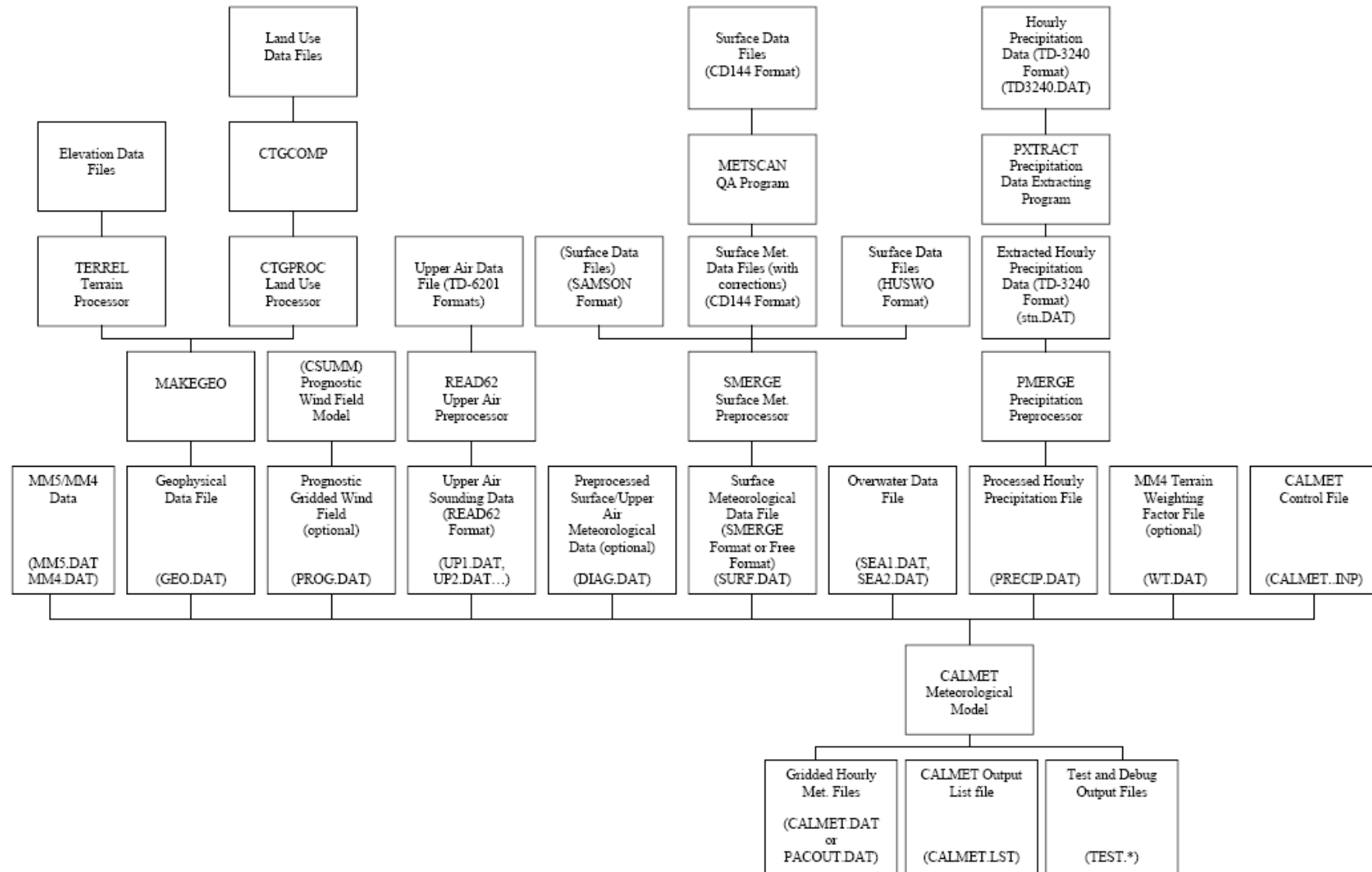


Figure 1-2. Meteorological modeling: CALMET modeling flow diagram.



GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE