

Difusão de Poluentes na Atmosfera

✉ Henrique M. J. Barbosa



Aplicações



Aplicação da modelagem de dispersão de poluentes:

- ∞ Calcular se a população está ou não exposta ou se estará exposta a material perigoso



Exposição



Depende basicamente de 3 fatores:

- ❧ Quão misturada a pluma está
 - ❧ Horizontal ou vertical x tempo
- ❧ Quão próxima a pessoa está do centro da pluma
 - ❧ Relação com o levantamento da pluma
- ❧ Quanto tempo ela está dentro da pluma
 - ❧ Velocidade do vento, duração da emissão, direção,...

Dispersão e Difusão



- ↻ Termos usados indistintamente => processos turbulentos na atmosfera
- ↻ É um processo aleatório (i.e. Monte Carlo)
- ↻ Não isotrópico (e depende do vento)
- ↻ Cria uma distribuição gaussiana (H/V)
- ↻ Sempre age no sentido de diluir as concentrações

Dispersão



Escoamento do ar:

↻ Quanto mais ar, mais diluída

Turbulência na atmosfera:

↻ **Mecânica**



The COMET Program

Dispersão



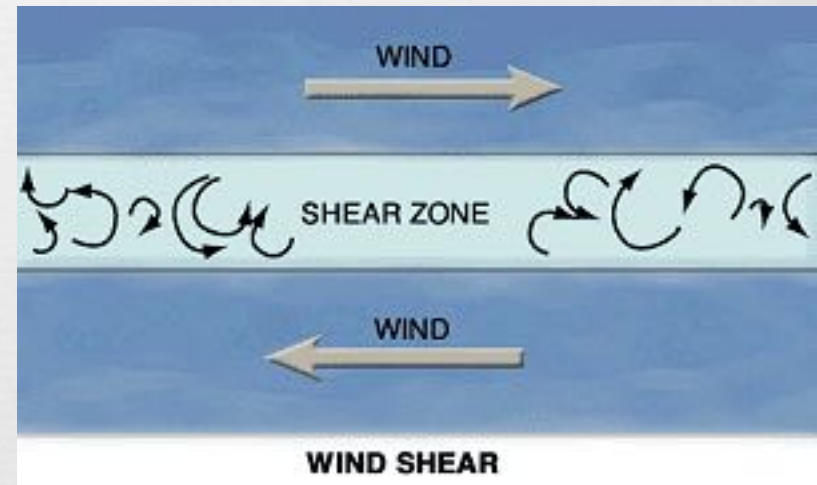
Escoamento do ar:

∞ Quanto mais ar, mais diluída

Turbulência na atmosfera:

∞ Mecânica

∞ **Cisalhamento**



Dispersão



Escoamento do ar:

↻ Quanto mais ar, mais diluída

Turbulência na atmosfera:

↻ Mecânica

↻ Cisalhamento

↻ Empuxo



Estabilidade



∞ O quanto a atmosfera suporta, tolera ou suprime movimentos turbulentos na vertical

Critérios:

∞ Instável se $dT/dz < \Gamma_d = -9.8 \text{ K / Km}$

∞ Neutro $dT/dz = \Gamma_d$

∞ Estável se $dT/dz > \Gamma_d$

Estimativas



- ∞ σ_{θ} – desvio padrão da direção do vento horizontal
- ∞ σ_w – desvio padrão da velocidade vertical



Estimativas



∞ Calculando a velocidade de fricção u^*

$$\rho u^{*2} = \rho u \ell_z^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = -\rho (\overline{w'u'})$$

Vertical moment flux
(a measure of turbulent diffusion)

(1) cisalhamento
do vento

ρ = air density

u = mean horizontal wind speed

ℓ_z = mixing length

w' = vertical eddy velocity

u' = horizontal eddy velocity

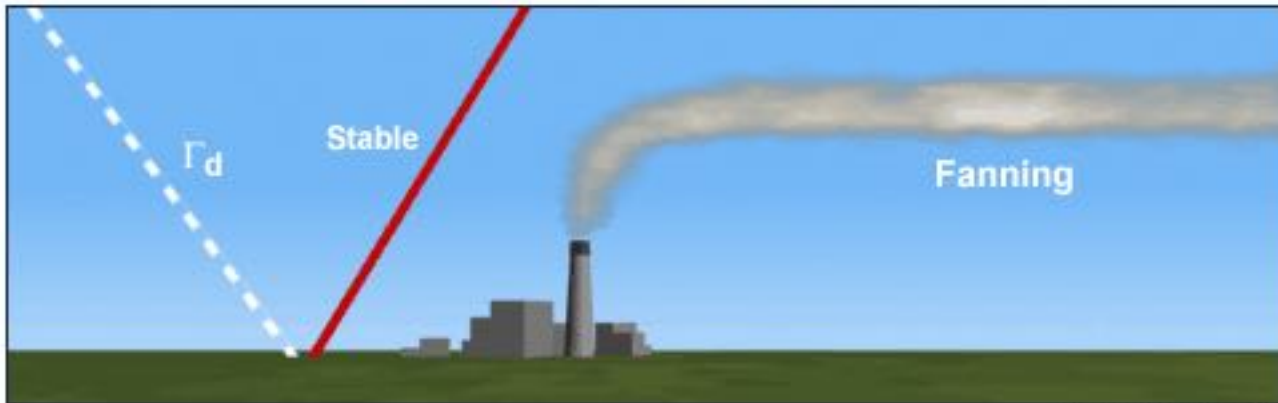
(2) Comprimento de
mistura

Perfil logaritmo
do vento na PBL

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln(z/z_0)$$

Tipos de pluma -1, 2

Fanning Plume Type



The COMET Program

Lofting Plume Type



The COMET Program

Tipos de pluma – 3, 4

Looping Plume Type



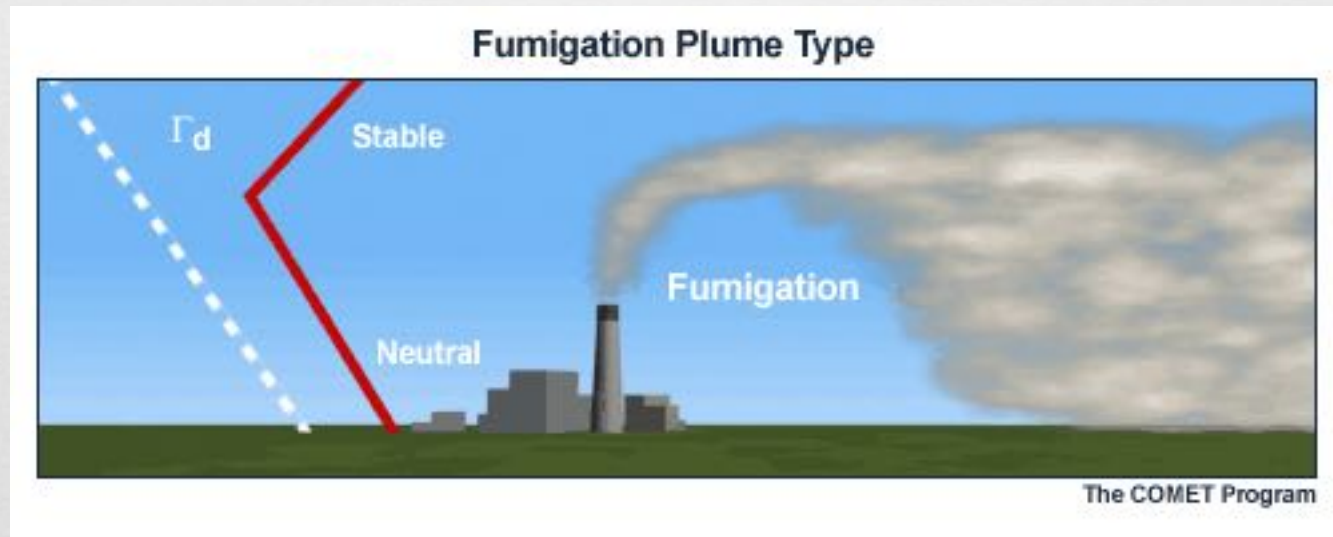
The COMET Program

Coning Plume Type

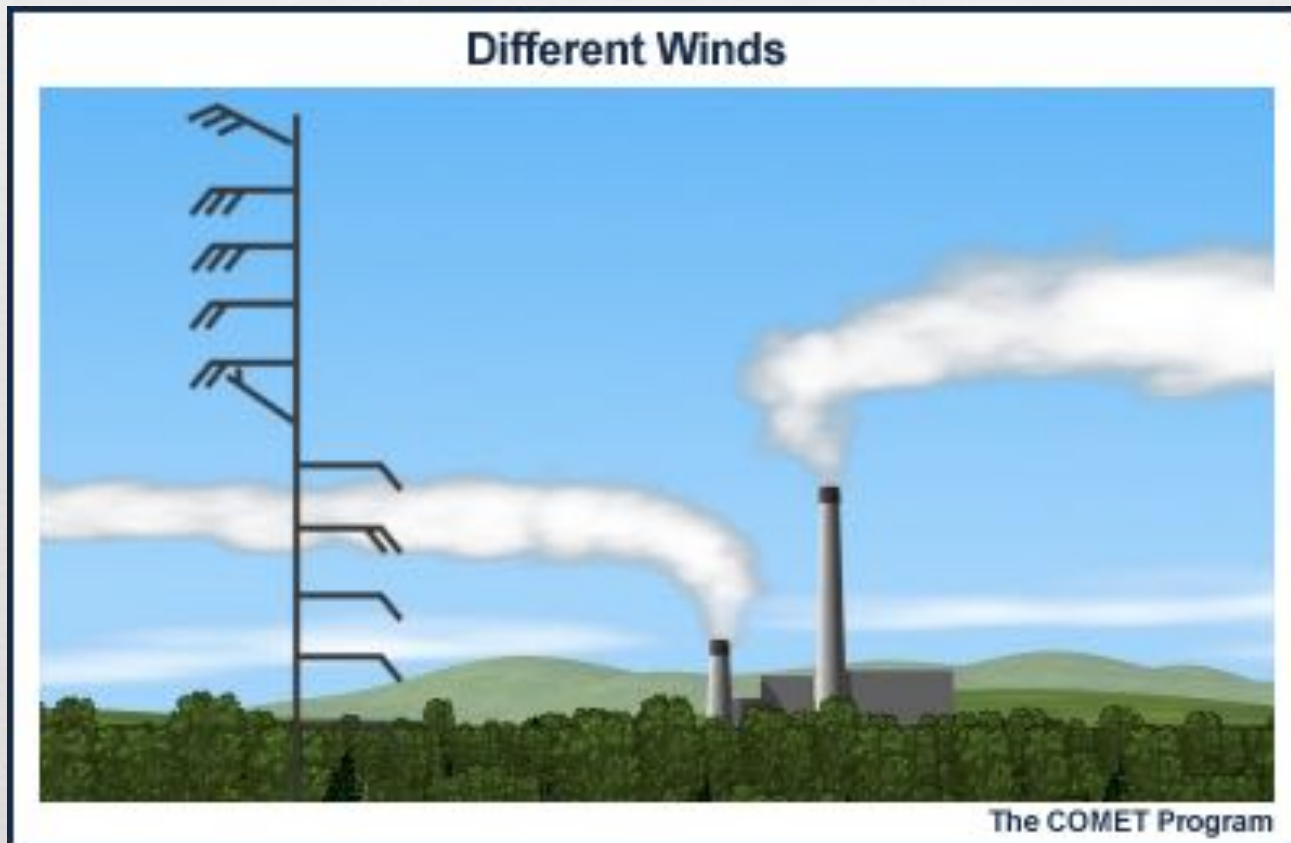


The COMET Program

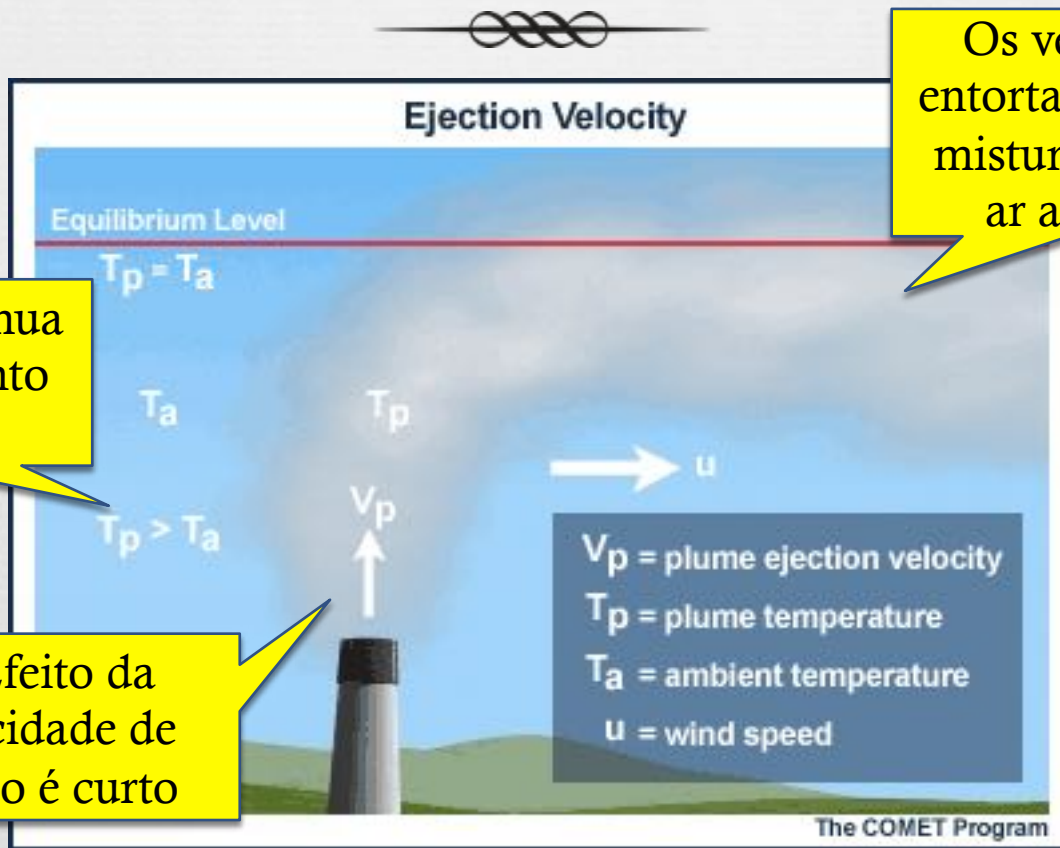
Tipos de pluma - 5



“Plume rise” e vento



“Plume rise” e vento



A pluma continua a subir enquanto $T_p > T_{amb}$

Os ventos vão entortar a pluma e mistura-la com o ar ambiente

O Efeito da velocidade de ejeção é curto

$$\text{Plume Rise} \cong \frac{\text{Ejection Velocity, Plume Buoyancy}}{\text{Wind Speed, Stability}}$$

$(u) \quad \partial\theta/\partial z$

Exemplos especiais



- ↻ Containers pressurizados
 - ↻ Velocidade de ejeção pode não ser vertical

- ↻ Incêndios
 - ↻ Velocidade zero, mas muito empuxo (calor)

- ↻ Gases densos
 - ↻ Se comporta como um líquido (segue a topografia)

Plume rise Holland's Eq.



$$\Delta h = \frac{V_s D}{u} \left(1.5 + 0.00268 P D \frac{(T_s - T_a)}{T_s} \right)$$

Δh \equiv plume rise, m

V_s \equiv stack exit velocity, m/s

D \equiv stack diameter, m

u \equiv wind speed, m/s

P \equiv pressure, mb (millibars)

T_s \equiv stack gas temperature, K

T_a \equiv ambient temperature, K

“Plume rise” e vento

Plume Rise in Light Winds with Neutral Stability



The COMET Program

Durante a manhã

Plume Rise in Strong Winds with Neutral Stability



The COMET Program

Previsão de ventos fortes a tarde

Estabiliza a temperatura mais rapidamente

Tipos de modelos de dispersão



∞ Dispersão gaussiana

Assume uma distribuição normal

∞ Transporte dos gradientes

Difusão ao longo de

∞ Estatísticos

Baseados em Monte-Carlo

∞ Similaridade

Monin-Obuhkov
Tuneis de vento

∞ “Caixa”

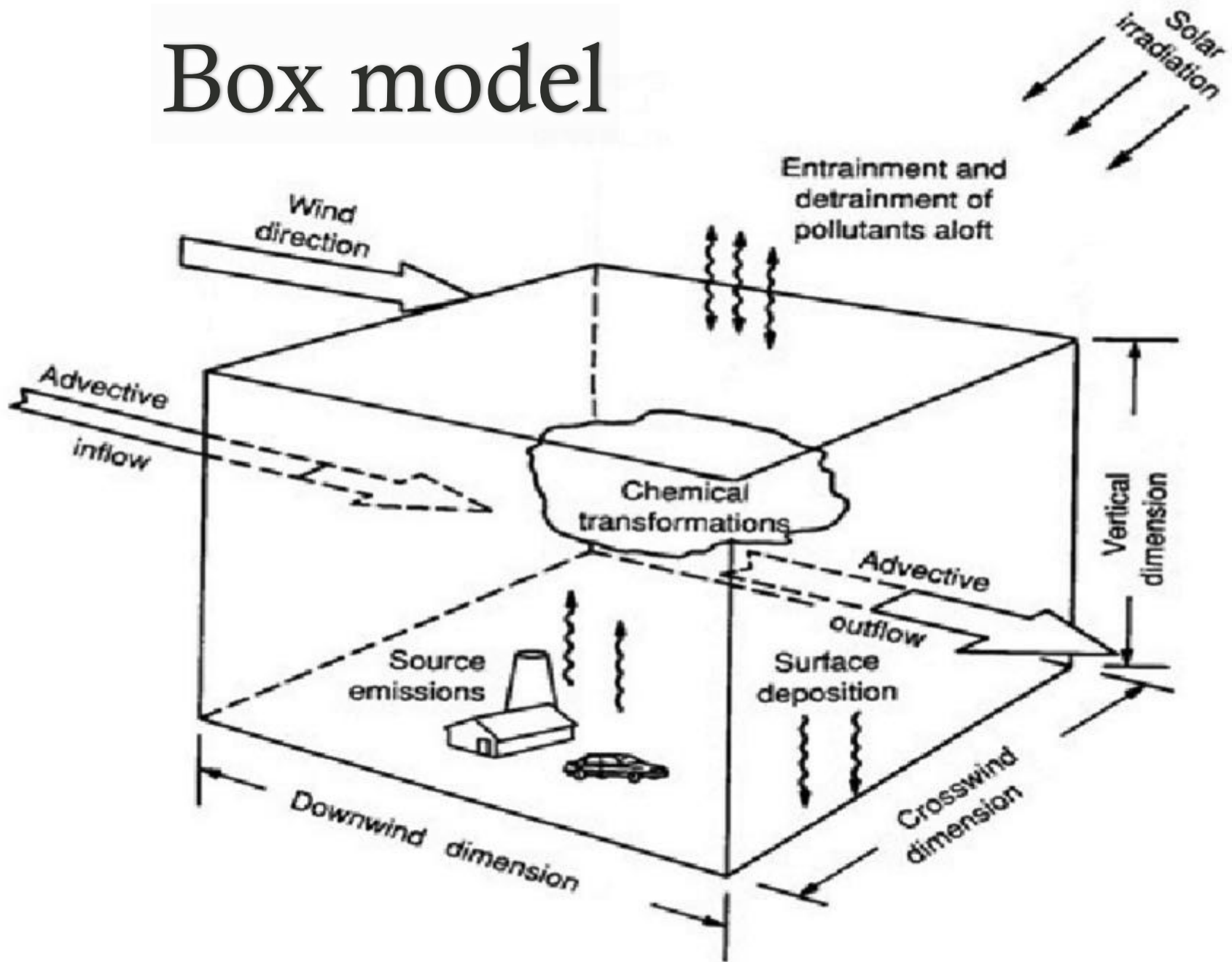
Mistura uniforme instantânea

Exemplos de alguns modelos de dispersão:

ADMS3
AERMOD
CALPUFF
DISPERSION21
ISC3
MERCURE
PUFF-PLUME
SIRANE
HYSPLIT
STILT
FLEXPART

...

Box model

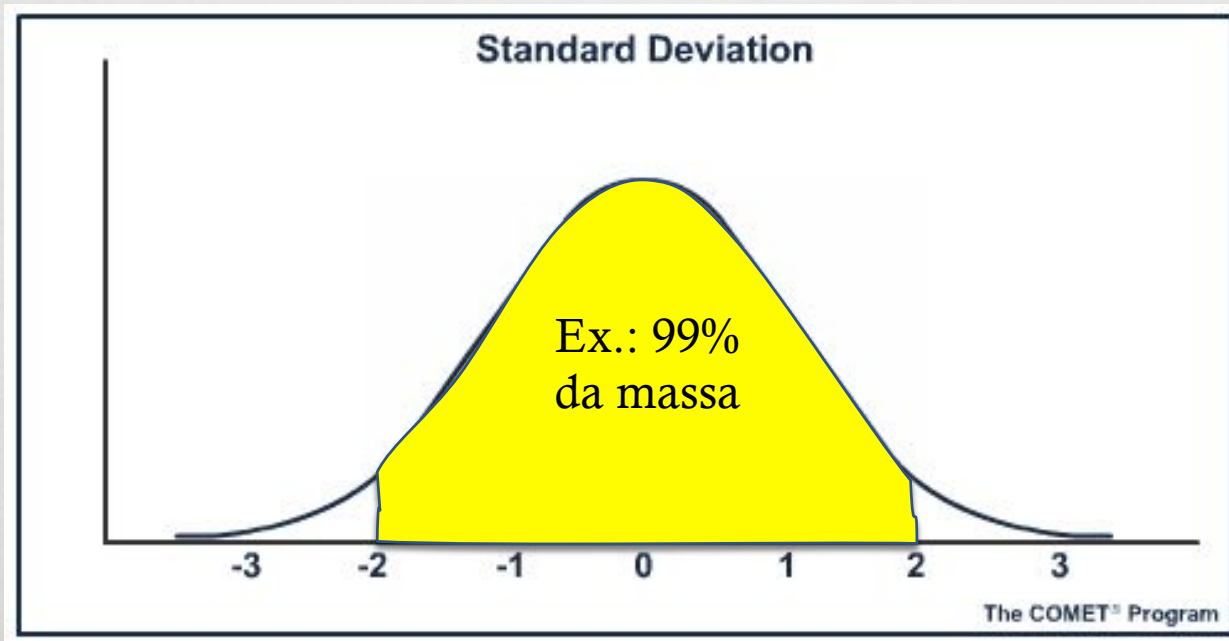


A TYPICAL FIXED BOX MODEL

Pluma Gaussiana



- É uma aproximação simples para o processo de dispersão (válido para $t \gg t_0$)



Pluma Gaussiana



- ✧ É preciso conhecer a capacidade de dispersão da atmosfera!
- ✧ Método 1: medir σ_{θ} e σ_w



Pasquill turbulence types

When No σ_θ or σ_w Is Available

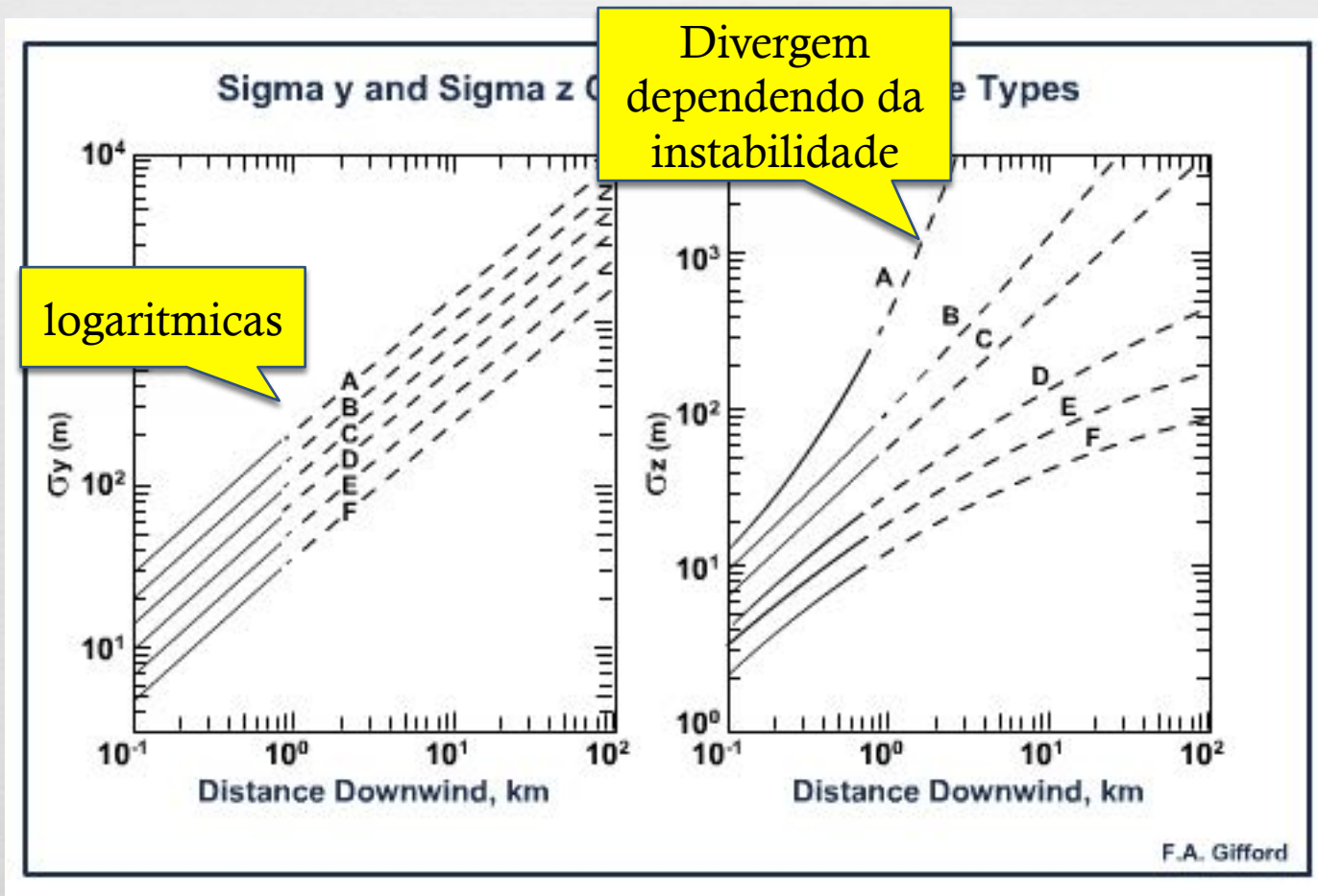
Meteorological Conditions Defining Pasquill Turbulence Types*				Formulas Recommended by Briggs (1973) for $\sigma_y(x)$ and $\sigma_z(x)$ ($10^2 < x < 10^4$ m)				
A: Extremely unstable conditions B: Moderately unstable conditions C: Slightly unstable conditions D: Neutral conditions [†] E: Slightly stable conditions F: Moderately stable conditions				Pasquill type	σ_y, m	σ_z, m		
Open-Country Conditions								
Surface wind speed, m/sec < 2 2-3 3-5 5-6 > 6				Daytime insolation				
				Strong Moderate Slight				
				A	A-B	B		
				A-B	B	C		
				B	B-C	C		
				C	C-D	D		
Urban Conditions								
				A-B	$0.32x (1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x (1 + 0.001x)^{1/2}$		
				C	$0.22x (1 + 0.0004x)^{-1/2}$	0.20x		
				D	$0.16x (1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x (1 + 0.0003x)^{-1/2}$		
				E-F	$0.11x (1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x (1 + 0.00015x)^{-1/2}$		
Nighttime conditions [‡]								
Surface wind speed, m/sec		Thin overcast or $\geq 4/8$ low cloud	$\leq 3/8$ cloud					
2-3		E	F					
3-5		D	E					
5-6		D	D					
> 6		D	D					

*From F.A. Gifford, *Nuclear Safety*, 17(1):68-86 (1976).

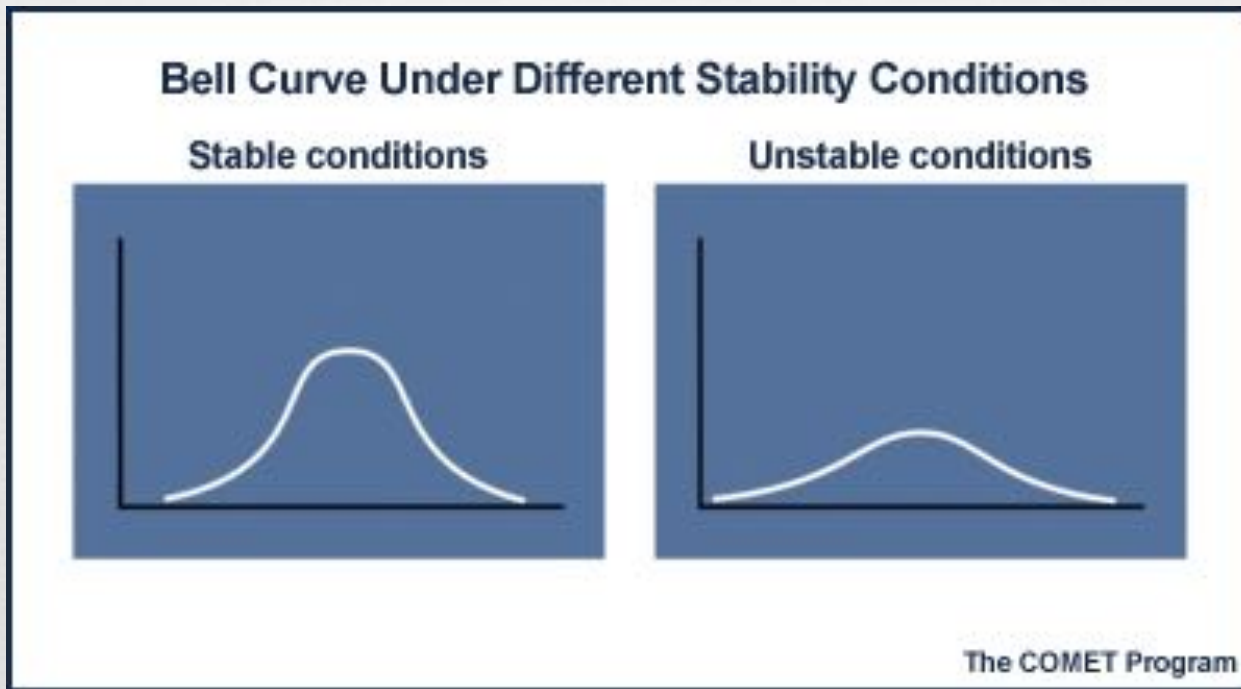
[†]Applicable to heavy overcast day or night.

[‡] The degree of cloudiness is defined as that fraction of the sky above the local apparent horizon that is covered by clouds.

Pasquill turbulence types

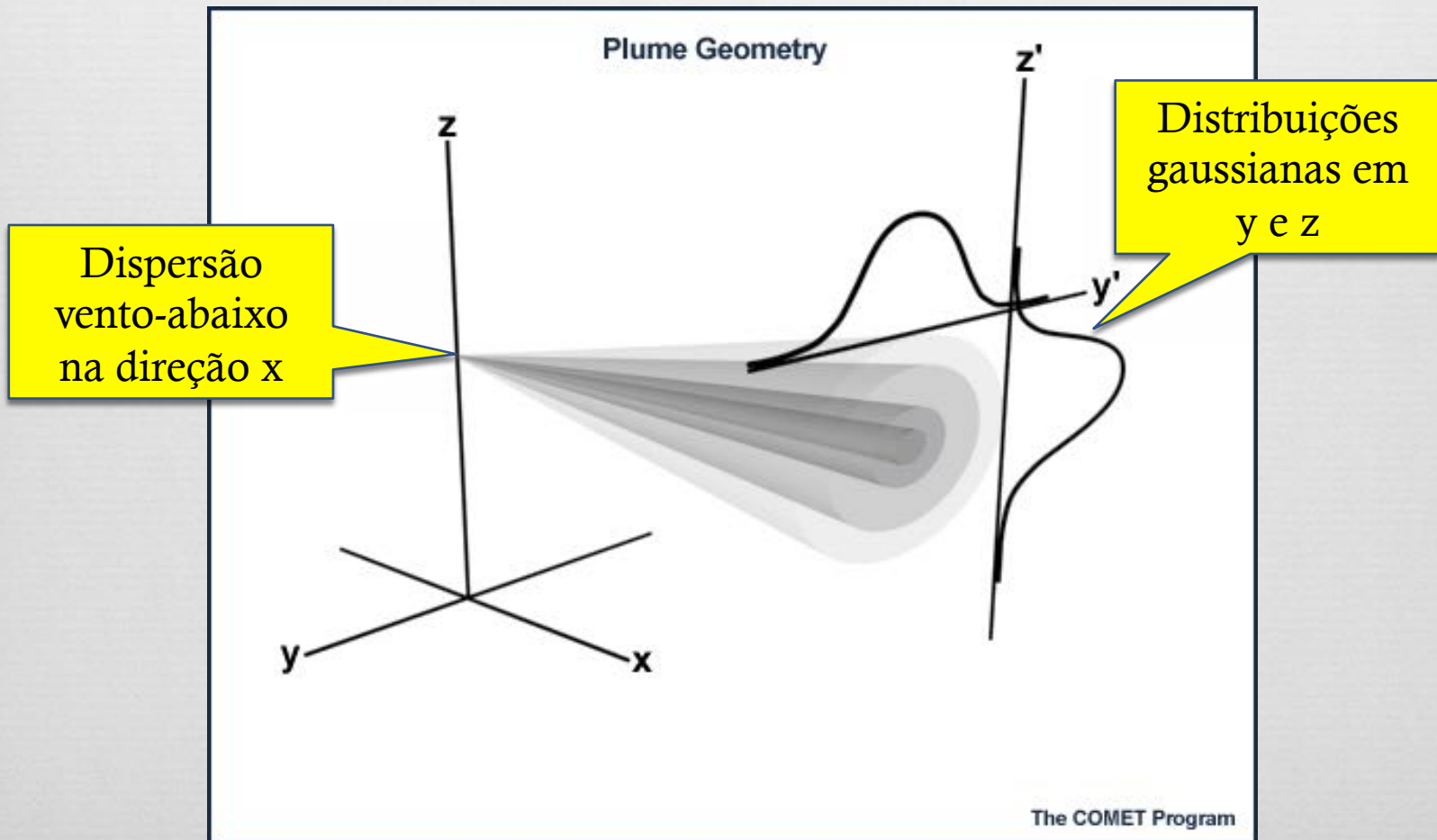


Pluma Gaussiana



- Além disso, a estabilidade suprime os movimentos verticais, mas não horizontais!

Geometria da pluma



Ex.: fonte pontual contínua



∞ Predição da concentração no centro da pluma

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}$$

C = concentration (g/m³) where:

Q = source strength (g/s)

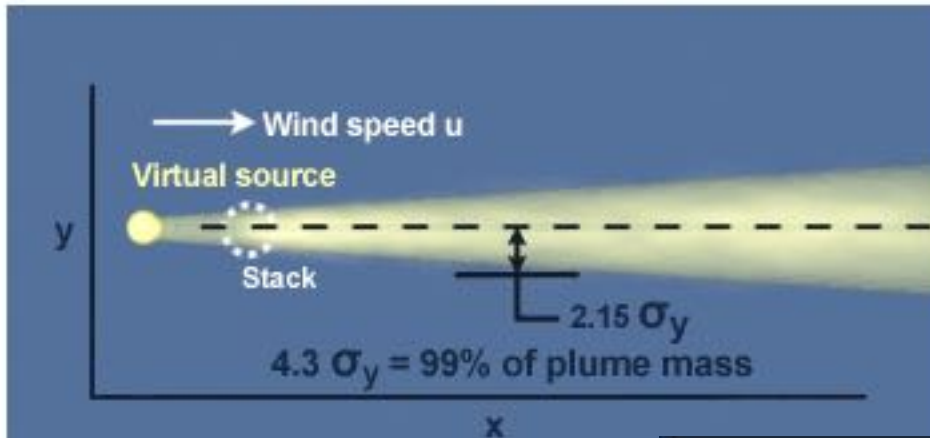
σ_y = standard deviation in the horizontal

σ_z = standard deviation in the vertical

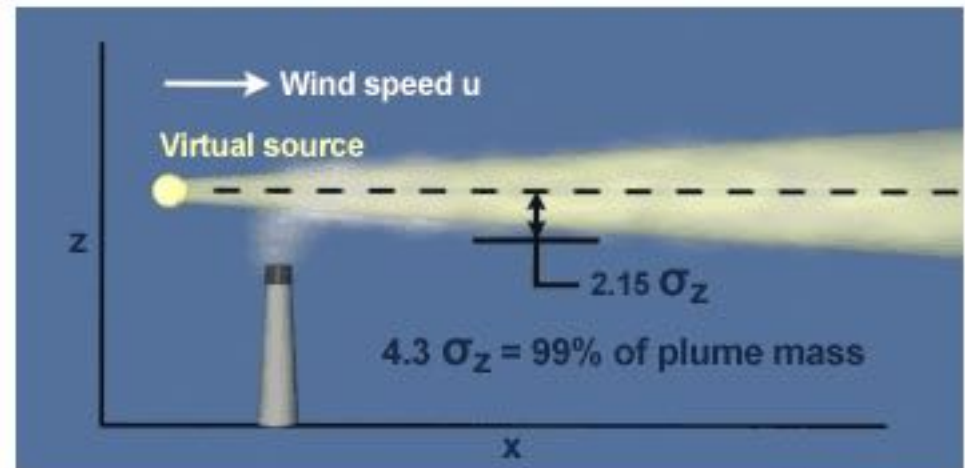
u = wind speed (m/s)

Geometria da pluma

Sigma y and Plume Mass



Sigma z and Plume Mass



Ex.: fonte pontual contínua



- ∞ $Q = 100 \text{ g/s}$ de SO_2
- ∞ $U = 10 \text{ m/s}$ e insolação moderada (Pasquill=>D)
- ∞ 1km vento abaixo, teremos (no centro da pluma):
 - ∞ $\sigma_y = 76\text{m}$
 - ∞ $\sigma_z = 38\text{m}$

$$C = \frac{100\text{g/s}}{2\pi \cdot 76\text{m} \cdot 38\text{m} \cdot 10\text{m/s}} = .00055\text{g/m}^3 \text{ of } \text{SO}_2$$

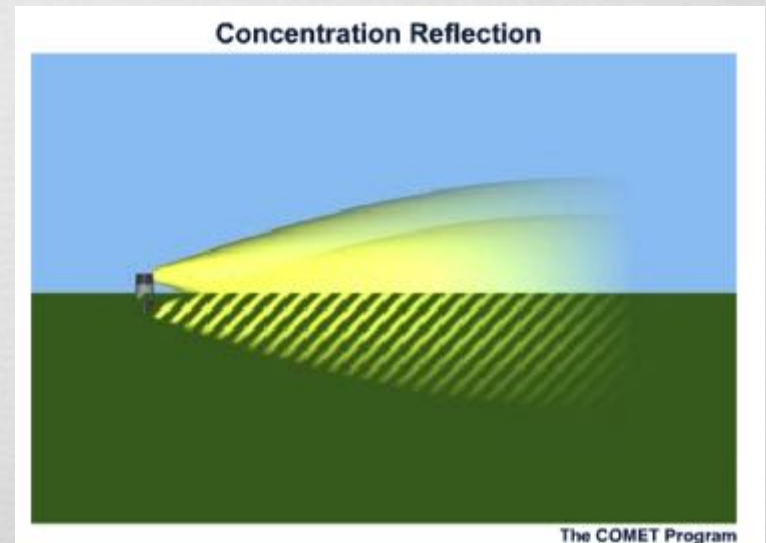
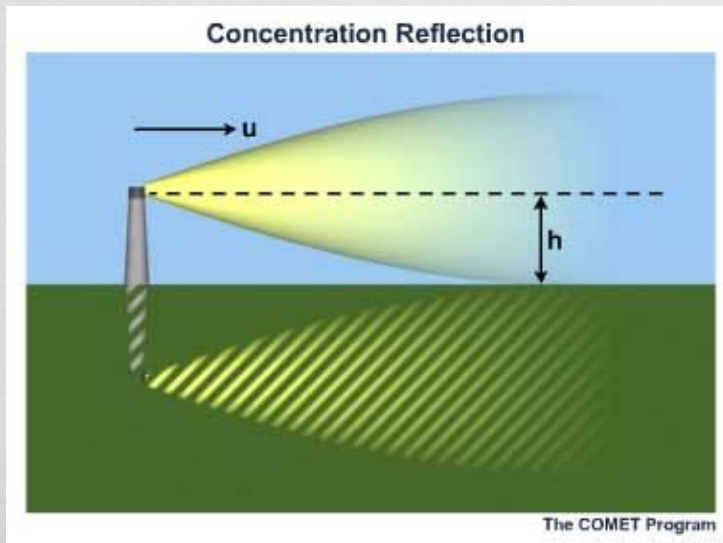
or 0.21 ppm (0.5 ppm is 3-hr standard)

Ex.: fonte pontual contínua

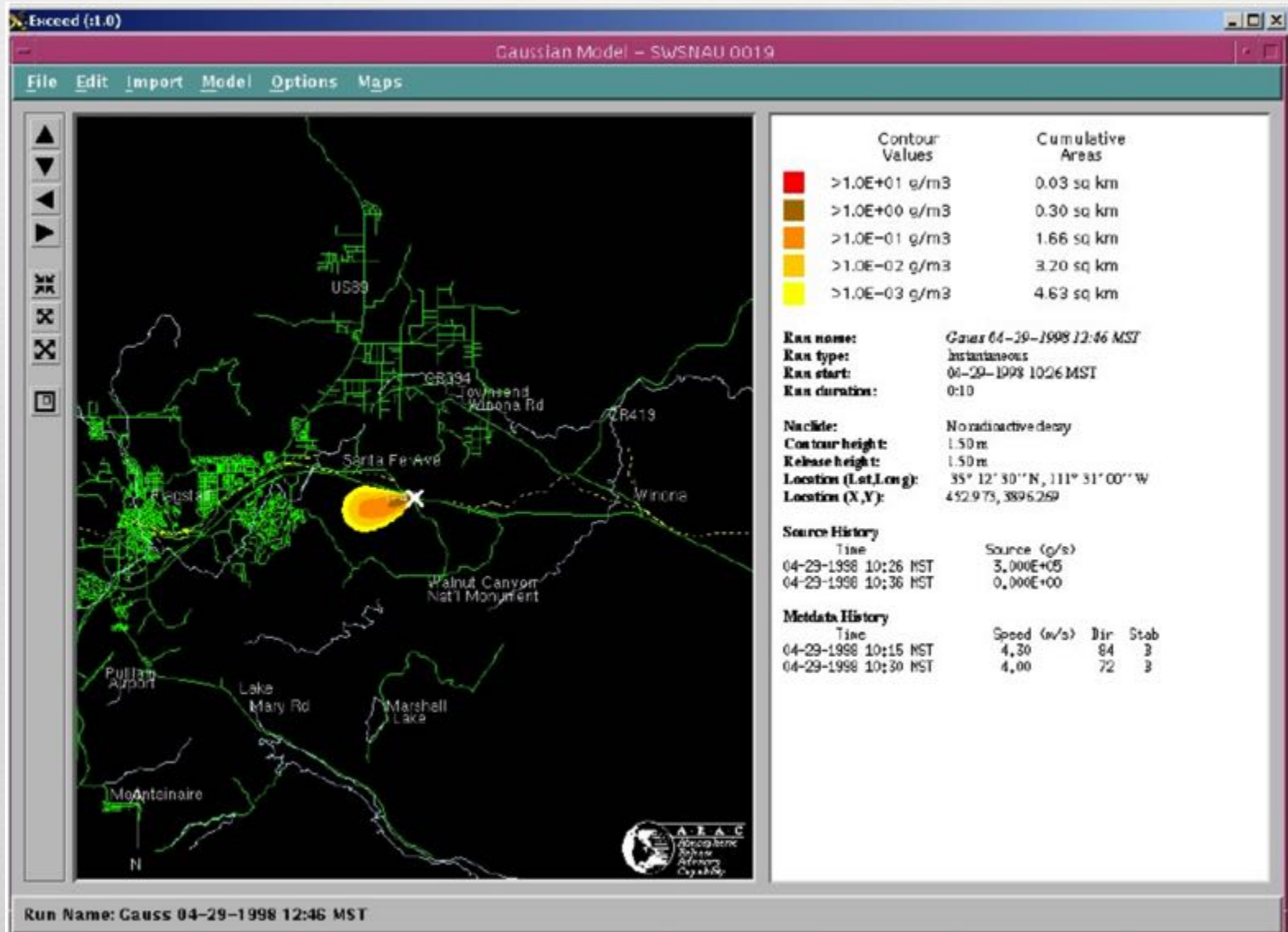


☞ Fora do centro da pluma, temos a equações completa:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left[\exp\left\{\frac{-(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{\frac{-(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right]$$



Ex.: software Screen3



a1. Particle count



Google earth

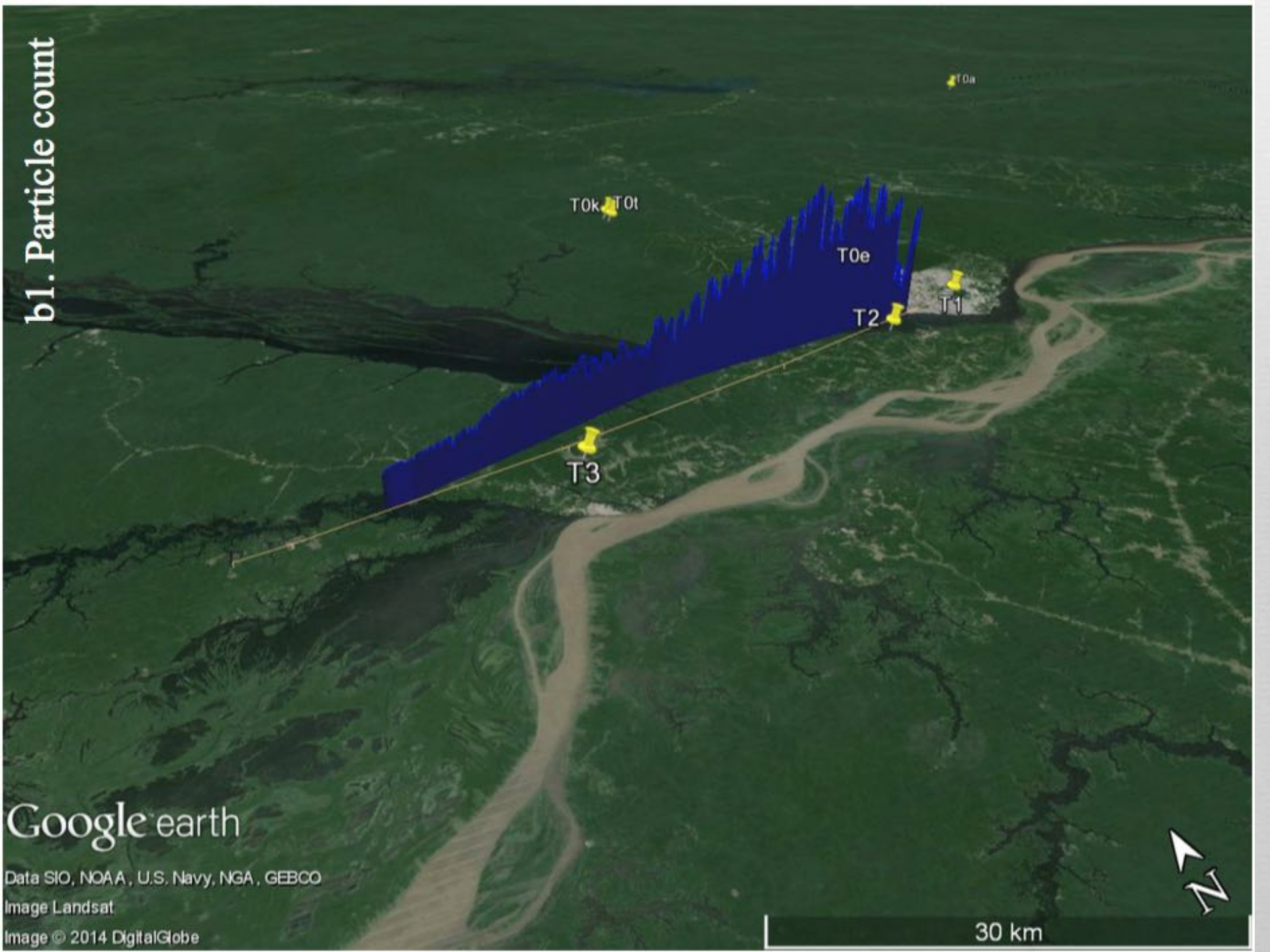
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Image Landsat

Image © 2014 DigitalGlobe



b1. Particle count



Google earth

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Image Landsat

Image © 2014 DigitalGlobe

30 km

Pluma Gaussiana



Hipóteses:

- ↻ É uma solução idealizada
- ↻ Mais estabilidade => maiores concentrações
- ↻ Menor estabilidade => menores concentrações
- ↻ Concentrações $\sim 1/\text{vento}$

Falha quando:

- ↻ Dispersão em longas distâncias

Transporte dos Gradientes



∞ Equação de conservação:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (N\mathbf{V}) - D\nabla^2 N = 0$$

Advecção

Difusão molecular

∞ Decompondo:

$$\chi = \bar{\chi} + \chi' \text{ e } \mathbf{V} = \bar{\mathbf{V}} + \mathbf{V}'$$

Transporte dos Gradientes



∞ Chegamos em:

Difusão turbulenta

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\bar{N}\mathbf{V}) - D\nabla^2 \bar{N} = -\nabla \cdot \overline{N'\mathbf{V}'}$$

∞ Em primeira ordem, a turbulência causa um transporte parecido com difusão molecular. Pela lei de Fick:

$$\nabla \cdot \overline{N'\mathbf{V}'} = \mathbf{K}\nabla \bar{N}$$

∞ Um modelo numérico então resolve a eq completa.

Turbulência seca

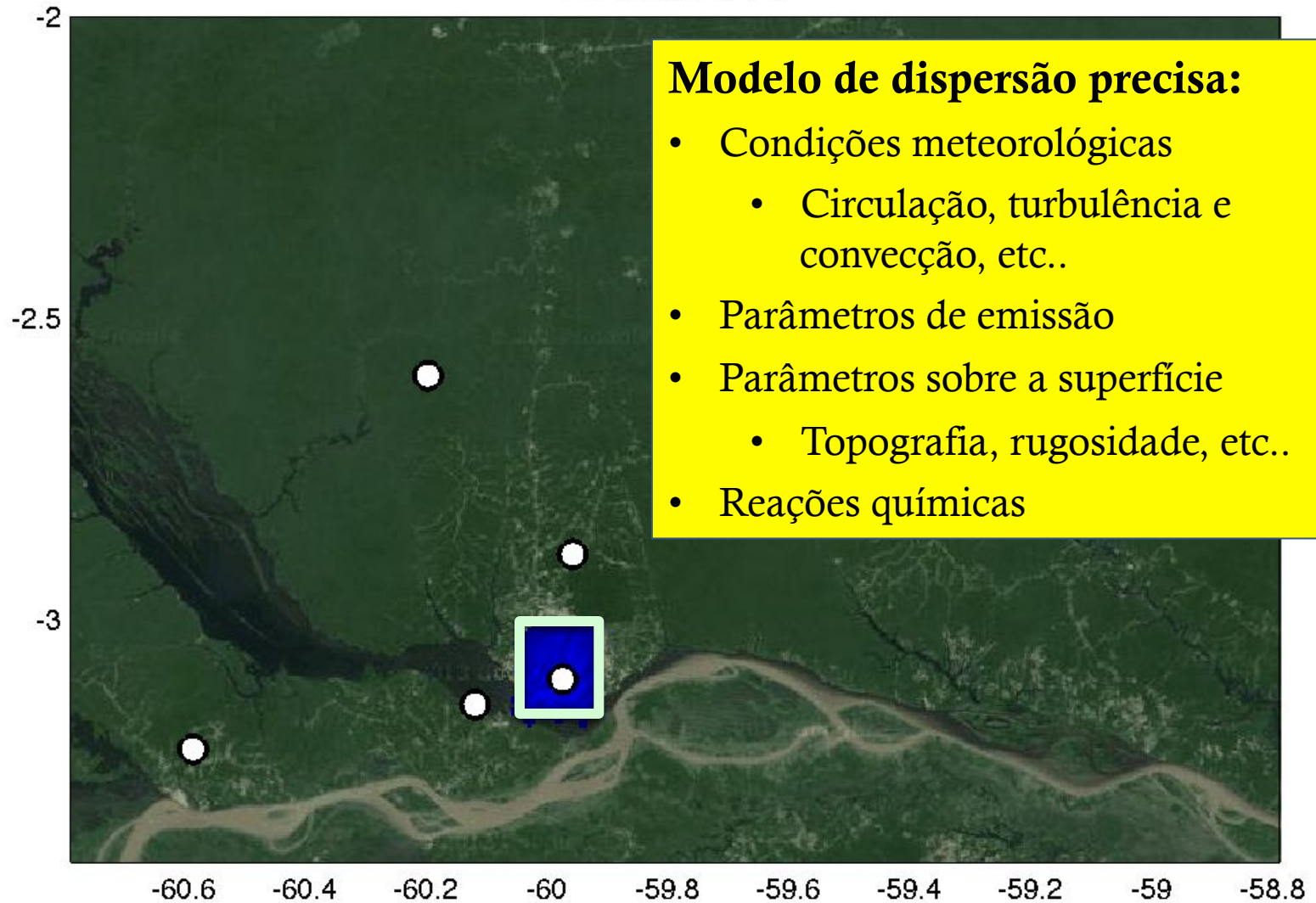


- ∞ Este método é utilizado tanto em modelos numéricos de dispersão de pluma:
 - ∞ Hysplit
 - ∞ Flexpart
 - ∞ STILT

- ∞ Quanto em modelos de previsão de tempo e clima!

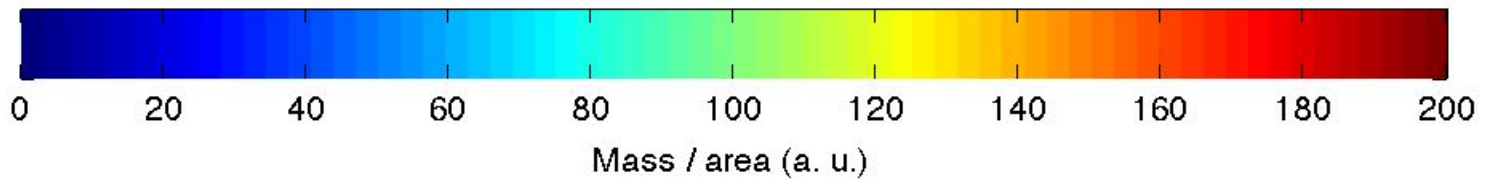
29-Jan-2014

WRF @ USP, Grid d04, Resol. 0.7 km
flexpart/continous/fwd/d04/

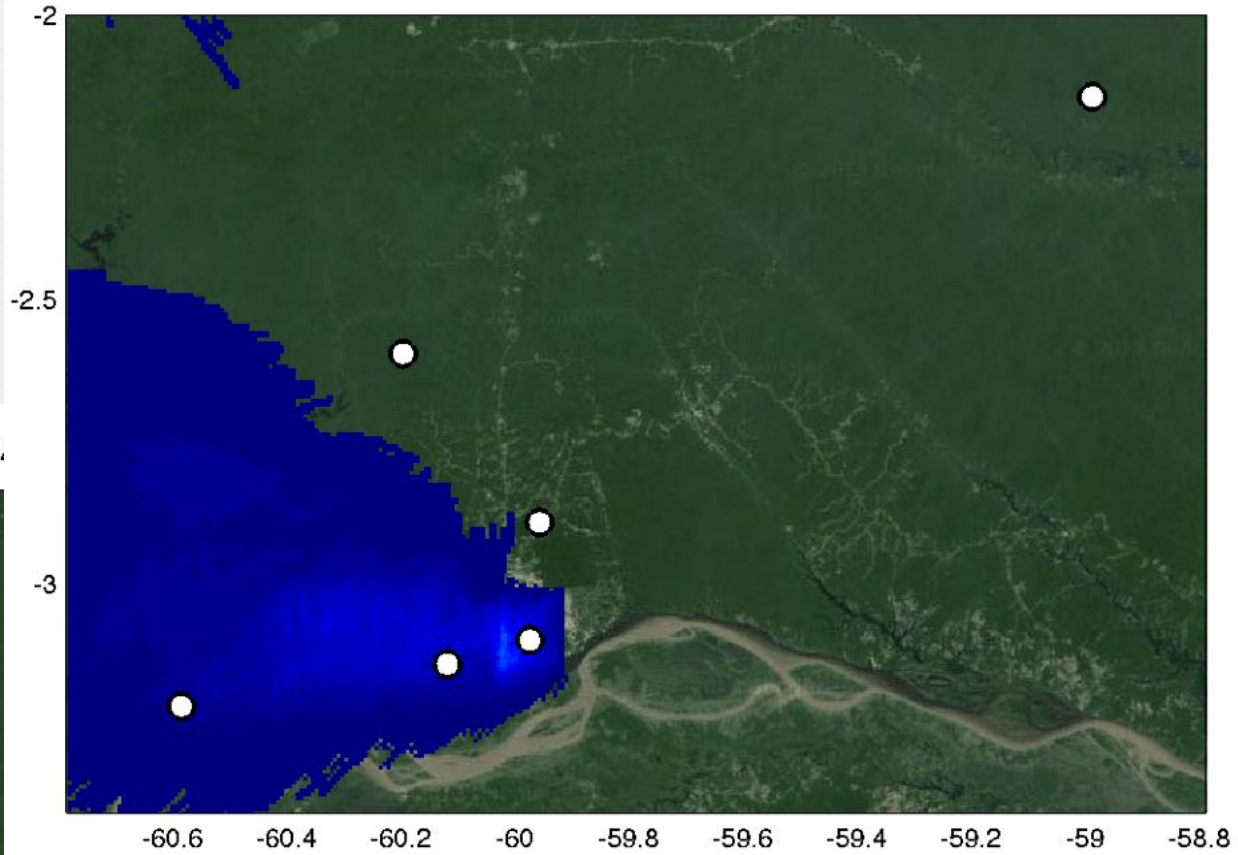


Modelo de dispersão precisa:

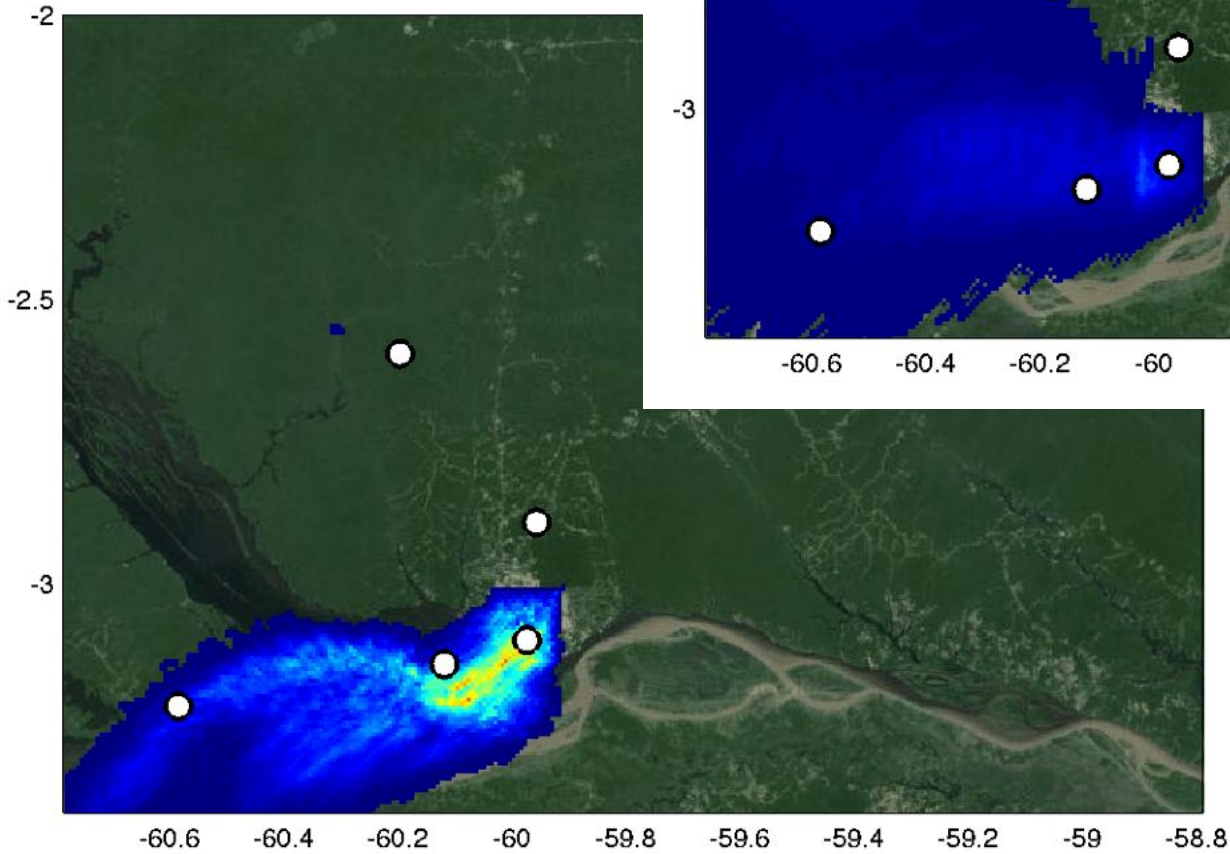
- Condições meteorológicas
 - Circulação, turbulência e convecção, etc..
- Parâmetros de emissão
- Parâmetros sobre a superfície
 - Topografia, rugosidade, etc..
- Reações químicas



25-Feb-2014 15:30:00

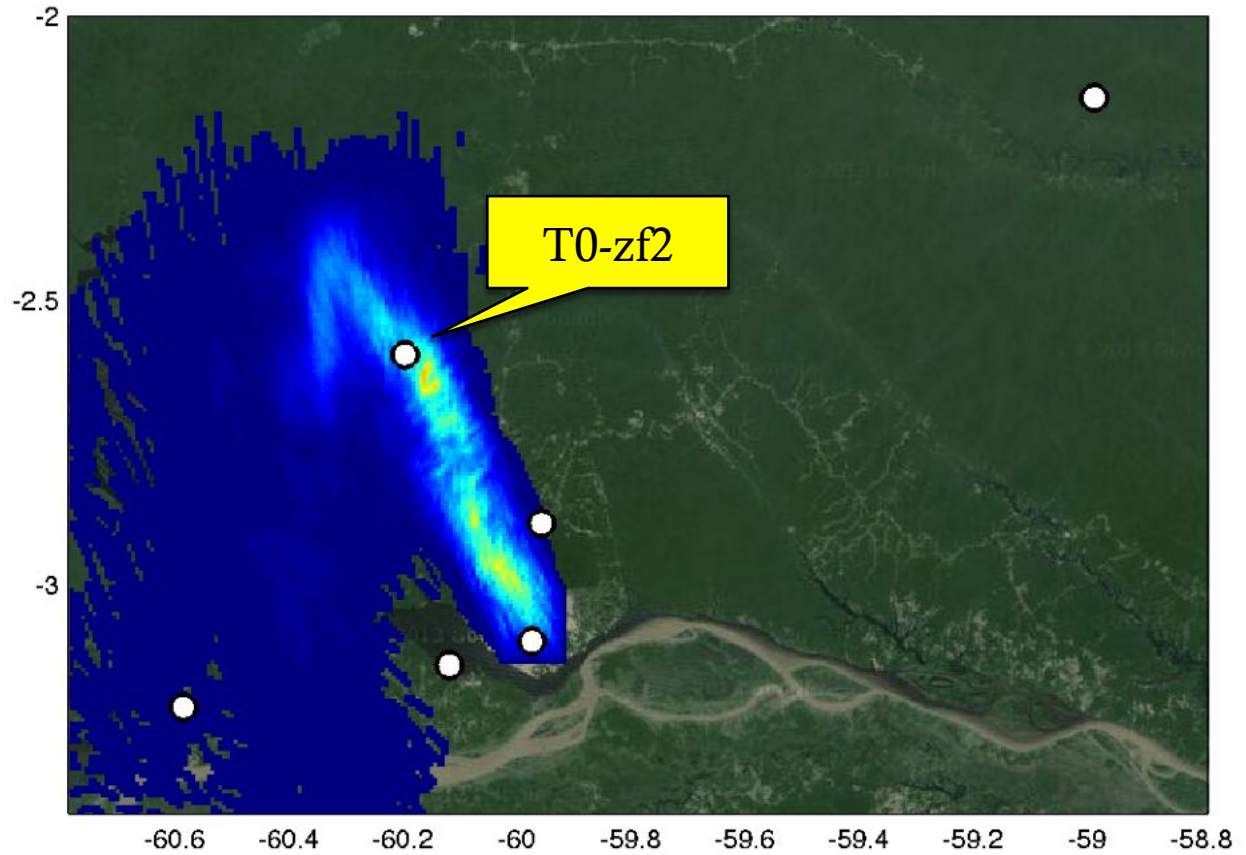


28-Feb-2014

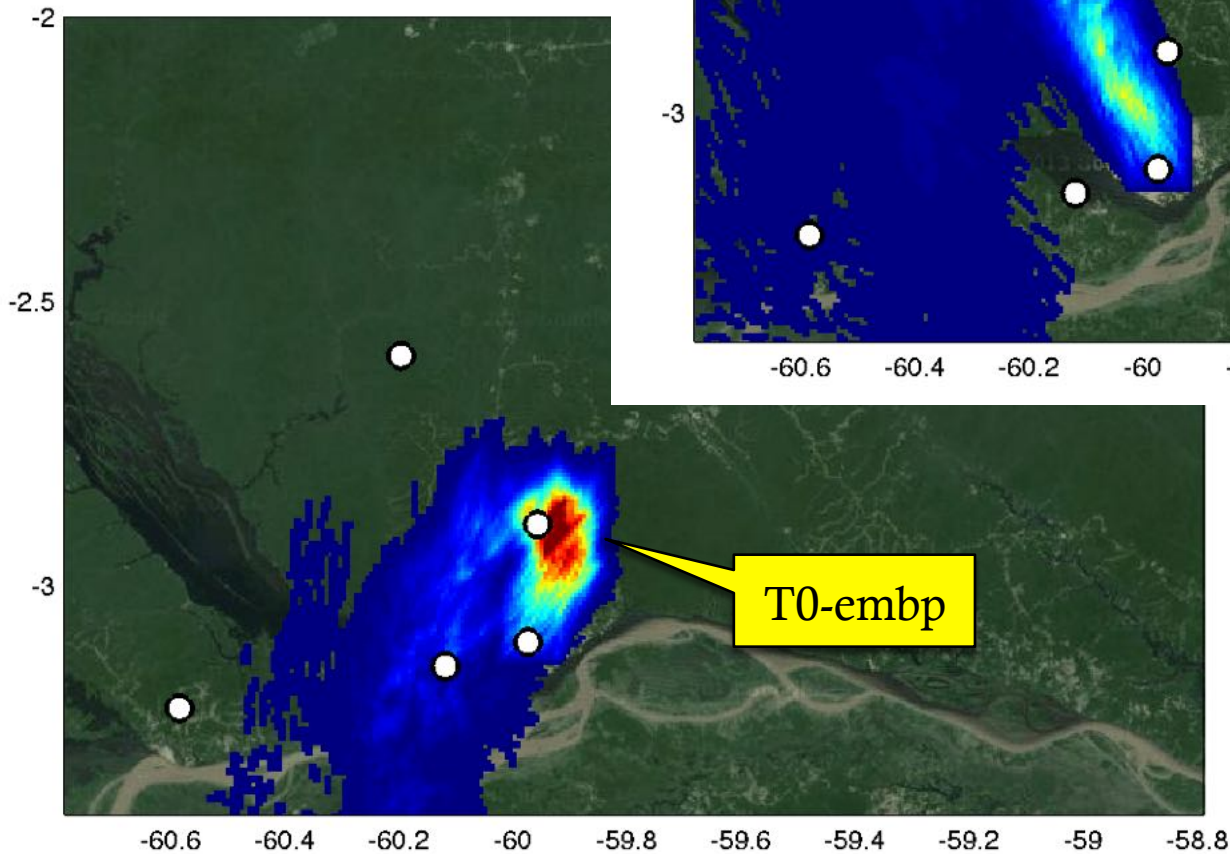


Plume going forward is **diluted!**

30-Jan-2014 08:00:00



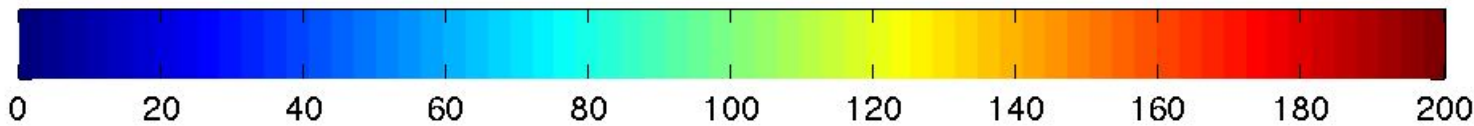
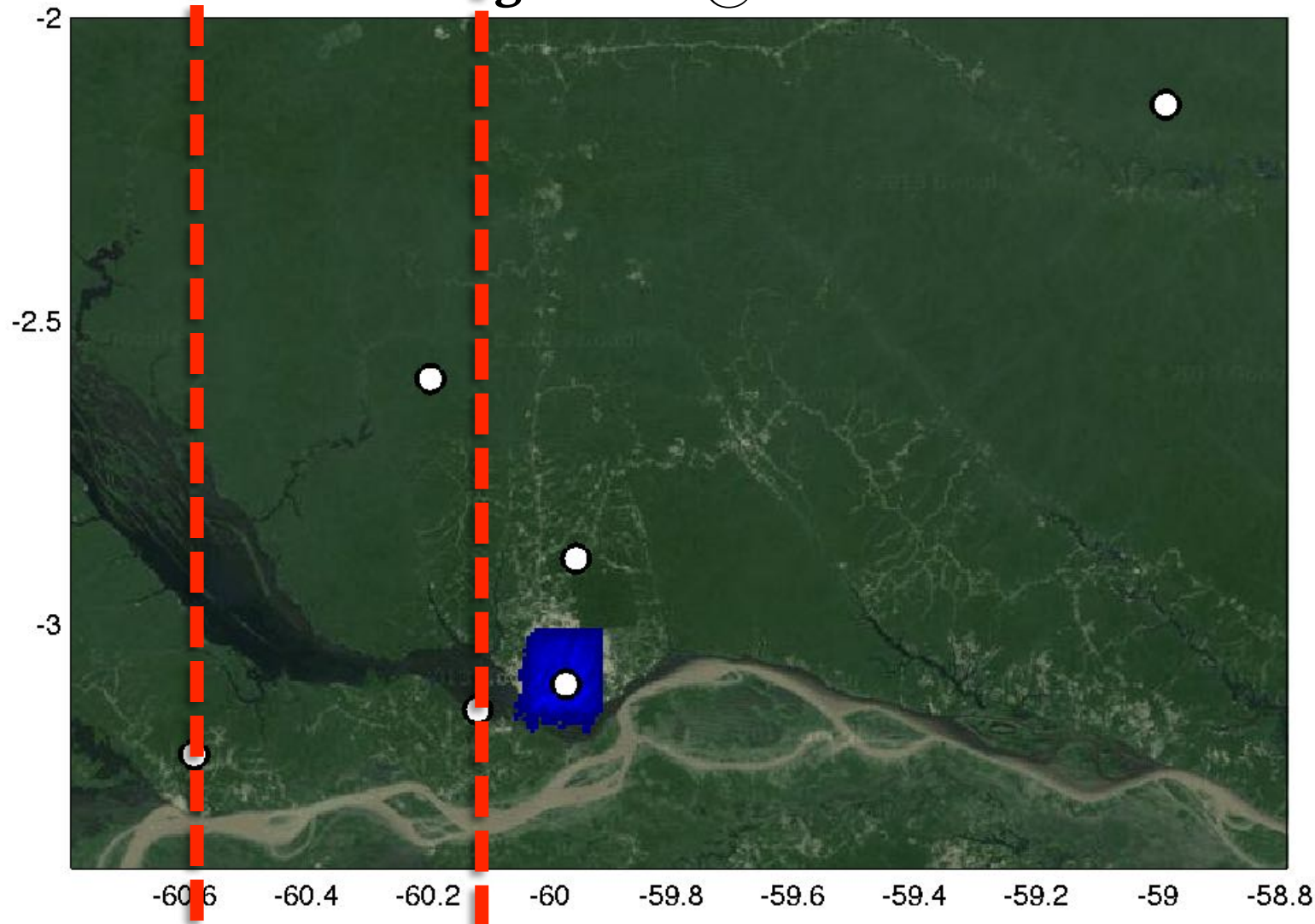
03-Feb-2014



Plume going
backwards is
concentrated!

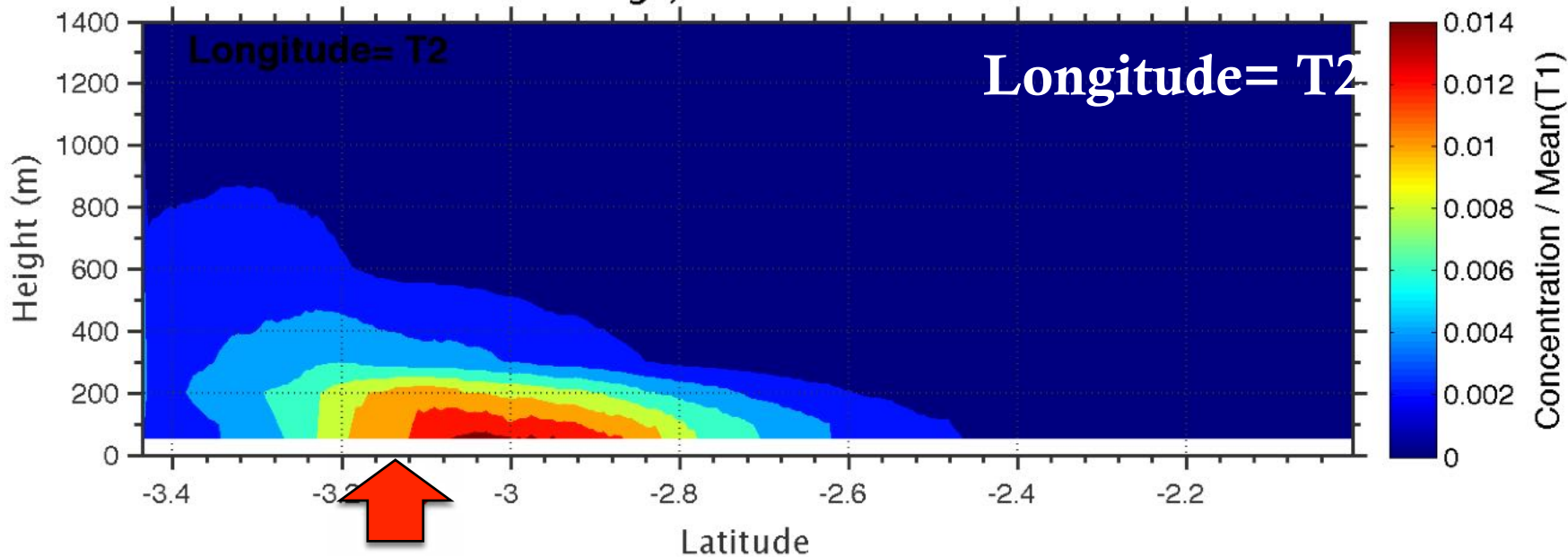
WRF @ USP, Grid d04, Resol. 0.7 km
flexpart/continous/fwd/d04/

Average IOP1 @ 10km

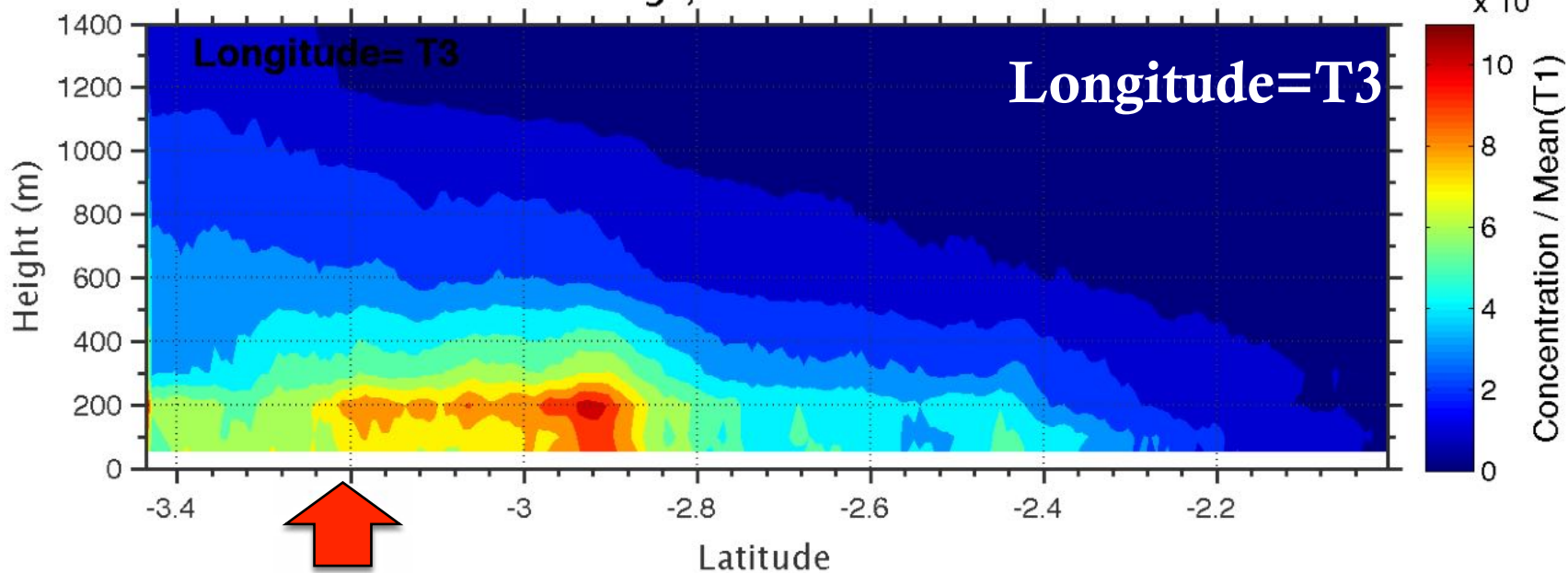


Log10 (Normalized Concentration)

IOP1 Average, Crosssection over T3



IOP1 Average, Crosssection over T3



Também importante:



- ∞ Transporte por convecção
- ∞ Remoção úmida (partículas) por precipitação
- ∞ Remoção seca por deposição na superfície
- ∞ Terreno

