

Fundamentos da Dispersão Atmosférica

Professor:
Neyval Costa Reis Jr.



Departamento de
Engenharia Ambiental
Centro Tecnológico
UFES

Fundamentos da Dispersão Atmosférica

- **Ementa:** Micrometeorologia. Teorias da difusão de contaminantes na atmosfera. Modelagens da dispersão atmosférica de contaminantes: modelos gaussianos, estatísticos e de equações de fundamentais de transporte. Mecanismos de remoção de contaminantes. Dispersão de contaminantes em longas distâncias. Dispersão de odores. Dispersão de contaminantes em terrenos de geometria complexa e em regiões costeiras.



Programa Detalhado

- Equação Governante do Transporte de Massa
- Micrometeorologia
 - Meteorologia local e global da poluição do ar
 - Estabilidade atmosférica
 - Campo de Vento e Perfis de Temperatura
 - Mecanismos de remoção e reações químicas dos contaminantes atmosféricos
- Principais Abordagens para Modelagem da Dispersão de Poluentes
 - Modelos Determinísticos vs. Estatísticos
 - Modelos Eulerianos vs. Modelos Lagrangeanos
 - Modelo de Caixa
 - Modelo Gaussiano
 - Modelos baseados nas equações de transporte
 - Modelos de Regressão e Séries Temporais
 - Modelo Receptor
- Aplicações
 - Modelos regulatórios - EPA
 - Dispersão de contaminantes em longas distâncias.
 - Dispersão de odores.
 - Dispersão de contaminantes em terrenos de geometria complexa e em regiões costeiras.

Equações governantes

Para estudar a dispersão de uma espécie química (substância), a equação geral de conservação de massa da substância é descrita a seguir.

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \omega}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \omega}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \omega}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_x \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_y \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_z \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] + S$$

... os coeficientes de difusão turbulenta K

É necessário conhecer o campo de velocidades (u, v, w) e ...

Equações governantes

Para estudar a dispersão de uma espécie química (substância), a equação geral de conservação de massa da substância é descrita a seguir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] + S$$

$C = \rho \omega$
Massa de contaminante por volume da mistura

Parte I

Fenômenos de Transporte na Atmosféra



Transporte de contaminantes na baixa atmosfera

Convecção

(campo de ventos)

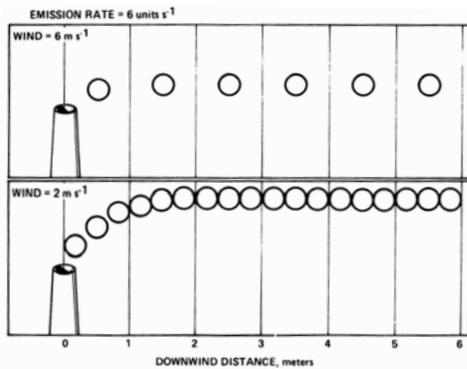
+

Difusão

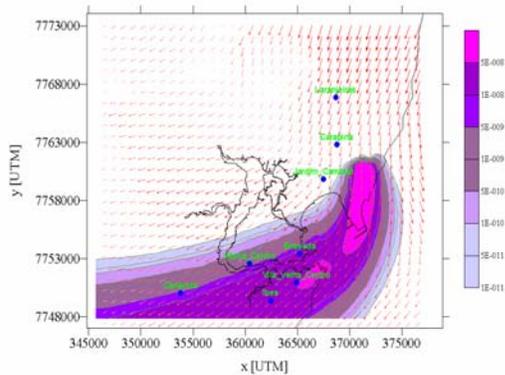
(Turbulência)

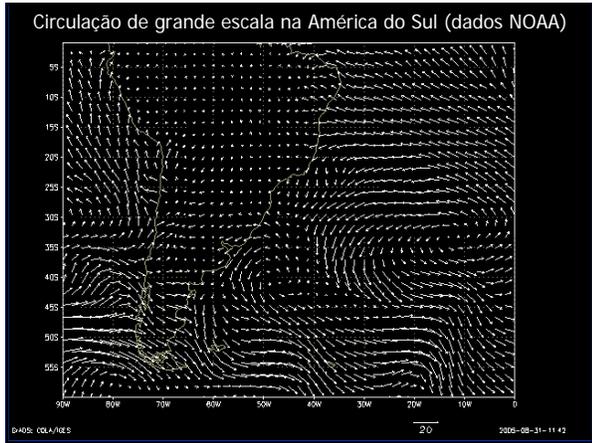


Efeito da Velocidade do Vento (convecção)



Efeito da Velocidade do Vento (convecção)





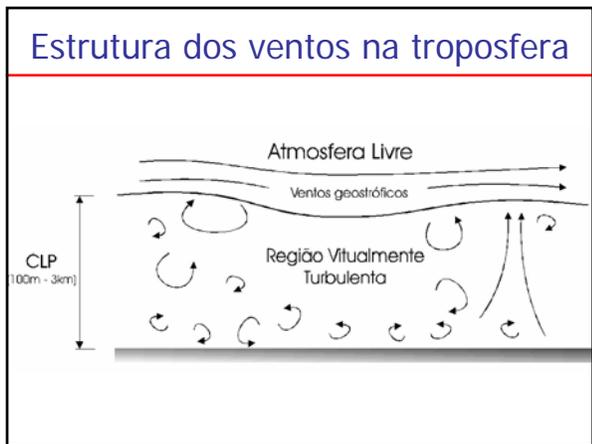
Transporte de contaminantes na baixa atmosfera

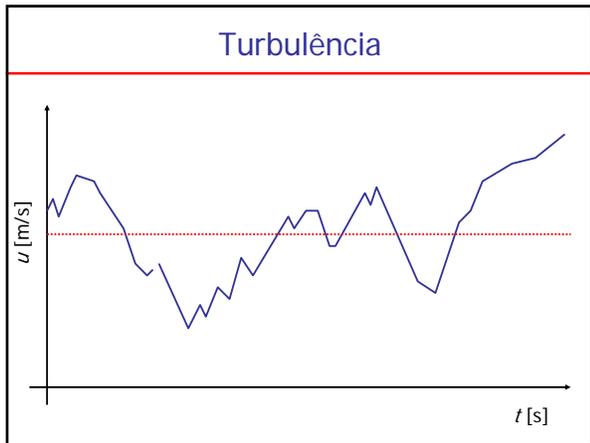
Convecção
(campo de ventos)

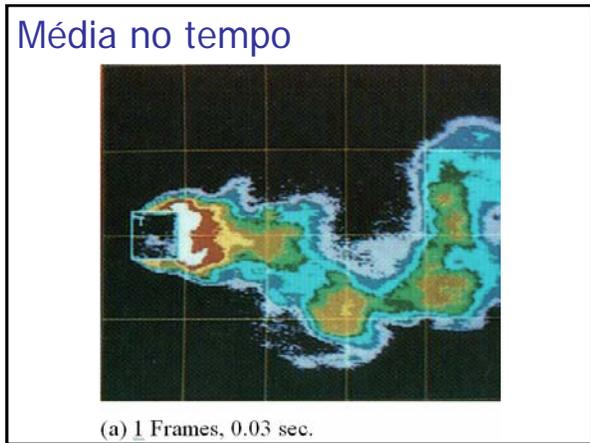
+

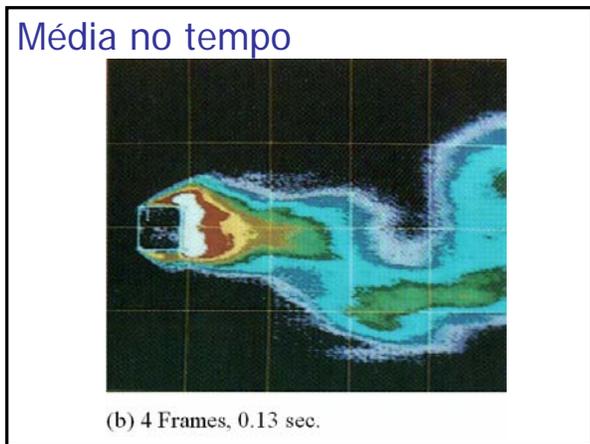
Difusão
(Turbulência)

UFES

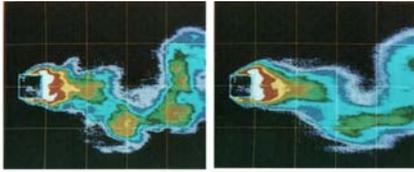






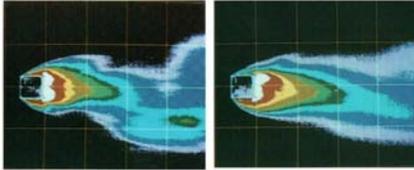


Média no tempo



(a) 1 Frames, 0.03 sec.

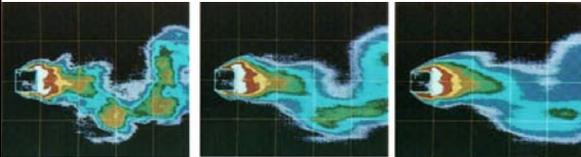
(b) 4 Frames, 0.13 sec.



(c) 8 Frames, 0.27 sec.

(d) 30 Frames, 1.0 sec.

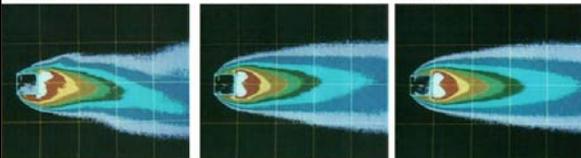
Média no tempo



(a) 1 Frames, 0.03 sec.

(b) 4 Frames, 0.13 sec.

(c) 8 Frames, 0.27 sec.

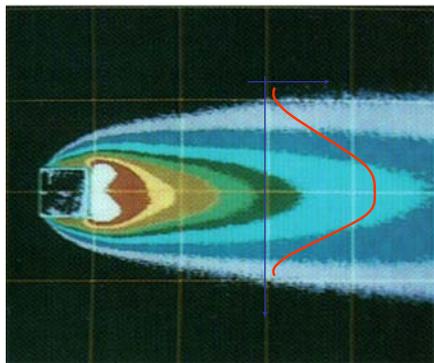


(d) 30 Frames, 1.0 sec.

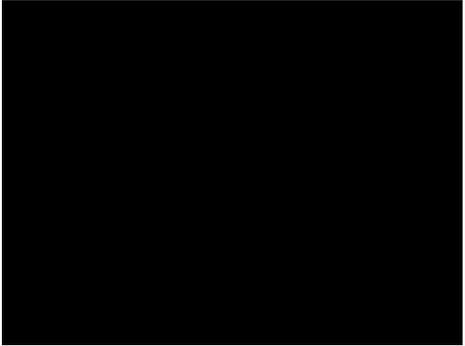
(e) 120 Frames, 4.0 sec.

(f) 450 Frames, 15.0 sec.

Média no tempo



Turbulência atmosférica




Turbulência na atmosfera

- Os mecanismos de transporte na atmosfera são dominados pela turbulência.
- Os efeitos de difusão molecular são bastante pequenos quando comparados aos efeitos da difusão turbulenta.

$D_{lam} \ll D_{turb}$

 → Frequentemente os coeficientes de difusão turbulenta são 3 a 4 ordens de grandeza maiores que os laminares.

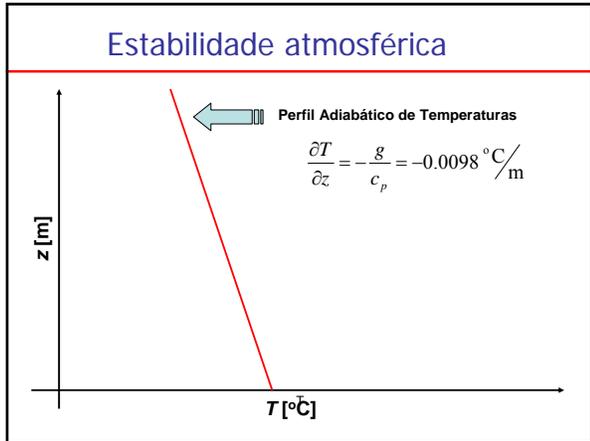
- Assim, as equações governantes devem ser reescritas incluindo os coeficientes de difusão turbulenta. Além disso, é possível negligenciar os efeitos da difusão molecular.

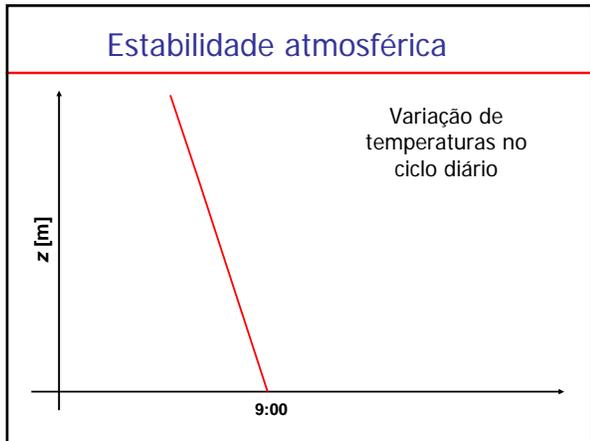


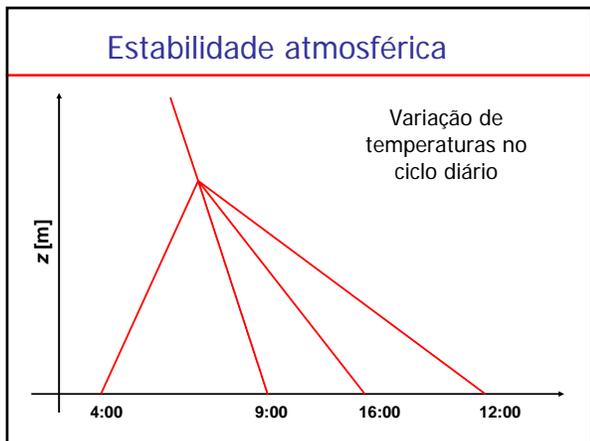
Turbulência na atmosfera

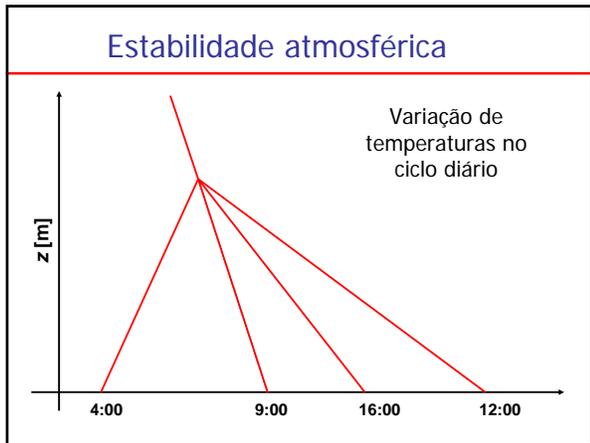
- A intensidade de Turbulência na atmosfera é fortemente ligada a estratificação vertical de temperaturas (densidade).
- O perfil vertical de temperaturas pode agir **suprimindo** ou **ampliando** os movimentos turbulentos, este efeito é chamado **Estabilidade Atmosférica**.

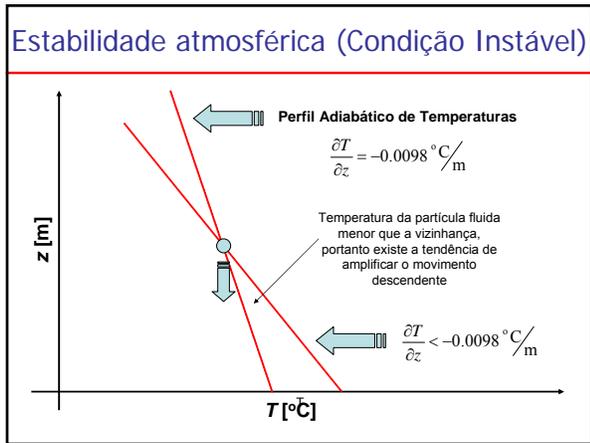


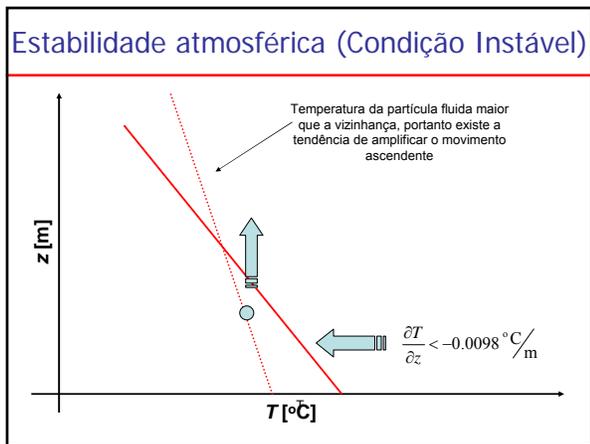




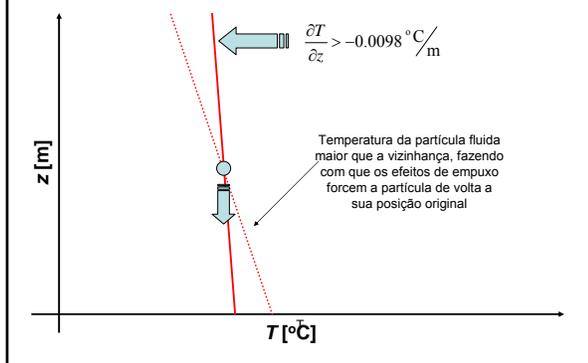




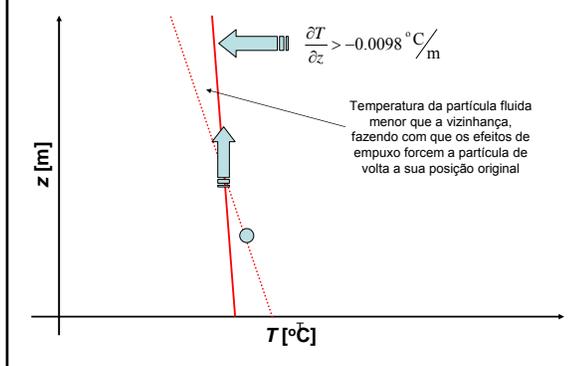


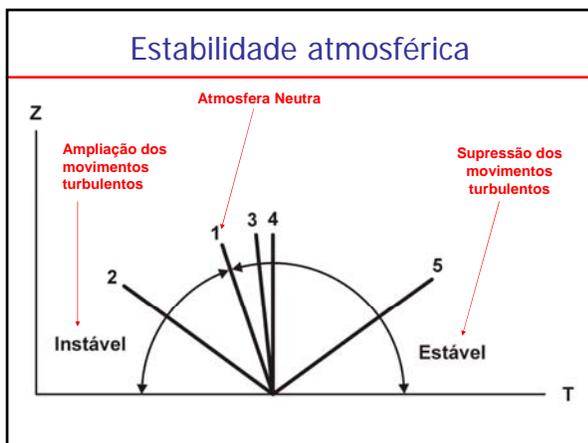


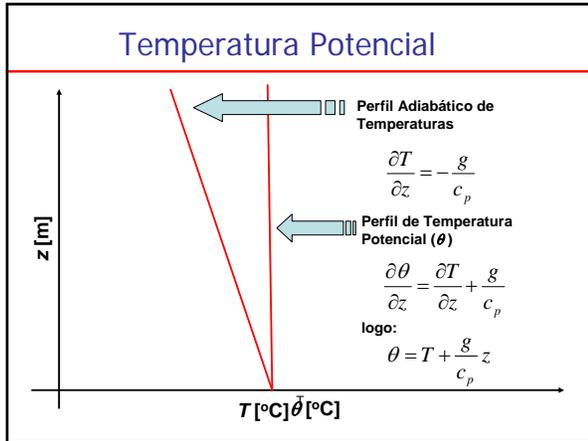
Estabilidade atmosférica (Condição Estável)

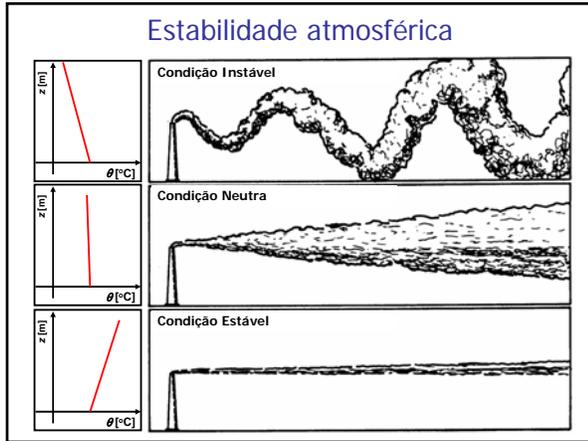


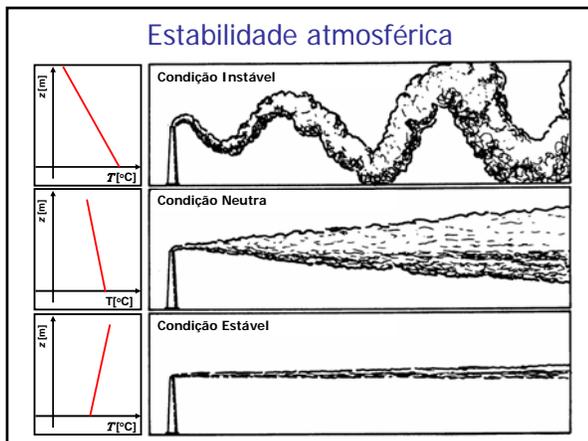
Estabilidade atmosférica (Condição Estável)

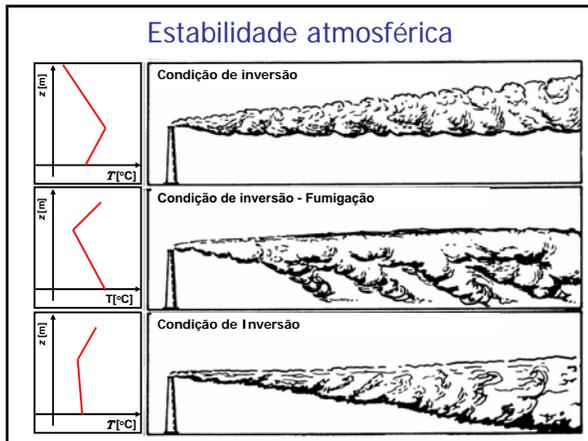


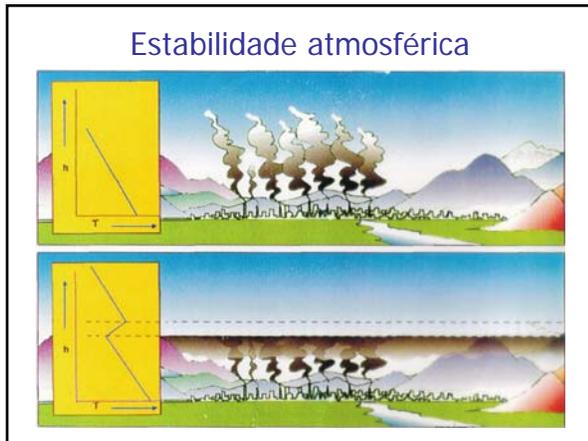


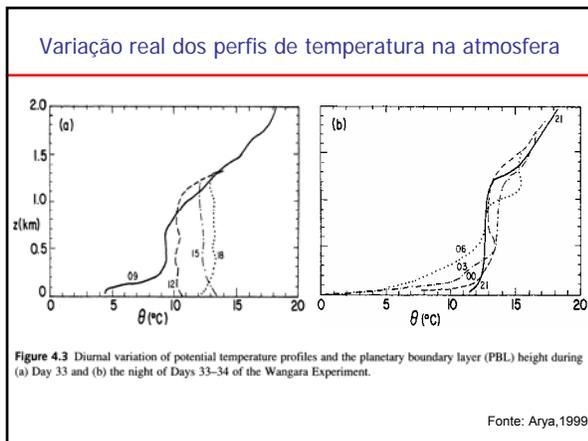


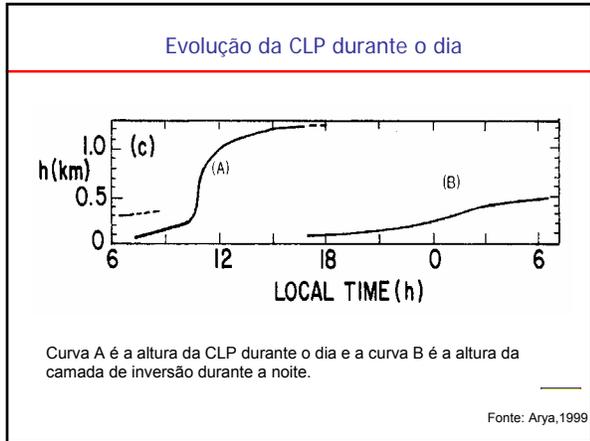


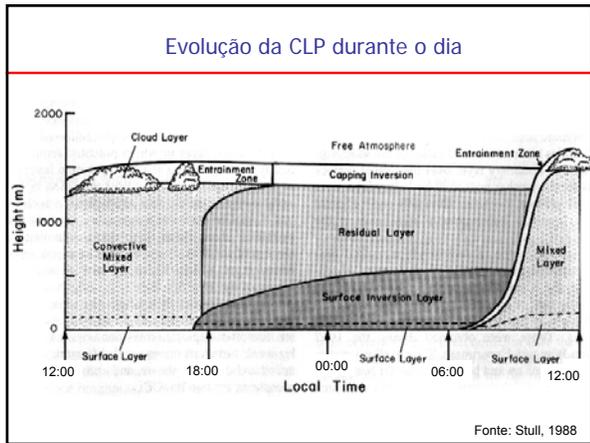


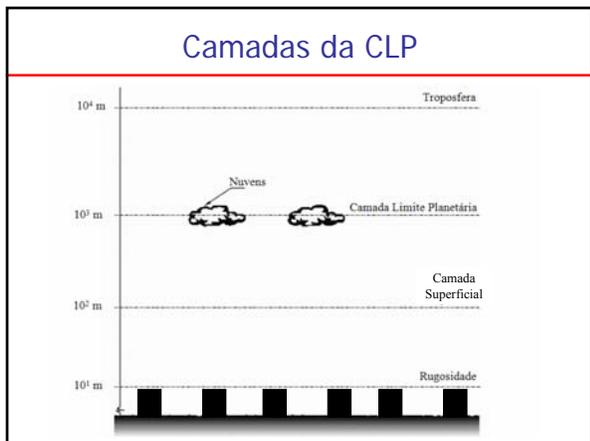


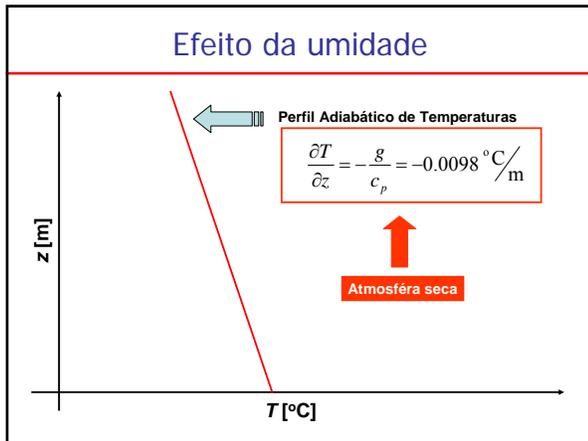












Efeito da umidade

Equação de estado do gás ideal ← $P = R\rho T = \left(\frac{R^*}{m}\right)\rho T$

Umidade específica ← $Q = \frac{M_{\text{vapor_d'agua}}}{M_{\text{vapor_d'agua}} + M_{\text{ar_seco}}}$

$$Q = \frac{m_{\text{vapor_d'agua}}}{m_{\text{ar_seco}}} \frac{P_{\text{vapor_d'agua}}}{P}$$

Massa molecular da água [g/mol] Massa molecular do ar seco [g/mol] Pressão parcial de vapor d'água

Efeito da umidade

Lei de Dalton ← $P = P_{\text{ar_seco}} + P_{\text{vapor_d'agua}}$

Combinando a lei de Dalton com a equação de estado de gases ideais

$$P = \left(\frac{R^*}{m_{\text{ar_seco}}}\right) \frac{M_{\text{ar_seco}}}{V} T + \left(\frac{R^*}{m_{\text{vapor_d'agua}}}\right) \frac{M_{\text{vapor_d'agua}}}{V} T$$

$$P = \left(\frac{R^*}{m_{\text{ar_seco}}}\right) \rho T \left[1 + \left(\frac{m_{\text{ar_seco}}}{m_{\text{vapor_d'agua}}} - 1\right) Q \right]$$

Efeito da umidade

$$P = \left(\frac{R^*}{m_{ar_seco}} \right) \rho T \left[1 + \left(\frac{m_{ar_seco}}{m_{vapor_d'agua}} - 1 \right) Q \right]$$

Correção na equação de estado para incorporar a umidade do ar

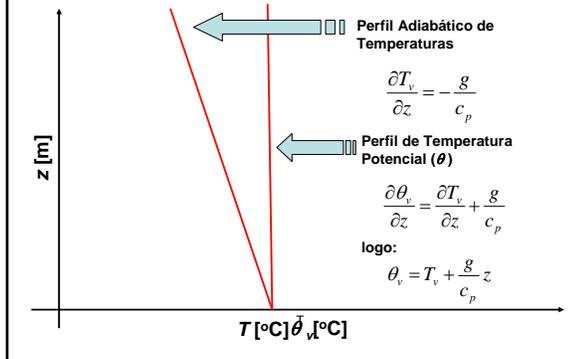
↓

$$P = \left(\frac{R^*}{m_{ar_seco}} \right) \rho T_v$$

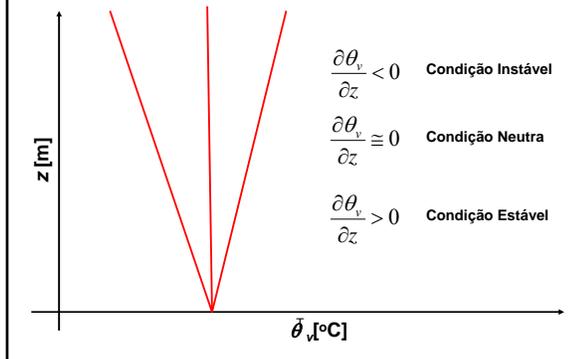
Temperatura virtual. É definida como a temperatura que o ar seco possuiria se estivesse à mesma pressão e densidade que o ar úmido.

$$T_v = T \left[1 + \left(\frac{m_{ar_seco}}{m_{vapor_d'agua}} - 1 \right) Q \right] = T(1 + 0.61Q)$$

Temperatura Potencial Virtual



Temperatura Potencial Virtual



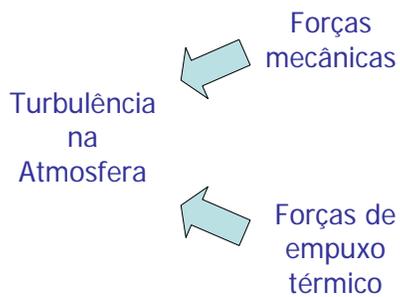
Indicadores de estabilidade

Para descrever os níveis de turbulência na atmosfera, e desta forma sua capacidade de dispersão de poluentes, é necessário caracterizar/quantificar a estabilidade da atmosfera.

Os valores do gradiente vertical de temperaturas, apesar de serem bons indicadores da estabilidade estática da atmosfera, não incorporam os efeitos mecânicos da turbulência.



Classificação da Estabilidade Atmosférica



Indicadores de estabilidade

Outros parâmetros são usados para descrever a relação entre as magnitudes das forças relacionadas aos efeitos do empuxo térmico e da turbulência mecânica. São eles:

Número de Richardson (Ri)

Comprimento de Monin-Obukhov (L)



Comprimento de Monin-Obukhov

Para condições não neutras Monin e Obukhov encontraram uma relação bem definida entre os dois grupos π introduzindo uma escala característica de comprimento definida da seguinte forma:

$$L = - \frac{\left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{3/2}}{k \left(\frac{g}{\theta_0} \right) (\theta \omega)_0}$$

Essa escala de comprimento é denominada de Comprimento de Monin-Obukhov.



Perfil vertical de velocidade horizontal (não-adiabática)

Assim o Comprimento de Monin-Obukhov é dado por:

$$L = - \frac{u_*^3}{k \left(\frac{g}{\theta_0} \right) (\theta \omega)_0}$$

Quando L é positivo o fluxo turbulento de calor sensível é negativo e neste caso a CLS é estável.

Quando L é negativo o fluxo vertical turbulento de calor sensível é positivo e neste caso a CLS é instável ou convectiva (convecção térmica).

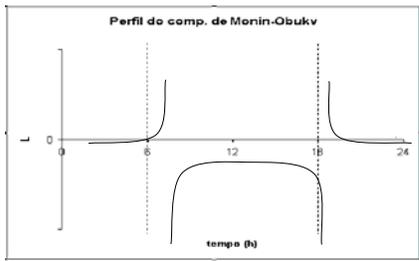
Quando $|L|$ tende para infinito o fluxo é nulo, portanto a CLS é neutra. Neste caso a TSMO indica que o perfil de velocidade média é logarítmica



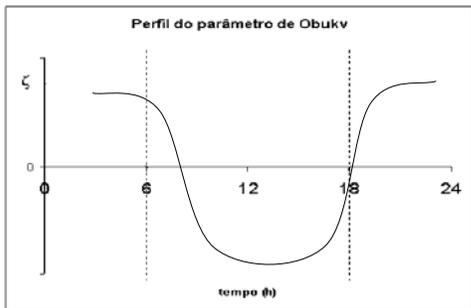
Comprimento de Monin-Obukhov

- L é uma escala de altura, que é proporcional a uma altura acima da superfície onde os fatores de empuxo térmico do ar são equivalentes à produção mecânica de turbulência.





- $L < 0$ em condições instáveis
- $L = \pm\infty$ em condições neutras
- $L > 0$ em condições estáveis



Classe de Estabilidade de Pasquill

- Pasquill sugeriu a classificação da estabilidade atmosférica em 6 classes:
 - **Classe A:** Regime turbulento que torna a atmosfera extremamente instável.
 - **Classe B:** Regime turbulento que torna a atmosfera medianamente instável.
 - **Classe C:** Regime turbulento que torna a atmosfera ligeiramente instável.
 - **Classe D:** Regime turbulento que torna a atmosfera neutra.
 - **Classe E:** Regime turbulento que torna a atmosfera ligeiramente estável.
 - **Classe F:** Regime turbulento que torna a atmosfera bastante estável.



- Aproximação prática do valor do comprimento de Monin-Obukov

$$\frac{1}{L} = a + b \log z_0$$

Onde

- **a** e **b** são os coeficientes de Golder
- **z₀** é a rugosidade aerodinâmica superficial.

Os coeficientes de Golder

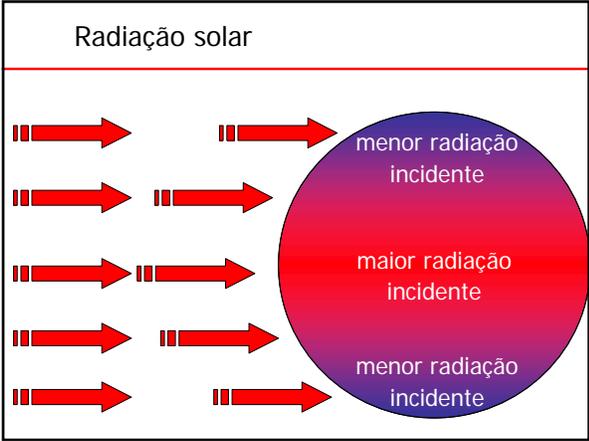
Tipo de Estabilidade	Classes de Pasquill	Coeficientes	
		a	b
Extremamente instável	A	-0,096	0,029
Moderadamente instável	B	-0,037	0,029
Levemente instável	C	-0,002	0,018
Neutra	D	0	0
Levemente estável	E	0,004	-0,018
Moderadamente estável	F	0,035	-0,036

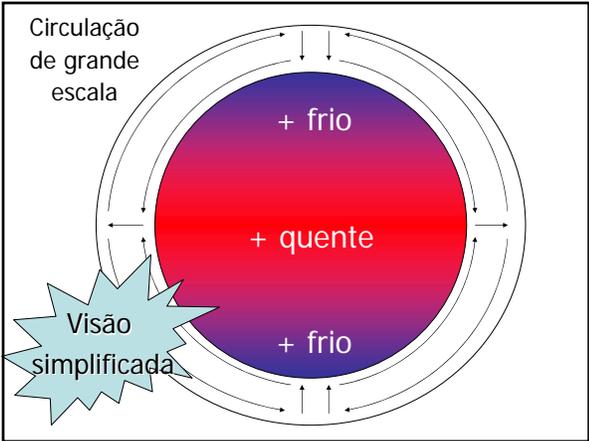


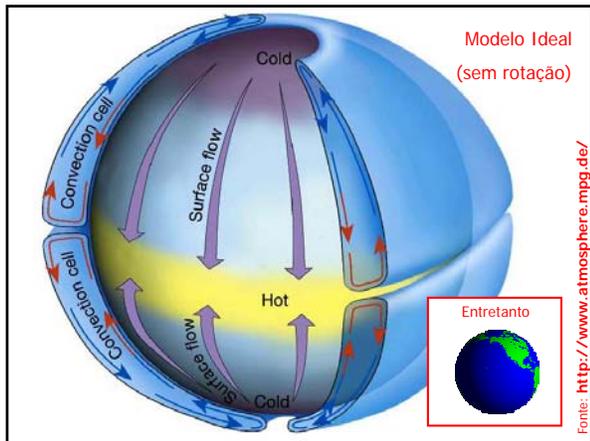
Pasquill's Stability Class	σ_θ (deg.)	σ_ϕ (deg.)
A	≥ 22.5	≥ 11.5
B	17.5–22.5	10.0–11.5
C	12.5–17.5	7.8–10.0
D	7.5–12.5	5.0–7.8
E	3.8–7.5	2.4–5.0
F	< 3.8	< 2.4

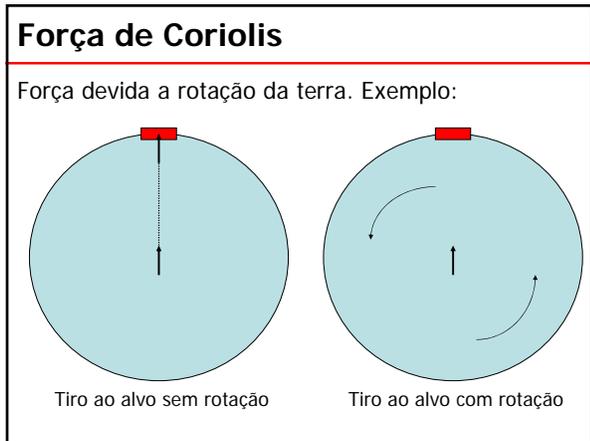
Source: Irwin, 1980.

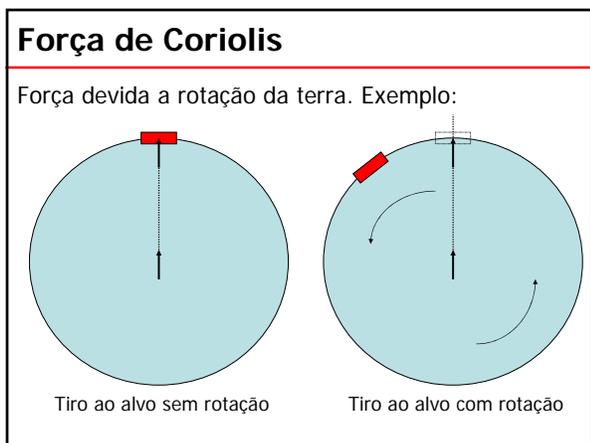
Ventos na atmosfera





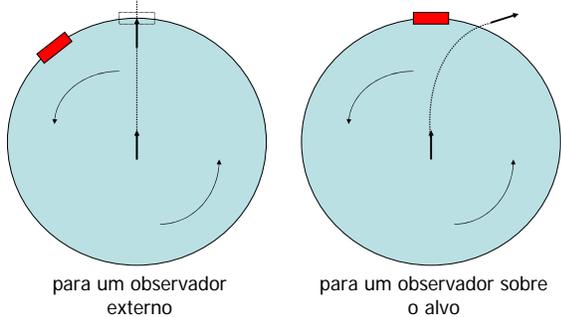






Força de Coriolis

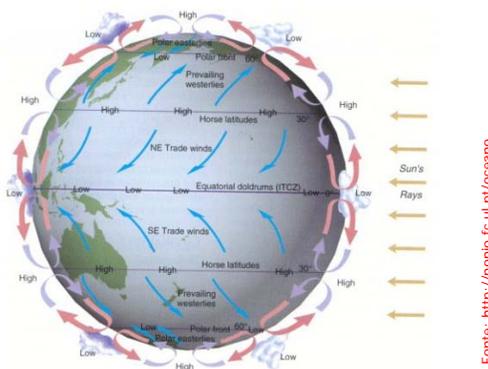
Força devida a rotação da terra. Exemplo:

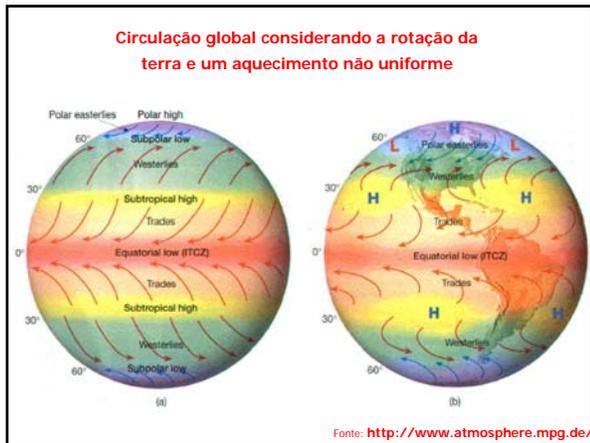


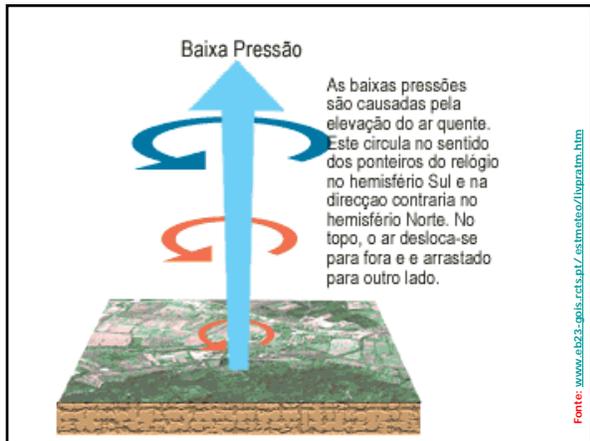
Força de Coriolis

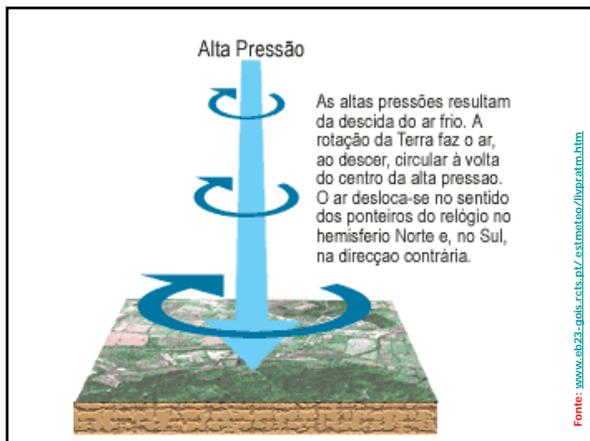


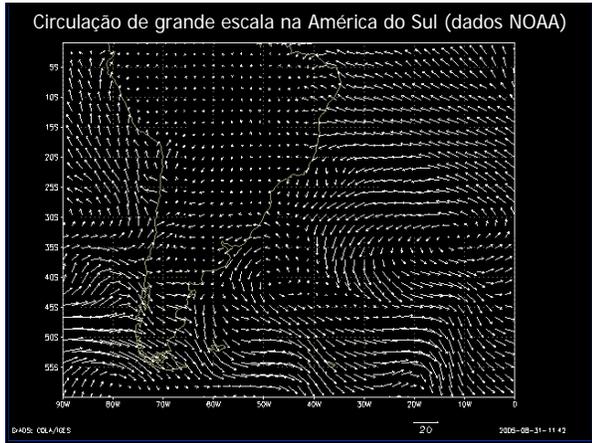
Circulação global considerando a rotação da terra e um campo de ventos permanente





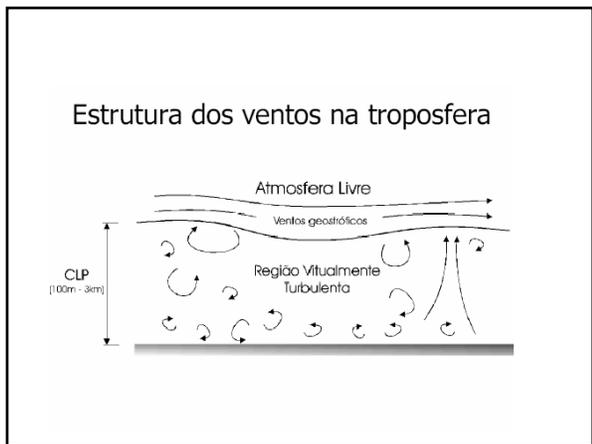






On-line
(imagens de satélite)
CPTEC

http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/setores/america_frame.htm



Características topográficas que alteram o campo de ventos

Ventos em vales:

Anabáticos e Catabáticos

Canalizado

Brisas Marinhas e Terrestres

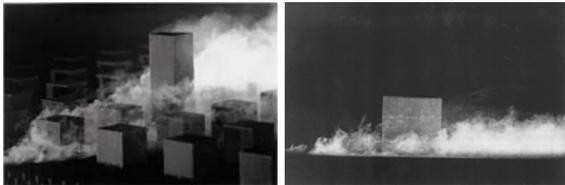
Obstáculos ou edificações



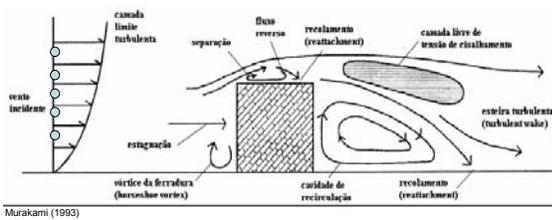




- A presença de edificações altera o padrão do escoamento e conseqüentemente altera o comportamento das plumas de poluentes na região próxima ao prédio.

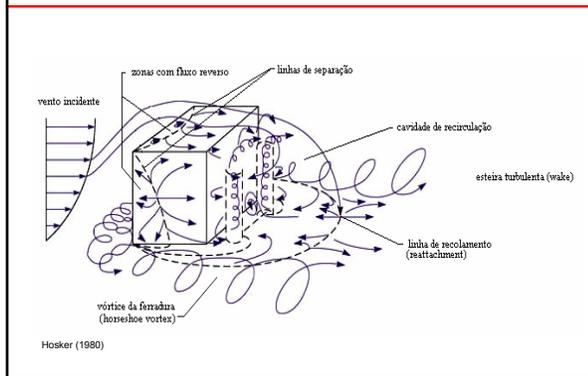


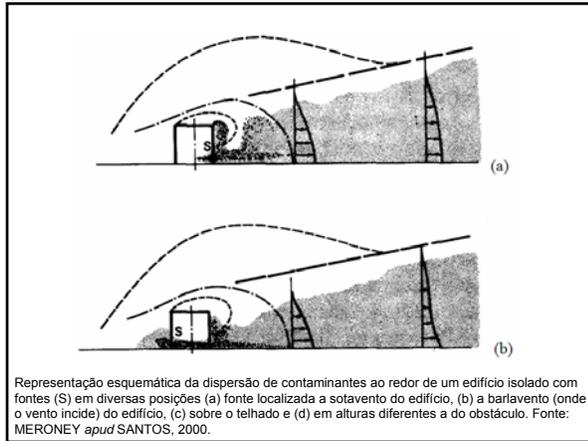
Escoamento ao Redor de Prédios

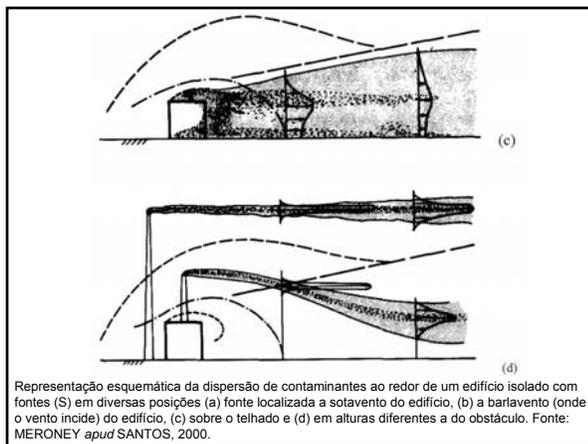


Murakami (1993)

Escoamento ao Redor de Prédios



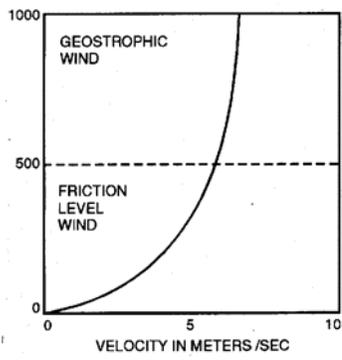




Estrutura dos ventos na troposfera



Perfil vertical de velocidade



Perfil vertical de velocidade

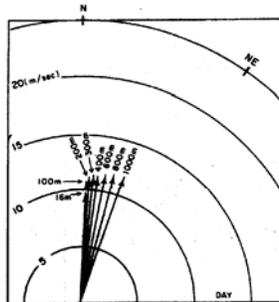
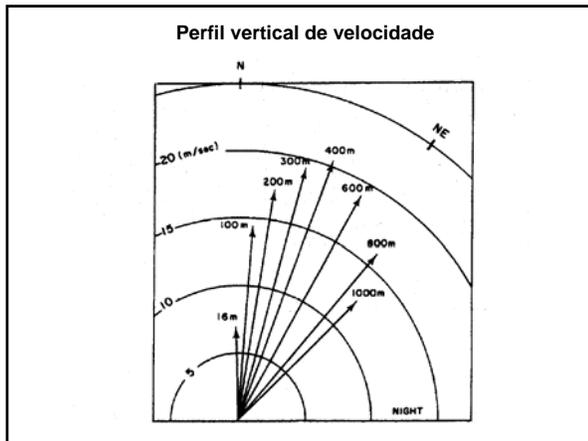
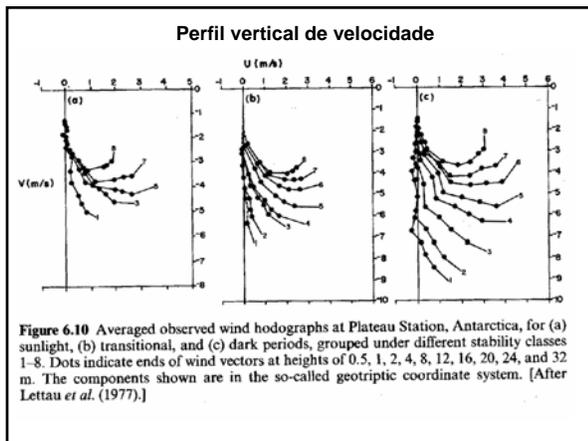
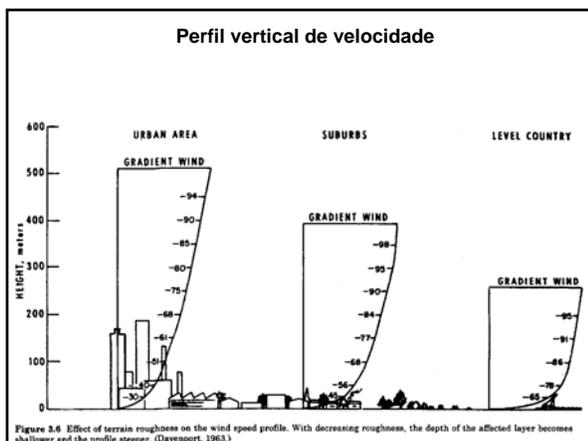
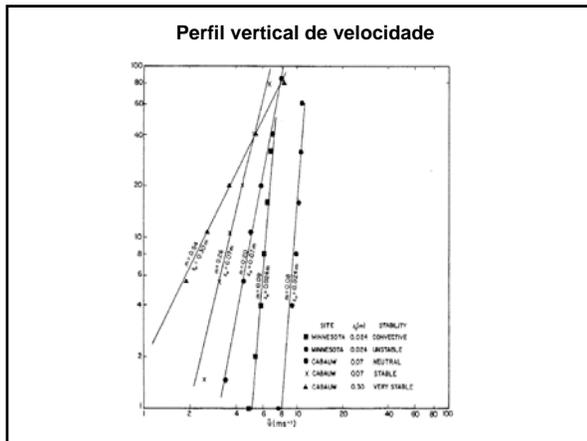


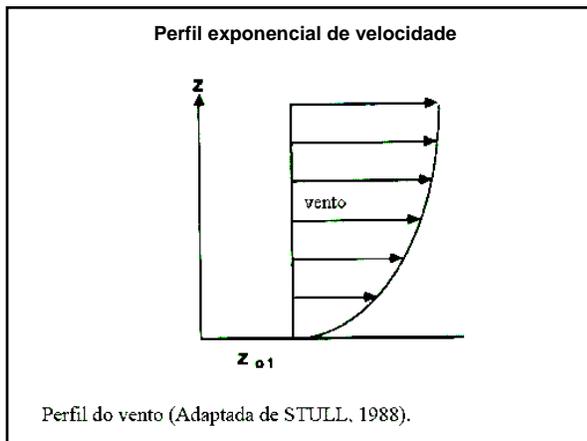
Figure 3.9 Twisting of the wind due to frictional effects. Average vectors constructed from night and day wind observations obtained during the Great Plains Turbulence Field Program in central Nebraska. (Lettau and Davidson, 1957.)











Perfil do vento (Adaptada de STULL, 1988).

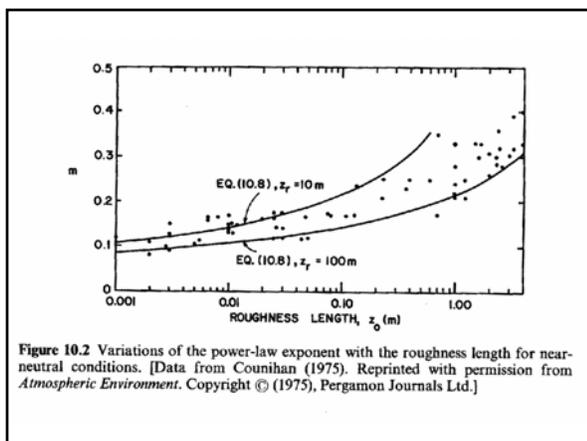


Figure 10.2 Variations of the power-law exponent with the roughness length for near-neutral conditions. [Data from Counihan (1975). Reprinted with permission from *Atmospheric Environment*. Copyright © (1975), Pergamon Journals Ltd.]

