



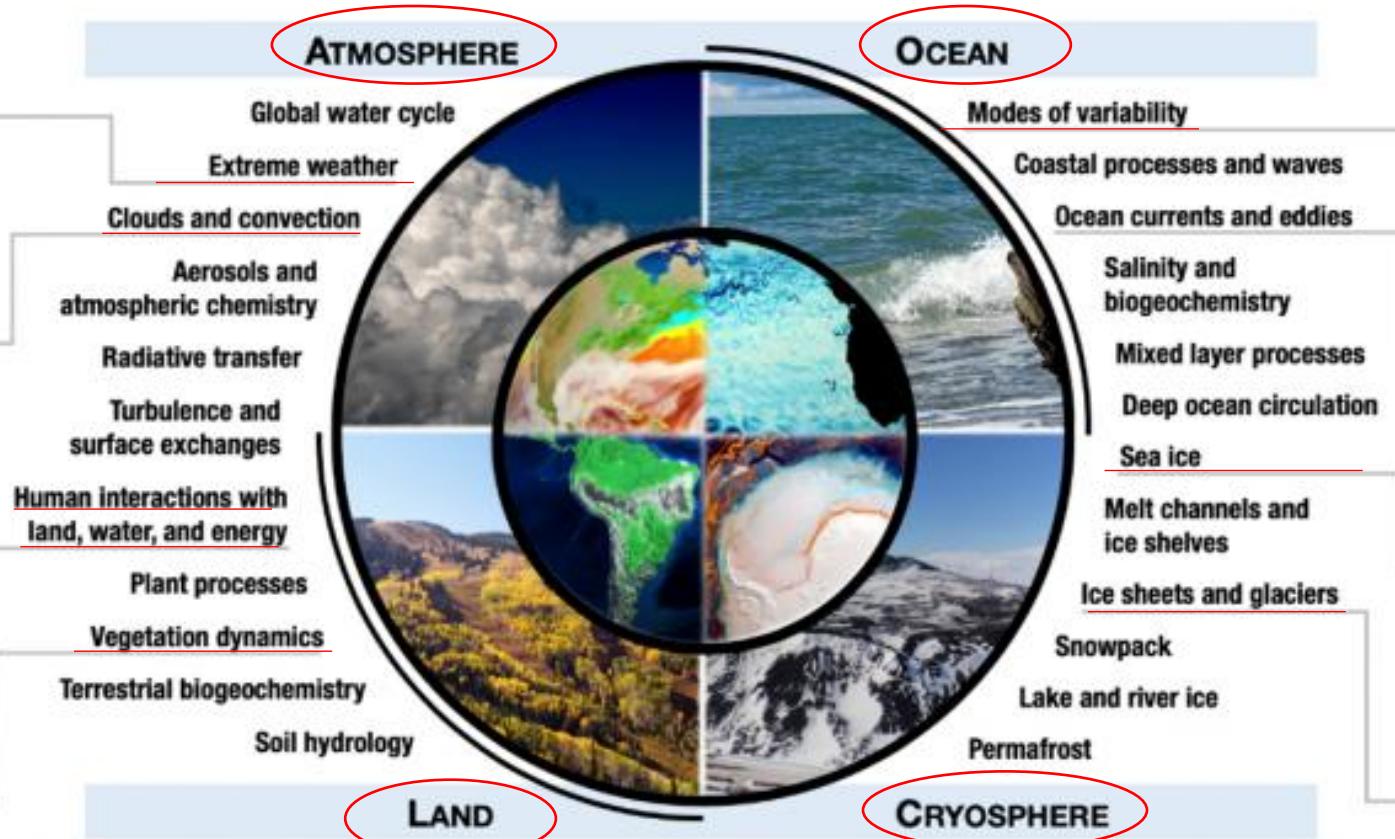
# **Fontes de Erros nos Modelos de Previsões Numéricas.**

Cachoeira Paulista, INPE

**Paulo Yoshio Kubota**



# Encontro dos Alunos de Pós-Graduação em Meteorologia (EPGMET)



Estes são os desafios?

Simular todos este sistemas de forma acoplada



Earth system models include many interdependent components and processes to help us understand our planet.

Image courtesy of Paul Ullrich, University of California, Davis

**Quais os problemas que devem ser considerados?**





# Encontro dos Alunos de Pós-Graduação em Meteorologia (EPGMET)



## Modelos de Circulação Geral da Atmosfera

## Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

Mid-1970s

Atmosphère

Como acoplar oceano e atmosfera + ...?  
Como Tratar o Sistema Terrestre globalmente?

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\nu \partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j}$$

+ ?? Termos ??

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \nabla \bar{\theta} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{u}' \theta'}{\partial x_i} + \frac{L}{\pi c_p} (c - e) + Q_{rad}$$

+ ?? Termos ??

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \nabla \bar{q}_v - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial \bar{u}' q'_v}{\partial x_i} - (c - e)$$

+ ?? Termos ??

$$\frac{\partial \bar{q}_l}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \nabla \bar{q}_l - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_l}{\partial z} - \frac{\partial \bar{u}' q'_l}{\partial x_i} + (c - e) - P_r$$

+ ?? Termos ??

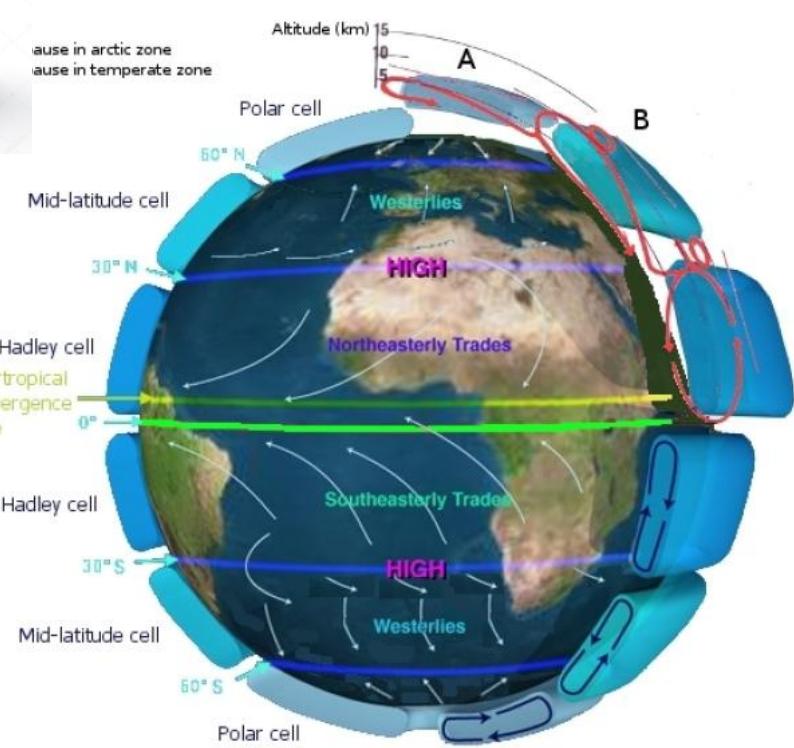
Advecção de Larga escala

Subsidiencia de Larga Escala

Transporte turbulento

Taxa de Condensação líquida

Taxa de Precipitação





**(1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?**

**(2) Quais são as características das interações de crescimento de erro/escala?**

**(3) Como podemos melhorar a base física da representação da incerteza do modelo?**

**(4) Como podemos melhorar a colaboração em toda a comunidade científica?**





## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

- Existem várias **fontes de incerteza** nos modelos que podem resultar em erro na simulação do modelo,

1) Decorrentes da Discretização da dinâmica {**erros de truncamento** espacial e temporal}

2) Limitações de nosso **conhecimento de processos físicos** em todo o “Sistema Terrestre”  
(atmosfera, oceano, superfície terrestre, gelo marinho, composição atmosférica)

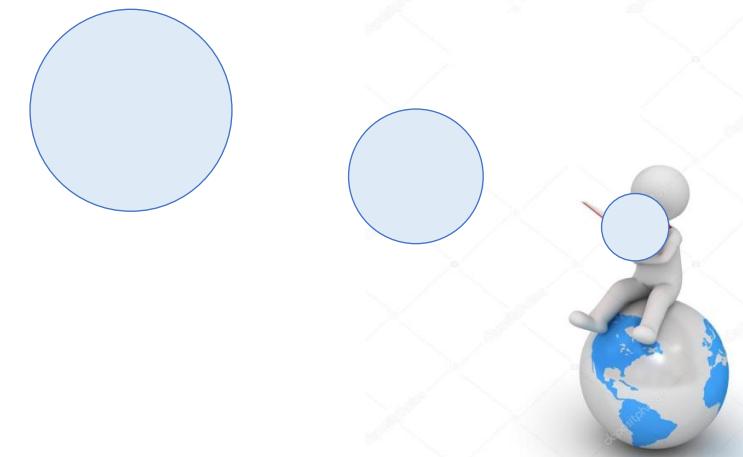
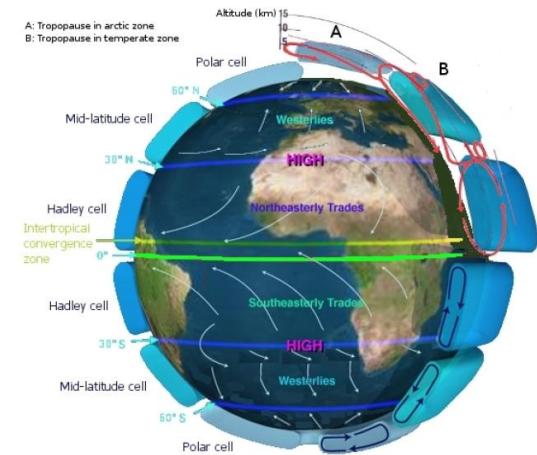




## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

**Erros Decorrentes do Método  
de Discretização da  
Dinâmica, Aproximações  
(hidrostática, não  
hidrostática, compressível,  
incompressível, atmosfera  
profunda, atmosfera rasa),  
tipo de grades, etc. )**

## Dinâmica

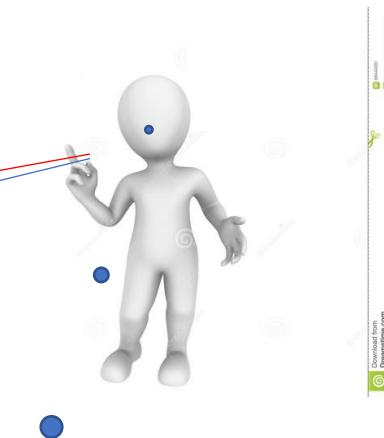


## 1) Decorrentes da Discretização da dinâmica {erros de truncamento espacial e temporal} Aliasing, instabilidade não linear, e conservação

### Exemplo Equação de Advecção (não linear)

De volta a algo familiar.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad - \text{ or } - \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} \right) = 0$$



O problema das diferenças finitas está na multiplicação.\*

*instabilidade não linear*

Seja  $u(x) = \sin(kx)$ ; então

$$u = \sin kx \Rightarrow \frac{\partial u^2}{\partial x} = k \sin^2 kx$$

Que número de onda efetivo  $k$  que estamos trabalhando agora ?

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação

## ***Exemplo***

Alguns estudos investigaram as ***ondas de gravidade*** perto das ***frentes meteorológicas***.

as ***ondas de gravidade WG apareceram em observações***

As **WG** apareceram em simulações de alta resolução. **Mas algumas das ondas modeladas não são reais (Onda Espurias).**

**Onda Espurias** apareceram em alta resolução horizontal.

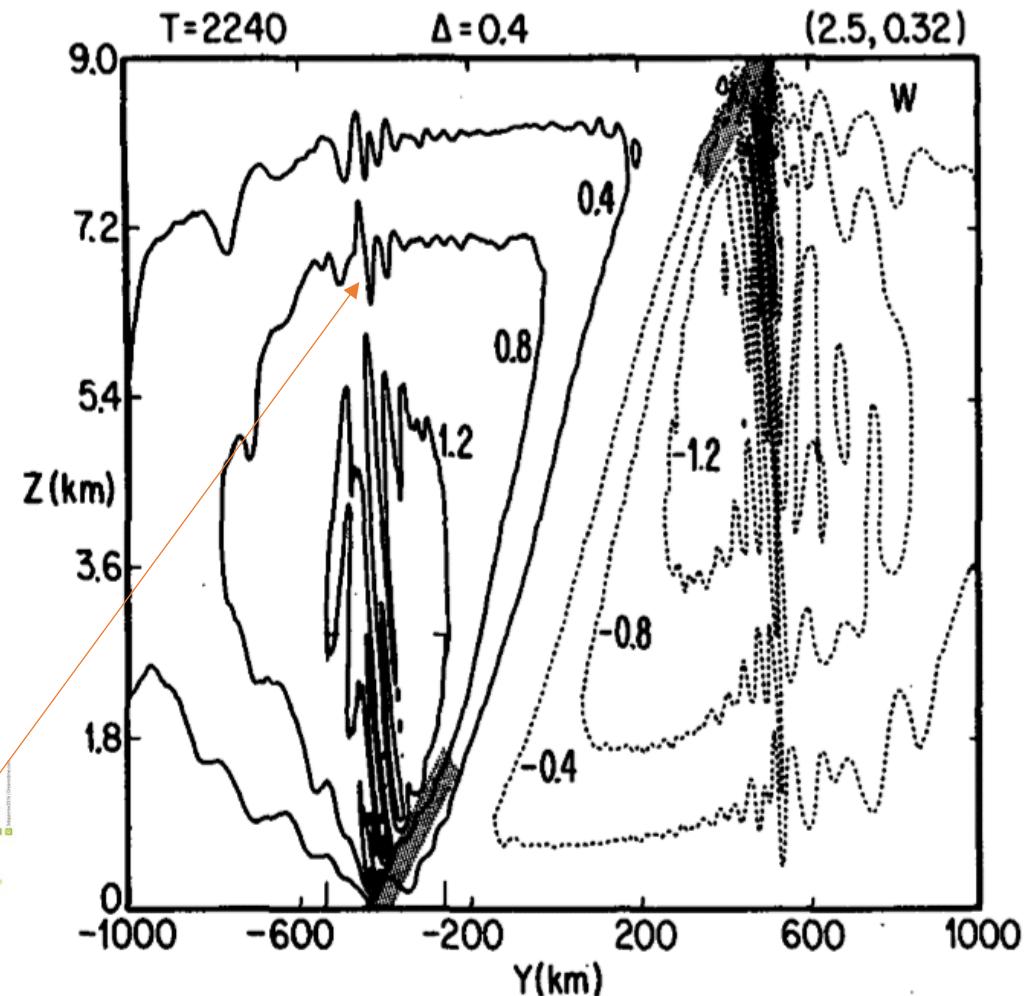


FIG. 2. Vertical velocity at  $T = 2240$  min from the beginning of the experiment. The experiment that produced this figure had a horizontal resolution of 2.5 km and a vertical resolution of 320 m. This **Io Yoshio Kubota**

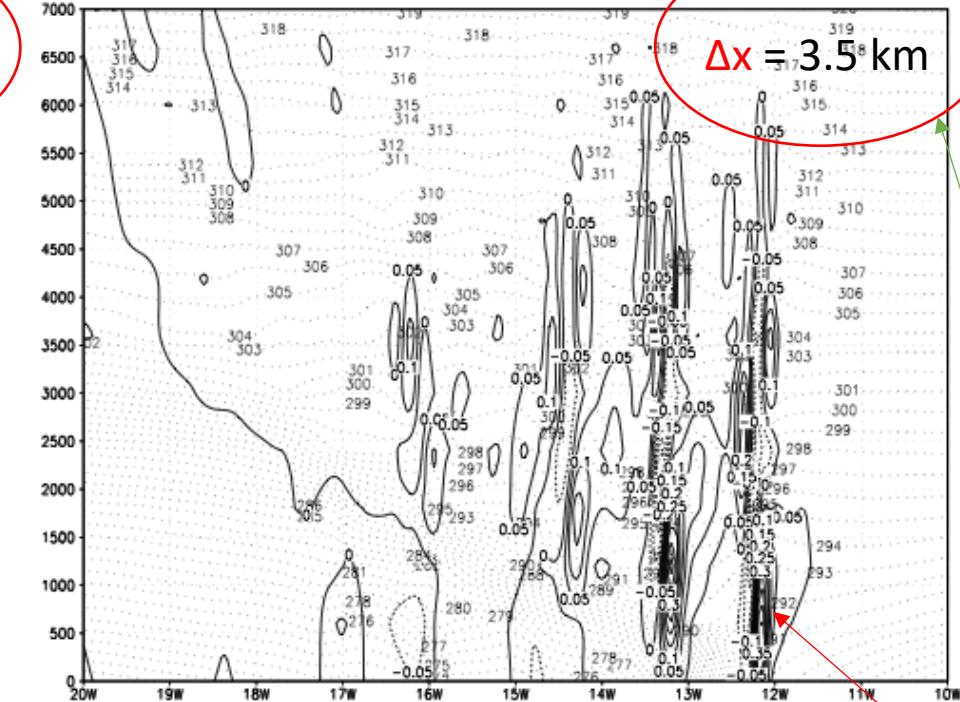
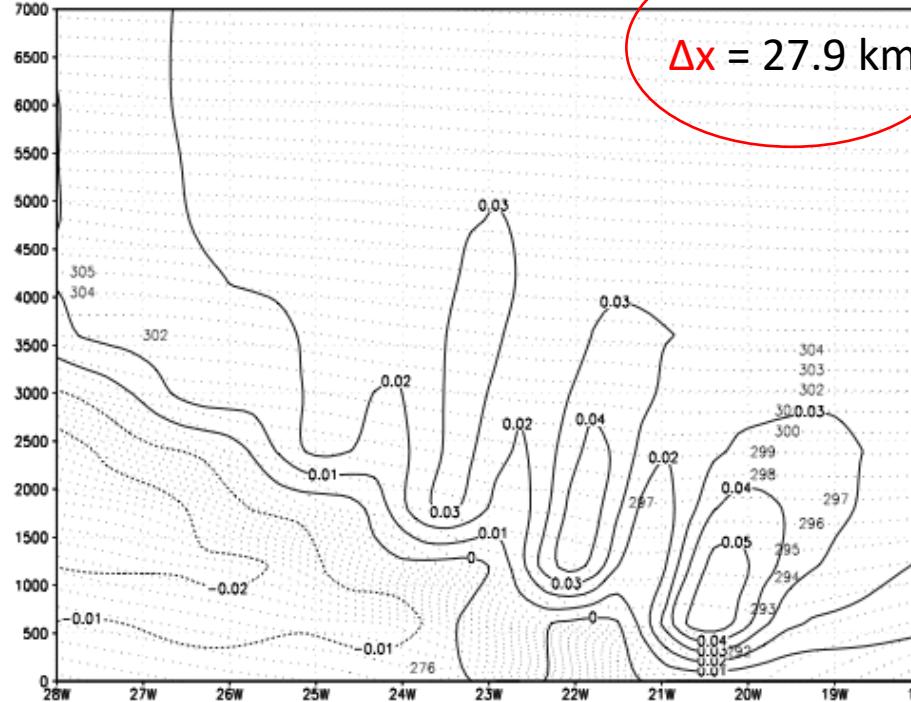


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação

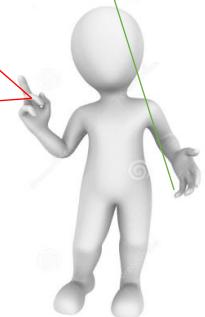


## Ondas Espúrias



Iga (2005) - ondas sobre sistema frontal. O campo da velocidade vertical é mostrada.

A única mudança é a diminuição de  $\Delta x$ .





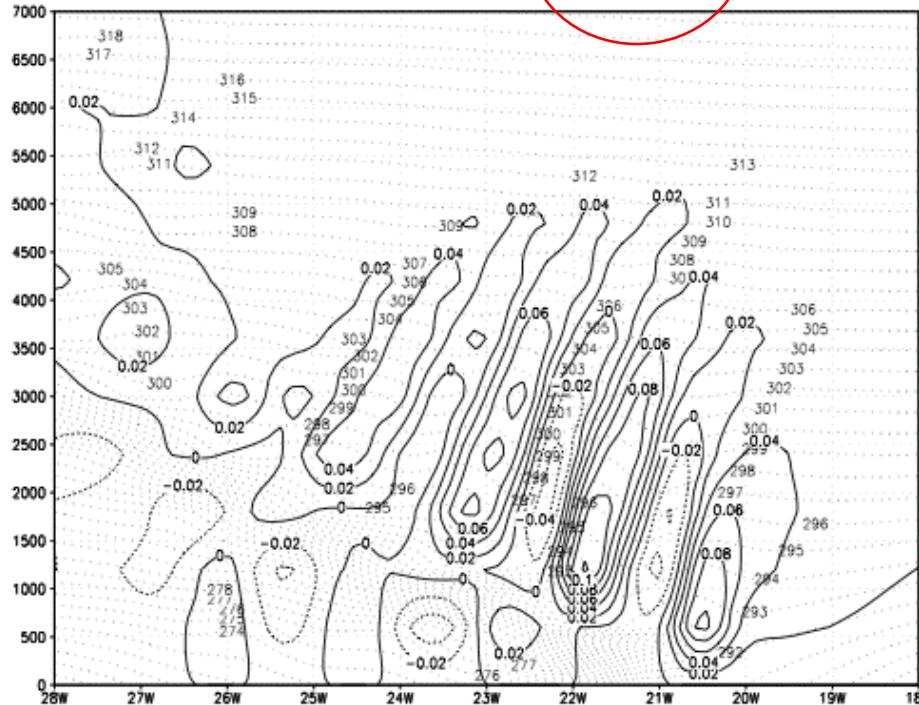
## **(1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?**

## Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



## Spurious waves

GLEVEL=9, ~~dz=600m~~



GLEVEL=9, (dz=300m)

# As ondas espúrias desaparecem..

Iga (2005) - ondas sobre sistema frontal. O campo da velocidade vertical é mostrada.

$\Delta x=14$  km. A única mudança é a diminuição em  $\Delta z$ .



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação

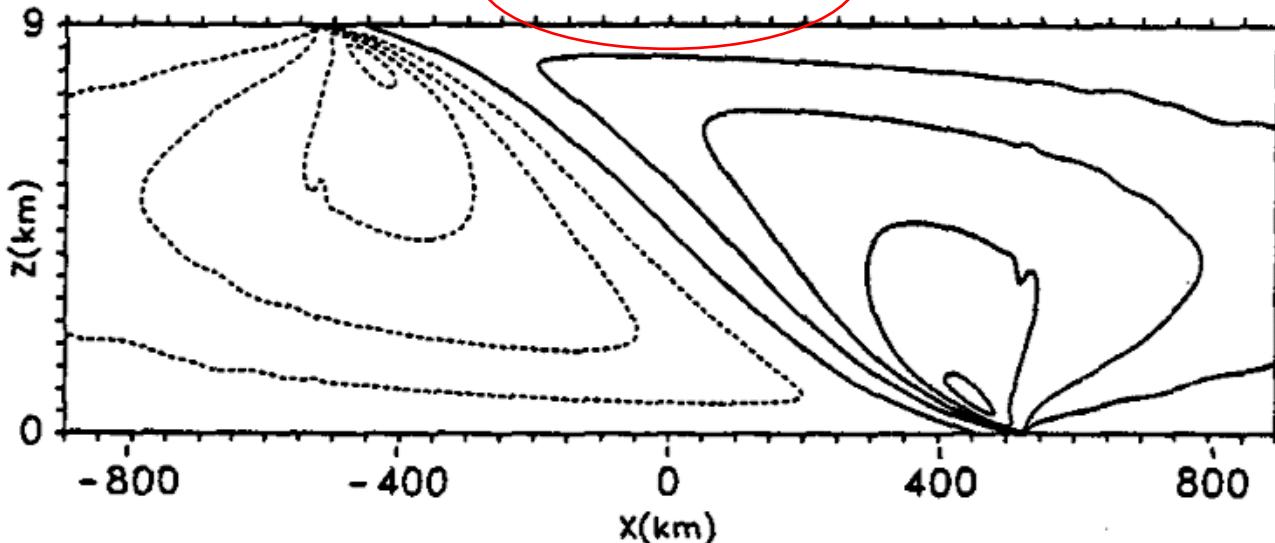


Spurious waves

(a)  $w$  at  $\beta=1.4$ ;  $\Delta z=322$  m



(b)  $w$  at  $\beta=1.4$ ;  $\Delta z=50$  m



Snyder et al. 1993. A única mudança é  $\Delta z$ .

As ondas aparecem em alta **resolução horizontal**

As ondas desaparecem com o **aumento** da **resolução vertical**.

Por quê?



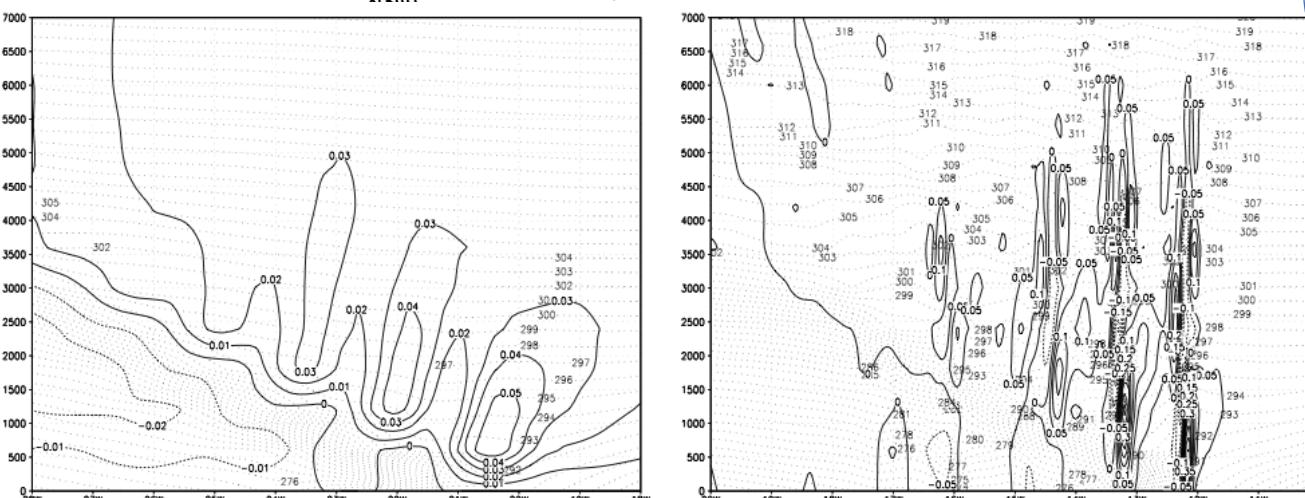
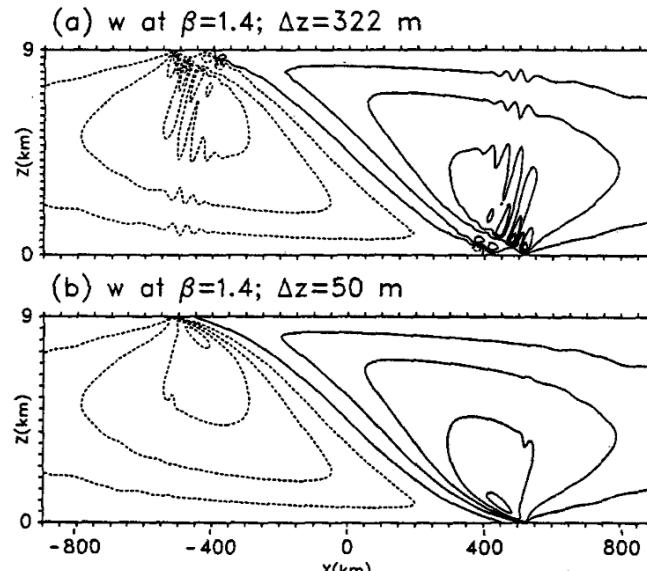


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



## Spurious waves



Uma possibilidade...

Reduzindo  $\Delta x$  mantendo  $\Delta z$  constante.  
Resulta em pequenas ondas horizontais com pequenas escalas verticais (muito pequenas) que também serão resolvidas



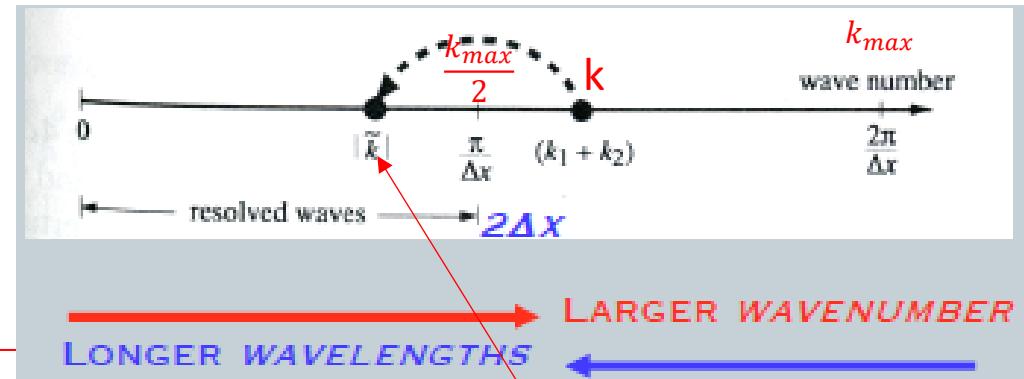
## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação

### Aliasing

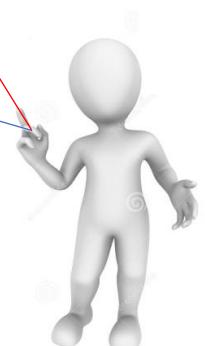
Mesmo se  $u(x)=\sin(kx)$  for resolvido... Se ...  $\frac{k_{max}}{2} < k_1 + k_2 = k < k_{max}$ , o termo não linear coloca energia em  $\tilde{k}$ :

$$k_{max} < k < 2k_{max}$$



Isso não tem solução!

Ele aparecerá em outros comprimentos de onda resolvíveis  $\tilde{k}$   
Isso é **Aliasing**.





# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



Spurious waves

Para onde as ondas não resolvidas “vão”?

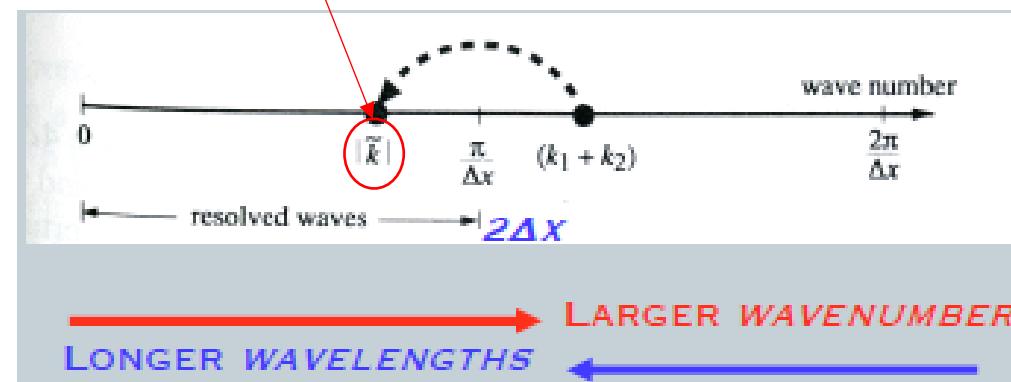
=> Durran eq. 3.91: Exemplos:

$$2\Delta x \cdot 2,5\Delta x \rightarrow 10\Delta x$$

$$(4/3)\Delta x \rightarrow 4\Delta x$$

$$\tilde{k} = \begin{cases} k_1 + k_2 - \frac{2\pi}{\Delta x}, & \text{if } k_1 + k_2 > \frac{\pi}{\Delta x} \\ k_1 + k_2 + \frac{2\pi}{\Delta x}, & \text{if } k_1 + k_2 < -\frac{\pi}{\Delta x} \end{cases}$$

Observe se ambas as ondas são  $4\Delta x$  ou maiores: sem Aliasing



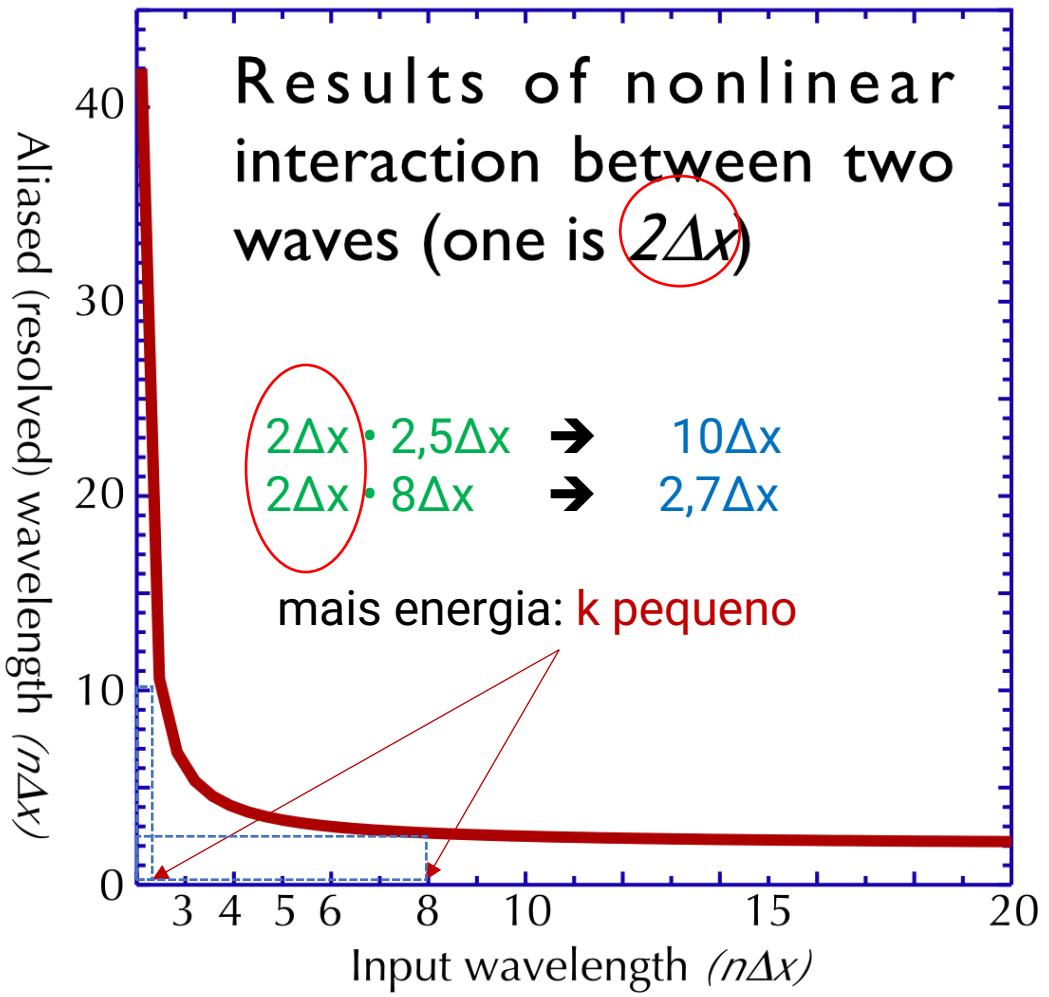


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



Spurious waves

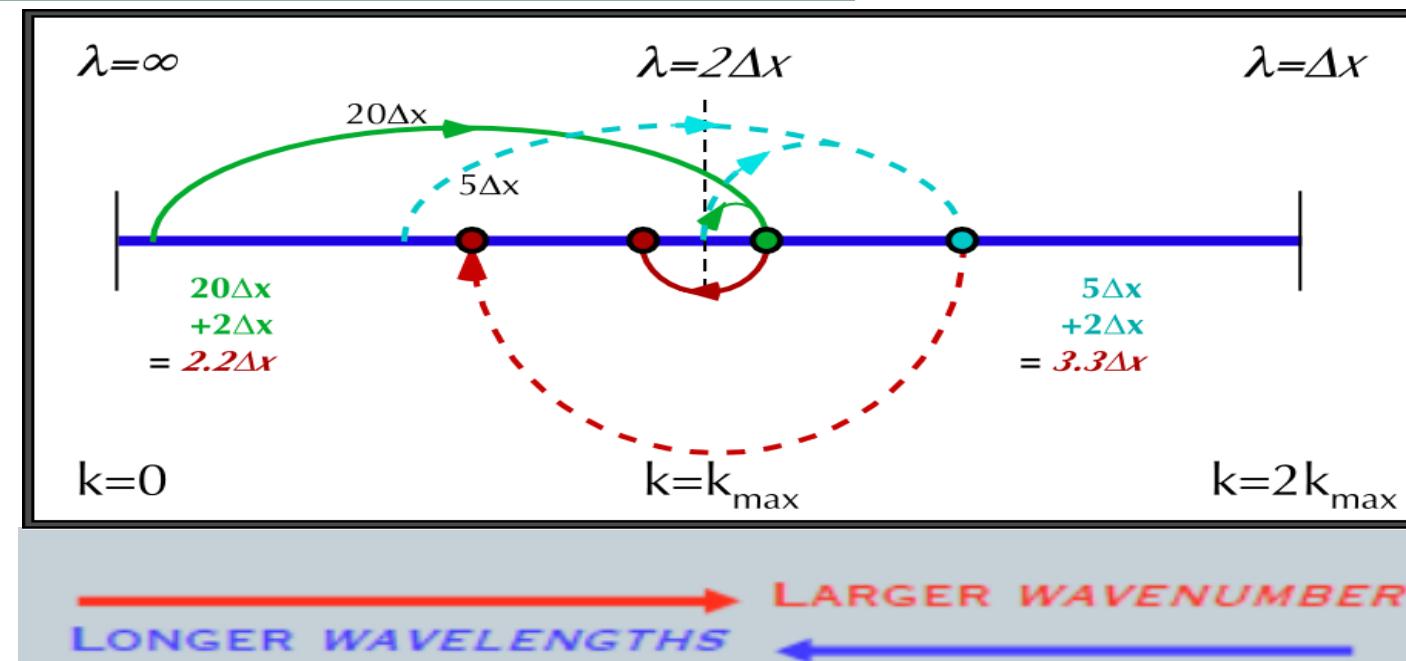


Input wave	Input $k / k_{max}$	$+ 2\Delta x = k / k_{max}$	aliased $k / k_{max}$	= final $N\Delta x$
$2.1 \Delta x$	0.95	1.95	0.05	$42 \Delta x$
$5.0 \Delta x$	0.40	1.40	0.60	$3.3 \Delta x$
$10 \Delta x$	0.20	1.20	0.80	$2.5 \Delta x$
$20 \Delta x$	0.10	1.10	0.90	$2.2 \Delta x$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad -\text{or}- \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + u(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = 0$$

$$u(x, t) = \sin(kx - vt)$$





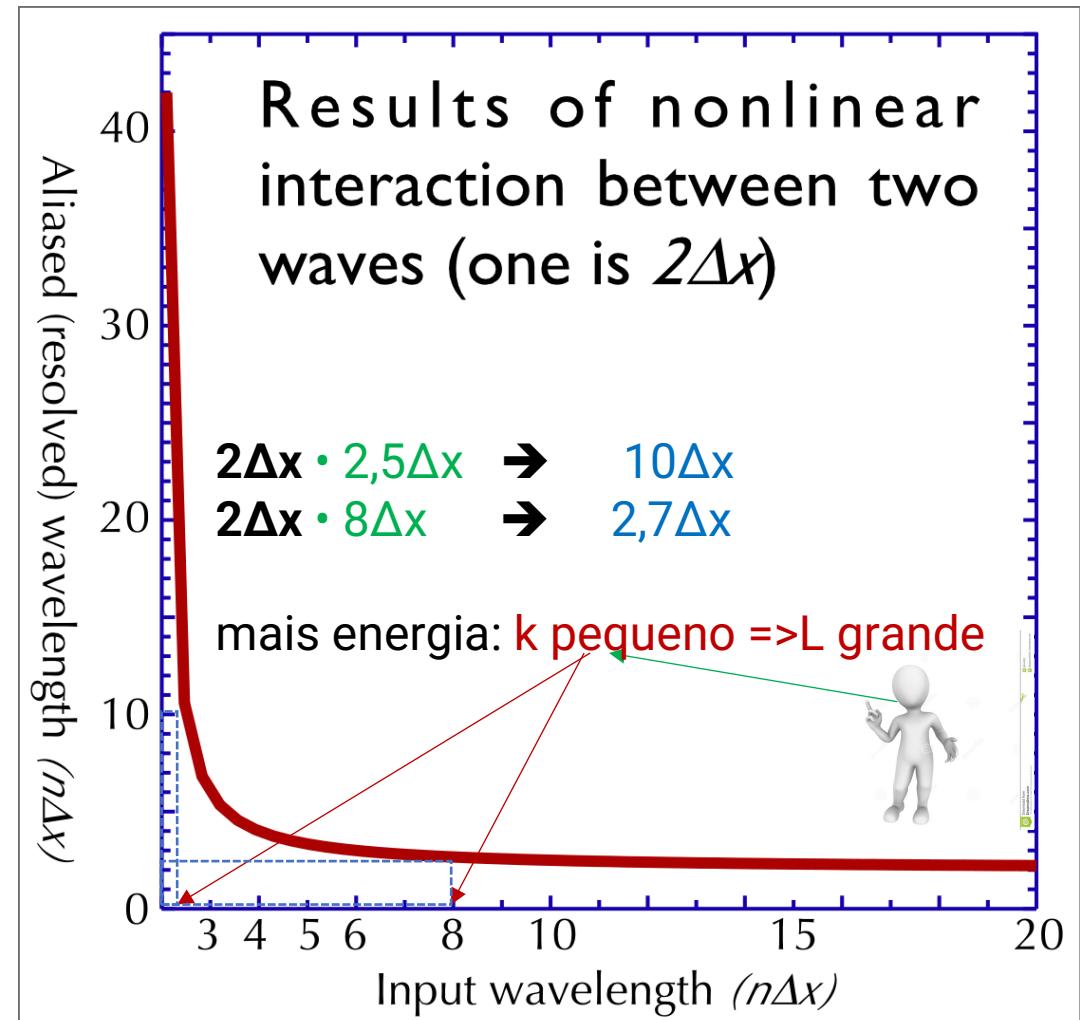
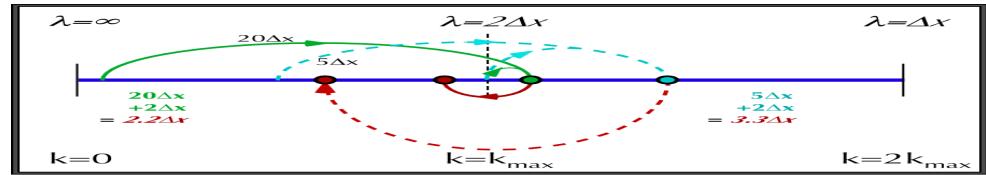
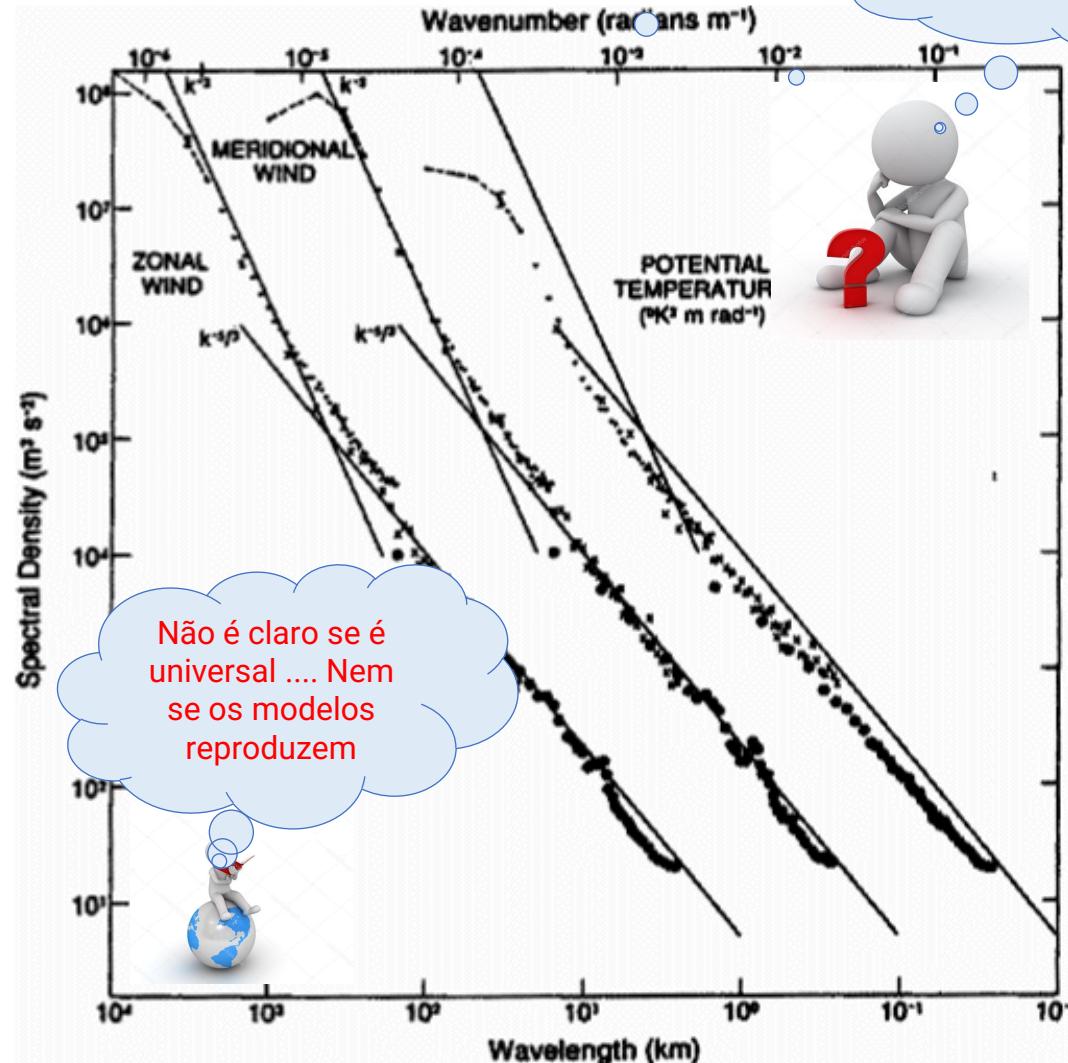
# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



Qual o efeito no  
espectro?

O espectro -5/3  
é universal?



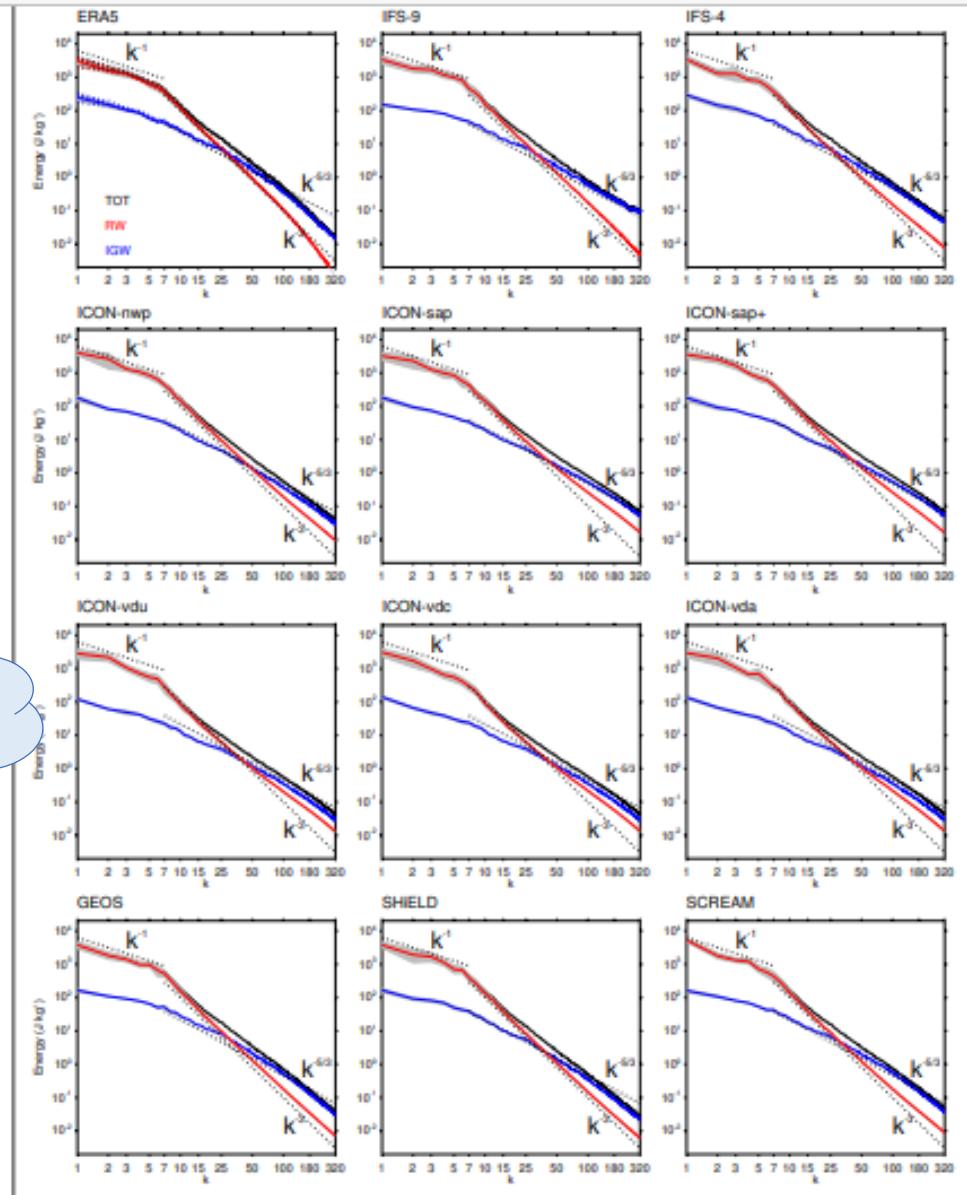


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



Spurious waves



os modelos não  
reproduzem o  
espectro



Espectros de energia global em função do número de onda zonal não dimensional  $k$  na reanálise do **ERA5** e nas **simulações**.

São mostrados os espectros total (TOT; preto), **RW (vermelho)** e **IGW (azul)**.

Além do ano de 2020, o painel ERA5 mostra em linhas tracejadas os espectros correspondentes para 2016, 2017, 2018, 2019.

O sombreamento cinza marca o desvio padrão calculado em dados de 6 horas. **Para referência, as inclinações espectrais de  $k^{-1}$ ,  $k^{-5/3}$  e  $k^{-3}$  são desenhadas como linhas tracejadas pretas.** Suas localizações são idênticas em cada painel. A faixa de eixos também é idêntica.

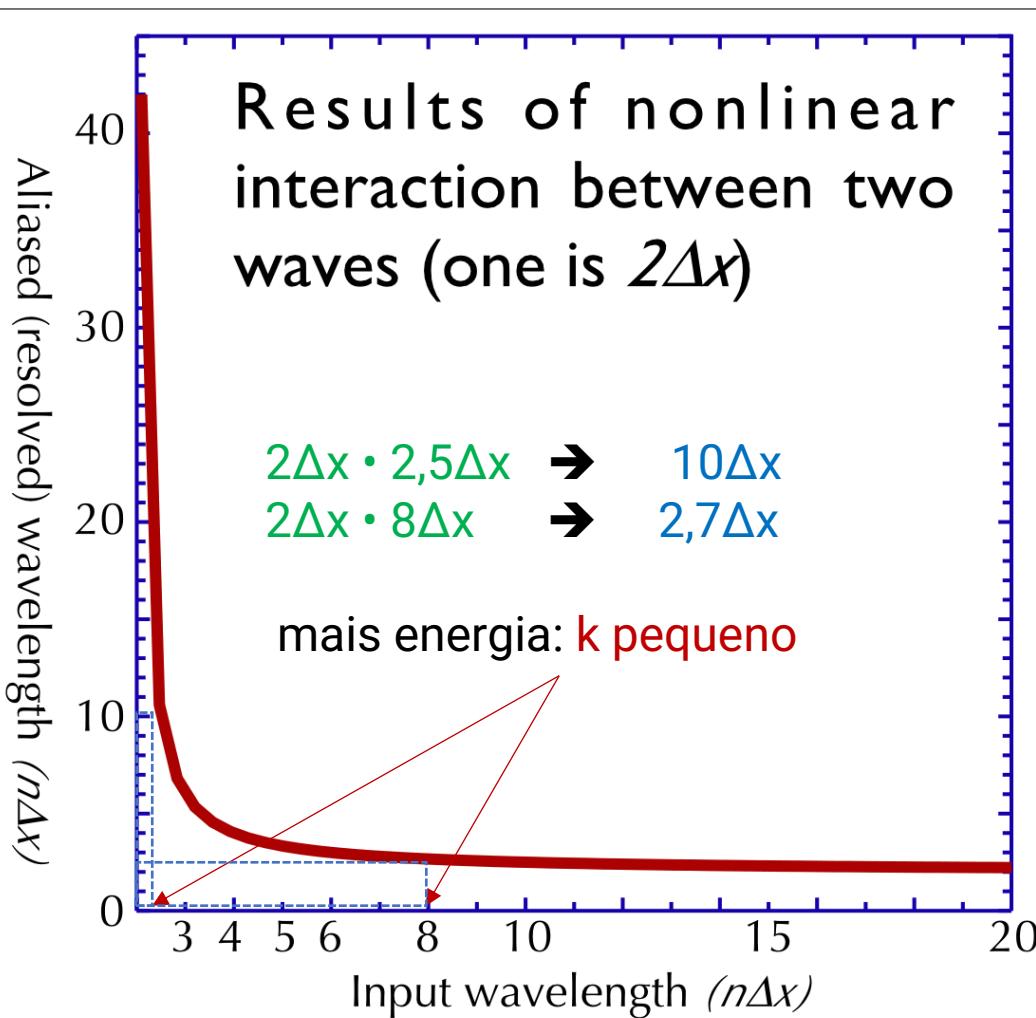


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

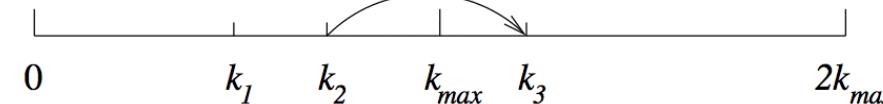
Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



## Spurious waves



Se a energia flui para os números de onda logo acima de  $k_{max}$ ...



O alias o dobra de volta para os números de onda logo abaixo de  $k_{max}$

- ÷ acumula energia perto do limite de resolução da grade
- ÷ Intereração não linear adicional melhora o fluxo em números de onda logo acima de  $k_{max}$ : acelera o processo
- ÷ Isto é a instabilidade não linear.

E a amplitude?

- ÷ Mais energia em  $k$  pequeno. Digamos  $k_2$  logo abaixo de  $k_{max}$ ...
- ÷ Não linear ( $k_1+k_2$ ) tem mais energia se  $k_1$  for pequeno.



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Aliasing, instabilidade não linear, e conservação



**Será que todos as fontes de erros da dinâmica são tratados de forma correta?**

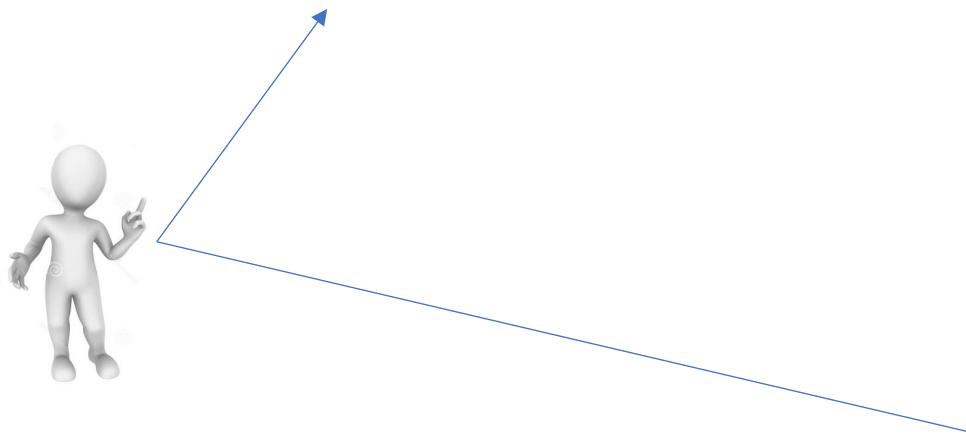
**As aproximações são utilizadas nas escalas corretas?**



Raulio Rosni Kubota

# Erros na representação dos processos físicos

**Em Geral, O erro do modelo é dominado pela representação de processos físicos (por exemplo, turbulência da camada limite, acoplamento de superfície, microfísica de nuvens, interação nuvem-radiação, aerossóis, ondas de gravidade de convecção, arrasto de superfície),**

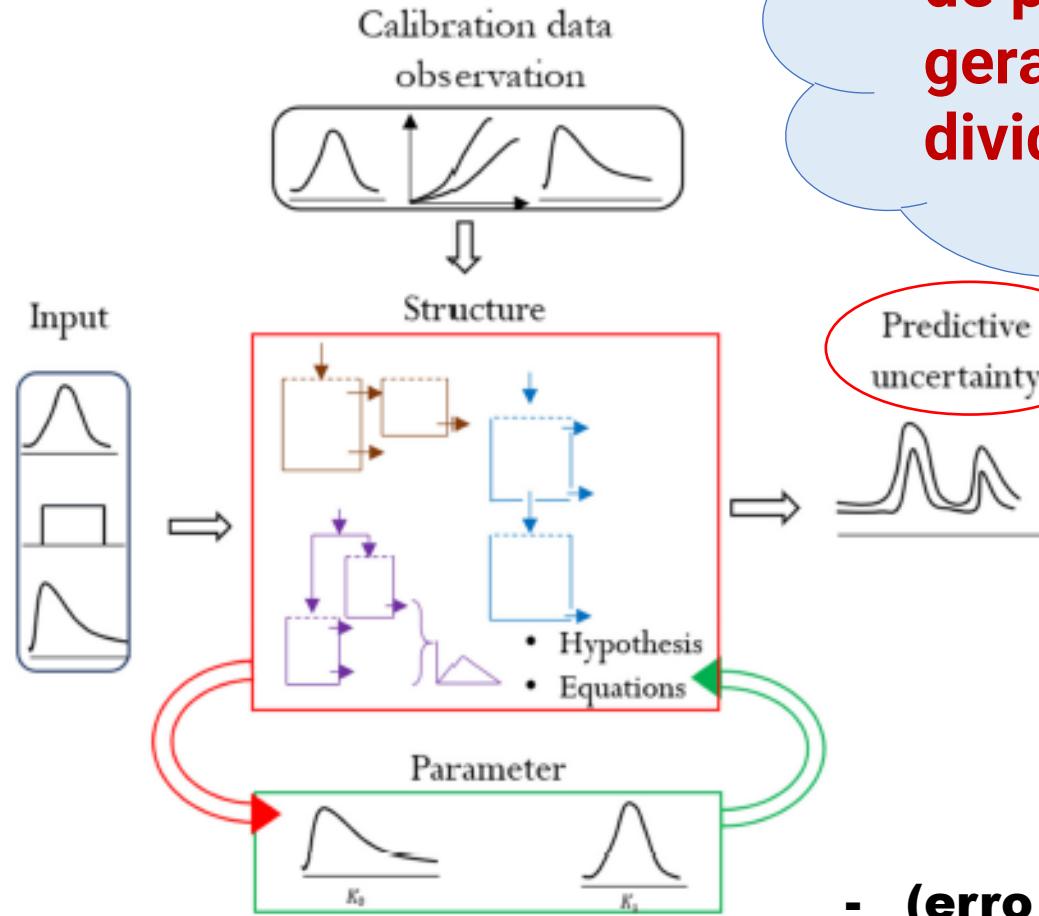


**Entretanto não devemos **negligenciar** a incerteza na **dinâmica**.**



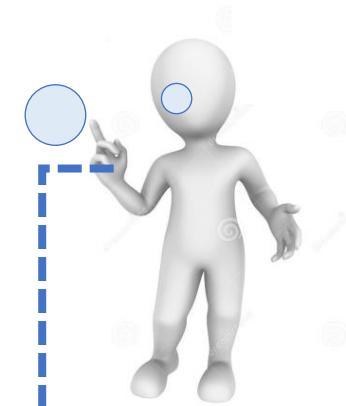
# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## fontes de erros



**Uma parametrização de processo físico geralmente se dividem em:**

Predictive uncertainty



- É difícil separar diferentes fontes de erro :
  - (erro de truncamento **versus** incerteza do processo físico)
  - (erro estrutural **versus** incerteza do parâmetro)



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? Processos físicos de superfície



- (erro estrutural versus incerteza do parâmetro versus incerteza do processo físico)

**Fonte de erros nos  
processos físicos de  
superfície**



## **(1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?**

**Processos físicos de superfície**

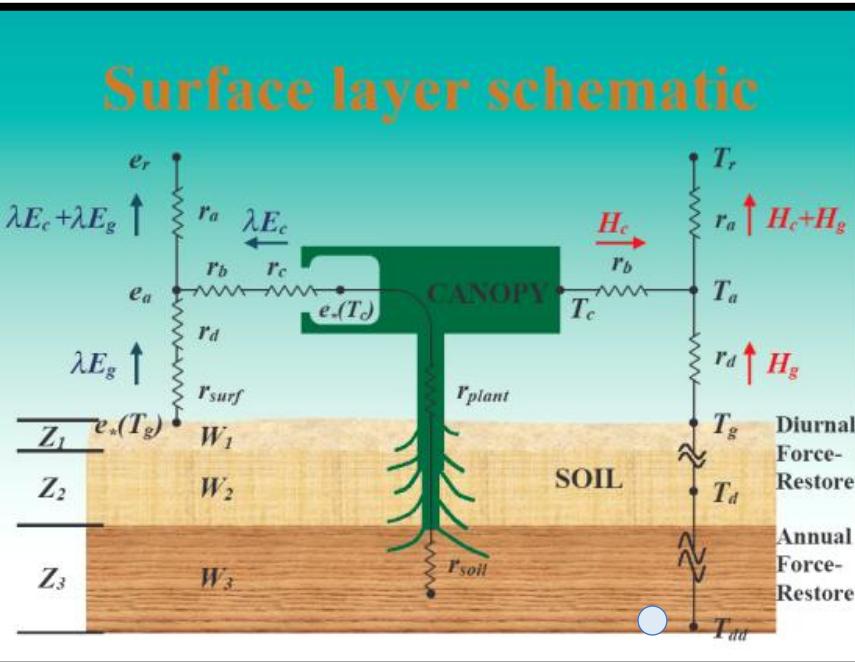
- (erro estrutural versus incerteza do parâmetro versus incerteza do processo físico)

SSiB

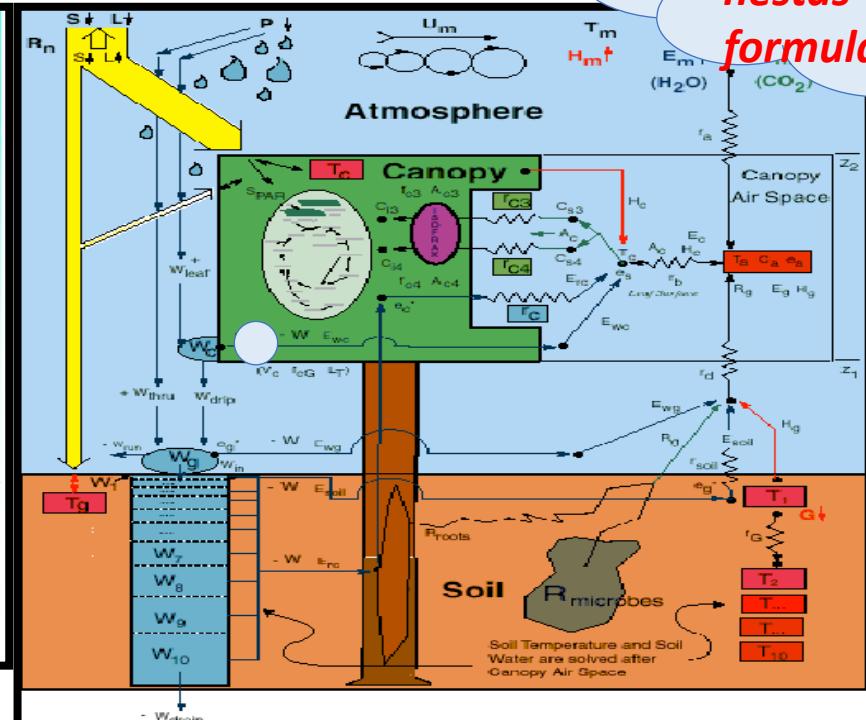
SiB 2.5

*Falta algum  
processo físicos  
nestas  
formulações?*

IBIS

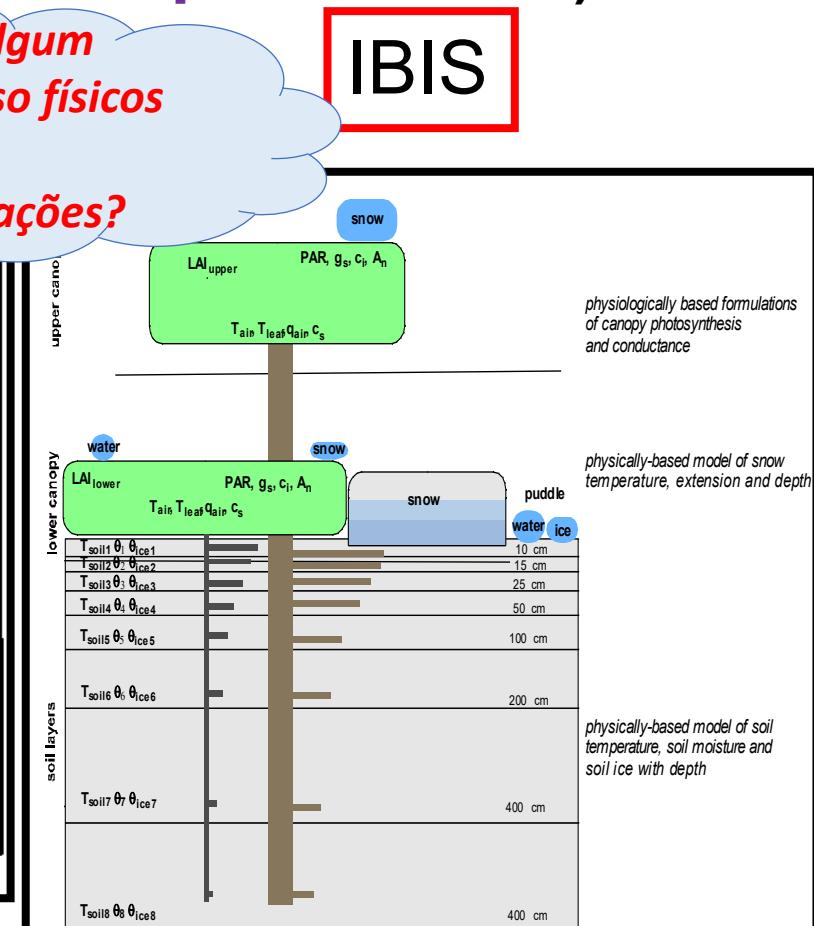


3 (Xue et al., 1991)



SiB 2.5 (Baker et al., 2003)

3º geração



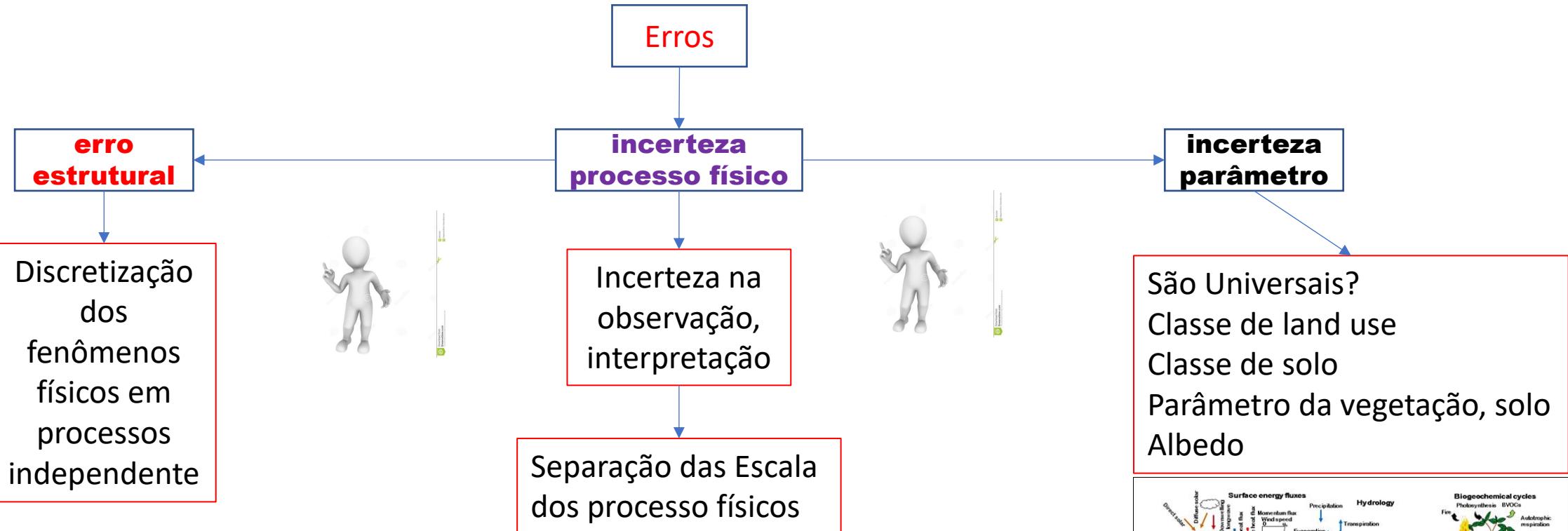
IBIS (Foley, J.A. et al., 2005)

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos físicos de superfície



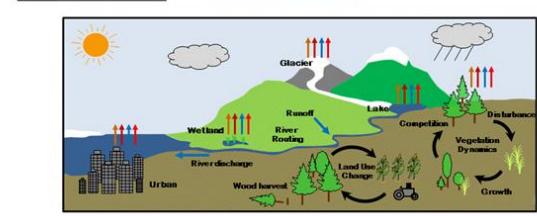
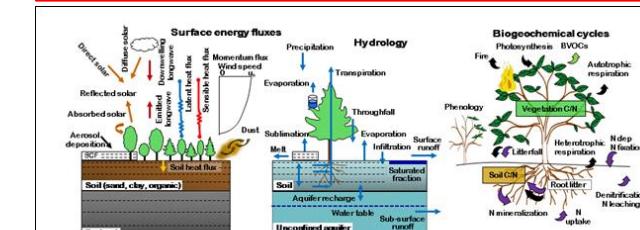
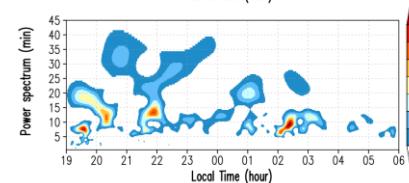
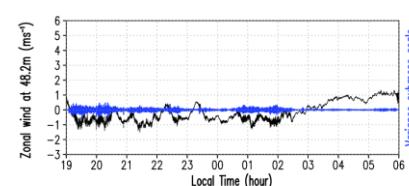
- (erro estrutural versus incerteza do parâmetro versus incerteza do processo físico)



$$C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = Rn_c - H_c - \lambda E_c$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Rn_g - H_g - \lambda E_g - \omega C_g (T_g - T_d)$$

$$C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = Rn_g - H_g - \lambda E_g$$



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? Processos físicos de superfície

- (erro estrutural versus incerteza do parâmetro) **versus incerteza do processo físico)**

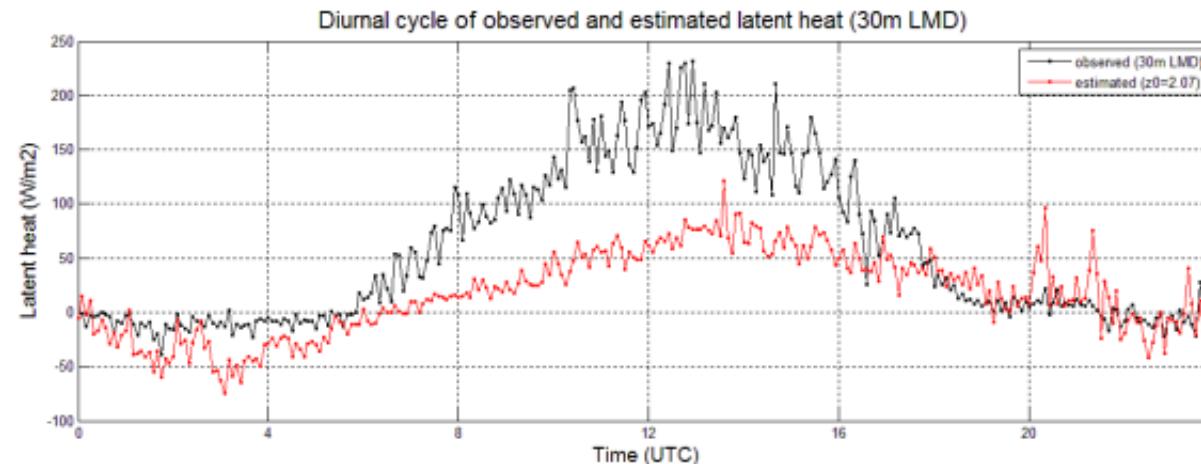
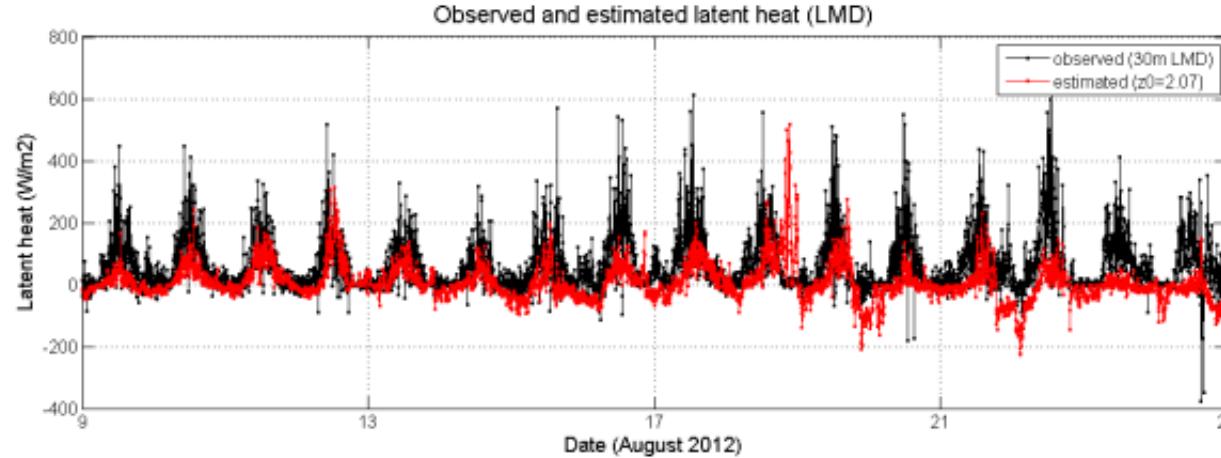


Figure22. Comparison of time series (upper) and diurnal cycle (lower) of estimated and observed

versus incerteza do processo físico)

**Parâmetros mal  
calibrados podem ser  
os responsáveis por  
estes bias!!**





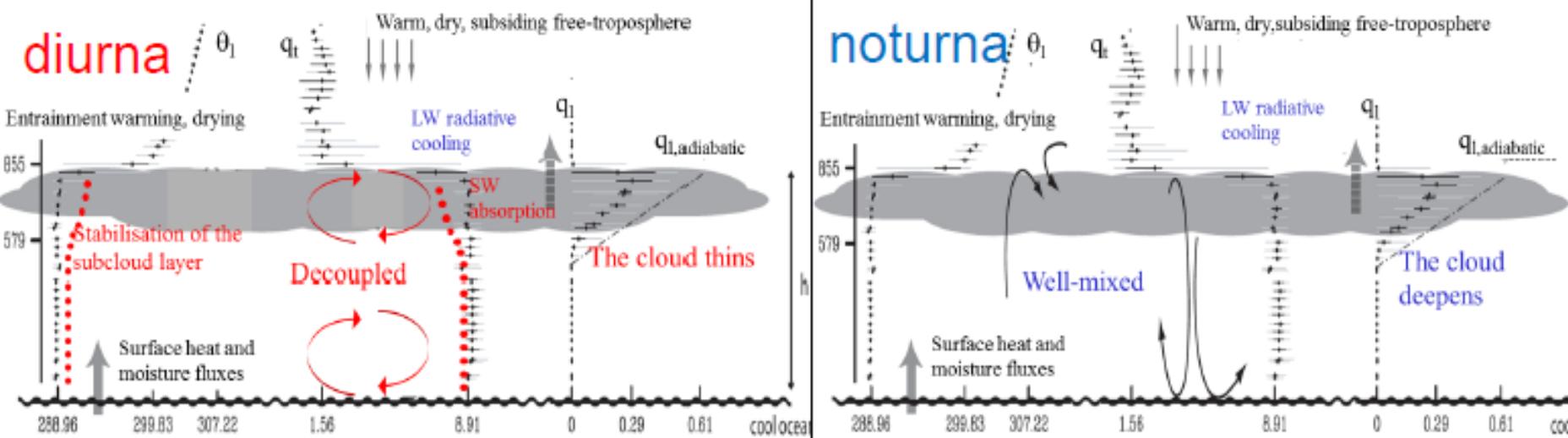
## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? Processos físicos da turbulência na camada limite



# **Fonte de erros nos Processos físicos de turbulência na camada limite planetária**

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

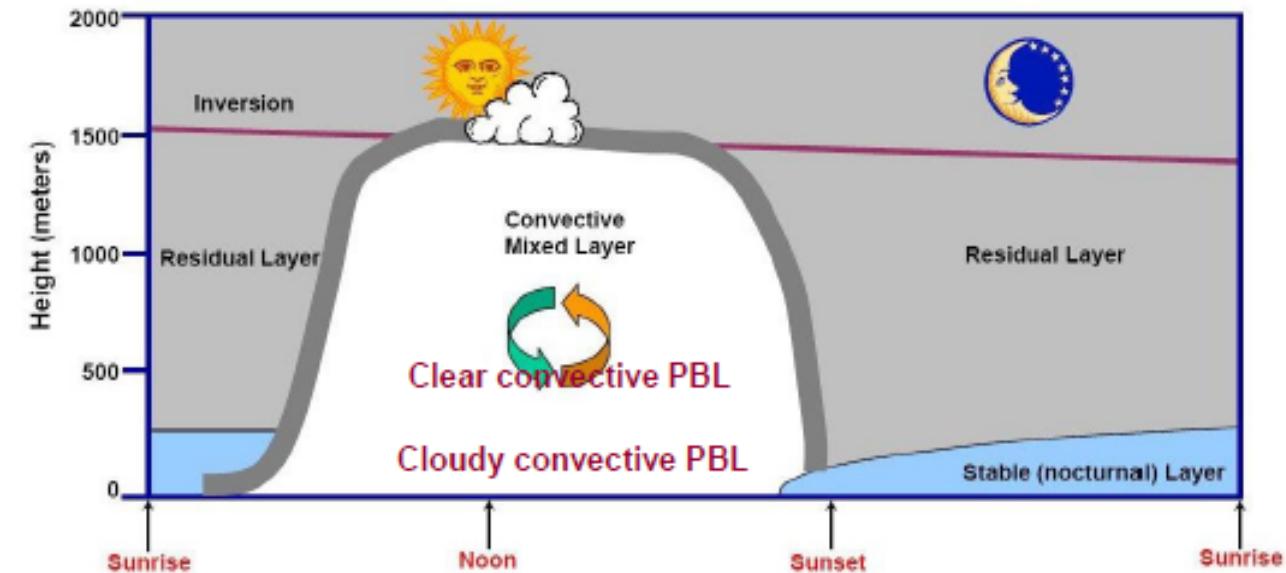
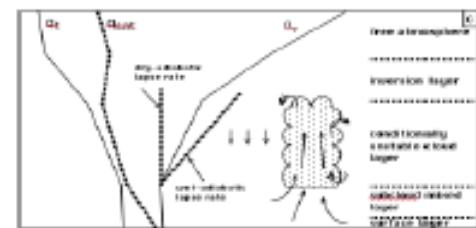
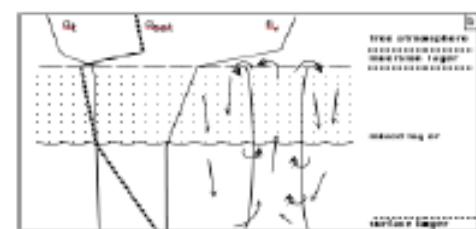
## Processos físicos da turbulência na camada limite



**Como calcular o coeficiente de difusão turbulenta?**  
 $K(x, y, z, ri, \text{cloud}, \text{rad}, \text{entr}, \dots)$



Estratocumulos PBL



Cumulos PBL

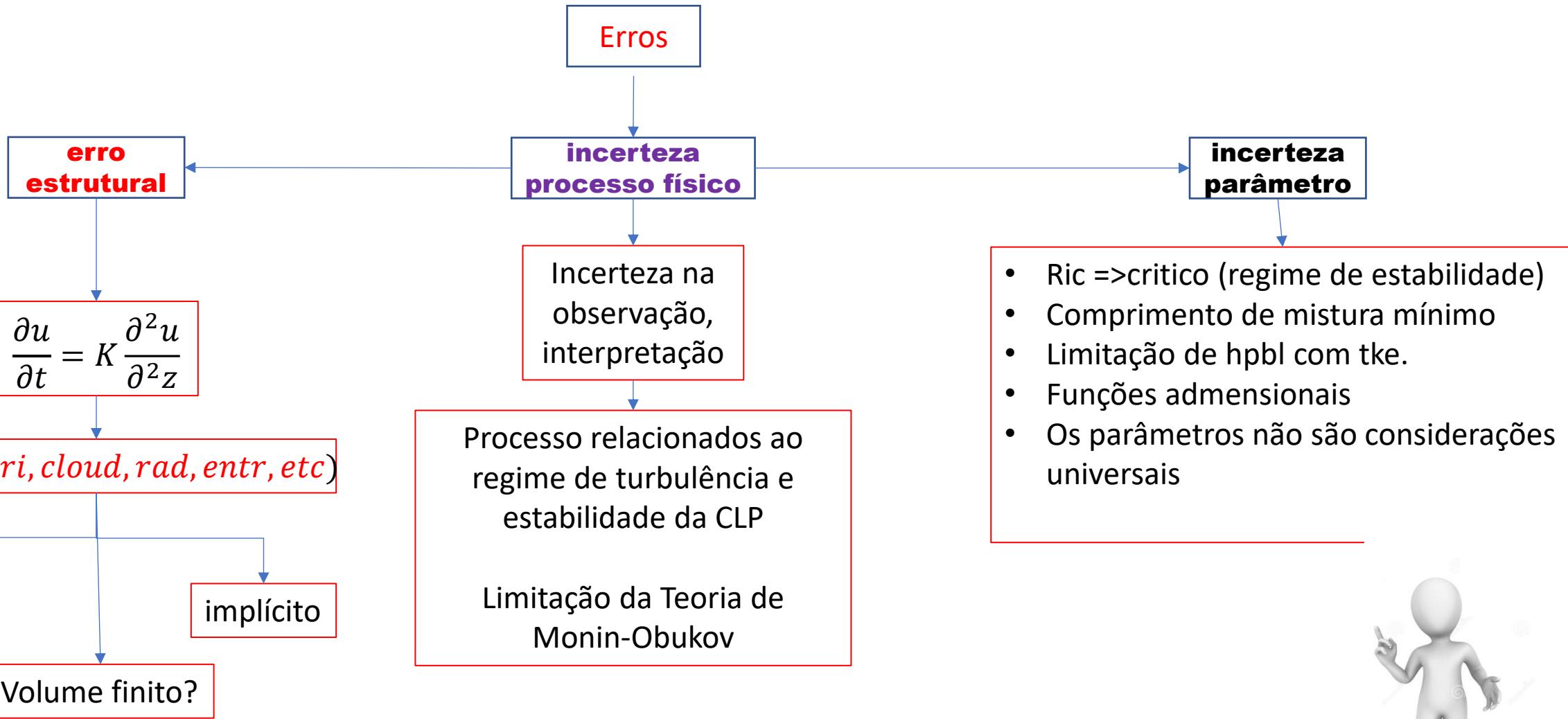
Adapted from Introduction to Boundary Layer Meteorology -R.B. Stull, 1988

Paulo Yoshio Kubota



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos físicos da turbulência na camada limite





# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos físicos da turbulência na camada limite



near-surface



balloon sounding



celiometer

### PBL parameterization

YSU

ACM2

MYJ

MYNN

BouLac

Evaluation

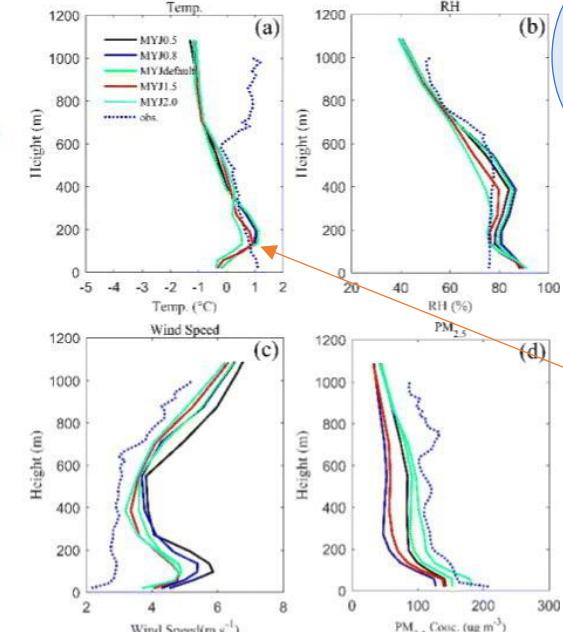
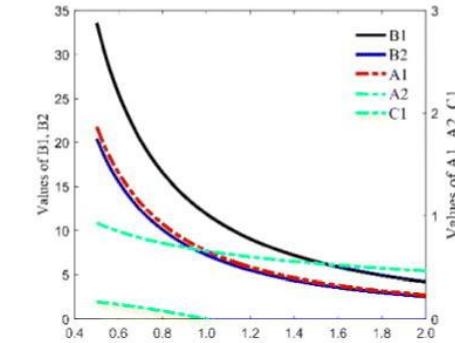
Meteorology

PM<sub>2.5</sub>

K<sub>m</sub>



Winter Haze Simulation



*A formulação do cálculo de K não incorpora corretamente os processos físicos. Os parâmetros podem estar mal calibrados  $K(x, y, z, ri, \text{cloud}, \text{rad}, \text{entr}, \dots)$*





## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? acoplamento entre a superfície e a atmosfera



**Fonte de erros no  
processo de  
acoplamento entre a  
superfície e a  
atmosfera**

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## acoplamento entre a superfície e a atmosfera



$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \overline{u_j} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{v \partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})_{sfc}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})_{tbl}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho} c_p} \frac{\partial \overline{F_j}}{\partial x_j} - \frac{L_v E}{\bar{\rho} c_p} - \frac{\partial (\overline{u'_i \theta'})_{sfc}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i \theta'})_{tbl}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \overline{q_t}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{q_t}}{\partial x_j} = \frac{S_{qt}}{\bar{\rho}} - \frac{\partial (\overline{u'_j q'_t})_{sfc}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_j q'_t})_{tbl}}{\partial x_j}$$

**Como acoplar as equações dos diferentes componentes do sistema terrestre?**

$$\overline{u' w'} = -K_M \frac{\partial \overline{u}}{\partial z}, \quad \overline{v' w'} = -K_M \frac{\partial \overline{v}}{\partial z}$$

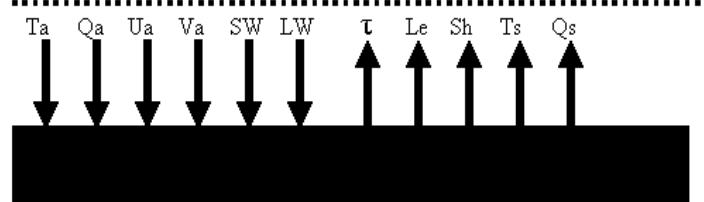
$$\overline{\theta' w'} = -K_H \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z}, \quad \overline{q' w'} = -K_H \frac{\partial \overline{q}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \overline{\phi' w'}}{\partial z} \approx \frac{\partial}{\partial z} \left( -K \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial z} \right) \approx -K \frac{\partial^2 \overline{\phi}}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t}, \frac{\partial Q_a}{\partial t}, \frac{\partial U_a}{\partial t}, \frac{\partial V_a}{\partial t}, \frac{\partial C_a}{\partial t} \Rightarrow z=3$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t}, \frac{\partial Q_a}{\partial t}, \frac{\partial U_a}{\partial t}, \frac{\partial V_a}{\partial t}, \frac{\partial C_a}{\partial t} \Rightarrow z=2$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t}, \frac{\partial Q_a}{\partial t}, \frac{\partial U_a}{\partial t}, \frac{\partial V_a}{\partial t}, \frac{\partial C_a}{\partial t} \Rightarrow z=1$$



137-level model

255	—	$U, V, T, q$
214	—	$U, V, T, q$
176	—	$U, V, T, q$
142	—	$U, V, T, q$
111	—	$U, V, T, q$
82	—	$U, V, T, q$
56	—	$U, V, T, q$
32	—	$U, V, T, q$
10	—	$U, \text{ (blue circle)}, q$
$z_o$	—	$0, 0, T_s, q$



A troca errada de fluxos turbulentos ( $\overline{(u'_i u'_j)}$ ,  $\overline{(u'_i \theta')}$ ,  $\overline{(u'_j q'_t)}$ ) pode produzir processos físicos irrealistas..



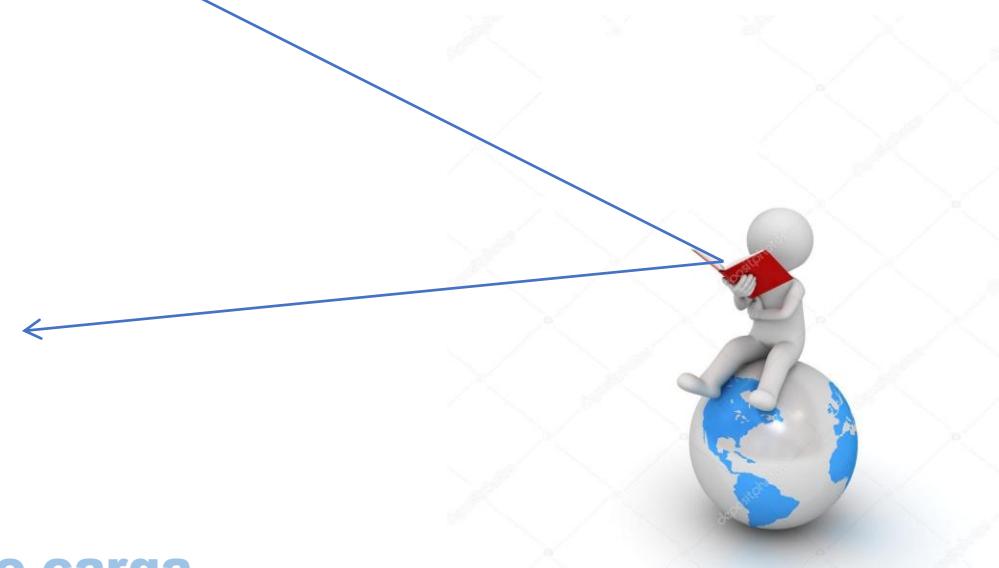
## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? acoplamento entre a superfície e a atmosfera

### Considerações Física

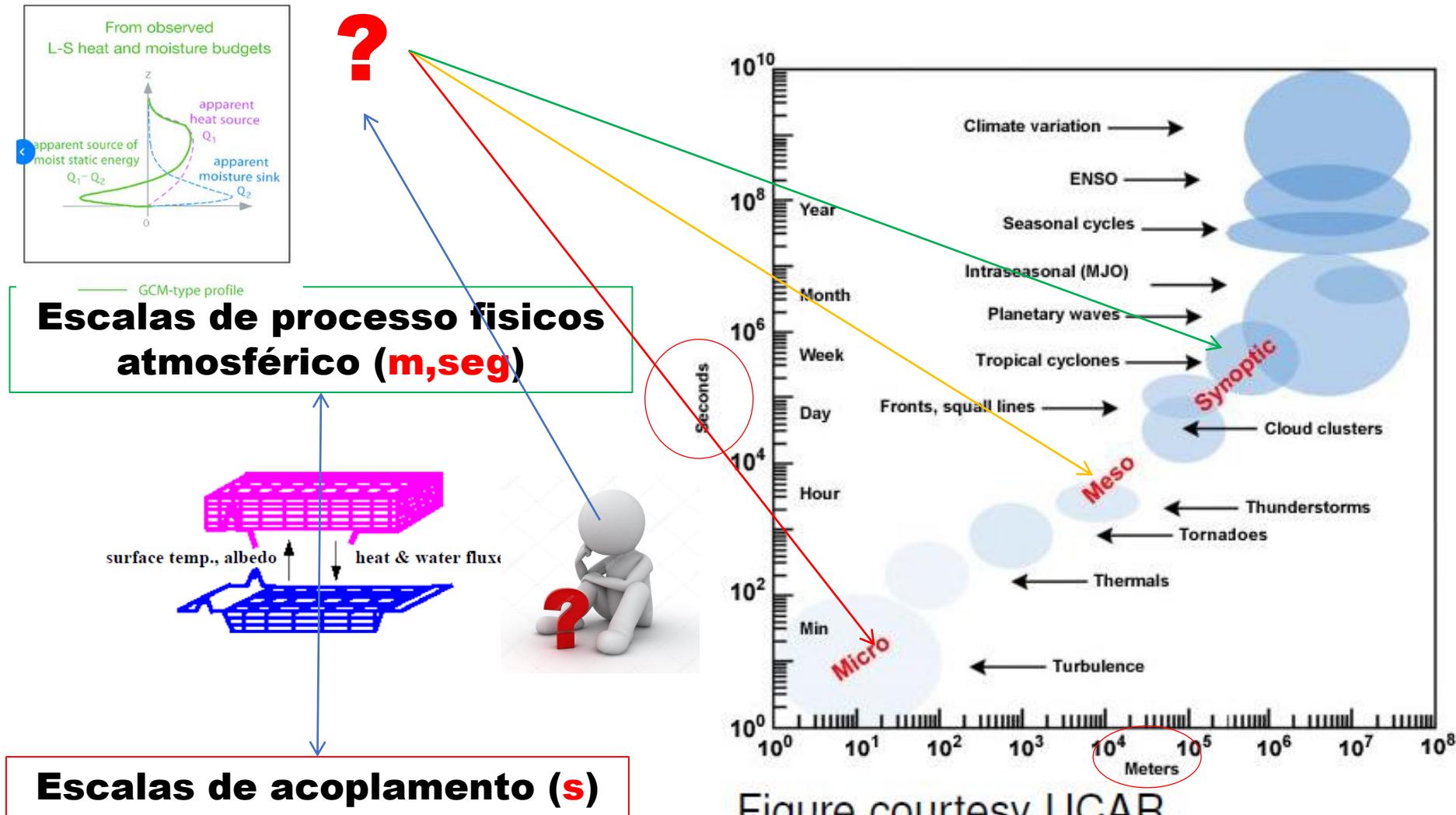
- 1- Detalhamento dos Processos físicos**
- 2- Escalas dos Processos físicos**
- 3-Interação dos processos físicos entre os módulos do sistema terrestre.**

### Considerações Computacionais.

- 1-Custo Computacional**
- 2-Engenharia de Software**
- 3-Paralelismo e balanceamento de carga**
- 4-Evolução dos processadores**



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? acoplamento entre a superfície e a atmosfera

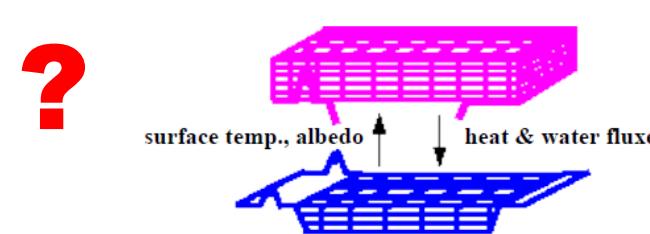




# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? acoplamento entre a superfície e a atmosfera



## Escalas de processo oceanicos



?

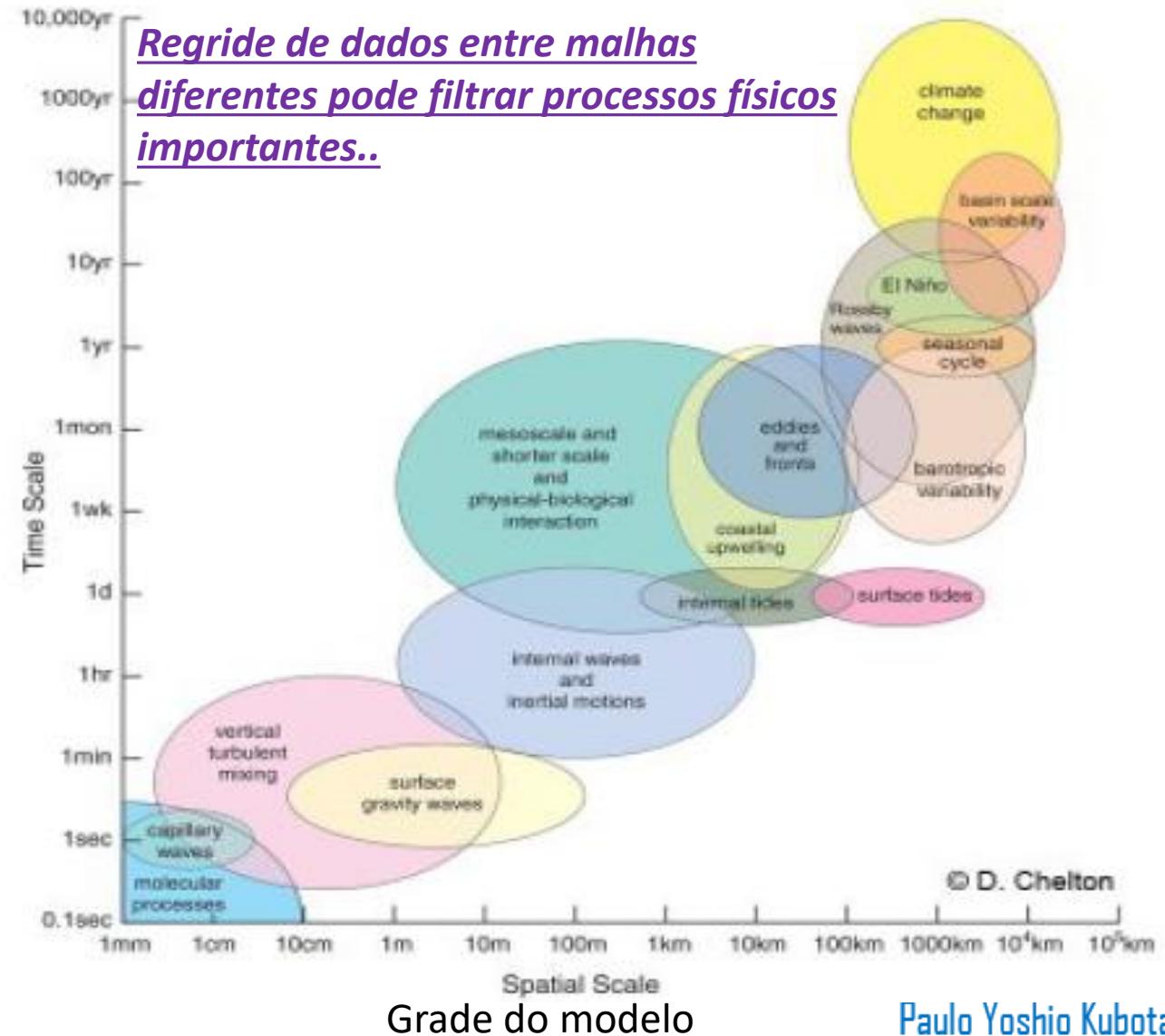
?

Qual a  
Frequência  
de  
acoplamento  
ideal?

?



Passo de tempo de integração



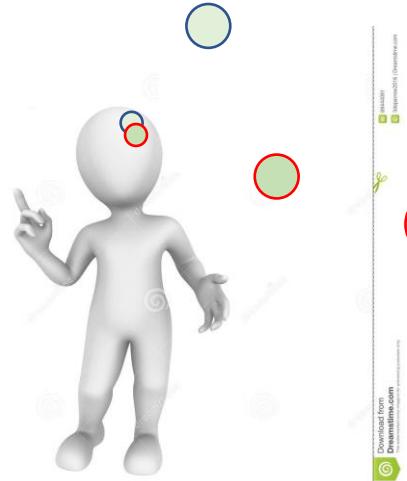


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? acoplamento entre a superfície e a atmosfera

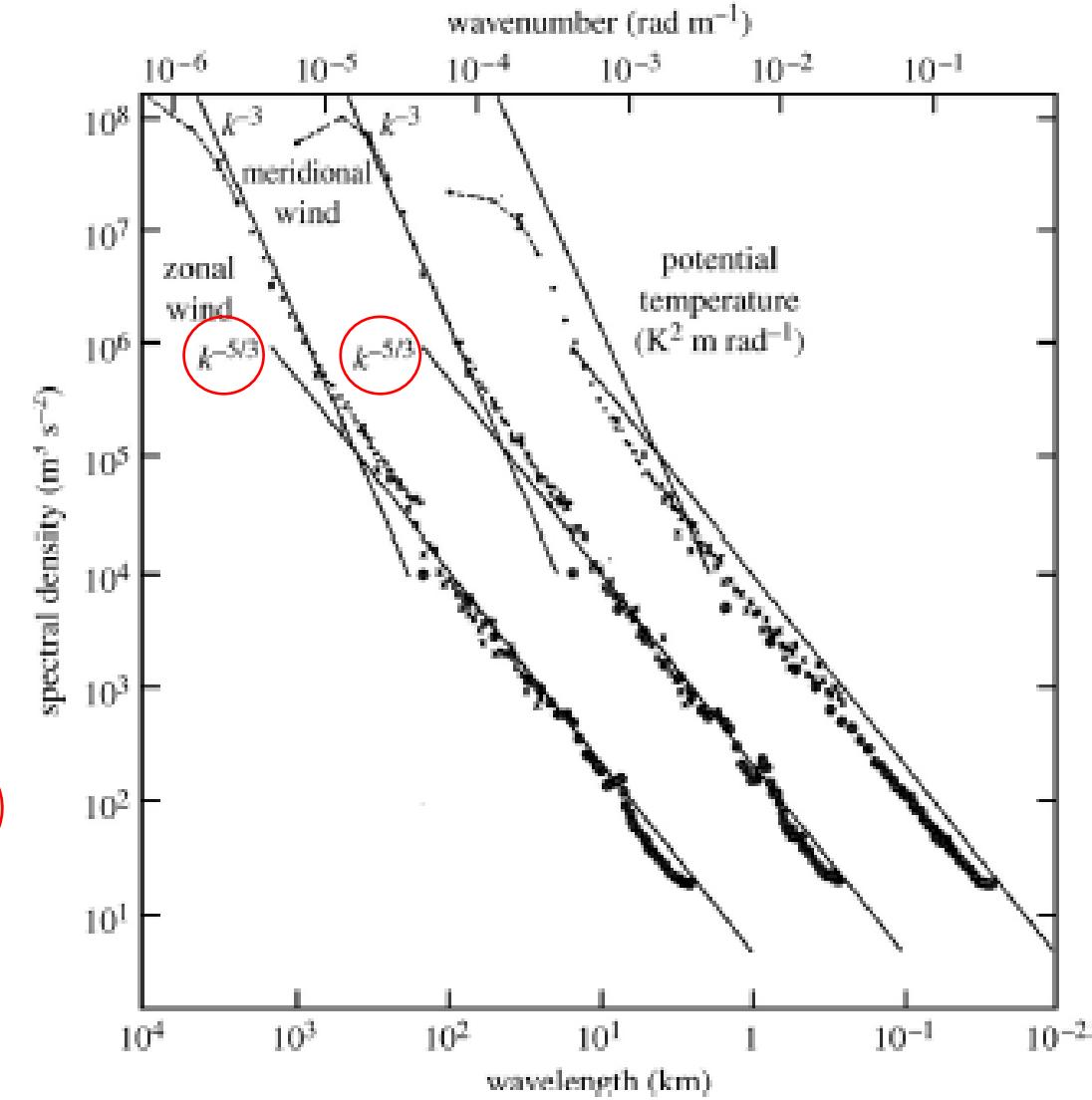


Nastrom e Gage (1985). Nós arbitrariamente truncamos a resolução em alguns ponto para separar "dinâmica" de "física".

Natureza não há separação de escalas "grandes" e "pequenas"

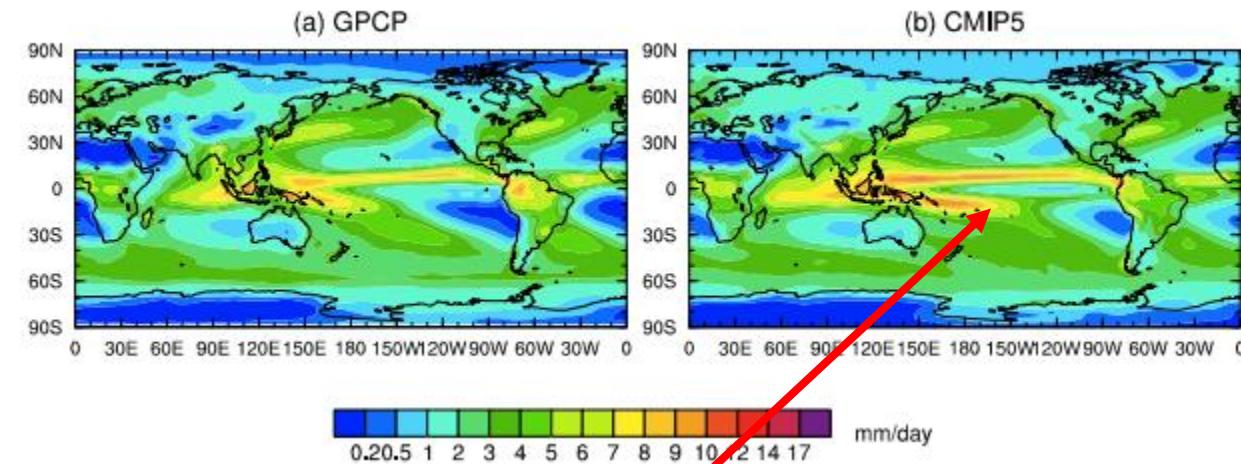


Será que é possível obter o espectro  $k^{-5/3}$  da atmosfera?



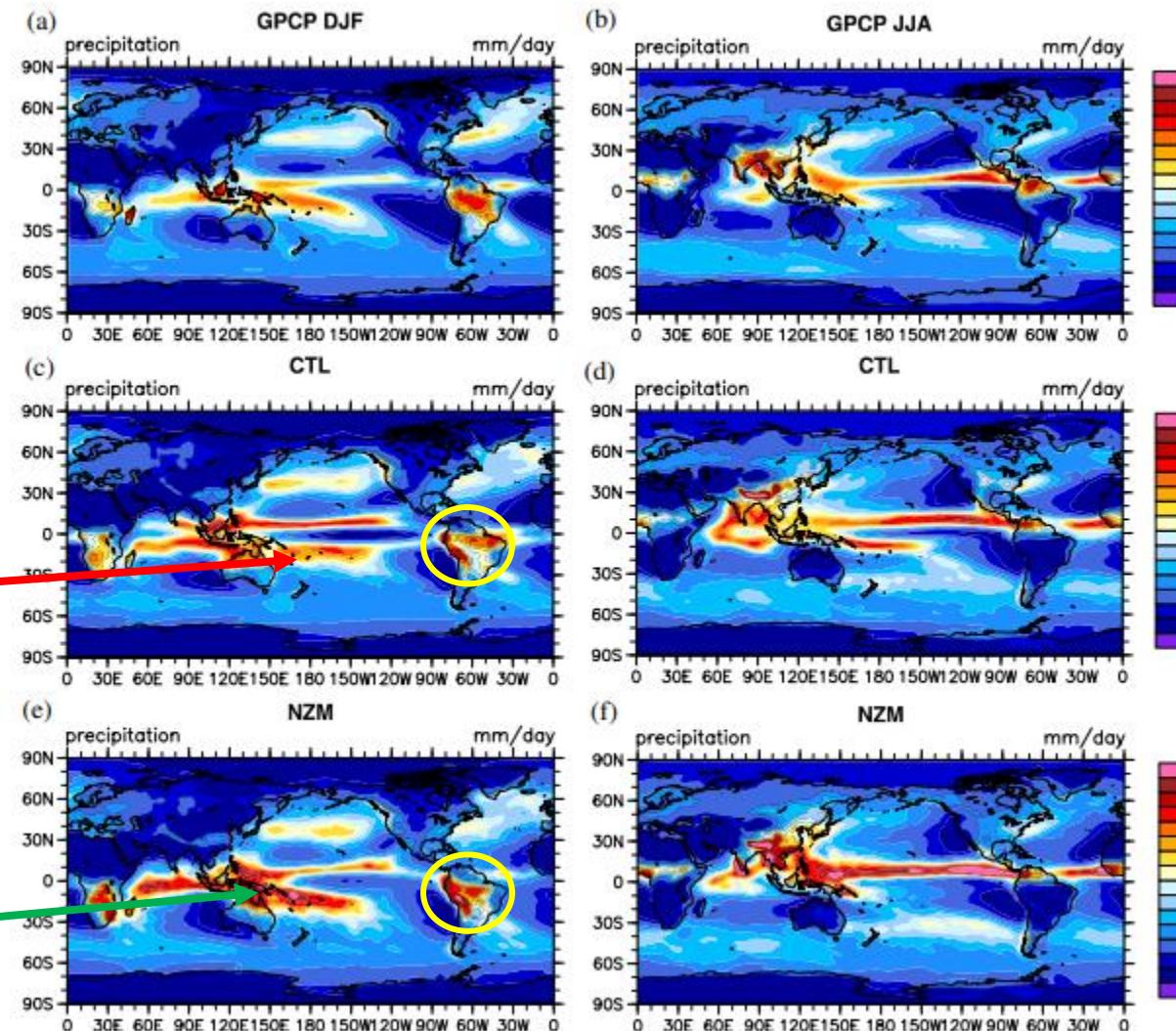


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? acoplamento entre a superfície e a atmosfera



a) GPCP observations (1985-2004) and b) ensemble mean of CMIP5 model simulations. South of the equator precipitation from CMIP5 models shows a clear double ITCZ in central and eastern Pacific

Porque a  
mudança na  
convecção  
mudou a  
ITCZ?



Seasonal precipitation (GPCP) (a) DJF and (b) JJA, from standard CESM1.2.1 (CTL) for (c) DJF and (d) JJA, and from CESM 1.2.1 with a modified convection scheme (NZM) for (e) DJF and (f)

Fábio Yoshio Kubota



**(1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?  
Processos convectivos úmidos (convecção profunda)**



**Fonte de erros nos processos  
convectivos úmidos  
(convecção profunda)**



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (convecção profunda)



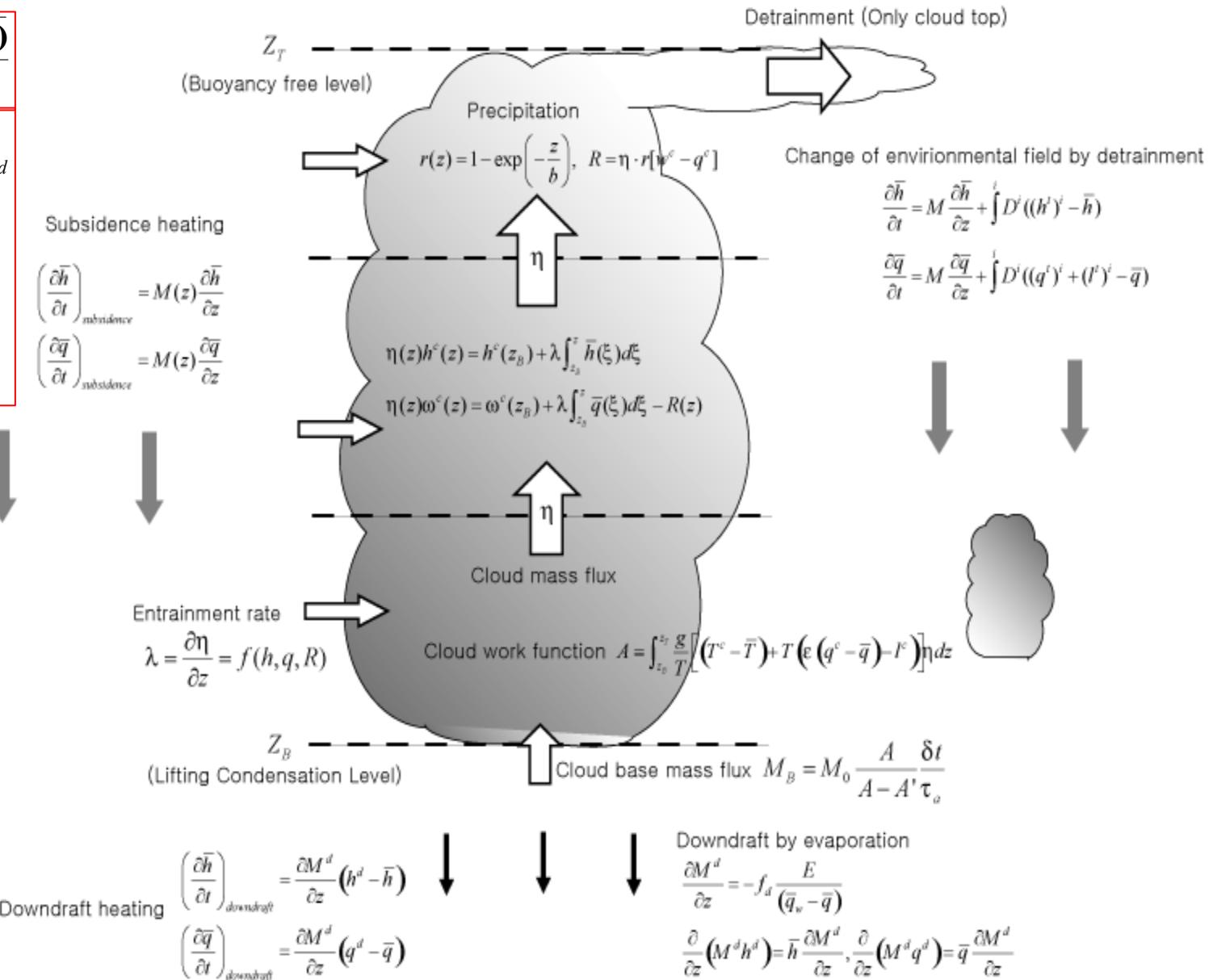
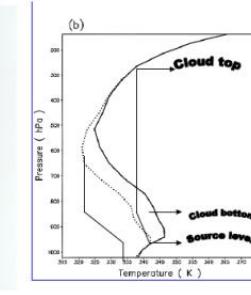
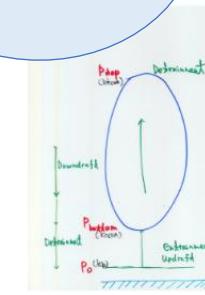
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\nu \partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(u'_i u'_j)}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \nabla \bar{\theta} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}'_i \bar{\theta}' + \frac{L}{\pi c_p} (c - e) + Q_{rad}$$

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \nabla \bar{q}_v - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}'_i \bar{q}'_v - (c - e)$$

$$\frac{\partial \bar{q}_l}{\partial t} = -\bar{v}$$

**Estas são as equações básicas de um esquema de convecção profunda. Entretanto, existem vários parâmetros utilizados nestas equações**



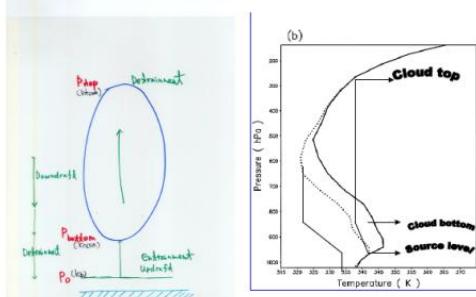
# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (convecção profunda)



### Equações das Plumulas $\sigma_i$

c. Conceptual model



$$\frac{\partial \rho \sigma_i}{\partial t} = E_i - D_i - \frac{\partial M_i}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i s_i}{\partial t} = E_i s_i - D_i s_i - \frac{\partial M_i s_i}{\partial z} + L \rho c_i + \rho Q_{R_i}$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i q_i}{\partial t} = E_i q_i - D_i q_i - \frac{\partial M_i q_i}{\partial z} + \rho c_i$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i l_i}{\partial t} = -D_i l_i - \frac{\partial M_i l_i}{\partial z} + \rho c_i - R_i$$

O  $s_i = c_p T + gz$  é a energia estática seca

O  $Q_R$  é a taxa de aquecimento radiativo

O  $R$  é a taxa de conversão de agua liquida para precipitação

O  $c$  é a taxa de condensação

$\sigma_i$  : fração a área coberta pela i-enésima nuvem

**Considerações sobre Entranhamento, Detranhamento e fluxo de massa devem ser feitas para resolver estas equações.**

**Isto gera Aproximações.**



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Esquema de Fluxo de Massa :"Arakawa-Schubert"(1974)"

**Assume**  $\sigma_c \ll 1$  ,  $\bar{s} = \tilde{s}$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i s_i}{\partial t} = E_i s_i - D_i s_i - \frac{\partial M_i s_i}{\partial z} + L \rho c_i + \rho Q_{R_i}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{s} &= -\nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{s}) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{s}) - \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{s} - \rho \bar{v} \bar{s}) \\ &\quad + M_c \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} - \sum_{dc} \left( \frac{\partial M_i}{\partial z} + \rho \frac{\partial \sigma_i}{\partial t} \right) (\delta_i - \bar{s}) - LE + \theta_R \end{aligned}$$

Adiabatic warming due to hypothetical  
subsidence between the clouds

Detraining clouds      detrainment, entrainment

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{q} &= -\nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{q}) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{q}) - \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{q} - \rho \bar{v} \bar{q}) \\ &\quad + M_c \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} - \sum_{dc} \left( \frac{\partial M_i}{\partial z} + \rho \frac{\partial \sigma_i}{\partial t} \right) (q_i - \bar{q}) - E \end{aligned}$$

### Spectral cloud ensemble

$$M_c(z) = \int_0^{\lambda_{\max}} m(z, \lambda) d\lambda$$

subensemble  
mass flux of between  $\lambda$  and  $d\lambda + \lambda$

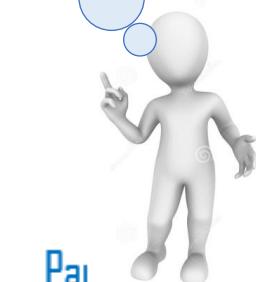
$$= \int_0^{\lambda_{\max}} m_B(\lambda) \eta(z, \lambda) d\lambda$$

Mass flux at cloud base

$$\eta(z, \lambda) \equiv \frac{m(z, \lambda)}{m_B(\lambda)}$$

; normalized subensemble mass flux

Como determinar  
uma função que  
descreve o fluxo de  
massa...



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (convecção profunda)



### Esquema de Fluxo de Massa :"Arakawa-Schubert"(1974)"

$$\frac{\partial m(z, \lambda)}{\partial z} = \mu(z, \lambda) \eta(z, \lambda)$$

$\eta(z, \lambda) = e^{\lambda(z - z_B)}$  ; mass flux profile

Cloud work function

$$A(\lambda) = \int_{z_B}^{z_D(\lambda)} \eta(z, \lambda) g \frac{T_c(z, \lambda) - \bar{T}(z)}{\bar{T}} dz$$

Q-G equilibrium

$$\frac{dA(\lambda)}{dt} = \underbrace{\frac{dA(\lambda)}{dt}}_{\text{Large-scale forcing}} \Big|_{LS} + \underbrace{\frac{dA(\lambda)}{dt}}_{\text{Adjustment}} \Big|_C ; 0$$

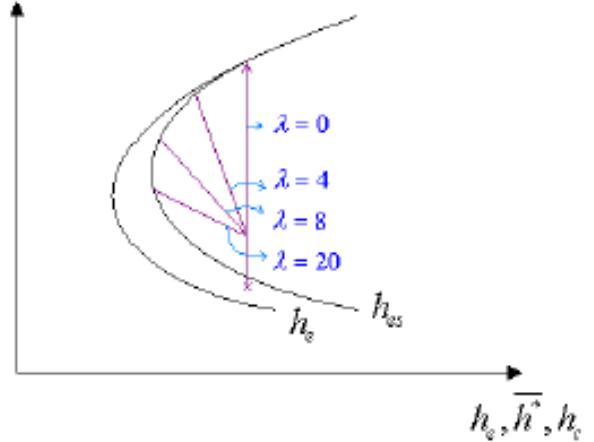
>0 : destabilized      <0 : stabilization

Kernel : Cloud scheme kinetic energy

$$K_{ij} = \frac{A'_i - A_i}{(m_B \Delta t)} \quad \sum_j^{i_{\max}} K_{ij} (m_B \Delta t)_j + F_i = 0$$

$\Rightarrow m_B$

compute  $\frac{\partial \bar{s}}{\partial n}$   $\frac{\partial \bar{q}}{\partial m}$  with  $n, m$



A suposição da  
aproximação de quase  
equilíbrio.  
É uma boa hipótese?...





## ***d. Parâmetros tunáveis no SAS***

- **evaflg(true)** : turn on the evaporation and suppress downdraft
  - **betal (s)** : portion of downdraft reaching the surface over land and oceans (bigger : cooler and moister near the surface)
  - **xmbmax** : maximum cloud base mass flux to prevent blowup in clouds
  - **edtmaxl (s)** : cumulus development threshold over land and oceans (bigger : more cumulus)
  - **alphal(s)** : portion of precipitation in subcloud layer over land and oceans (bigger ---> weak convection)
  - **evef** : evaporation coefficient (bigger--> smaller precip)
  - **pdetrn** : threshold of cloud depth for downdraft (200 mb)
  - **w1-w4** : are functions of dx
  - **w1, w2** : minimum and maximum upward velocity at cloud base to scale convective time scale (C2)
  - **w3, w4** : minimum and maximum upward velocity at cloud base to scale climatological A0 (C1)

**O Problema é que os parâmetros não são universais...Portanto, podem produzir erros**

**O Problema é que os parâmetros não são universais...Portanto, podem**

- **alpha(s)** : porti **produzir erros** in subcloud layer over land and oceans (bigger ---> weak convection)

- **evef** : evaporation coefficient (bigger--> smaller precip)

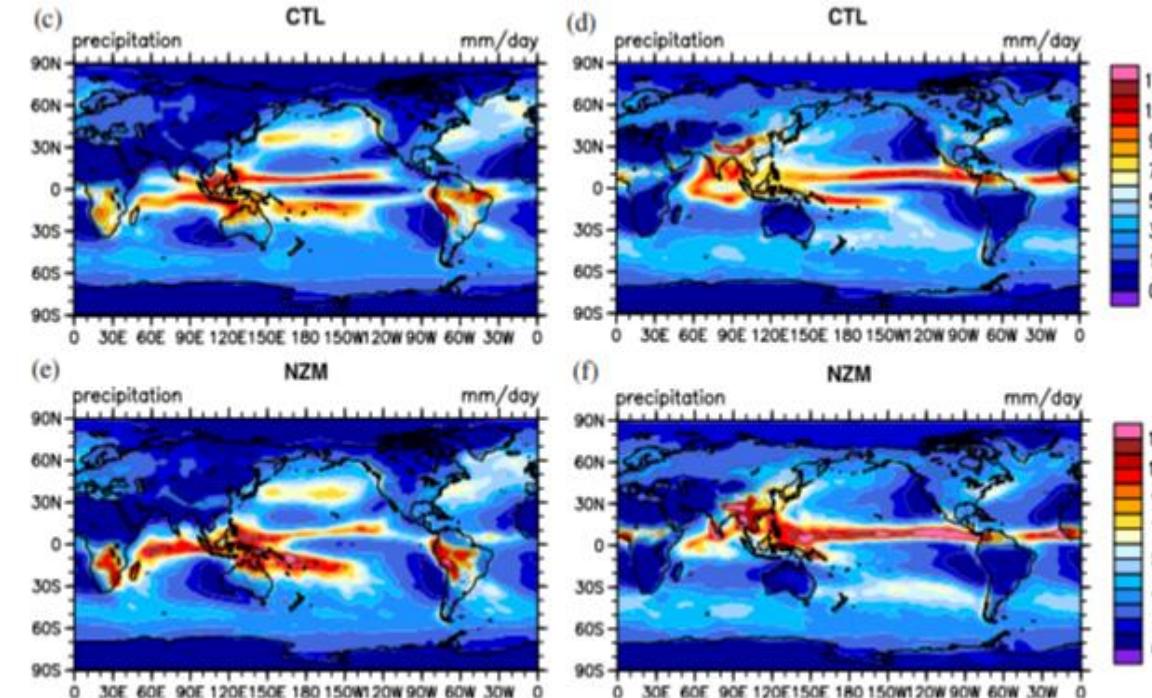
- **pdetrn** : threshold of cloud depth for downdraft (200 mb)

- $w_1-w_4$  : are functions of  $dx$

**w1 w2** : minimum and maximum upward velocity at cloud

$\tau_{\text{C3}}$ : convective time scale

base to scale convective time scale (CZ)  a w3\_w4



Seasonal precipitation CESM1.2.1 (CTL) for  
(c) DJF and (d) JJA, and from CESM 1.2.1  
**with a modified convection scheme (NZM)** for  
(e) DJF and (f) JJA





**(1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?  
Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)**

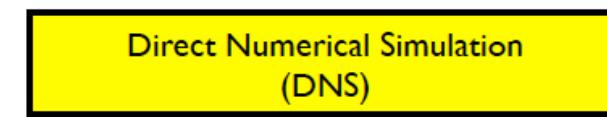
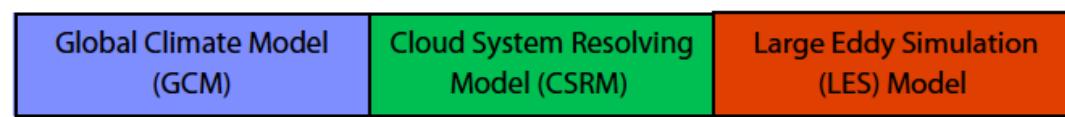
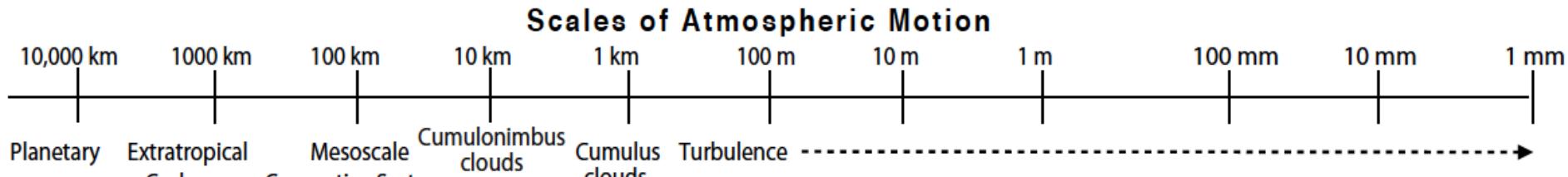


**Fonte de erros nos processos  
convectivos úmidos  
(microfísica de nuvens)**



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)



As definições das escalas são muito importantes nos fenômenos que desejam simular...



*parameterization problem:*  
microfísica parametrizada em nuvens (sub)resolvidas



*parameterization<sup>2</sup> problem:*  
microfísica parametrizada junto com a parametrização de nuvens (macrofísica)

Nas escalas de CRM e LES ainda parametrizamos os processos físicos das nuvens



microfísica em sua escala nativa (gotículas, partículas,)



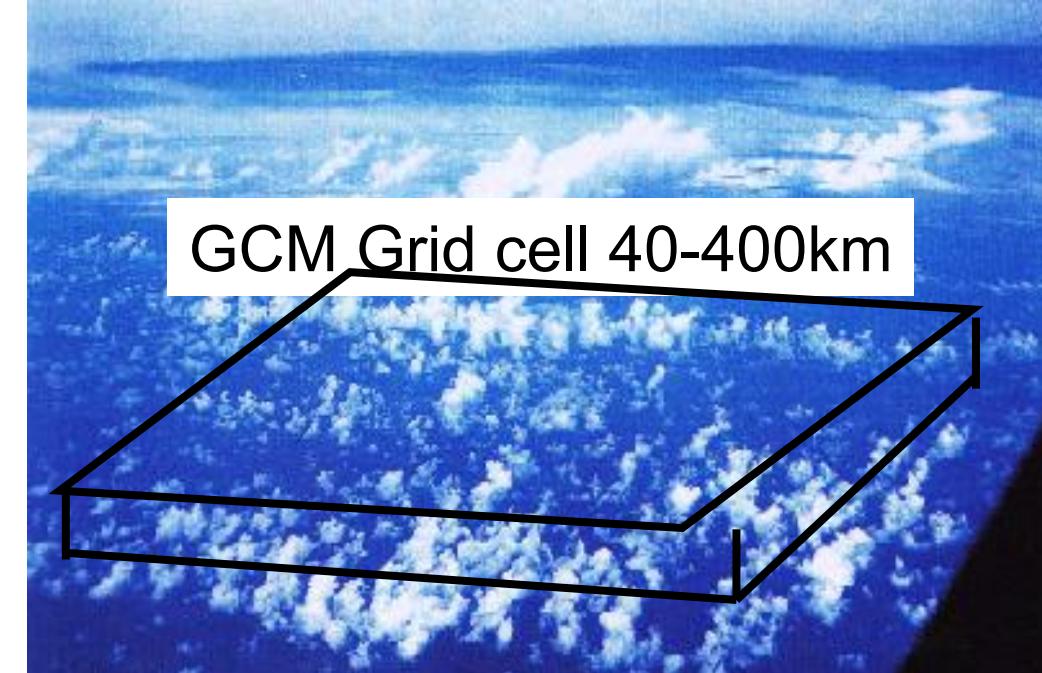
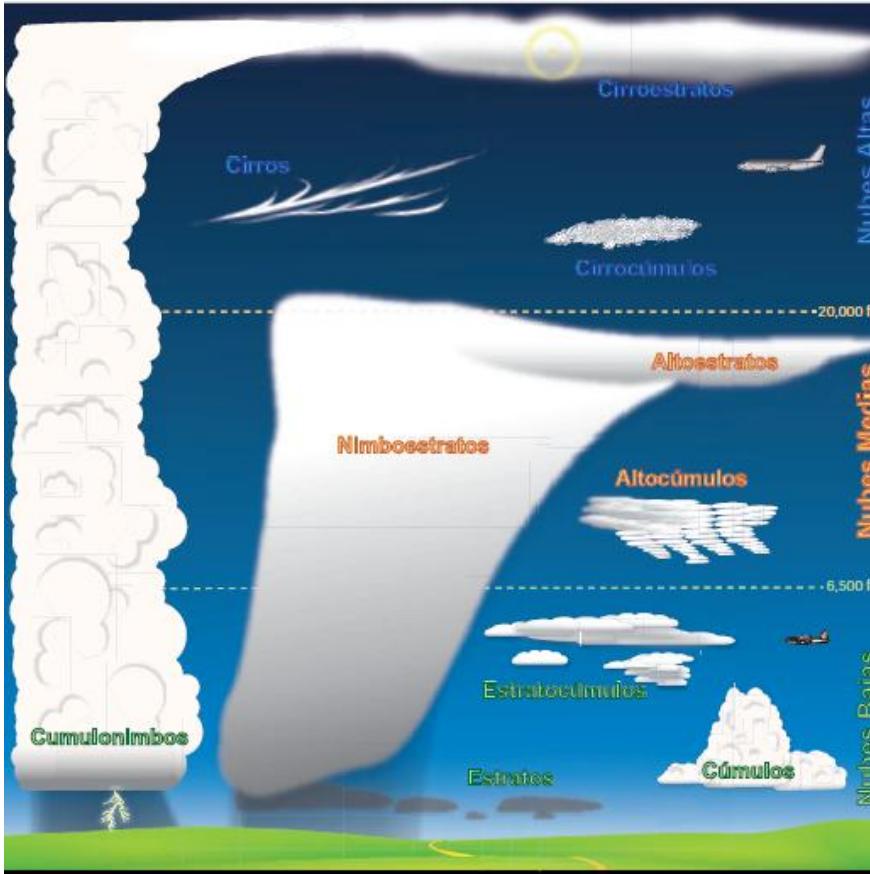
Microfísica da nuvem em todas as escalas

Paulo

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

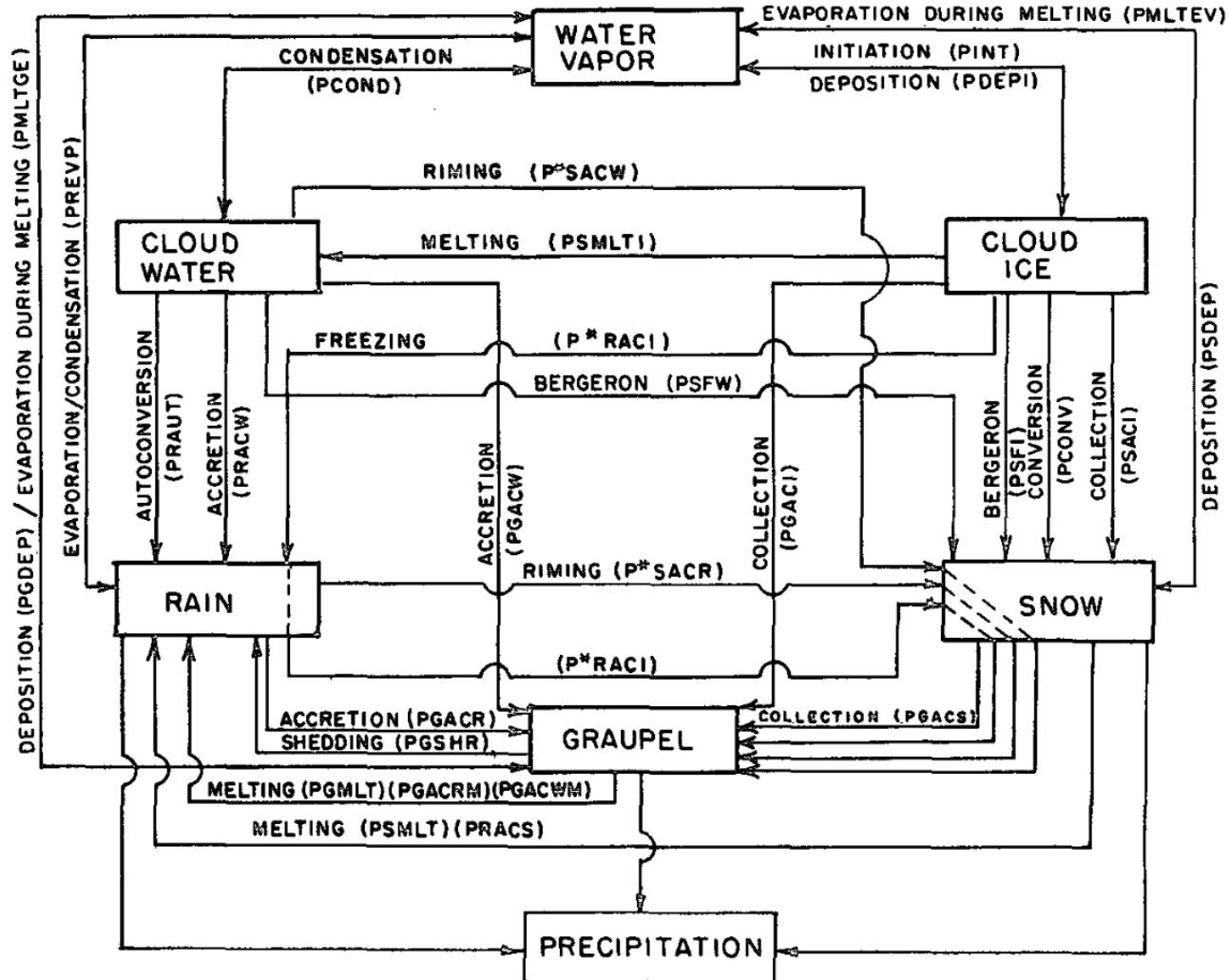
## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)

Muitas das nuvens observadas e especialmente os processos físicos dentro delas são de tamanho subgrade (horizontal e verticalmente)



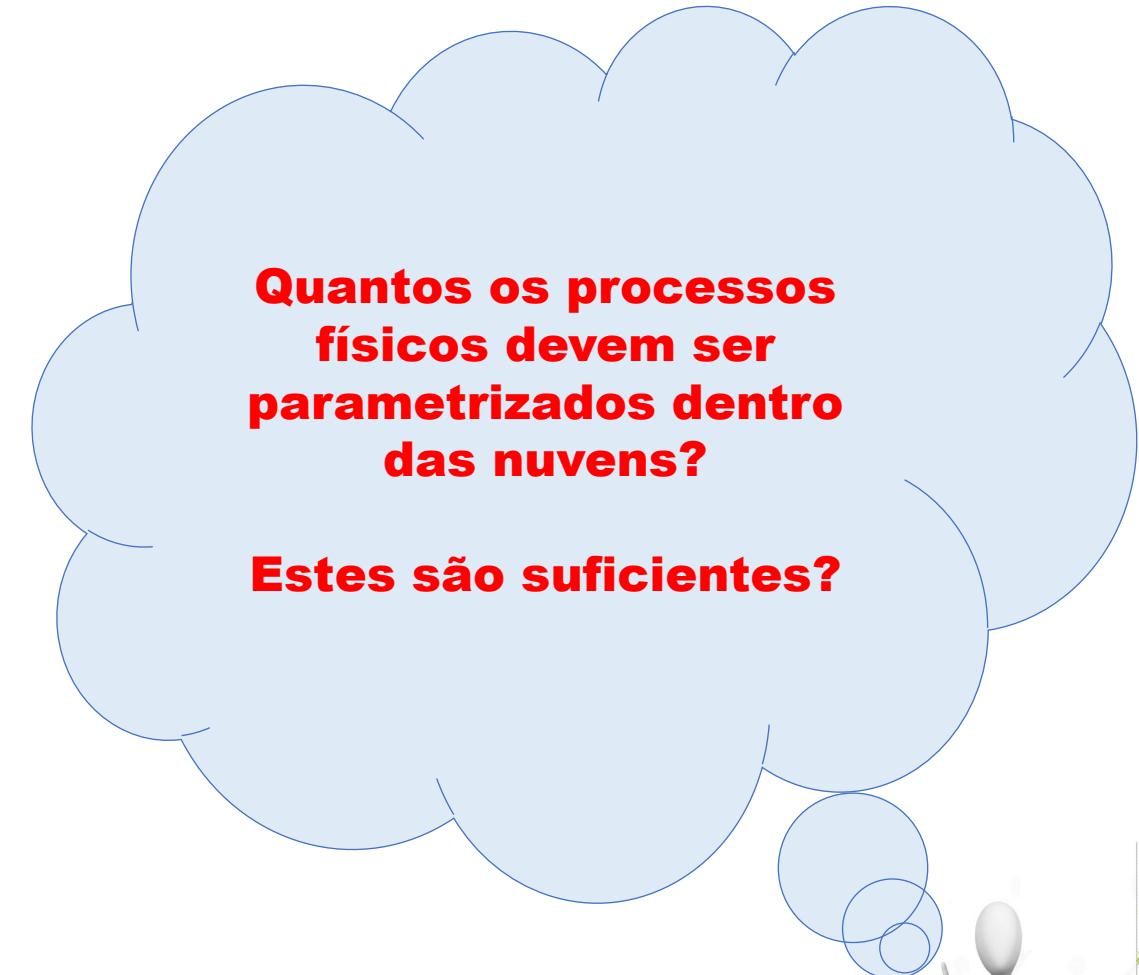
# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)



Quantos os processos  
físicos devem ser  
parametrizados dentro  
das nuvens?

Estes são suficientes?



Representação Esquemática dos processos de nuvens e precipitação

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

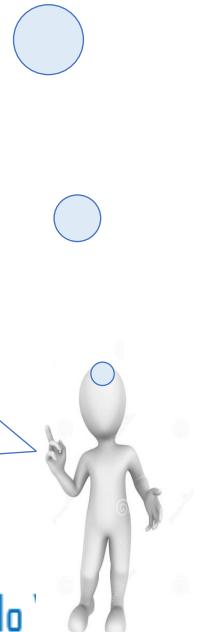
## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)



### A microfísica de nuvem deve considerar estes processos físicos básicos

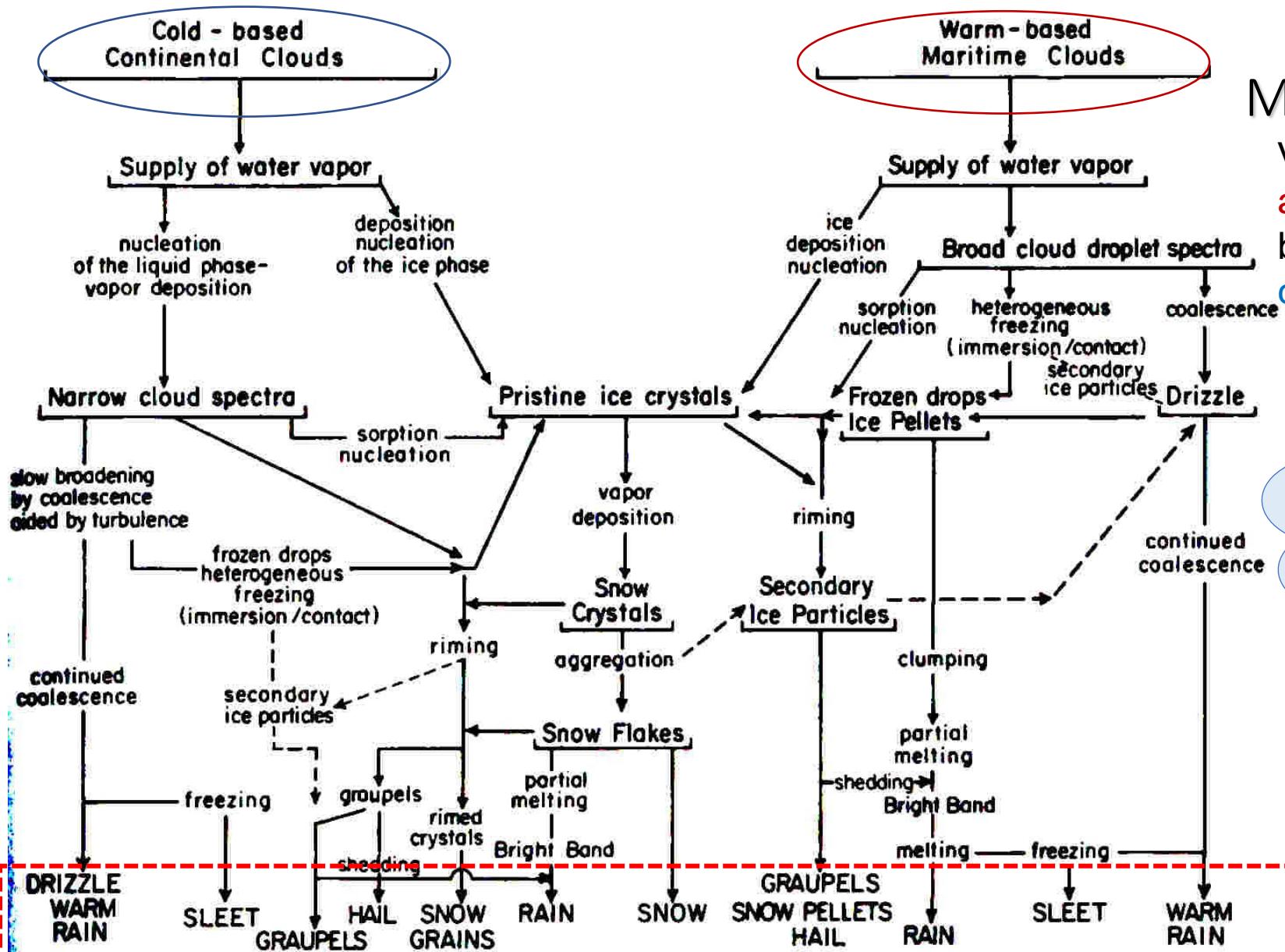
- ativação de partículas -superfície de pressão de vapor de saturação
- Nucleação Homogênea de gota líquida
- Nucleação Heterogênea de gota líquida CCN
- Processo de Bergeron
- Nucleação de Gelo
- Nucleação de Gelo CCN
- Crescimento por difusão (água)
- Colisão-Coalescência
- “Autoconversão” de gotas de nuvem em gotas de chuva
- Agregação
- acreção
- Riming
- Derretimento
- Evaporação
- Precipitação
- Velocidade terminal
- Distribuições de tamanho de partículas (PSDs)

Paulo



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)



Microfísica: Sistema Complexo!

Visão geral de

- Microfísica de Fase Quente  $T > 273K$
- Microfísica de fase mista  $250K < T < 273K$
- Gelo puro Microfísica  $T < 250K$

Quais são os  
produtos gerados  
pelos esquema de  
microfísica de  
nuvens?

Paulo

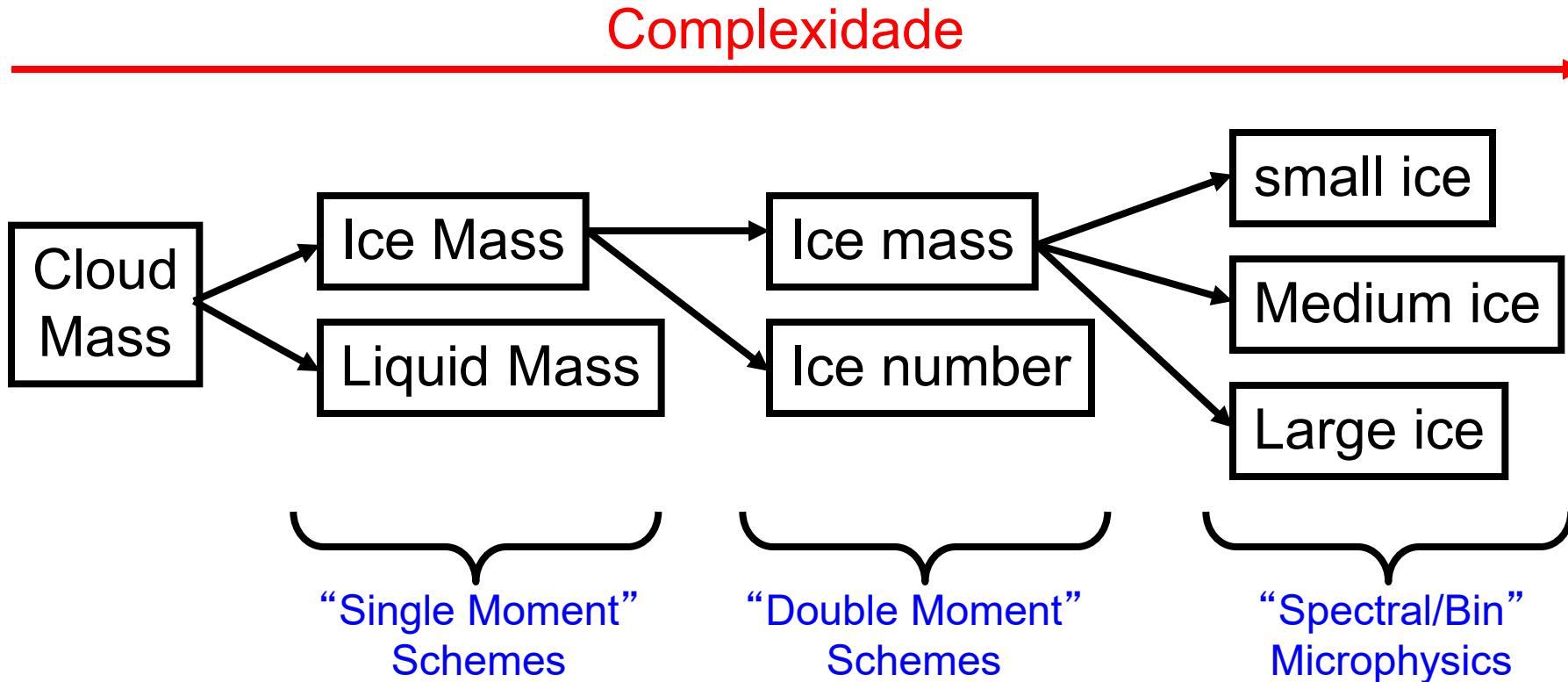


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)



O que queremos representar?  
Há necessidade de uma microfísica complexa?



Quais são os  
produtos  
gerados pelos  
esquema de  
microfísica de  
nuvens?

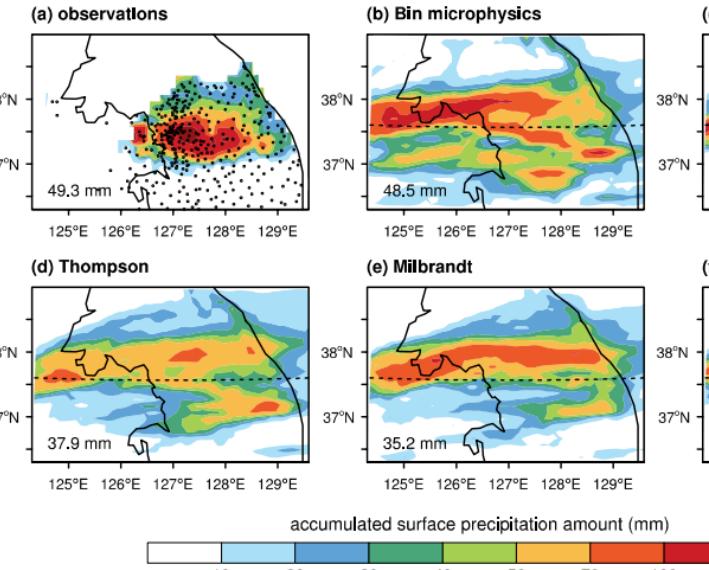
A maioria dos GCMs possui apenas esquemas simples de momento único

Paulo

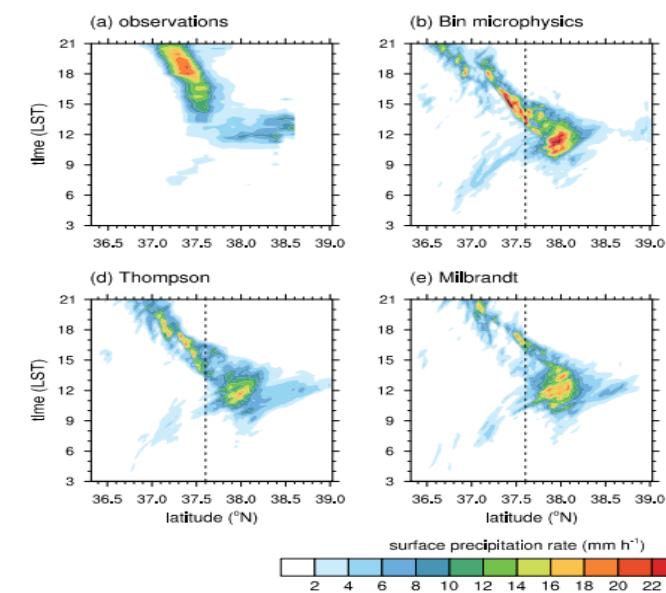
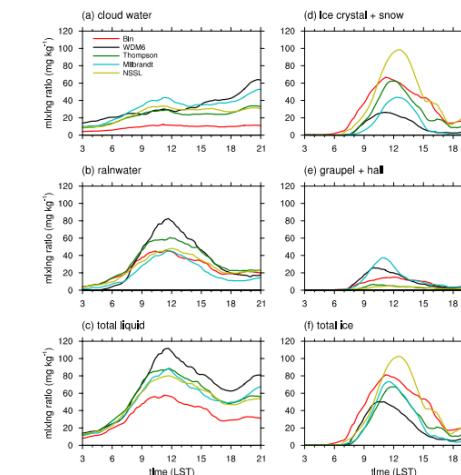
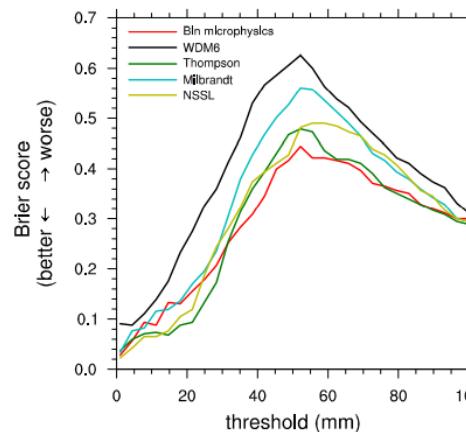


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

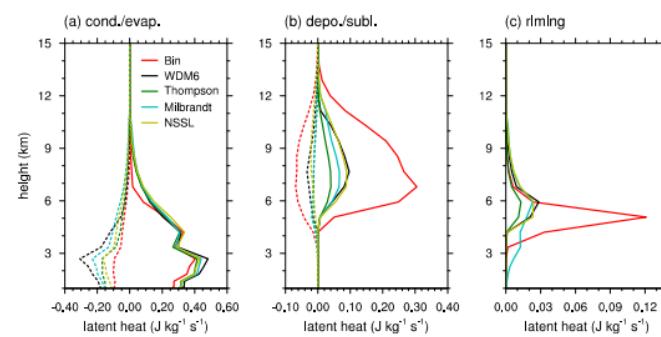
## Processos convectivos úmidos (microfísica de nuvens)



The 18-hr accumulated surface precipitation amount



Latitude–time diagrams (Hovmöller diagram)



a) condensação e evaporação, (b) deposição e sublimação, e (c) riming. Em (a), linhas sólidas e tracejadas correspondem à condensação e evaporação, respectivamente. Em (b), linhas sólidas e tracejadas correspondem a deposição e sublimação, respectivamente

Paulo





## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

---



**Fonte de erros na  
parametrização de arrasto de  
ondas de gravidade**



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? ondas de gravidade de convecção

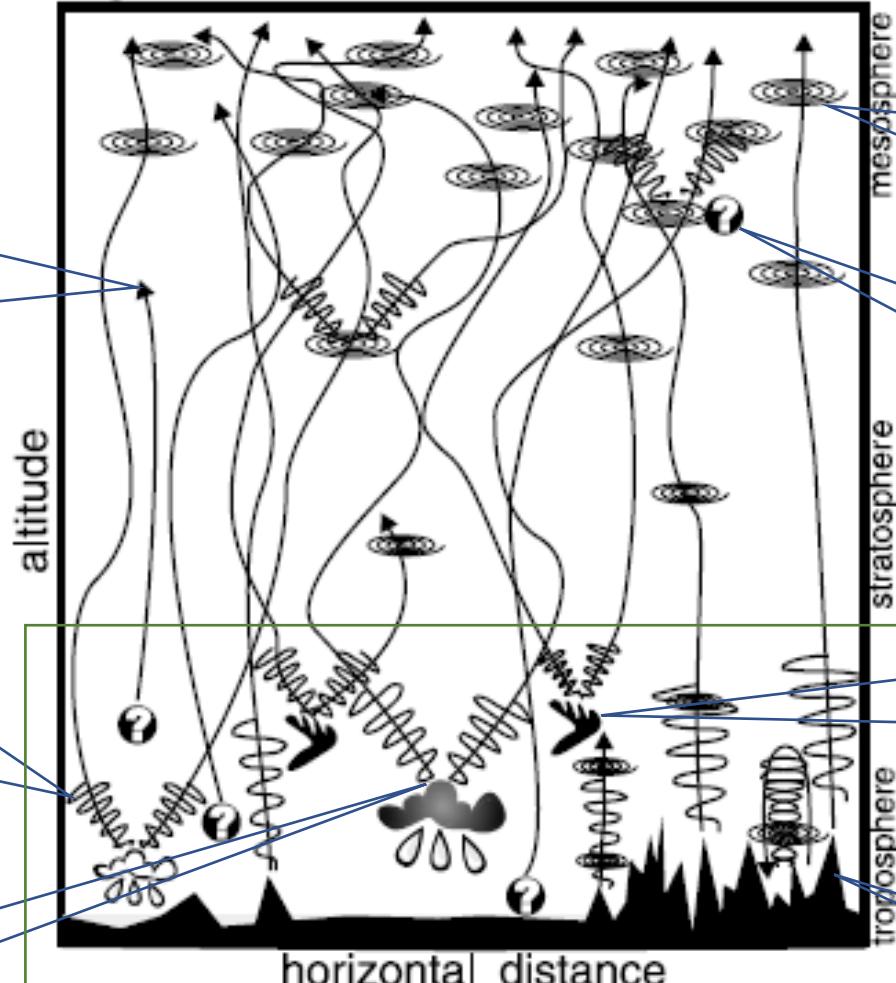


Onda de Gravidade da Atmosfera são processo não resolvidos pelos modelos

Propagação  
do Grupo de  
ondas de  
Gravidade

Amplitude e  
forma das  
ondas de  
Gravidade

Convecção  
profunda



Fontes de GW

Quebra de  
GW e  
Arrasto

Fontes não  
definida de  
GW

Instabilidade  
das correntes  
de Jatos

Orografia

Os modelos  
conseguem  
resolver ou  
parametrizar  
todas a fontes,  
propagação e  
dissipação das  
ondas de  
gravidade?

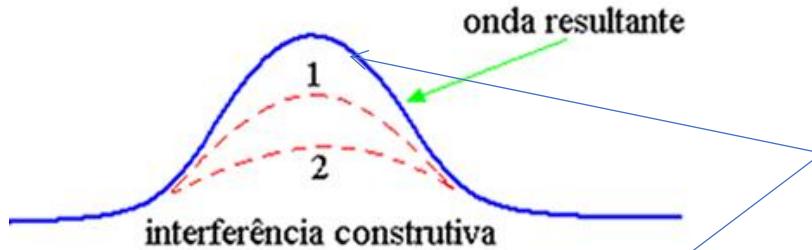


Paulo

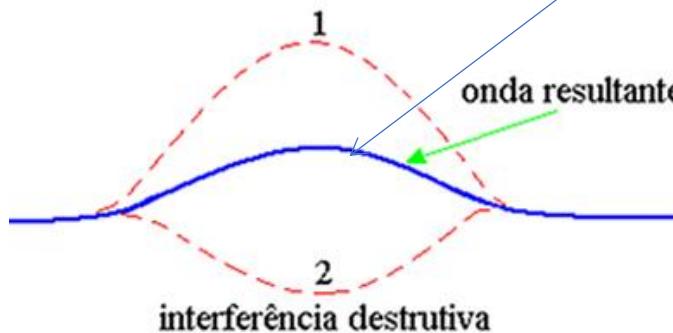
## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? ondas de gravidade de convecção

Onda de Gravidade da Atmosfera são processo não resolvidos pelos modelos

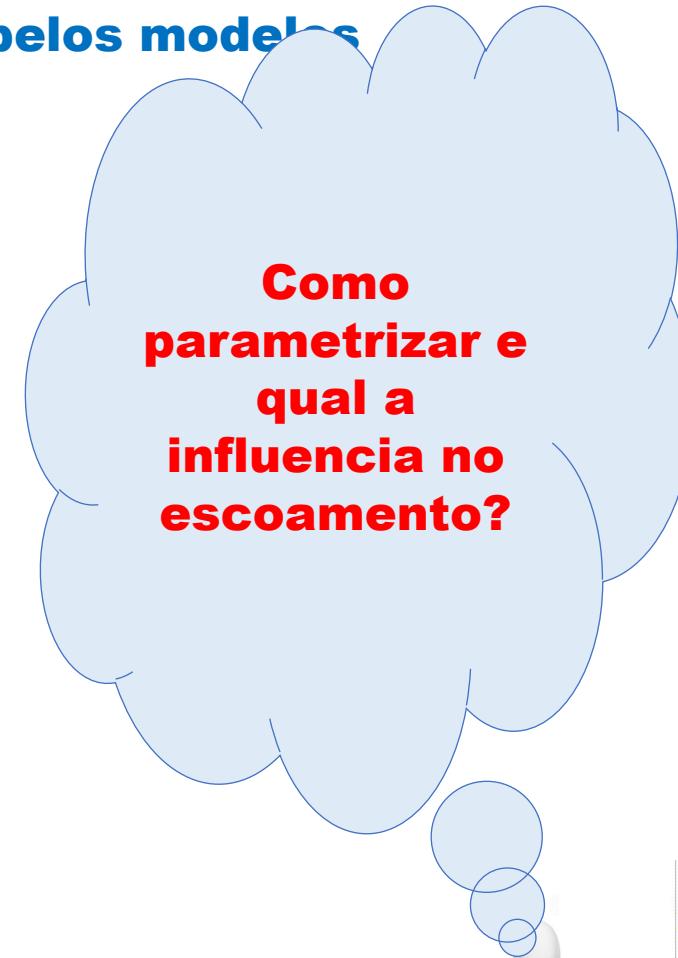
A dissipação de **GW** (5 - 500km) produz uma força sobre escala sinótica que atua no escoamento atmosférico



Esta interação é conhecida como  
**Arrasto Por Onda De Gravidade**  
**GWD**



O Termo Drag implica na desaceleração do escoamento onde a força sobre o escoamento produzida pela dissipação de GW sempre acelera ou desacelera (retarda ou reverte) os escoamento.

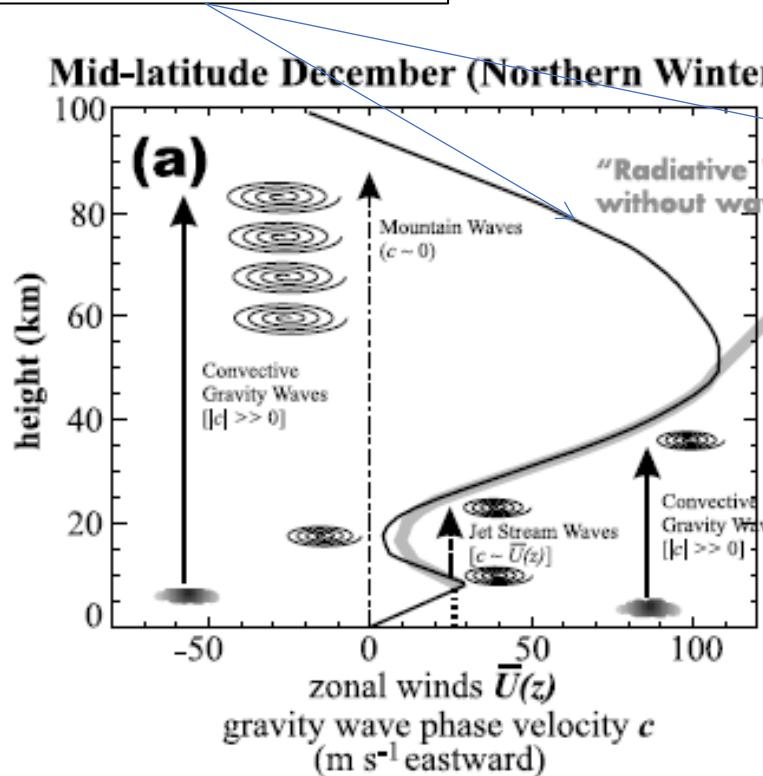


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? ondas de gravidade de convecção

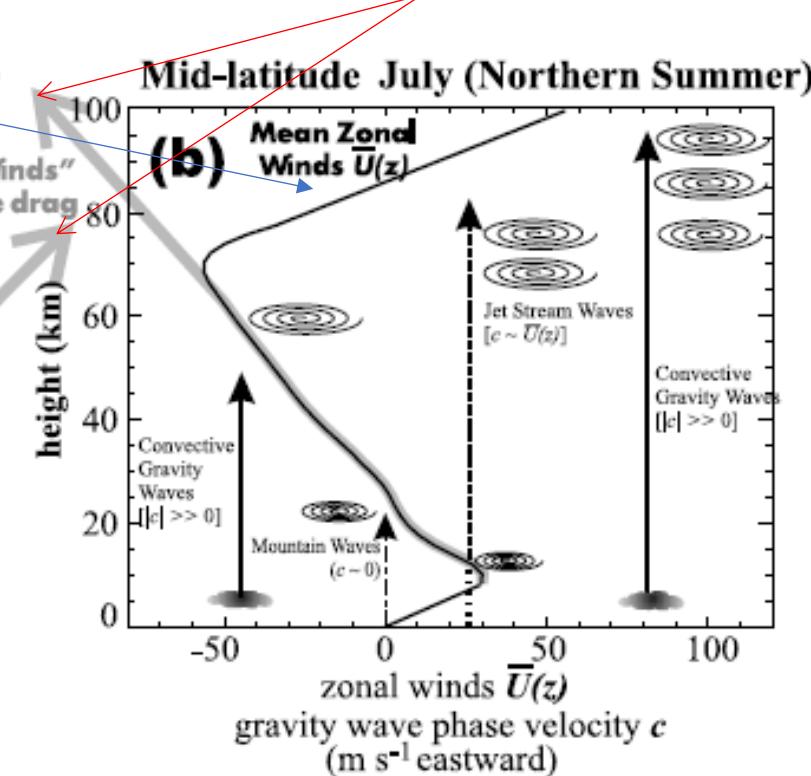
**GWDO** : GWD induzida pela Orografia

**GWDC** : GWD induzida pela Convecção

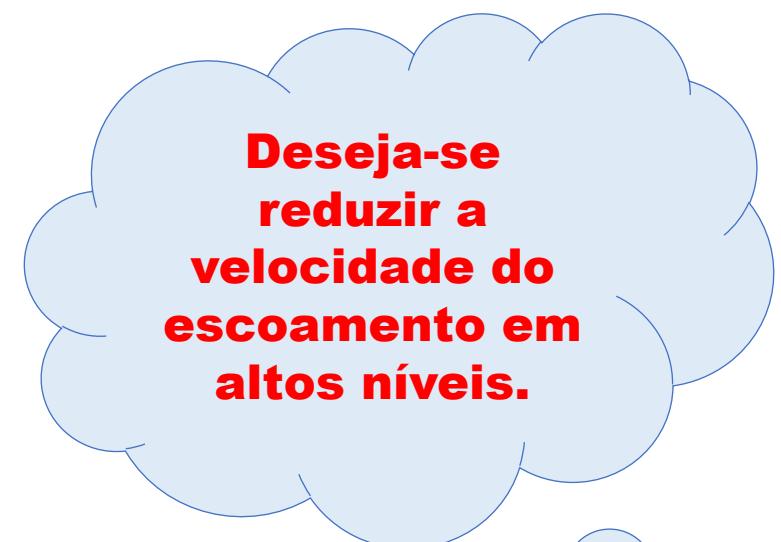
## Vento observado



## Vento Sem Parametrização do GWD



## Atmos em Equilíbrio Radiativo



$c = 0$  Ondas de gravidade de Montanhas

$|c| \gg 0$  Ondas de gravidade Convectiva

$c \sim \bar{U}(z)$  Ondas de gravidade de Correntes de Jatos



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? ondas de gravidade de convecção

- Modelo com resolução T62L28 X reanalise 2(RA2)
- 1996, 1997, 1999 DJF  
(Normal, ElNino, Lanina yr \* 3 ensemble member )

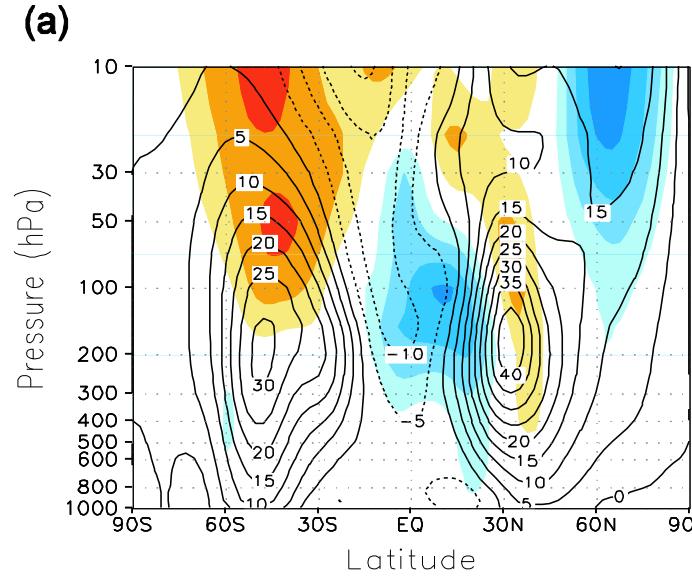
Exp.	Description
AL	The typical GWDO forcing in the upper troposphere (Alpert et al. 1988).
KA	Kim & Arakawa 1995 (reference heights = Kim and Doyle 2005) $\langle \text{LOGWD\_MX} \rangle$

O que esperar do resultados, quando utiliza-se duas parametrizações com complexidade diferentes.



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? ondas de gravidade de convecção

▪ AL



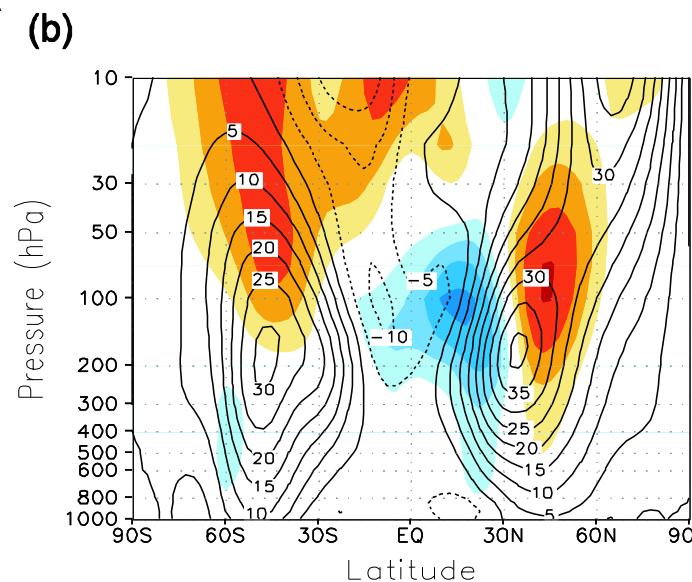
## Zonal mean Zonal wind

Contour: Model output

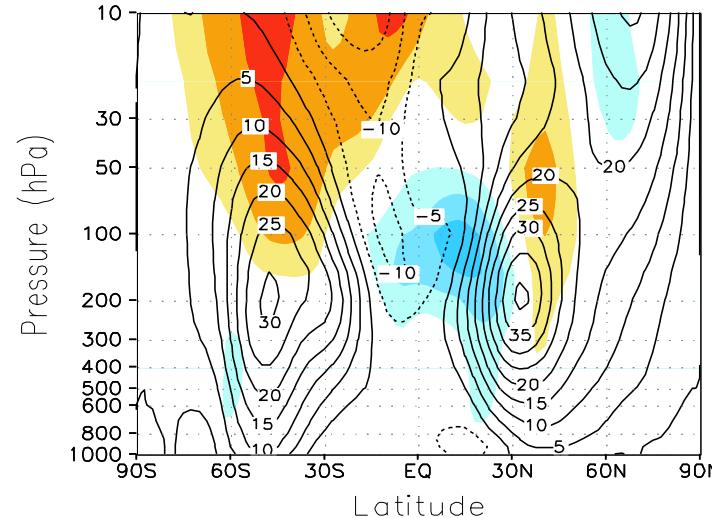
Shading: BIAS= Model – RA2



▪ KA



## ▪ KA (Ric=0.75)



**Não importa a complexidade.  
Ainda temos um bias positivos no escoamento zonal em altos níveis**



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? interação nuvem-radiação



**Fonte de erros na  
parametrização da interação  
nuvem-radiação**

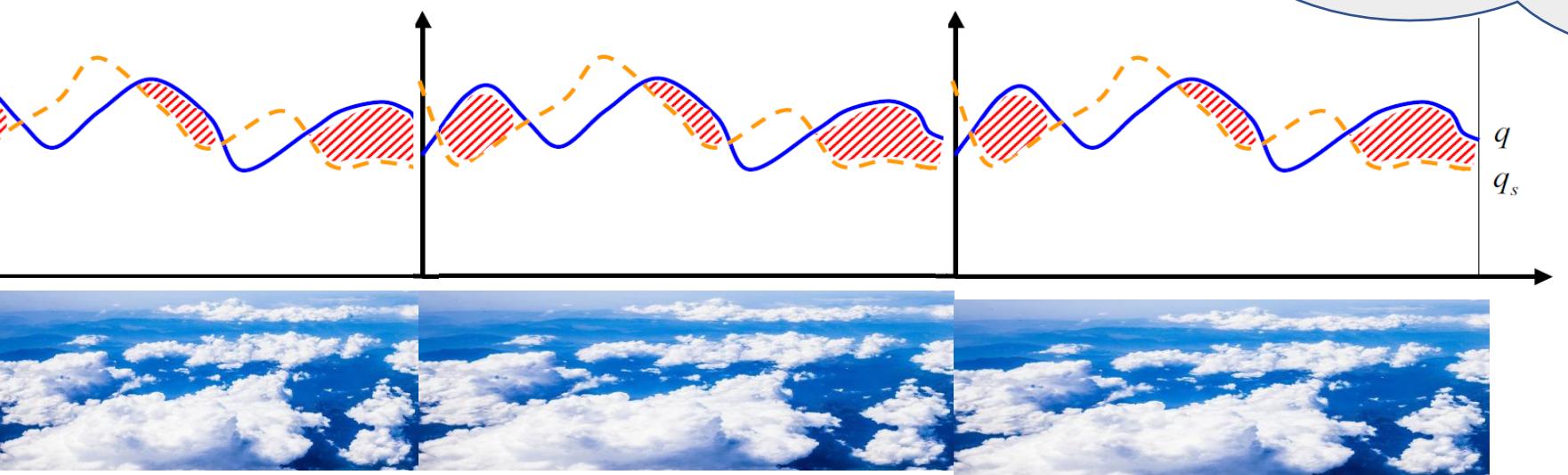
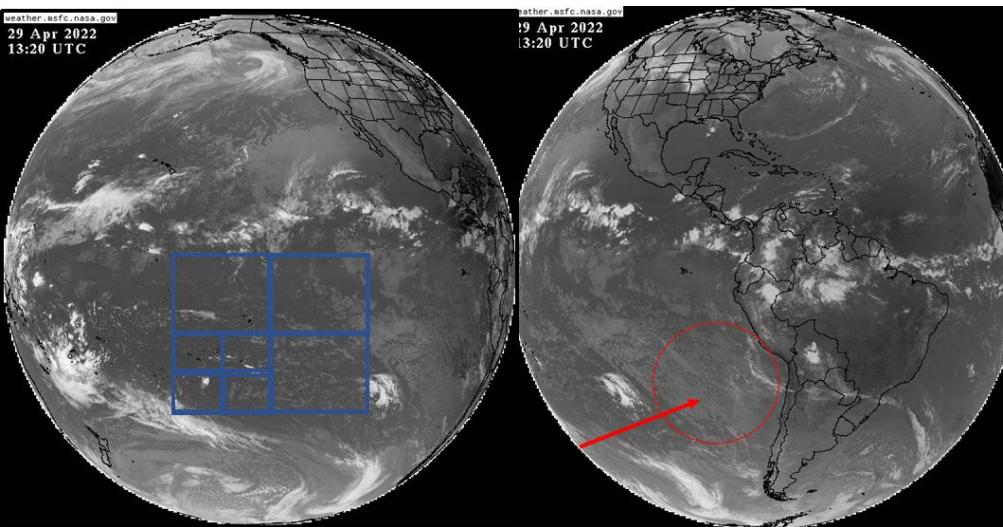


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? interação nuvem-radiação



Paul

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? interação nuvem-radiação

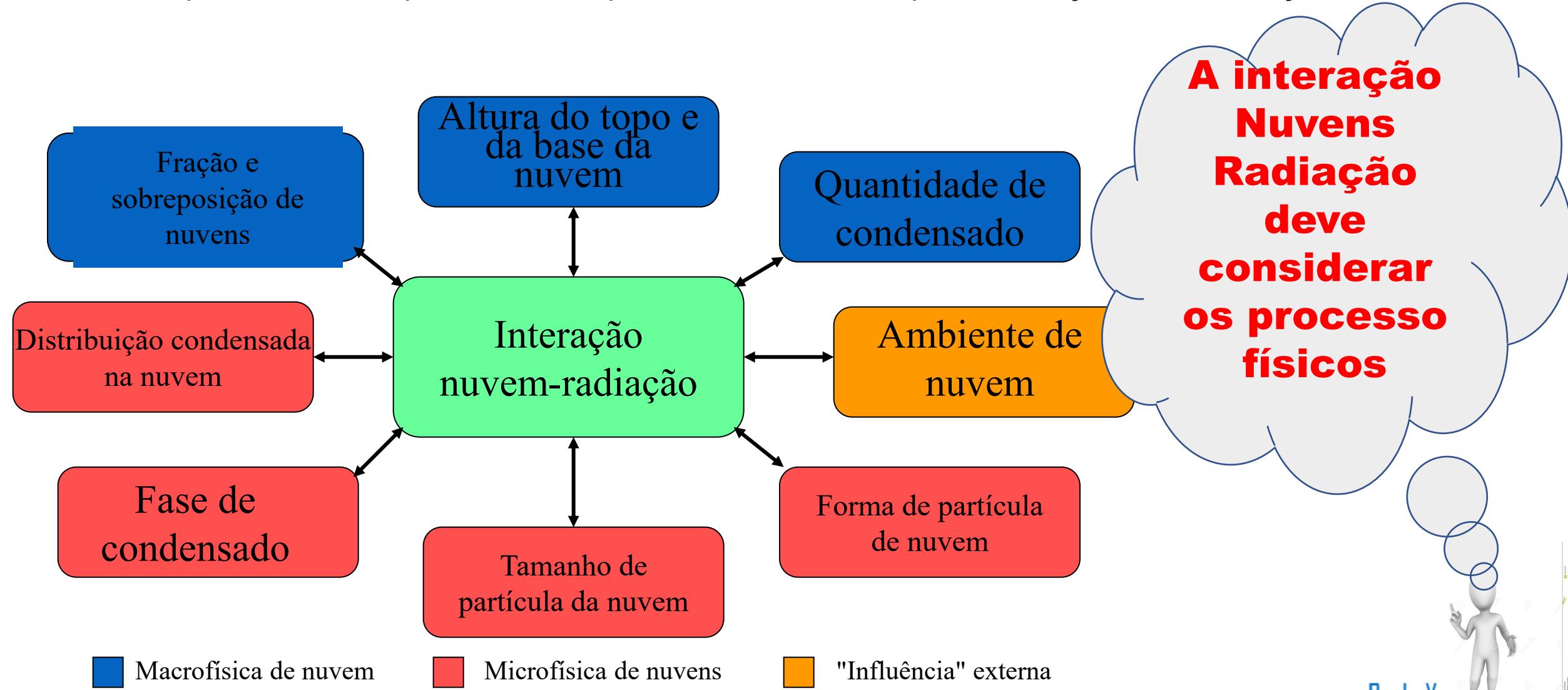


**Erros devido a  
dificuldade de  
representar a nuvens  
em uma célula de  
grade?**



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? interação nuvem-radiação

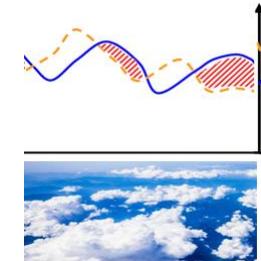
Muitos desses processos são apenas mal compreendidos - Por exemplo, a interação com a radiação



## a) Nuvens Baixas

- Fração de nuvens em função de supersaturação ( $RH_c$ ) =>  $fc = 1 - \sqrt{\frac{1-RH}{1-RH_c}}$

$fc \Rightarrow$



$Dthdpc = -0.4e-1 \Rightarrow$  critério estabilidade para a formação de nuvens de inversão

a) Devido ao tipo de inversão da camada if  $\frac{d\theta}{dP_{k+1}} < dthdpc \Rightarrow fc = MAX(-f6p67 * \left(\frac{d\theta}{dP_{k-1}} - dthdpc\right), 0.0)$

## a) Nuvens Médias

$$cldsatn = MAX\left(\frac{RH - RH_c}{RH_r}, 0.0\right)$$

$RH_c = 0.8$  ! Umidade Relativa Crítica

$RH_r = 0.2$  ! Umidade Relativa Critica de Referência

## a) Nuvens Altas

$$cldsatn = MAX\left(\frac{RH - RH_c}{RH_r}, 0.0\right)$$

$RH_c = 0.9$  ! Umidade Relativa Crítica

$RH_r = 0.2$  ! Umidade Relativa Critica de Referência

## a) Nuvens Profundas (CumuloNimbus e Nimbustratus)

$$Cld_{Convec} = fp2457 + fp1253 * LOG(prec * f8p0e3)$$

$fp2457 = 0,2457$

$$Cld_{Convec} = MAX(Cld_{Convec}, 0.0e0_r8)$$

$fp1253 = 0,1253$

$$Cld_{Convec} = MIN(Cld_{Convec}, f0p8)$$

$f8p0e3 = 8.0e3$

PREC = taxa de precipitação

Exemplos de PDFs encontrados na literatura obtidos e dados de agua liquida e gelo

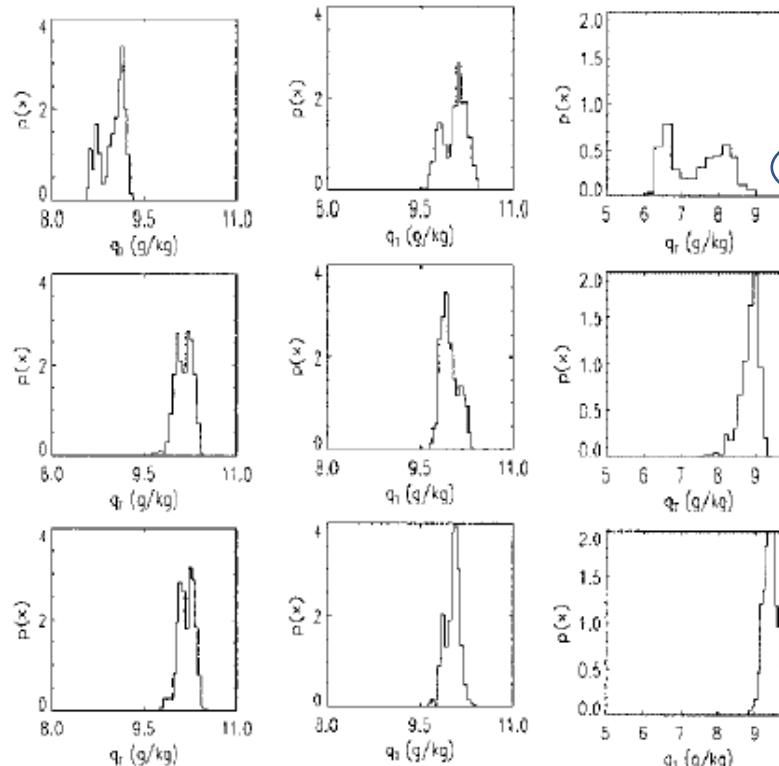


Figure 5: Reproduction total water PDFs from the aircraft observational study of [Wood and Field \(2000\)](#). Refer to the original article for details.

**Derivando PDF de  
dados  
Observacionais**

fc  $\Rightarrow$  PDF  $\Rightarrow$

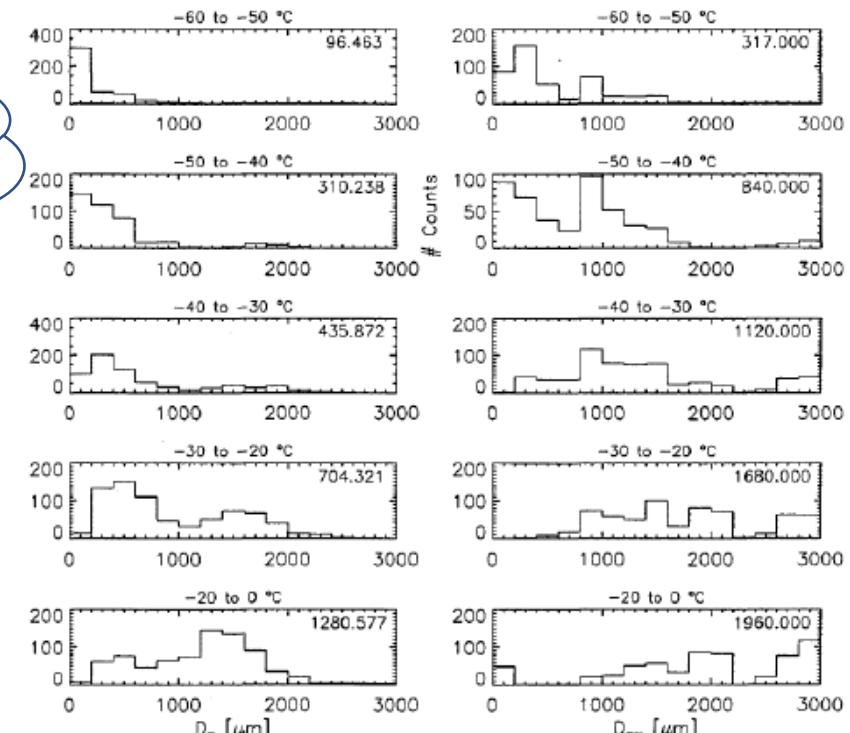
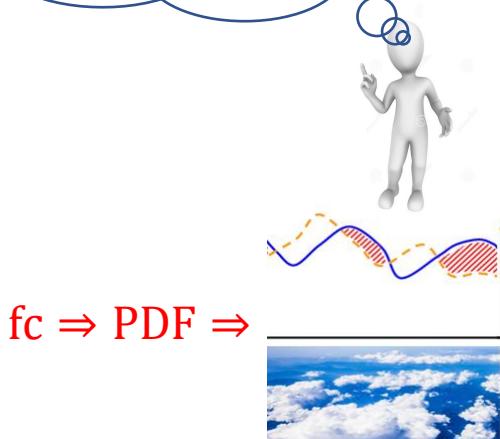
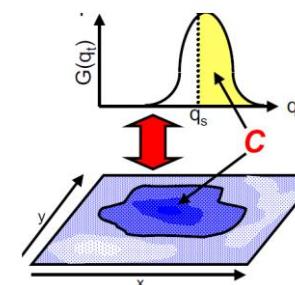


Figure 6: Reproduction of ice water content PDFs from the aircraft observational study of [Heymsfield and McFarquhar \(1996\)](#). Refer to the original article for details.

Assume-se que toda supersaturação é imediatamente condensada como nuvem. Aqui também estamos ignorando as flutuações de temperatura para simplificar



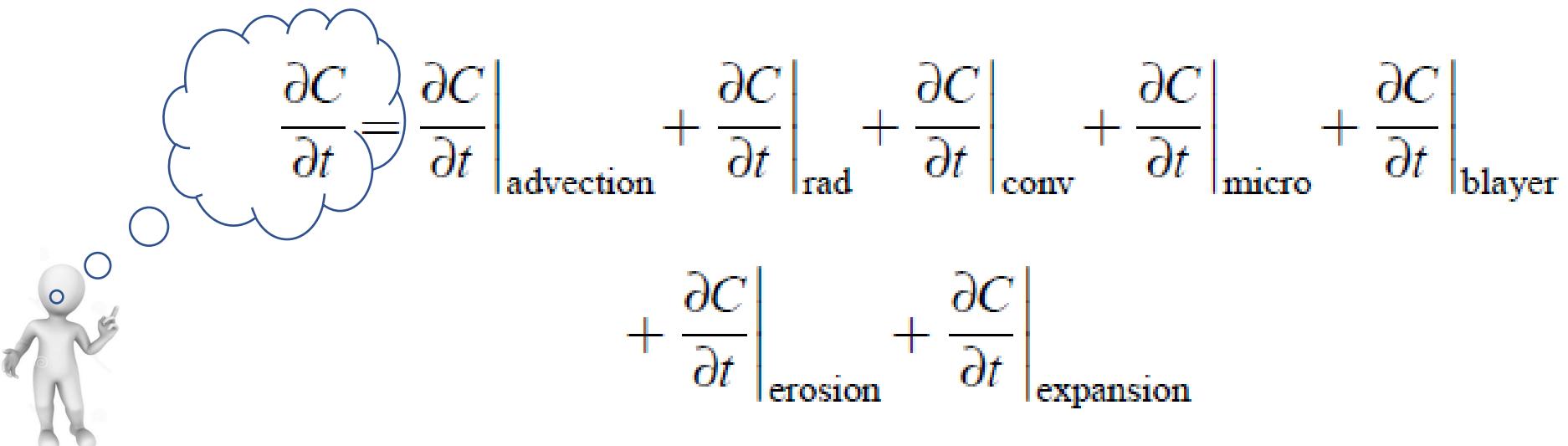
$$c = \int_{q_s}^{\infty} G(q_t) dq_t$$

## ***Esquema Prognósticos***

Met Office UM, Wilson et al 2008

Anteriormente usado um esquema  $RH_{crit}$  equivalente a uma PDF triangular simétrico (Smith 1990)

Agora usando um esquema de prognóstico para C e  $q_l$


$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{advection} + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{rad} + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{conv} + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{micro} + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{blayer} \\ + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{erosion} + \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_{expansion}$$

Originalmente Clima, NWP global, agora em mesoescalas Radiação, turbulência e expansão apenas alteram  $q_t$ , não C,  $q_l$



## Como Representar as Propriedades das Nuvens na Grade do Modelos.

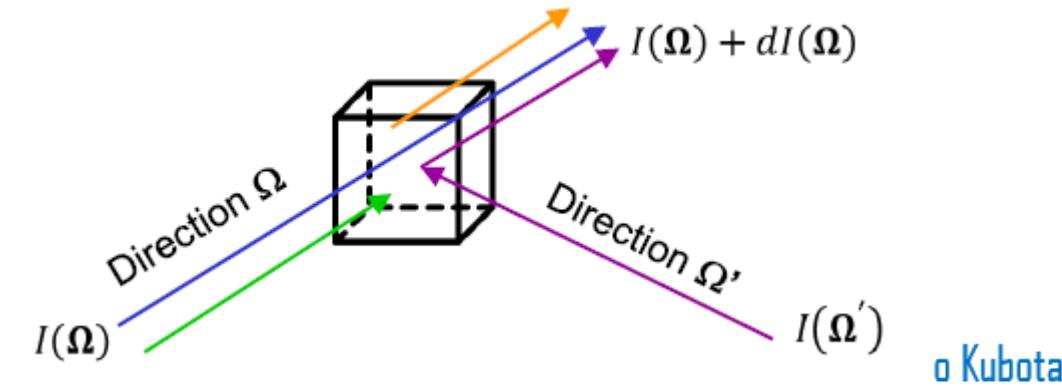
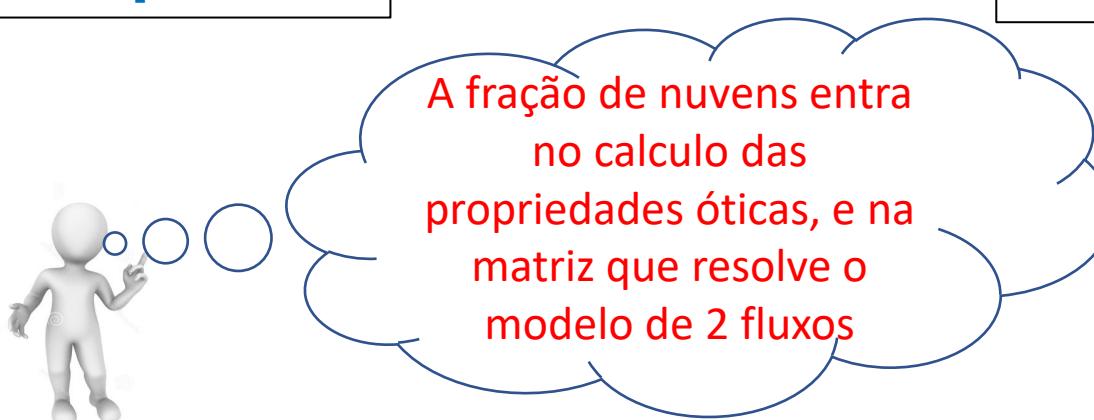
### Eq. transferência radiativa

Derivada espacial representando quanta radiação está a upstream

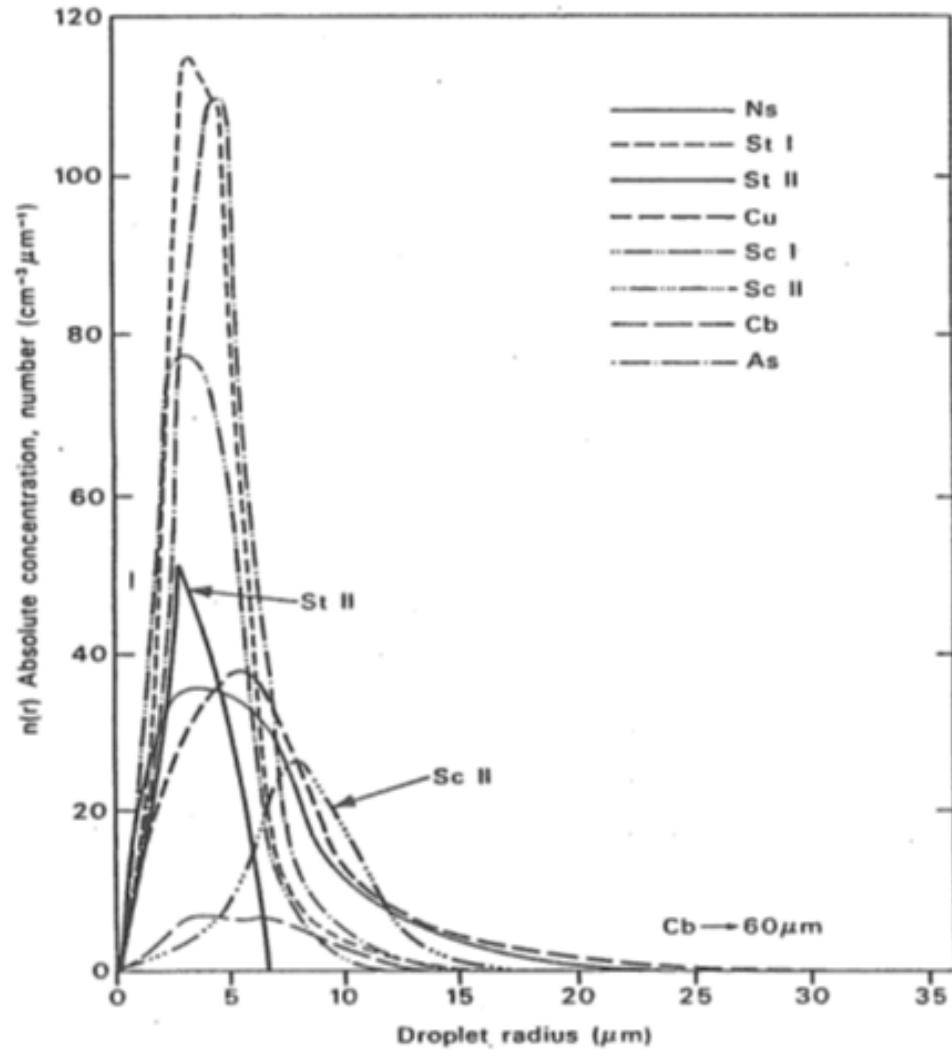
Perda por absorção ou espalhando

Ganho através do espalhamento de Radiação espalhada de todas as outras direções

Fonte como emissão térmica



## Como Representar as Propriedades das Nuvens na Grade do Modelos.



### Tamanho das Distribuições

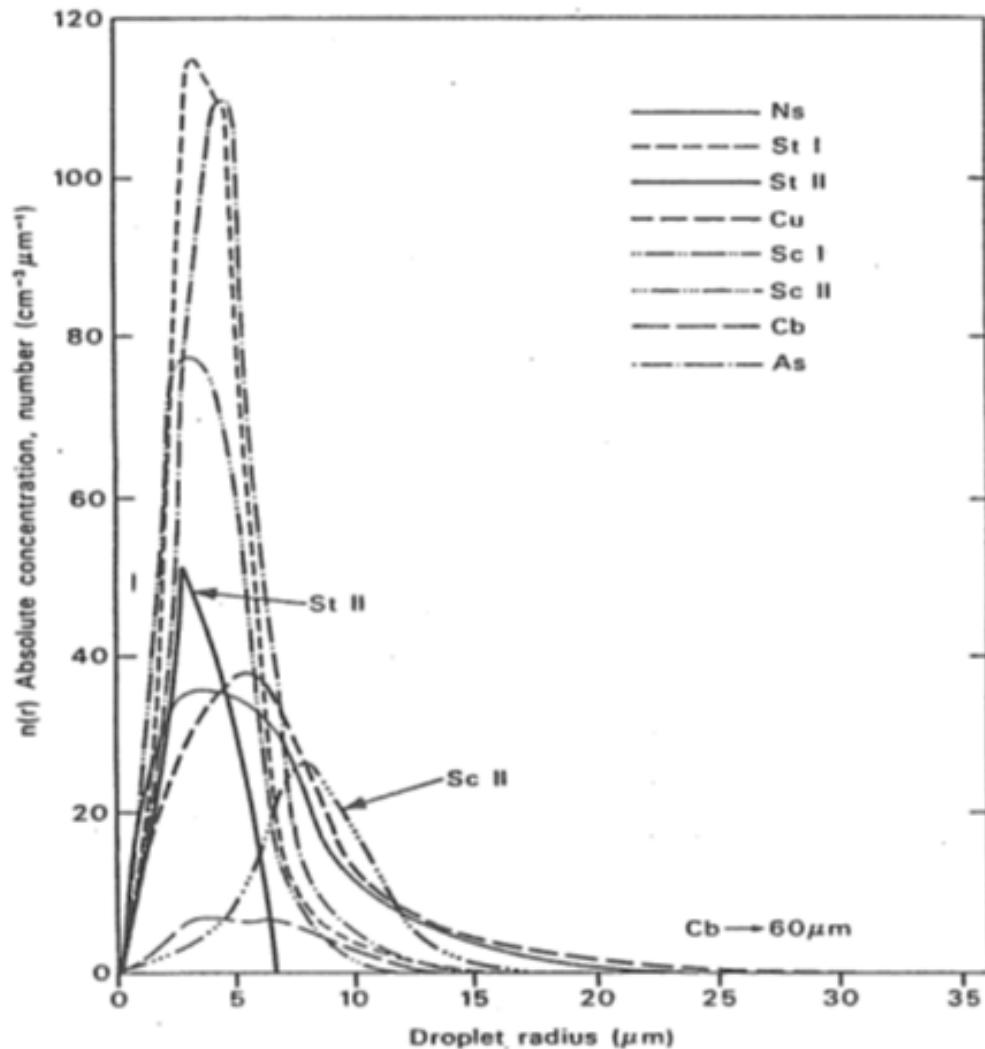
- Deseja-se o volume integral das propriedades de espalhamento.
- A descrição da distribuição do tamanho  $n(r)[m^{-4}]$ , onde  $n(r)dr$  é o numero de concentração de partículas com raio entre  $r$  e  $r + dr$ .
  - O coeficiente de extinção  $m^{-1}$  é a integral da seção transversal de extinção de partículas  $m^2$  por unidade de volume

$$\beta_e = \int n(r)\sigma_e(r)dr$$

- Na região óptica geométrica ( $r \gg \lambda$ )  $\sigma_e = 2\pi r^2$ , portanto, é apropriado caracterizar o tamanho médio das partículas por

$$Effective\ radius\ r_e = \frac{\int r^3 n(r)dr}{\int r^2 n(r)dr} = \frac{3LWC}{2\rho_l \beta_{e,go}}$$

## Como Representar as Propriedades das Nuvens na Grade do Modelos.



- Pode converter o teor de água de prognóstico do modelo em coeficiente de extinção

- Em cada parte do espectro,  $\omega$  e  $g$  são parametrizados em função de  $r_e$

- 1  $\tau$  extinction optical depth
- 2  $\theta$  single scattering albedo
- 3  $\omega$  a função de fase de espalhamento
- 4  $g$  assymetry parameter
- 5  $f$  forward scattered fraction

Obtidos através de tabelas de coeficientes pré-calculados para diferentes bandas e raio efetivo de agua líquida e gelo



# Brazilian Atmospheric Model



## a) Propriedades Óticas de Nuvens (Ebert and Curry, 1992, JGR, 97, 3831-3836)

! extinction optical depth

if( $cldn \geq cldmin . and . cldn \geq cldeps$ )then

$$liq_{tau} = 1000 * cliqwp * \left[ abaril + \frac{bbaril}{\text{MAX}(4.2, \text{MIN}(scaleFactor * rel, 16))} \right]$$

Else

$$liq_{tau} = 0.0$$

Endif

! single scattering albedo \* tau

$$liq_{tau\_w} = liq_{tau} * \text{MIN} [1 - cbaril - dbaril * \text{MIN}(\text{MAX}(4.2, scaleFactor * Rel), 16)), 0.99999]$$

!

! Fator asymmetry parameter

$$w = ebaril * [fbaril * \text{MIN}(\text{MAX}(4.2, scaleFactor * Rel), 16))]$$

! assymetry parameter \* tau \* w

$$liq_{tau\_w\_g} = liq_{tau\_w} * w$$

! forward scattered fraction \* tau \* w\*w

$$liq_{tau\_w\_f} = liq_{tau\_w} * w * w$$



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

$$\Omega \cdot \nabla I(\Omega) = -\beta_e I(\Omega) + \beta_s \int_{4\pi} P(\Omega, \Omega') I(\Omega') d\Omega' + S(\Omega)$$

**Derivada espacial representando quanta radiação está a upstream**

**Perda por absorção ou espalhando**

**Ganho através do espalhamento de Radiação espalhada de todas as outras direções**

**Fonte como emissão térmica**

- Radiation is an integral:

$$\overline{F^{\uparrow\downarrow}(z)} = \int_{\Delta t} \int_{\infty} \int_{\Delta x} \int_{2\pi} I(z, \Omega, x, v, t) d\Omega dx dv dt$$

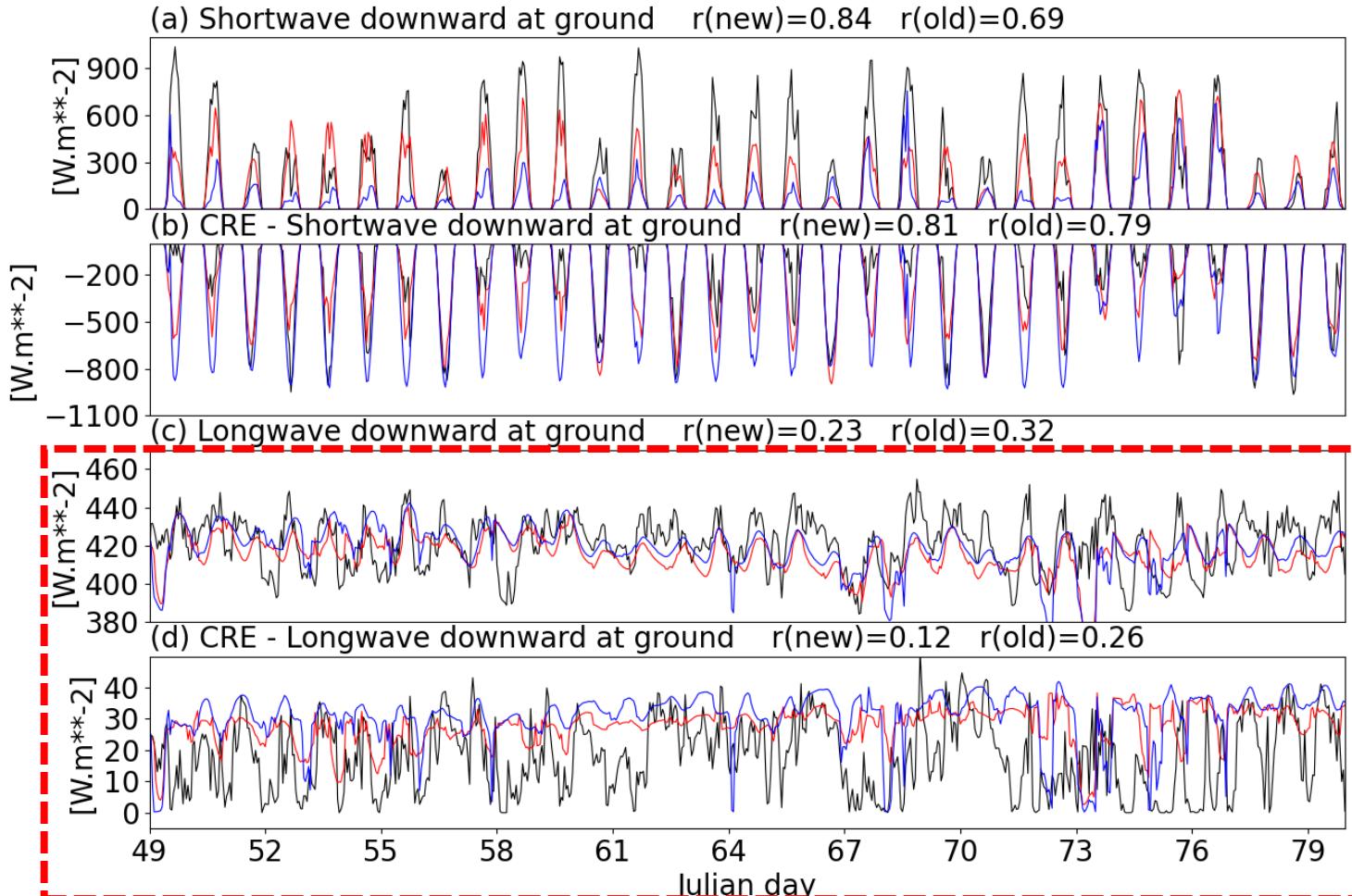
Dimension	Typical number of quadrature points	How well is this dimension known?	Consequence of poor resolution
Time	1/3 (every 3 h)	At the timestep of the model	Changed climate sensitivity (Morcrette 2000); diurnal cycle (Yang & Slingo 2001)
Angle	2 (sometimes 4)	Well (some uncertainty on ice phase functions)	$\pm 6 \text{ W m}^{-2}$ (Stephens et al. 2001)
Space	2 (clear+cloudy)	Poorly (clouds!)	Up to a $20 \text{ W m}^{-2}$ long-term bias (Shonk and Hogan 2009)
Spectrum	100-250	Very well (HITRAN database)	Incorrect climate response to trace gases?

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## E2: Fluxos de radiação de onda longa e onda curta

**Figura 5.4 - Série temporal dos fluxos de radiação e efeito radiativo de nuvens (CRE) para o período da IOP1 do GoAmazon 2014/15. Simulações utilizando os dados do SAM como forçantes de larga escala.**

Observed — CFRM\_exp — CFRM\_ctl



Mesmos com esquemas sofisticados não conseguimos resolver o problema da interação da radiação com nuvens.

Principalmente no comprimento de onda da radiação térmica (terrestre) devido a nebulosidade.



Fonte: Layrson Gonçalves, 2022

Paul

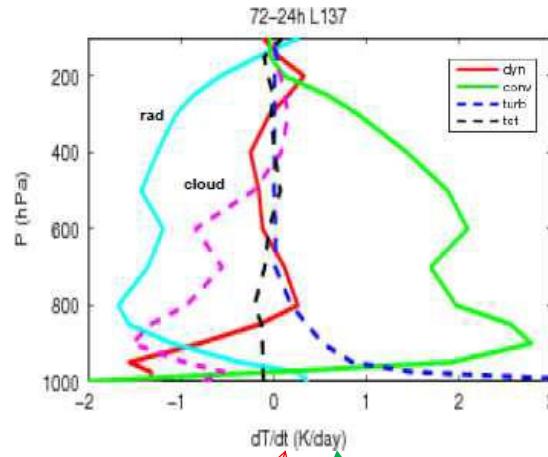
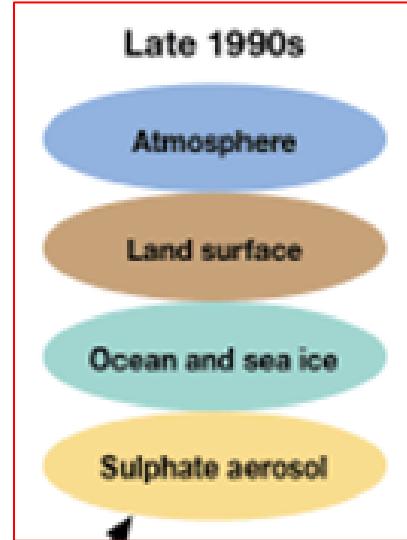


## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

**Interações de aerossóis na atmosfera terrestre**

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Interações de aerossóis na atmosfera terrestre



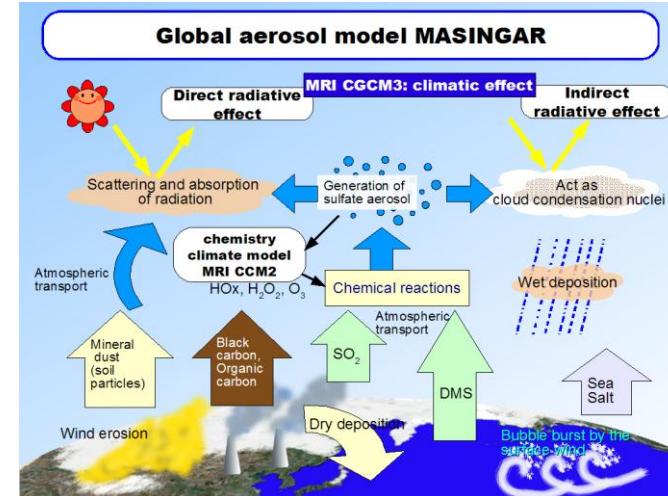
**Reações químicas**

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{X})}{\partial x_i} = \dots$$

Transporte-Advecção

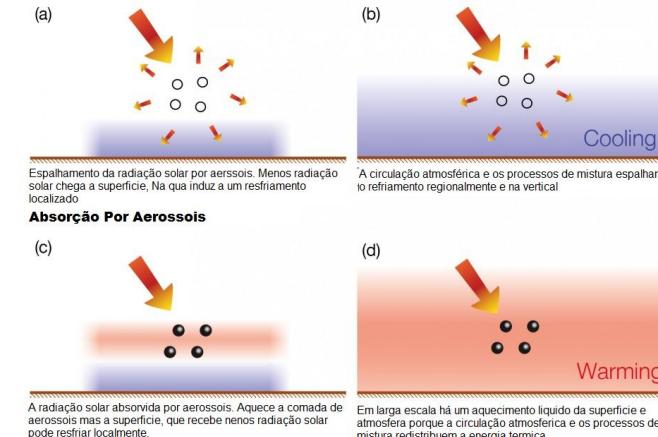
$$\frac{\partial \bar{u}'_i \bar{X}'}{\partial x_i} \Big|_{chem} - \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{X}'}{\partial x_i} \Big|_{aerosol}$$

$$+ \bar{S_x} \Big|_{chem} + \bar{S_x} \Big|_{aerosol}$$



**Interações Aerossóis-Radiação**  
espalhamento por aerossóis

<http://www.climatechange2013.org/report/reports-graphic/ch7-graphics/>



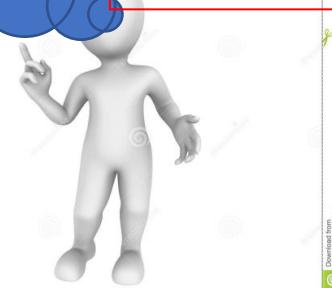
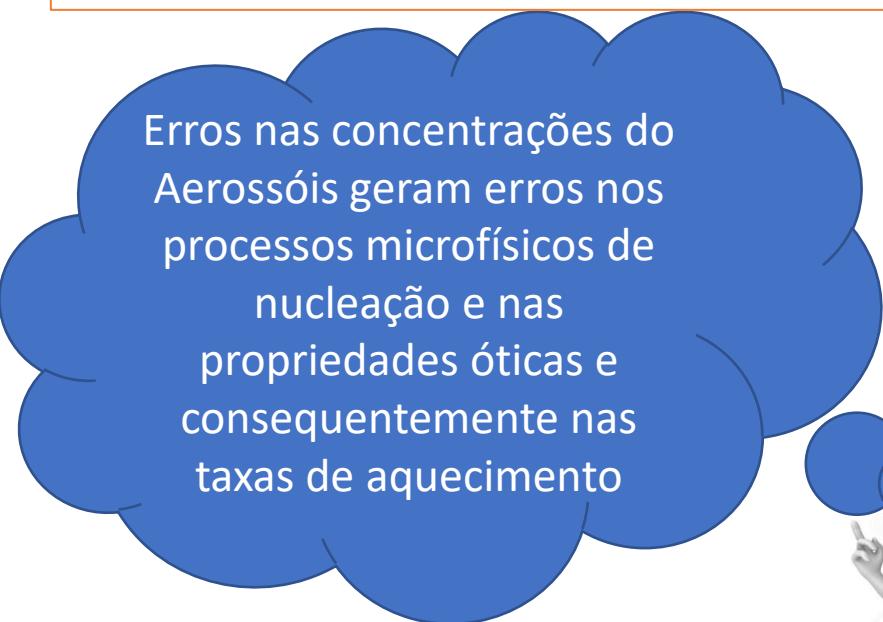
Afeta diretamente a taxa de aquecimento e indiretamente o escoamento atmosférico



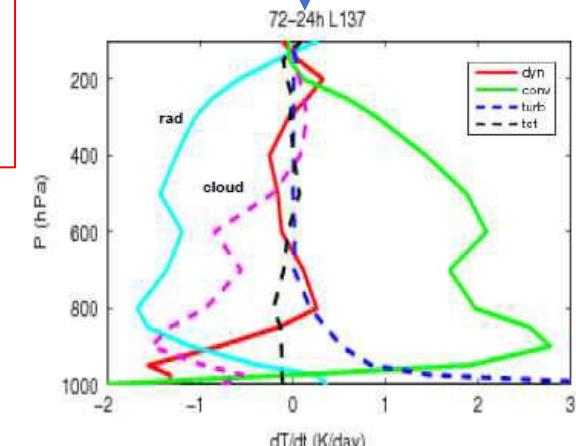
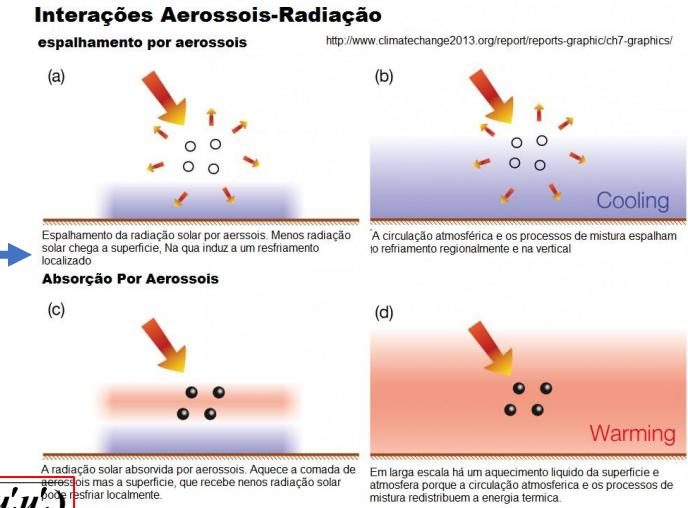


# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

- 1 extinction optical depth**
- 2 single scattering albedo**
- 3 a função de fase de espalhamento**
- 4 assymetry parameter**
- 5 forward scattered fraction**



$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\delta_{ij} g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\nu \partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} &= -\bar{v} \cdot \nabla \bar{\theta} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i' \bar{\theta}' + \frac{L}{\pi c_p} (c - e) + Q_{rad} \\ \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} &= -\bar{v} \cdot \nabla \bar{q}_v - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i' \bar{q}_v' - (c - e) \\ \frac{\partial \bar{q}_l}{\partial t} &= -\bar{v} \cdot \nabla \bar{q}_l - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_l}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i' \bar{q}_l' + (c - e) - P_r\end{aligned}$$



Rauli Ruslio Kubota

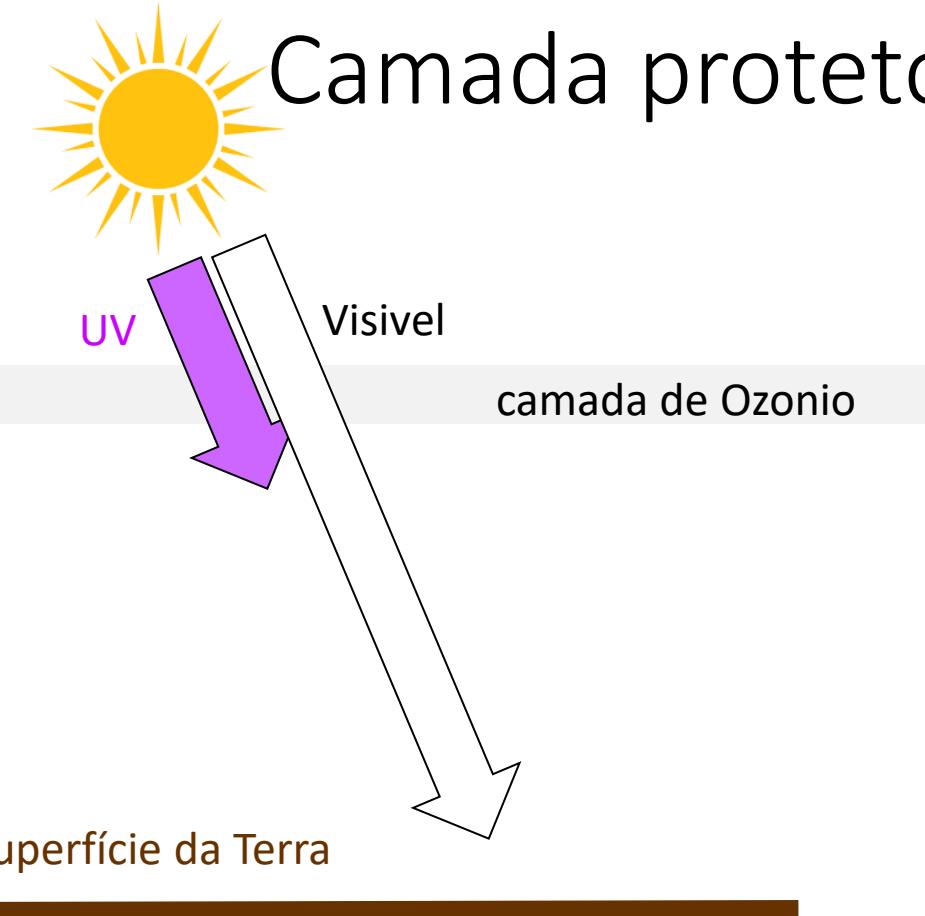


**(1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?**

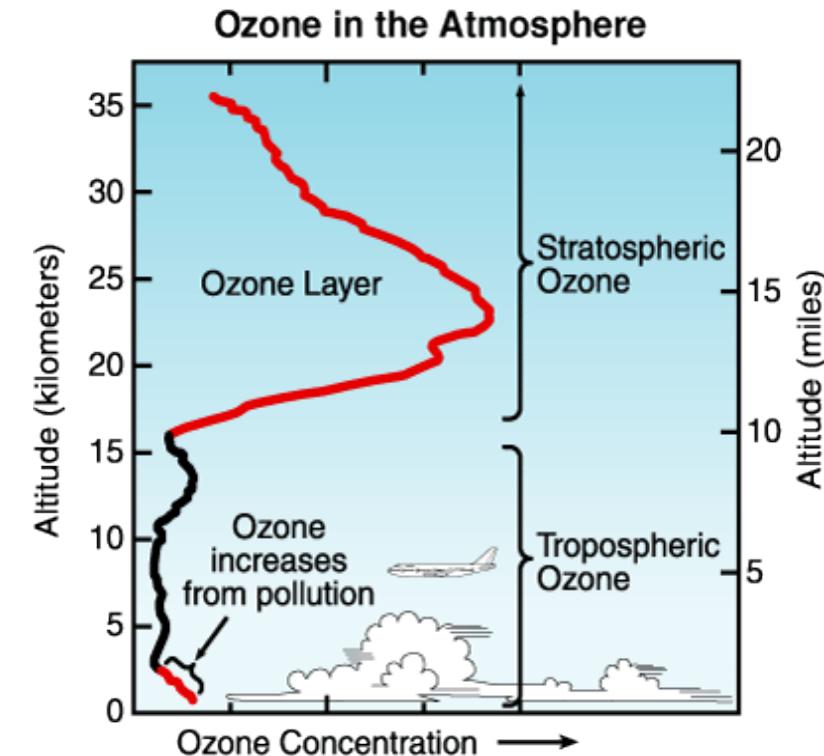


# **Ciclo do ozônio na estratosfera**

## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

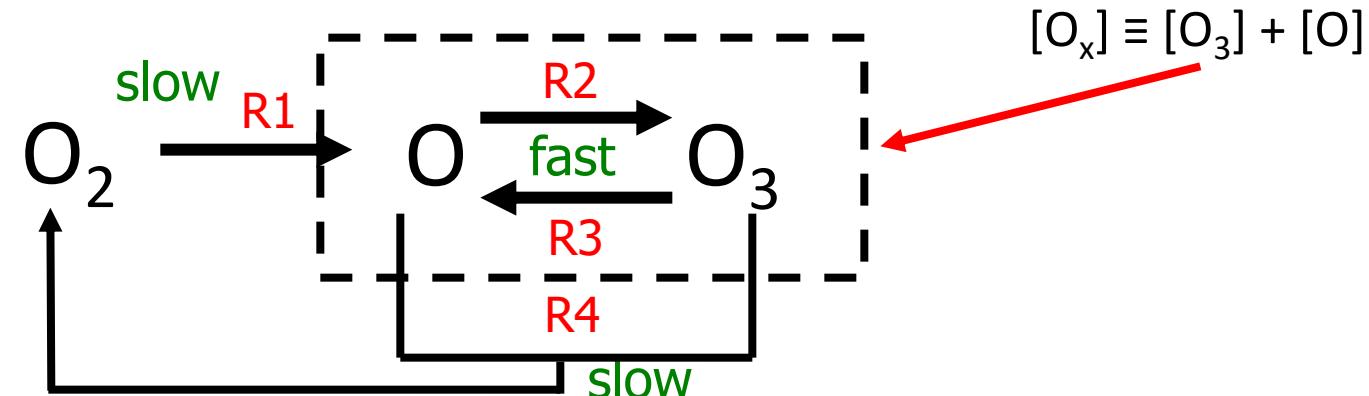


Radiação UV absorvida pelo Ozônio enquanto permite que a luz visível atravesse.

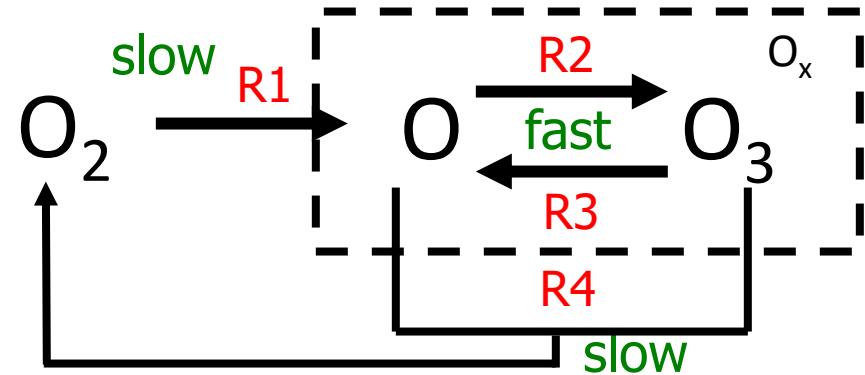


- (R1)  $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$   
(R2)  $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$   
(R3)  $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$   
(R4)  $O_3 + O \rightarrow 2O_2$

Família de oxigênio ímpar



Na química atmosférica, uma “família química” é simplesmente um dispositivo para contabilizar.. Aqui  $[O] \ll [O_3]$ , então  $[O_3] \approx [O_x]$ . O balanço de ozônio é na verdade o de oxigênio ímpar : ozônio é efetivamente produzido por (R1) e perdido por (R4)

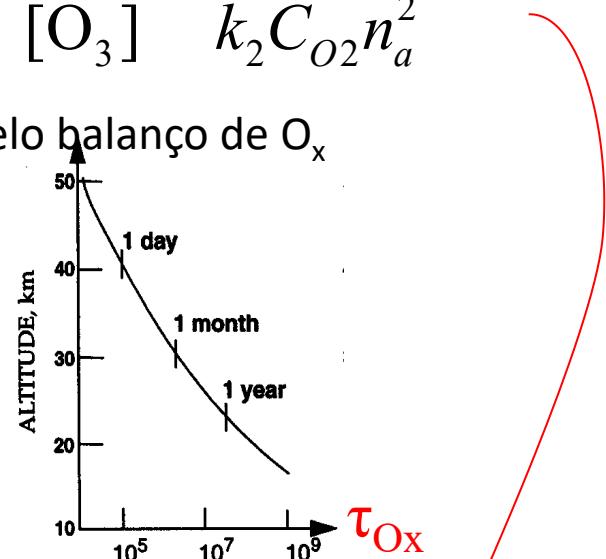


Estado estacionário para átomos de O:

$$\text{Rate}(2) = \text{Rate}(3) \Rightarrow k_2[\text{O}][\text{O}_2][\text{M}] = k_3[\text{O}_3] \Rightarrow \frac{[\text{O}]}{[\text{O}_3]} = \frac{k_3}{k_2 C_{\text{O}2} n_a^2} \ll 1$$

$\Rightarrow [\text{O}_x] \approx [\text{O}_3]$  ... então o balanço de  $\text{O}_3$  é controlado pelo balanço de  $\text{O}_x$

$$\text{Tempo de vida de } \text{O}_x: \tau_{\text{O}x} = \frac{[\text{O}_x]}{2k_4[\text{O}_3][\text{O}]} \approx \frac{1}{2k_4[\text{O}]}$$

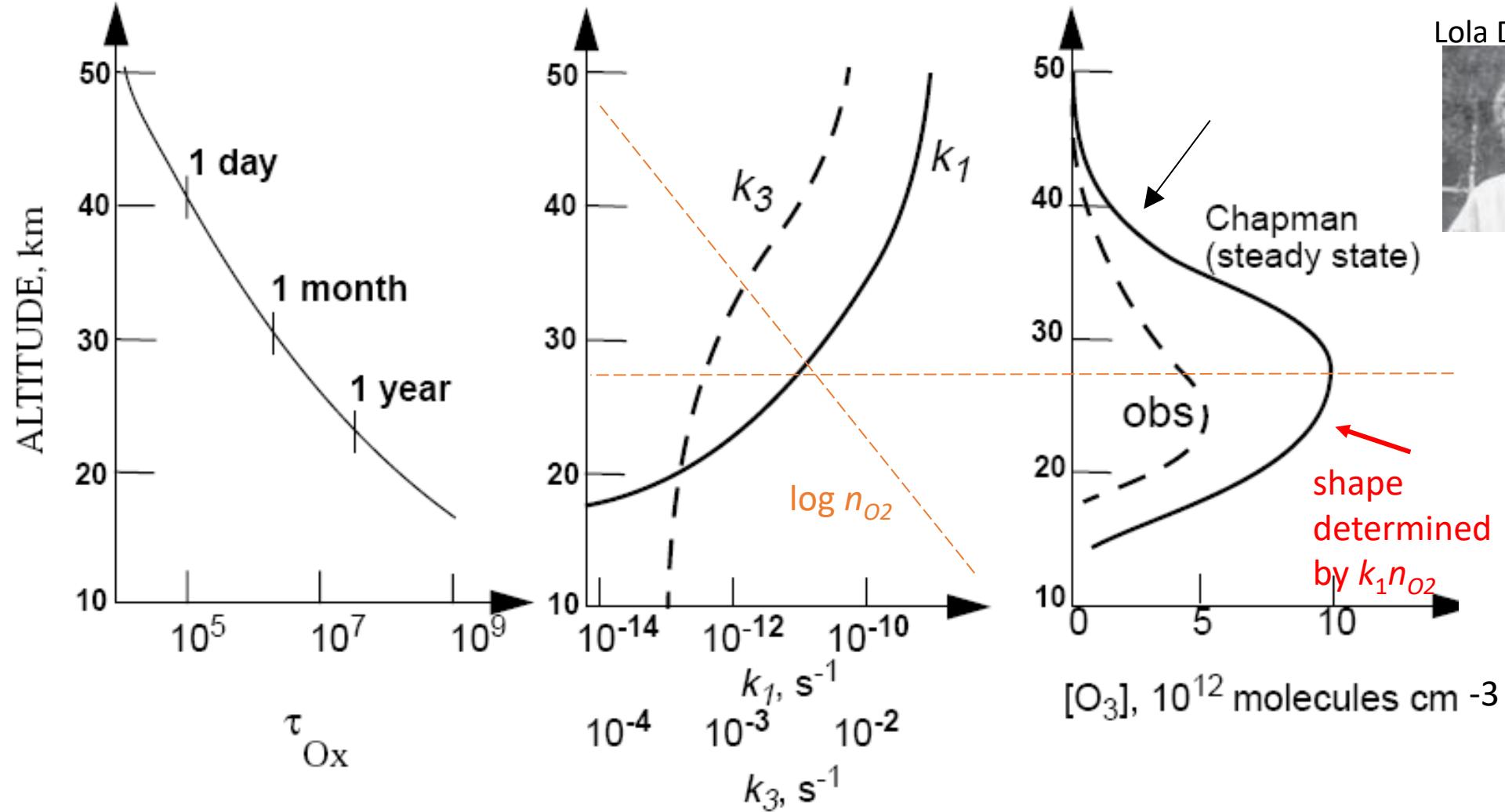


Estado estacionário para  $\text{O}_x$ :

$$2\text{Rate}(1) = 2\text{Rate}(4) \Rightarrow k_1[\text{O}_2] = k_4[\text{O}_3][\text{O}] \Rightarrow [\text{O}_3] = \left[ \frac{k_1 k_2}{k_3 k_4} \right]^{\frac{1}{2}} C_{\text{O}2} n_a^{\frac{3}{2}}$$



Forte atenuação das constantes de taxa de fotólise  $k_1$  e  $k_3$  pela sobrecarga de ozônio; estado estacionário  $[O_3]$  deve ser calculado numericamente a partir do topo da atmosfera



Lola Deming (1936)



O mecanismo Chapman reproduz a forma, mas é muito alto pelo fator 2-3 ! missing sink! Paulo Yoshio Kubota

## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Circulação Brewer (1949) e Dobson et al. (1946) e distribuição de ozônio

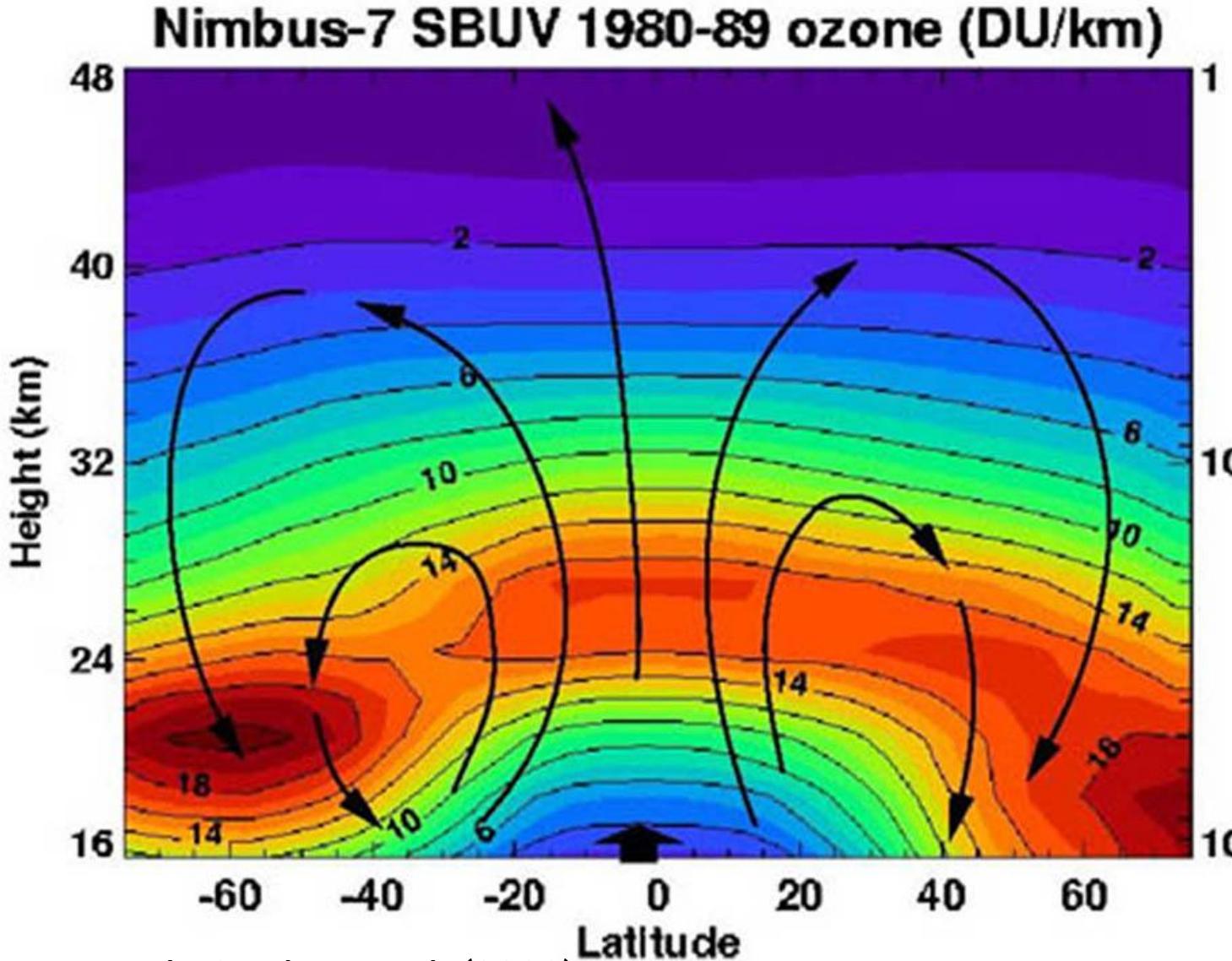


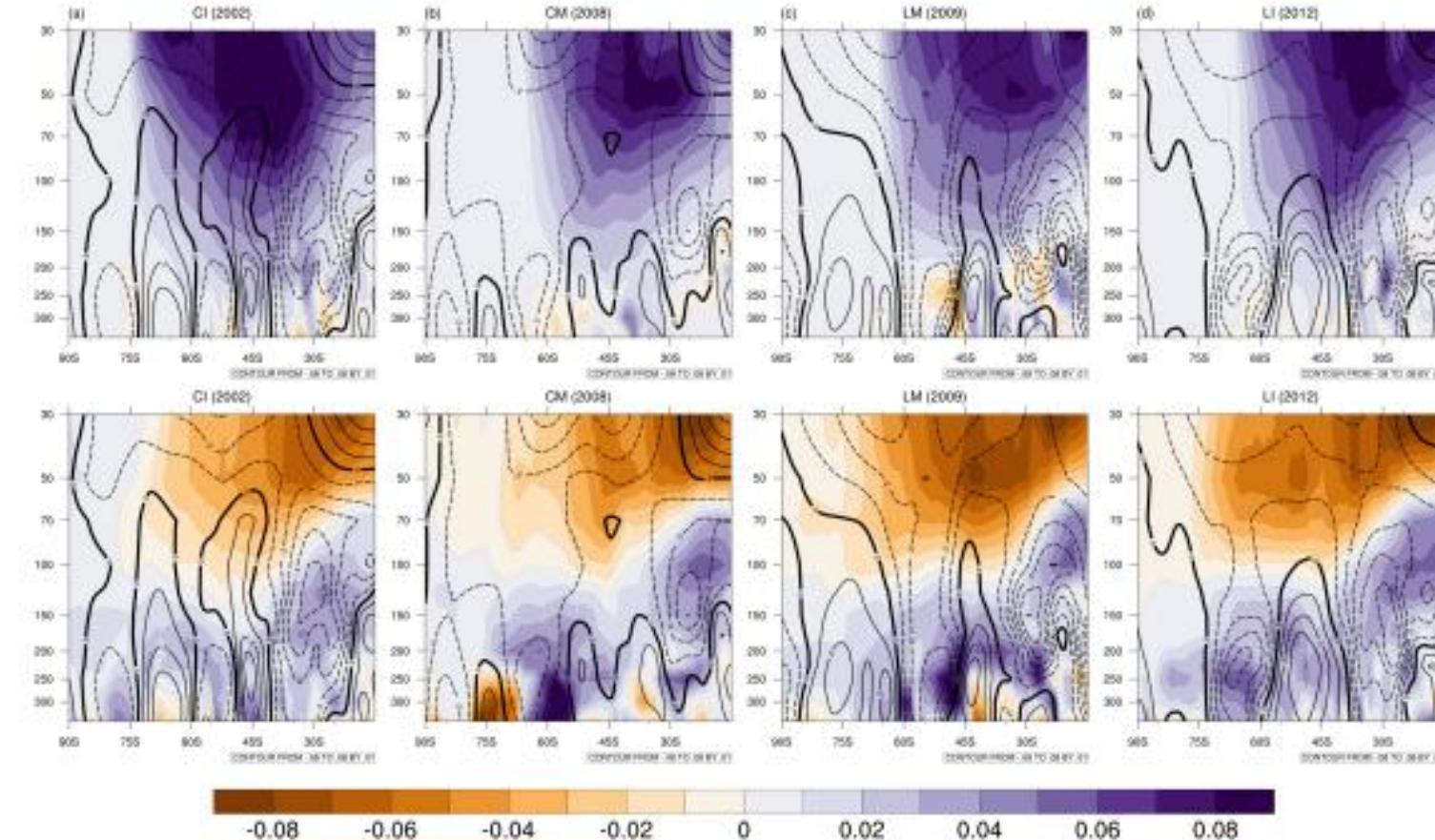
Imagen de Cordero et al. (2003).

Brewer (1949) e Dobson et al. (1946) propuseram que a variação do ozônio com a latitude pode ser explicada por uma corrente lenta (setas pretas) se movendo no hemisfério de inverno. Pensar na distribuição do ozônio como resultado de uma circulação pode não ser totalmente preciso. A distribuição observada do ozônio pode simplesmente refletir as altitudes onde o ciclo do ozônio pode existir e o fato de que a fotodissociação do ozônio diminui nas regiões polares de inverno devido à menor disponibilidade de luz solar, permitindo que o ozônio se acumule. É claro que a distribuição do ozônio com altitude e latitude pode ser afetada pelas células de Hadley, latitude média e circulação polar que conduzem a circulação atmosférica, mas o tempo de vida do ozônio é muito curto.

Paulo Yoshio Kubota



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? Ciclo do ozônio na estratosfera



Média da diferença entre os experimentos CTRL e os cinco membros de cada evento para a taxa de aquecimento radiativo para os quatro eventos no PSE

Imagen de Mateus Nunes (2021).

O sombreado representa a diferença média das taxas de aquecimento radiativo ( $K \cdot s^{-1}$ ) devido:

a onda curta (paineis superior)

e onda longa (paineis inferior) 1.

evento (a) CI, (b) CM, (c) LI e (d) LM

(CTRL) que representa  $\pm 1$  dp  $\Rightarrow O_3$

(MEM02) que representa  $\pm 2$  dp  $\Rightarrow O_3$

(MEM03) que representa  $\pm 3$  dp  $\Rightarrow O_3$

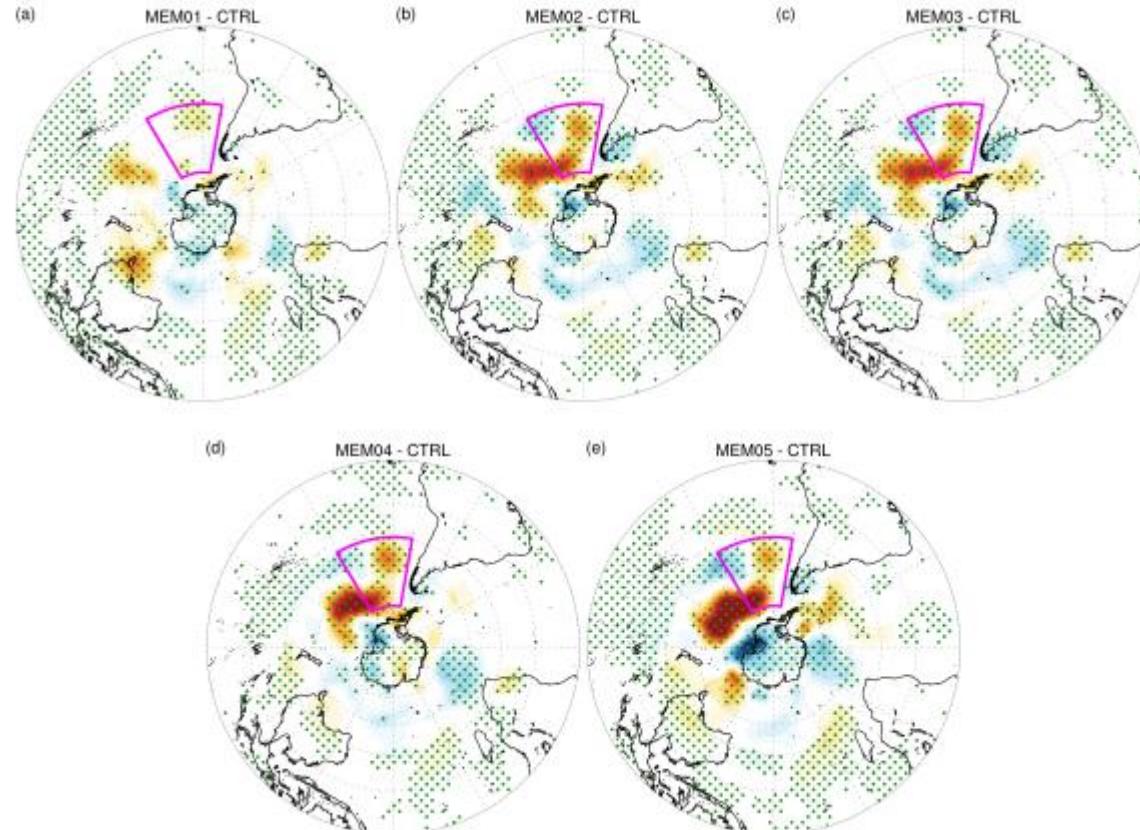
(MEM04) que representa  $\pm 4$  dp  $\Rightarrow O_3$

(MEM05) que representa  $\pm 5$  dp  $\Rightarrow O_3$

Paulo Sérgio Kubota

# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

## Ciclo do ozônio na estratosfera

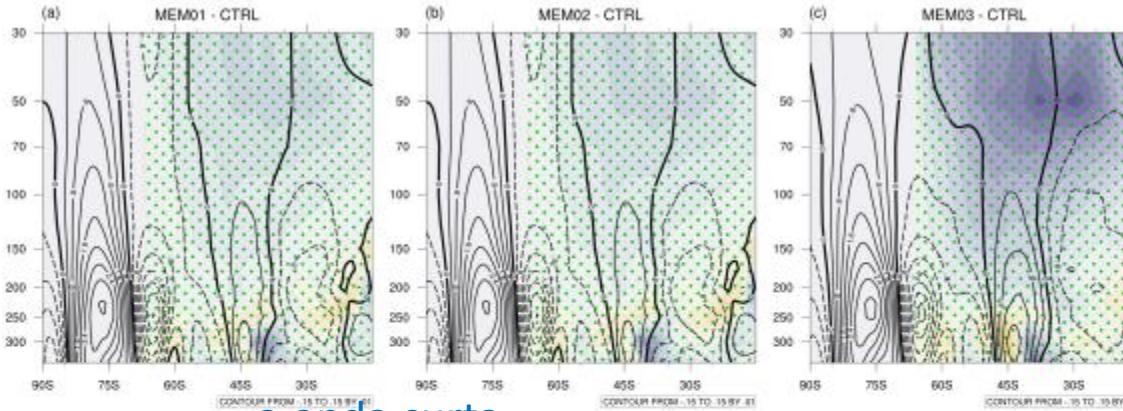


(CTRL) que representa  $\pm 1$  dp  $\Rightarrow$  O3  
(MEM02) que representa  $\pm 2$  dp  $\Rightarrow$  O3  
(MEM03) que representa  $\pm 3$  dp  $\Rightarrow$  O3  
(MEM04) que representa  $\pm 4$  dp  $\Rightarrow$  O3  
(MEM05) que representa  $\pm 5$  dp  $\Rightarrow$  O3

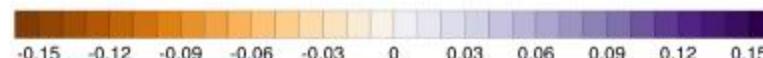
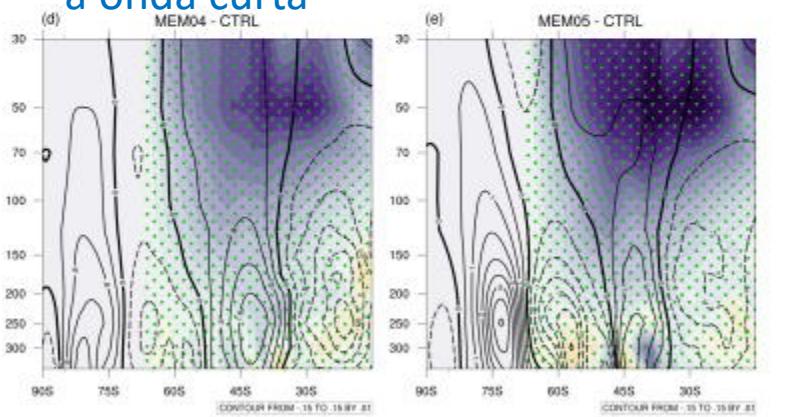
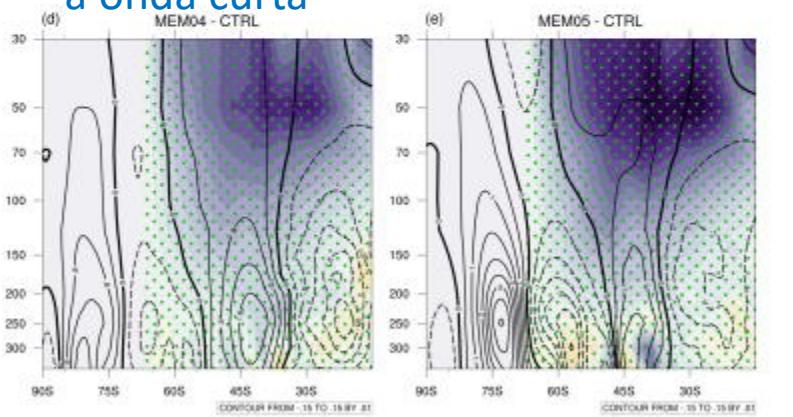
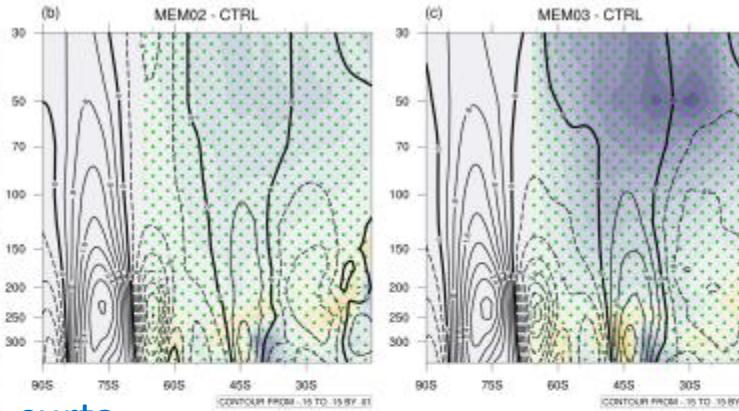
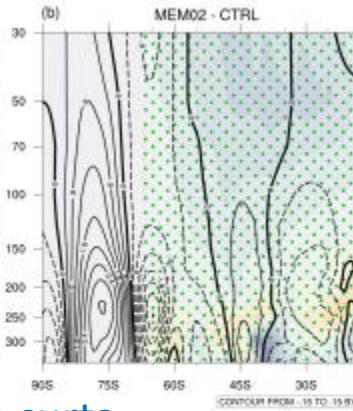
Diferença do H500 entre cada membro e o CTRL para o evento Curto Médio de junho de 2008.



# (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo? Ciclo do ozônio na estratosfera

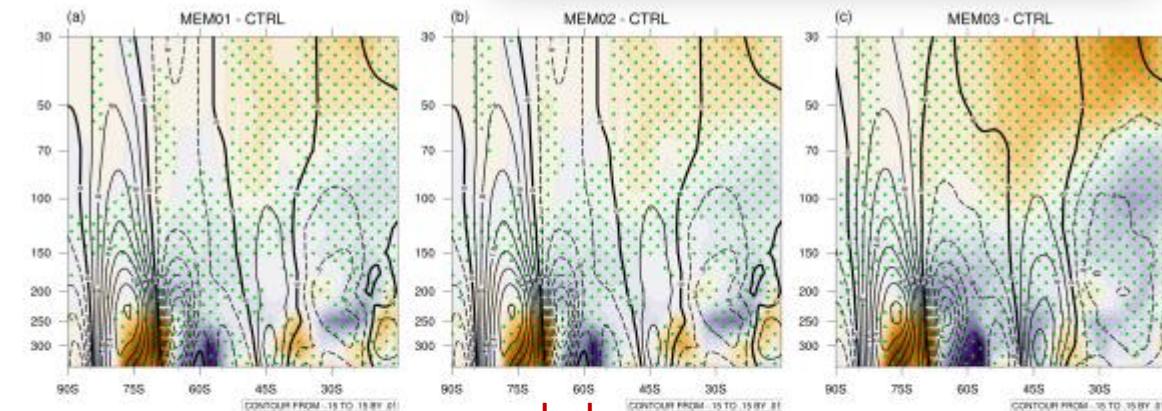


a onda curta

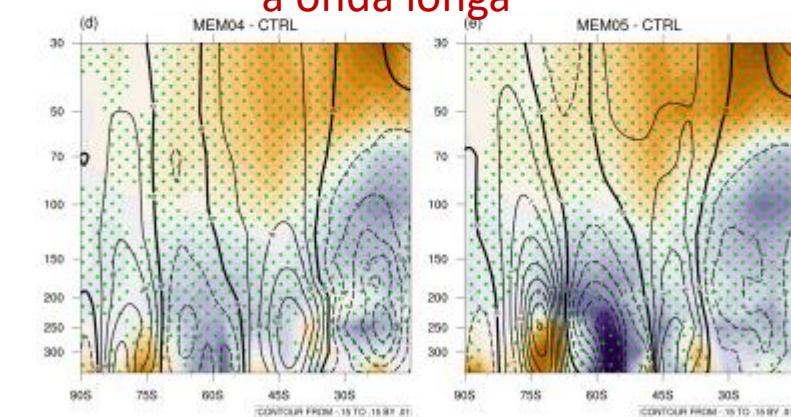
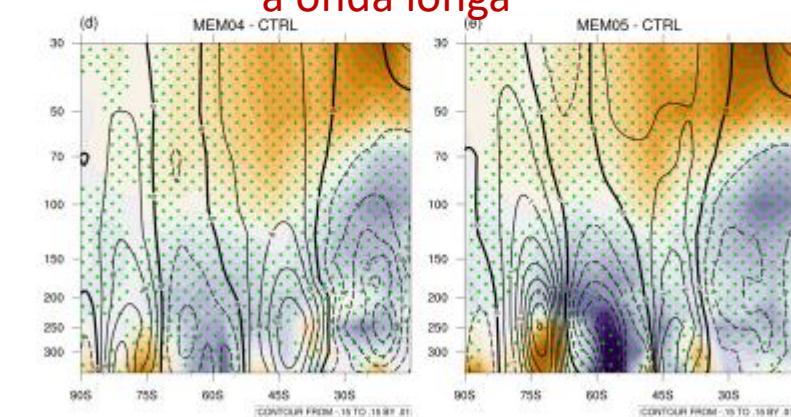
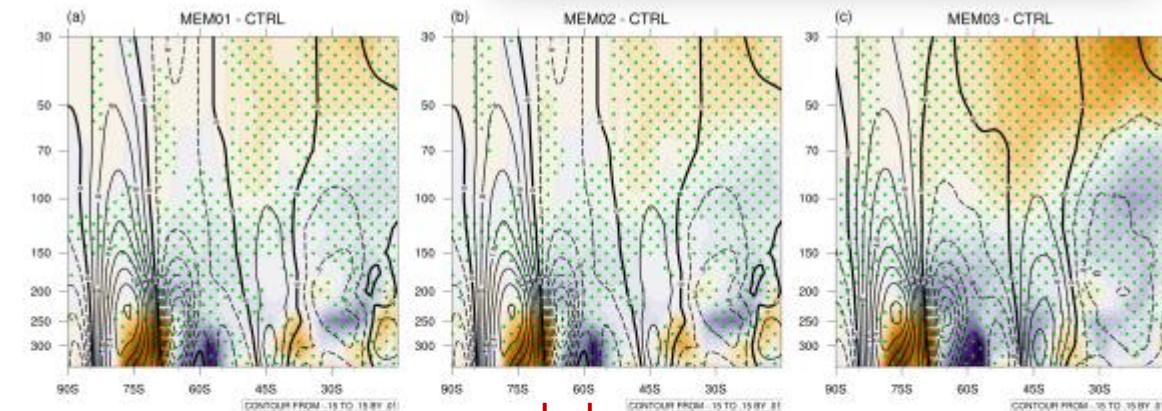
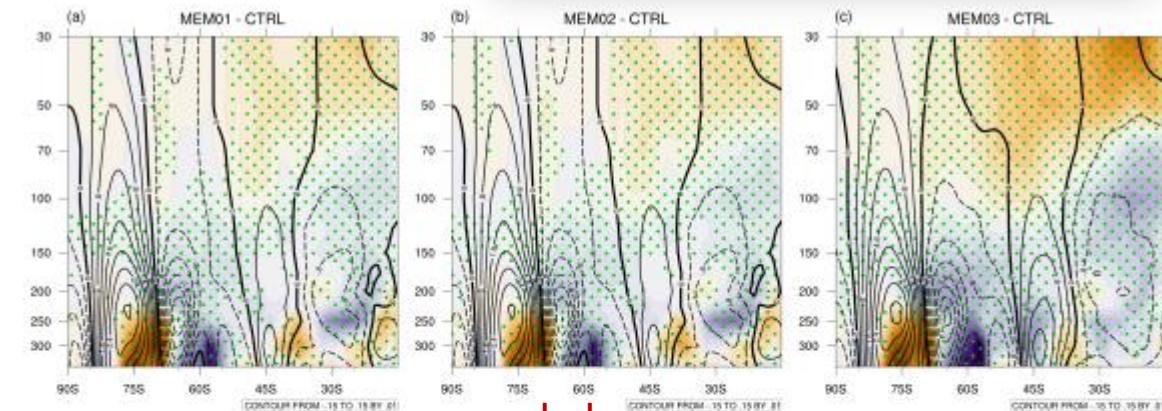


Evento Curto Médio de junho de 2008.

Imagen de Mateus Nunes (2021).



a onda longa



(MEM01) que representa  $\pm 1$  dp  $\Rightarrow$  O<sub>3</sub>  
(MEM02) que representa  $\pm 2$  dp  $\Rightarrow$  O<sub>3</sub>  
(MEM03) que representa  $\pm 3$  dp  $\Rightarrow$  O<sub>3</sub>  
(MEM04) que representa  $\pm 4$  dp  $\Rightarrow$  O<sub>3</sub>  
(MEM05) que representa  $\pm 5$  dp  $\Rightarrow$  O<sub>3</sub>

Paulo Yoshio Kubota



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

- Erros de parametrização podem surgir de incerteza estrutural
- 1) representação incorreta ou parcial das equações diferenciais necessárias para descrever a evolução dos processos físicos)
  - 2) incerteza de parâmetro e erros de truncamento.
- Os erros podem ser considerados como "**sistemáticos**" ou "**aleatórios/intrínsecos**".

Os **erros sistemáticos** estão frequentemente relacionados a regimes meteorológicos particulares (ou seja, devido a erros dependentes do regime na física que afetam diretamente as escalas meso/sinóticas),

Os **erros intrínsecos** podem ser considerados devidos ao **aumento da incerteza em escalas pequenas, faltando graus de liberdade e erros de truncamento.**



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

Os **erros sistemáticos** são visíveis em uma previsão determinística e têm escopo para serem reduzidos por melhorias do modelo.

Os **erros intrínsecos** sempre exigirão perturbações estocásticas em um ensamblé.

No entanto, pode ser **muito difícil definir** e separar essas **diferentes fontes de erro** nos modelos.

Os **Erros sistemáticos** também podem ser devidos à **resposta não linear** do sistema às perturbações aleatórias.

Os **Erros sistemáticos de parametrização** dependentes do regime: podem aparecer como **erros aleatórios** em algum espaço ou escala de tempo devido aos regimes meteorológicos variados.



## (1) Quais são as fontes de incerteza do modelo?

- **Na prática, é difícil separar diferentes fontes de erro do modelo:**
  - (**erro sistemático versus erro aleatório**)
  - (**erro de truncamento versus incerteza do processo físico**)
  - (**erro estrutural versus incerteza do parâmetro**)

**Os esquemas de incerteza do modelo precisam representar todas essas fontes de erro.**



## **Quais são as características das interações no crescimento de erro/escala?**



**Quais são as características das interações no crescimento de erro/escala?**



## Quais são as características das interações no crescimento de erro/escala?



### 1. Avaliação dos modelos mostra diferenças em relação às observações:

Quando modelos numéricos são comparados a dados reais, são encontradas diferenças que podem ser causadas por:

- incertezas nas observações,
- variabilidade natural do sistema climático,
- falhas na forma como processos físicos são representados nos modelos.



## Quais são as características das interações no crescimento de erro/escala?



### 2. Principais erros identificados:

- **Precipitação convectiva:** Problemas no ciclo diário (horário) de chuva, tanto na intensidade quanto no momento em que ocorre. Também falhas na organização dos sistemas convectivos e na distribuição espacial e intensidade da chuva, influenciadas por fatores como o vapor d'água na coluna atmosférica, temperatura da superfície do mar (SST) e movimentos verticais do ar.
- **Microfísica das nuvens:** Erros relacionados à presença de diferentes fases da água nas nuvens (gelo, líquido super-resfriado, chuva quente), que afetam a formação e evolução das nuvens.
- **Precipitação em regiões montanhosas:** Equívocos na distribuição espacial e intensidade da chuva sobre terrenos irregulares, como montanhas.
- **Modelagem do MJO (Oscilação Madden-Julian):** Problemas na forma como essa importante oscilação intraseasonal tropicais se propaga e responde a erros médios, afetando também as teleconexões (influência em outras regiões).



## Quais são as características das interações no crescimento de erro/escala?



- **Nuvens na camada limite subtropical:** Ainda são sobreestimadas e exibem brilho excessivo nos modelos, com grande incerteza na sua variação conforme parâmetros climáticos; podem envolver feedbacks acoplados complexos.
- **Zona dupla de convergência intertropical e ENSO tendencioso:** Complexidade causada por uma extensão exacerbada para oeste do ENSO, interações nuvem-oceano, e insuficiente representação das ondas de instabilidade tropical.
- **Ciclones tropicais:** Previsões de alta resolução tendem a gerar ciclones mais intensos do que os reais, embora ao acoplar com modelos oceânicos haja melhorias moderadas; erros sistemáticos nas relações entre vento e pressão são comuns.
- **Arrasto na superfície:** Viéses e variabilidade em grande escala são sensíveis à forma como o arrasto da superfície é modelado. Erros médios detectados em modelos CMIP5 indicam arrasto insuficiente.
- **Erro na heterogeneidade do solo:** Representação incorreta da diversidade de tipos e características do solo, que afetam trocas superficiais.



## Quais são as características das interações no crescimento de erro/escala?



- **Física estocástica:** Apesar de benéficas, as atuais parametrizações estocásticas (que tentam representar incertezas) não capturam adequadamente toda a complexidade da incerteza do modelo.
- **Erros nos fluxos superficiais:** Falhas significativas na modelagem do fluxo de energia e massa entre superfície e atmosfera, incluindo erros no ciclo diário de temperatura da superfície.
- **Erros em variações e tendências de forçantes externas históricas:** Dificuldades em representar corretamente como fatores externos variaram historicamente e suas tendências, impactando simulações.
- **Desafios na previsão de regimes sinópticos em latitudes médias e bloqueios atmosféricos:** Problemas em prever corretamente padrões de circulação importantes em latitudes médias que influenciam o tempo.
- **Erros na representação das teleconexões entre estratosfera e troposfera:** O acoplamento adequado entre essas camadas é fundamental para modelar respostas climáticas distantes; erros nesse acoplamento comprometem a precisão.
- **Viéses no estado médio, aquecimento diabático, SST, resposta do vento meridional e jato troposférico impactam simulações de teleconexões.**