

# Parametrização de Radiação em modelos atmosféricos

Júlio C. S. Chagas

III Worketa, Cachoeira Paulista, 24 a 29 de outubro de 2010.

# Assuntos a serem tratados:

- 1. Palavras iniciais sobre MCGAs.
- 2. Diálogo entre Modelo e Código.
- 3. O bom trabalho.
- 4. O trabalho rápido:
  - Ondas curtas.
  - Ondas longas.
- 5. Exemplos.

# 1. Palavras iniciais sobre MCGAs

Modelos de circulação geral atmosférica (MCGA):

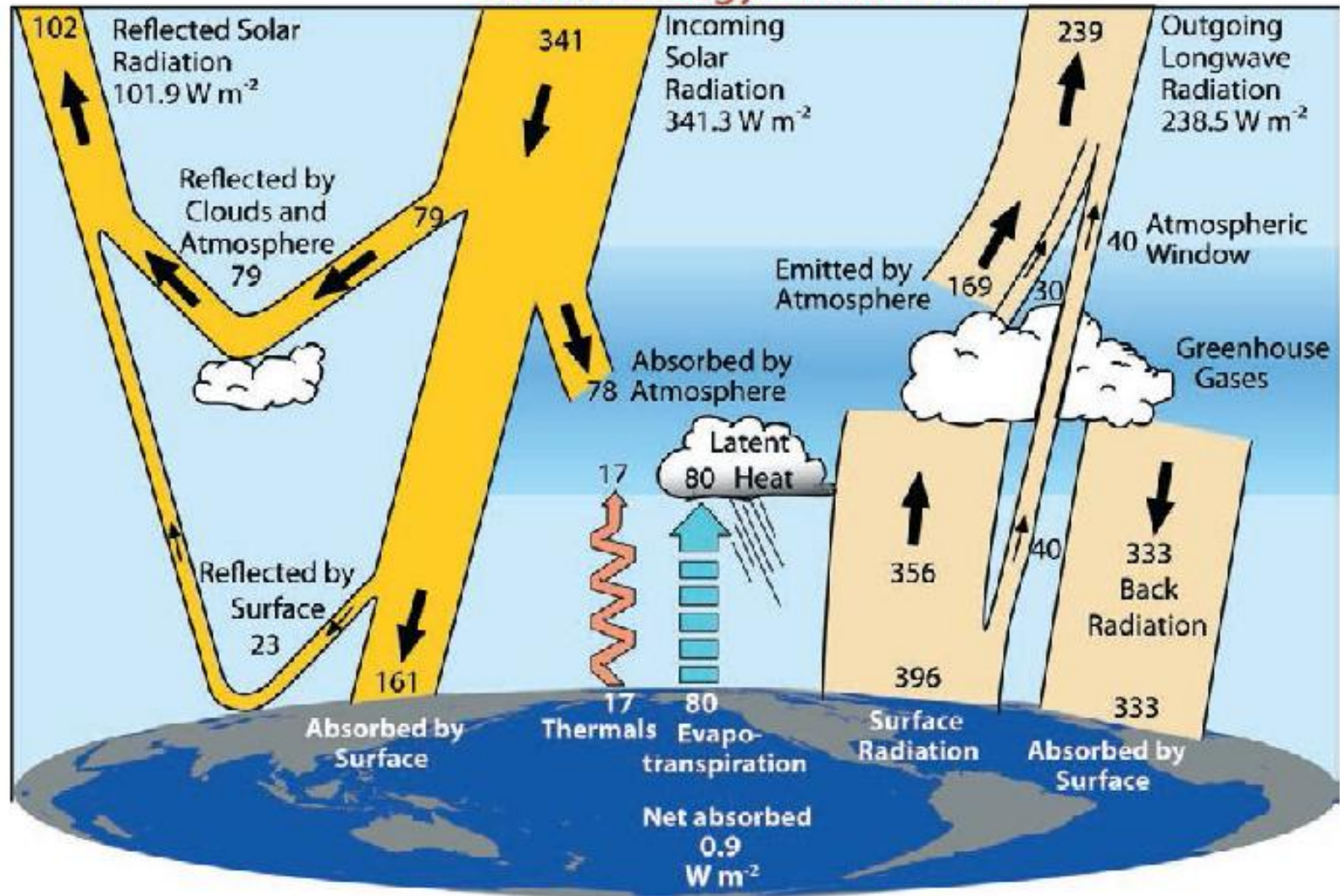
A “dinâmica do modelo”:

- Leis de conservação de massa, umidade, energia e momentum angular.
- Equações primitivas (equações da continuidade de massa para o ar seco e vapor de água, primeira lei da termodinâmica, equações do movimento (2ª lei de Newton), equação do balanço hidrostático).

A “física do modelo”:

- Interações entre atmosfera e superfície.
- Camada limite (processos turbulentos).
- Processos radiativos.
- Processos úmidos (condensação em grande escala, convecção rasa, convecção profunda).

## Global Energy Flows $W m^{-2}$

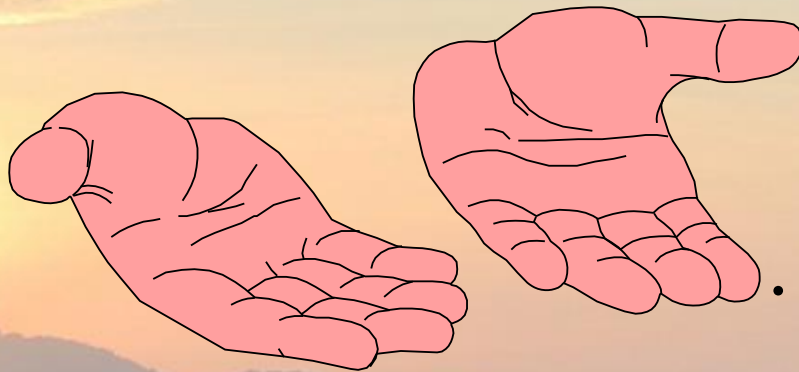


**FIG. 1.** The global annual mean Earth's energy budget for the Mar 2000 to May 2004 period ( $W m^{-2}$ ). The broad arrows indicate the schematic flow of energy in proportion to their importance.

## 2. O diálogo

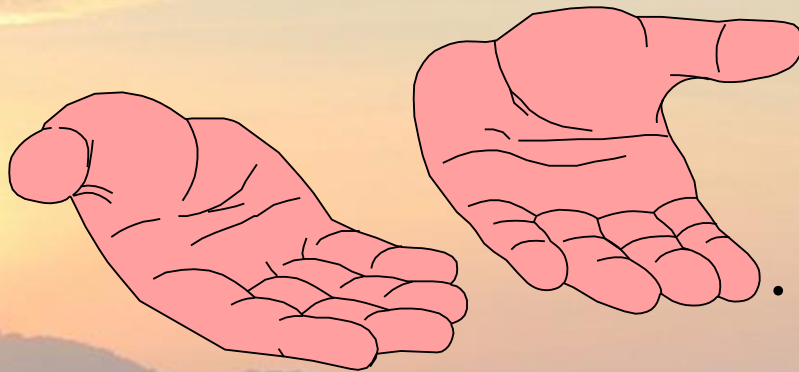


# Diálogo ouvido sempre que o programa principal chama a rotina de radiação:



- Modelo:
  - Entrego a você uma série de informações sobre o estado atual da atmosfera.
- Código radiativo:
  - Devolverei, depois de árduo trabalho, fluxos de energia no topo e na superfície e taxas de aquecimento no interior da atmosfera, conforme seu pedido.
- Modelo:
  - OK! Faça um bom trabalho, mas seja rápido, pois preciso concluir logo essa integração.

# Diálogo ouvido sempre que o programa principal chama a rotina de radiação:



- Modelo:
  - Entrego a você uma série de informações sobre o estado atual da atmosfera.
- Código radiativo:
  - Devolverei, depois de árduo trabalho, fluxos de energia no topo e na superfície e taxas de aquecimento no interior da atmosfera, conforme seu pedido.
- Modelo:
  - OK! Faça um bom trabalho, mas seja rápido, pois preciso concluir logo essa integração.

## Model equations in $\eta$ coordinate

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \mathbf{v} \right) + \nabla_{\eta} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \mathbf{v} \mathbf{v} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \dot{\eta} \mathbf{v} \right) + \frac{\partial p}{\partial \eta} \left( f \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{v} + \nabla_{\eta} \phi + \frac{R_d T_v}{p} \nabla_{\eta} p + \mathbf{F} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = - \frac{R_d T_v}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{\kappa T \omega}{p} + T' + \frac{g}{c_p} \frac{\partial R / \partial \eta}{\partial p / \partial \eta} = 0 \quad (3)$$

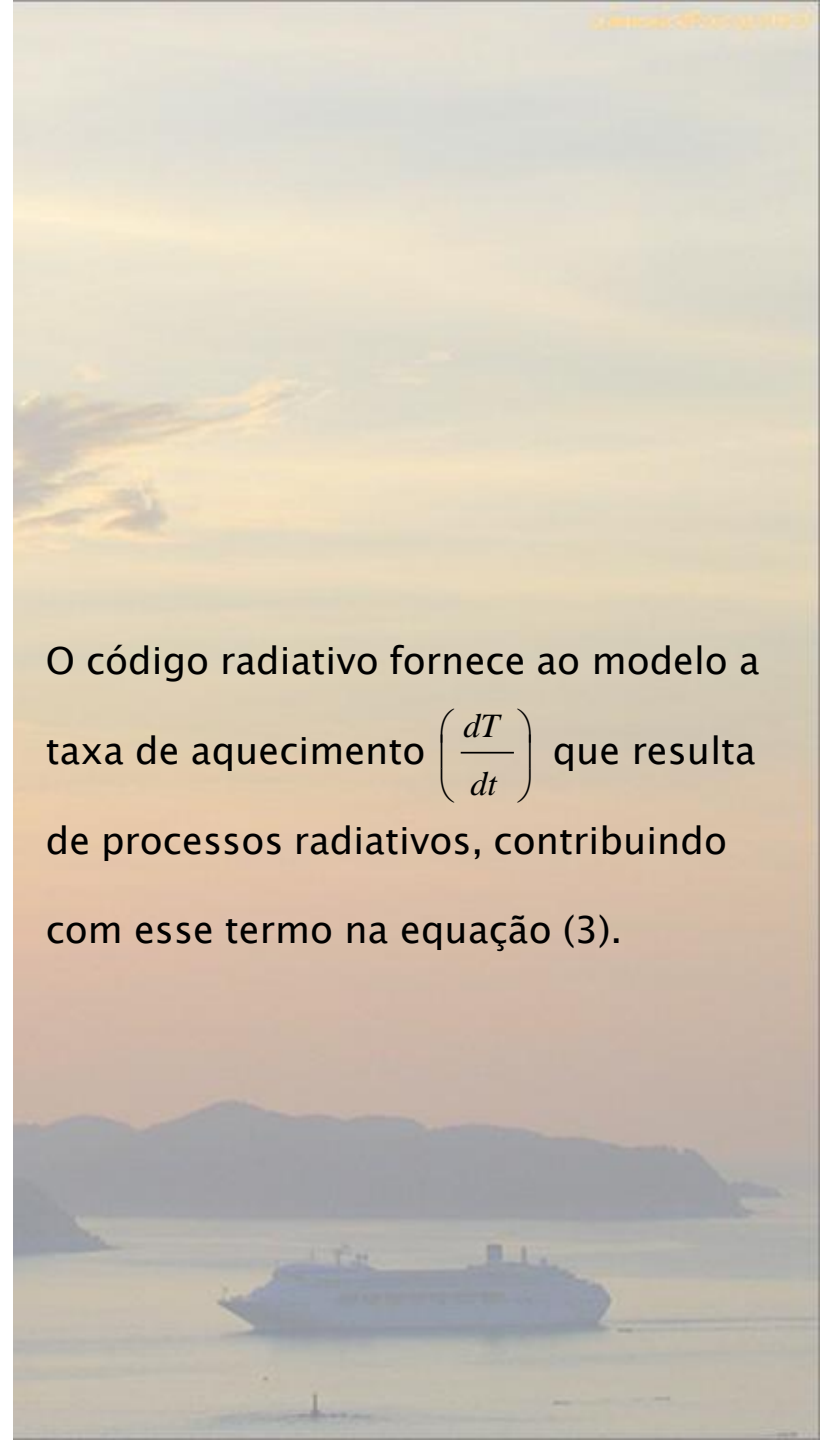
$$\frac{1}{\eta_s} \frac{\partial p_s}{\partial t} + \nabla_{\eta} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \mathbf{v} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \dot{\eta} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^{\eta_s} \nabla_{\eta} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \mathbf{v} \right) d\eta \quad (5)$$

$$\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} = - \frac{\eta}{\eta_s} \frac{\partial p_s}{\partial t} - \int_0^{\eta} \nabla_{\eta} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial \eta} \mathbf{v} \right) d\eta \quad (6)$$

$$\frac{dq}{dt} + q' = S \quad (7)$$

O código radiativo fornece ao modelo a taxa de aquecimento  $\left( \frac{dT}{dt} \right)$  que resulta de processos radiativos, contribuindo com esse termo na equação (3).





## Algumas equações

$$S + F^{\downarrow} + F^{\uparrow} + H + LE = 0 \quad \bullet \quad \text{Balanço de radiação à superfície}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dots + \frac{\tilde{Q}_{rad}}{c_p} + \dots$$

$$\tilde{Q}_{rad} = \tilde{Q}_{SW} + \tilde{Q}_{LW}$$

- Equação da tendência termodinâmica

$$Q_{SW} = \frac{\tilde{Q}_{SW}}{c_p} = \frac{g}{c_p} \frac{dF_{SW}^{net}}{dp}$$

$$Q_{LW} = \frac{\tilde{Q}_{LW}}{c_p} = \frac{g}{c_p} \frac{dF_{LW}^{net}}{dp}$$

- Taxas de aquecimento radiativo

## O modelo fornece ao código:

Perfis verticais de:

- Temperatura
- Pressão
- Razão de mistura dos gases:  
H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs,  
...
- Características das nuvens:
  - fração de cobertura (0 a 1)
  - raio efetivo das gotículas e das partículas de gelo
  - razão de mistura de água condensada
  - fração (0 a 1) de gelo/água líquida
- Razão de mistura dos aerossóis

## O código devolve ao modelo:

Fluxos de radiação (irradiância, W/m<sup>2</sup>):

- no topo da atmosfera (up, down, net)
- na superfície (up, down, net)  
*(... que o modelo irá usar para fechar os devidos balanços de energia).*

Taxas de aquecimento radiativo:

- em cada camada  
*(... que o modelo irá usar na composição do termo diabático da equação da termodinâmica).*

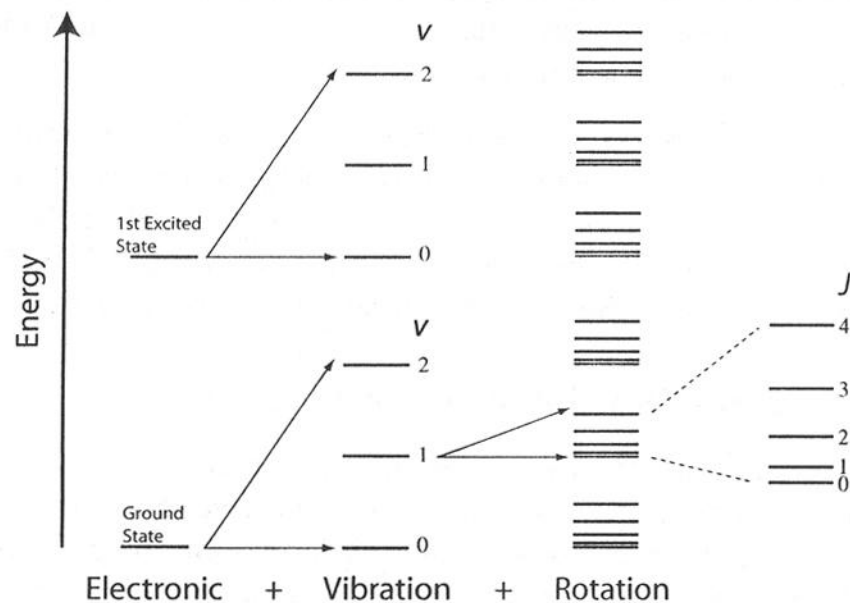
# 3. O bom trabalho



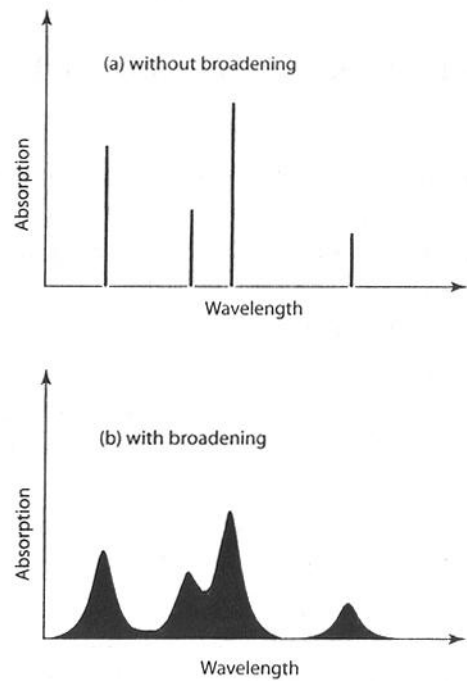
O melhor trabalho possível é o que poderia ser feito se não houvesse a necessidade de ser rápido.

- A base é a teoria da transferência de radiação, que vem sendo desenvolvida desde o final do século 19 por Boltzmann, Stefan, Wien, Planck, Einstein (espectro da radiação emitida por um corpo negro) e depois Chandrasekhar e outros (equação da transferência radiativa).
- Separação entre:
  - ondas curtas (quase toda energia abaixo do comprimento de onda de  $\sim 4 \mu\text{m}$  e a fonte fora da atmosfera: o sol).
  - ondas longas (quase toda energia acima de  $\sim 4 \mu\text{m}$  e as fontes: superfície, gases –  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  – e nuvens).
- Absorção e emissão de radiação por gases ocorre de forma discreta (linhas) para as quais se determinam, em laboratório, posição, forma e espessura. A base de dados espectroscópicos HITRAN registra **63.196 linhas apenas para o  $\text{H}_2\text{O}$**  em sua edição de 2004.
- *“Any unfortunate soul tasked with calculating broadband fluxes and/or heating rates in the cloud-free atmosphere has to contend with the enormous complexity of the absorption spectra of atmospheric constituents.”* (G.W.Petty, 2004).
- $\Rightarrow$  Cálculos “linha-a-linha”.

# Alguns conceitos:



**Fig. 9.5:** Schematic depiction of the superposition of electronic, vibrational and rotational energy levels. The absorption spectrum of a molecule is determined by all nonforbidden transitions between pairs of levels in the righthand column.



**Fig. 9.6:** Schematic depiction of the effect of broadening on a hypothetical line spectrum.

# Cálculo linha-a-linha

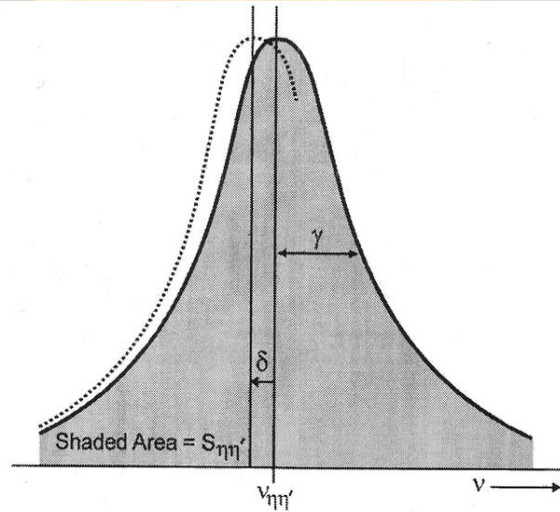


Fig. 1. Schematic of fundamental spectroscopic parameters of a line transition in HITRAN. The dotted line refers to a perturbed transition (with a negative  $\delta$ ).

S: line intensity at 296 K  
 $\nu$ : line transition frequency  
 $\gamma$ : line halfwidth at 296 K  
 $\delta$ : air-broadened pressure shift  
 $\eta, \eta'$ : lower, upper states

- Para se calcular a intensidade de radiação **monocromática** numa altura  $z$  é necessário somar as contribuições, de todas as linhas relevantes, ao coeficiente de absorção  $\beta_a$  naquela frequência  $\nu$  e repetir isso para todas as alturas.
- Para se obter a intensidade de radiação **numa banda larga**, esses cálculos devem ser feitos para cada um dos intervalos  $\Delta\nu$  (em geral um número muito grande).
- O cálculo de perfis de aquecimento radiativo dentro da atmosfera requer valores de intensidade de radiação em banda larga para cada nível em que a atmosfera for dividida (em geral um número pequeno).

Esse é realmente um trabalho árduo e caro: **milhões de vezes mais caro do que o problema monocromático.**

# Cálculo linha-a-linha

- Modelos linha-a-linha (LAL) são o que há de mais preciso para calcular radiâncias, **mas existem incertezas ...**
- Precisão de 5% na intensidade e de 10% na espessura das linhas.
- Cada modelo usa uma solução diferente da equação da transferência radiativa (distribuição de camadas atmosféricas, grade espectral, estratégias para maximizar a eficiência computacional, ...)
- Formulações para alguns ramos de absorção do  $\text{CO}_2$  e para o “continuum” do vapor de água ainda estão sujeitas a debate.



# Cálculo linha-a-linha

- Modelos linha-a-linha (LAL) são o que há de mais preciso para calcular radiâncias, **mas existem incertezas ...**
- Precisão de 5% na intensidade e de 10% na espessura das linhas.
- Cada modelo usa uma solução diferente da equação da transferência radiativa (distribuição de camadas atmosféricas, grade espectral, estratégias para maximizar a eficiência computacional, ...)
- Formulações para alguns ramos de absorção do CO<sub>2</sub> e para o “continuum” do vapor de água ainda estão sujeitas a debate.
- Intercomparação: Tjemkes *et al.* (2003) sete diferentes modelos LAL são comparados entre si e com observações.
- Observações: HIS (High resolution Interferometer Sounder) e ARIES (Air-borne Research Interferometer Evaluation System)
- Modelos:
  - LBLRTM (AER, EUA; EUMETSAT, Alemanha; SA, França; UW, EUA)
  - GENLN2 (ECMWF, Inglaterra; UKMO, Inglaterra)
  - HARTCODE (ADGB, Itália)
  - KOPRA (KOPRA, Alemanha)
  - LARA (LPMA, França)
  - LITMS (LITMS, Rússia)
  - 4A00 (LMD, França)
- Modelos em geral concordam
- Detectaram-se regiões espectrais em que os modelos têm discrepâncias entre si
- Algumas regiões importantes com diferenças entre observações e modelos

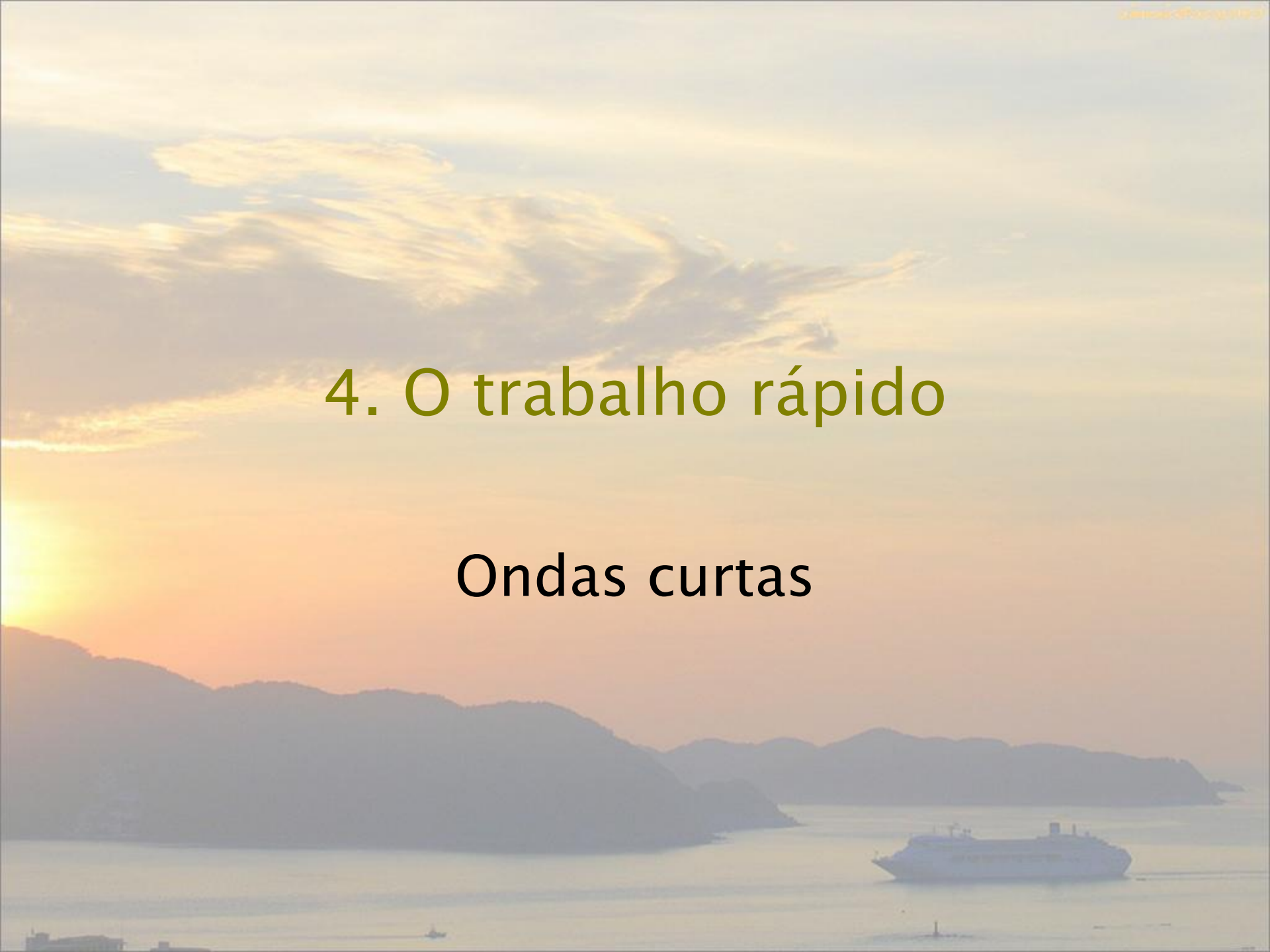
Tjemkes et al. The ISSWG line-by-line inter-comparison experiment. *J.Quant.Spec.Rad.Transf.*, 77:433-453, 2003.

# Cálculos linha-a-linha

- No desenvolvimento e implantação de modelos parametrizados, resultados obtidos com cálculos linha-a-linha são usados como valores de referência (“*benchmark*”) para testes.
- Depois de passar no teste, o código parametrizado é então implantado no modelo atmosférico.
- O CPTEC tem usado nos últimos anos os valores de referência de Fomin e Gershanov (1996a,b).
- Em julho de 2006, a AER (*Atmospheric Environment Research*) forneceu ao CPTEC alguns casos de referência para ondas curtas obtidos com o LBLRTM.

# 4. O trabalho rápido

## Ondas curtas



# Para ser rápido, é preciso parametrizar

- A propagação de radiação ocorre em **escalas espaciais muito menores do que as escalas explicitamente resolvidas pelos modelos atmosféricos** (por exemplo: interação com gotículas de nuvens).
- A **complexidade das equações** que descrevem a propagação de radiação (os modelos linha-a-linha) e o seu **alto custo computacional** não permitem o uso direto nos modelos atmosféricos.
- Portanto: é preciso **parametrizar**, ou seja,  
levar em conta os **efeitos radiativos** a partir das **variáveis do modelo** e na **escala espacial do modelo**

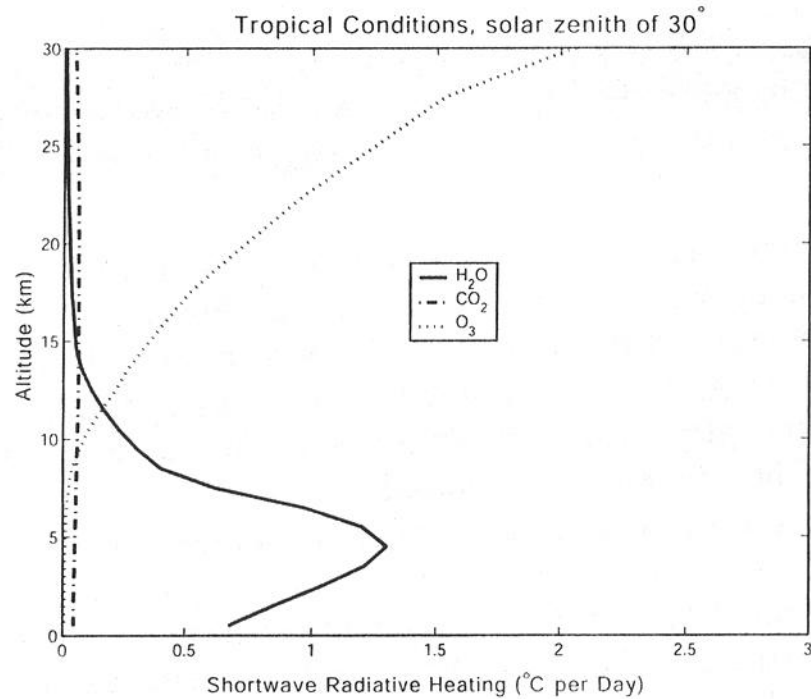
e

com **baixo custo computacional**.

# Ondas curtas – efeitos a serem incluídos

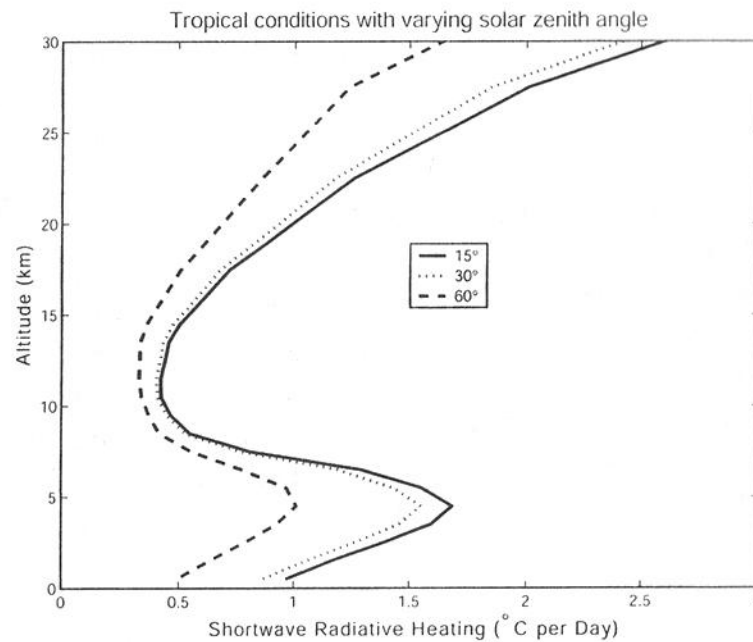
- **Absorção gasosa**  $\Rightarrow$  “aquecimento” devido a ondas curtas.
  - $\text{H}_2\text{O}$ : domina o aquecimento da troposfera,  $\sim 2$  K/dia em torno de 700 mb.
  - $\text{O}_3$ : domina o aquecimento da estratosfera,  $\sim 15$  K/dia na estratopausa.
  - $\text{CO}_2$ : aquecimento em toda a coluna, alguns décimos de K/dia.
- **Espalhamento molecular (espalhamento de Rayleigh)**
- **Espalhamento por partículas (espalhamento de Mie)**
  - Gotículas de água, partículas de gelo, aerossóis
  - Distribuição angular dos fótons espalhados (função de fase)
  - Eficiência em que um fóton é espalhado (albedo para espalhamento simples)

# Perfil de aquecimento devido à absorção de radiação solar.



**Fig. 10.6:** Typical heating profiles due to solar absorption in a cloud-free tropical atmosphere, segregated according to the responsible atmospheric constituents ozone (O<sub>3</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and water vapor (H<sub>2</sub>O). (Figure courtesy of S. Ackerman.)

# Perfil de aquecimento devido à absorção de radiação solar.



**Fig. 10.7:** Typical heating profiles due to solar absorption in a cloud-free tropical atmosphere at three different solar zenith angles. The heating profile for  $\theta_s = 30^\circ$  corresponds to the sum of the three profiles in Fig. 10.6. (Figure courtesy of S. Ackerman.)

## 4. O trabalho rápido

### Ondas longas

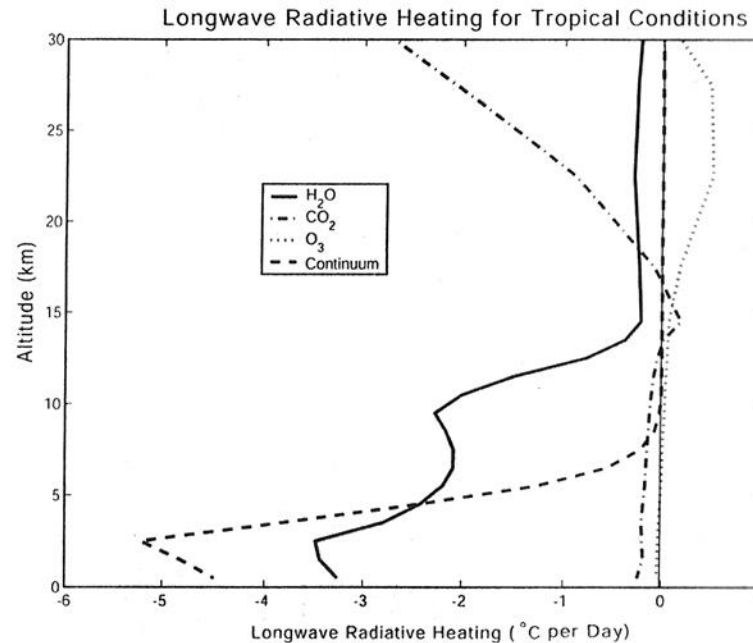




## Ondas longas – efeitos a serem incluídos

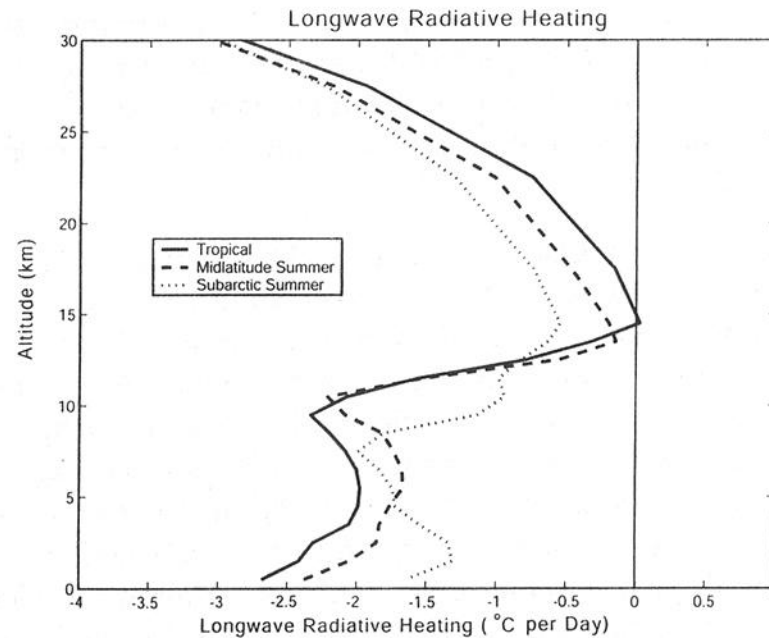
- **Absorção e emissão**  $\Rightarrow$  “resfriamento” devido a ondas longas.  
(Pois emissão domina, mas há aquecimento quando absorção domina).
  - **H<sub>2</sub>O**: resfriamento concentrado na troposfera ( $\sim 3$  K/dia), onde se concentra o gás, e muito pequeno acima da tropopausa ( $\sim 0.2$  K/dia).
  - “**Continuum**” do **H<sub>2</sub>O**: muito sensível à pressão, alto resfriamento em baixas altitudes ( $\sim 5$  K/dia), caindo a praticamente zero acima de 10 km.
  - **CO<sub>2</sub>**: pouco efeito na troposfera ( $\sim 0.1$  K/dia), pequeno aquecimento na tropopausa, “resfriamento para o espaço” dominante na estratosfera.
  - **O<sub>3</sub>**: responsável pelo aquecimento por ondas longas ( $\sim 0.5$  K/dia) entre 20 e 30 km, na base da camada de ozônio; resfriamento no topo da camada.
  - **O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs**: contribuições menores.

# Perfil de aquecimento devido à transferência de ondas longas



**Fig. 10.8:** Typical heating rate profiles due to longwave (thermal IR) radiative transfer in a cloud-free tropical atmosphere, segregated according to the responsible atmospheric constituents ozone (O<sub>3</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), water vapor resonant absorption (H<sub>2</sub>O), and water vapor continuum. Negative values represent cooling. (Figure courtesy of S. Ackerman, with modifications.)

# Perfil de aquecimento devido à transferência de ondas longas



**Fig. 10.9:** Total longwave heating rate profiles for three different model atmospheres. (Figure courtesy of S. Ackerman, with modifications.)

# Linha de absorção x banda de absorção

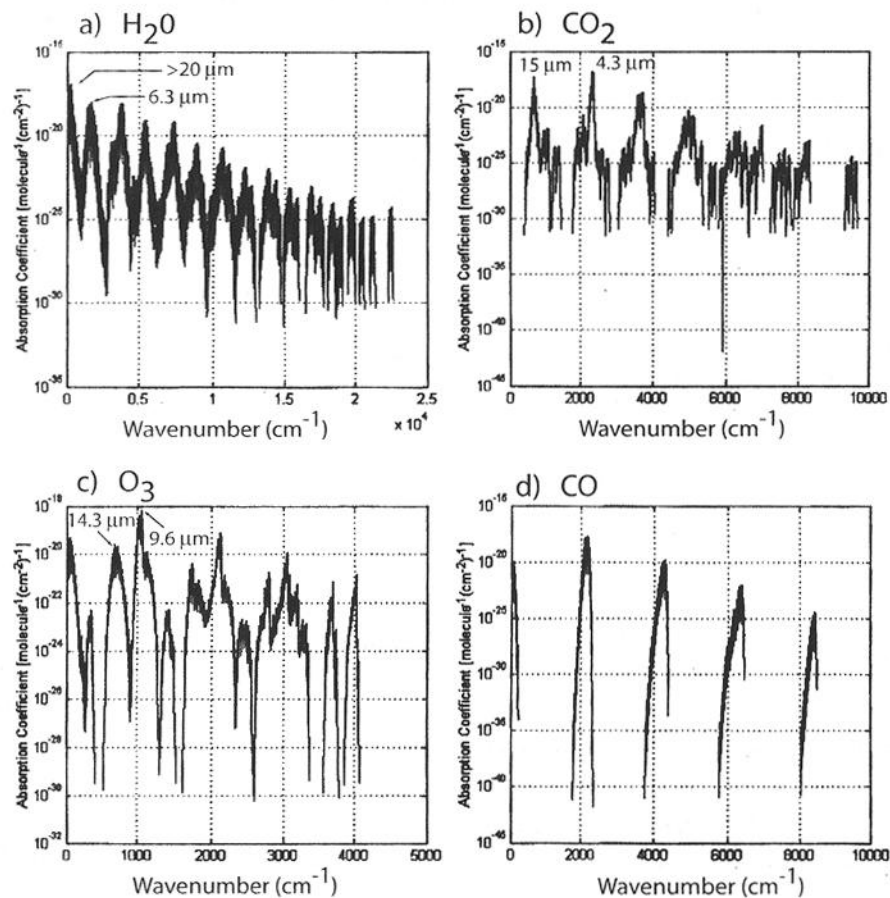


Fig. 9.10: Spectra of absorption cross-sections for several molecules encountered in the atmosphere. Absorption bands of particular significance for thermal radiative transfer in the atmosphere are labeled with the center wavelength. (a) Water vapor. (b) Carbon dioxide. (c) Ozone. (d) Carbon monoxide.

# 5. Exemplos



## Exemplo 1: modificação do código de ondas curtas do modelo global do CPTEC corrigindo Lacis e Hansen (1974) de acordo com Ramaswamy e Freidenreich (1992) para absorção de radiação solar pelo vapor de água

- Fowle (1915): absorptância média x conteúdo de vapor de água, para as bandas de absorção centradas em 0.72, 0.8, 0.94, 1.1, 1.38 e 1,87  $\mu\text{m}$   $\Rightarrow$  curvas.
- Howard et al. (1956a,b): absorção total x conteúdo de vapor de água, para as bandas de absorção em 0.94, 1.1, 1.38, 1.87, 2.7, 3.2 e 6,3  $\mu\text{m}$   $\Rightarrow$  expressões analíticas.
- Yamamoto (1962): juntou curvas em 0.72 e 0.8  $\mu\text{m}$  de Fowle e as expressões de Howard et al. para as demais bandas e produziu uma curva da absorptância em função do conteúdo de vapor de água.
- Lacis & Hansen (1974): ajustou expressão analítica à curva de Yamamoto,

$$A(w) = \frac{2.9 w}{(1 + 141 .5 w)^{0.635} + 5.925 w}$$

e escreveu isso na forma de uma soma de exponenciais (8 termos):

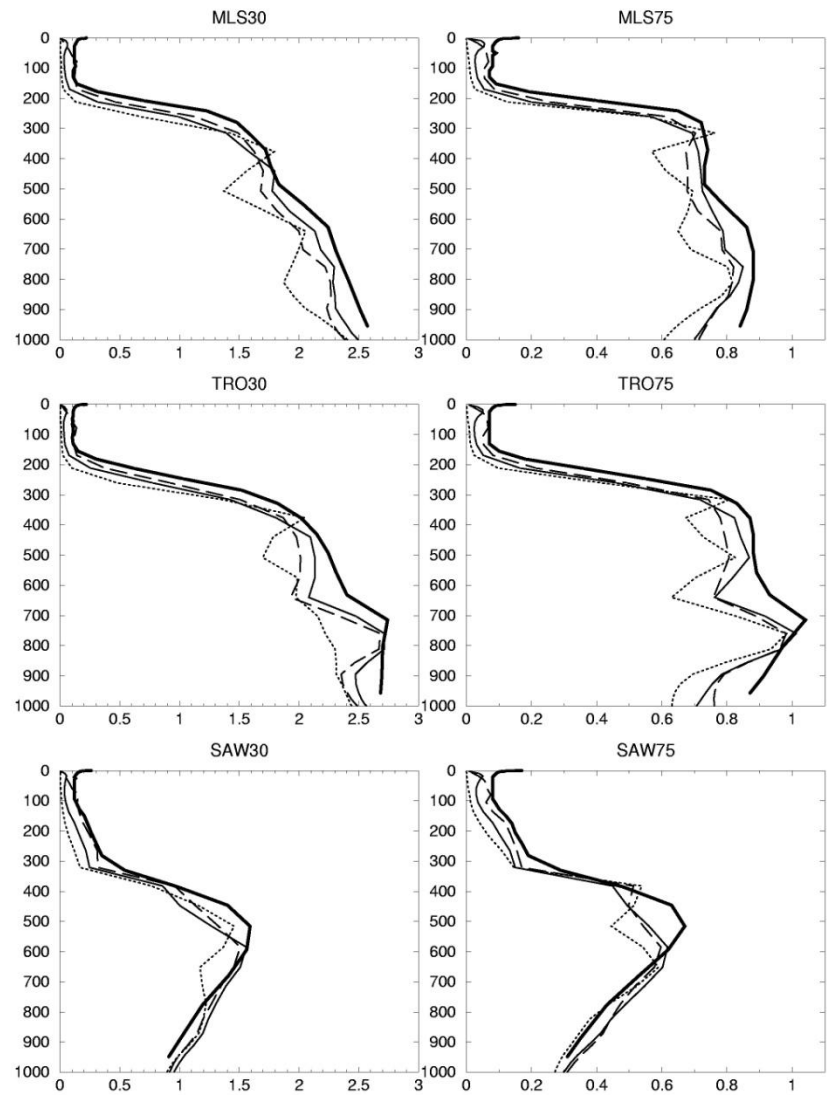
$$A(w) = 1 - \sum_{n=1}^N P(k_n) \cdot \exp[-k_n \cdot w]$$

- Ramaswamy & Freidenreich (1992): “corrigiram” a soma de exponenciais de Lacis & Hansen para ajustar a resultados linha-a-linha  $\Rightarrow$  soma com 11 termos  $\Rightarrow$  maior absorção.

Lacis AA and Hansen JE. A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **31**:118–133, 1974.

Ramaswamy V and Freidenreich SM. A study of broadband parameterizations of the solar radiative interactions with water vapor and water drops. *J. Geoph. Res.*, **97(D11)**:11487–11512, 1992.

# Perfis de taxa de aquecimento em K/dia.

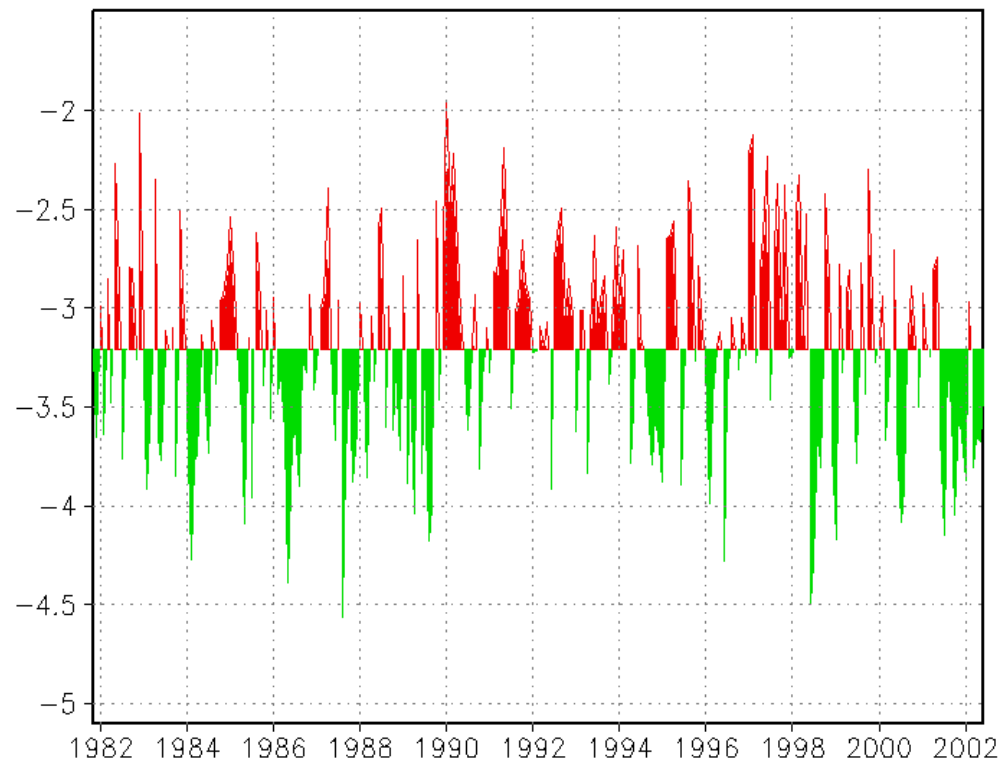


- Linha cheia grossa:  
Fomin e Gershanov 1996
- Linha cheia fina:  
Ramaswamy e Freidenreich 1992
- Linha pontilhada:  
Davies 1982
- Linha tracejada:  
Lacis e Hansen 1974



Diferenças entre a média global da radiação de onda curta incidente à superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) calculada pelo modelo modificado (RF92) e a calculada pelo modelo atual (LH74) para os 248 meses de integração.

A diferença é sempre negativa (RF92 absorve mais do que LH74), fica na média em torno de  $3,2 \text{ W}/\text{m}^2$  e uma nova variabilidade surge. O problema do **excesso de radiação de ondas curtas incidente na superfície** foi diminuído mas ainda não resolvido.





## Exemplo 2: implantação do código do UKMetOffice para ondas curtas no modelo global do CPTEC.

O código de ondas curtas do modelo global (RF92 para vapor de água e LH74 para ozônio) foi substituído por um novo código (Edwards & Slingo, 1996) baseado no conceito de “*correlated-k distribution*”.

A absorção é escrita como várias somas de exponenciais para algumas bandas espectrais. Pesos e expoentes são obtidos a partir de parâmetros de linhas de absorção.

Antes da implantação, comparações *off-line* entre quatro códigos:

- CPTEC-old (LR74 para vapor de água e para ozônio)
- CPTEC-new (RF92 para vapor de água e LR74 para ozônio)
- CLIRAD-m (Chou & Suarez 1999; Tarasova & Fomin 2002)
- UKMO (ES96 para ozônio, vapor de água e CO<sub>2</sub>)

Valores de referência obtidos com LBLRTM fornecidos pela AER, Estados Unidos.

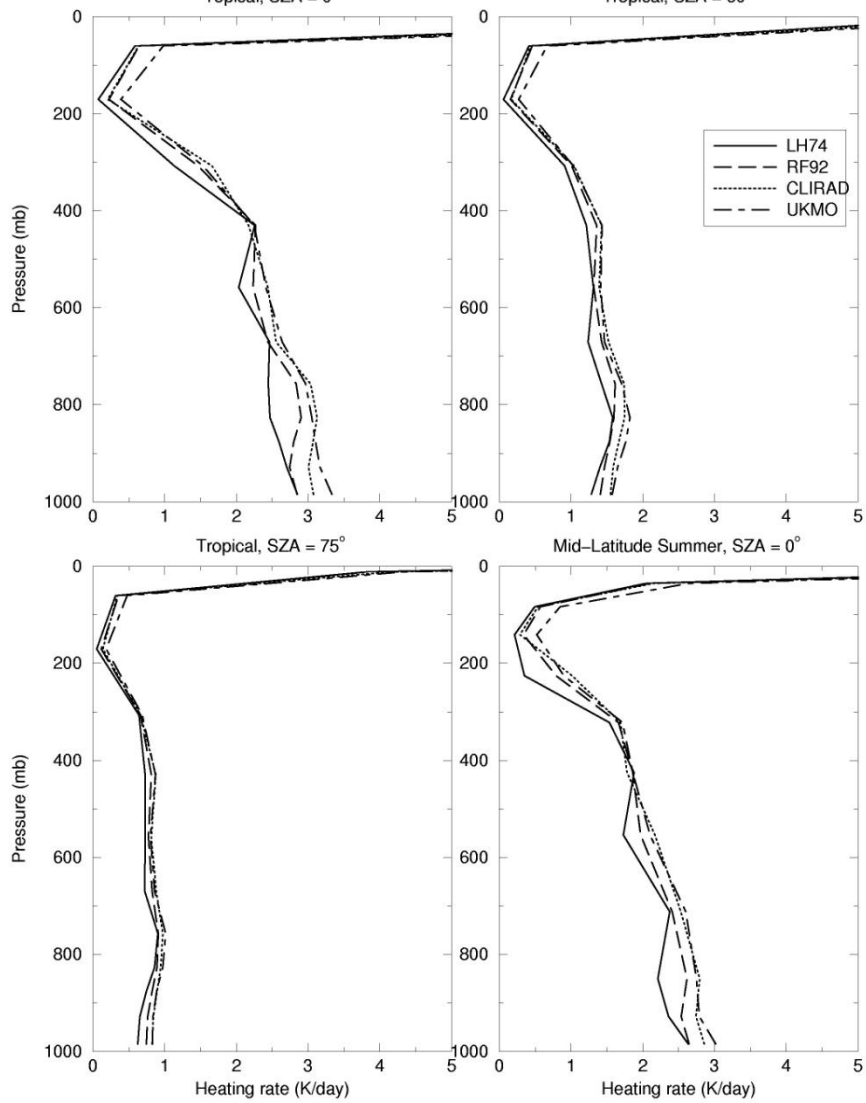
### CLEAR CASES

Tropical, SZA = 0°

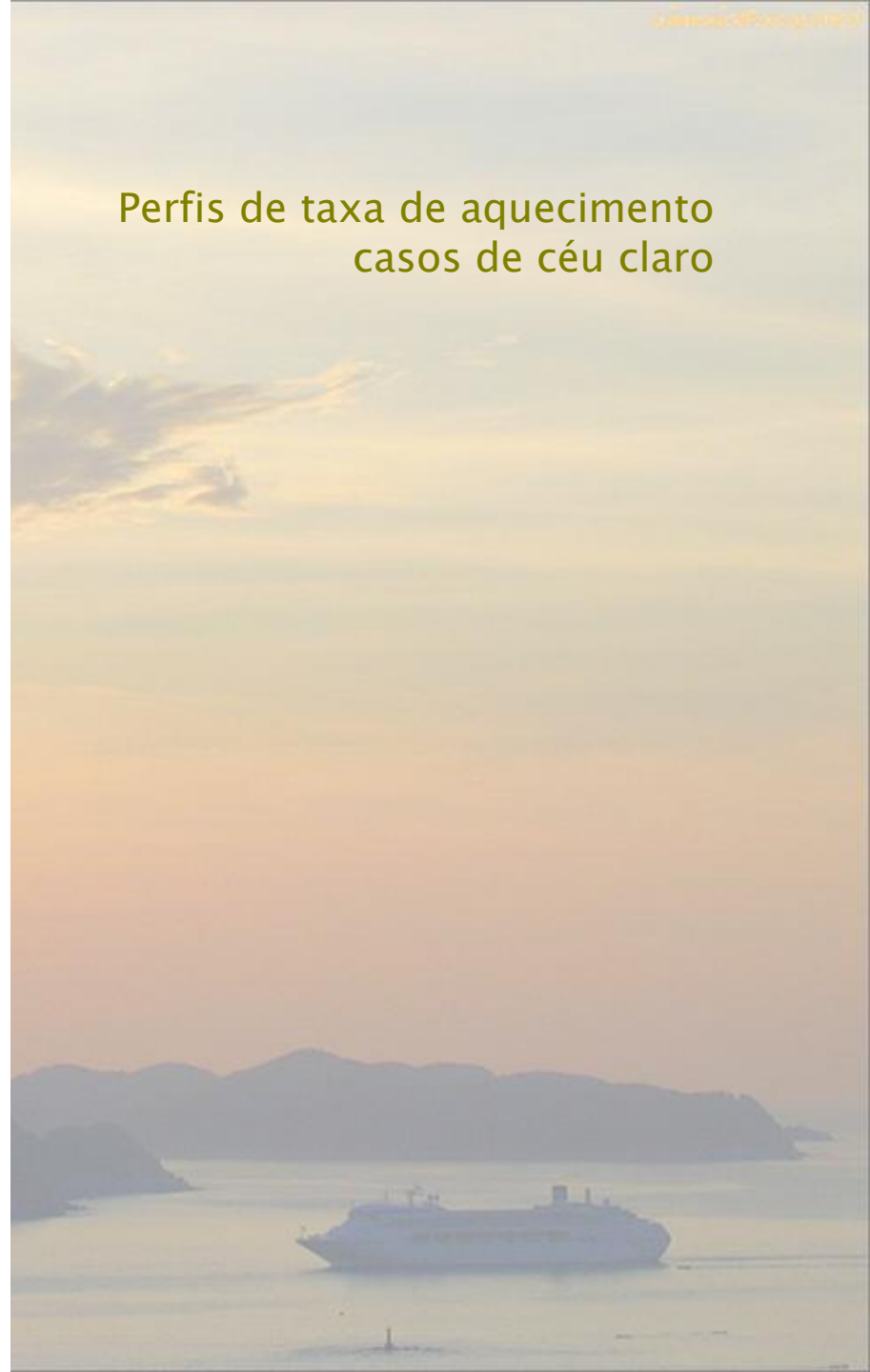
Tropical, SZA = 60°

Tropical, SZA = 75°

Mid-Latitude Summer, SZA = 0°

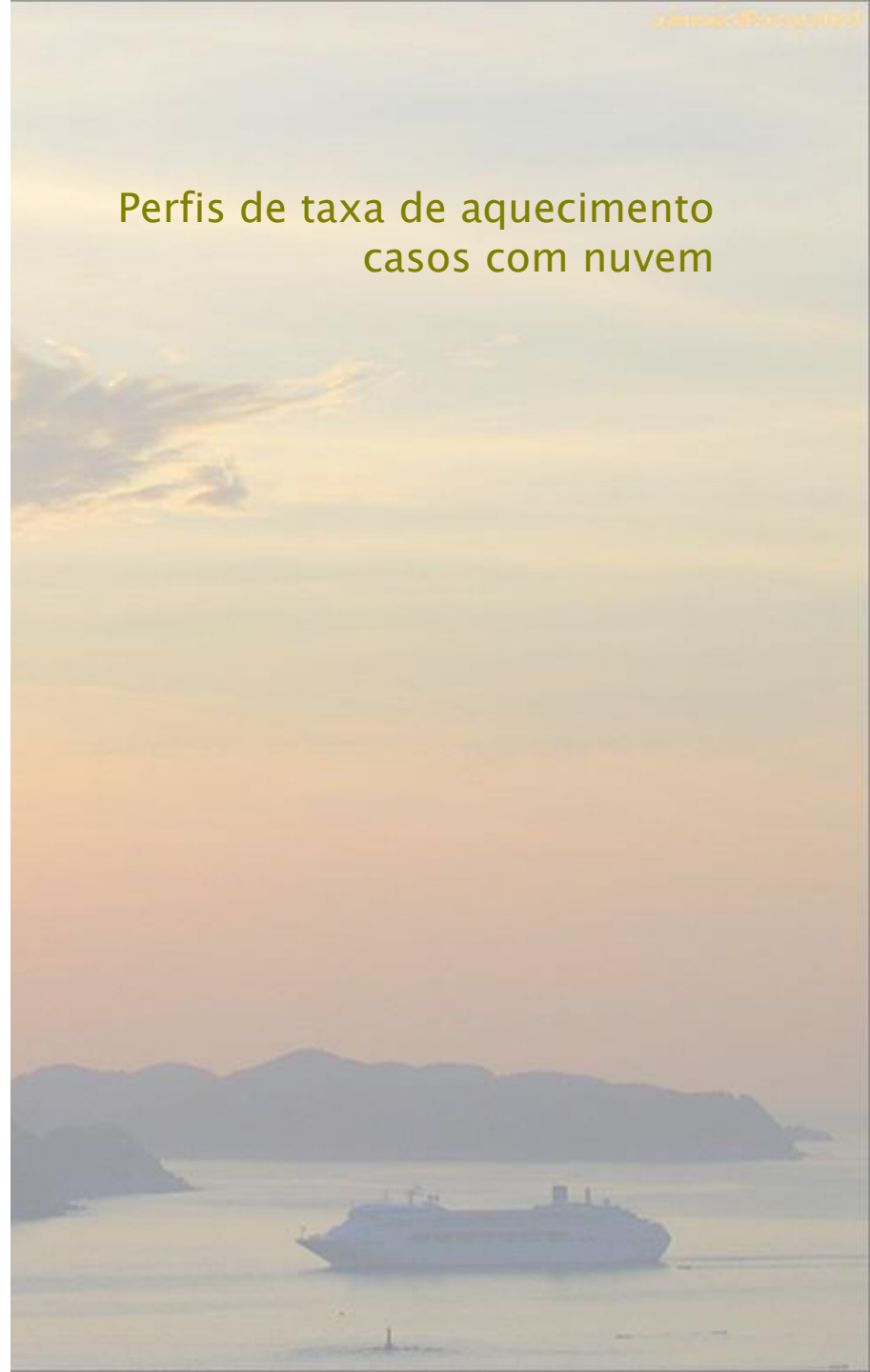
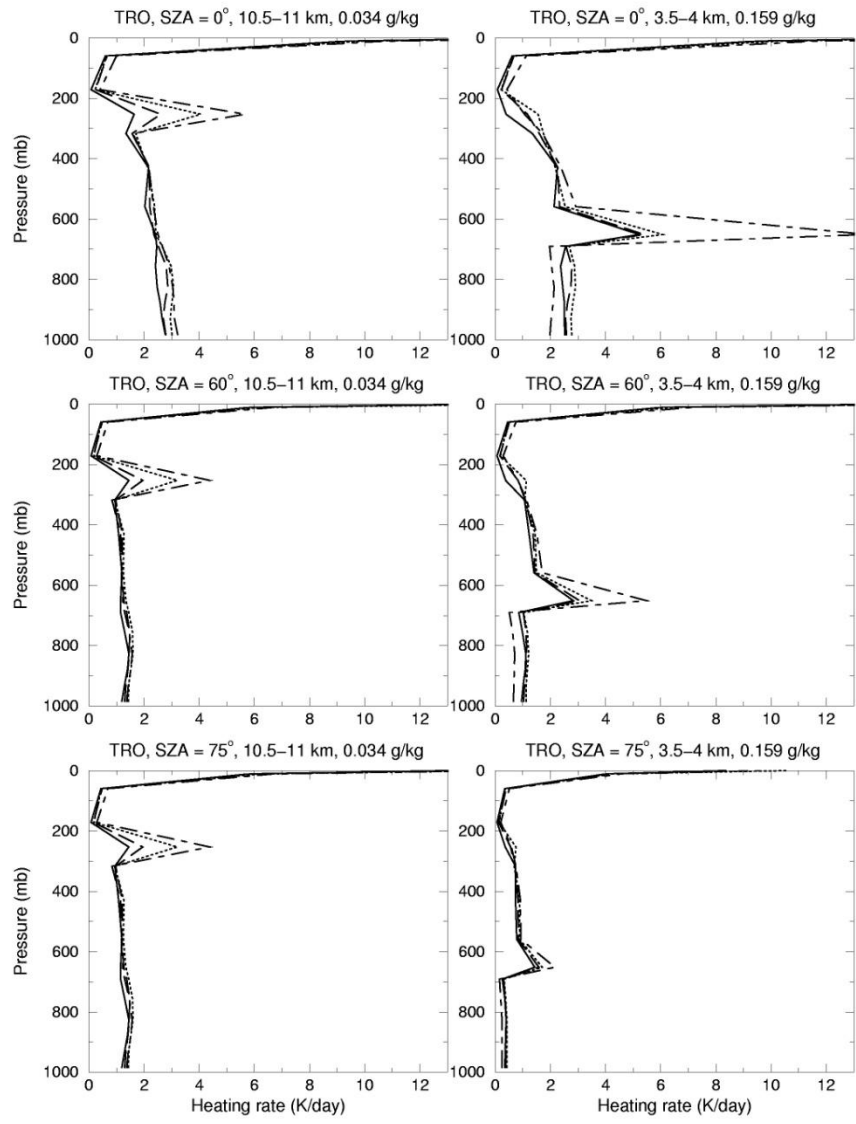


## Perfis de taxa de aquecimento casos de céu claro



# Perfis de taxa de aquecimento casos com nuvem

## CLOUDY CASES



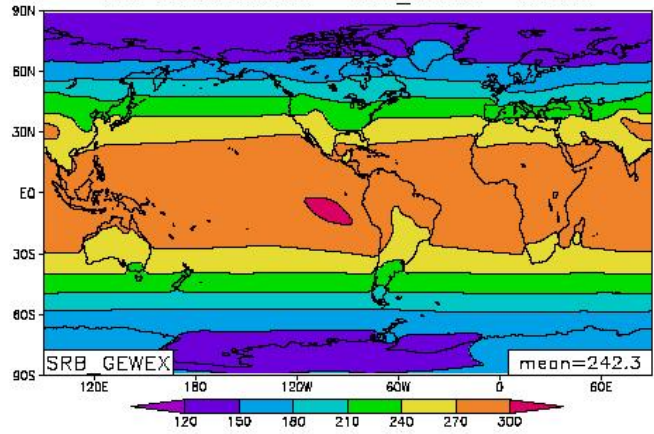
# Casos com céu claro

Caso	LBLRTM	CPT-old	CPT-new	CLIRAD	UKMO
<i>Refletância no topo da atmosfera:</i>					
tro00	0,170	+0,006	+0,003	+0,003	-0,001
mls00	0,173	+0,005	+0,002	+0,003	-0,000
tro60	0,189	+0,007	+0,003	+0,004	-0,003
tro75	0,216	+0,011	+0,007	+0,005	-0,005
<i>Absortância da atmosfera:</i>					
tro00	0,207	-0,038	-0,024	-0,013	-0,006
mls00	0,194	-0,033	-0,019	-0,010	-0,005
tro60	0,247	-0,046	-0,030	-0,017	-0,009
tro75	0,292	-0,055	-0,035	-0,019	-0,013
<i>Absortância da superfície:</i>					
tro00	0,622	+0,032	+0,021	+0,009	+0,007
mls00	0,634	+0,029	+0,017	+0,007	+0,005
tro60	0,564	+0,039	+0,027	+0,013	+0,012
tro75	0,492	+0,044	+0,028	+0,014	+0,017

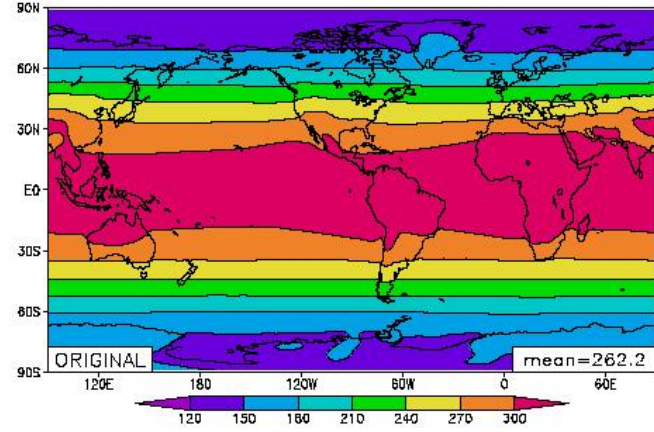
# Casos com nuvens

Caso	LBLRTM	CPT-old	CPT-new	CLIRAD	UKMO
<i>Refletância no topo da atmosfera:</i>					
high00	0,188	-0,007	-0,010	-0,005	+0,001
high60	0,288	-0,039	-0,043	-0,048	-0,016
high75	0,425	-0,086	-0,091	-0,104	-0,048
low00	0,387	-0,172	-0,176	-0,174	-0,009
low60	0,511	-0,177	-0,182	-0,189	-0,009
low75	0,567	-0,132	-0,139	-0,148	-0,009
<i>Absortância da atmosfera:</i>					
high00	0,210	-0,041	-0,027	-0,015	-0,006
high60	0,225	-0,036	-0,020	-0,007	-0,007
high75	0,212	-0,011	+0,006	+0,021	+0,004
low00	0,225	-0,048	-0,033	-0,022	-0,005
low60	0,227	-0,036	-0,021	-0,010	-0,011
low75	0,242	-0,039	-0,023	-0,012	-0,016
<i>Absortância da superfície:</i>					
high00	0,602	+0,048	+0,037	+0,020	+0,005
high60	0,487	+0,075	+0,063	+0,055	+0,023
high75	0,362	+0,097	+0,084	+0,083	+0,044
low00	0,388	+0,220	+0,209	+0,196	+0,014
low60	0,261	+0,213	+0,203	+0,198	+0,020
low75	0,191	+0,170	+0,162	+0,160	+0,025

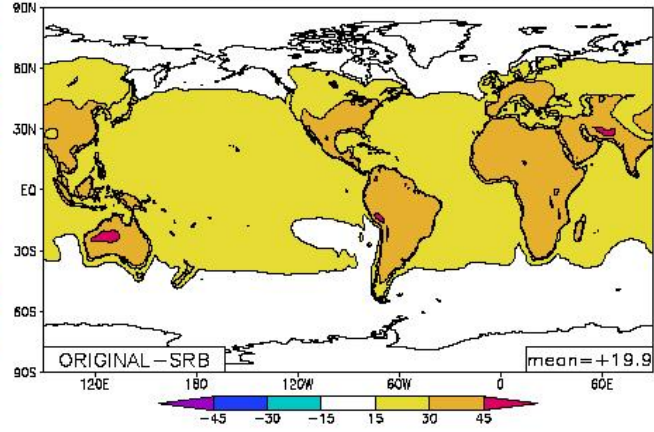
SFC SW down clear - SRB\_GEWEX - Annual



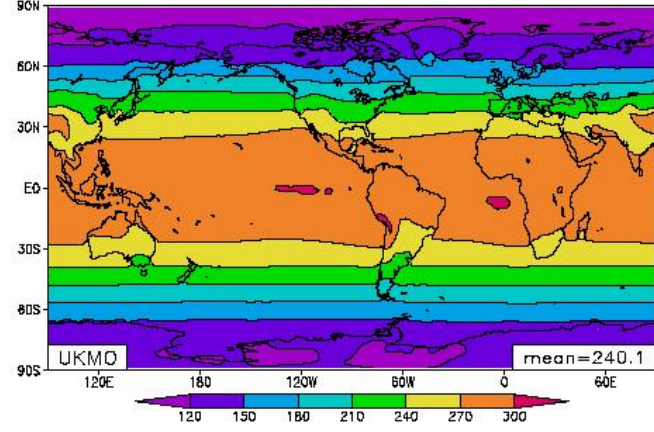
SFC SW down clear - ORIGINAL - Annual



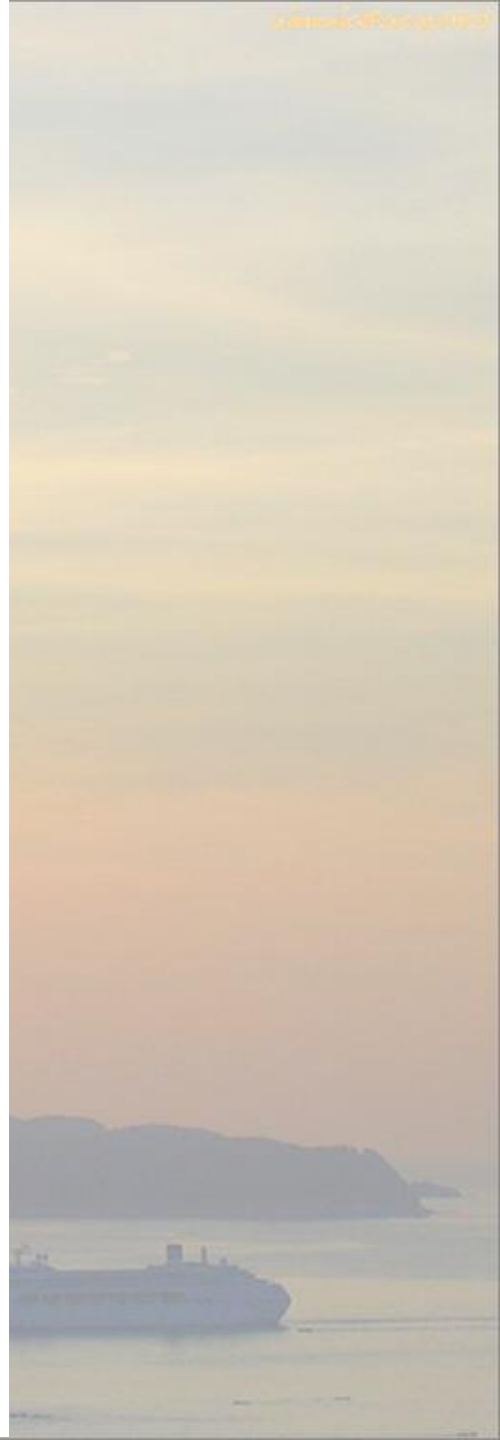
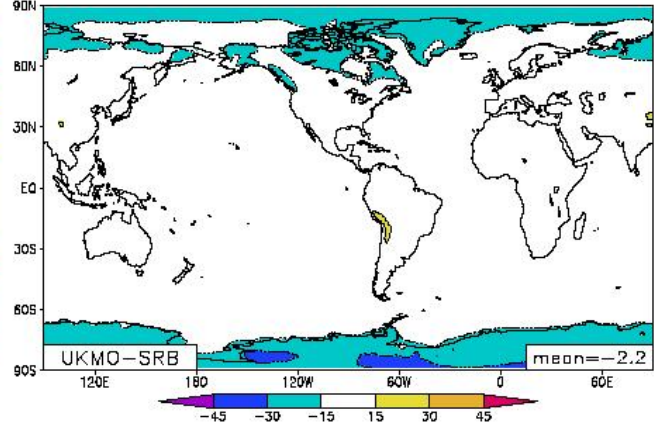
SFC SW down clear - ORIGINAL-SRB - Annual



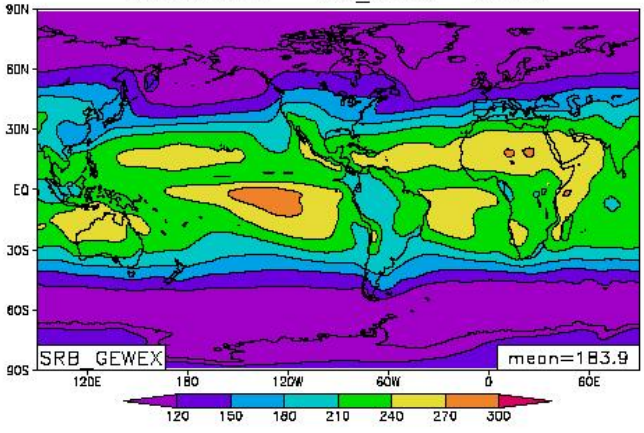
SFC SW down clear - UKMO - Annual



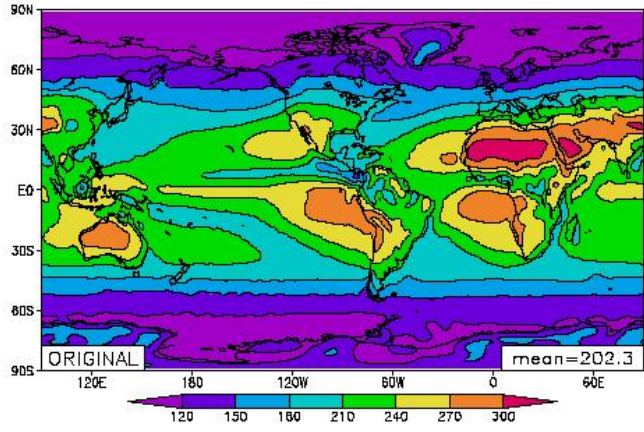
SFC SW down clear - UKMO-SRB - Annual



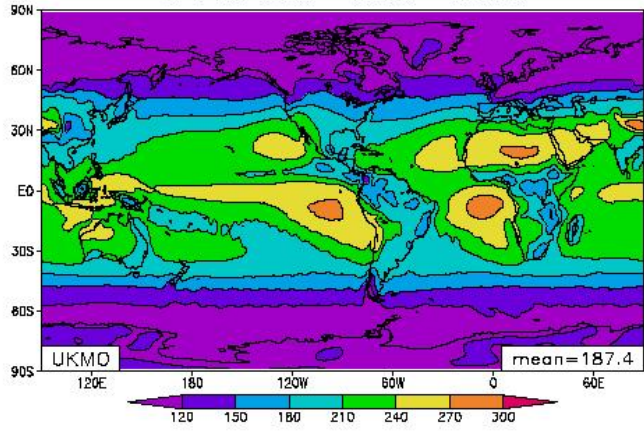
SFC SW down - SRB\_GEWEX - Annual



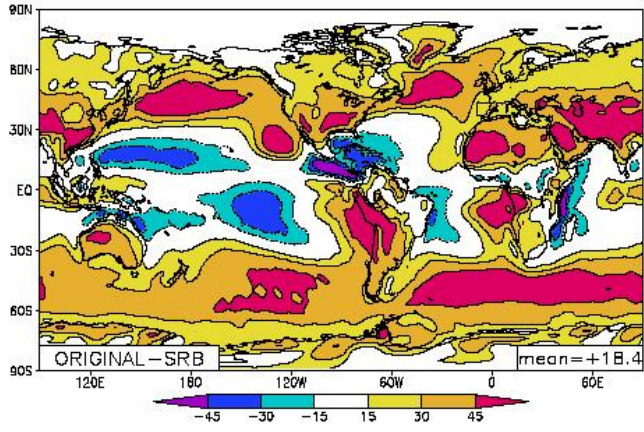
SFC SW down - ORIGINAL - Annual



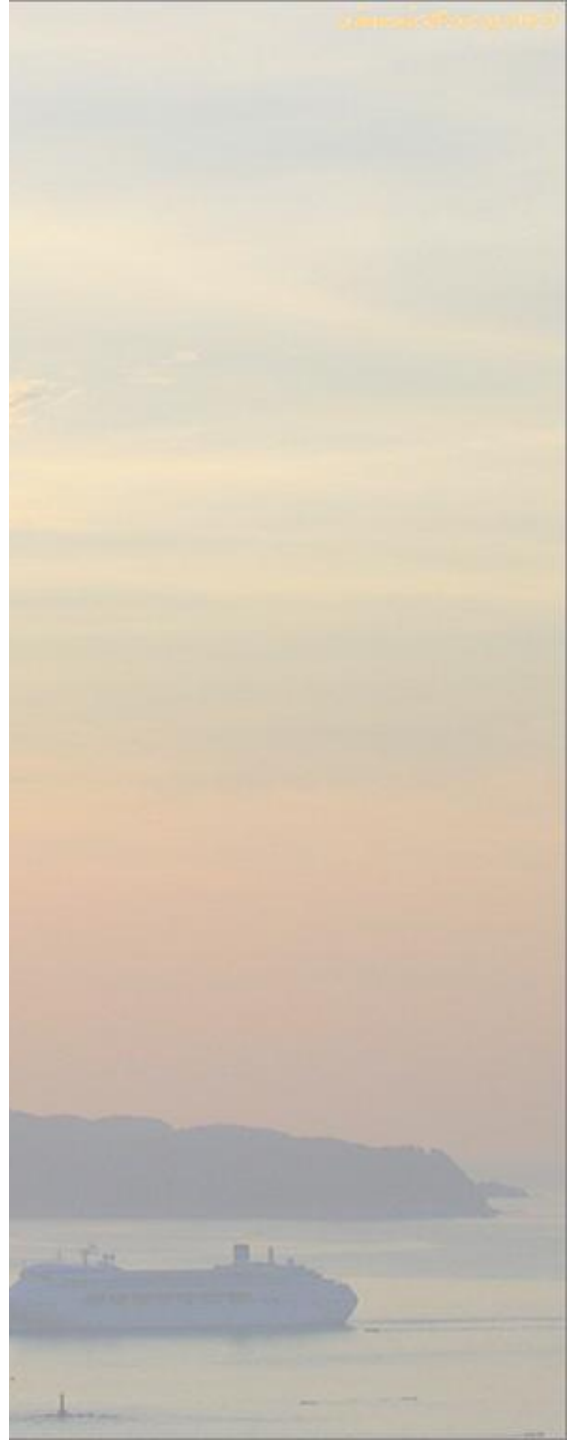
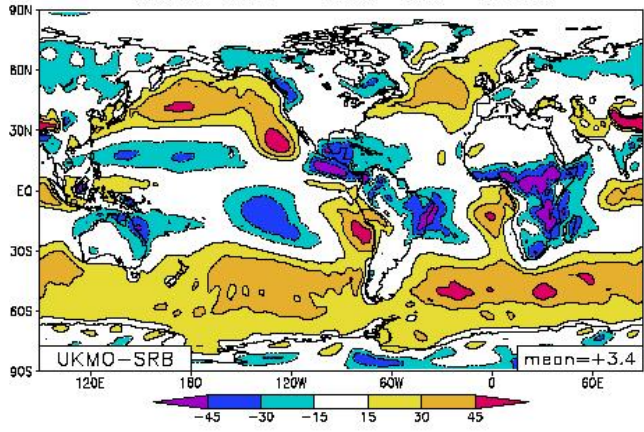
SFC SW down - UKMO - Annual



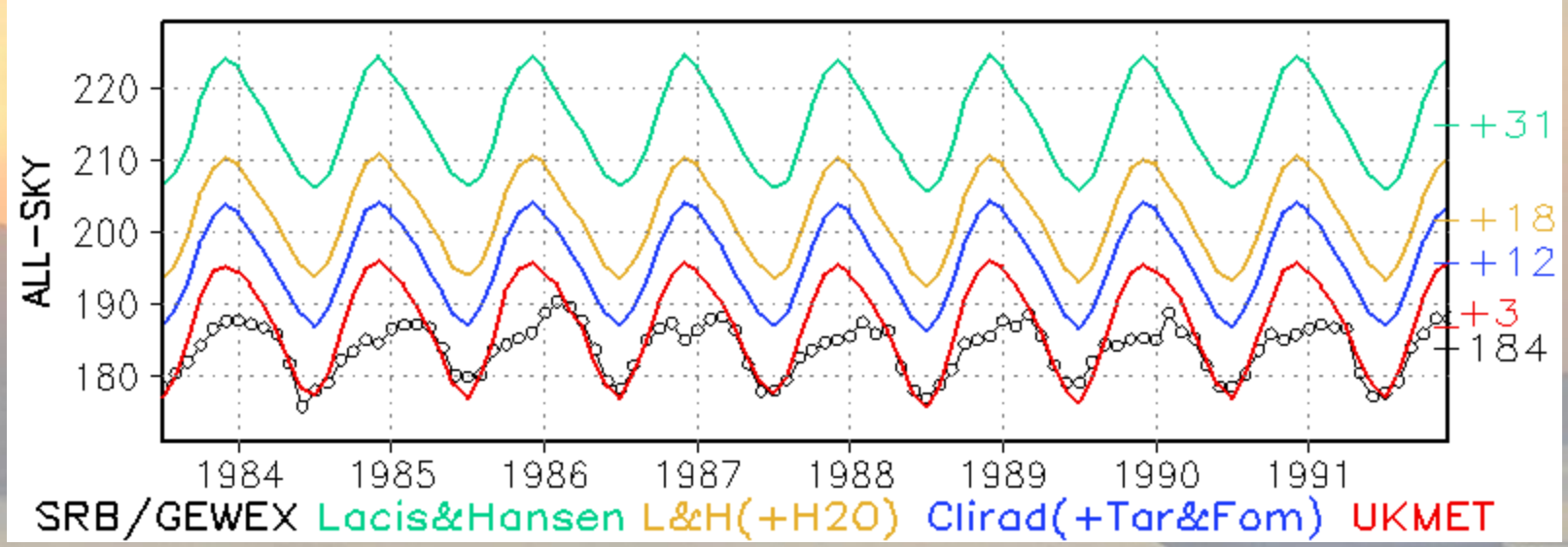
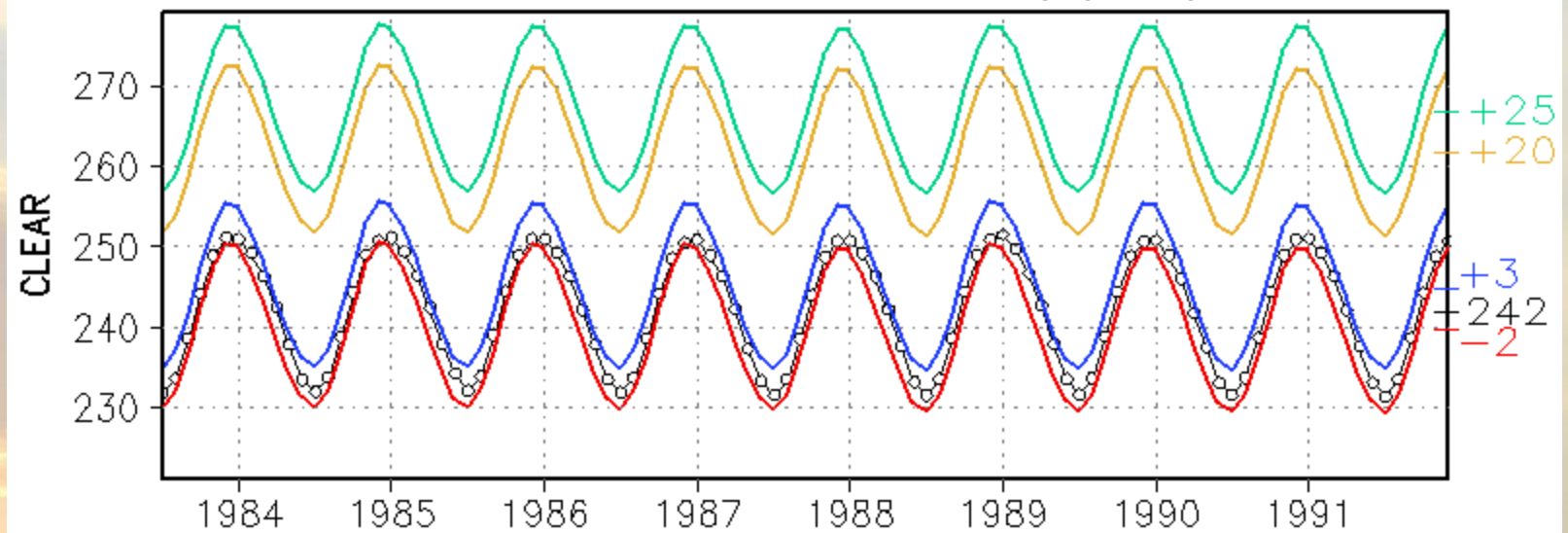
SFC SW down - ORIGINAL-SRB - Annual



SFC SW down - UKMO-SRB - Annual



### DOWNWARD SURFACE FLUX (W/m<sup>2</sup>)



SRB/GEWEX L&H(+H<sub>2</sub>O) Clirad(+Tar&Fom) UKMET



Obrigado.

