



WORK VIII 2025 Eta

WORKSHOP EM MODELAGEM NUMÉRICA DE TEMPO, CLIMA
E MUDANÇAS CLIMÁTICAS UTILIZANDO O MODELO ETA

Introdução Parametrização da Radiação Solar e Terrestre em Modelos de Previsão Numérica

Simone Sievert
DISSM/CGCT-INPE

Conteúdo da Aula

- O que faz um esquema de radiação?
- Quais parâmetros de entrada e variáveis de saída em um esquema de parametrização de radiação?
- Quais são as equações de transferência radiativa, e como são parametrizadas nos modelos meteorológicos?
- Quais são os desafios dos códigos de radiação?

O que faz um Esquema de Radiação?

Input

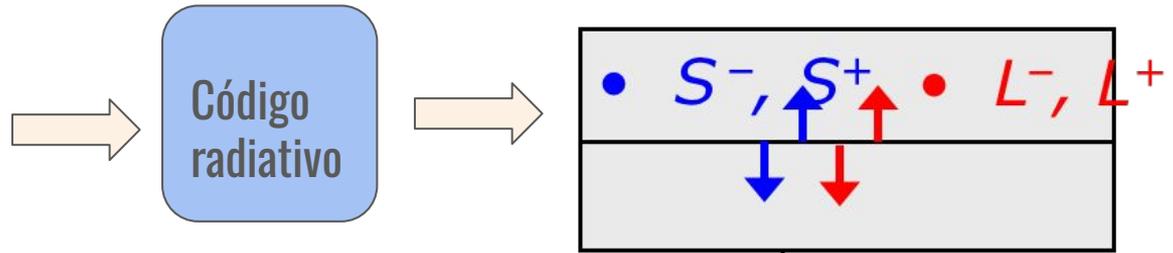
Variáveis Prognósticas:

Temperatura, Umidade, Fração de nuvens, Razões de mistura de líquido e gelo, Temperatura da superfície

Variáveis Diagnósticas:

Ângulo solar, Albedo da superfície, Gases atmosféricos: O3 (ozônio), aerossol, CO2, O2, CH4, N2O, CFC-11 e CFC-12.

Equação da Termodinâmica

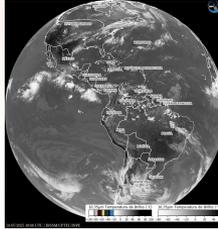
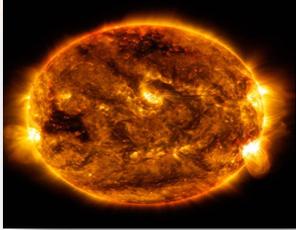


Output:

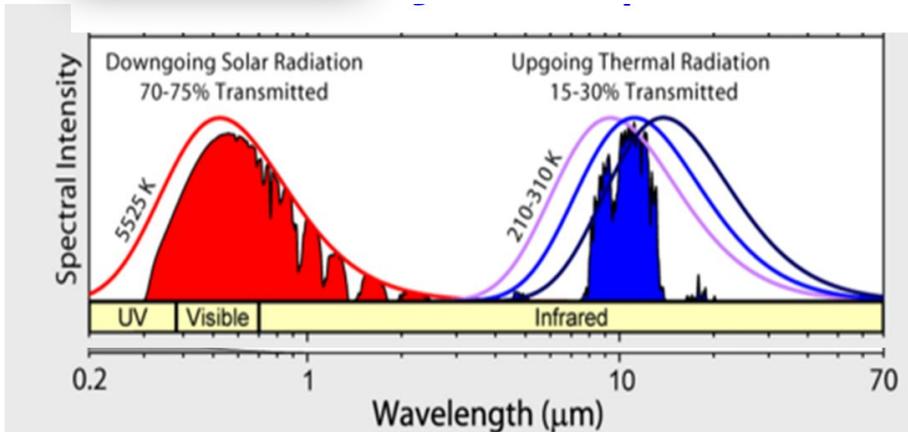
Fluxos radiativos que atravessam uma camada atmosférica

$$\frac{D\bar{\theta}}{Dt} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial R_n}{\partial z} + latent + \dots$$

Radiação Solar e Terrestre



A origem e o comprimento de onda da radiação (Sol versus Terra) definem como ela se comporta e, por isso, exigem equações e parametrizações diferentes para serem representadas com precisão nos modelos.



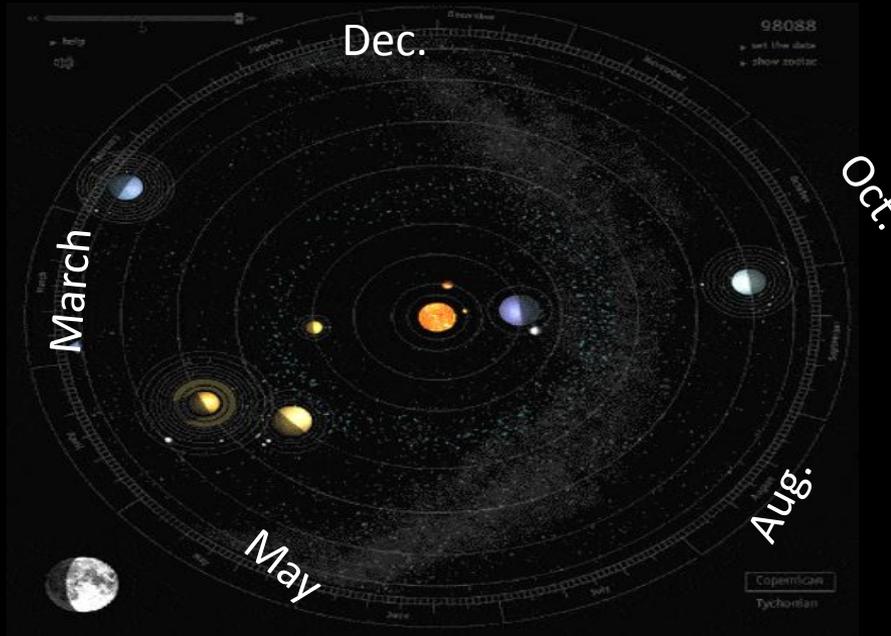
Aula: A base das Parametrizações e Simplificações, sem discriminar OL e OC.

shortwave

Longwave

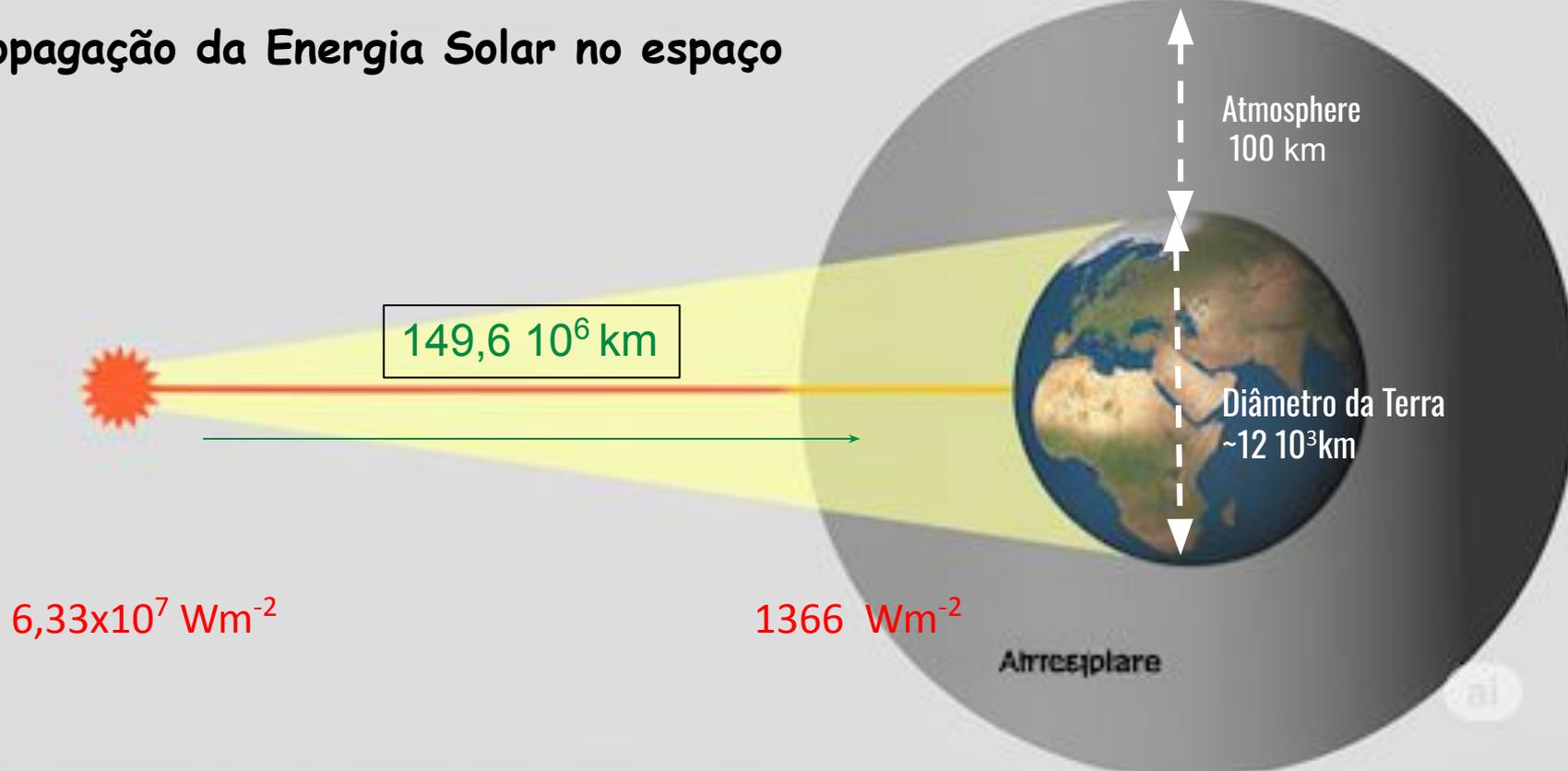
Unidade: Wm^{-2}

Fatores orbitais e projeção dos raios solares



**Movimentos da Terra &
quantidade de energia
solar incidente.
Rotação: dia e noite**

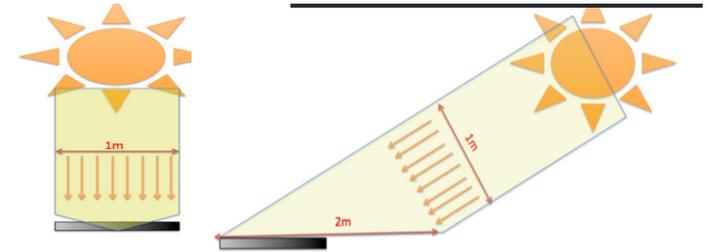
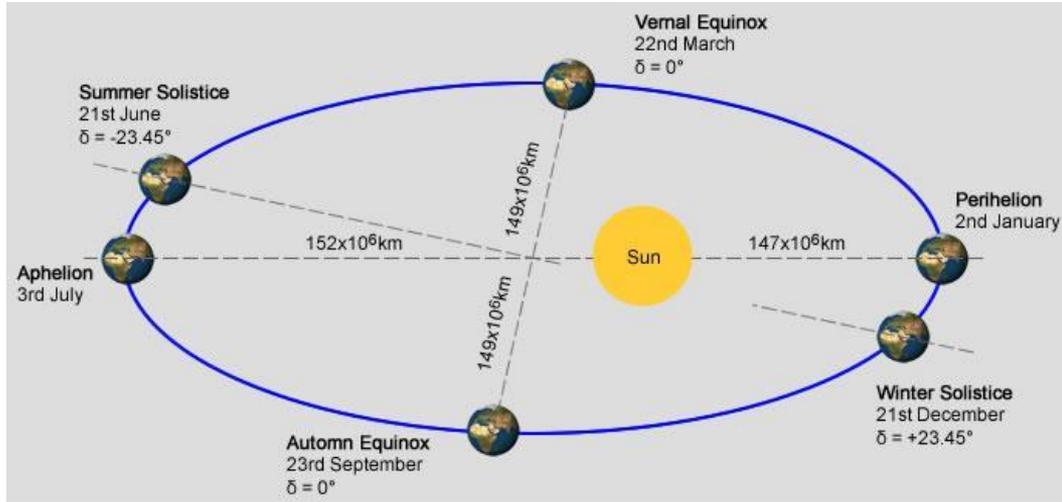
Propagação da Energia Solar no espaço



Constante Solar (Irradiância solar total) quantidade de energia solar total que incide no TOA para uma distância média Terra- Sol de $149,6 \cdot 10^6 \text{ Km}$

Introdução: Efeito dos movimentos da Terra na Rad.

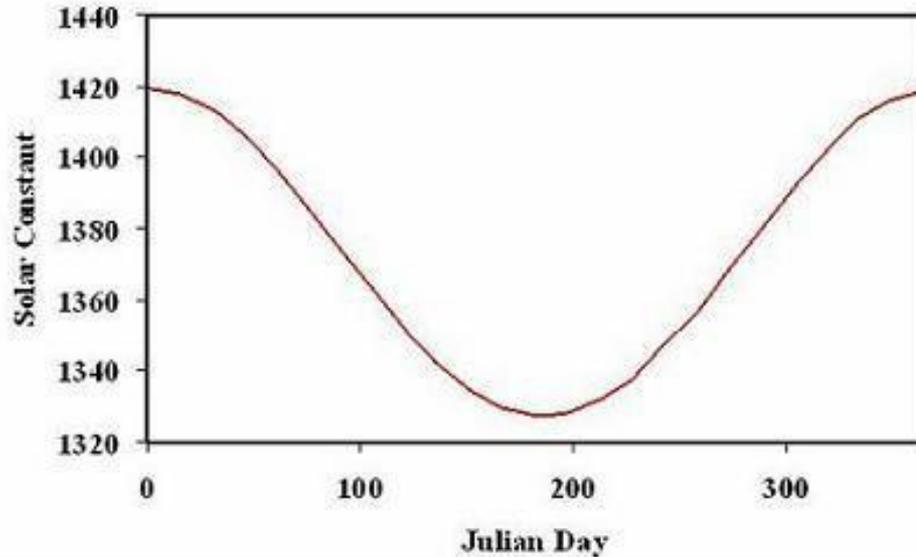
Nos modelos de tempo e climáticos, a variação da radiação solar no topo da atmosfera (TOA) é um fator crucial. Essa variação é determinada pelo movimento orbital da Terra.



Variação Anual da Radiação solar no TOA

A Irradiância Solar no topo da atmosfera tem variações durante o ano (~7%).

Lei do Inverso do Q. Distância



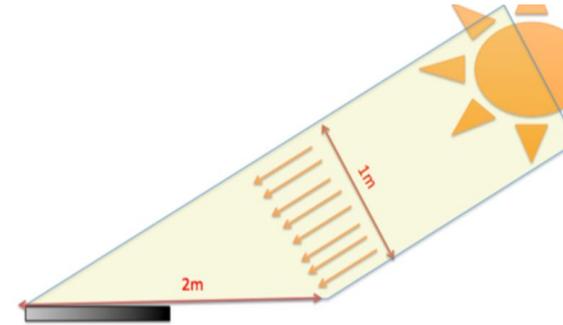
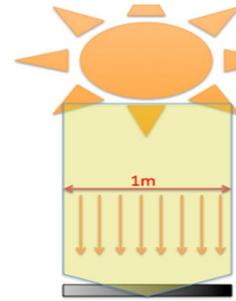
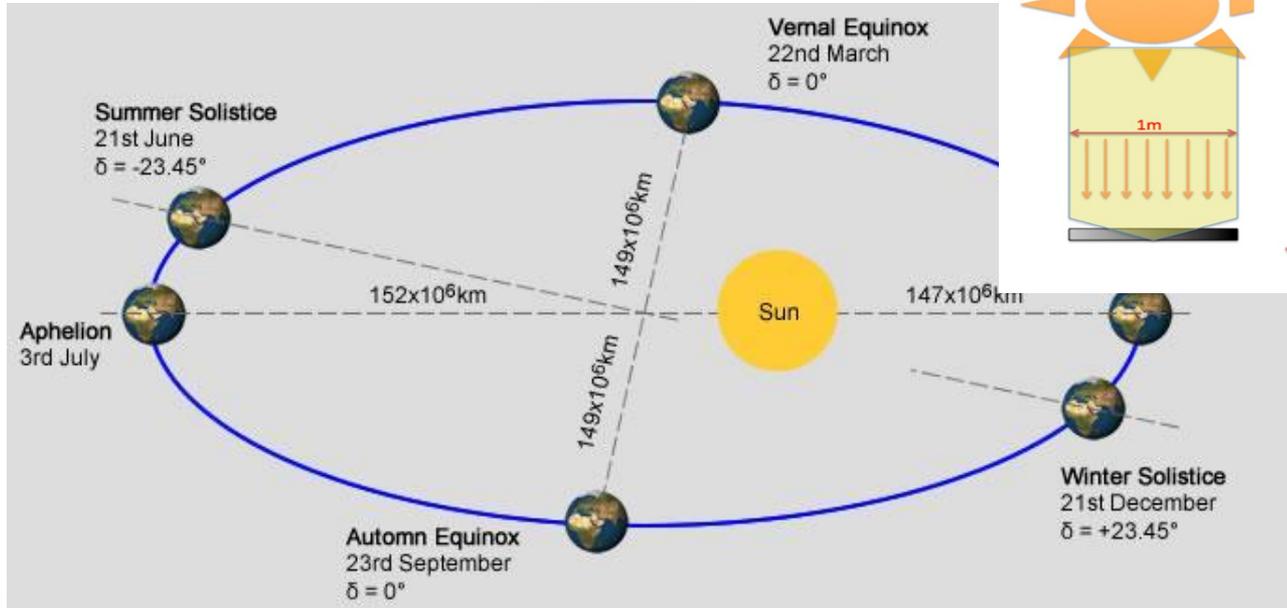
$$D_n = \frac{\bar{D}}{\sqrt{1 + 0,033 \cos(2\pi n/365)}}$$

Distância Terra e Sol é um parâmetro essencial que deve ser incorporado em modelos de tempo e clima para garantir sua precisão.

Introdução: Translação & órbita da Terra

Declinação solar δ (parâmetro astronômico)

$$\delta = 23,45^\circ \text{ sen}[(284 + n) \cdot 360/365] \quad [\textit{graus}]$$

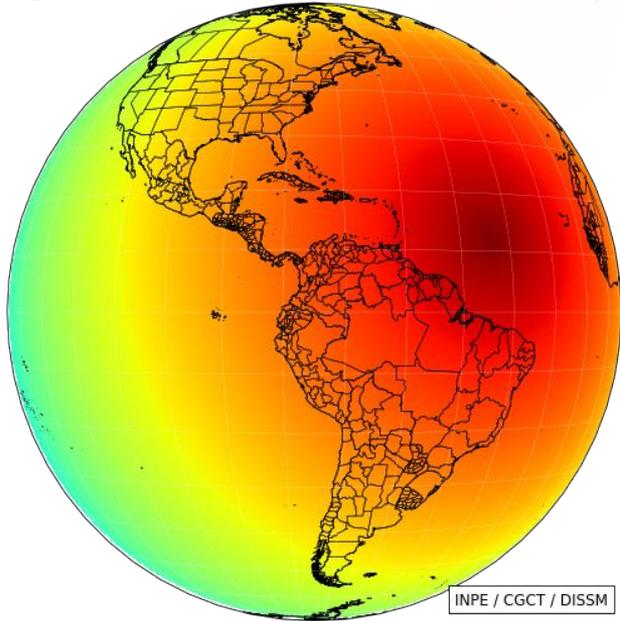


Wm^{-2}

Introdução: Radiação Solar / onda curta - shortwave

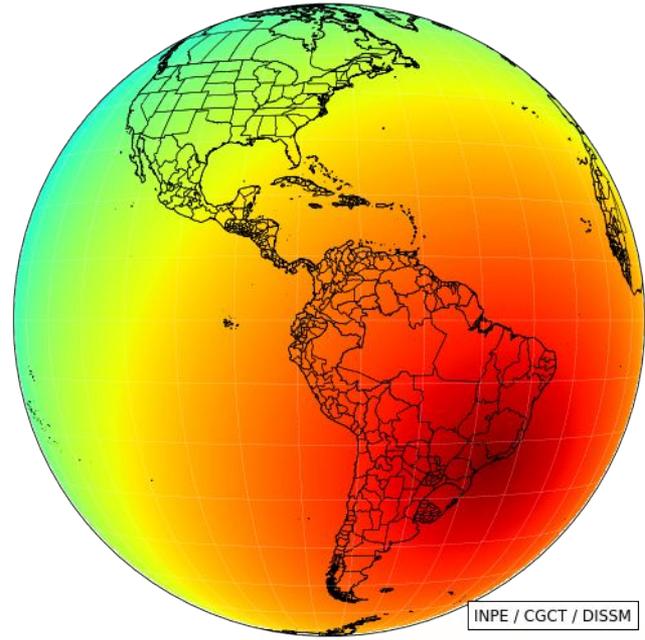
Efeito da Rotação/ Translação na projeção dos raios solares:
Inverno Austral

Ângulo Solar Zenital - 21-08-2022 15:00 UTC Curso de Radiação



Verão austral

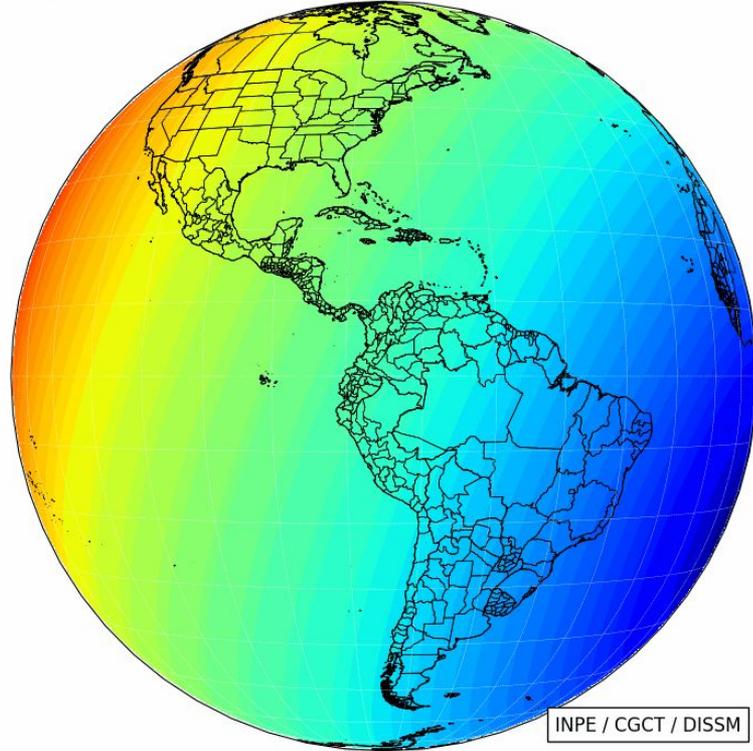
Ângulo Solar Zenital - 21-12-2022 15:00 UTC Curso de Radiação



Introdução: Radiação Solar / onda curta - shortwave

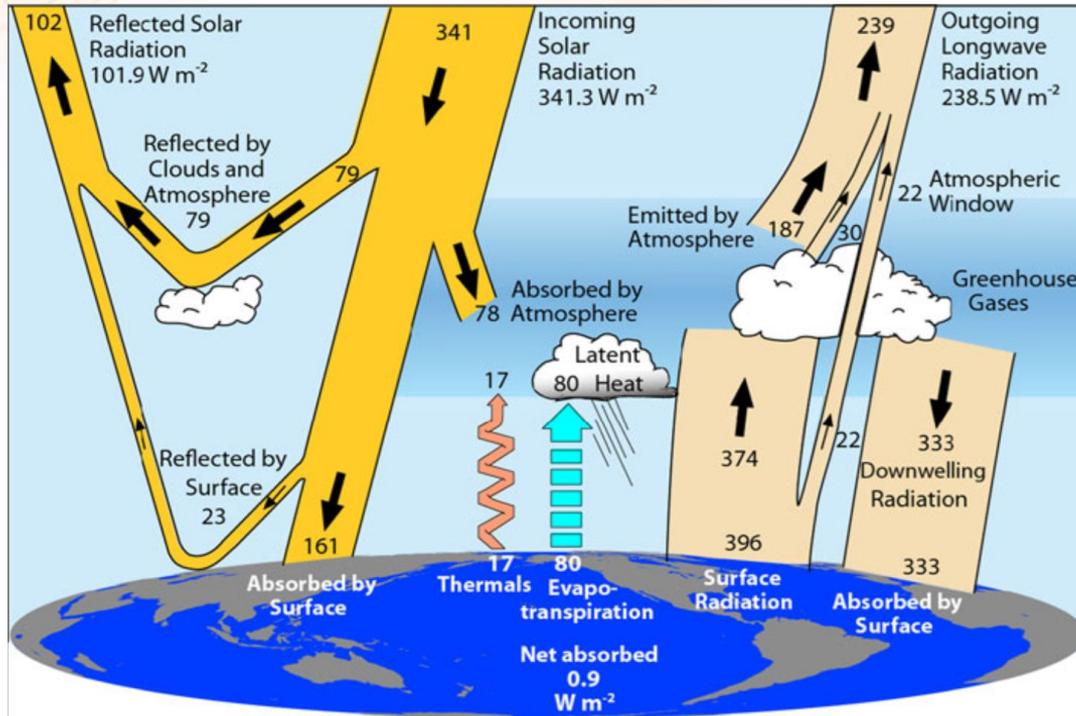
Ângulo Solar Zenital - 07-06-2022 00:00 UTC

Curso de Radiação



Efeito da Rotação na projeção dos raios solares durante um dia de inverno austral.

Radiação Solar e Terrestre



Trenberth e Fasullo, 2011

A modelagem da radiação consideram os efeitos de sua interação com a superfície terrestre e a atmosfera.

Esquemas de TR descrevem a propagação e partição da energia no sistema terrestre.

Esquemas de radiação de onda curta e onda longa.

TR Maths: Emissão e absorção, ignora espalhamento

$$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda + B_\lambda(T)$$

I_λ - Intensidade Espectral da Radiação

λ - Comprimento de Onda

· τ_λ - Espessura Óptica (Transparência da atmosfera)

· $B_\lambda(T)$ - Função de Planck

TR Maths: Emissão, absorção e espalhamento

$$\frac{1}{k_{\lambda}\rho} \frac{dI_{\lambda}(\Omega)}{ds} = -I_{\lambda}(\Omega) + (1 - \omega_{\lambda})B_{\lambda}(T) + \frac{\omega_{\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(\Omega')P(\Omega', \Omega)d\Omega'$$

- $I_{\lambda}(\Omega)$ é a **intensidade espectral** da radiação em uma direção Ω .
- k_{λ} é o **coeficiente de extinção de massa** (ou atenuação), absorção + espalhamento.
- ρ é a **densidade da atmosfera**
- s é o **comprimento do caminho** percorrido pela radiação.

Últimos 2 termos **fontes de radiação**, que representa o ganho de intensidade em uma determinada direção.

Parametrização e as Soluções numéricas em códigos de Transferência radiativa

- Transmitâncias (concentração, propriedades óticas: gases, nuvens, aerossóis, depende de T' , P),
- Função de Planck (λ , T')
- Integração hemisférica (ângulo zenital = $d\mu$)
- Integração vertical (dz ou dp)
- Integração espectral ($d\lambda$)

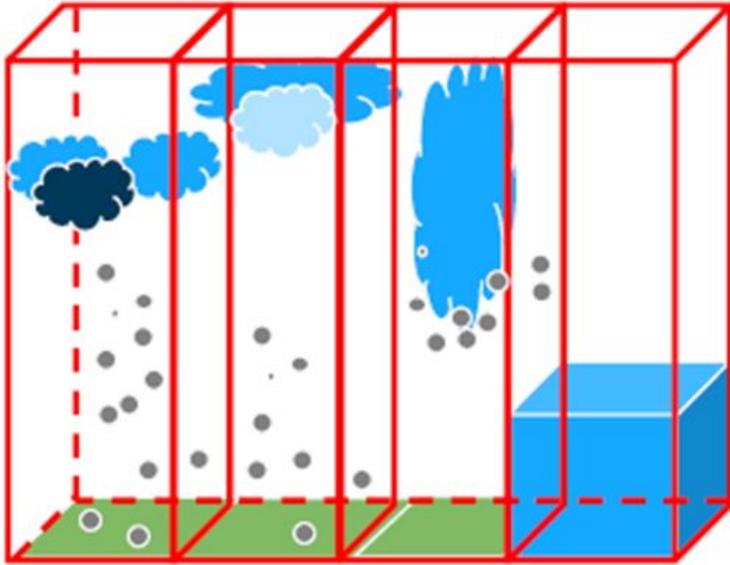
TR Maths: Emissão, absorção e espalhamento

Devido à sua complexidade, essas equações são raramente resolvidas analiticamente para a atmosfera terrestre. Em vez disso, os cientistas usam **métodos numéricos** e aproximações:

- Line-by-Line,
- Método de ordenadas discretas,
- Métodos de Dois Fluxos (2-Stream Solutions),
- Método de Monte Carlo,
- k-distribution ou k-correlated distribution

TR Maths: Simplificações e Aproximações na ETR

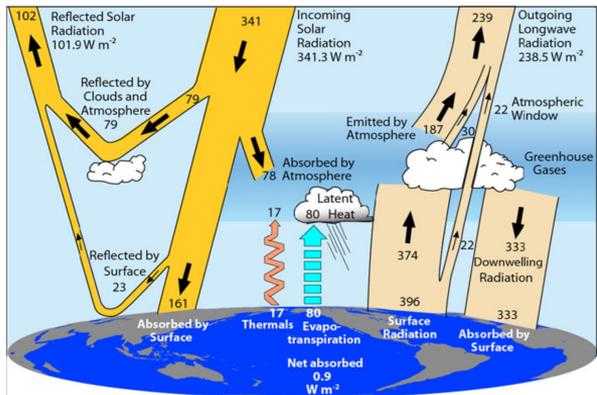
Aproximação Plano-Paralela (ignora a curvatura da Terra):



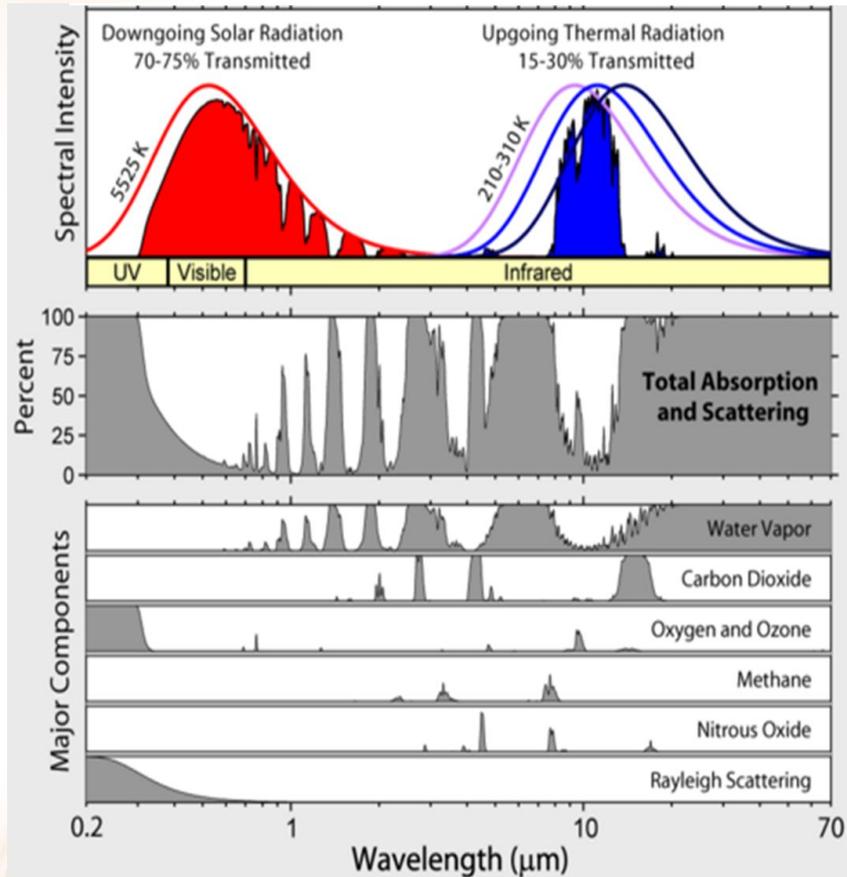
- A atmosfera é tratada em colunas individuais.
- propriedades da atmosfera variam mais na vertical em relação à horizontal dentro da grade.

Razão de ter dois esquemas de TR em modelos PNT?

Distribuição Espectral de Radiação



Trenberth e Fasullo, 2011



SW: atmosfera é praticamente transparente

LW: atmosfera é praticamente opaca

espalhamento tende a zero

TR Maths: Simplificações e Aproximações na ETR

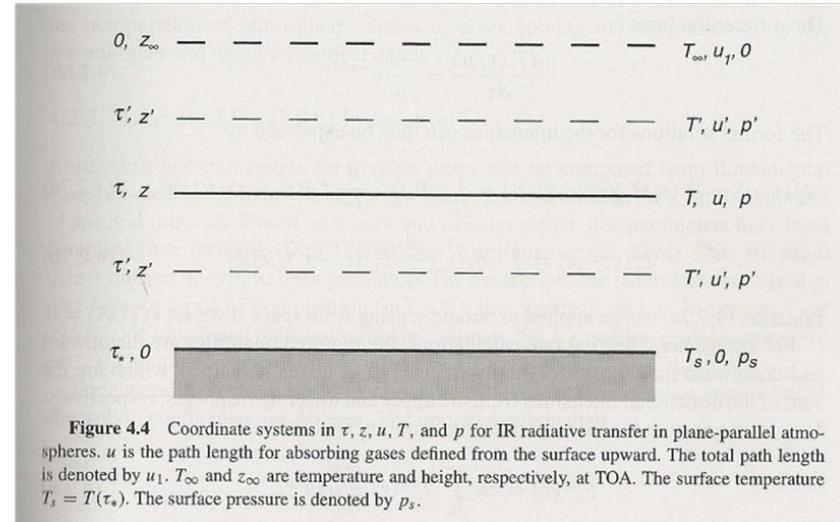
Aproximação Plano-Paralela (ignora a curvatura da Terra):

- **Profundidade óptica: τ_λ**

$$\tau_\lambda = \int k_\lambda \rho dz'$$

$k\lambda$ = coeficiente mássico de absorção (Depende dos gases, partículas de nuvens, etc).

- **Albedo simples ω_λ [0,1]**
- **Parâmetro de assimetria g_λ [0,1]**

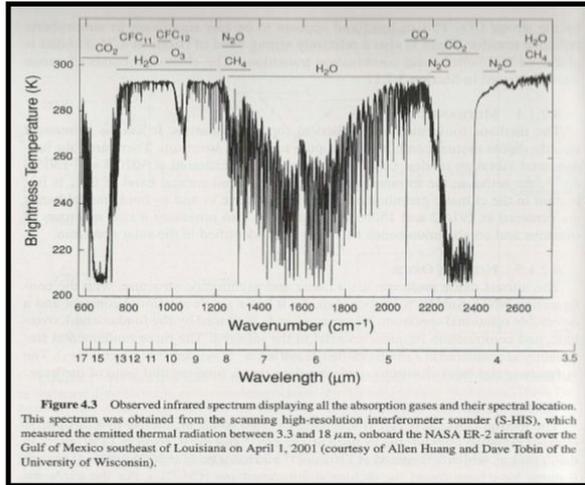


Parametrização:

Métodos para o Cálculo da opacidade atmosférica / Transmitância

1) Linha a Linha

(perfil de Voigt, Doppler, Lorenz utiliza dados de laboratorio) – Liou



$$k_\nu = \frac{S \alpha_L}{\pi (\nu - \nu_0)^2 + \alpha_L^2},$$
$$\alpha_L = \alpha_0 \left(\frac{p}{p_0}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)^n.$$

Liou, 1998

2) k-distribution

3) Scaling approximation

método distribuição-k correlacionada

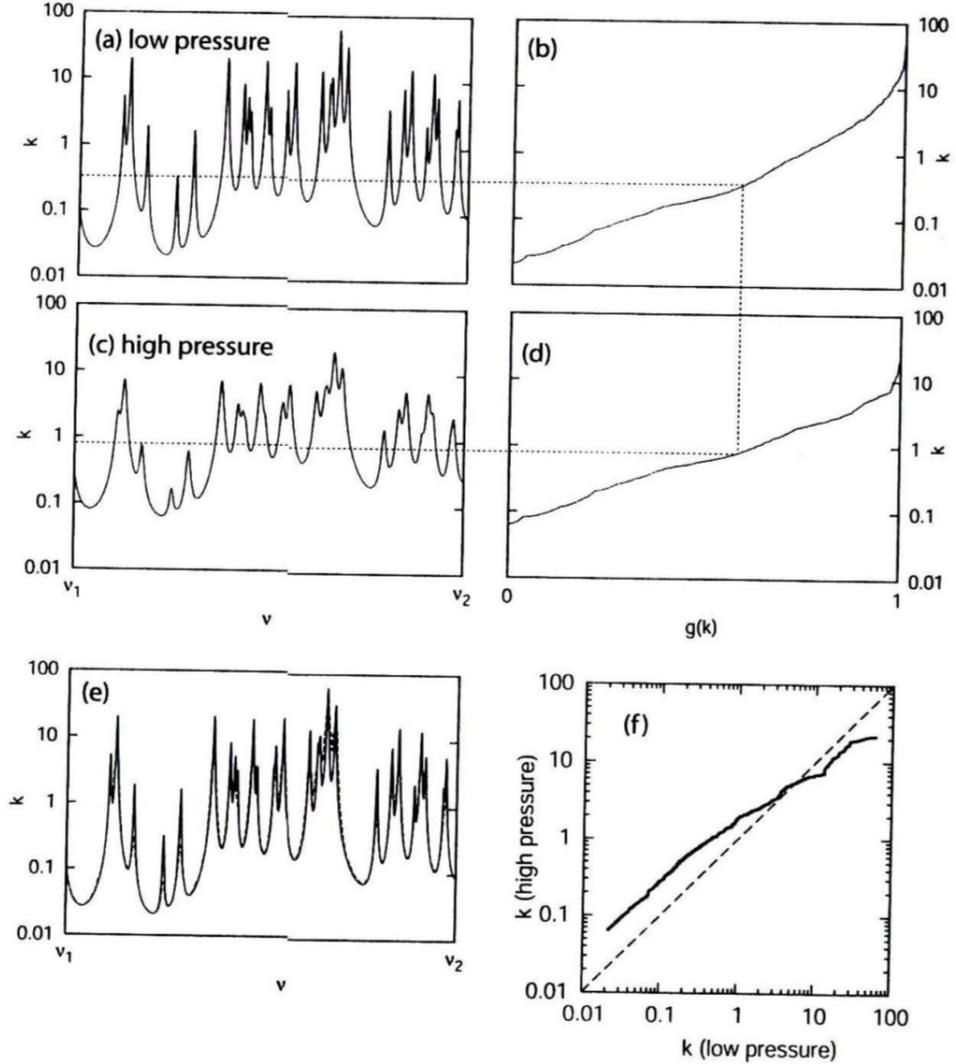
Ilustração dos métodos:

distribuição k [a,b]

distribuição k
correlacionada [c,d, f]

Comparação k
observado e simulado
usando

k distr. Corr. [e]

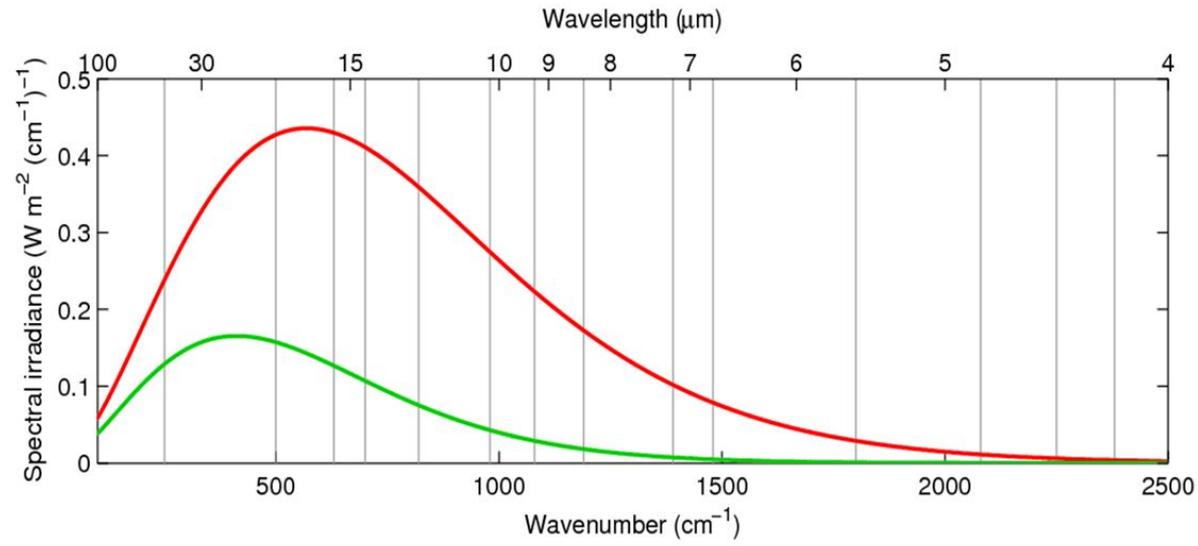


Métodos p/ Cálculo da opacidade atmosférica/ Transmitância

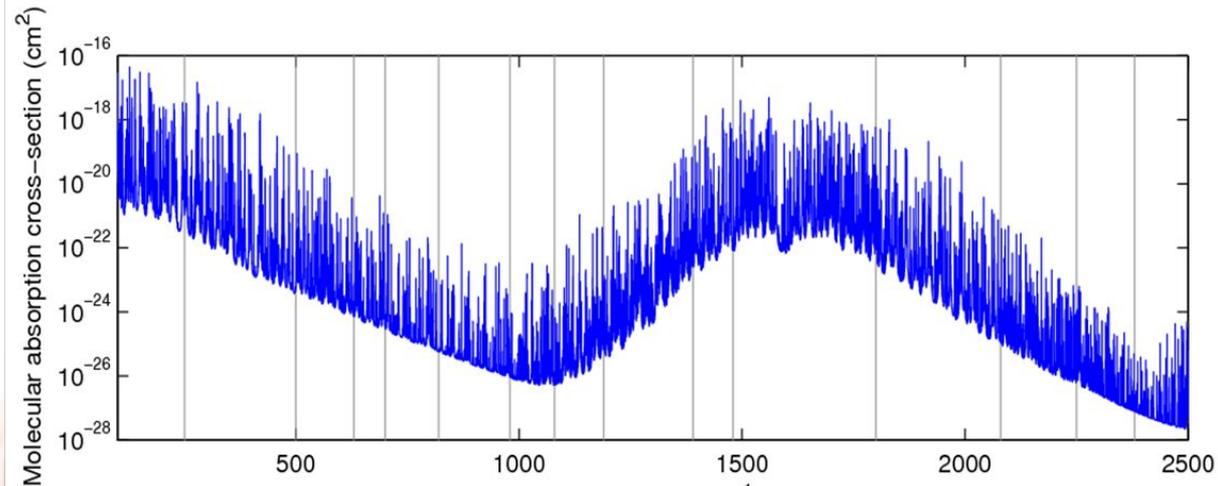
k-distribution

Os modelos dividem em bandas espectrais.

Planck function



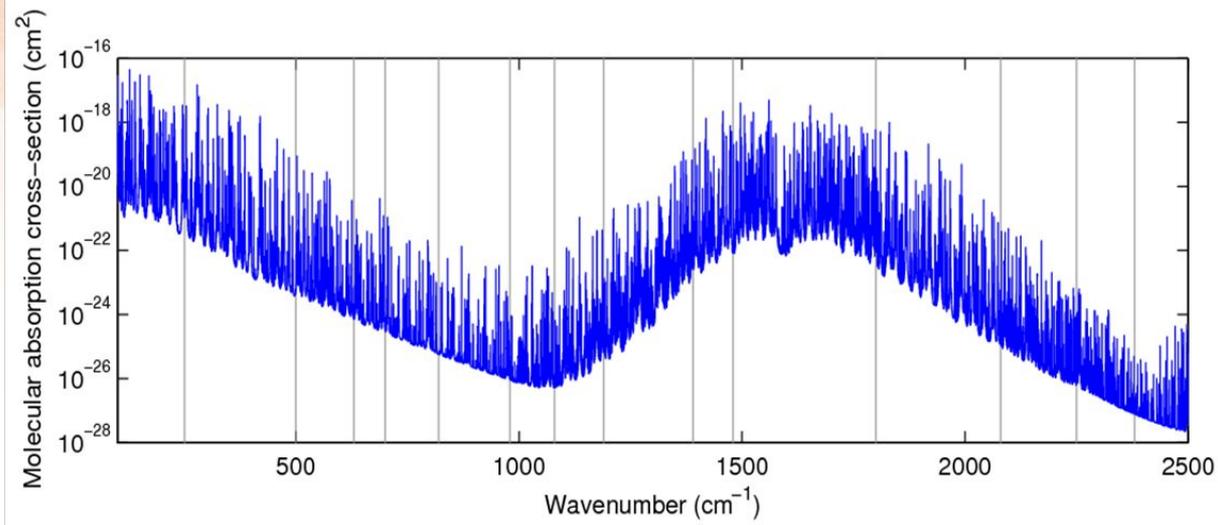
Water vapour spectrum



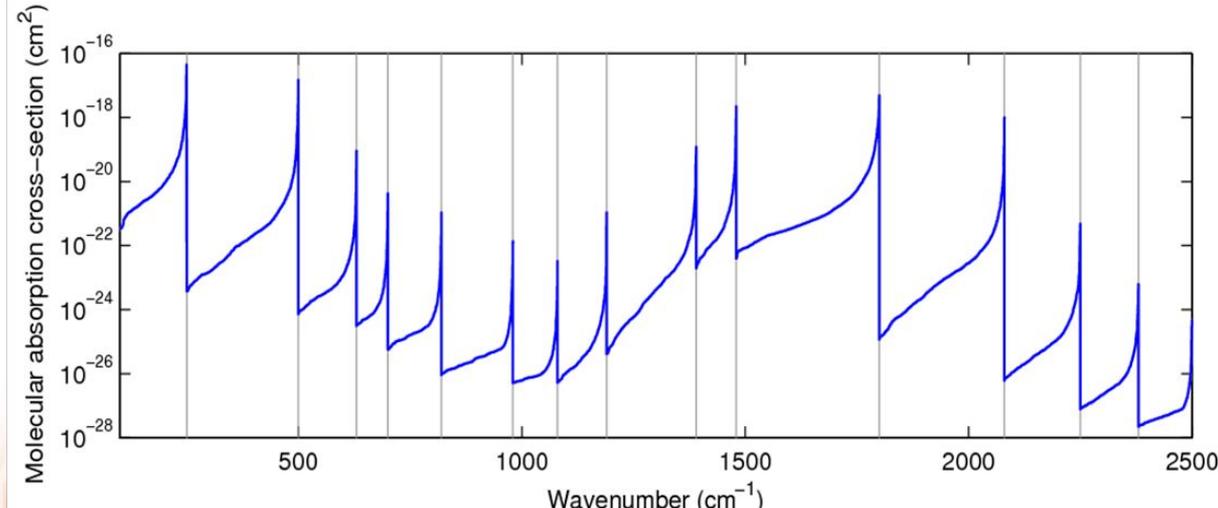
Métodos p/ Cálculo da opacidade atmosférica/ Transmitância

k-distribution

Water vapour spectrum



Water vapour spectrum



Efeitos de nuvens e aerossóis

Profundidade óptica mistura de gases (céu claro e limpo)

$$u_{\nu}^g(p, p') = \sum u_{\nu,i}^g(p, p'),$$

$$u_{\nu,i}^g(p, p') = \int_p^{p'} q_i(p'') k_{\nu,i}(p'', T'') \frac{dp''}{g}.$$

Profundidade óptica com nuvens (céu limpo)

$$u_{\nu}(p, p') = u_{\nu}^g(p, p') + u_{\nu}^c(p, p'),$$

$$u_{\nu}^c(p, p') = \sum_j u_{\nu,j}^c(p, p').$$

E os aerossóis???

Solução da F

em esquemas d
radiação

$$\frac{1}{k_{\lambda}\rho}$$

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}}$$

3.3 Band-Integrated Planck Functions

The spectrally integrated Planck fluxes were pre-computed for each band and then fitted by a 4th-degree polynomial in temperature:

$$B_i(T) = c_{i,0} + \sum_{n=1}^4 c_{i,n} T^n. \quad (22)$$

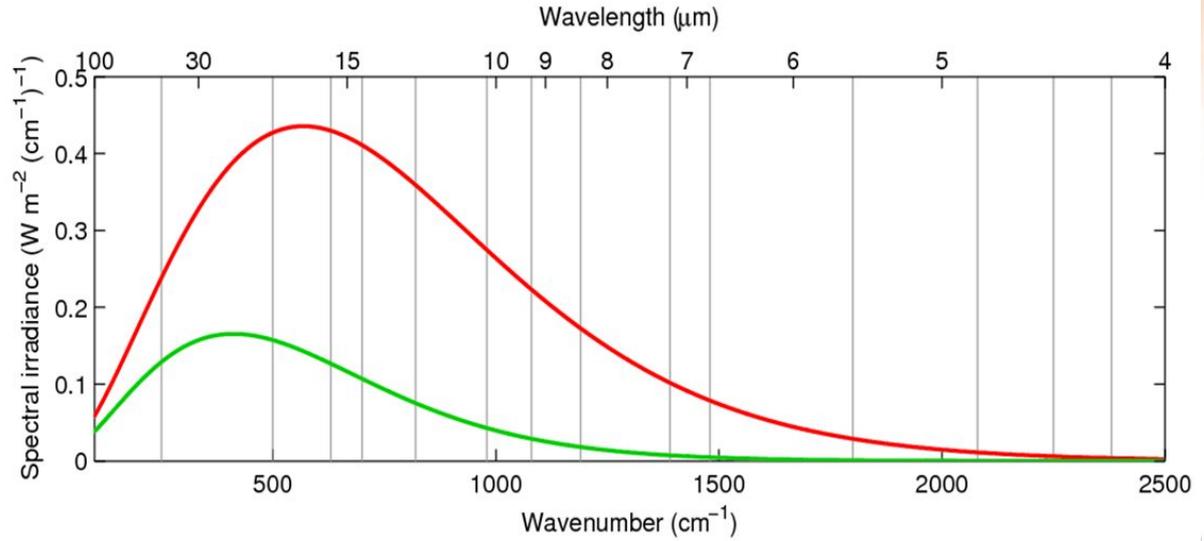
When integrated over the eight bands, errors in this regression are negligible ($< 0.1\%$) for $160 \text{ K} < T < 345 \text{ K}$. The coefficients $c_{i,n}$ are listed in Table 2.

Table 2: Coefficients for computing the spectrally integrated Planck fluxes using the polynomial fits. The units of temperature are Kelvin.

Band	$c_{i,0}$	$c_{i,1}$	$c_{i,2}$	$c_{i,3}$	$c_{i,4}$
1	-2.6844E-1	-8.8994E-2	1.5676E-3	-2.9349E-6	-2.2233E-9
2	3.7315E+1	-7.4758E-1	4.6151E-3	-6.3260E-6	3.5647E-9
3	3.7187E+1	-3.9085E-1	-6.1072E-4	1.4534E-5	-1.6863E-8
4	-4.1928E+1	1.0027E+0	-8.5789E-3	2.9199E-5	-2.5654E-8
5	-4.9163E+1	9.8457E-1	-7.0968E-3	2.0478E-5	-1.5514E-8
6	-1.0345E+2	1.8636E+0	-1.1753E-2	2.7864E-5	-1.1998E-8
7	-6.9233E+0	-1.5878E-1	3.9160E-3	-2.4496E-5	4.9301E-8
8	1.1483E+2	-2.2376E+0	1.6394E-2	-5.3672E-5	6.6456E-8

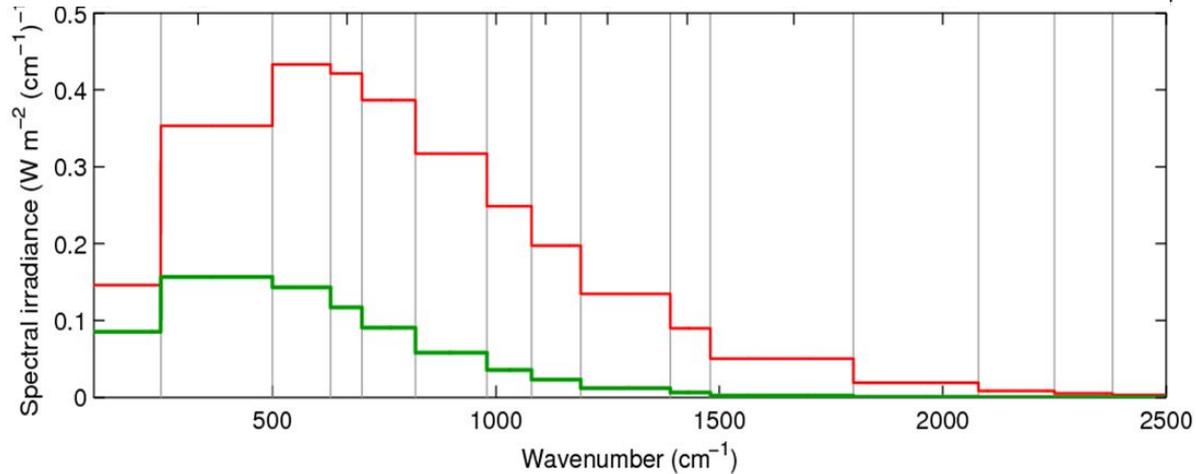
Solução da Função de Planck

Planck function



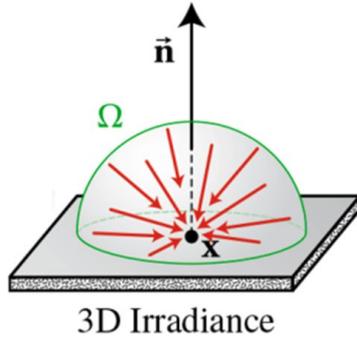
Planck function

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$



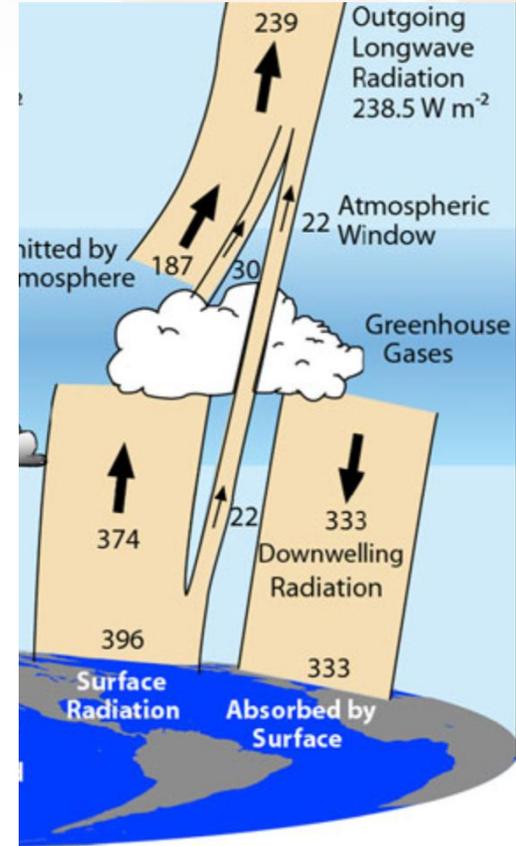
Integração Hemisférica

A radiação que incide em um ponto não vem de uma única direção, mas de todo o hemisfério acima ou abaixo desse ponto.



A integração hemisférica é, essencialmente, um cálculo matemático que soma a contribuição de toda a radiação que chega de todas as direções (ângulos zenitais e azimutais) desse hemisfério.

$$F_v \uparrow = 2\pi \int I_v \uparrow(\mu) \mu \, d\mu$$



2 fluxos

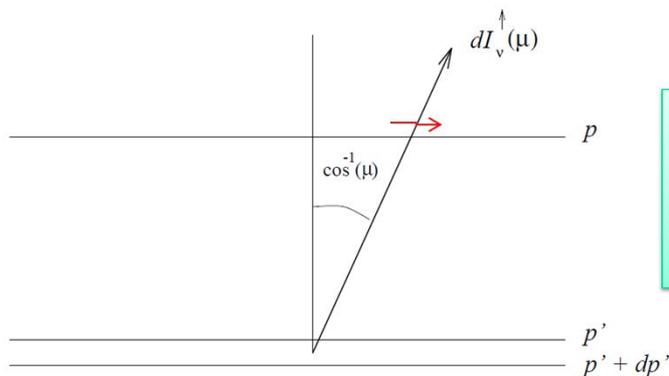
Solução na grade (céu claro e nuvens)

Transmitância da camada céu claro

$$\tau_{\nu}(p, p') = 2 \int_0^1 e^{-u_{\nu}^g(p, p')/\mu} \mu d\mu.$$

Transmitância da camada com nuvens

$$\begin{aligned} \tau_{\nu}^*(p, p') &= 2 \int_0^1 \left[(1 - A^c) e^{-u_{\nu}(p, p')/\mu} + A^c e^{-[u_{\nu}(p, p') + \tilde{u}_{\nu}^c]/\mu} \right] \mu d\mu, \\ &= \left[1 - A^c (1 - e^{-\tilde{u}_{\nu}^c/\bar{\mu}}) \right] \tau_{\nu}(p, p'), \end{aligned}$$

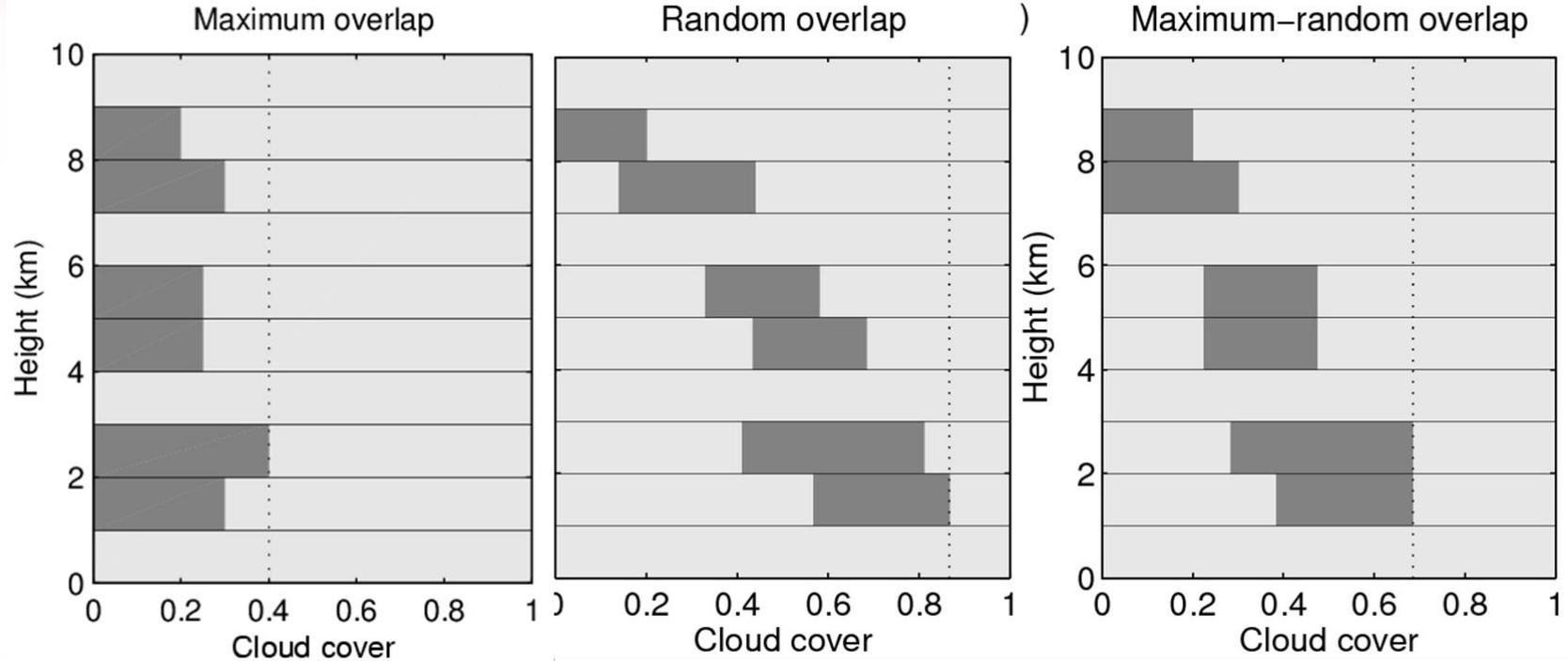


$\bar{\mu}$ Fator de difusividade médio
Maioria dos MCG considera
 $(1/\bar{\mu} = 1,66)$
Equivalente ângulo zenital = 52 °
(Elsasser, 1942)

Figure 1: Contribution from a differential layer at p' to the upward radiance at p .

Cloud overlap parametrization

Como as nuvens se alinham verticalmente em diferentes camadas da atmosfera ?



Desafios e Melhorias da modelagem da radiação

Eficiência

- **Computacional:** códigos de TR são computacionalmente caros, não executados em cada passo de tempo do modelo.
- **Dados Espectroscópicos:** É necessário usar dados espectroscópicos mais precisos, especialmente para o contínuo de absorção do vapor d'água.
- **Tratamento da alta atmosfera:** Estender a altas altitudes (modelos "high-top") e aprimorar o tratamento da estratosfera superior e da mesosfera. Isso permite que observações de satélite dessas regiões sejam assimiladas de forma mais eficaz no modelo.
- **Avaliação:** Os modelos precisam ser avaliados e validados com novas observações, garantindo que as simulações reflitam a realidade de maneira precisa.

Novas Capacidades e Desenvolvimentos

- **Propriedades Radiativas de Aerossóis:** A inclusão das propriedades radiativas de aerossóis que são previstos pelo modelo (aerossóis prognósticos) é fundamental, já que eles interagem com a radiação e afetam o balanço energético.
- **Equilíbrio Termodinâmico Não Local (Non-local-thermodynamic equilibrium - NLTE):** Para modelos de alta altitude, é necessário considerar o NLTE. Nessas camadas, as moléculas não estão em equilíbrio termodinâmico local e a radiação interage de forma diferente, o que exige um tratamento específico.
- **Espalhamento (Scattering) em Onda Longa:** Tradicionalmente, o espalhamento de radiação de onda longa era considerado insignificante, mas estudos recentes mostram que ele pode ser relevante, especialmente em certas condições. A inclusão desse processo pode aumentar a precisão dos modelos.
- **Nebulosidade:** heterogeneidade de nuvens, e efeito de laterais de nuvens.

Contato

simone.sievert@inpe.br

DISSM/CGCT - INPE

G-STAR - Grupo de Radiação Solar, Terrestre e Atmosférica

https://satelite.cptec.inpe.br/gstar/GSTAR_principal.html