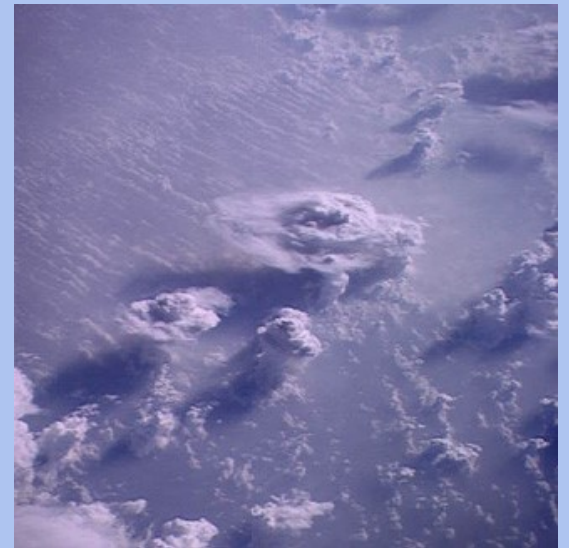
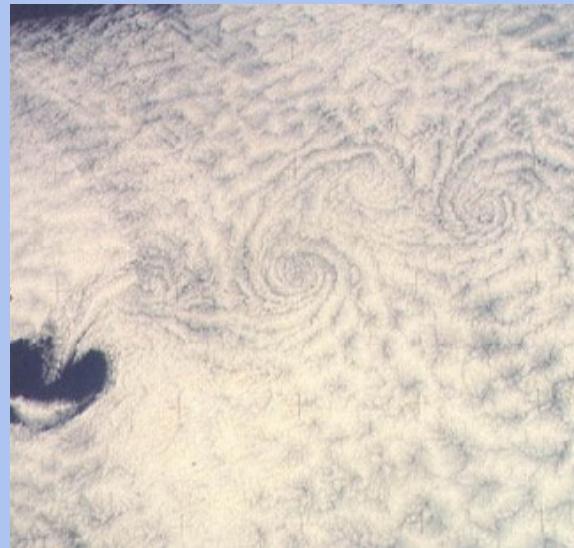
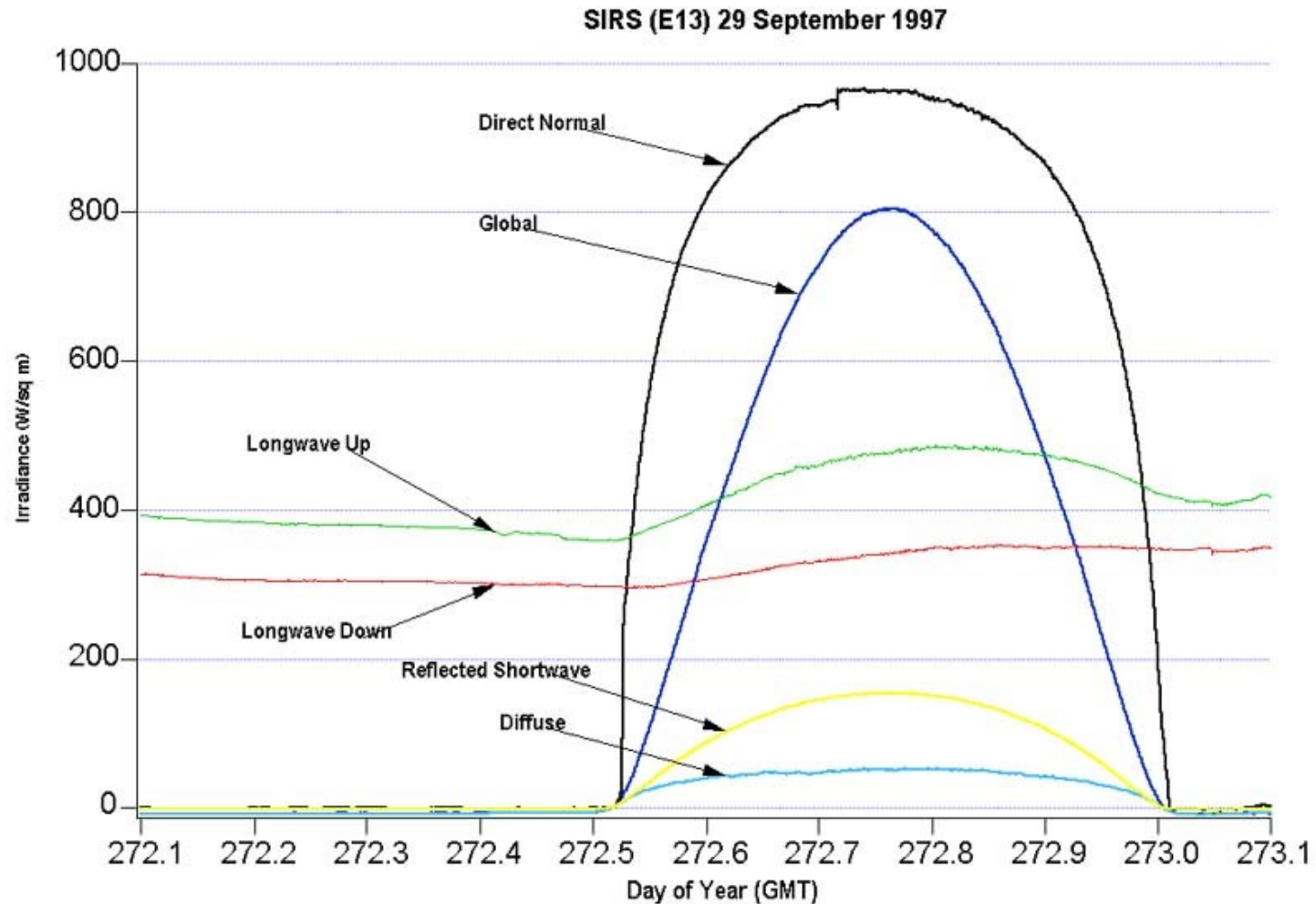


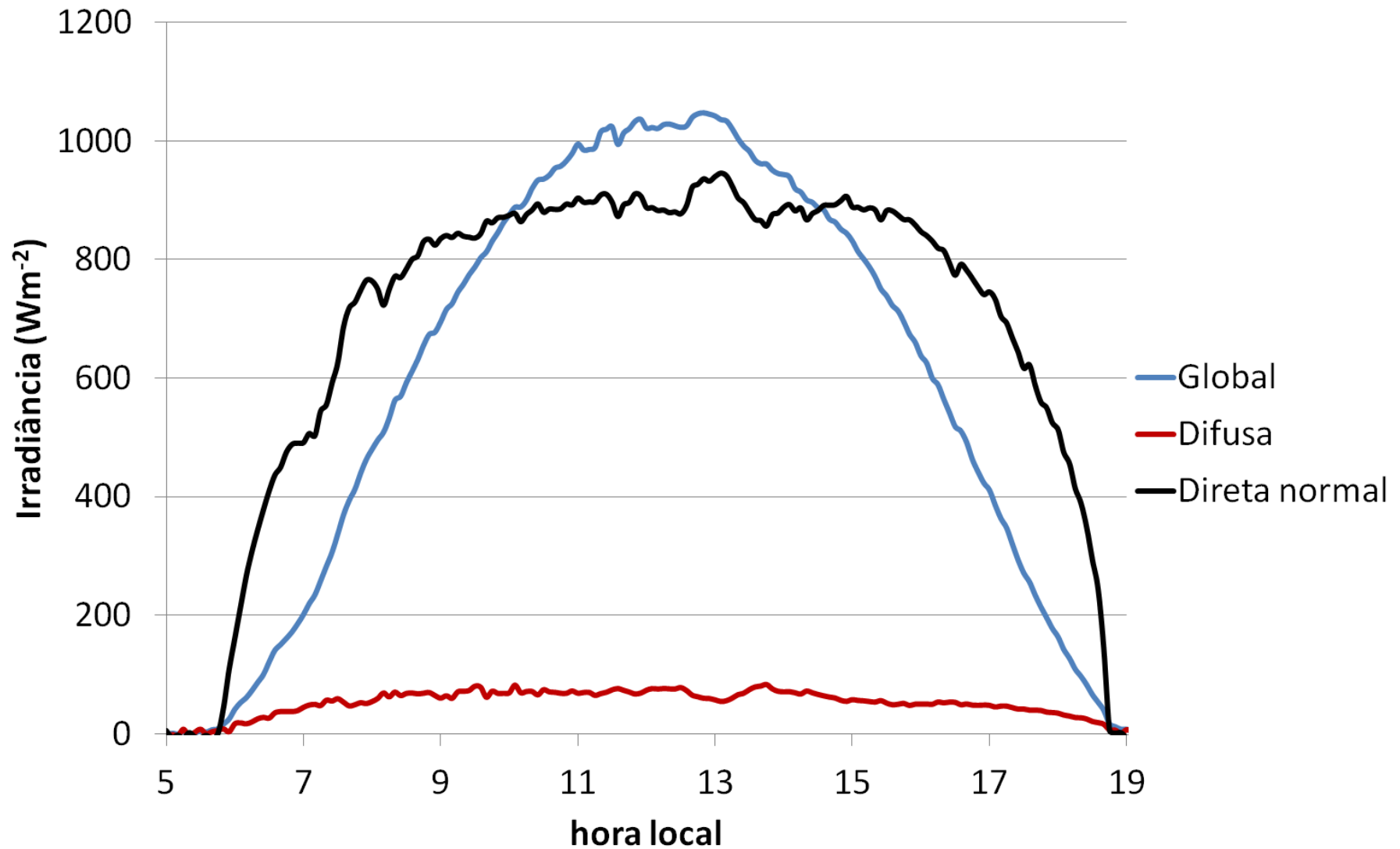
# Interação entre Nuvens e Radiação



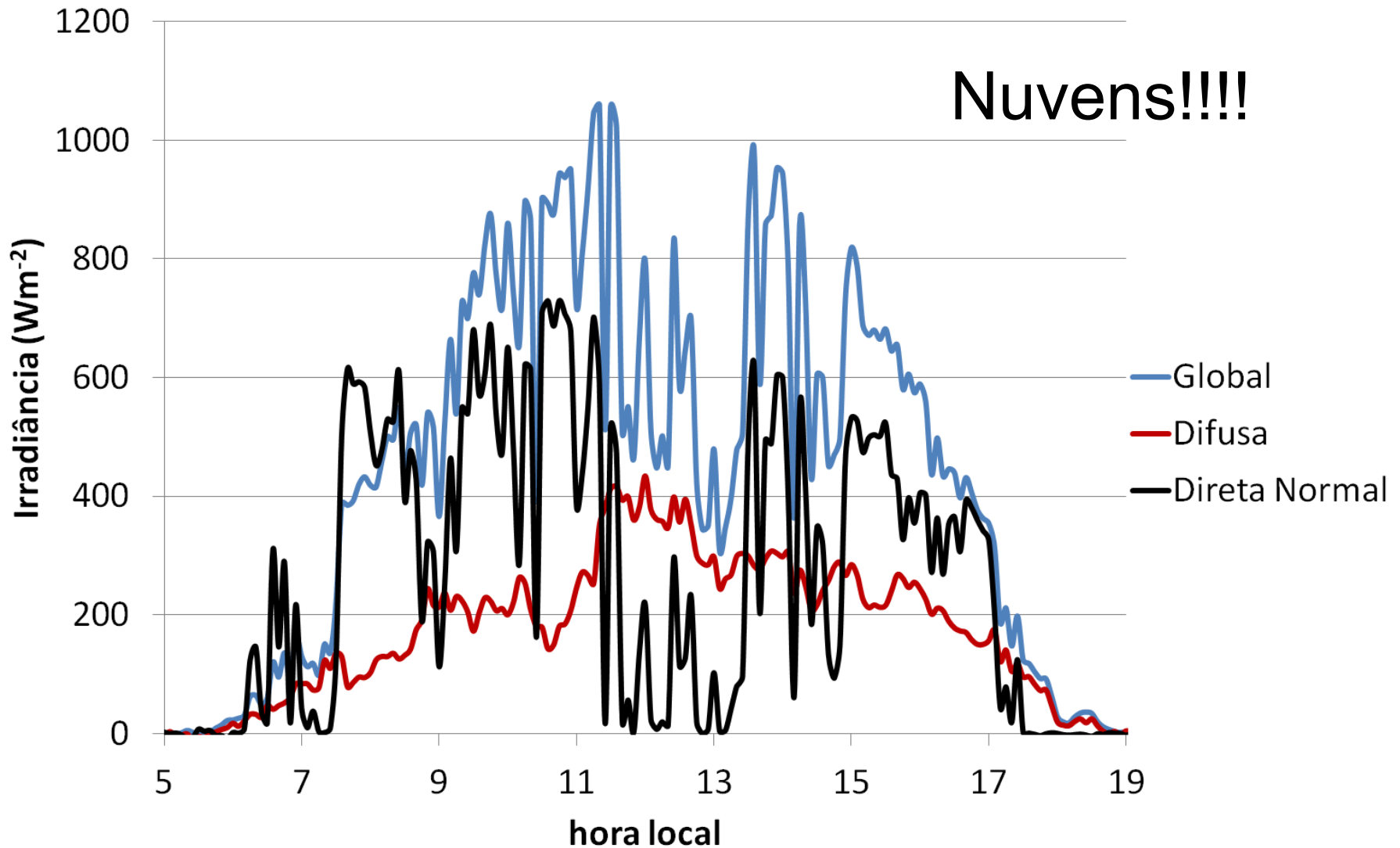
# Em aula anterior...



# São Paulo em 17/01/2006



# São Paulo em 18/01/2006



| Type            | Size                          | Number                               |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Gas molecule    | $\sim 10^{-4} \mu\text{m}$    | $< 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ |
| Aerosol, Aitken | $< 0.1 \mu\text{m}$           | $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$          |
| Aerosol, Large  | $0.1\text{--}1 \mu\text{m}$   | $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$          |
| Aerosol, Giant  | $> 1 \mu\text{m}$             | $\sim 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$       |
| Cloud droplet   | $5\text{--}50 \mu\text{m}$    | $10^2\text{--}10^3 \text{ cm}^{-3}$  |
| Drizzle drop    | $\sim 100 \mu\text{m}$        | $\sim 10^3 \text{ m}^{-3}$           |
| Ice crystal     | $10\text{--}10^2 \mu\text{m}$ | $10^3\text{--}10^5 \text{ m}^{-3}$   |
| Rain drop       | $0.1\text{--}3 \text{ mm}$    | $10\text{--}10^3 \text{ m}^{-3}$     |
| Graupel         | $0.1\text{--}3 \text{ mm}$    | $1\text{--}10^2 \text{ m}^{-3}$      |
| Hailstone       | $\sim 1 \text{ cm}$           | $10^{-2}\text{--}1 \text{ m}^{-3}$   |
| Insect          | $\sim 1 \text{ cm}$           | $< 1 \text{ m}^{-3}$                 |
| Bird            | $\sim 10 \text{ cm}$          | $< 10^{-4} \text{ m}^{-3}$           |
| Airplane        | $\sim 10 \text{ m}$           | $< 1 \text{ km}^{-3}$                |

Tabela 12.1 de G. W. Petty (2006)

# Importância das nuvens

- Nuvens cobrem ~ 60% da superfície da Terra
  - Refletem, absorvem e transmitem a radiação solar
  - Refletem, absorvem e emitem radiação terrestre
-  Podem contribuir para aquecer ou resfriar o sistema Terra-atmosfera!

# Nuvens

Nas regiões espectrais do visível e infravermelho próximo do espectro:

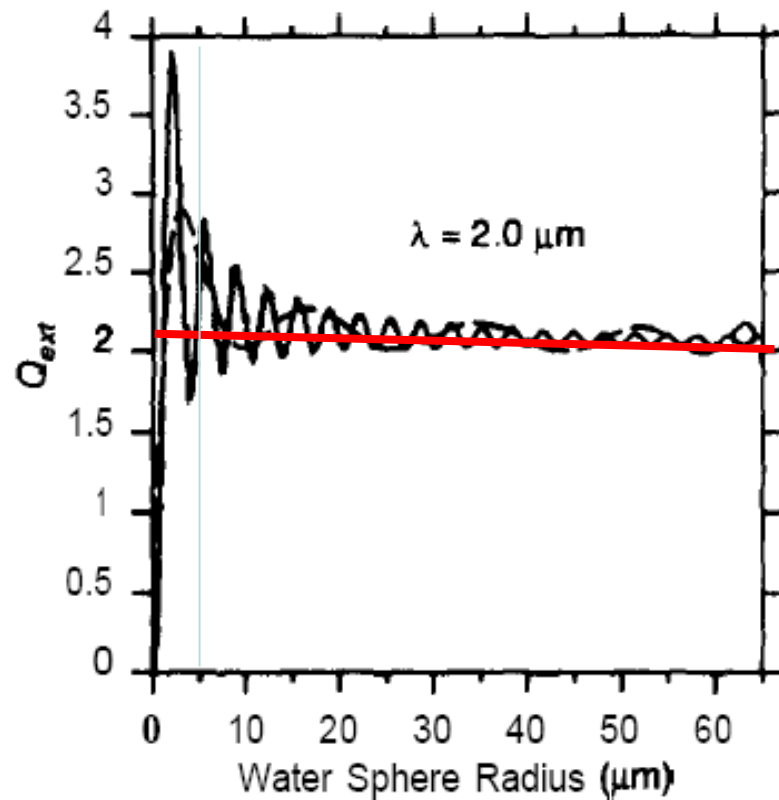
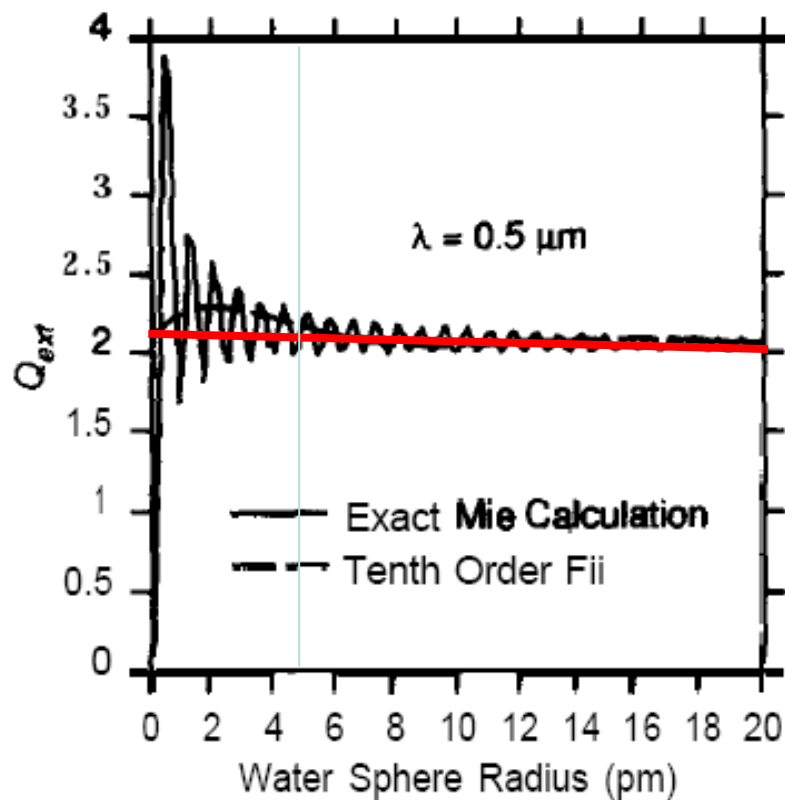
- as gotas de nuvens são **espalhadores não seletivos espectralmente** 
- a eficiência de espalhamento é alta 
- água líquida não absorve radiação no visível, portanto, as nuvens apresentam mínima absorção nessa região do espectro.
- No NIR a absorção aumenta devido ao aumento dos coeficientes de absorção tanto do vapor quanto da água líquida 
- Em média, sobre o espectro solar, as nuvens espalham 74%, absorvem 10%, e transmitem 16% da radiação incidente.



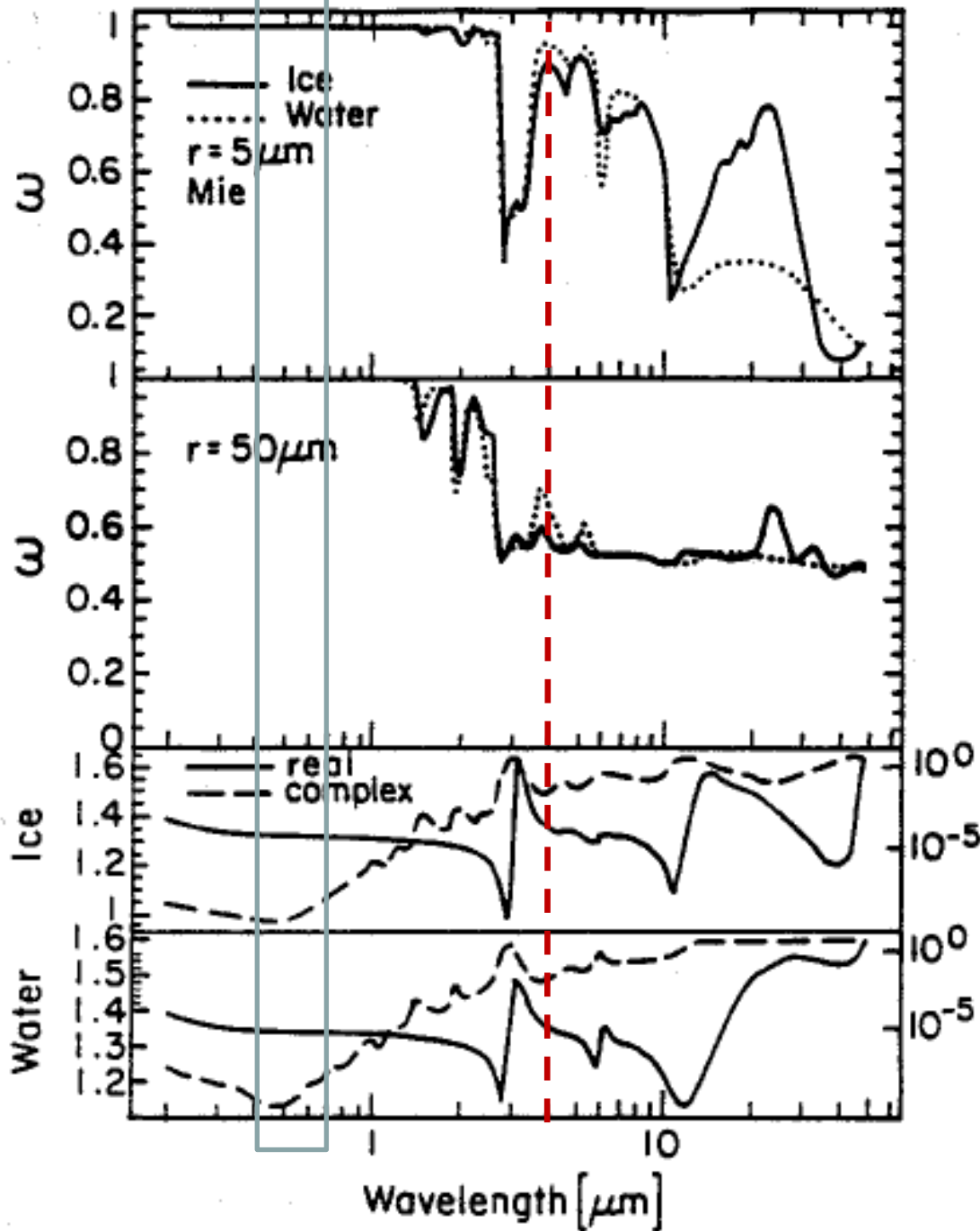
# Espectro solar

*P. Chylek et al. /Atmospheric Research 35 (1995) 139-156*

145







Twomey and Seton, 1980,

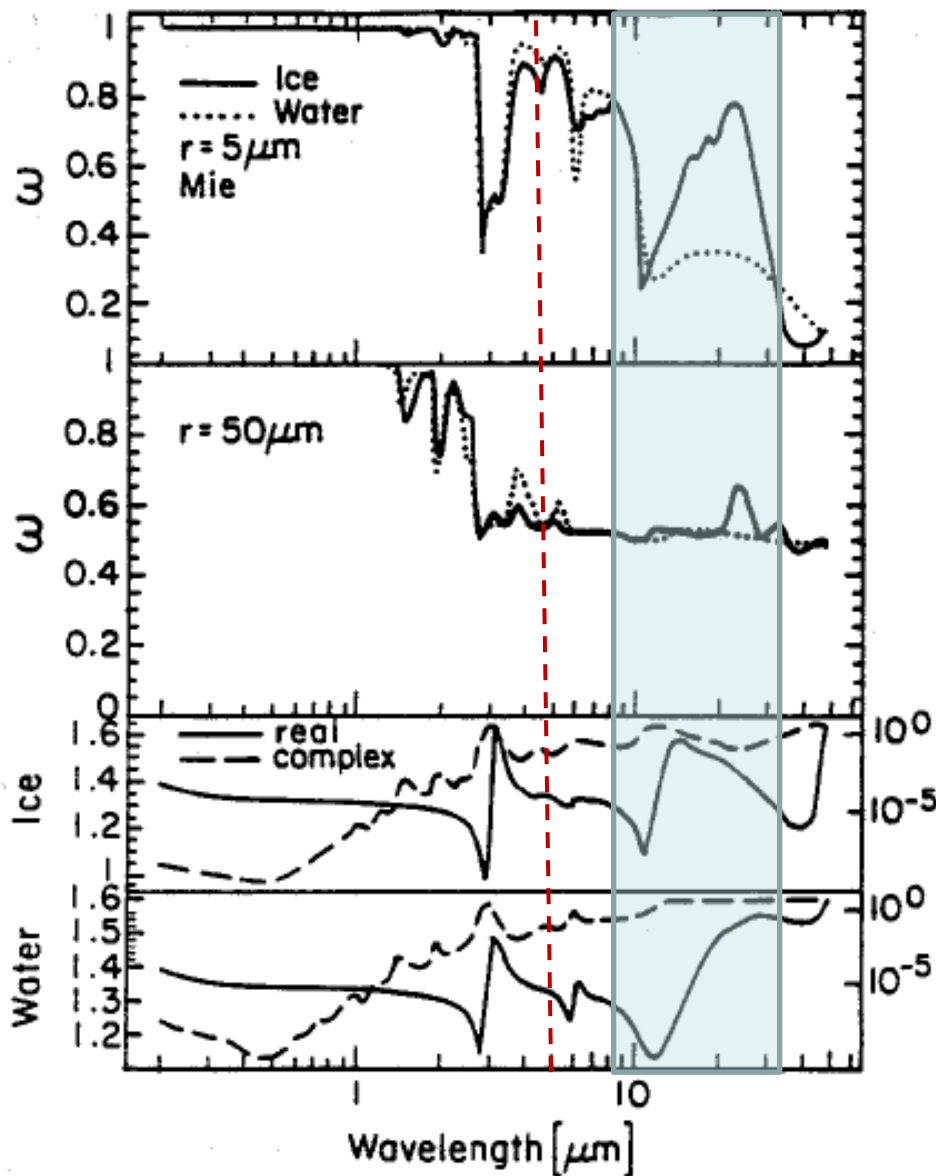
Albedo simples  
para esferas de  
gelo e água  
com raio de  
 $5 \mu\text{m}$  e  $50 \mu\text{m}$

Índice de  
refração  
complexo para  
gelo e água



# Nuvens

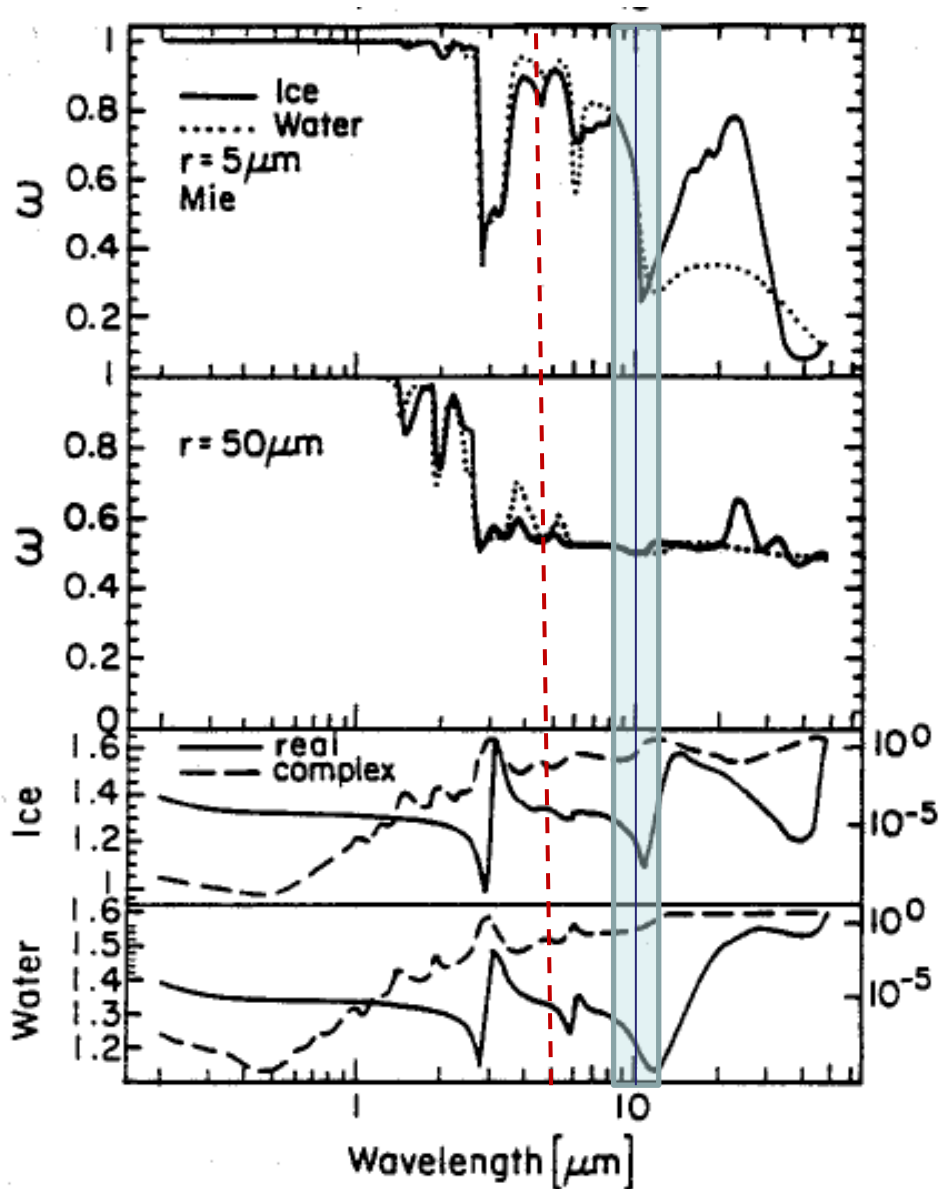
No infravermelho, propriedades ópticas apresentam maiores diferenças de acordo com o tamanho e fase da água.



*Twomey and Seton, 1980,*

Albedo simples  
para esferas de  
gelo e água  
com raio de  
 $5 \mu\text{m}$  e  $50 \mu\text{m}$

Índice de  
refração  
complexo para  
gelo e água



*Twomey and Seton, 1980,*

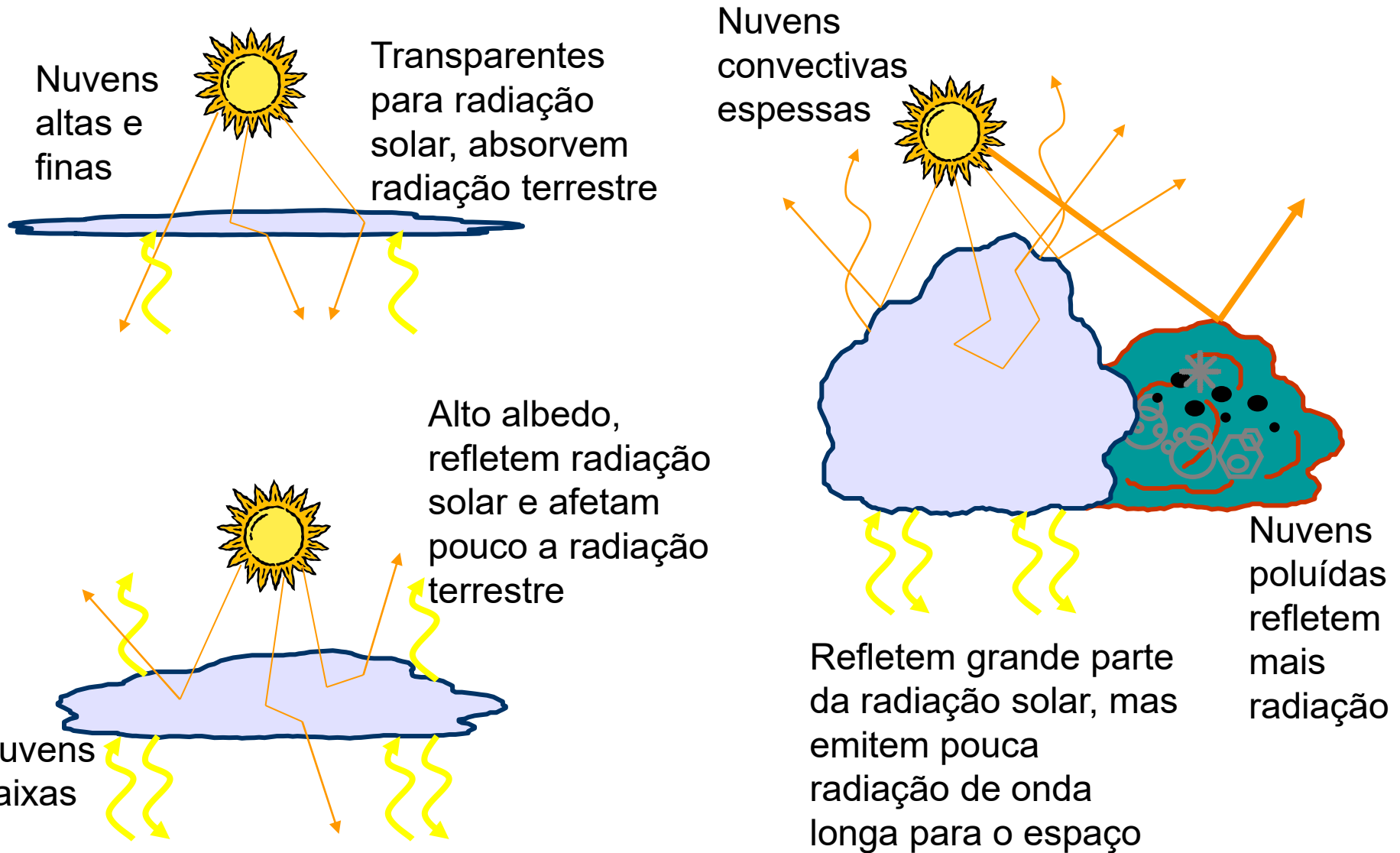
Albedo simples  
para esferas de  
gelo e água  
com raio de  
 $5\mu\text{m}$  e  $50\mu\text{m}$

Índice de  
refração  
complexo para  
gelo e água

# Nuvens

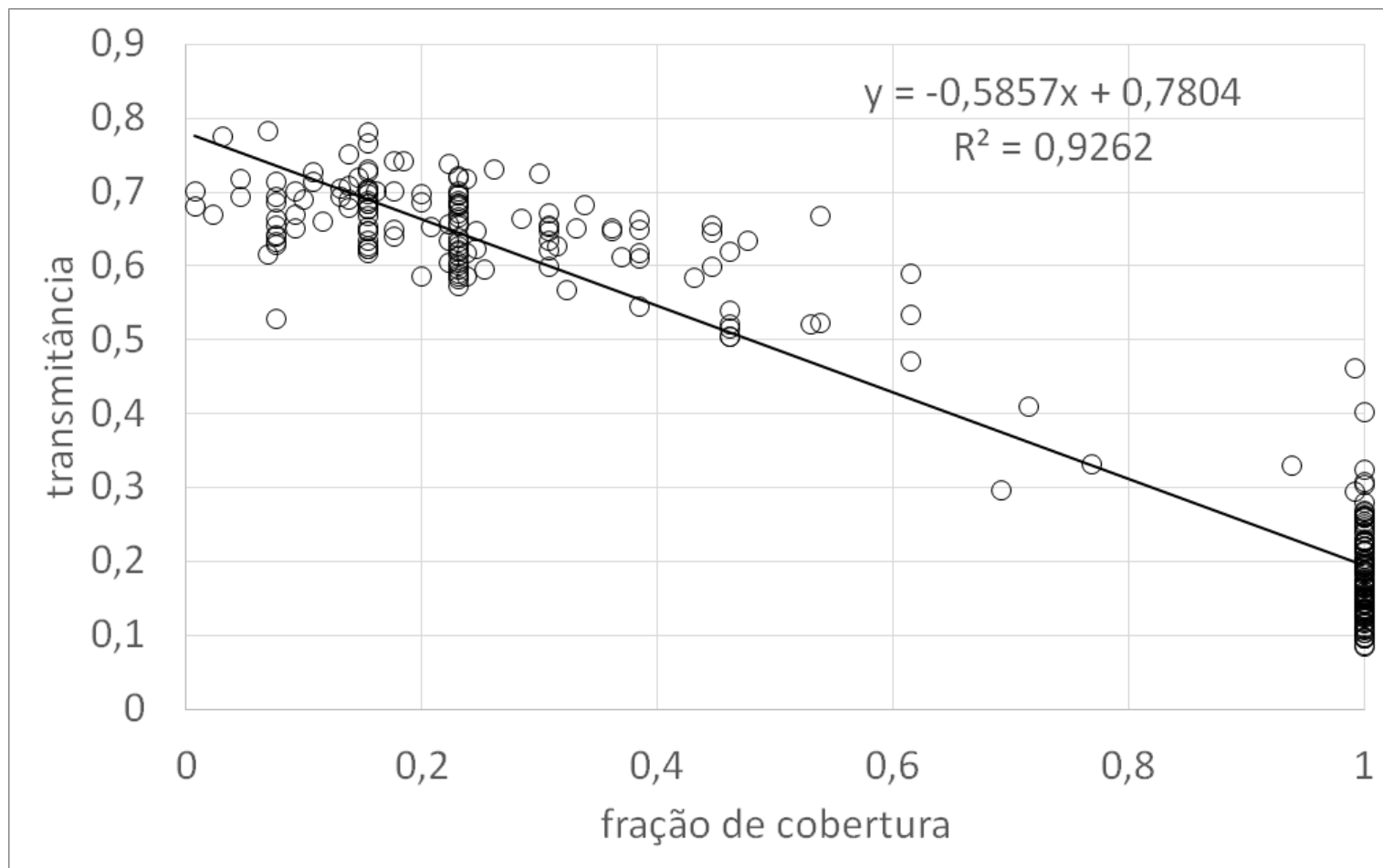
- Nas microondas:
- O parâmetro de tamanho  $x \sim 0,01$  para **gotas de nuvens**, portanto,  espalhamento Rayleigh
- baixa absorção (transmitância  $> 90\%$ )
- partículas de gelo absorvem menos ainda
- **gotas de chuva ( $> 100 \mu\text{m}$ )** interagem fortemente com a radiação em microondas, portanto, a transmitância é menor para **nuvens precipitantes**.

# As nuvens e o balanço radiativo



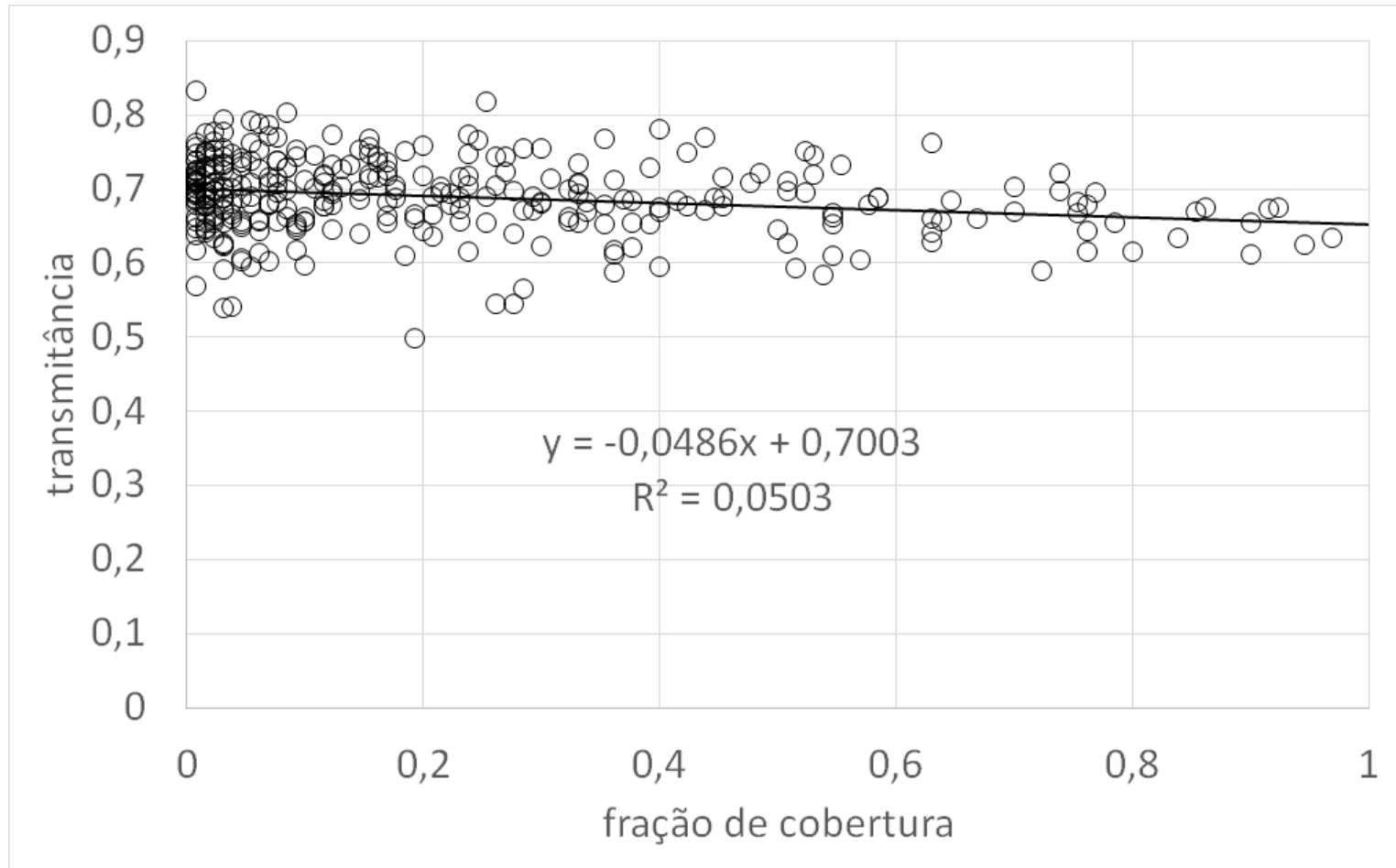
(Adaptado de Protat, 2005)

# Stratus



Henrique Yoshida (2020)

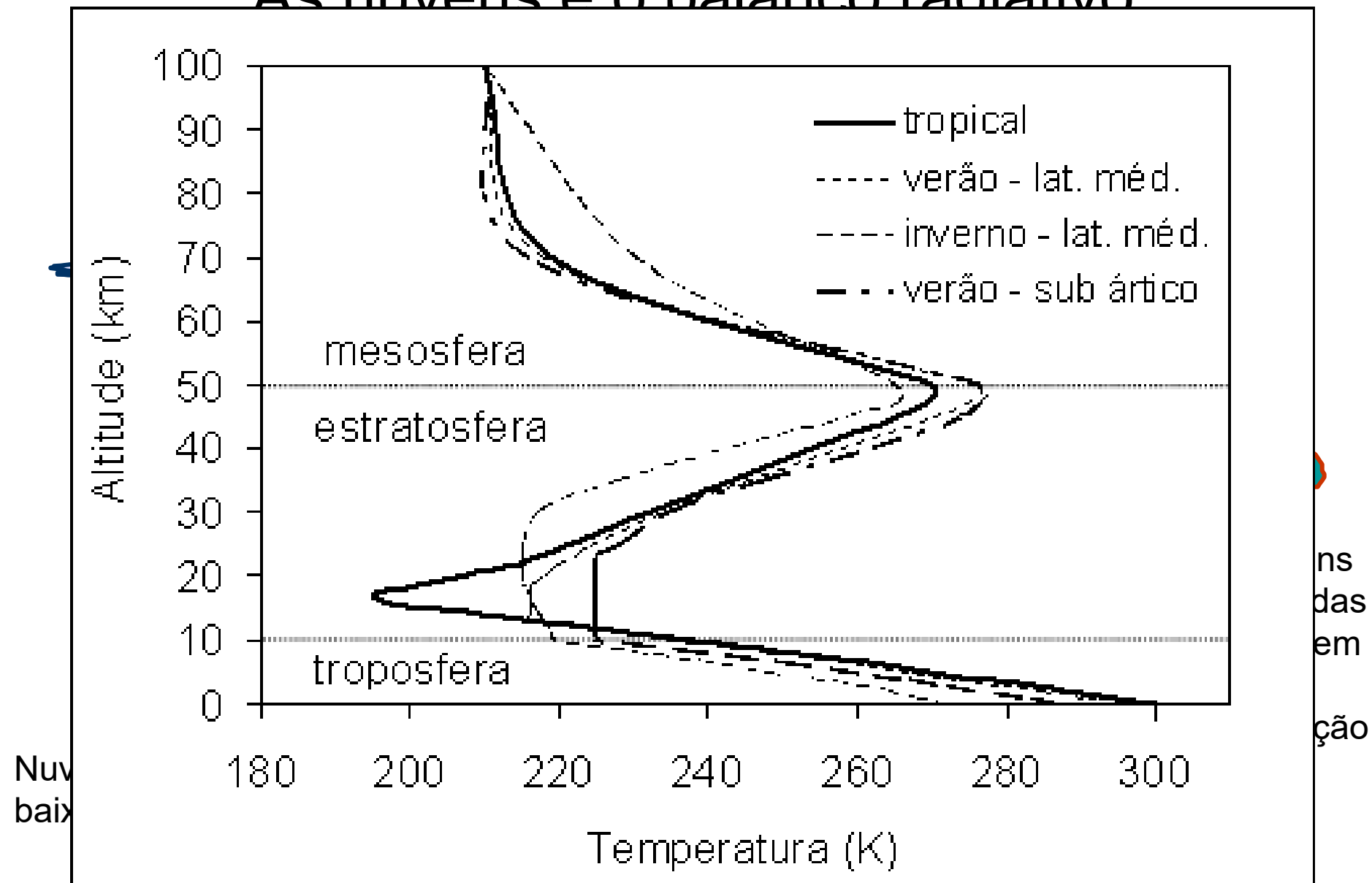
# Cirrus



Henrique Yoshida (2020)

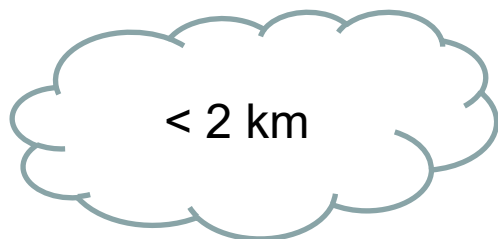


# As nuvens e o balanço radiativo



(Adaptado de Protat, 2005)

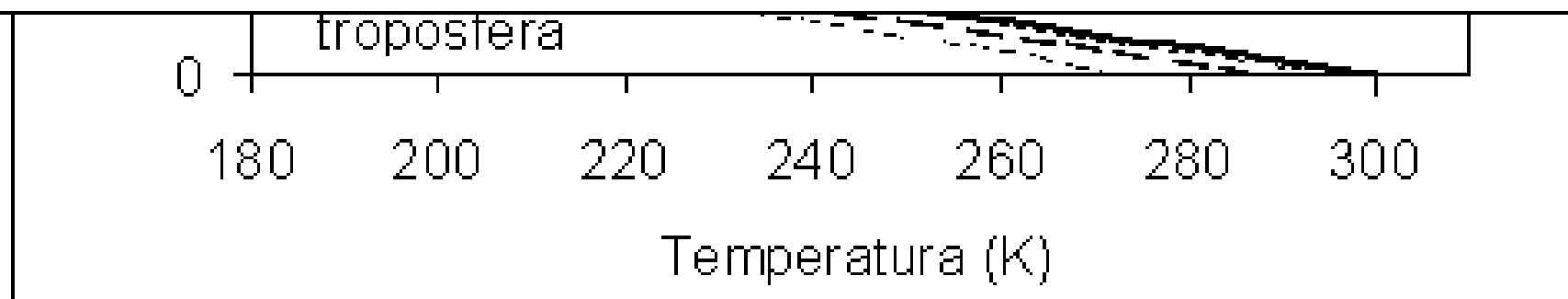
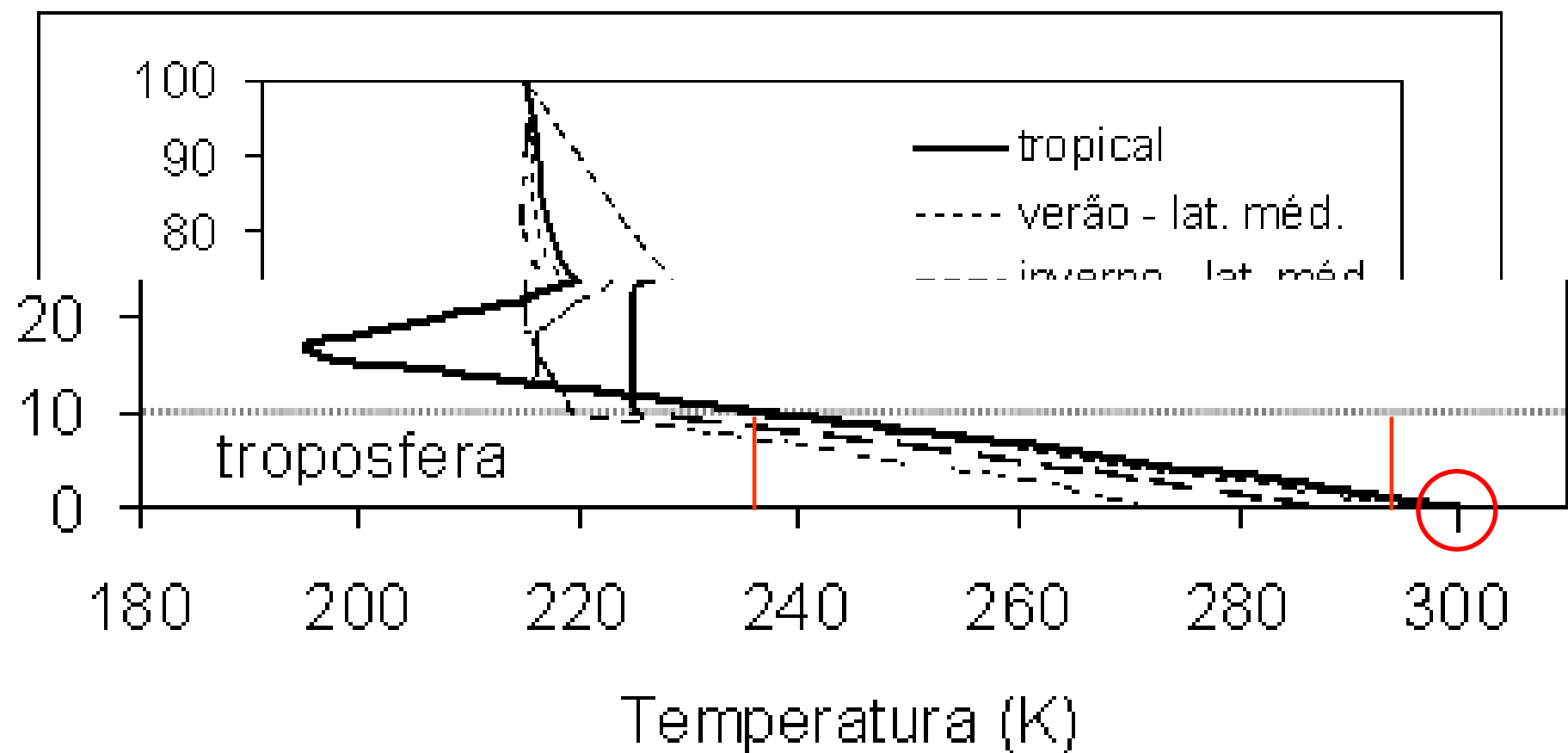
## Nuvens baixas

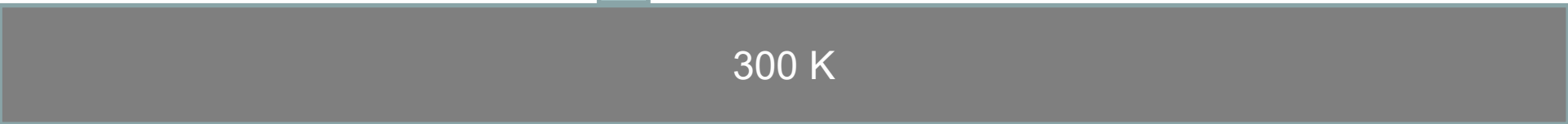


## Nuvens altas

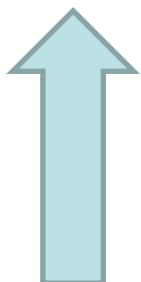
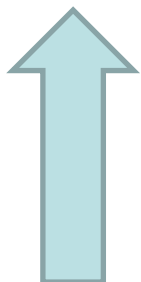
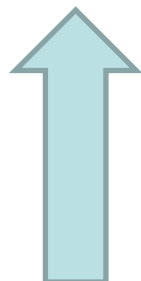


~ 10 km

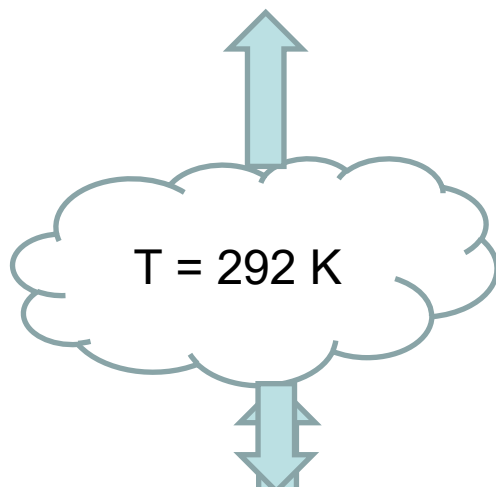




300 K



## Nuvens baixas



300 K

# Espalhamento/absorção

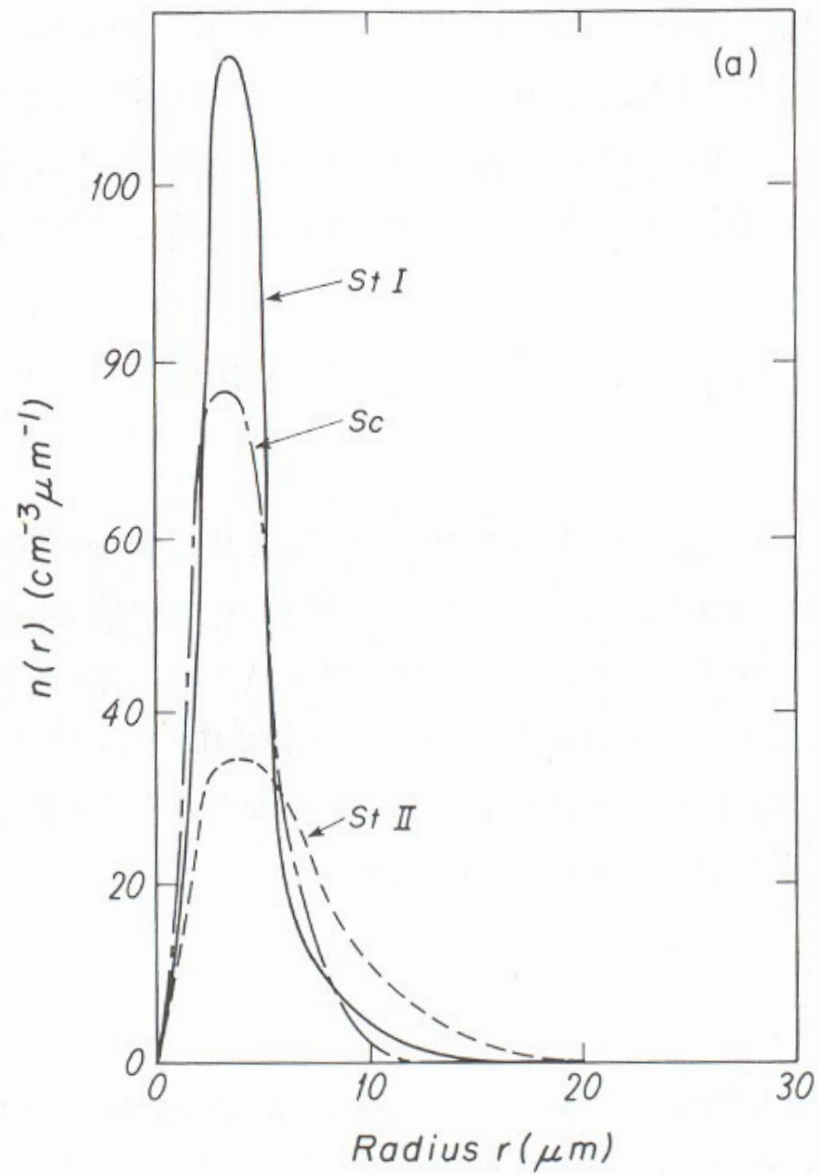
- Distribuição de tamanho
  - Índice de refração
  - Conteúdo de água líquida e gelo
- + Teoria Mie (supondo que as gotas são esféricas):
- Albedo simples
  - Função de fase
  - Profundidade óptica

# Absorção/emissão

- Perfil vertical de temperatura, água e gelo

# Distribuição de tamanho





**FIG. 4.10(a)** Droplet size distributions of stratocumulus and stratus over land (St II) and (St I).

Liou, 1992

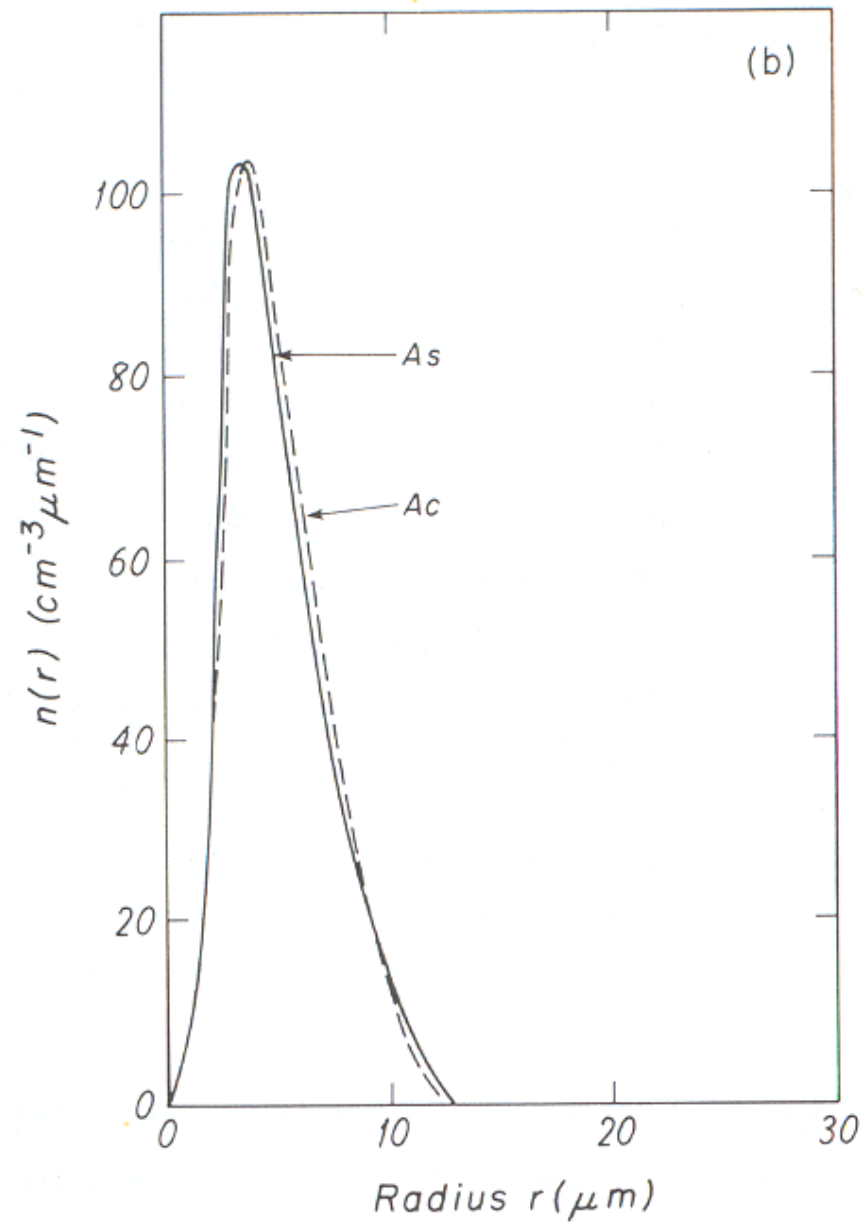
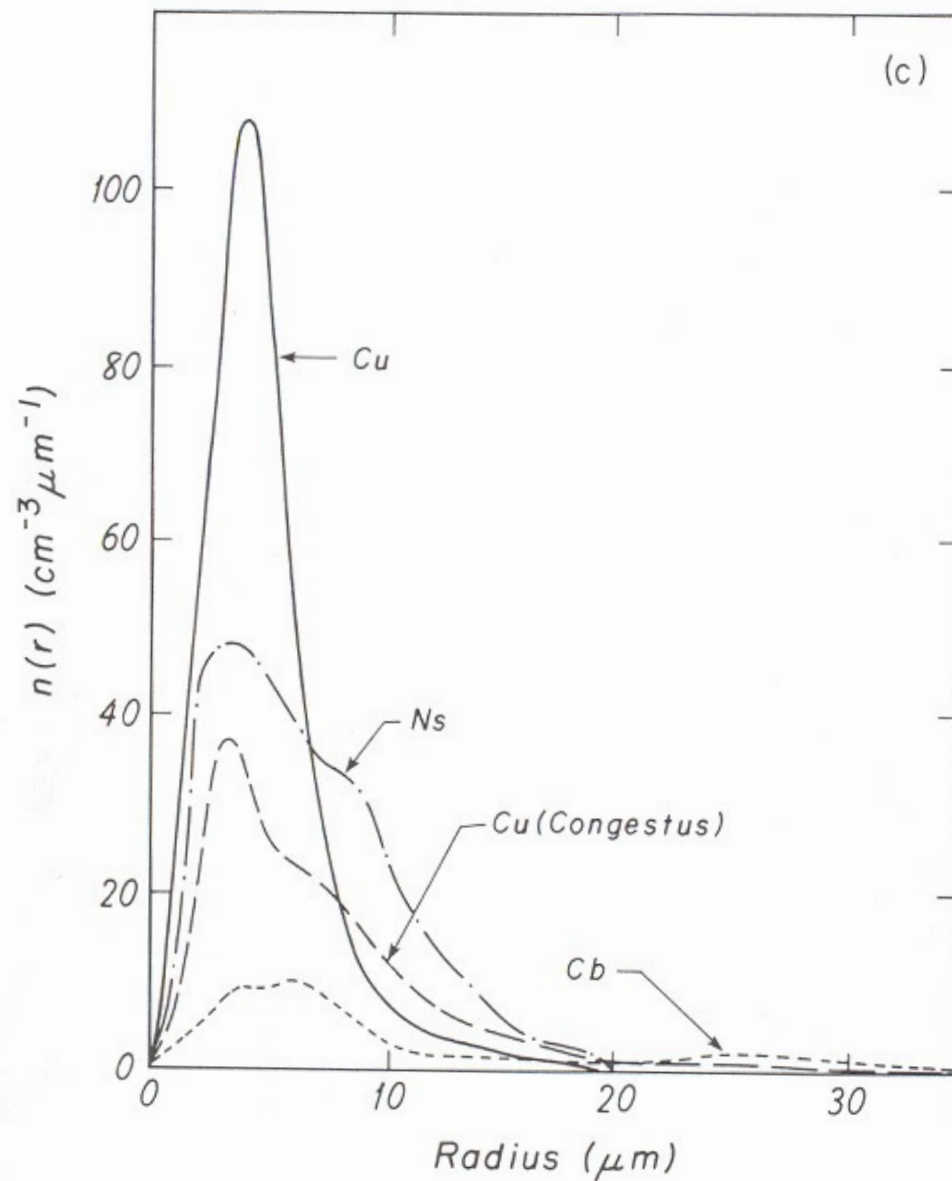


FIG. 4.10(b) Droplet size distributions of altostratus and altocumulus.

Liou, 1992



**FIG. 4.10(c)** Droplet size distributions of fair weather cumulus, nimbostratus, cumulus congestus, and cumulonimbus.

Liou, 1992

Dependendo do tipo de nuvem, tanto a distribuição de tamanho quanto a forma de seus hidrometeoros variam

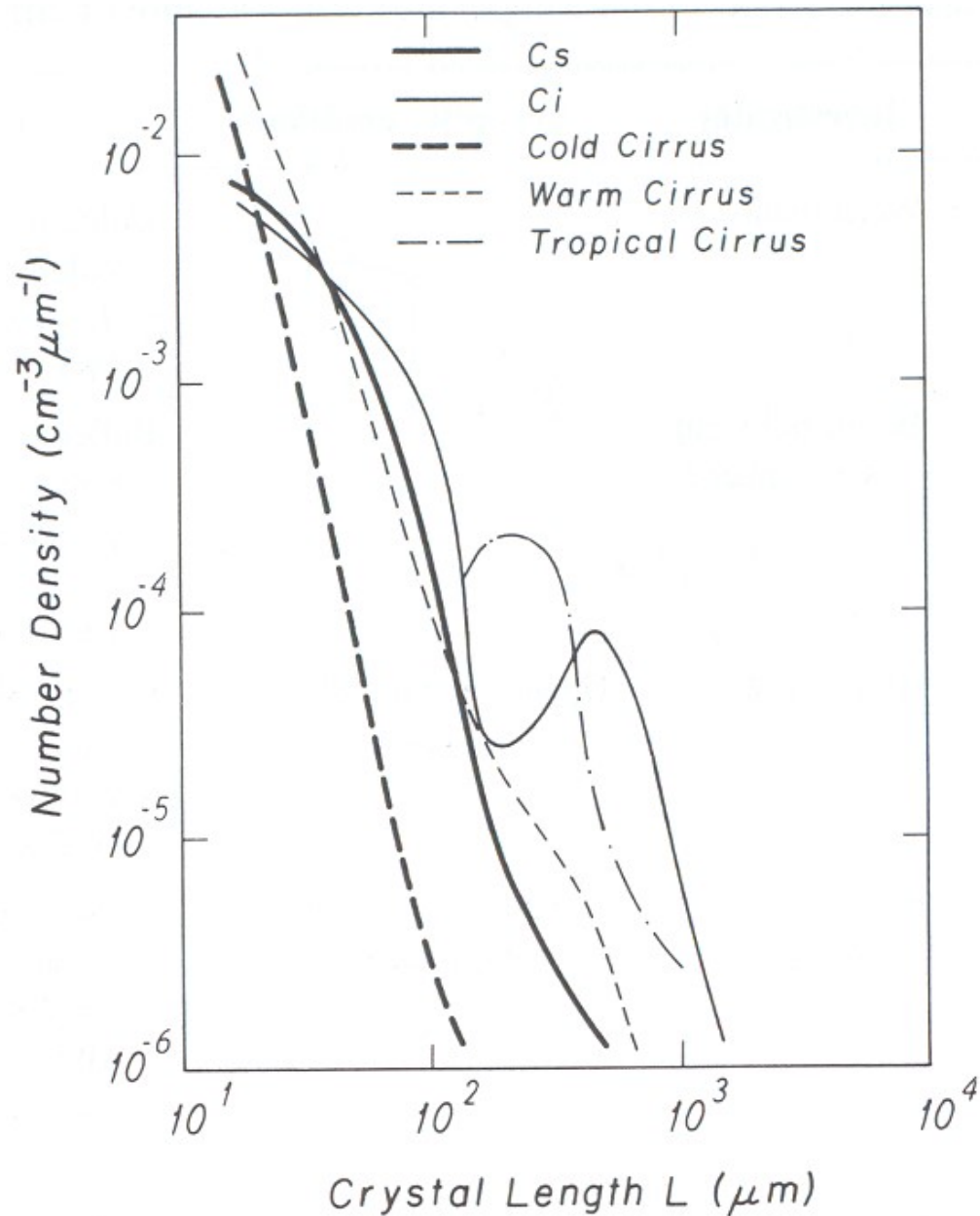
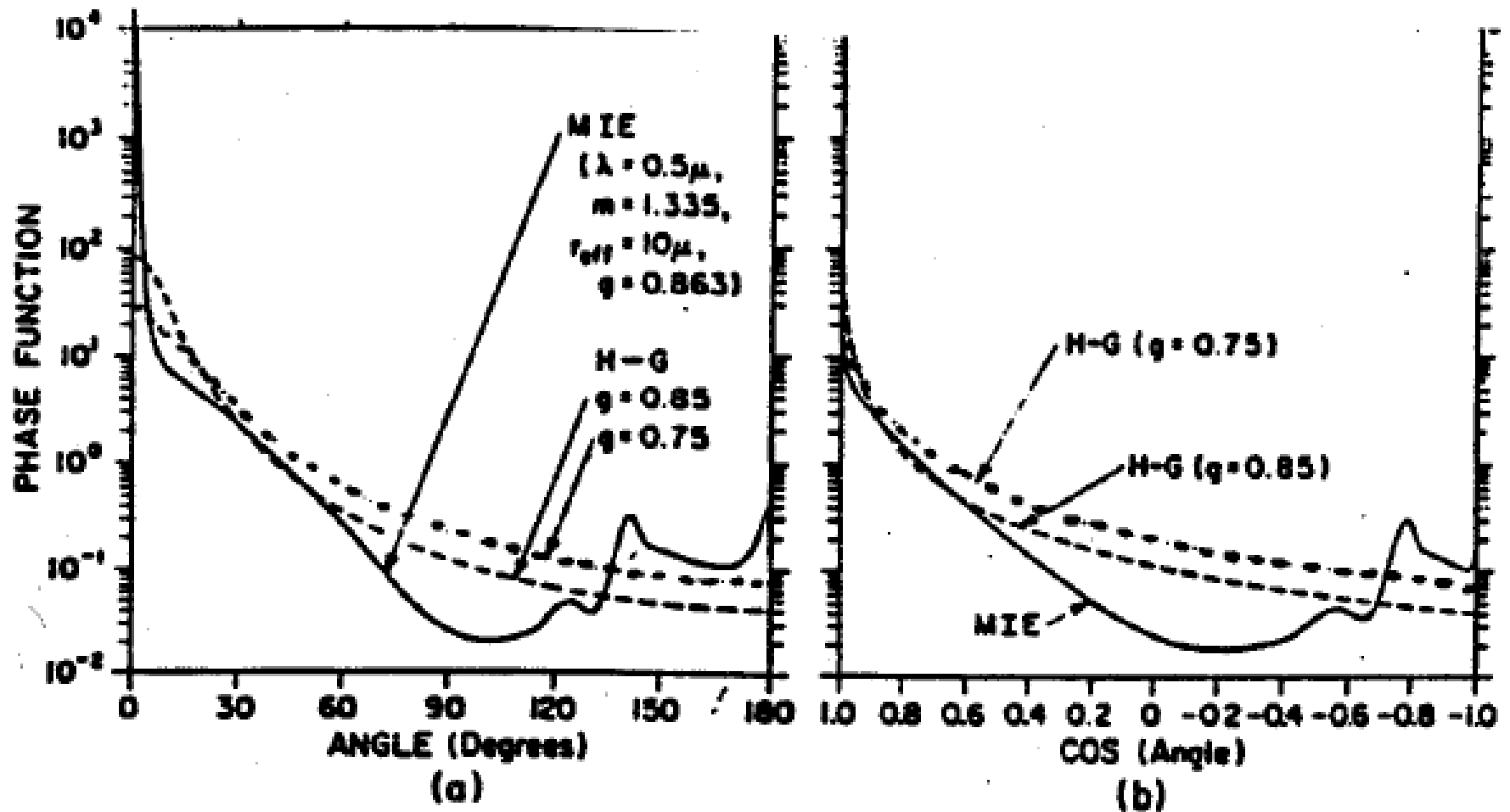
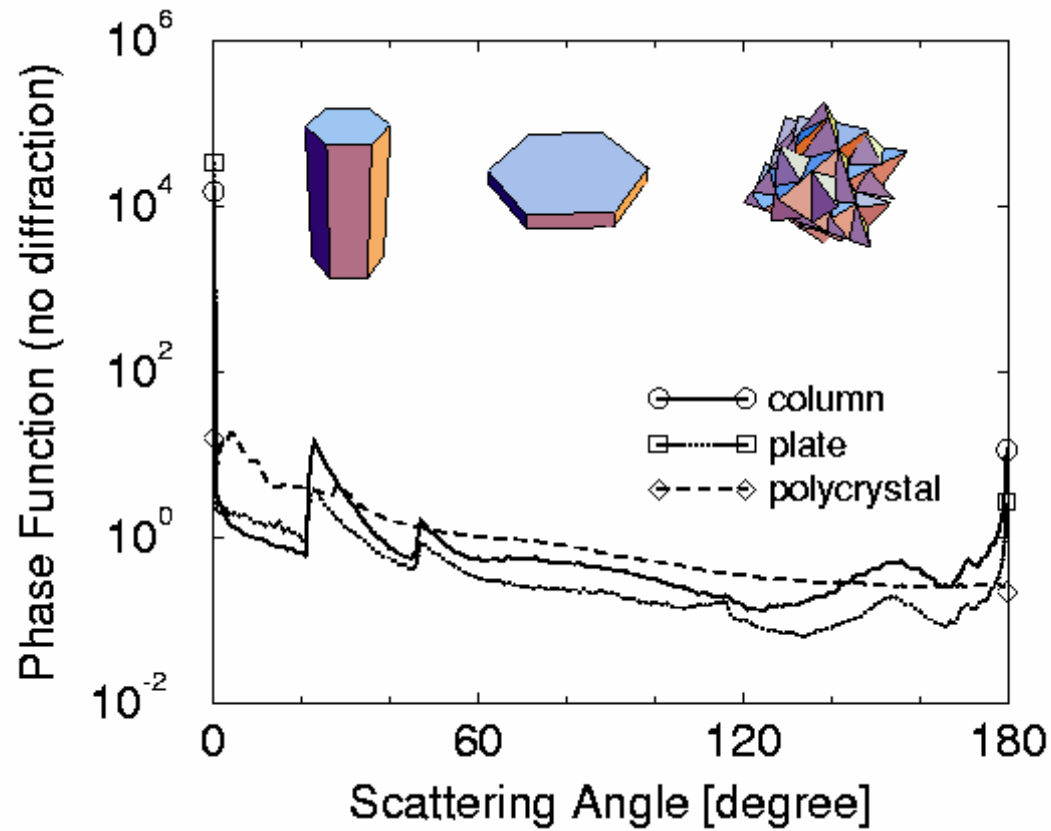
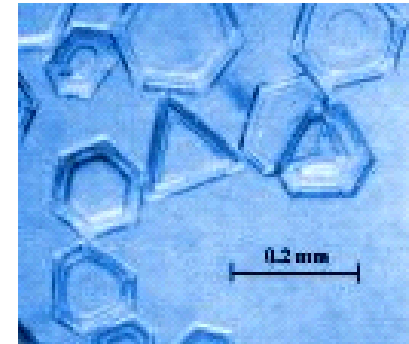
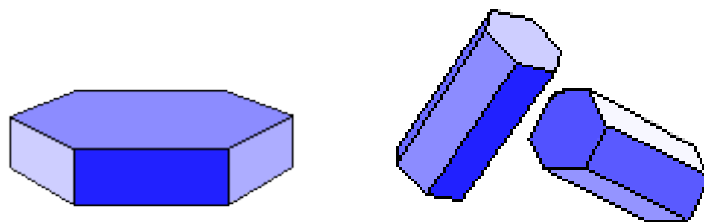
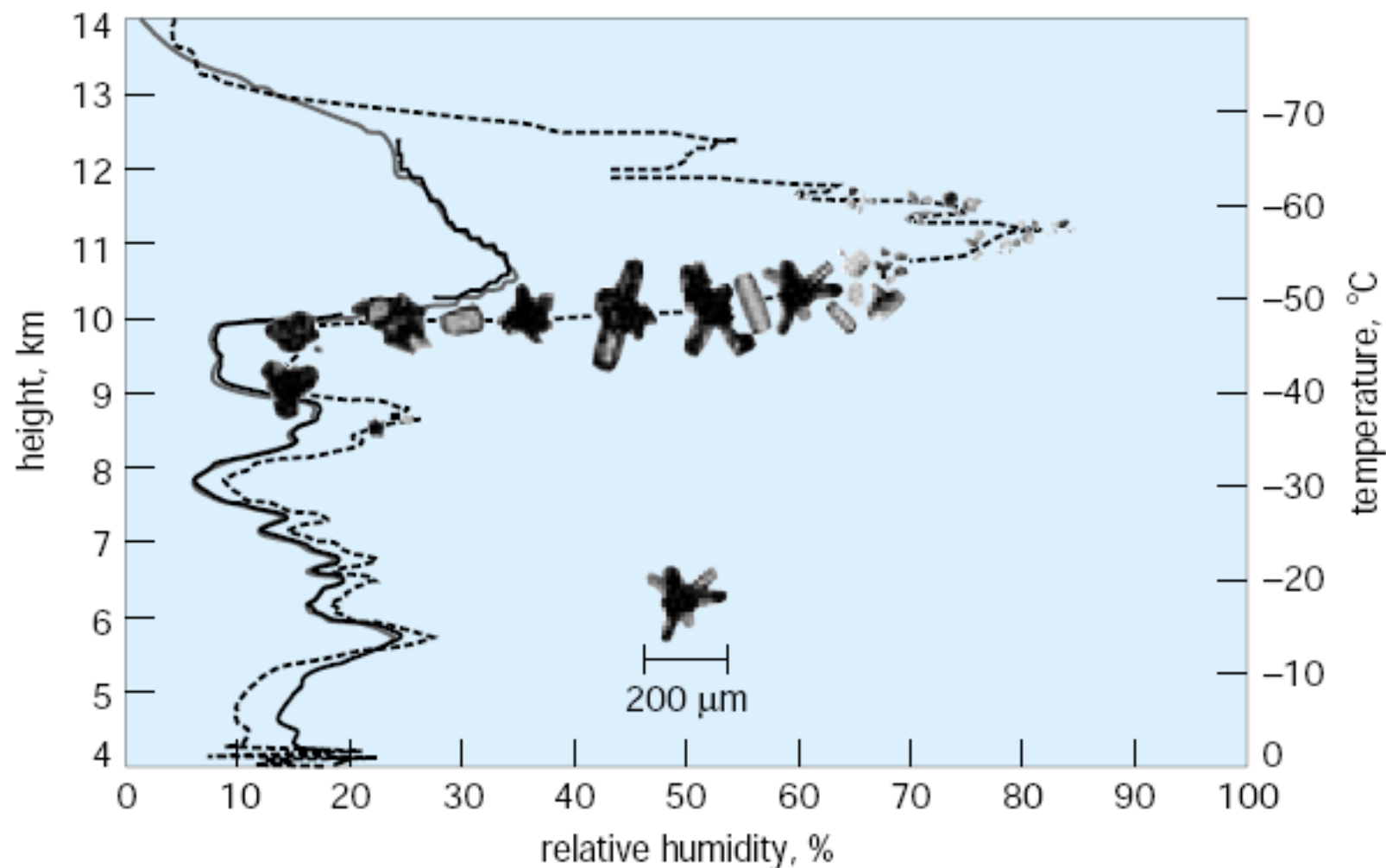


FIG. 4.12 Representative ice crystal size distributions for cirrus clouds.

# Função de fase







Ice crystal size and shape as a function of height, temperature, and relative humidity captured by a replicator balloon sounding system in Marshall, Colorado, on November 10, 1994. The broken and solid lines denote the relative humidity measured by cryogenic hygrometers and Vaisala RS80 instruments, respectively. (Graphic by Andrew Heymsfield, National Center for Atmospheric Research. data from K. N. Liou, *An Introduction to Atmospheric Radiation*, 2d ed., Academic Press, 2002)

# De aula anterior

$$\beta(\lambda, s) = \pi r^2 Q(\lambda, s) \cancel{N(s)}$$

Mede-se ou estima-se a densidade de água na nuvem,  $\rho_w$  :

$$\rho_w = N \frac{4\pi r^3}{3} \rho_l$$

onde  $\rho_l$  é a densidade da água pura  
 $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$

Valores típicos de  $\rho_w$  : 0,1 a 1 g/m<sup>3</sup>



Coeficiente mássico de atenuação [m<sup>2</sup>/kg]

$$\beta(\lambda, s) = \cancel{\pi r^2} Q(\lambda, s) \cancel{N(s)} = k \rho_w = k \cancel{N} \cancel{\frac{4\pi r^3}{3}} \rho_l$$

$$\Rightarrow k = 3 \frac{Q}{4r\rho_l}$$

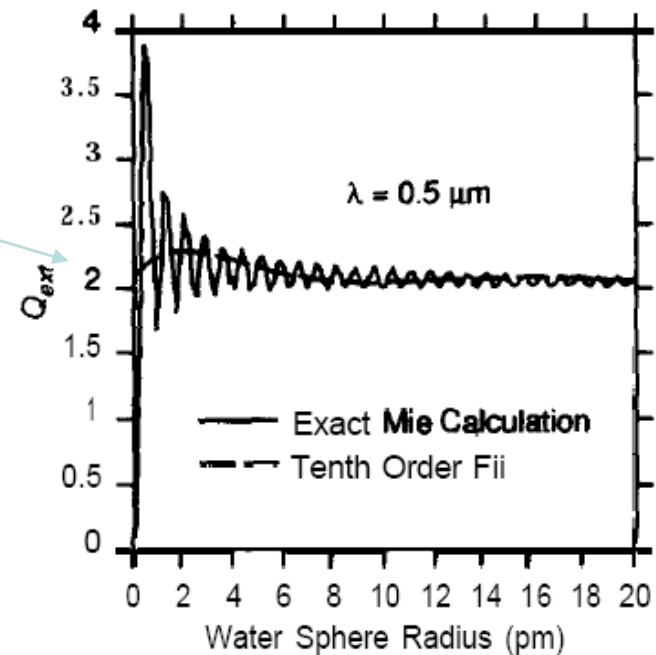
$\Rightarrow k$  é maior para raio menor

Para chuva,  $r \sim 1$  mm

$\Rightarrow k \sim 1,5$  m<sup>2</sup>/kg

Para nevoeiro,  $r \sim 10$  μm

$\Rightarrow k \sim 150$  m<sup>2</sup>/kg



Supondo  $\rho_w \sim 0,1 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

$$\beta(\lambda, s) = k\rho_w$$

quanto vale  $\beta$  em  $\text{km}^{-1}$ ?

Chuva?

Nevoeiro?

- Supondo  $\Delta z = 1 \text{ km}$

Quanto vale  $\tau$  para gotas de chuva e para o nevoeiro?

E a transmitância direta em cada caso?

- Definindo o conteúdo integrado de água líquida  $L$ :

$$L = \int_{z_{base}}^{z_{topo}} \rho_w(z) dz$$

Como  $Q = 2$ , no visível:

$$\tau = \frac{3L}{2\rho_l r}$$

mas

Gotas de nuvens têm tamanhos diferentes,  
assim,

$$N = \int_0^{\infty} n(r) dr$$

# Neste caso

$$\rho_w = \int_0^{\infty} n(r) \rho_l \frac{4\pi r^3}{3} dr$$
$$\beta = \int_0^{\infty} n(r) Q \pi r^2 dr$$

Definindo-se o raio efetivo como:

$$r_{ef} = \frac{\int_0^{\infty} r^3 dr}{\int_0^{\infty} r^2 dr}$$

# Tem-se

$$k = \frac{\beta}{\rho_w}$$
$$\sim \frac{2 \times 3}{4\rho_l r_{ef}} \sim \frac{3}{2\rho_l r_{ef}}$$

$$\tau \sim \frac{3L}{2\rho_l r_{ef}}$$

## **Média Anual Global do Efeito Radiativo de Nuvens ( $\text{Wm}^{-2}$ ) no topo da atmosfera estimada via satélite**

|                   | LW<br>CRF    | SW<br>CRF     | Net<br>CRF   |
|-------------------|--------------|---------------|--------------|
| ERBE: 1985 – 89   | +29.1        | - 47.6        | -18.5        |
| ScaRaB: 1994 – 95 | +27.2        | - 48.2        | -21.0        |
| CERES-EBAF        | +26 $\pm$ 12 | - 47 $\pm$ 24 | -21 $\pm$ 16 |

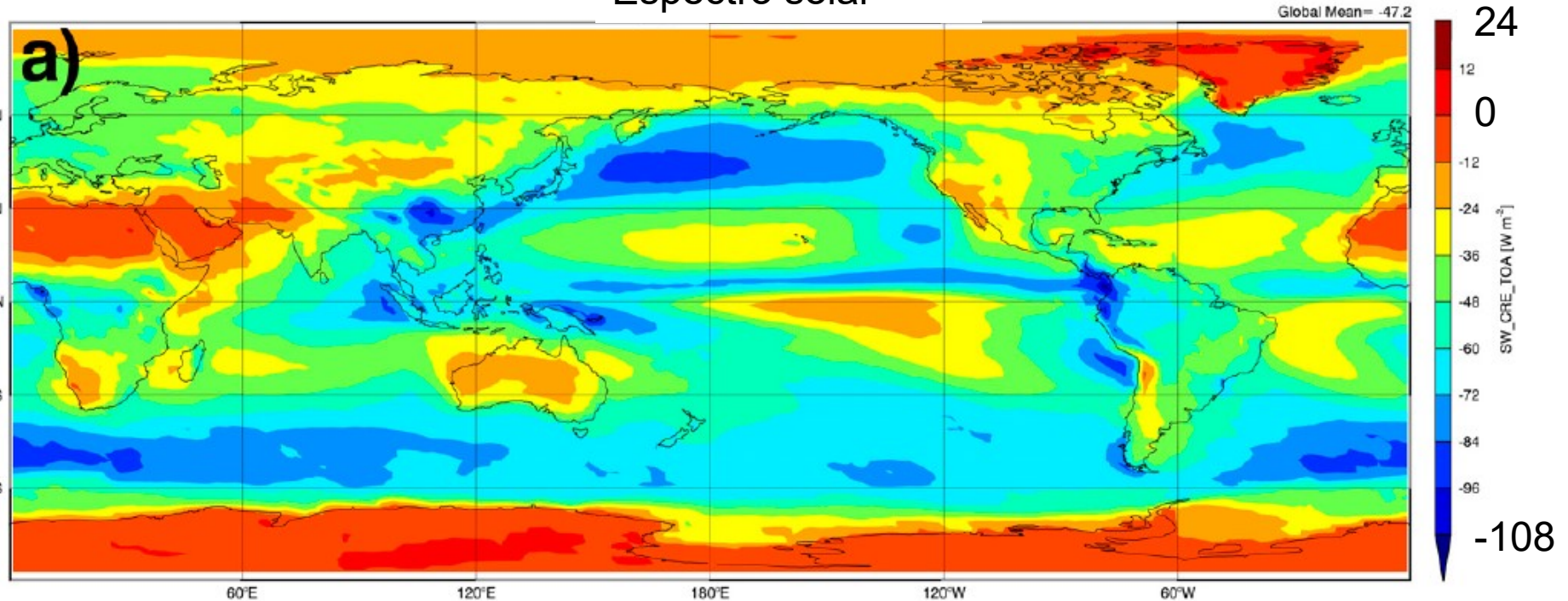
(ERBE e SCARAB: <http://www.lmd.polytechnique.fr/~Scarab/english/ECRF.htm>)

(CERES-EBAF: Stanfield et al. 2015. Journal of Climate 28,1842-1864)



# Alta variabilidade espacial

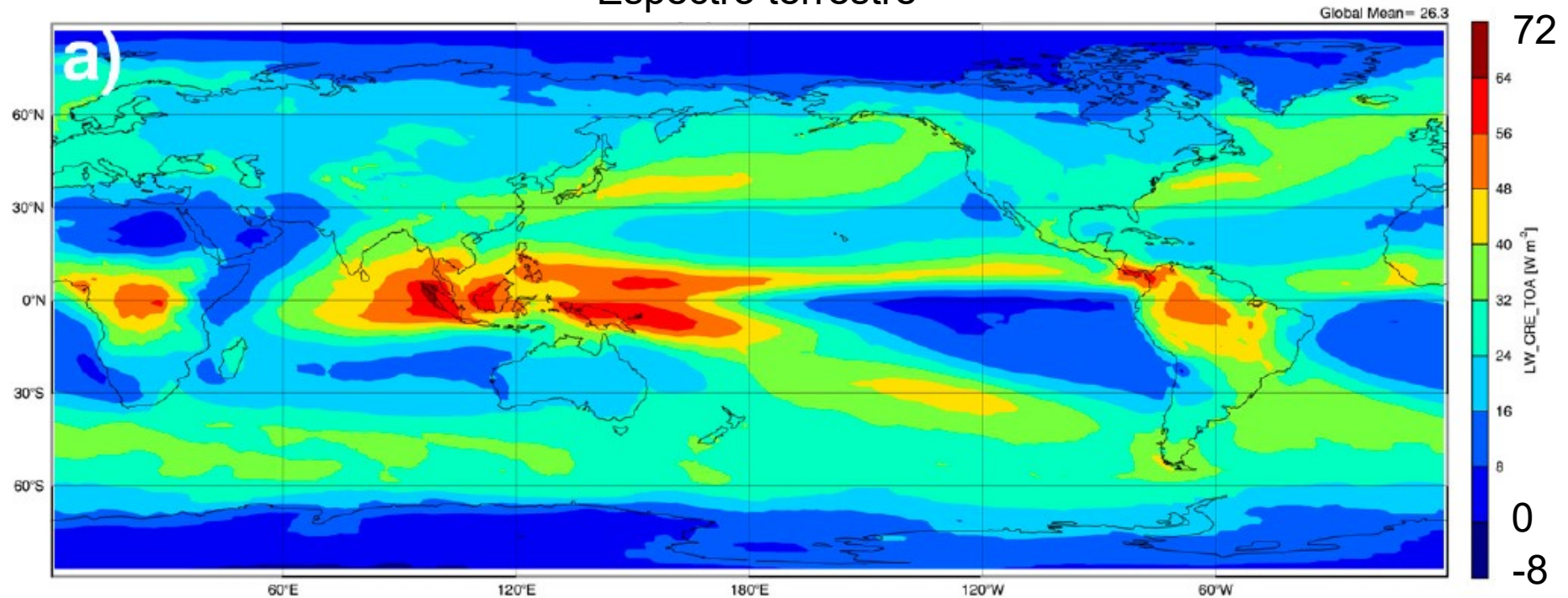
Espectro solar



(CERES-EBAF: Stanfield et al. 2015. Journal of Climate 28,1842-1864)

# Alta variabilidad espacial

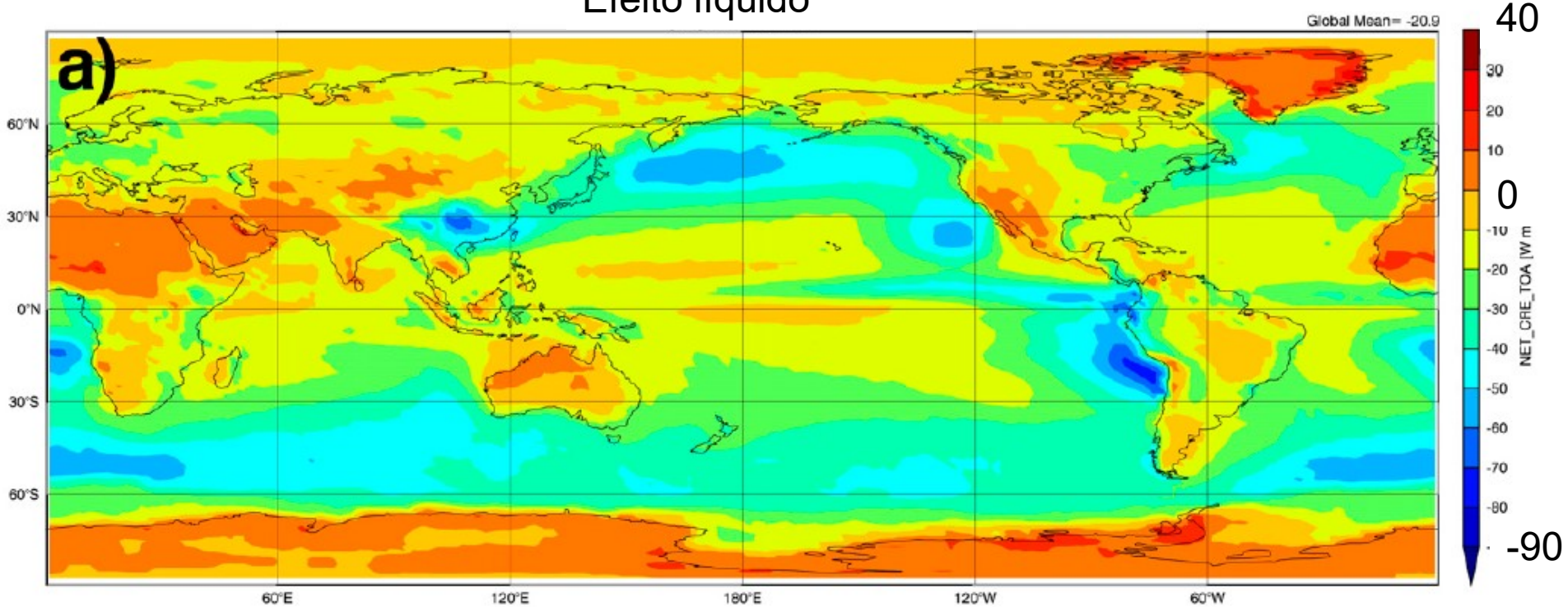
## Espectro terrestre



(CERES-EBAF: Stanfield et al. 2015. Journal of Climate 28,1842-1864)

# Alta variabilidade espacial

Efeito líquido



(CERES-EBAF: Stanfield et al. 2015. Journal of Climate 28,1842-1864)

# Aerossol x nuvens

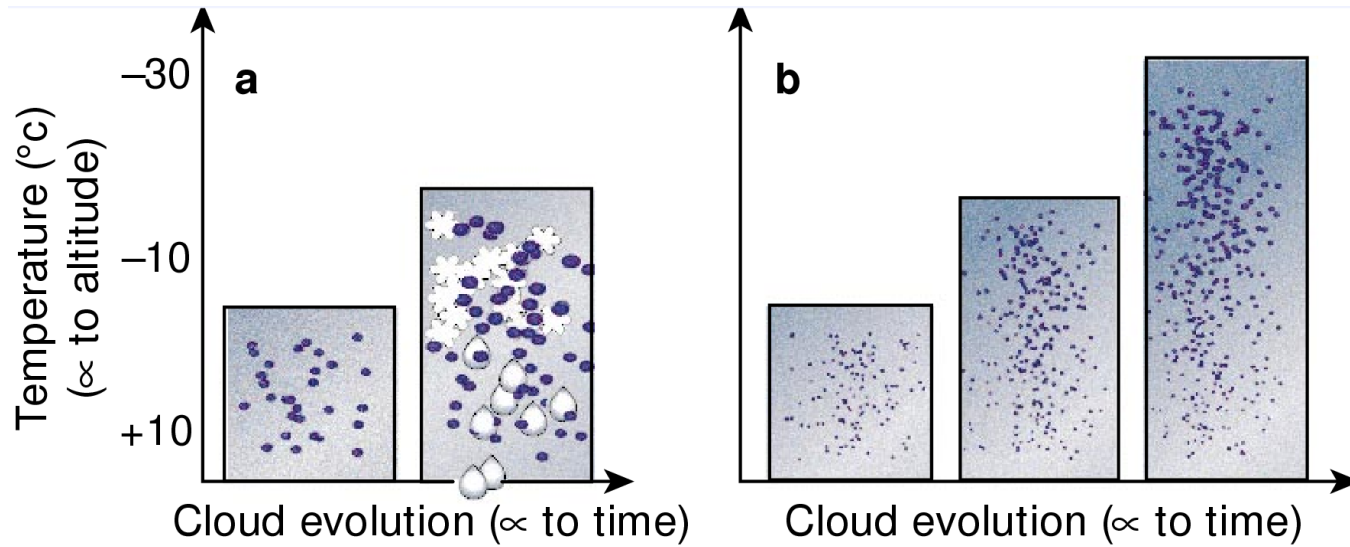
| <b>Propriedade</b>      | <b>Aerossol</b>    | <b>Nuvens</b>                                                                           |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Região espectral        | Radiação solar     | radiação solar e terrestre                                                              |
| Vida média              | ~ 1 semana         | minutos a dias                                                                          |
| Distribuição geográfica | pode ser homogênea | heterogênea<br>(localmente)<br>(espalhamento lateral)                                   |
| Profundidade óptica     | < 10.0             | > 100                                                                                   |
| Tipos                   | depende da fonte   | água, gelo<br>se em áreas poluídas,<br>podem ter<br>propriedades ópticas<br>modificadas |



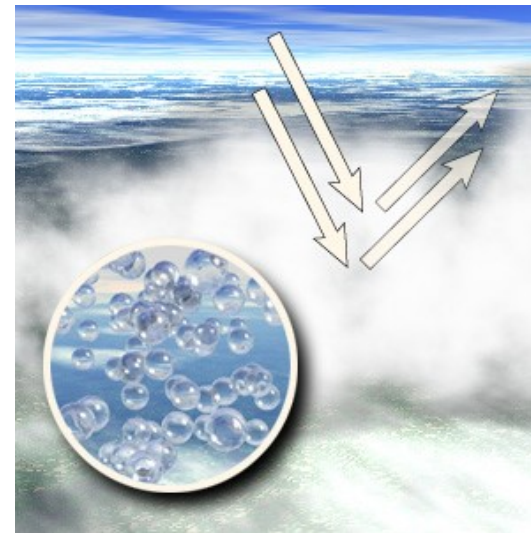
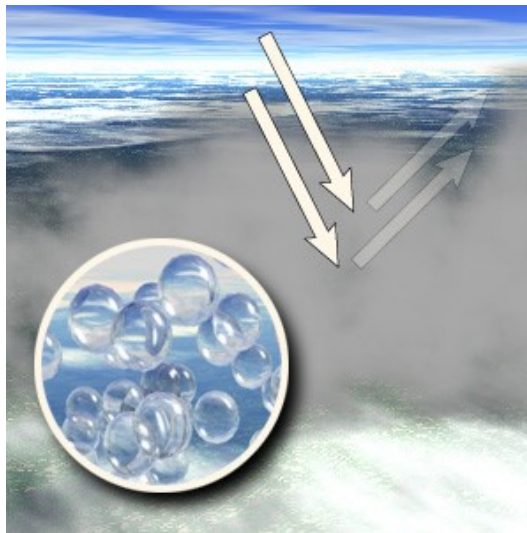
# Efeito indireto do aerossol

limpo

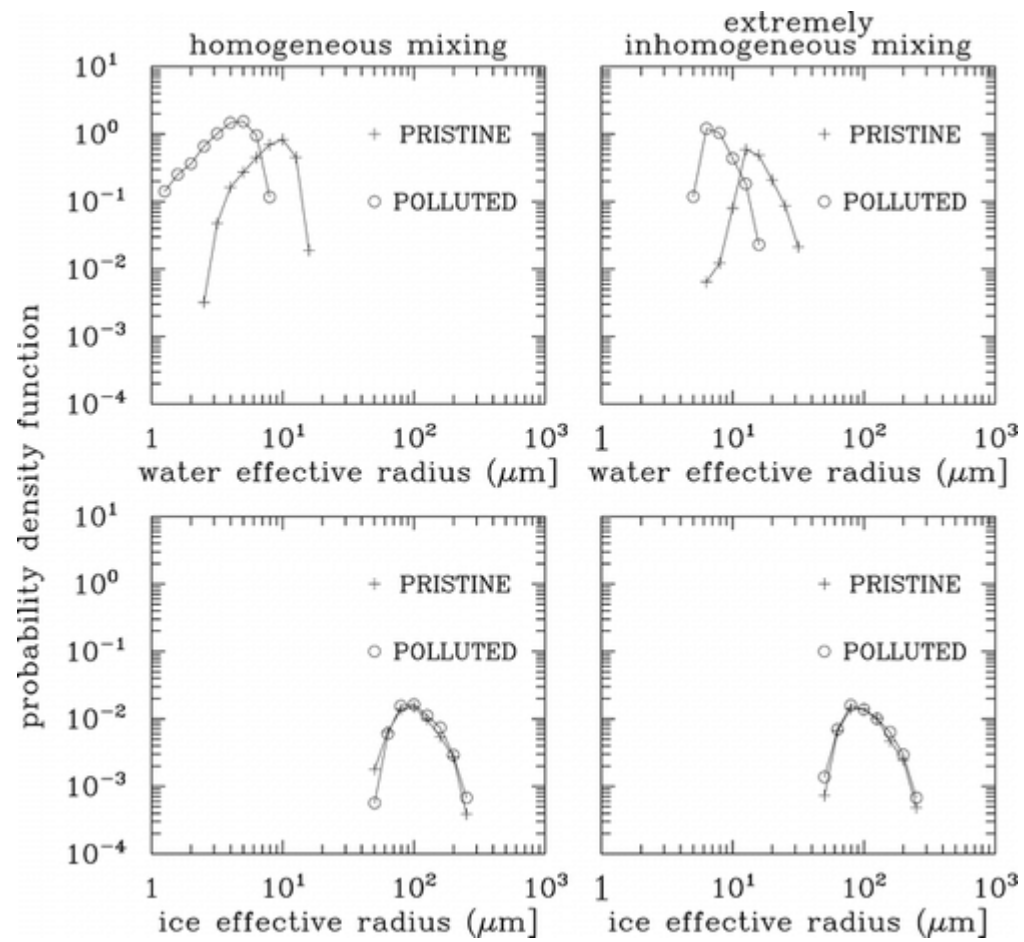
poluído



Kaufman et al., 2002



NASA earthobservatory



Grabowski (2006)

Marítimo:  $N \leq 500 \text{ cm}^{-3}$

Amazônia sem poluição:

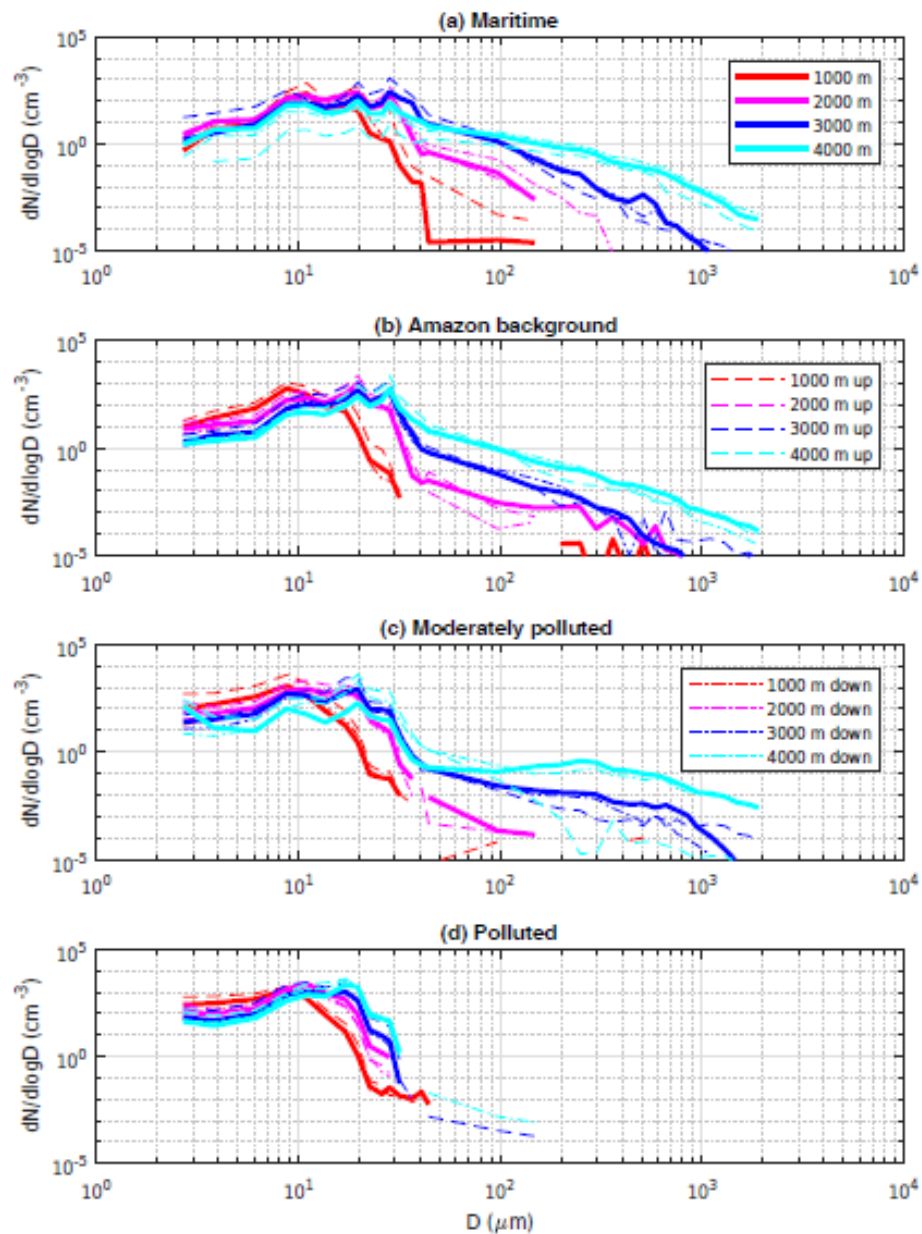
$500 \text{ cm}^{-3} \leq N \leq 1000 \text{ cm}^{-3}$

Moderadamente poluído:

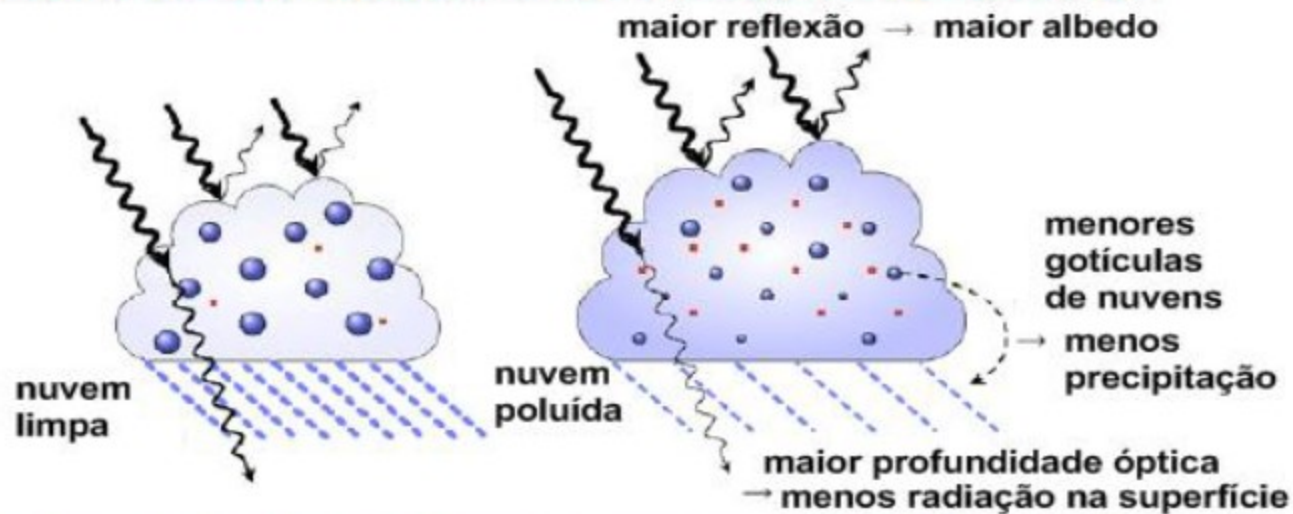
$1000 \text{ cm}^{-3} \leq N \leq 3000 \text{ cm}^{-3}$

Poluído:  $N > 3000 \text{ cm}^{-3}$

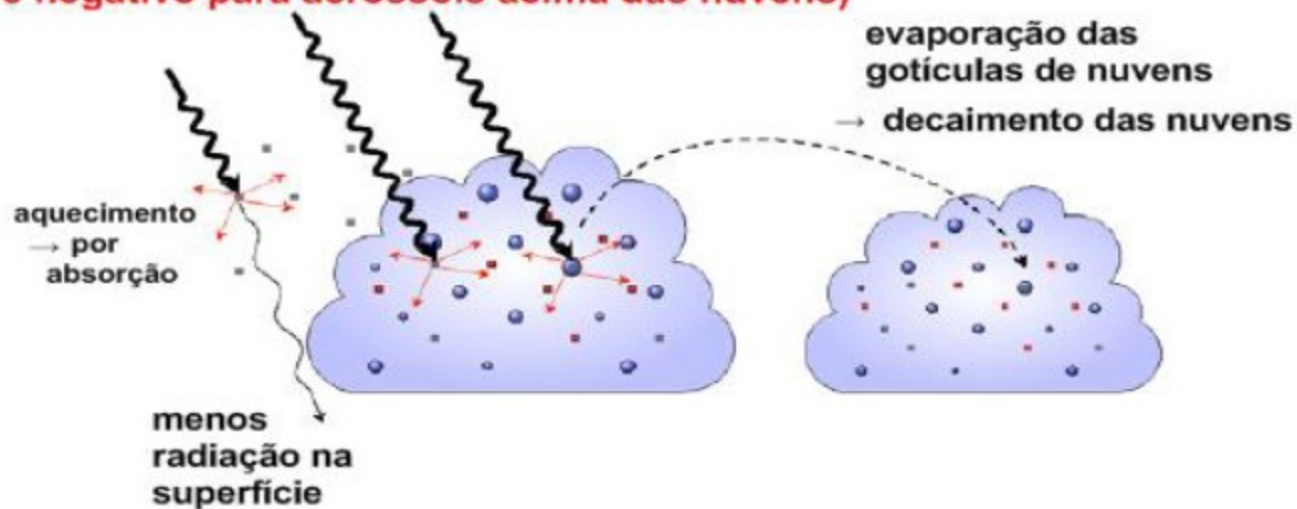
Cecchini et al. (2017)



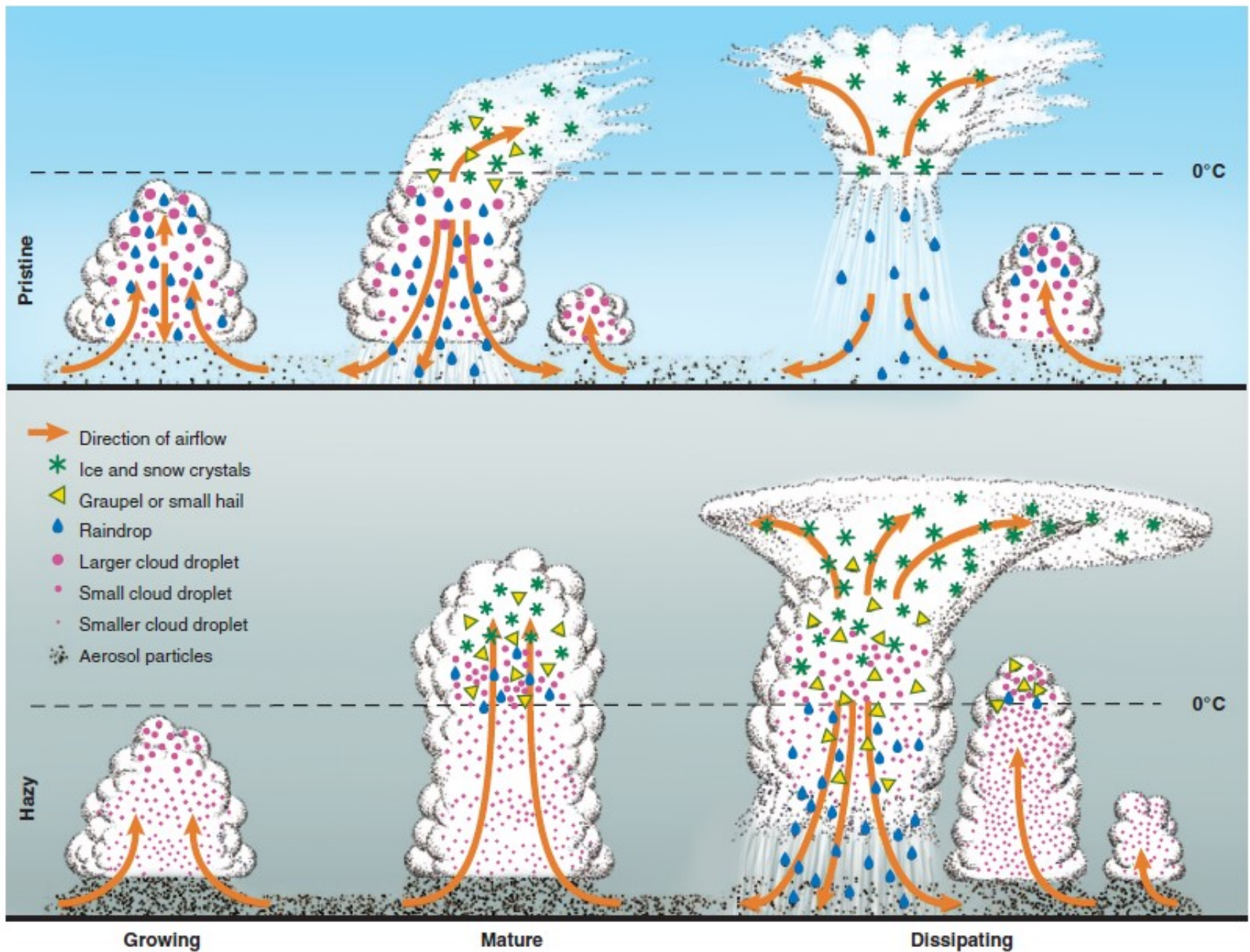
**Efeito indireto sobre o tempo de vida e albedo das nuvens  
(forçante positiva no topo da atmosfera e menor precipitação)**



**Efeito semi-direto (forçante positiva para aerossóis dentro da nuvem  
e negativo para aerossóis acima das nuvens)**







Rosenfeld et al. (2008)