

# RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

---

Miguel Centeno Brito

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Type of surface	Albedo (%)
Ocean	2 – 10
Forest	6 – 18
Cities	14 – 18
Grass	7 – 25
Soil	10 – 20
Grassland	16 – 20
Desert (sand)	35 – 45
Ice	20 – 70
Cloud (thin, thick stratus)	30, 60 – 70
Snow (old)	40 – 60
Snow (fresh)	75 – 95

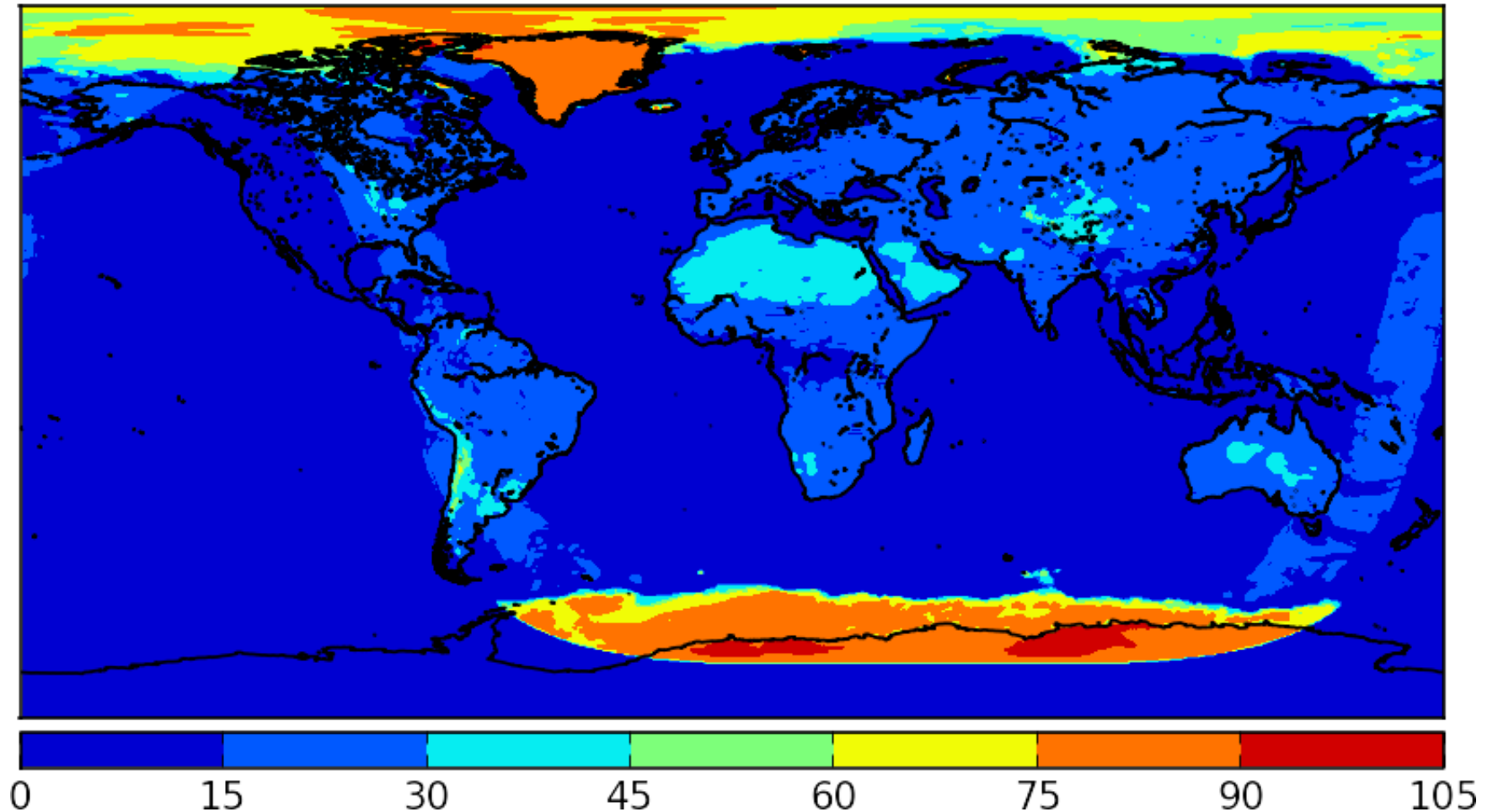
A reflectividade (albedo) da superfície depende fortemente da sua natureza, variando entre quase zero (oceanos) e quase total (neve fresca).

O albedo das nuvens é muito variável.

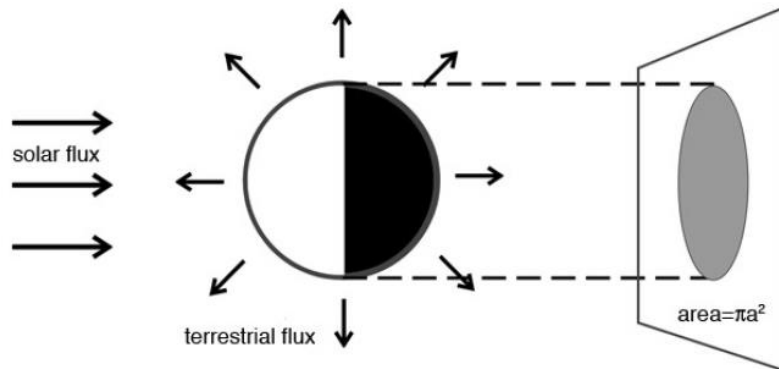
**Em termos médios, o albedo do planeta é aproximadamente 30%.**

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Surface Albedo (%) 14/08/2013 12:00:00



# Equilíbrio radiativo na atmosfera



Potência radiação solar **incidente**:

$$S_0 \pi a^2 = 1.74 \times 10^{17} \text{ W}$$

Potência radiação solar **absorvida**:

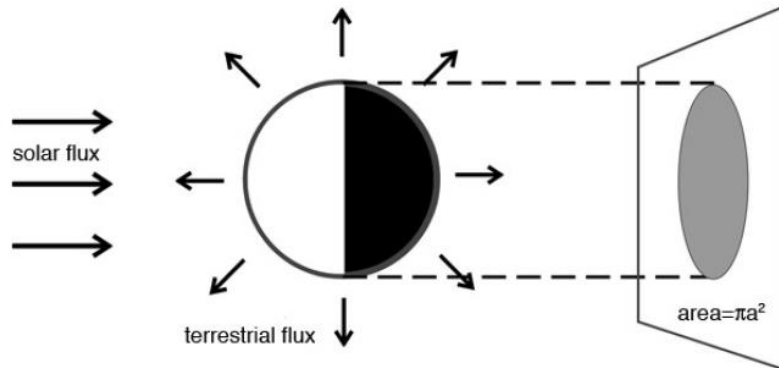
$$(1 - \alpha_p) S_0 \pi a^2 = 1.22 \times 10^{17} \text{ W}$$

Potência radiação **emitida** pela Terra:

$$4\pi a^2 \sigma T_e^4$$

A temperatura de emissão da Terra é, por definição, a temperatura de corpo negro do planeta.

# Equilíbrio radiativo na atmosfera



Potência radiação solar **incidente**:

$$S_0 \pi a^2 = 1.74 \times 10^{17} \text{ W}$$

Potência radiação solar **absorvida**:

$$(1 - \alpha_p) S_0 \pi a^2 = 1.22 \times 10^{17} \text{ W}$$

Potência radiação **emitida** pela Terra:

$$4\pi a^2 \sigma T_e^4$$

Notar que a temperatura apenas depende da distância (via  $S_0$ ) e do albedo e não do raio da Terra.

De facto a temperatura de emissão da Terra é de aproximadamente 288 K

Como estamos em equilíbrio térmico, a radiação absorvida tem que ser igual à radiação emitida e portanto

$$T_e = \left[ \frac{S_0(1 - \alpha_p)}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} = 255 \text{ K}$$

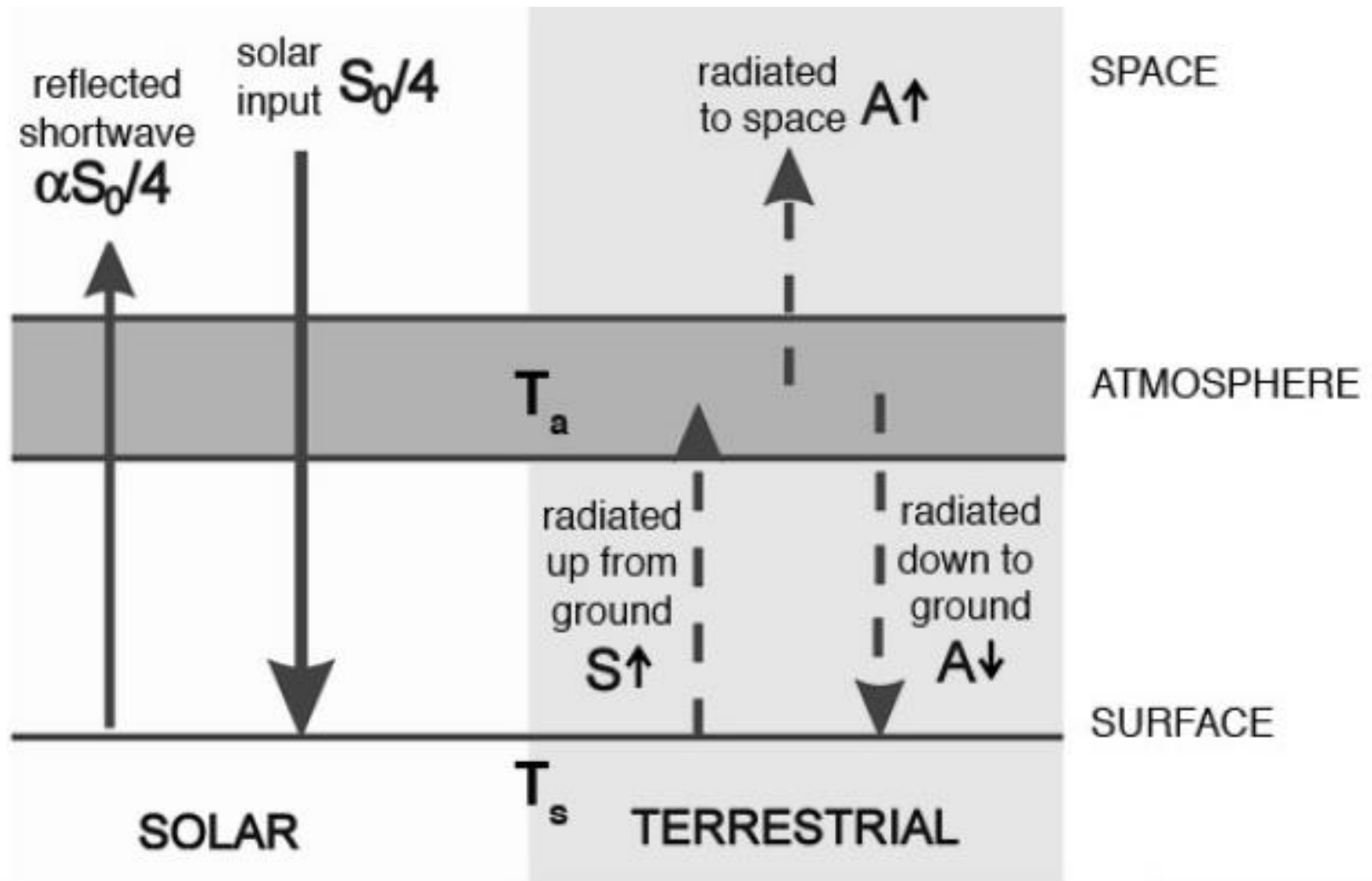
# Equilíbrio radiativo na atmosfera

A radiação emitida pela Terra (**infravermelho**) vai ser absorvida pelo **vapor de água** na atmosfera, que depois a re-emite.

- ❑ Acima de 5km, a atmosfera é quase transparente para o infravermelho
- ❑ A temperatura de emissão é portanto a temperatura da camada de atmosfera a 5km
- ❑ A superfície vai receber a radiação solar incidente e a radiação emitida pela atmosfera (logo  $T_s > T_e$ )

# EFEITO ESTUFA

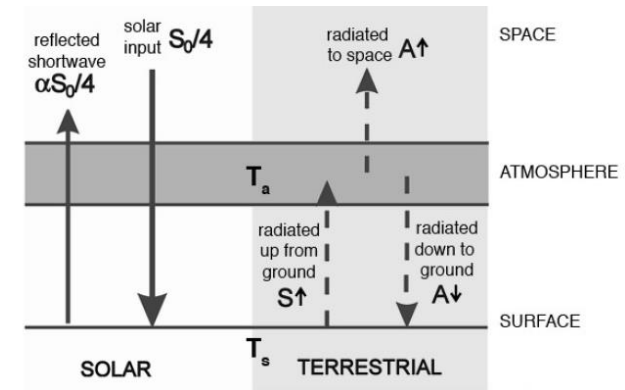
# Equilíbrio radiativo na atmosfera



# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

- ☐ Atmosfera transparente à radiação solar
- ☐ Atmosfera opaca à radiação térmica



Energia solar **incidente**, por unidade de área

$$\frac{S_0 \pi a^2}{4 \pi a^2} = \frac{S_0}{4}$$

Energia solar **absorvida**, por unidade de área

$$\frac{1}{4} (1 - \alpha_p) S_0$$

Energia **emitida** pela atmosfera, por unidade de área

$$A \uparrow = \sigma T_a^4$$

Como estamos em equilíbrio térmico, a radiação absorvida tem que ser igual à radiação emitida e portanto

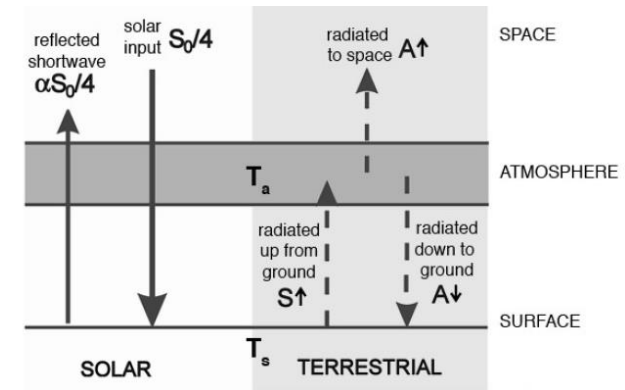
$$\sigma T_a^4 = \frac{1}{4} (1 - \alpha_p) S_0 = \sigma T_e^4$$



# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

- ☐ Atmosfera transparente à radiação solar
- ☐ Atmosfera opaca à radiação térmica



A **superfície** recebe a radiação **solar**

$$\frac{1}{4} (1 - \alpha_p) S_0$$

A emissão da **atmosfera**

$$A \downarrow = \sigma T_a^4 = \sigma T_e^4$$

E **superfície** emite à sua temperatura  $T_s$

$$S \uparrow = \sigma T_s^4$$

E portanto

$$S \uparrow = \frac{1}{4} (1 - \alpha_p) S_0 + A \downarrow$$

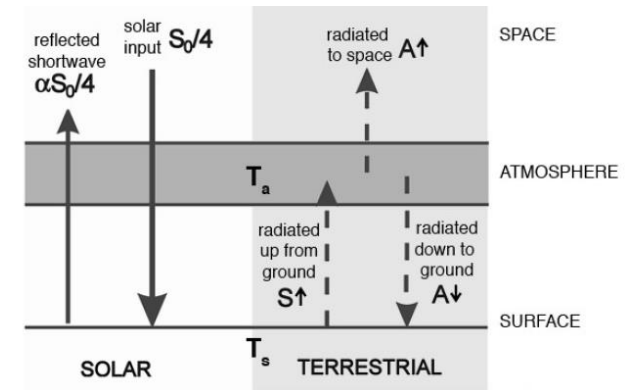
$$\sigma T_s^4 = \frac{1}{4} (1 - \alpha_p) S_0 + \sigma T_e^4 = 2\sigma T_e^4$$

$$T_s = 2^{\frac{1}{4}} T_e = 2^{\frac{1}{4}} \times 255 = 303 \text{ K}$$

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

- Atmosfera transparente à radiação solar
- Atmosfera opaca à radiação térmica



A temperatura da superfície é 288K e não 303K!

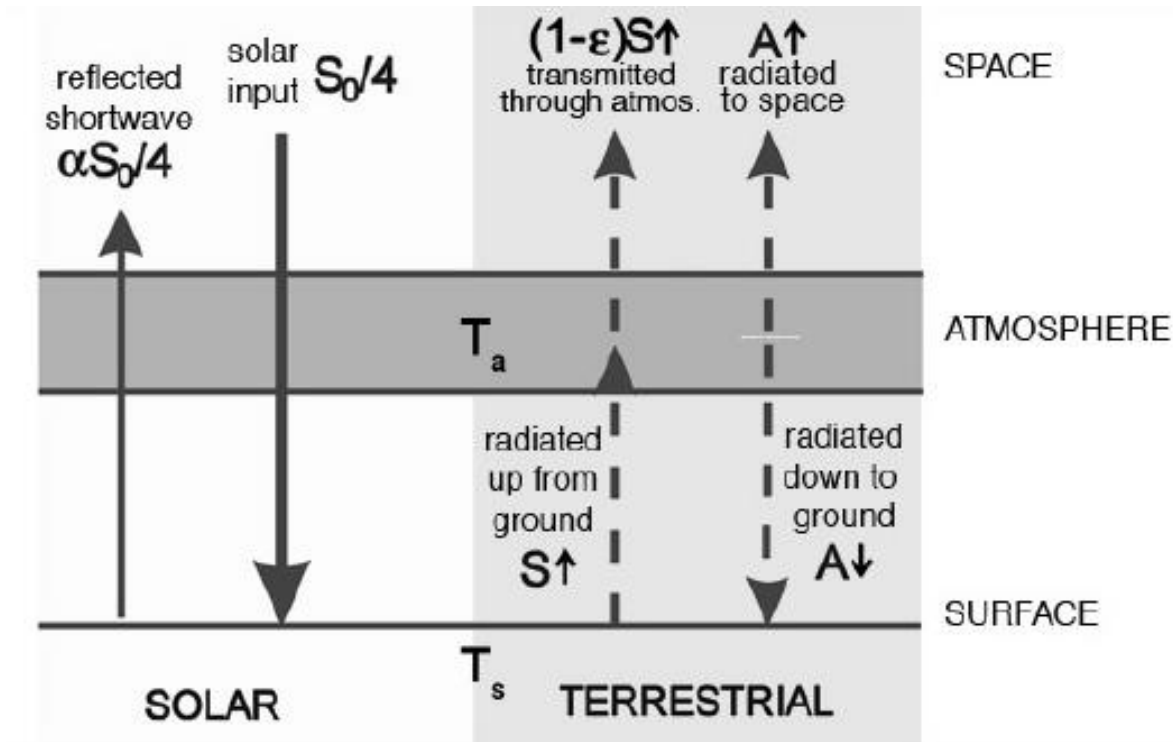
**Limitações** deste modelo

- Na realidade parte da radiação solar é absorvida na atmosfera (nuvens) e não chega à superfície (20-25%)
- Na realidade a atmosfera não absorve totalmente a radiação emitida pela superfície e por isso o efeito estufa é menos forte

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

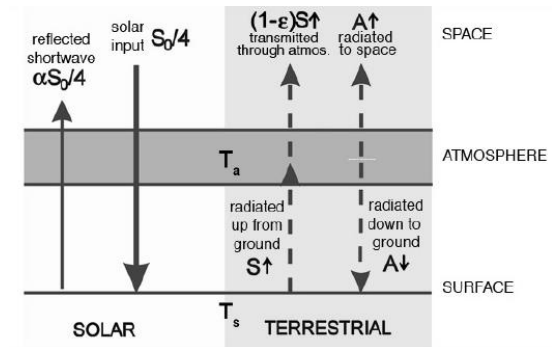
- ❑ Atmosfera transparente à radiação solar
- ❑ Atmosfera **quase** opaca à radiação térmica



# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

- ☐ Atmosfera transparente à radiação solar
- ☐ Atmosfera **quase** opaca à radiação térmica



Vamos considerar agora que a atmosfera tem uma absorvidade  $\epsilon < 1$  para a radiação infravermelha emitida pela superfície.

Na atmosfera temos

$$\frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 = A \uparrow + (1 - \epsilon) S \uparrow$$

Como  $A \uparrow = A \downarrow$

Vem

$$S \uparrow = \sigma T_s^4 = \frac{1}{2(2 - \epsilon)} (1 - \alpha_p) S_0 = \frac{2}{(2 - \epsilon)} \sigma T_e^4$$

E na superfície temos

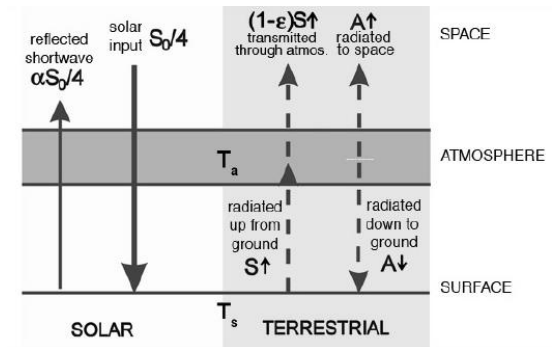
$$\frac{1}{4}(1 - \alpha_p) S_0 + A \downarrow = S \uparrow$$

$$\text{logo } T_s = \left( \frac{2}{2 - \epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} T_e$$

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

- ❑ Atmosfera transparente à radiação solar
- ❑ Atmosfera **quase** opaca à radiação térmica



$$T_s = \left( \frac{2}{2 - \epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} T_e$$

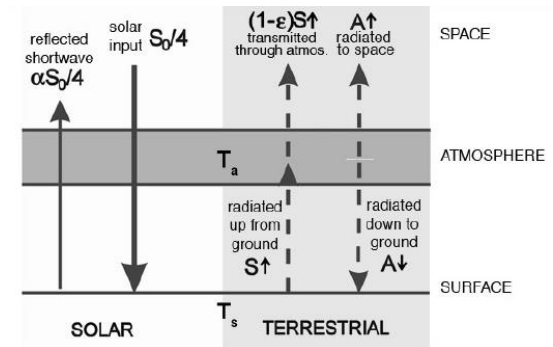
- ❑ No limite  $\epsilon \rightarrow 0$  (atmosfera transparente) temos  $T_s = T_e$
- ❑ No limite  $\epsilon \rightarrow 1$  (atmosfera opaca) recuperamos  $T_s = 2^{\frac{1}{4}} T_e$
- ❑ Genericamente temos

$$0 < \epsilon < 1, T_e < T_s < 2^{\frac{1}{4}} T_e$$

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera:

- ☐ Atmosfera transparente à radiação solar
- ☐ Atmosfera **quase** opaca à radiação térmica



Usando a lei de Kirchhoff (emissividade = absorvidade) podemos escrever

$$A \uparrow = A \downarrow = \epsilon \sigma T_a^4$$

E portanto

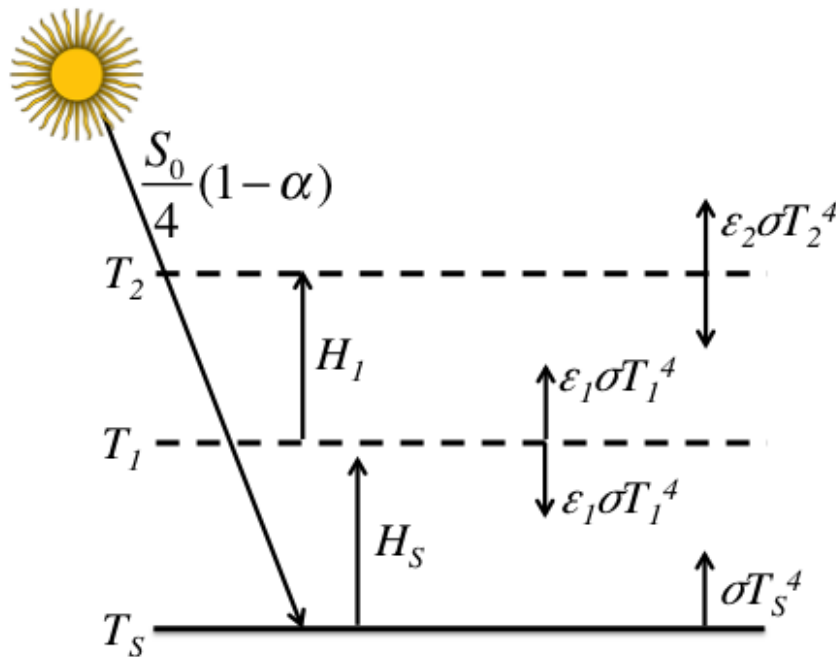
$$T_a = \left( \frac{1}{2 - \epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} T_e = \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{4}} T_s$$

Notar que a temperatura da superfície é sempre maior do que a da atmosfera!

# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo simplificado da atmosfera com duas camadas:

- ❑ A camada inferior da atmosfera absorve toda a radiação no infravermelho
- ❑ Mas a radiação emitida por essa camada não se perde para o espaço



Podemos ainda incluir transferências de calor entre camadas por convecção (H)

Superfície

$$\frac{S_0}{4}(1 - \alpha) + \epsilon_1 \sigma T_1^4 + (1 - \epsilon_1) \epsilon_2 \sigma T_2^4 = \sigma T_S^4 + H_S$$

Camada inferior

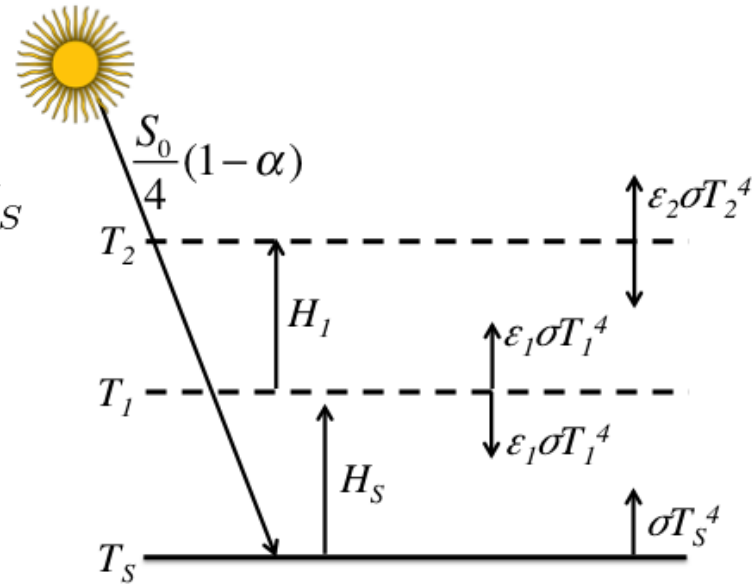
$$\epsilon_1 \sigma T_S^4 + \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma T_2^4 + H_S = 2 \epsilon_1 \sigma T_1^4 + H_L$$

Camada superior

$$(1 - \epsilon_1) \epsilon_2 \sigma T_S^4 + \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma T_1^4 + H_L = 2 \epsilon_2 \sigma T_2^4$$

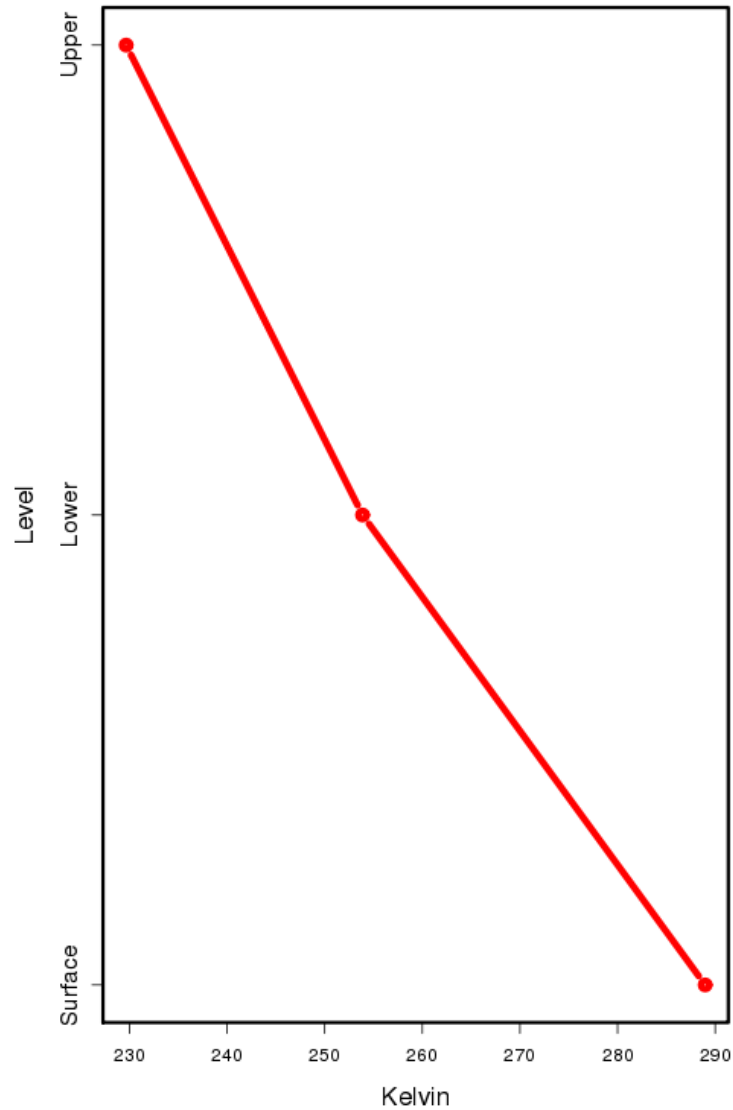
Cuja solução é a solução do sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} -1 & \epsilon_1 & (1 - \epsilon_1) \epsilon_2 \\ \epsilon_1 & -2 \epsilon_1 & \epsilon_1 \epsilon_2 \\ (1 - \epsilon_1) \epsilon_2 & \epsilon_1 \epsilon_2 & -2 \epsilon_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_S^4 \\ T_1^4 \\ T_2^4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma} \begin{bmatrix} H_S - \frac{S_0}{4}(1 - \alpha) \\ H_L - H_S \\ -H_L \end{bmatrix} .$$



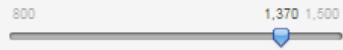


### Temperature Profile



#### Adjust Layer Properties

Solar Constant (W/m<sup>2</sup>)



Temperature Units:

- Kelvin
- Celsius
- Fahrenheit

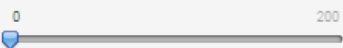
#### Upper Atmosphere

Emissivity of Upper Atmosphere



#### Lower Atmosphere

Convective Heat Flux from Lower to Upper Atmosphere

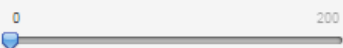


Emissivity of Lower Atmosphere

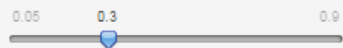


#### Surface

Convective Heat Flux from Surface to Lower Atmosphere

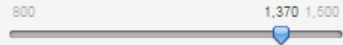


Planetary Albedo



Adjust Layer Properties

Solar Constant (W/m<sup>2</sup>)



Temperature Units:

- Kelvin
- Celsius
- Fahrenheit

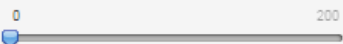
Upper Atmosphere

Emissivity of Upper Atmosphere

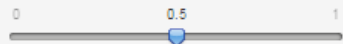


Lower Atmosphere

Convective Heat Flux from Lower to Upper Atmosphere



Emissivity of Lower Atmosphere

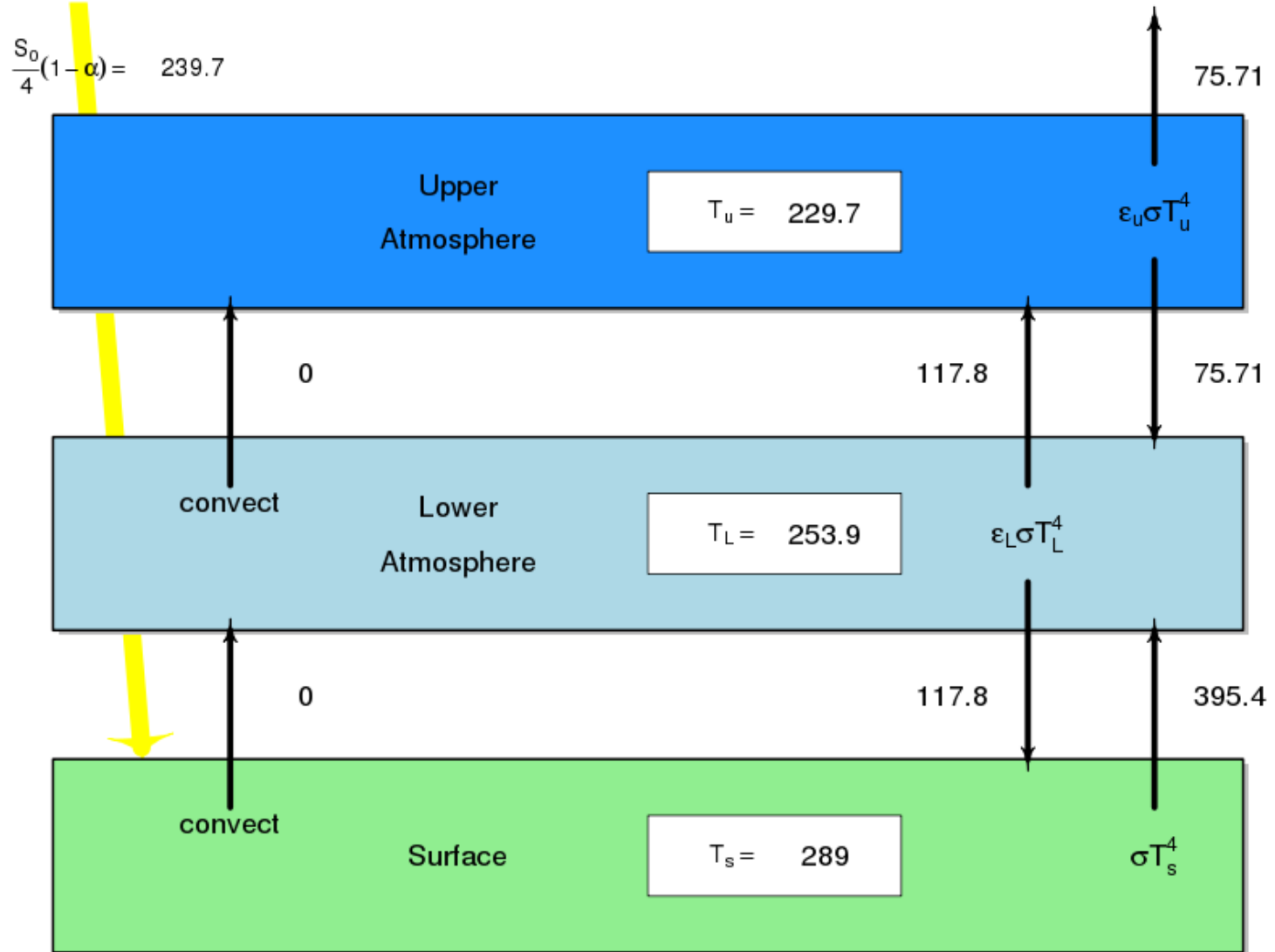
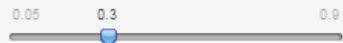


Surface

Convective Heat Flux from Surface to Lower Atmosphere

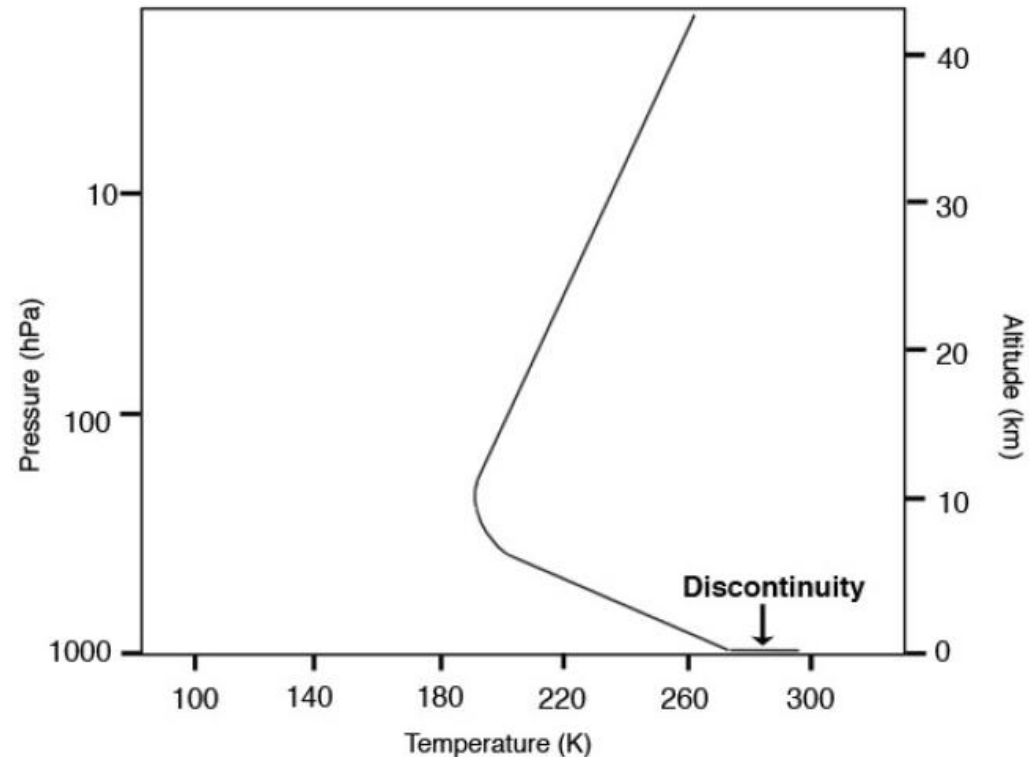
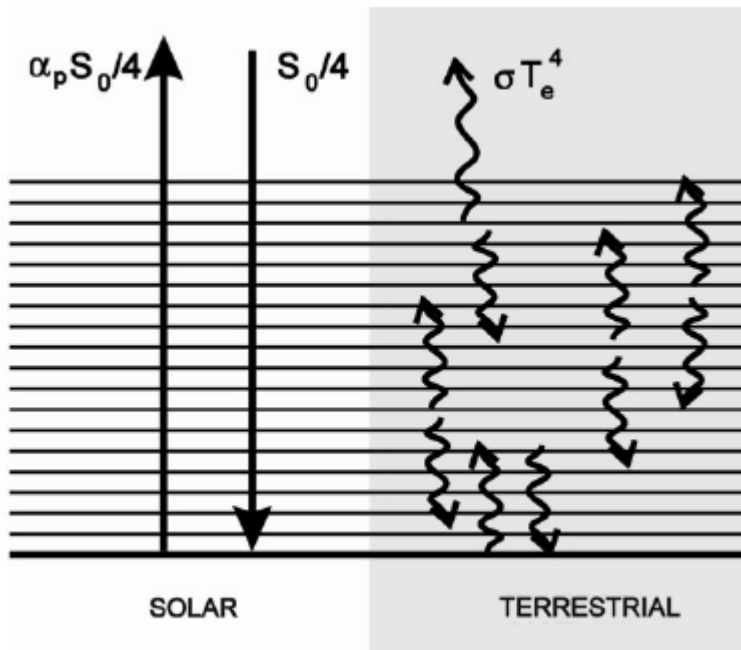


Planetary Albedo



# Equilíbrio radiativo na atmosfera

Modelo com  $n$  camadas na atmosfera, mas sem transferência de calor por convecção. Descontinuidade (não real) da temperatura na superfície devido à radiação solar incidente.



# Equilíbrio radiativo na atmosfera

