



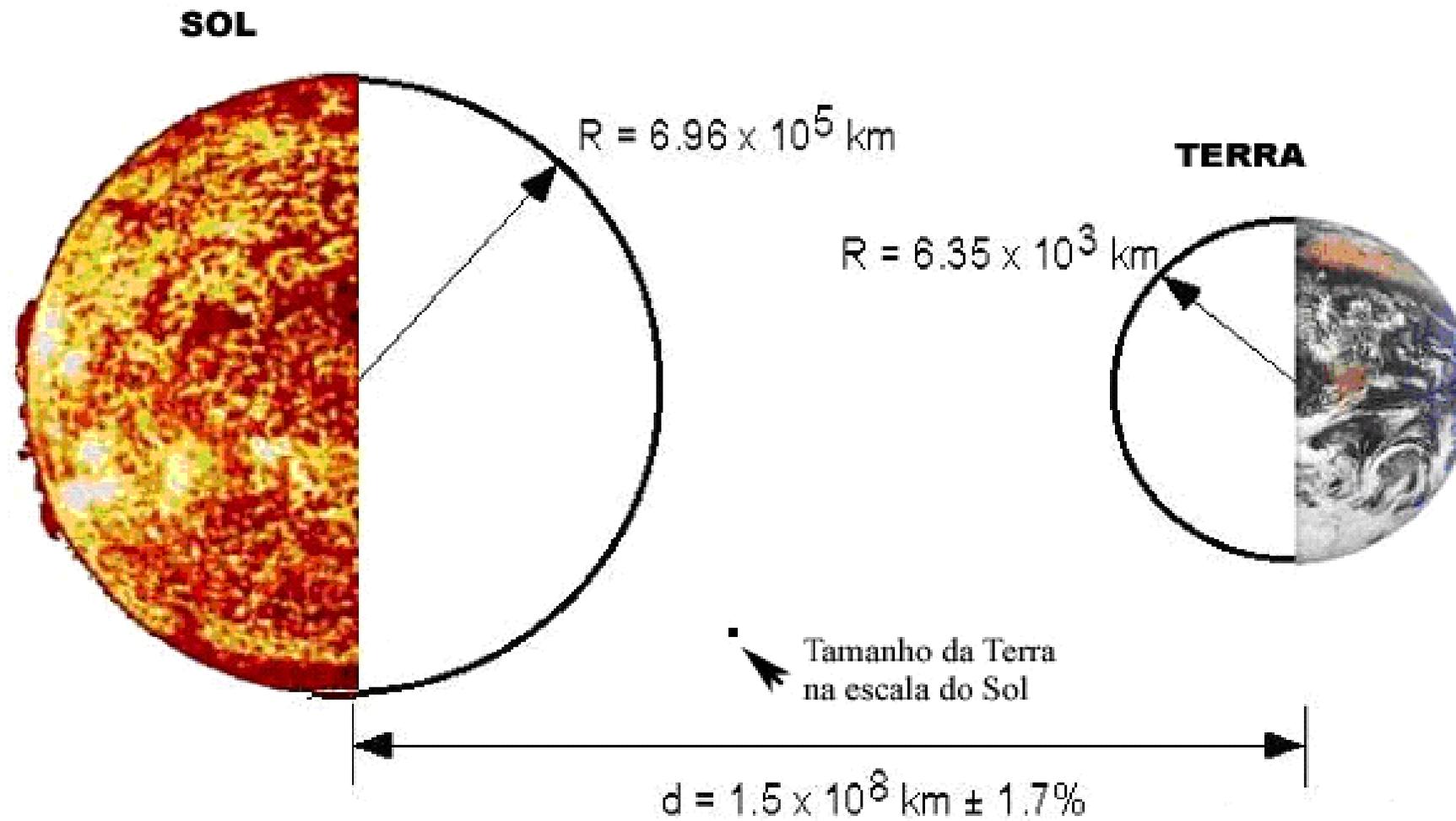
LABORATÓRIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS - INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IEE0004 - APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Aula 04 – O Recurso Solar

Pedro Torres
pftorres@iee.usp.br

O Sol



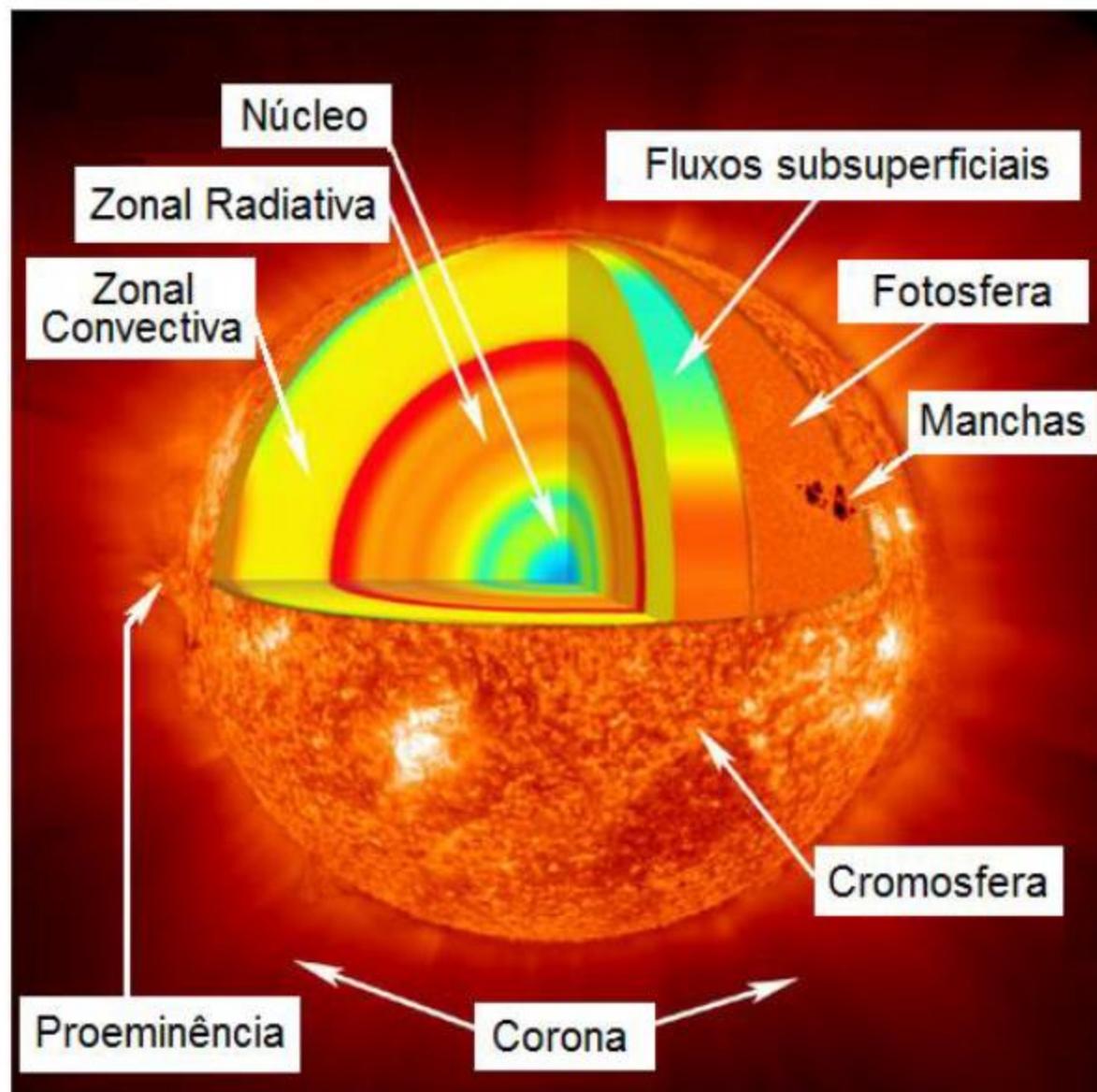


Figura 2.1 - Estrutura do Sol. Fonte: (<http://theuniversalmatrix.com/pt-br/artigos/wp-content/uploads/2011/12/Sol-Estrutura-Interna.png>)

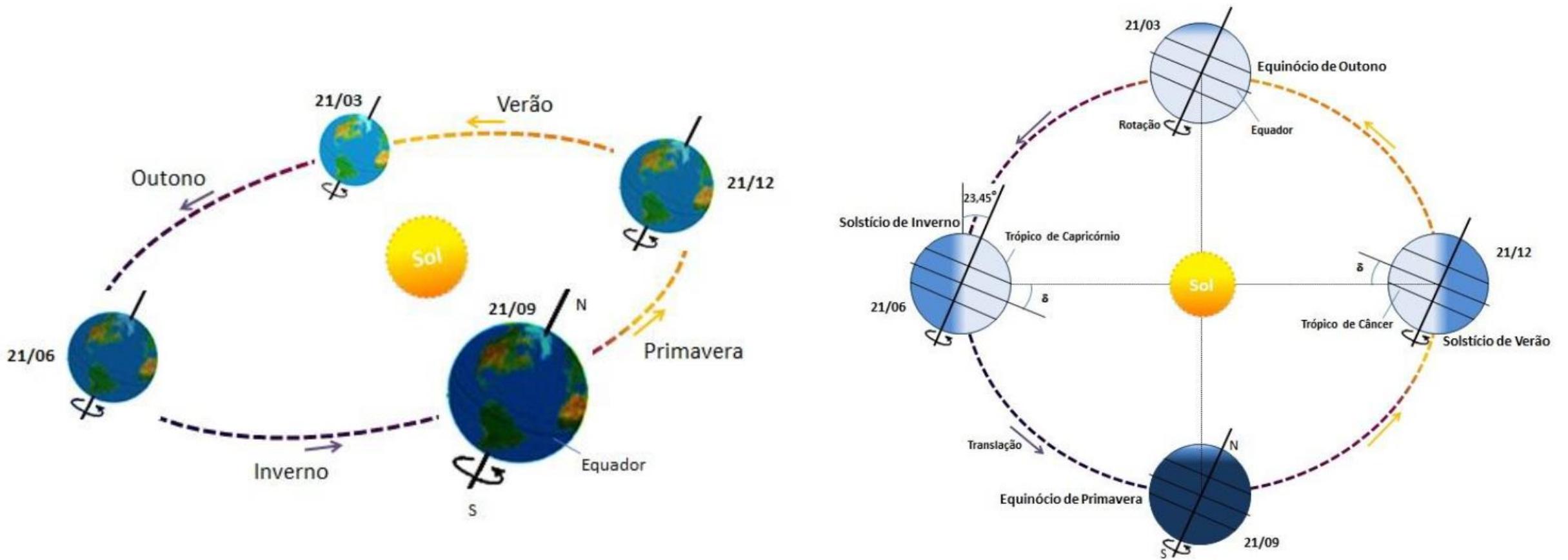
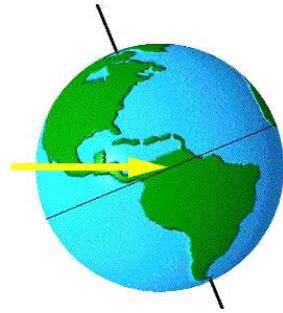
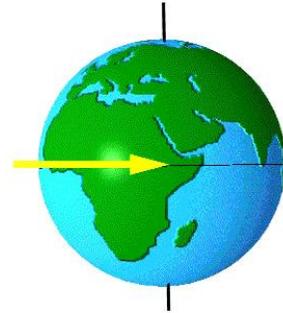


Figura 2.2 (a) e (b) – Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.

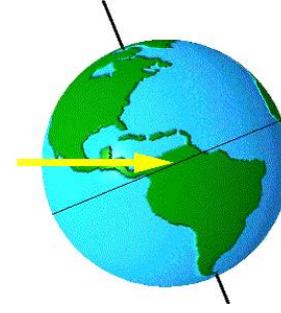
Declinação/ Estações do Ano



Verão*

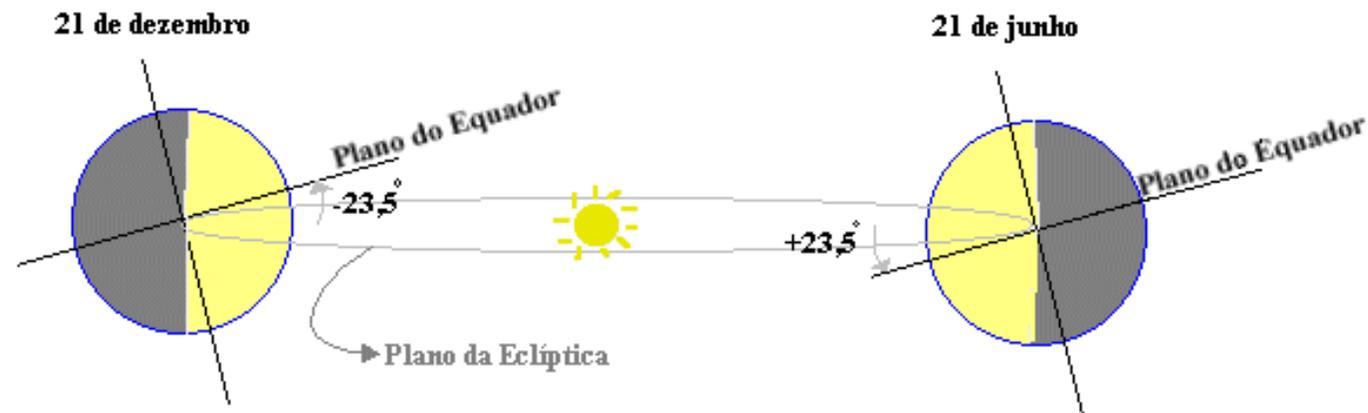


Primavera/Outono*



Inverno*

* Para o hemisfério Sul.

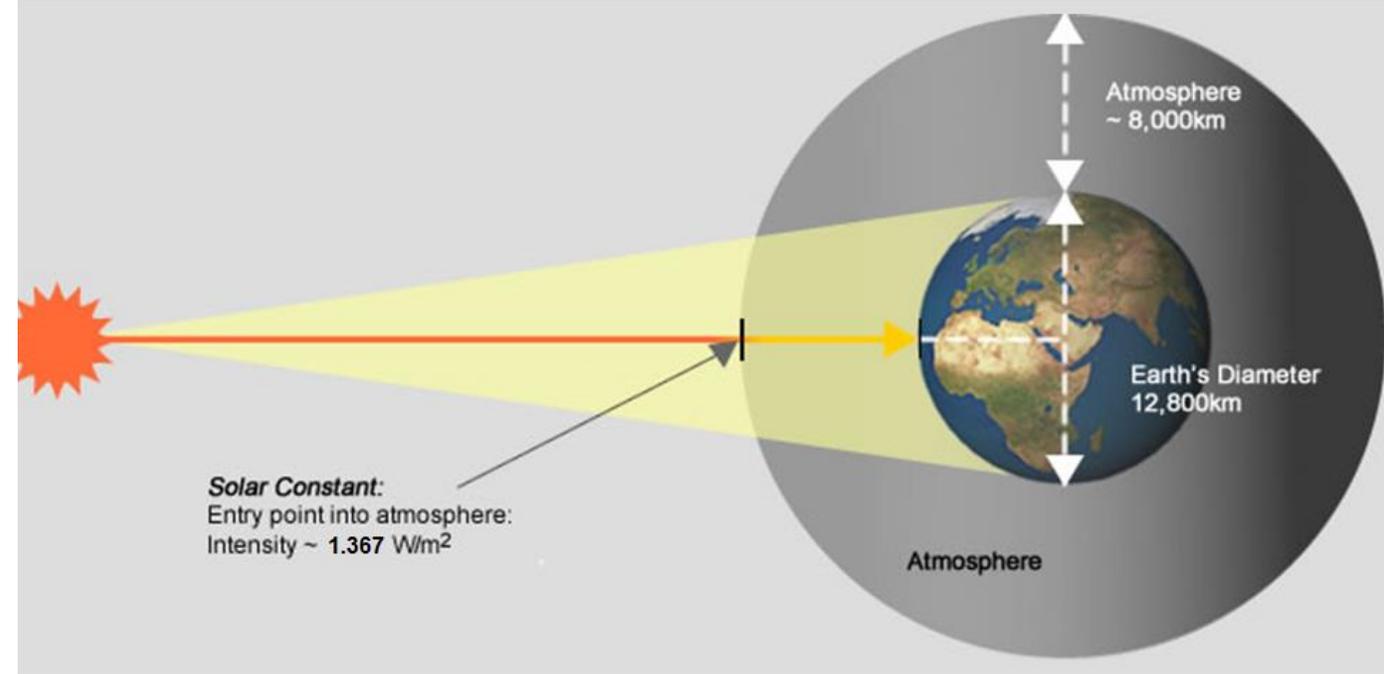
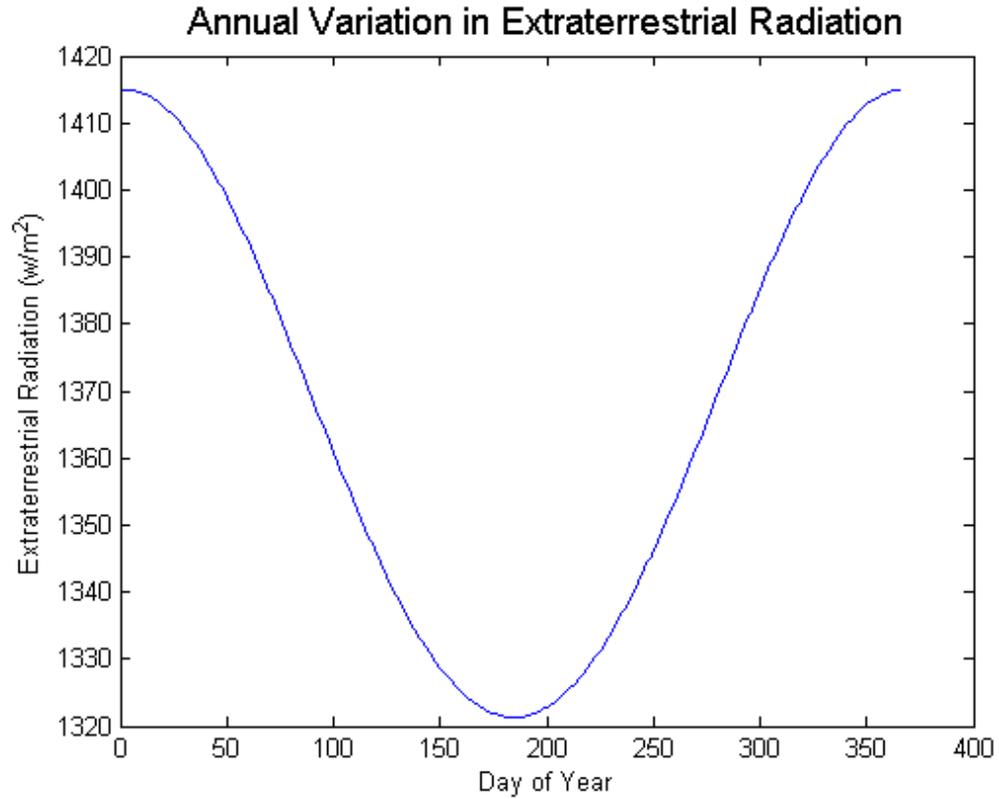


$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \text{sen} \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right]$$

$$d_n = 1, 2, \dots, 365$$

Constante Solar

Constante Solar (fluxo médio de radiação): 1367 W/m^2



Irradiância Extraterrestre Efetiva

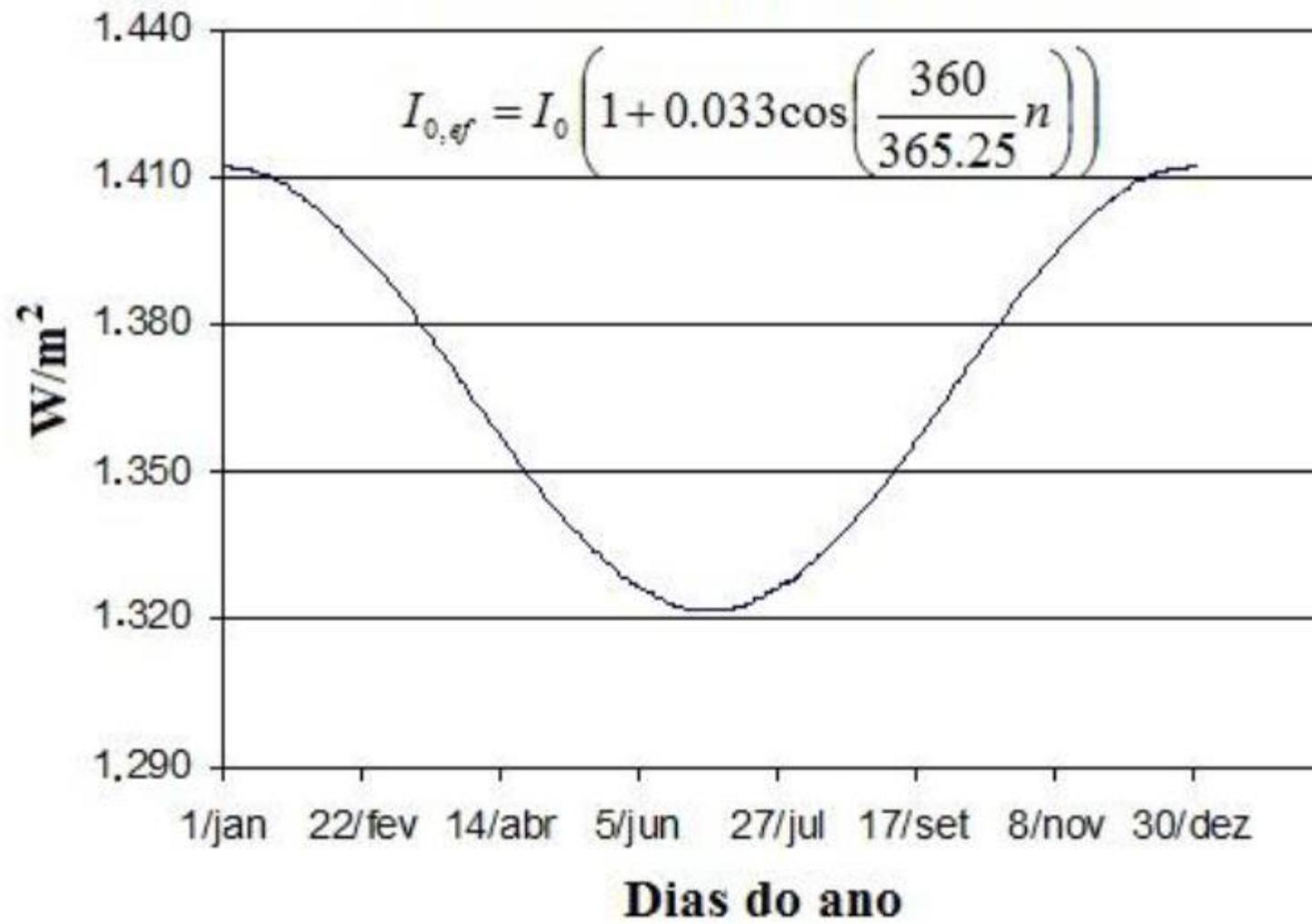
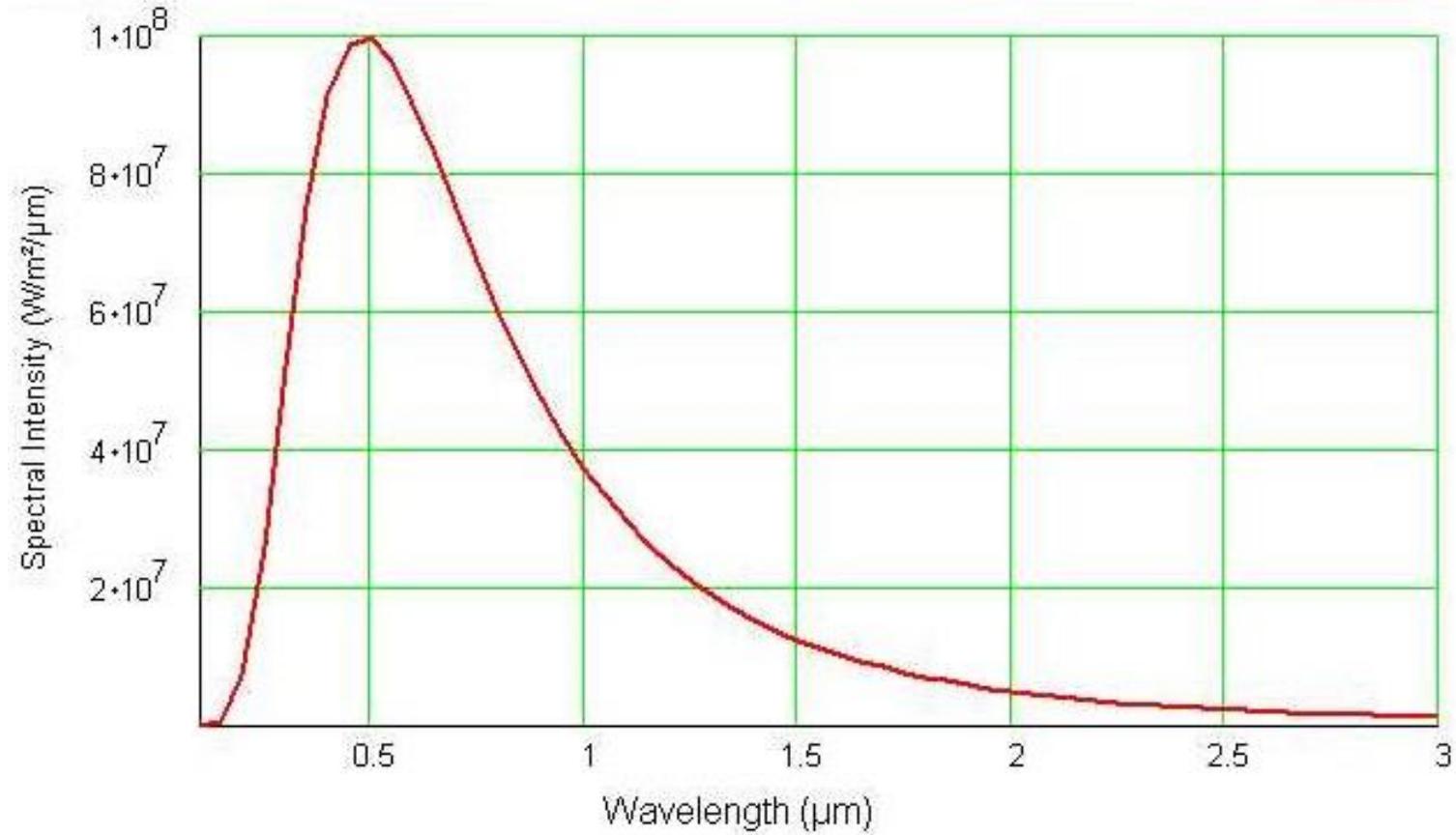
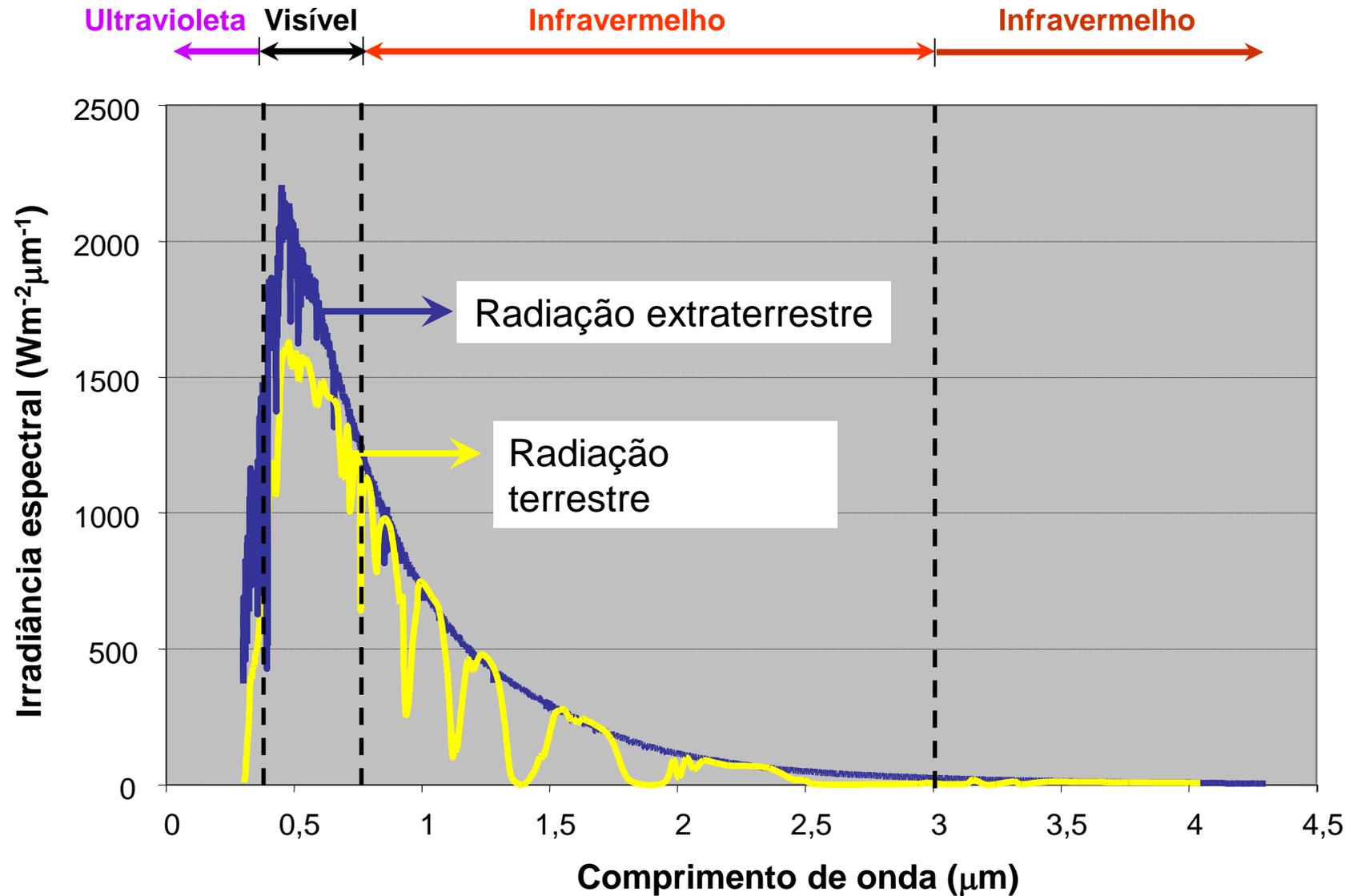


Figura 2.3 – Variação da irradiância solar extraterrestre ($I_{0,ef}$) ao longo do ano.

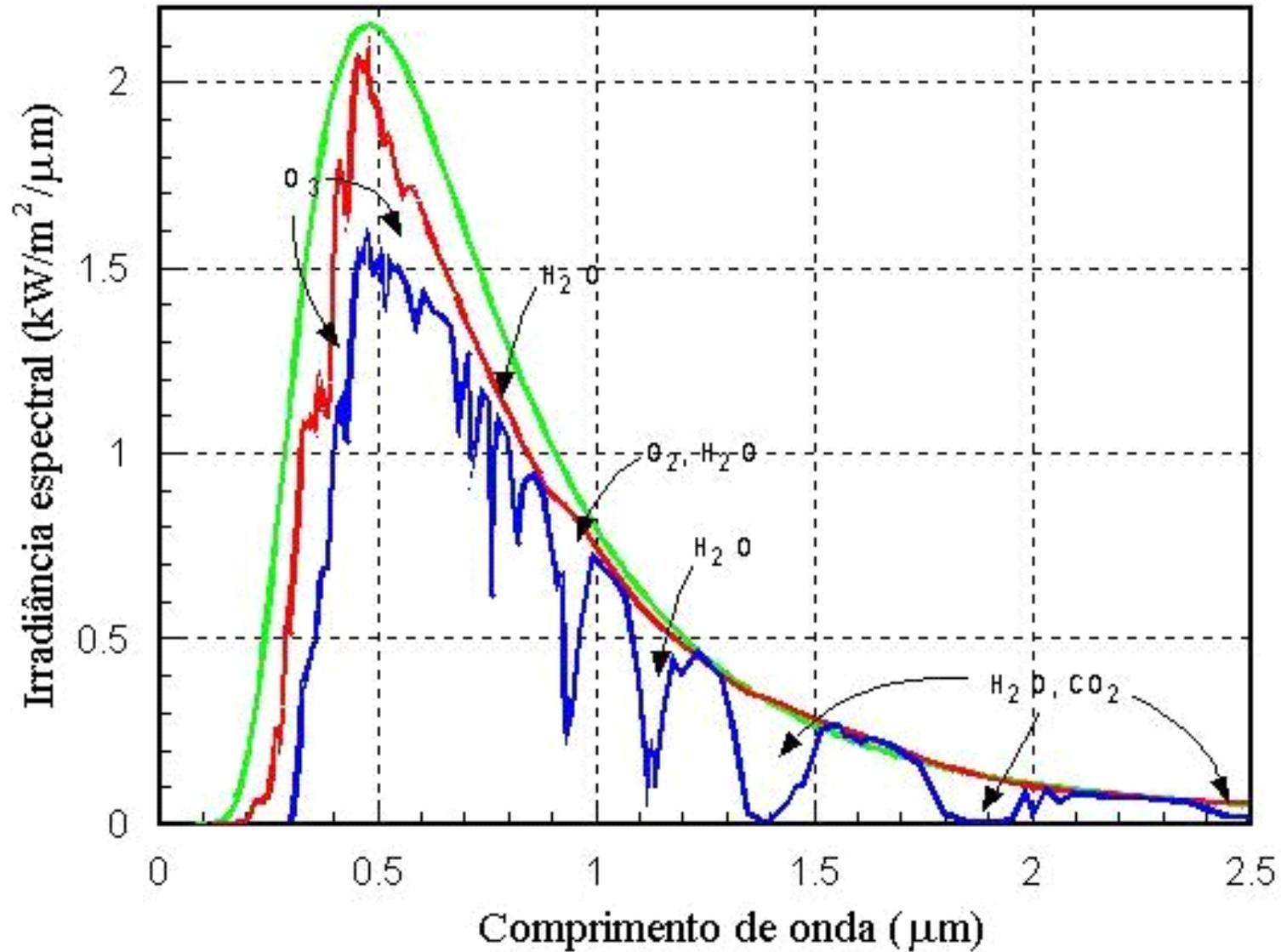
Radiação de Corpo Negro



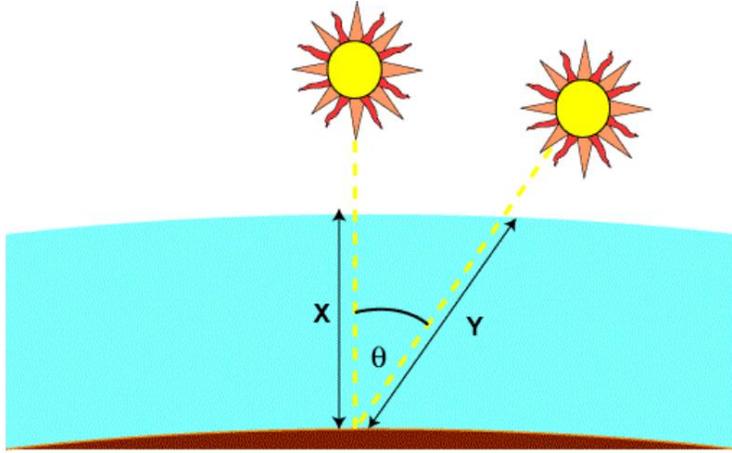
Distribuição espectral da radiação solar



Irradiância Espectral da Radiação Solar

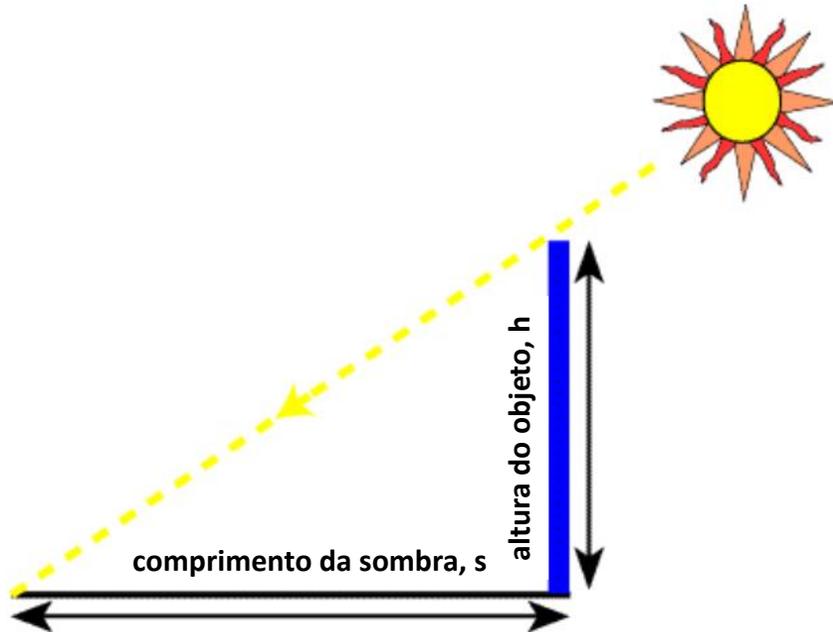


Massa de Ar:



$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Maneira simples de calcular a Massa de Ar:



$$AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0.50572(96.07995 - \theta)^{-1.6364}}$$

Massa de Ar é a hipotenusa dividida para altura do objeto, h, e pelo Teorema de Pythagoras temos:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$

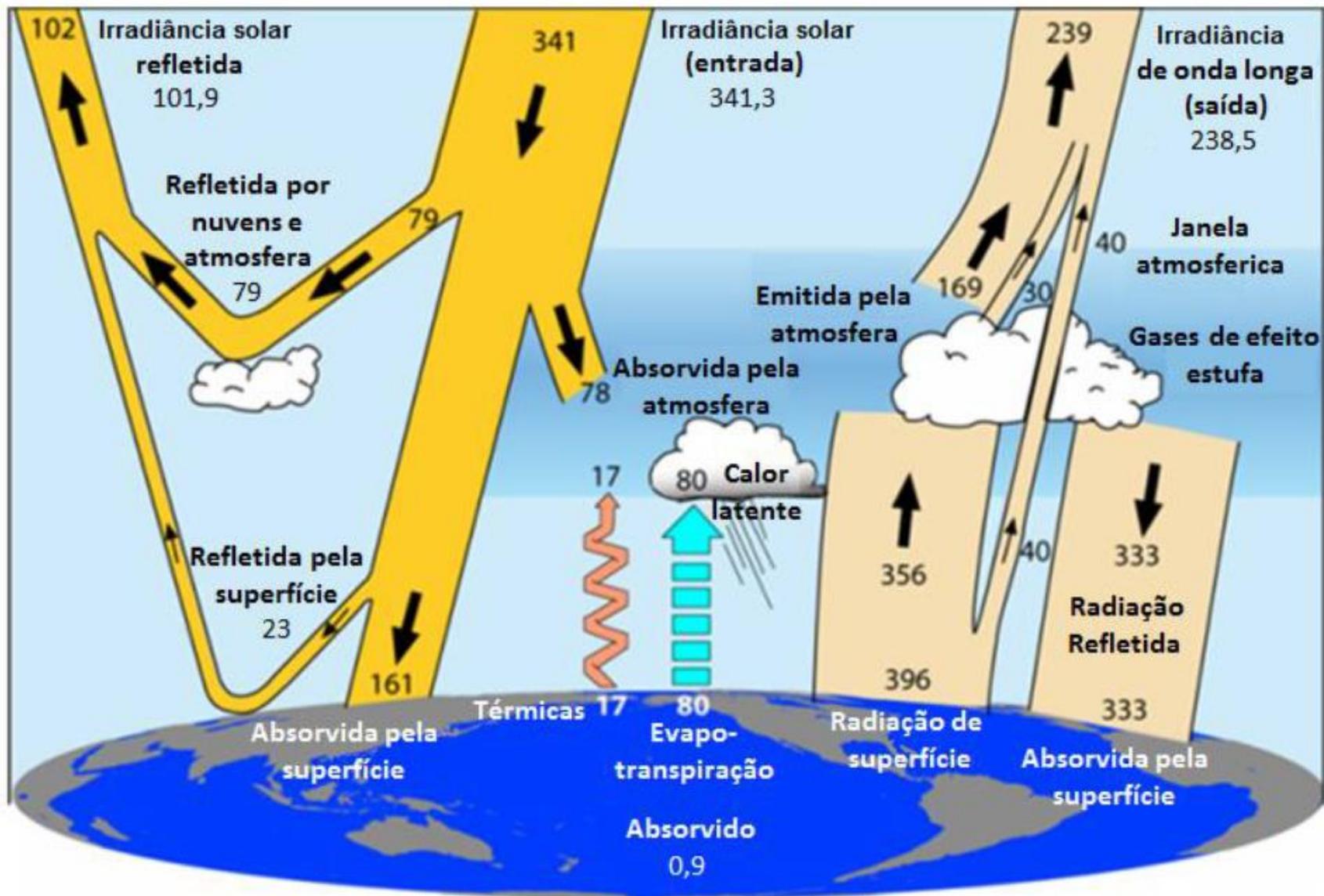
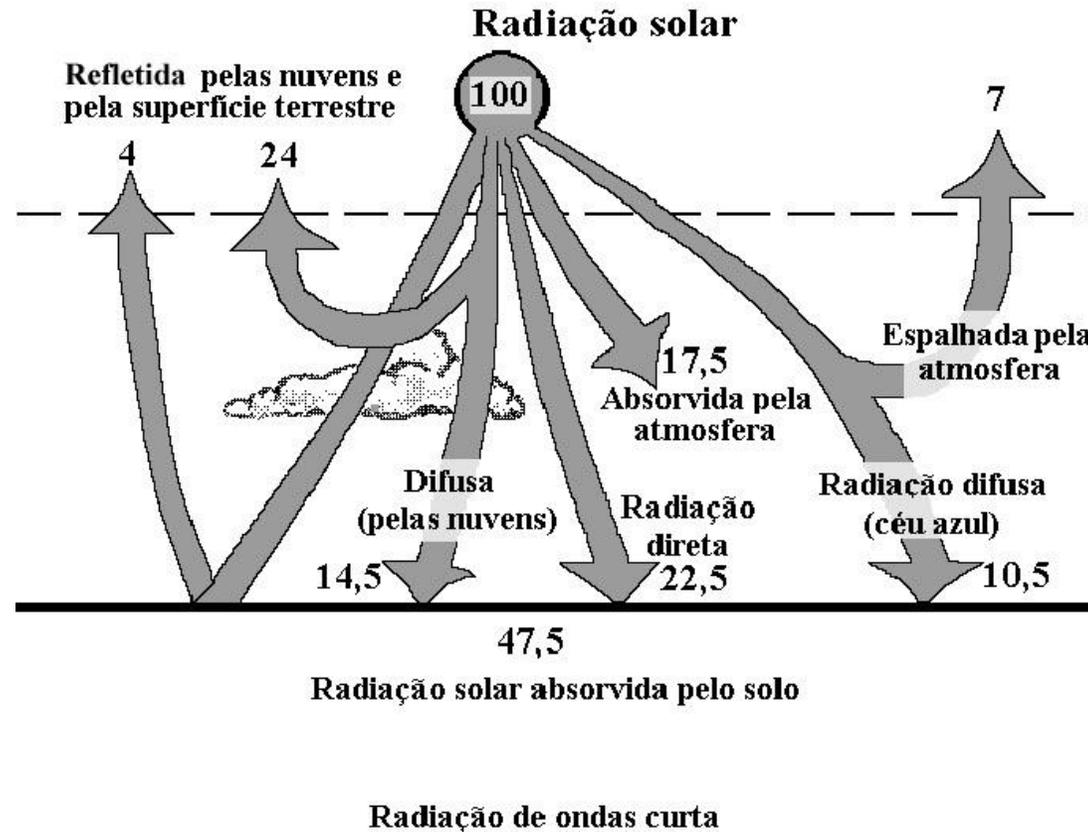
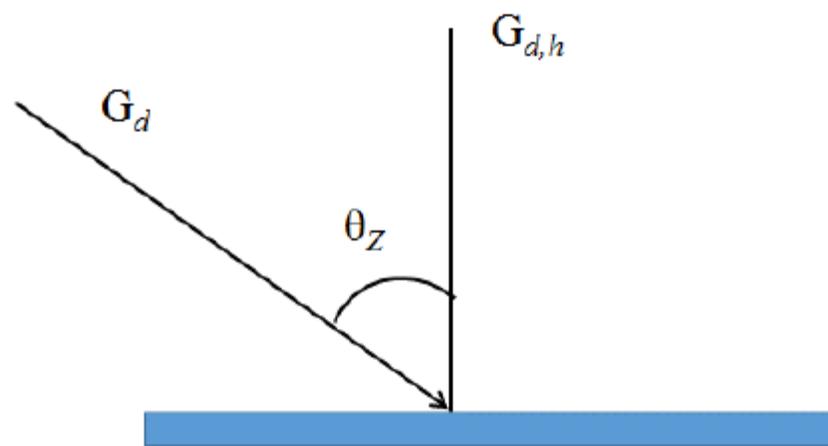


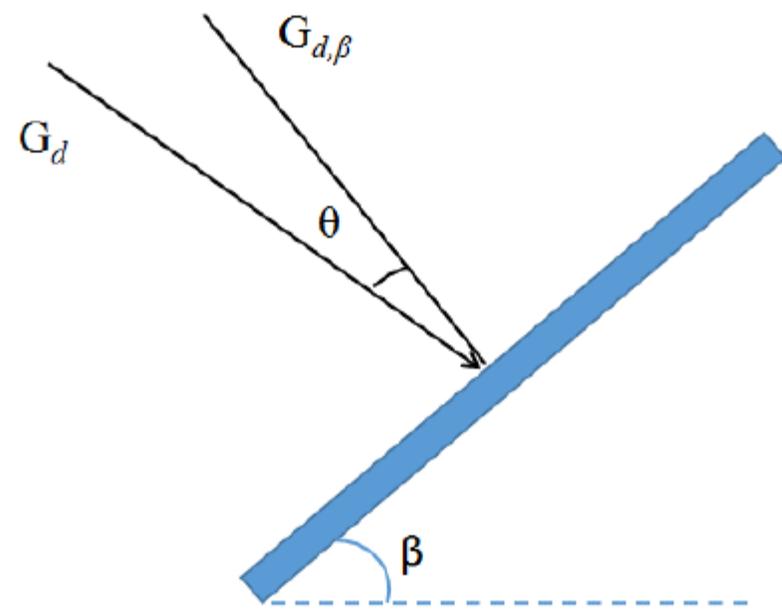
Figura 2.7 - Fluxo de potência global (em W/m^2). O valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera aqui apresentado é um fluxo médio anual recebido ao longo das 24 horas de um dia ($341,3 \text{ W/m}^2$) no topo da atmosfera. Fonte: (Trenberth *et al.*, 2009).

Distribuição da Radiação Solar na Atmosfera



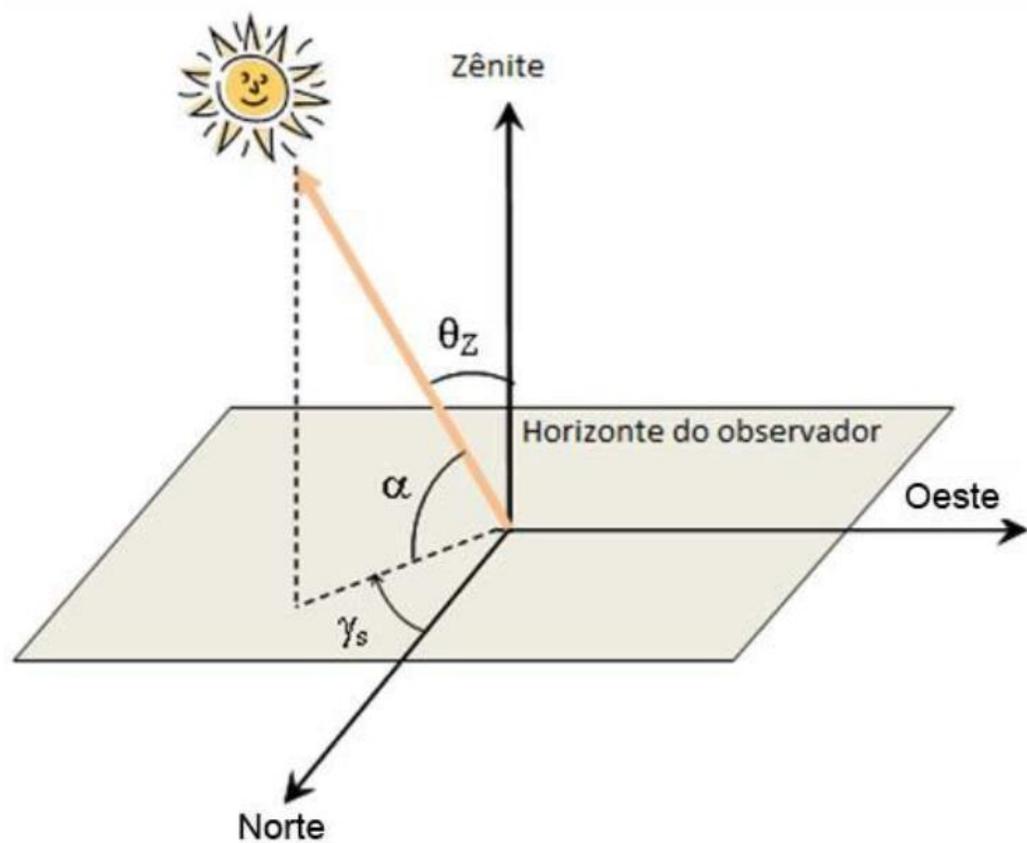


(a)

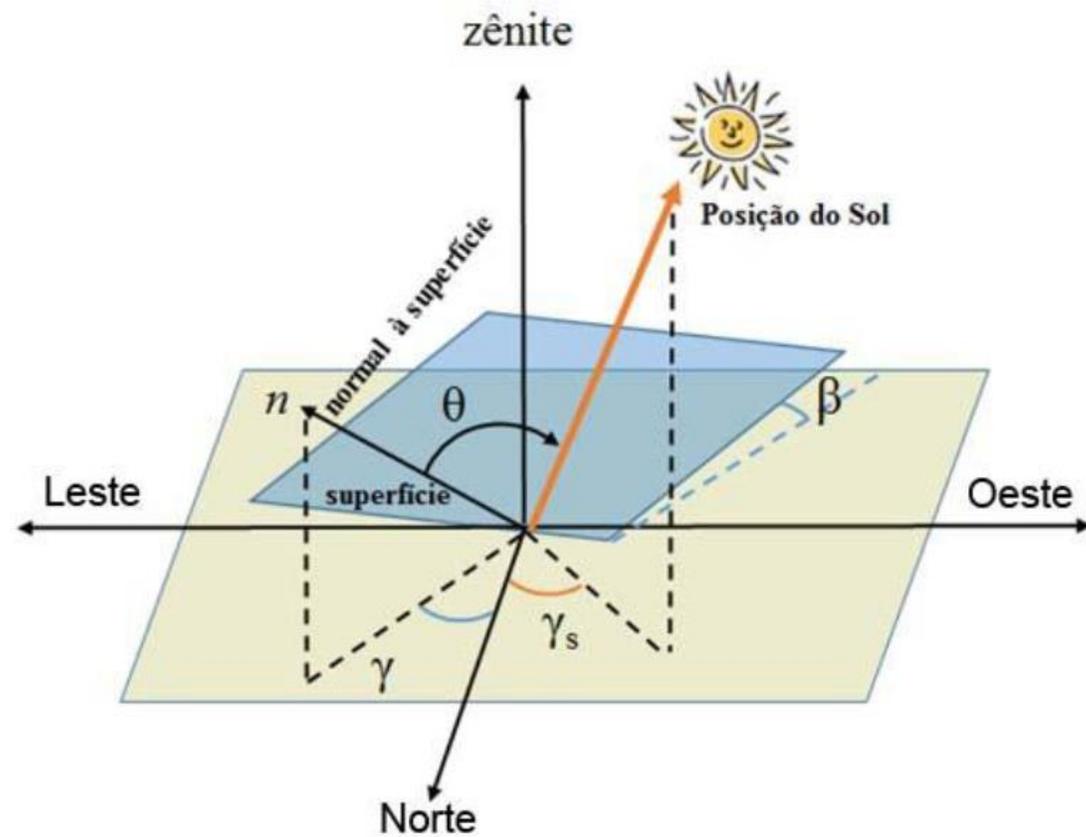


(b)

Figura 2.5 – (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada.



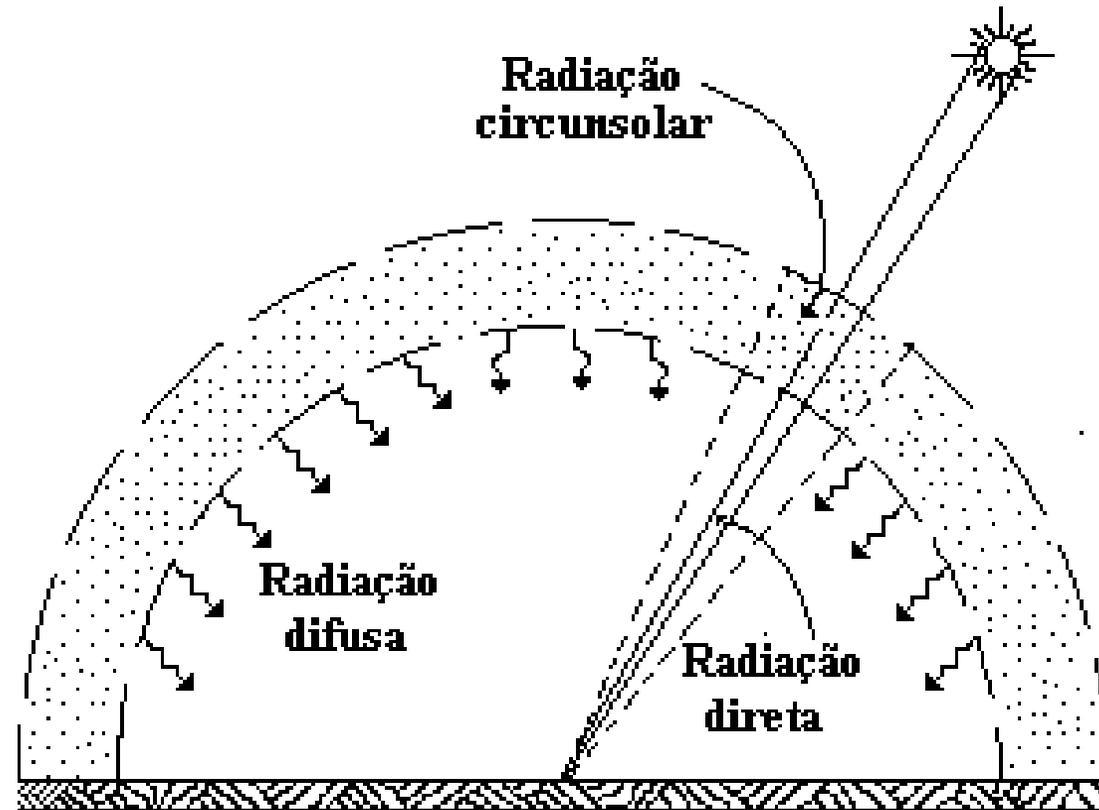
(a)



(b)

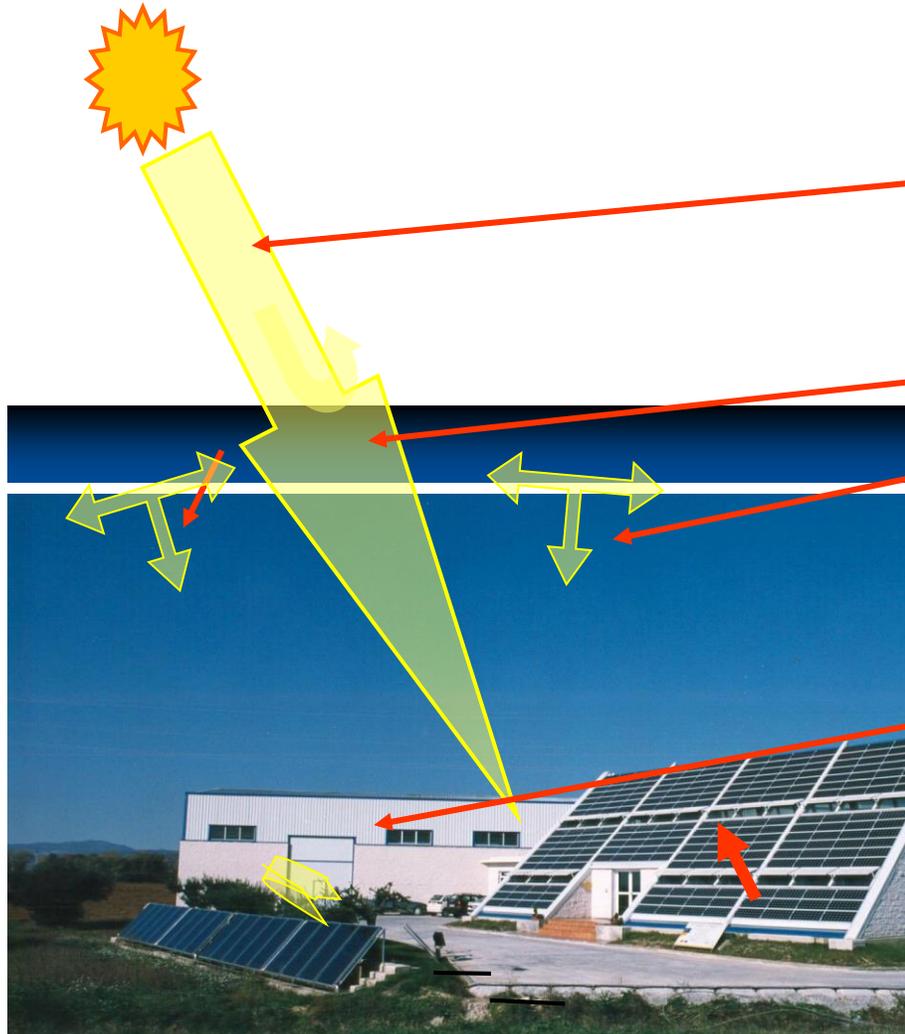
Figura 2.4 – (a) Ilustração dos ângulos θ_Z , α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano: ângulos β , γ , γ_s e θ .

Componentes da Radiação Solar



Componentes da Radiação Solar: Direta, Difusa, Refletida

- **Irradiância:** Potência por unidade de superfície (kW/m^2)
- **Irradiação:** Energia por unidade de superfície (kWh/m^2)

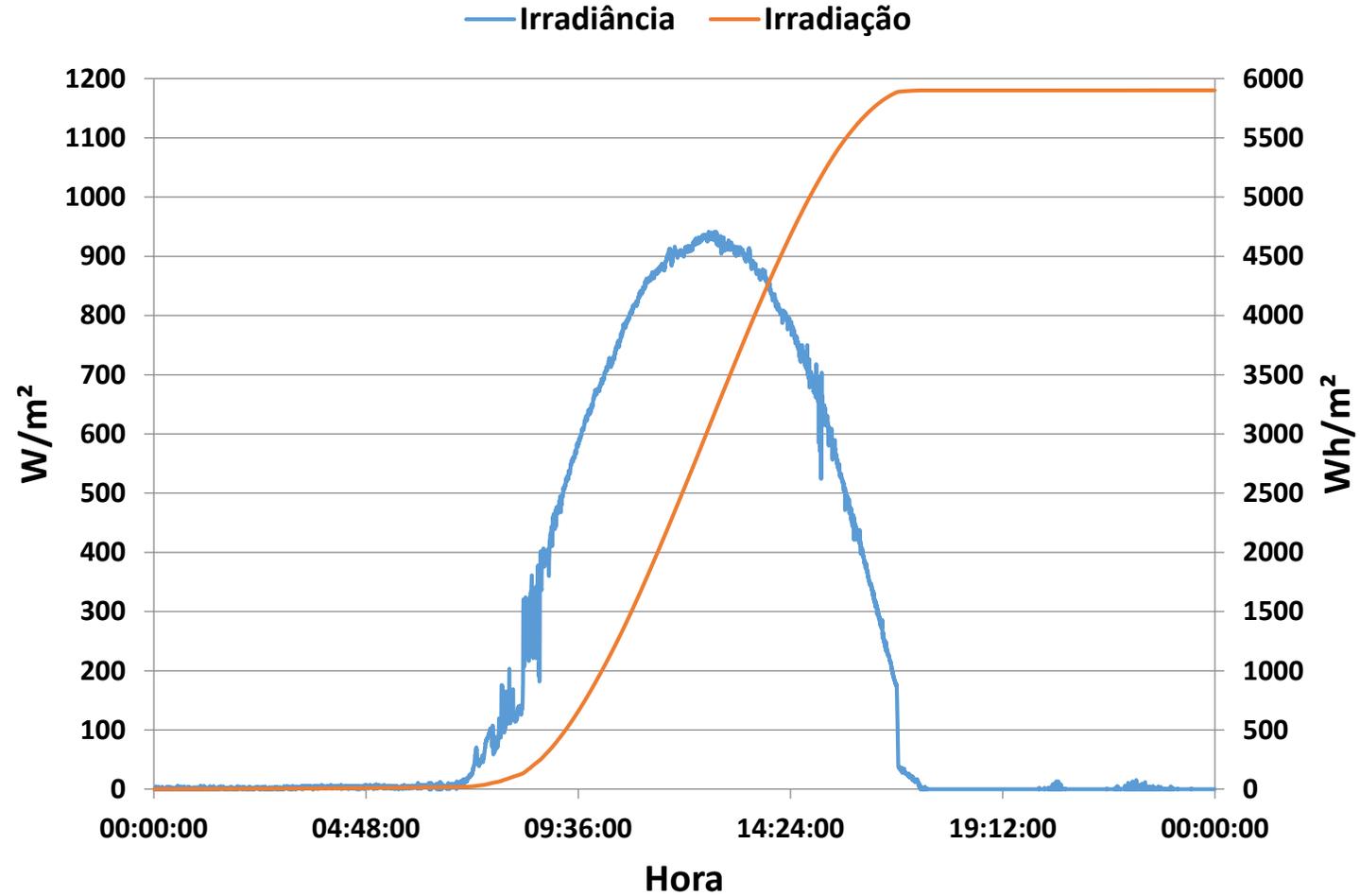


- **Extra-atmosférica:** Fora da atmosfera
- **Direta:** Procede do sol e depende de sua posição
- **Difusa:** Procede da atmosfera e é consequência dos processos de reflexão, difração, dispersão e absorção
- **Refletida:** Procede da reflexão da radiação incidente sobre o entorno
- **Global = Direta + Difusa + Refletida:** Radiação total incidente sobre uma superfície

Tabela 2.3 - Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies. Fonte: (MARKVART e CASTAÑER, 2004).

Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Grama seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar:	
$\alpha > 45^\circ$	0,05
$\alpha = 30^\circ$	0,08
$\alpha = 20^\circ$	0,12
$\alpha = 10^\circ$	0,22

Irradiância vs Irradiação



Perfis diários de irradiância

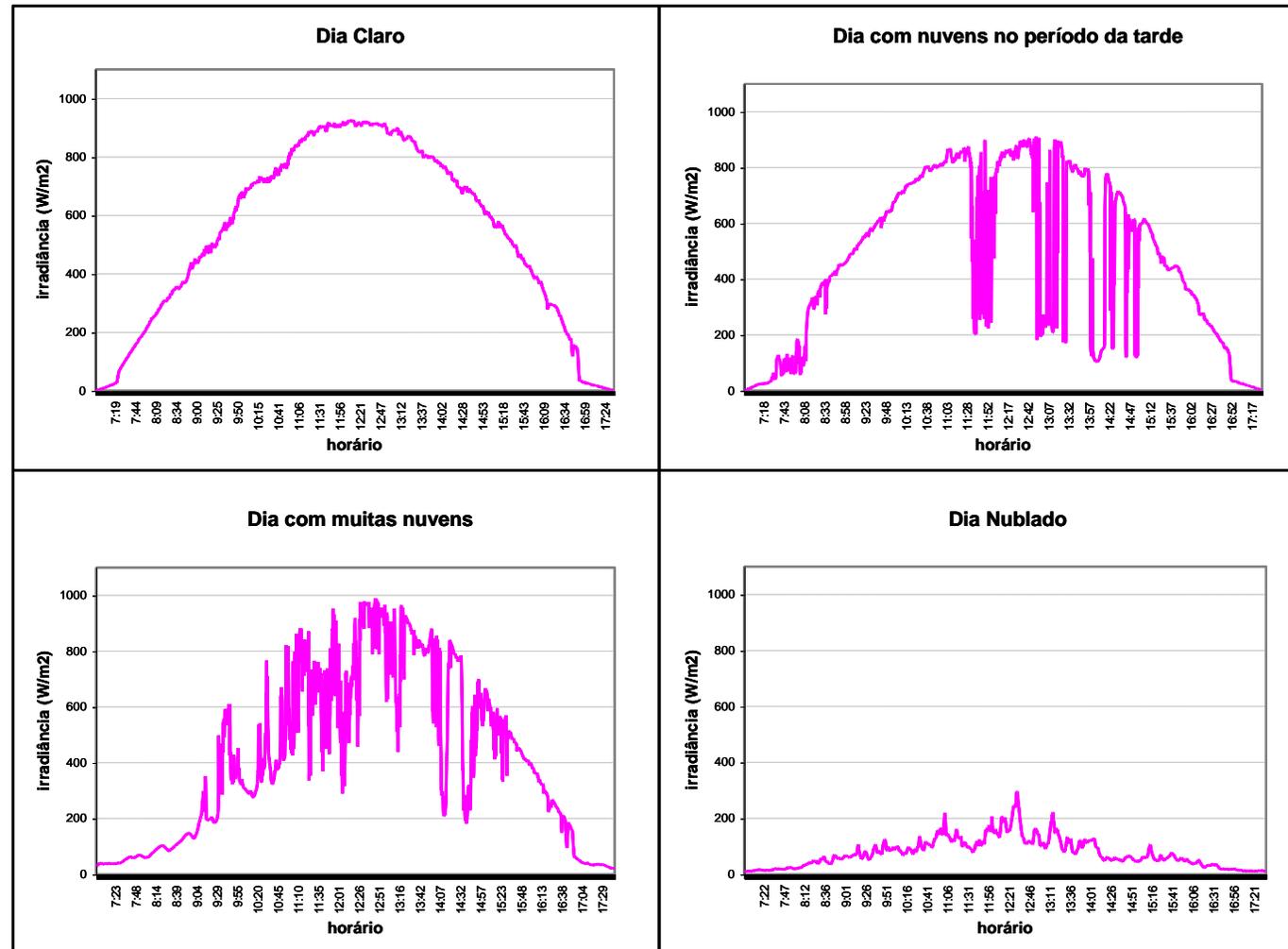


Diagrama de trajetórias do sol (I)

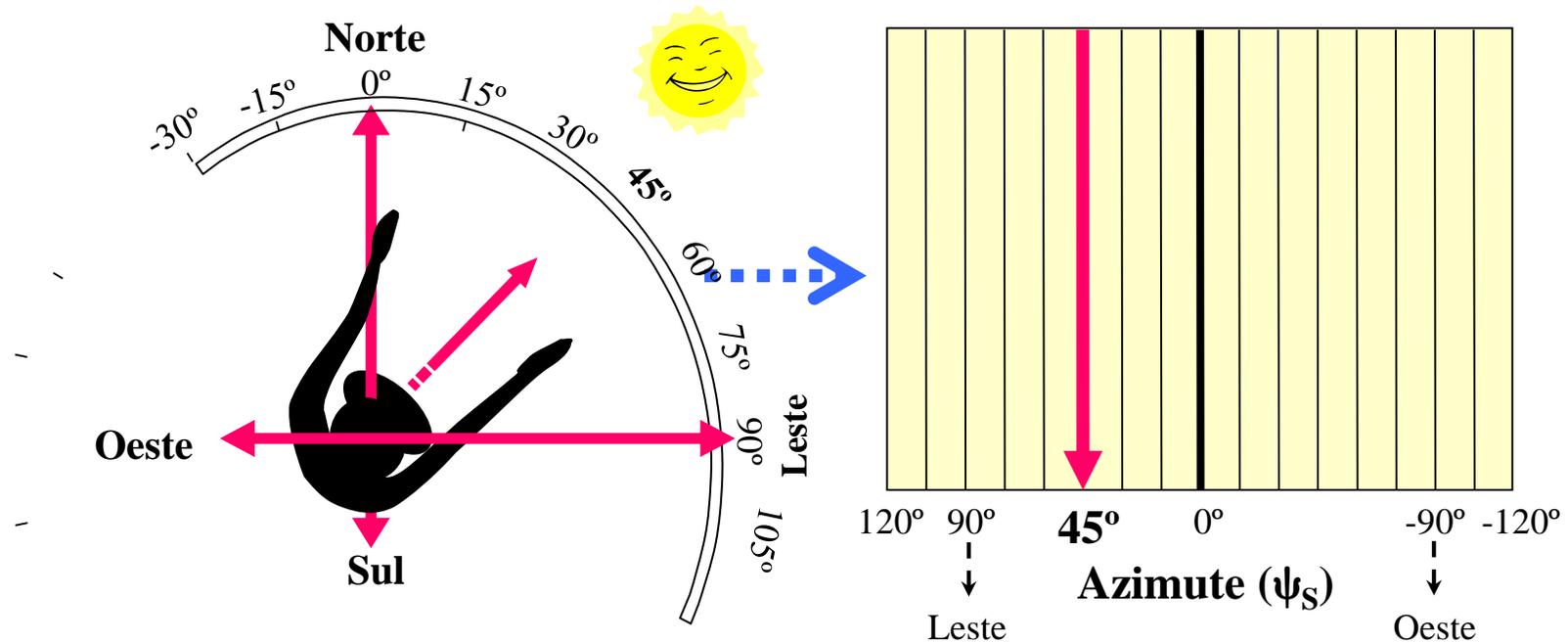
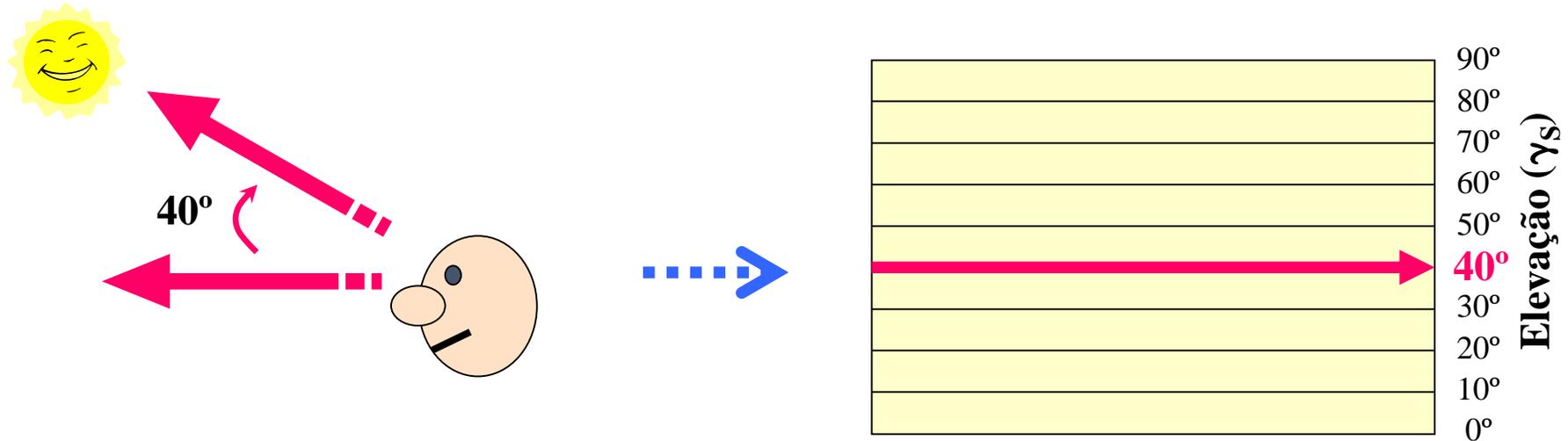


Diagrama de trajetórias do sol (II)

Exemplo: Equinócios

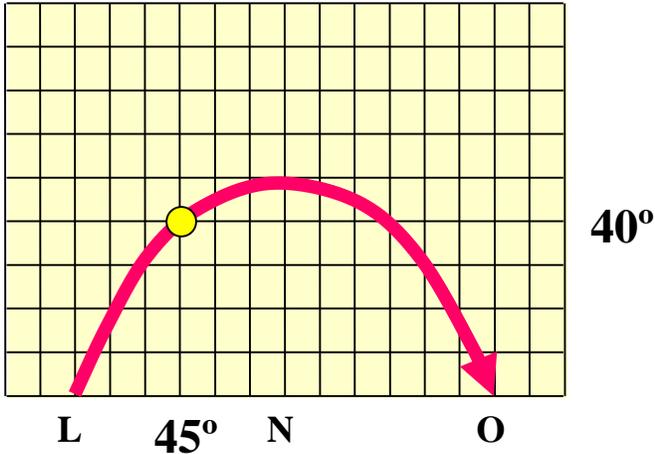
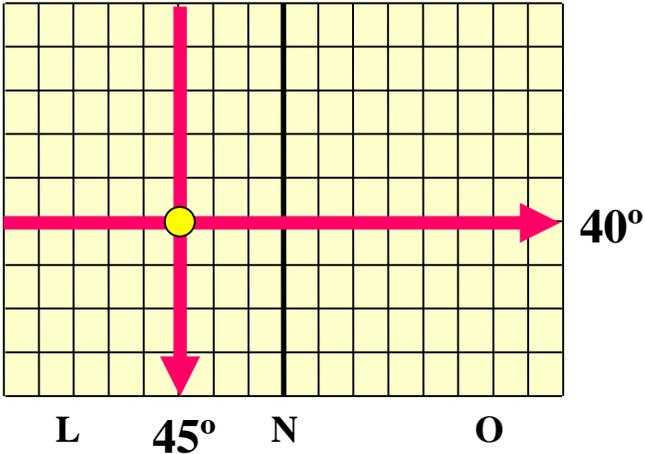
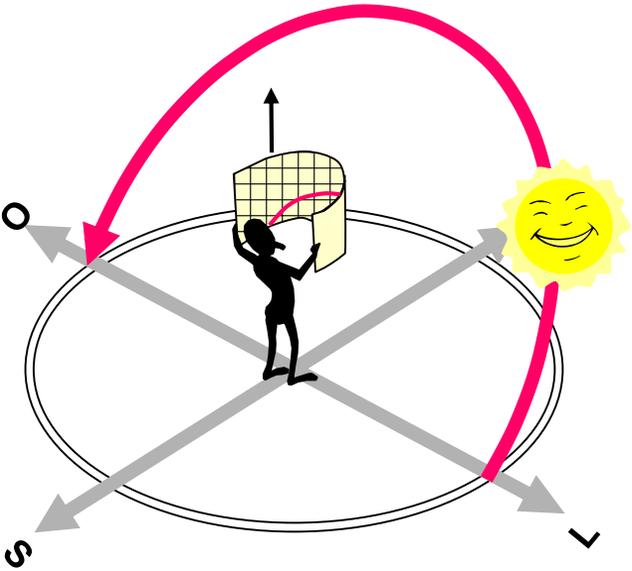
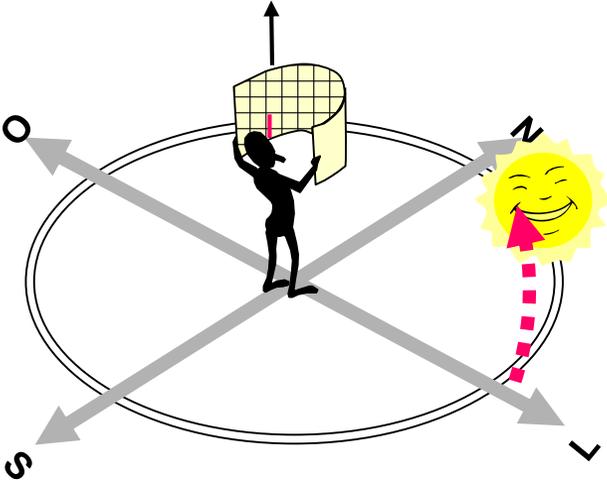
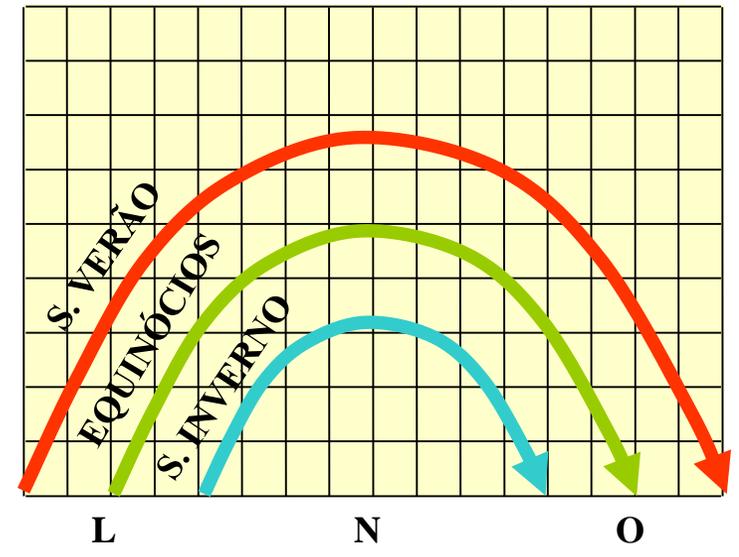
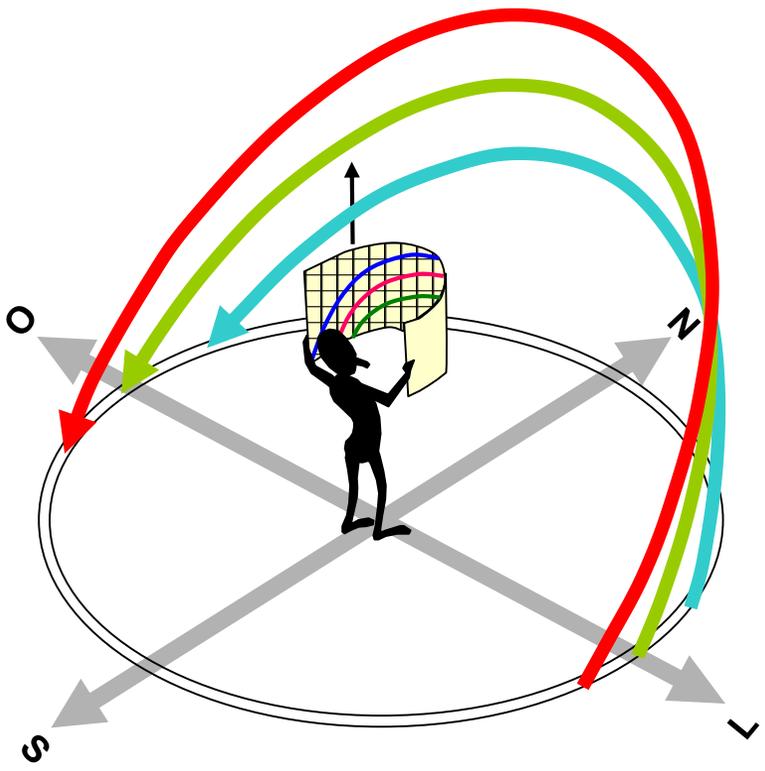


Diagrama de trajetórias do sol (III)

- ➔ Solstício de verão (Dezembro)
- ➔ Equinócios de Primavera e Outono (Setembro/Março)
- ➔ Solstício de inverno (Junho)



Estimação das componentes da radiação solar

- 📄 Cálculo da irradiação extra-atmosférica
- 📄 Dados de valores globais sobre superfície horizontal
- 📄 Cálculo das componentes sobre superfície horizontal
- 📄 Cálculo da irradiação sobre uma superfície arbitrariamente orientada

•Nomenclatura

- Extra-atmosférica (B_0)
- Direta (B)
- Difusa (D)
- Refletida (R)
- Global (G)

•Subíndices

- — irradiância
- h irradiação horária
- d irradiação diária
- m irradiação média

•Exemplos:

- $G(0)$ irradiância global sobre superfície horizontal
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$ irradiação global diária média sobre S
- $B(90)$ irradiância direta sobre uma superfície vertical orientada ao equador

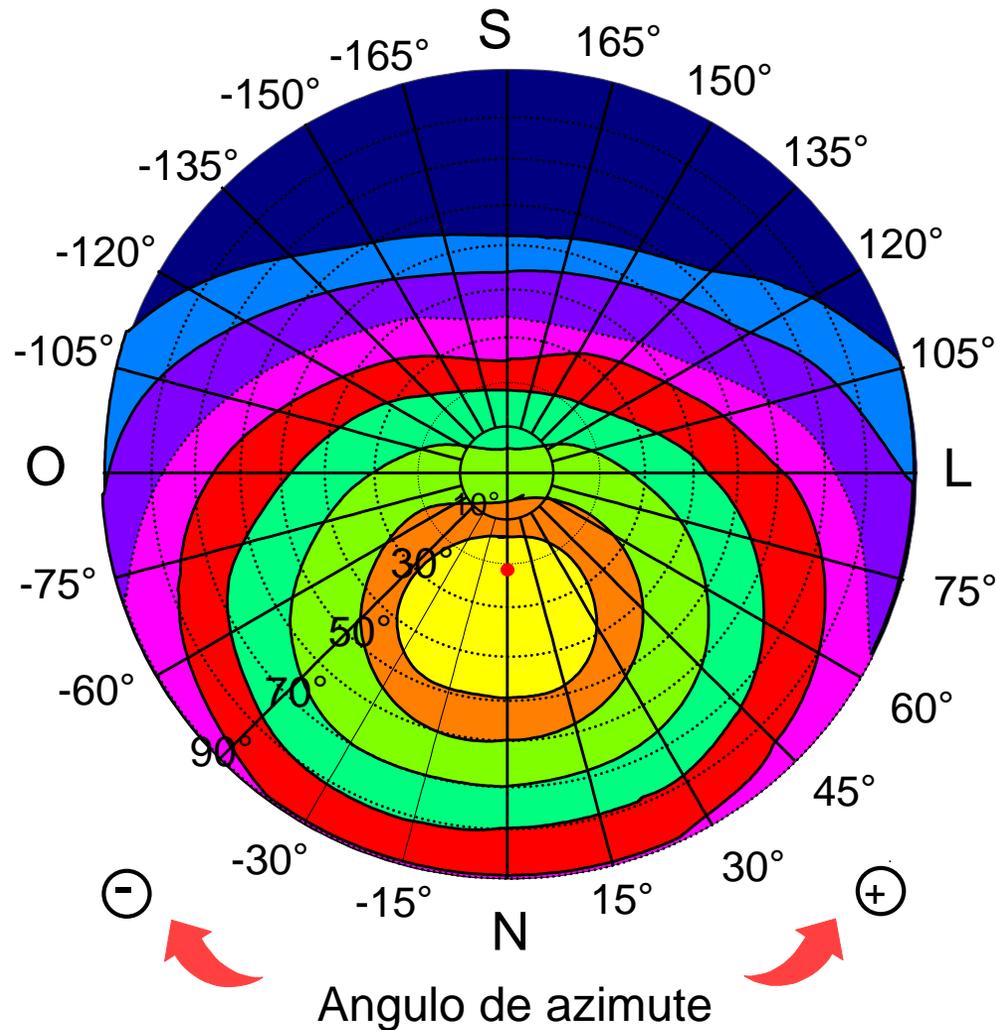
Cálculos de irradiação - Exemplo: São Paulo

• Mês	d_n	δ (°)	B_{Od} (0) (Wh/m ²)	G_{dm} (0) (Wh/m ²)	G_{dm} (23°) (Wh/m ²)	G_{dm} (33°) (Wh/m ²)
• JAN	17	-20.90	11765	4500	4143	3864
• FEV	46	-13.29	11125	5000	4776	4525
• MAR	75	-2.42	9936	4056	4117	4013
• ABR	105	9.41	8337	3611	3959	3980
• MAI	135	18.79	6899	3194	3796	3927
• JUN	161	23.01	6211	2944	3651	3832
• JUL	198	21.18	6480	3222	3968	4152
• AGO	228	13.45	7659	3722	4269	4359
• SET	258	1.81	9236	3750	3907	3852
• OUT	289	-9.97	10683	4028	3921	3756
• NOV	319	-19.15	11558	5000	4619	4309
• DEZ	345	-23.12	11887	4530	4124	3825
• Anual			9305	3956	4099	4029

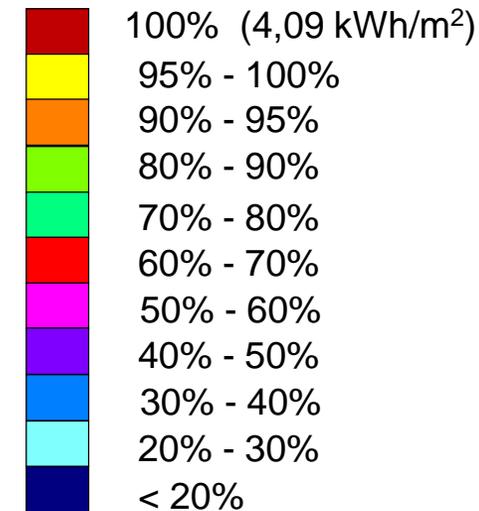
Valor médio diario máximo de uma superfície óptima [$G_{dm}(\alpha_{opt}, \beta_{opt})$],
de acordo com os dados de irradiação diária média mensal

Irradiação sobre superfícies inclinadas (III)

- “Carta de irradiação”:



Valor médio diário máximo de uma superfície ótima [$G_{dm}(\alpha_{opt}, \beta_{opt})$], de acordo com o AMT de São Paulo

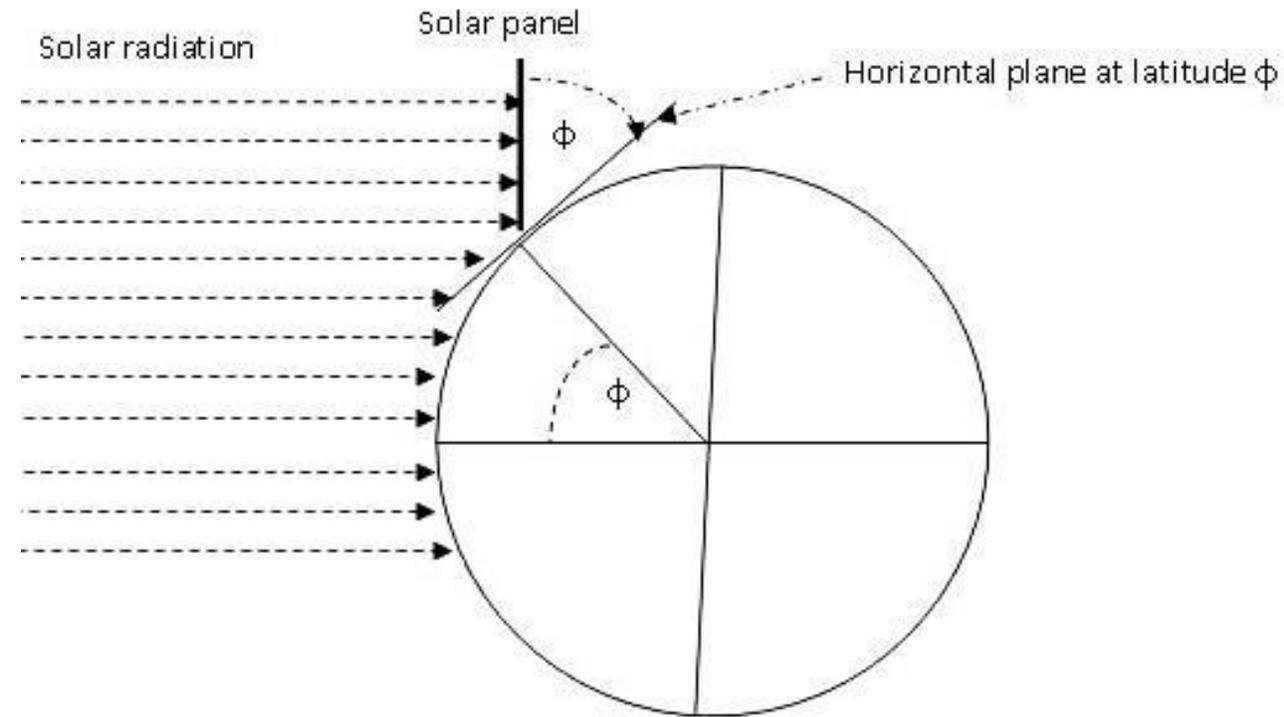


Perdas com relação ao máximo:

β : 0,2% /° (entorno $\pm 15^\circ$)

α : 0,05% /° (entorno $\pm 25^\circ$)

Inclinação Igual à Latitude



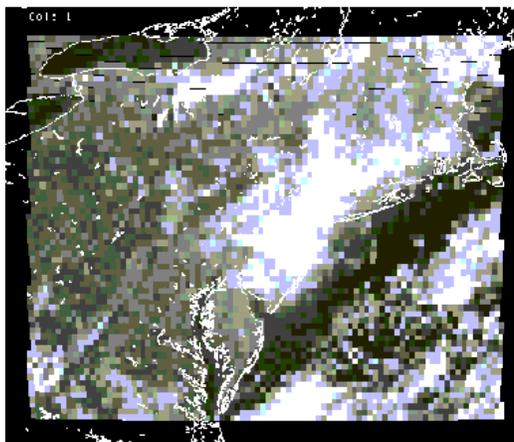
Redução do ângulo de incidência máximo ao longo do ano.

Irradiação global

- Medidas diretas



- Medidas indiretas
 - Horas de sol
 - Satélite



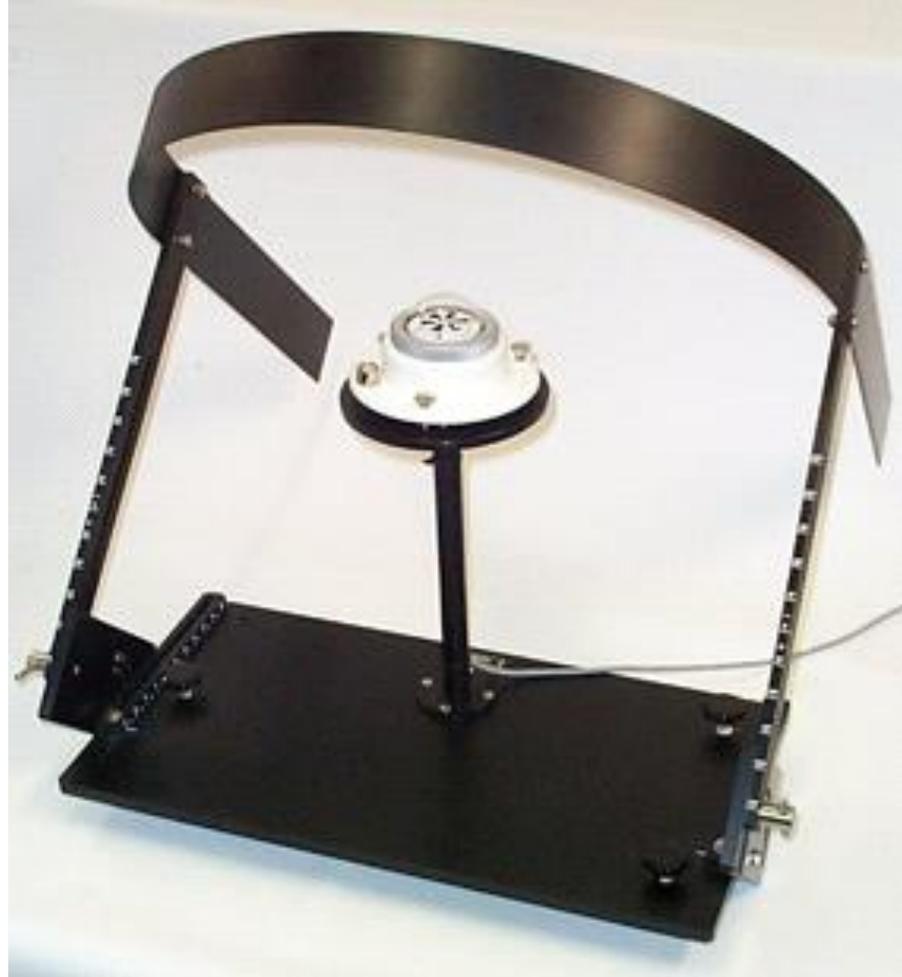
Pireliômetro



Piranômetro



Piranômetro com Banda de Sombra



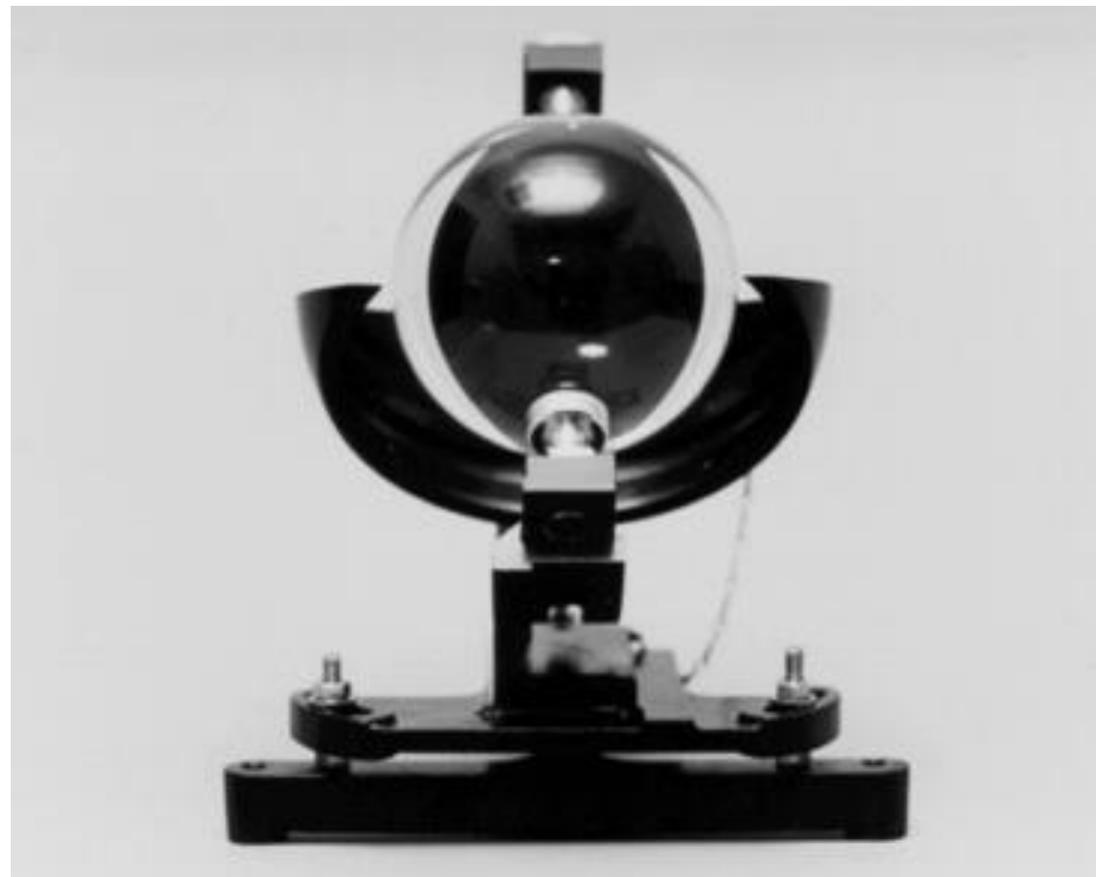
Piranômetro Fotovoltaico

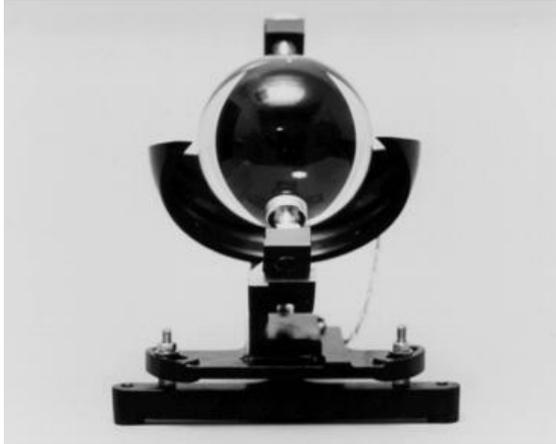


Piranômetro de Precisão



Heliógrafo



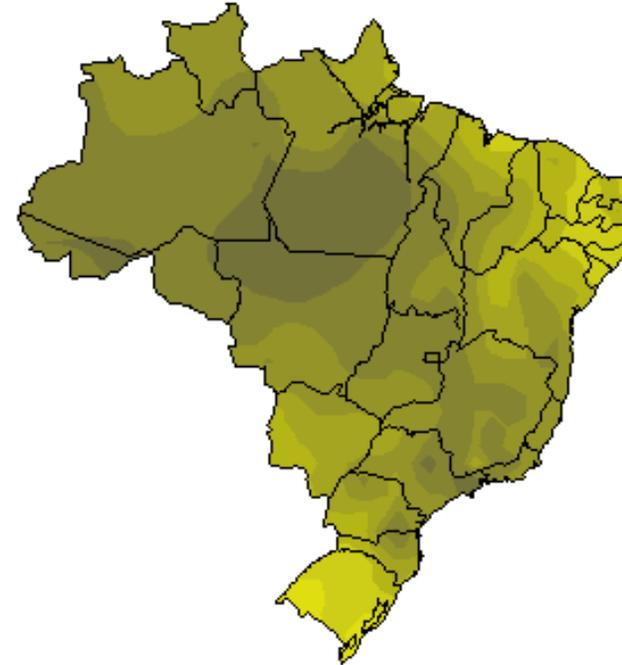


Insolação = horas de sol por mês

Page

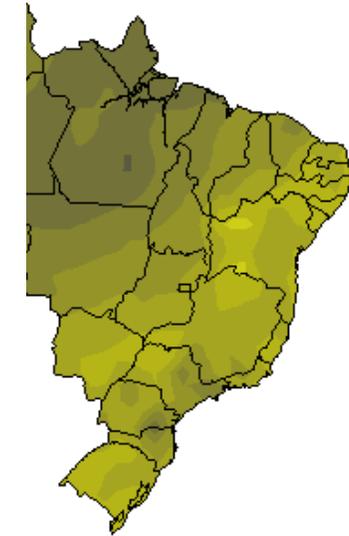
$$H / H_o = a + b (n / N_d)$$

INSOLAÇÃO - DEZEMBRO



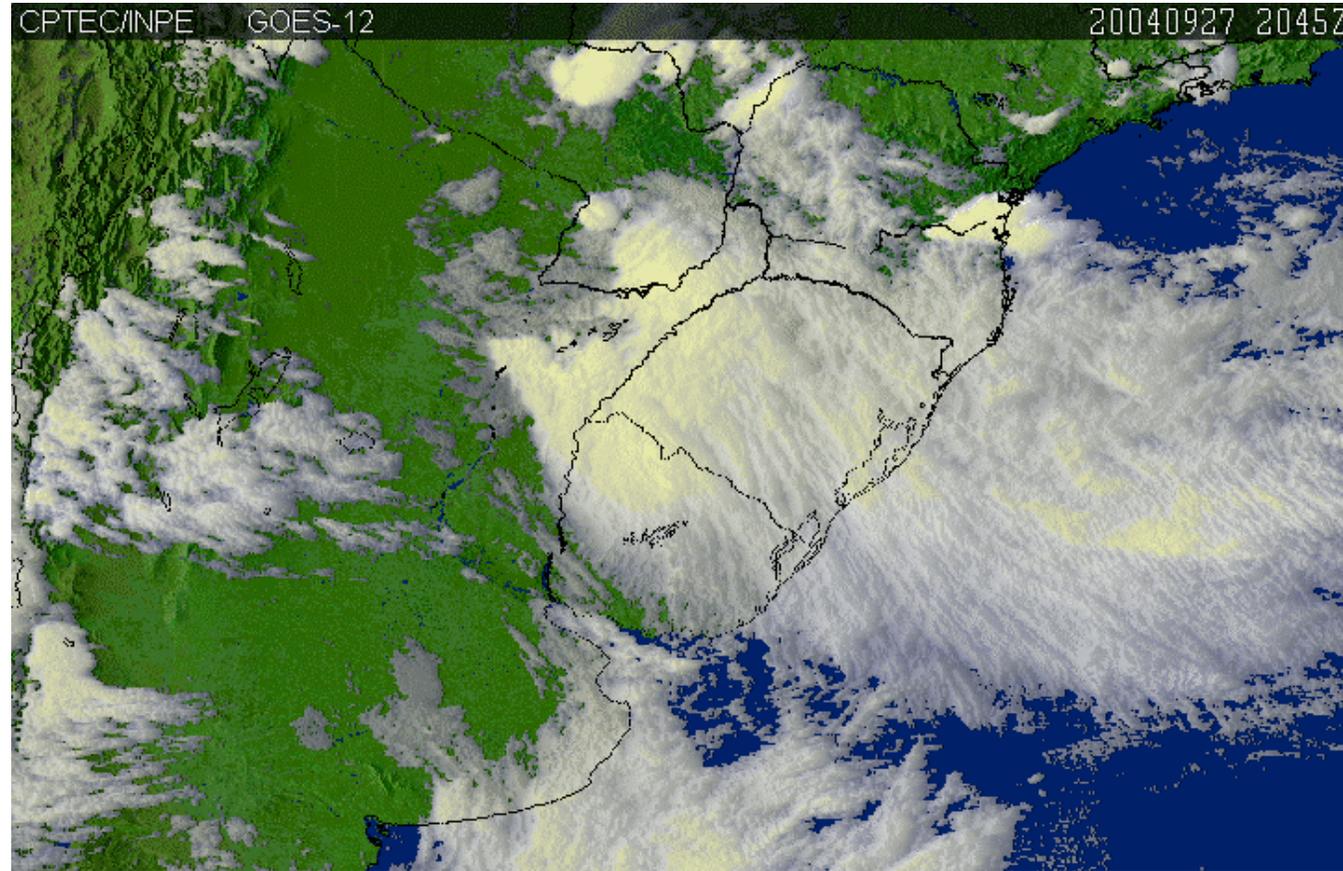
Fonte: INMET 1931/1990

IARÇO



131/1990

Modelos a partir de imagens de satélites



Compilações de dados terrestres e de satélite

Atlas UFSC

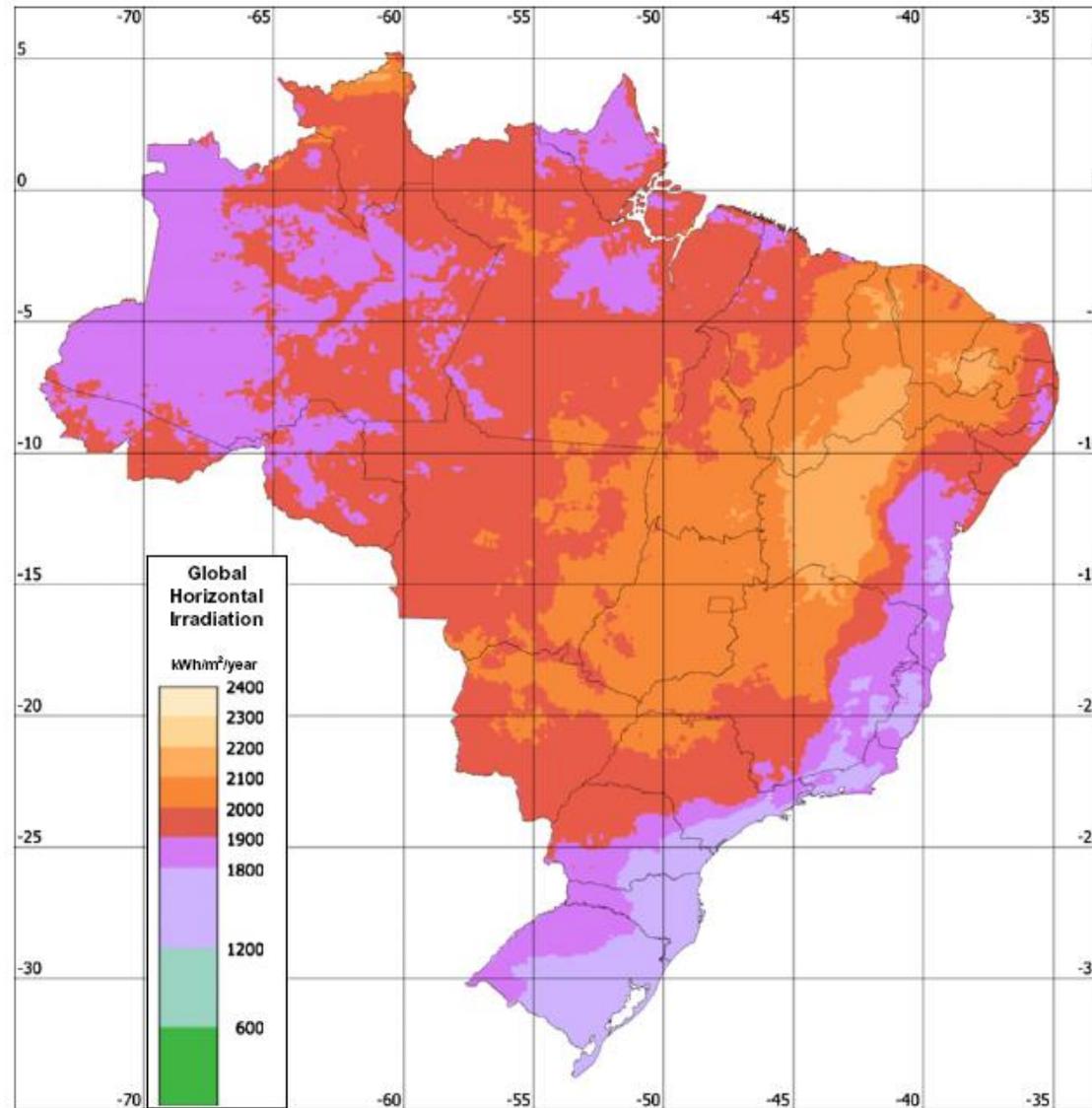


compilação e tratamento dos dados

- Compilação das principais bases de coleta de dados solares e eólicos
- Compilação de dados auxiliares tais como dados sobre rede de distribuição de eletricidade, malha viária, população e dados sócio econômicos, etc..
- Ferramenta de análise GIS para identificação de área potenciais para exploração e montagem do banco de dados/metadados

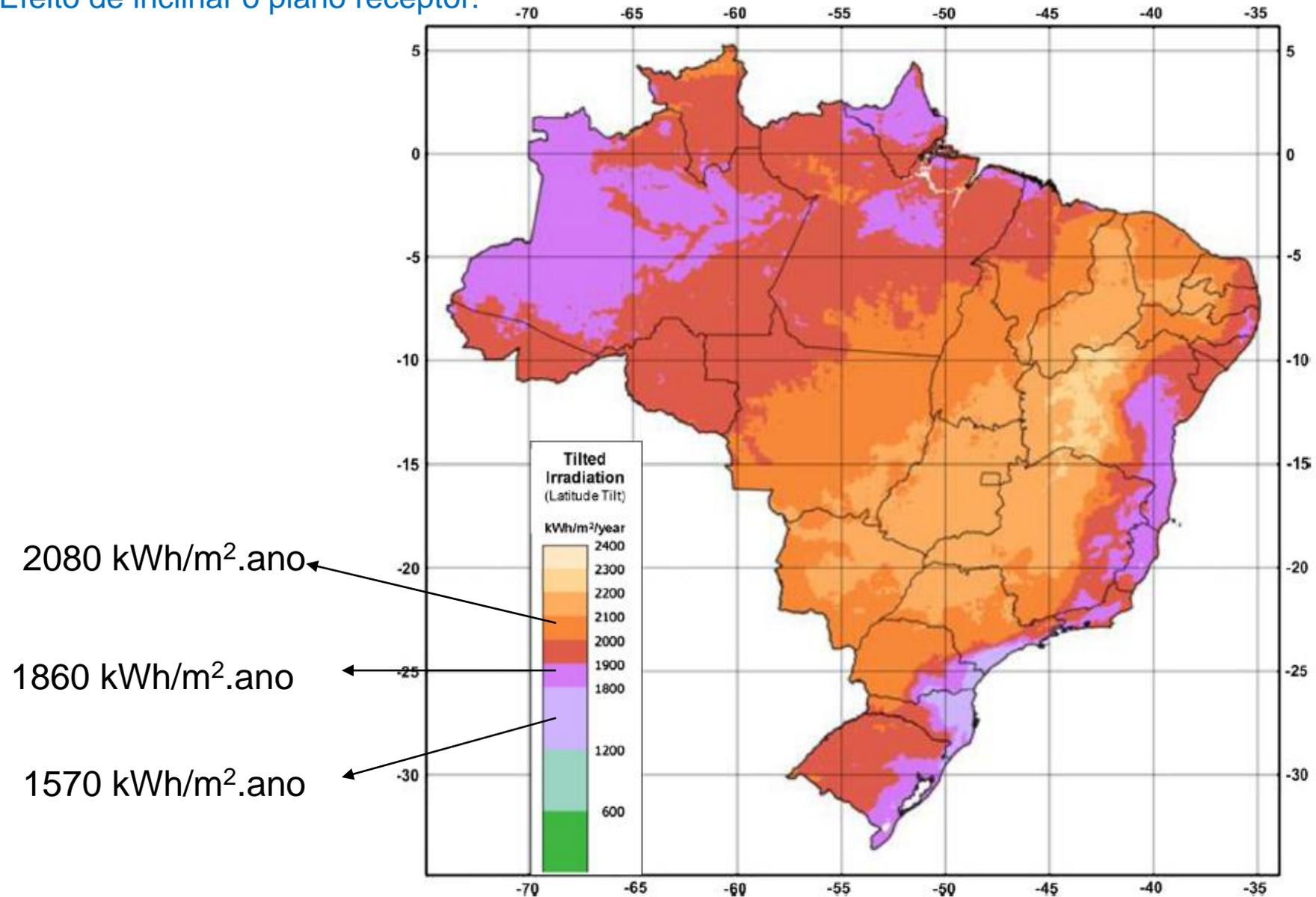
SOFTWARES

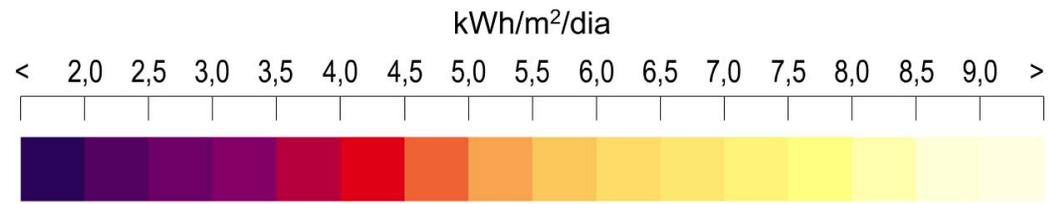
The screenshot shows the SeqMet BR software interface. It features a central map of Brazil with red and yellow data points. To the left, there are three bar charts: 'Umidade Relativa' (Relative Humidity) in cyan, 'Radiação' (Radiation) in green, and 'Radiação Inclinada' (Inclined Radiation) in yellow. To the right, there are three line graphs: 'Temperatura Máxima' (Maximum Temperature) in blue, 'Temperatura Média' (Average Temperature) in blue, and 'Temperatura Mínima' (Minimum Temperature) in blue. Below the maps, there are control panels for 'Cidade Interpolada' (Interpolated City) with 'Desvio Azimutal' (Azimuthal Deviation) and 'Inclinação do Módulo' (Module Inclination) sliders, and an 'Albedo Local (%)' (Local Albedo) slider. The interface also includes a 'Desig. dos dados' (Data Design) section with radio buttons for 'Mapas' (Maps) and 'Interpolação' (Interpolation), and a 'Sugeri. inclinação' (Suggested inclination) button.



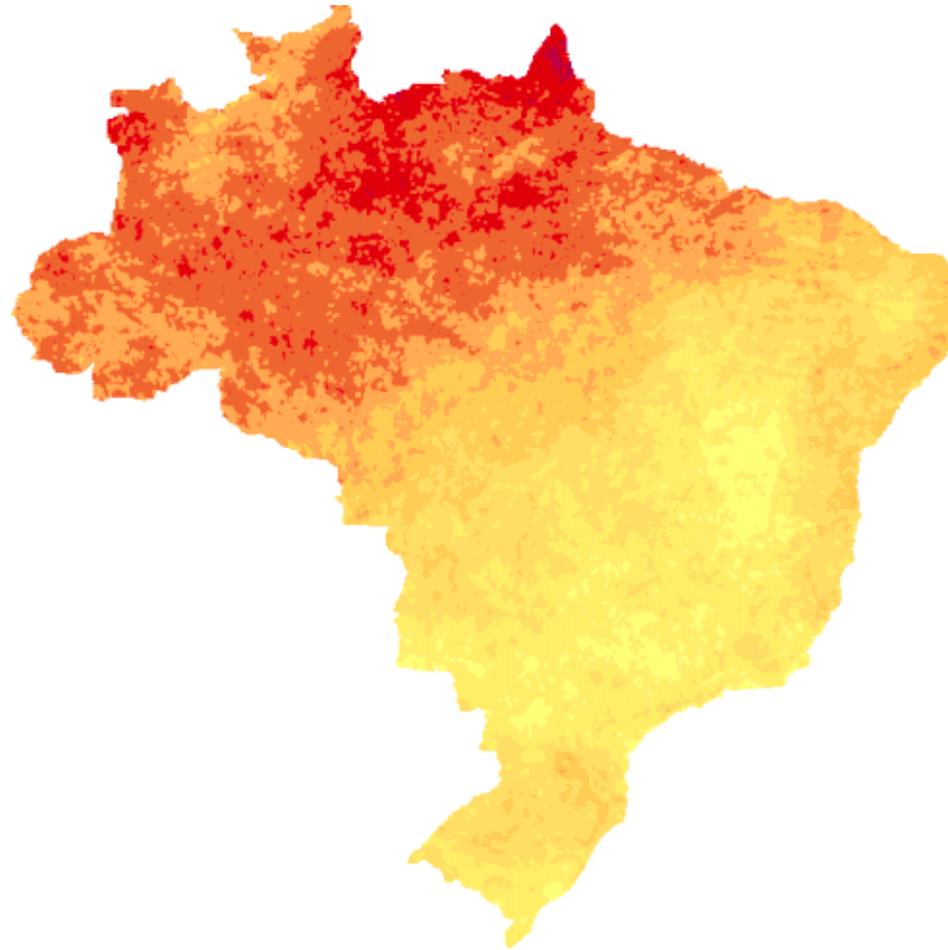
Viana et al, Solar Energy 85, 2011, 586-495

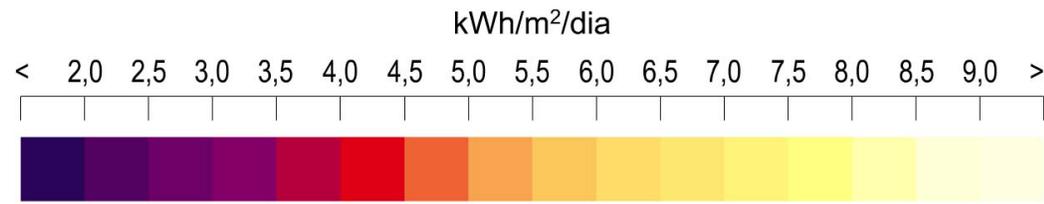
Efeito de inclinar o plano receptor:



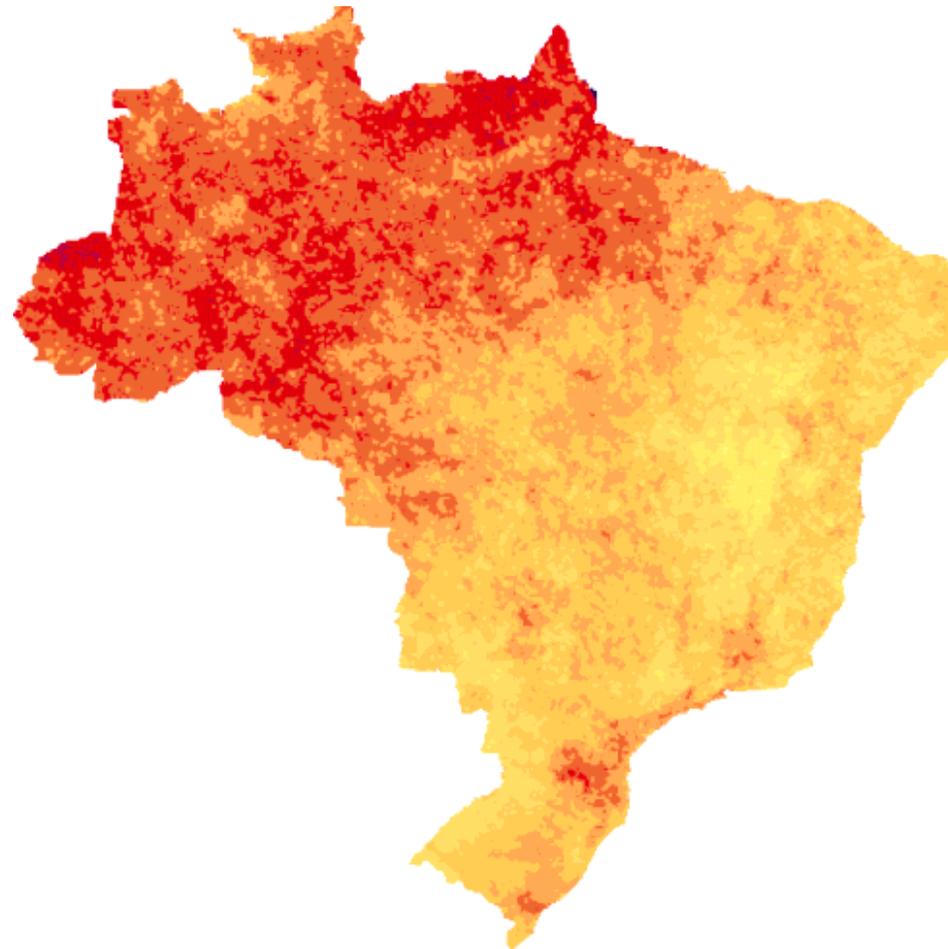


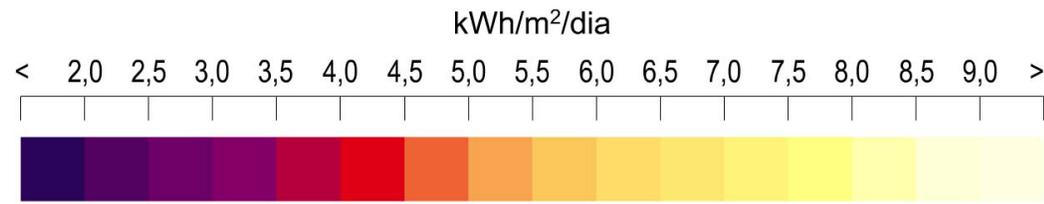
JANEIRO



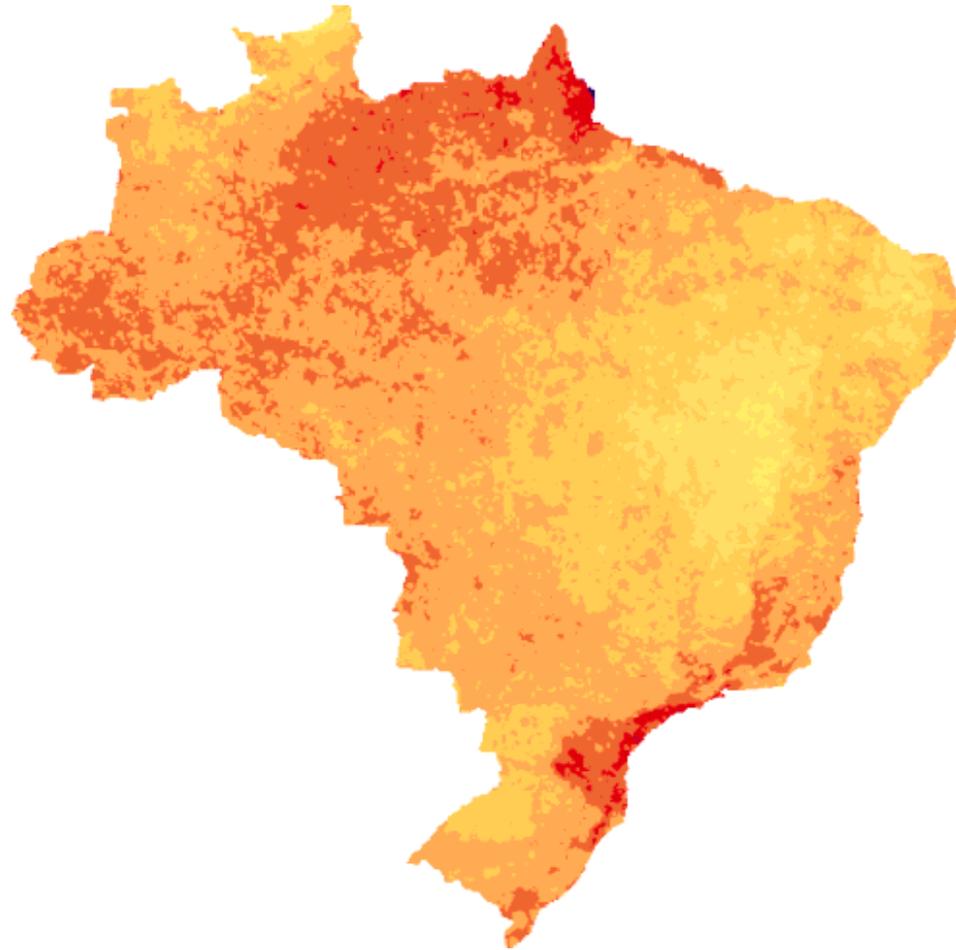


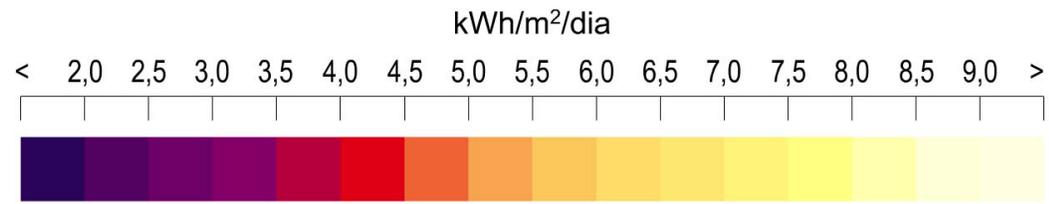
FEVEREIRO



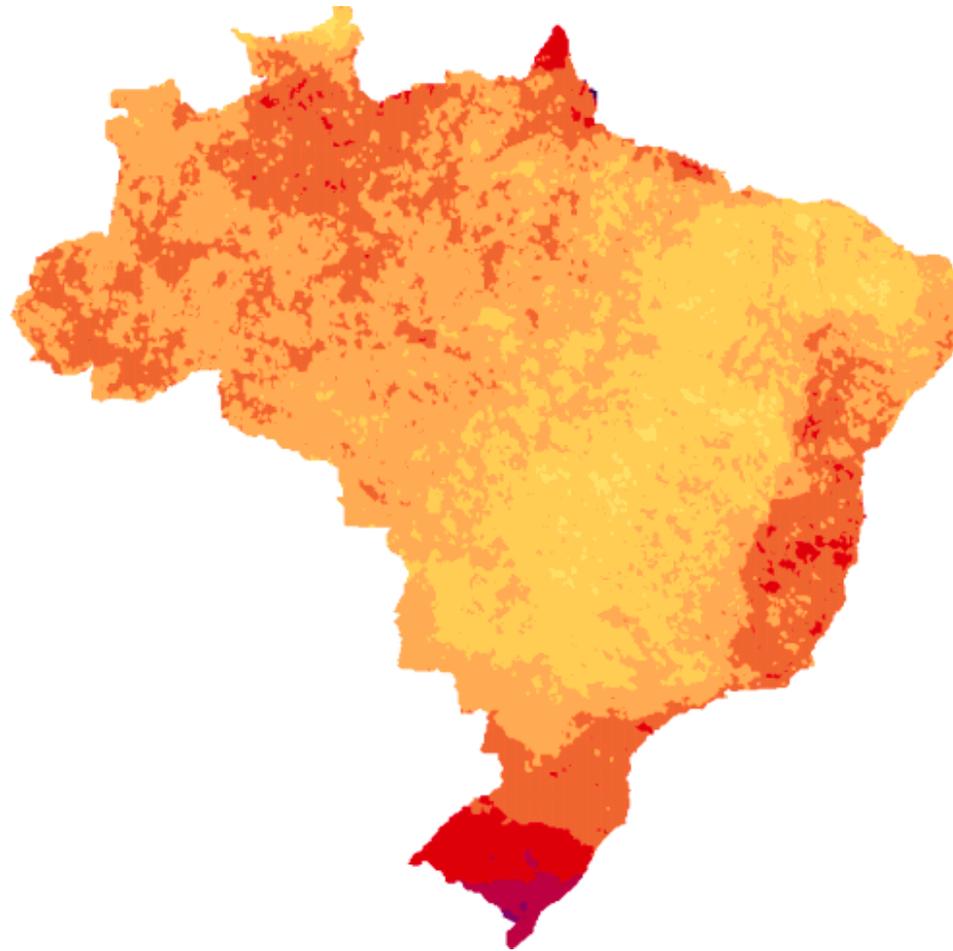


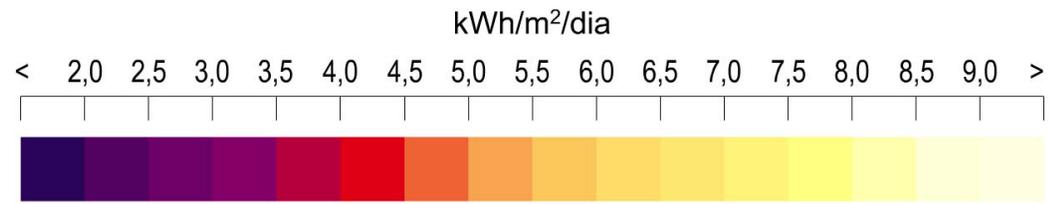
MARÇO



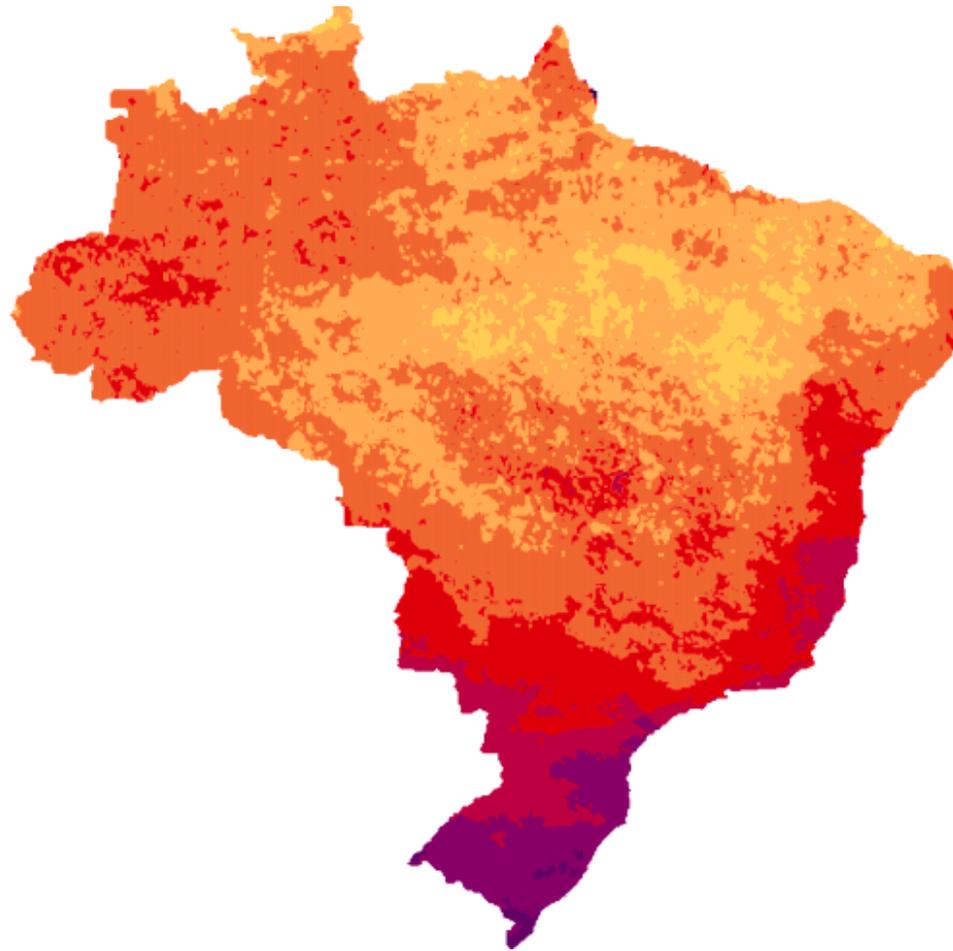


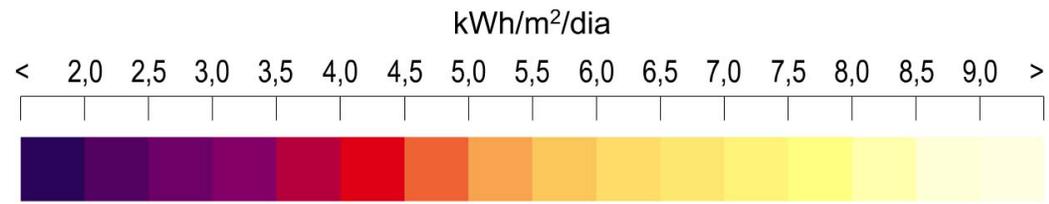
ABRIL





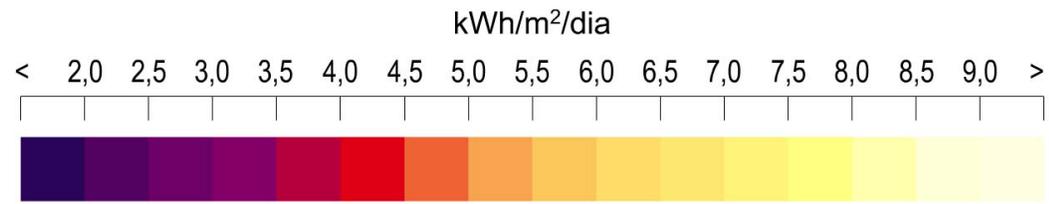
MAIO





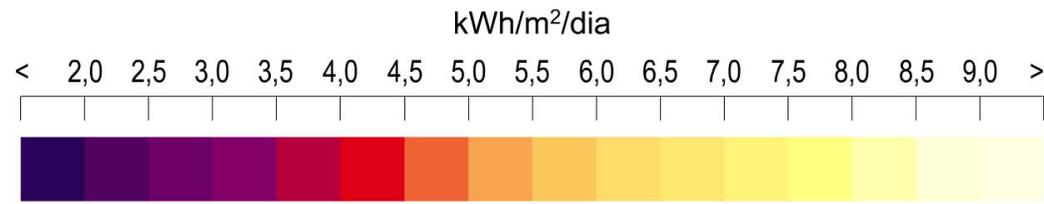
JUNHO



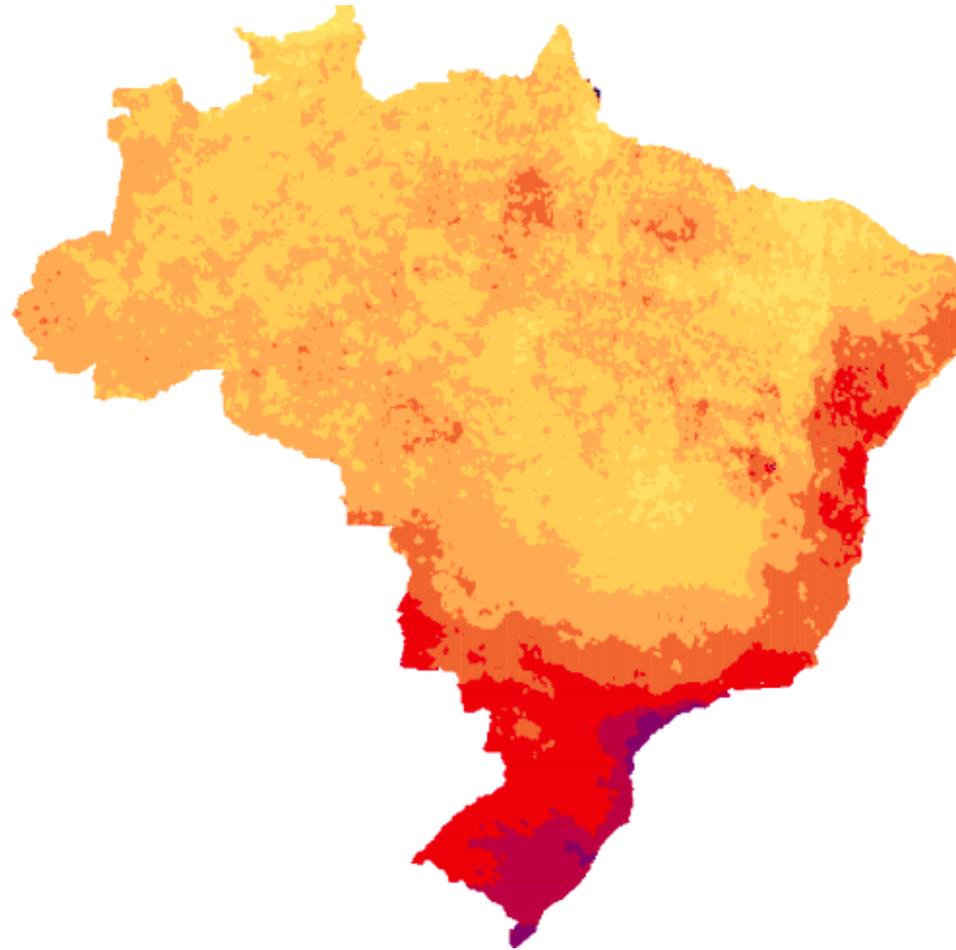


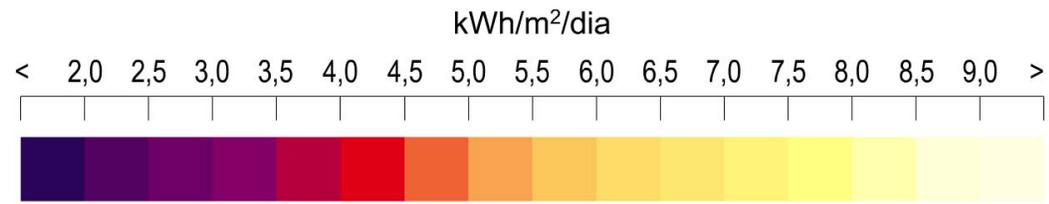
JULHO



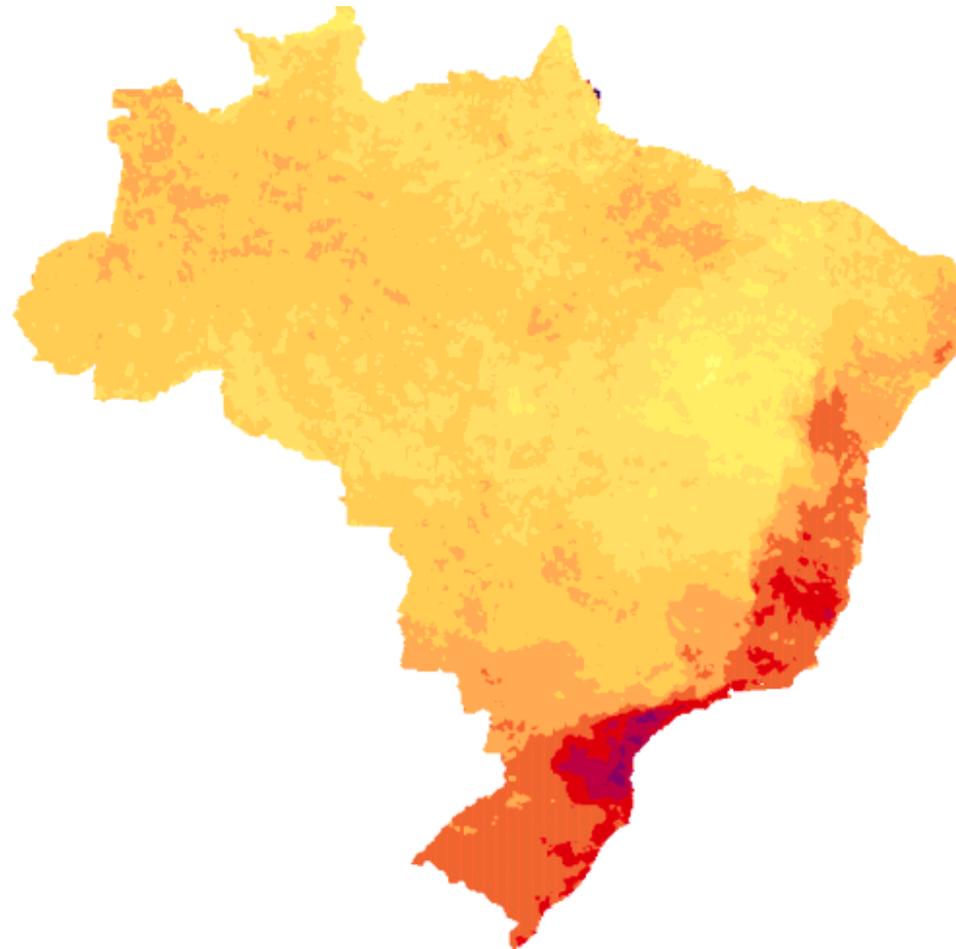


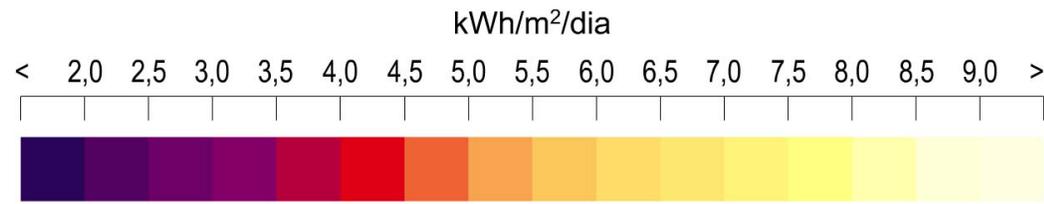
AGOSTO





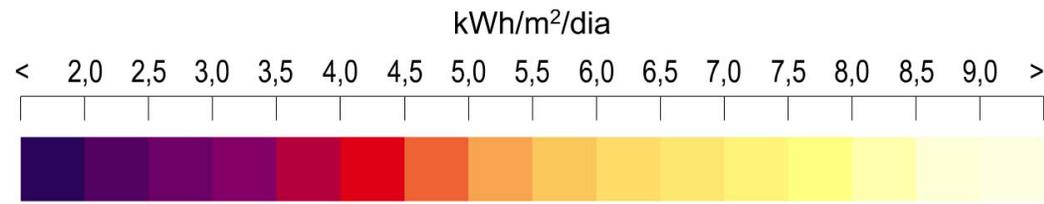
SETEMBRO



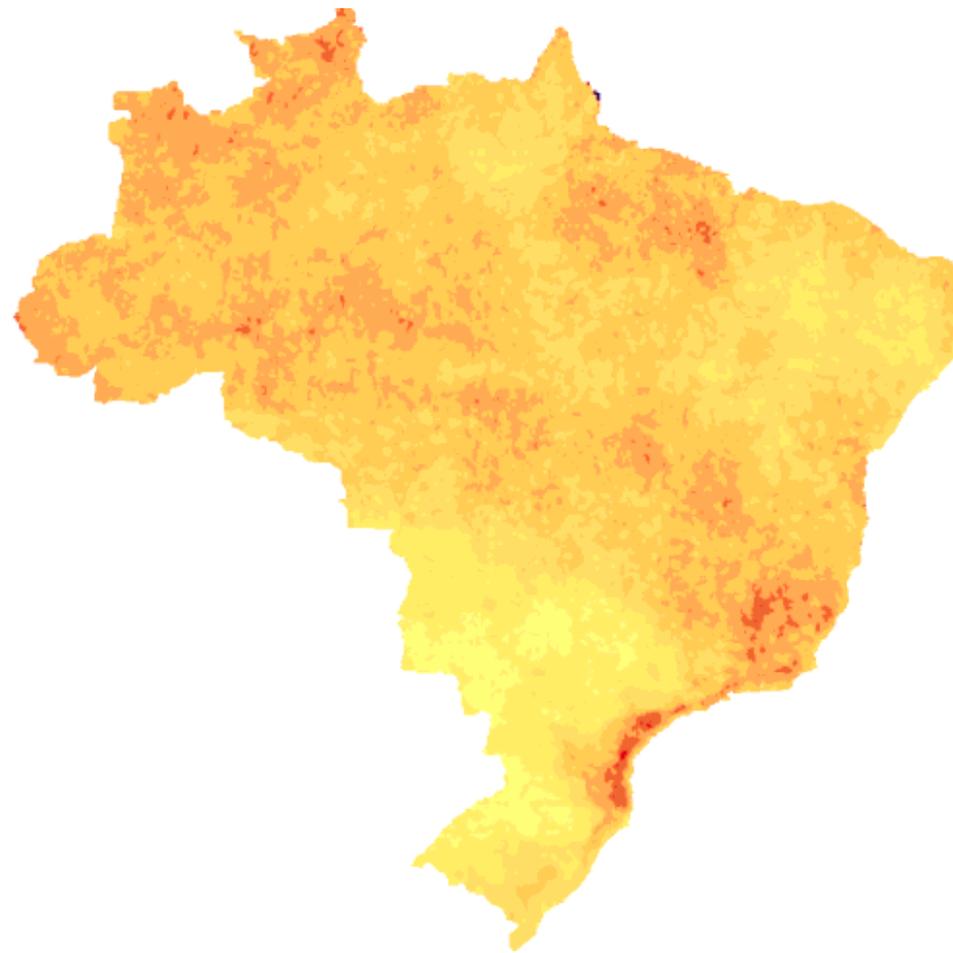


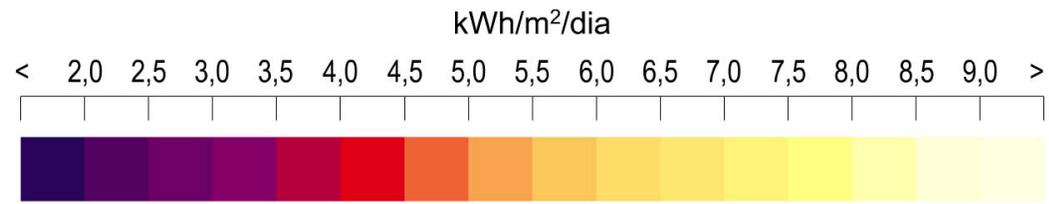
OUTUBRO





NOVEMBRO





DEZEMBRO



Radiação solar média diária no coletor inclinado de 10° N - Manaus/AM

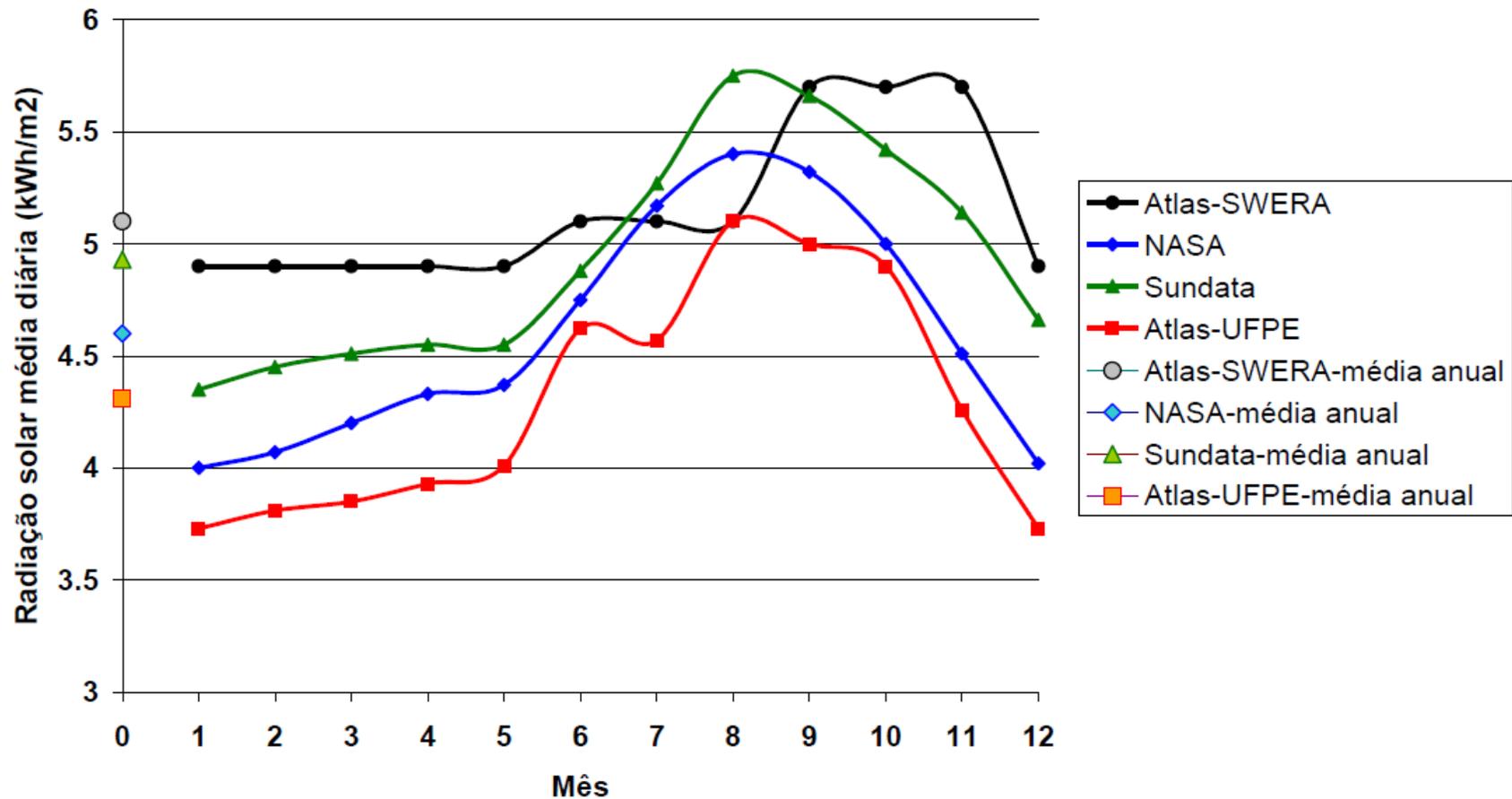
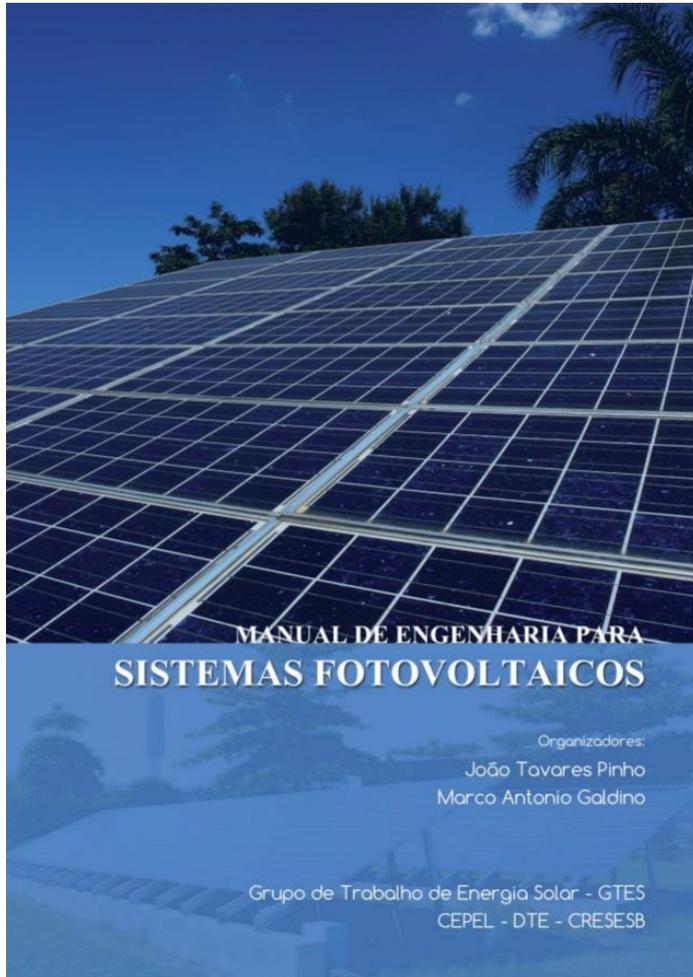


Figura 2.22 - Médias mensais e anual da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Manaus. A média anual de cada série está mostrada por um símbolo sobre o eixo vertical no "mês zero". Cada série é proveniente de um banco de dados diferente. Fonte: (SOARES et al., 2010).

Onde recorrer? – dados de irradiação solar

<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>

http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html



CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR

2.1 – O Sol e suas características

2.2 – Geometria Sol-Terra

2.3 – Radiação solar sobre a terra

2.3.1 – Distribuição da irradiação solar média diária no mundo

2.4 – Instrumentos de medição da radiação solar

2.5 – Potencial solar e sua avaliação

2.6 – Tratamento e análise dos dados solarimétricos

2.6.1 – Avaliação da qualidade dos dados medidos

2.6.2 – Tratamento dos dados primários e sua análise

2.7 – Bases de dados solarimétricos e programas computacionais

2.7.1 – Informações a partir de medições de superfície

2.7.2 – Informações a partir de medições por satélites