

ENERGIA SOLAR

Energias Renováveis

Miguel Centeno Brito

- **Irradiância** – fluxo de radiação solar por unidade de área (W/m^2)
- **Constante solar** – irradiância num plano perpendicular aos raios solares no topo da atmosfera da Terra à distância **média** da Terra-Sol

$$S = 1366 \text{ W}/\text{m}^2$$

Radiação solar interceptada pela Terra: $Q = S\pi R^2$

Superfície da Terra (esfera): $A = 4\pi R^2$

Radiação solar por unidade de área na superfície:

$$Q/A = S/4 = 340 \text{ W/m}^2$$

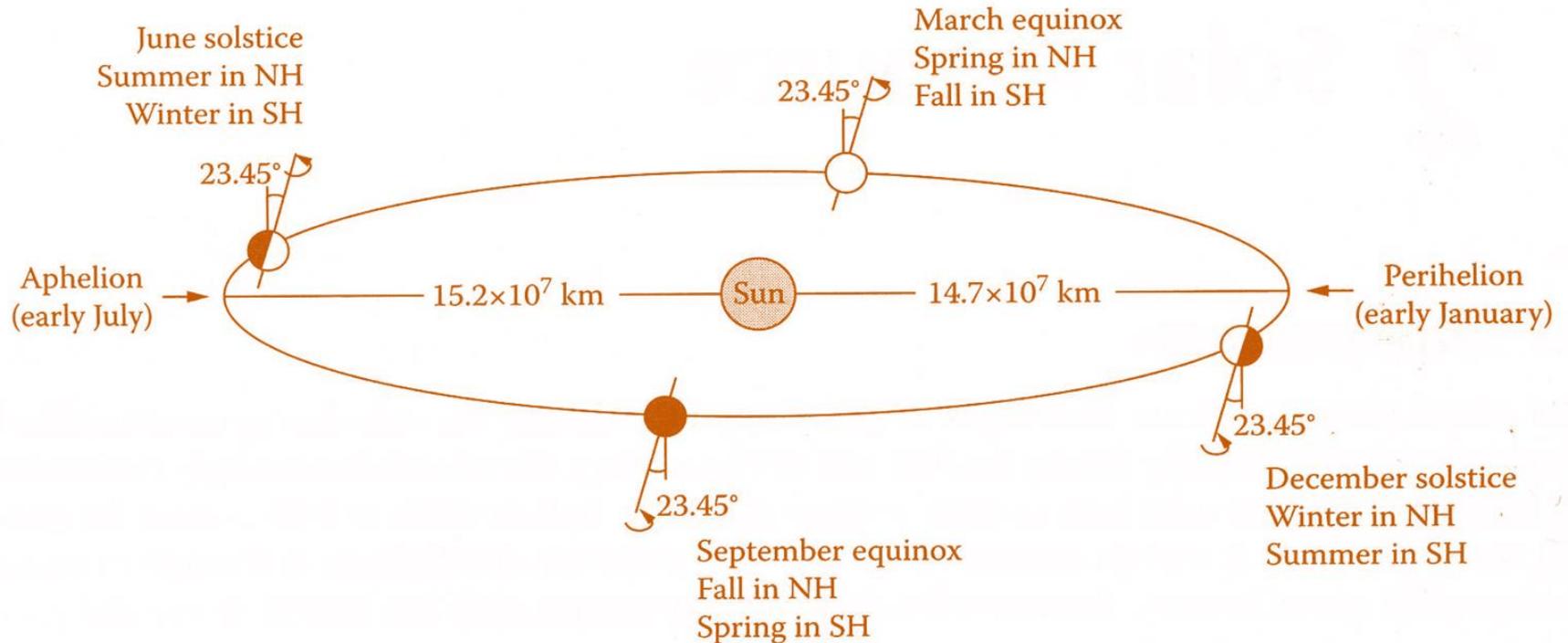
Área dos desertos: $12 \times 10^6 \text{ km}^2 = 12 \times 10^{12} \text{ m}^2$

Radiação solar nos desertos:

$$340 \times 12 \times 10^{12} \text{ W} = 4 \times 10^{15} \text{ W} = 266 \times 1.53 \times 10^{13} \text{ W}$$

A energia solar que chega aos desertos representa 250x as nossas necessidades de energia primária

Distância Terra-Sol varia ao longo do ano



$$d = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 + \varepsilon \cos\left(\left(\gamma - P\right) \frac{\pi}{180}\right)} d_0$$

Distância Terra-Sol varia ao longo do ano

Excentricidade da órbita:

$$\varepsilon = 0.01672$$

Longitude do **periélio**:

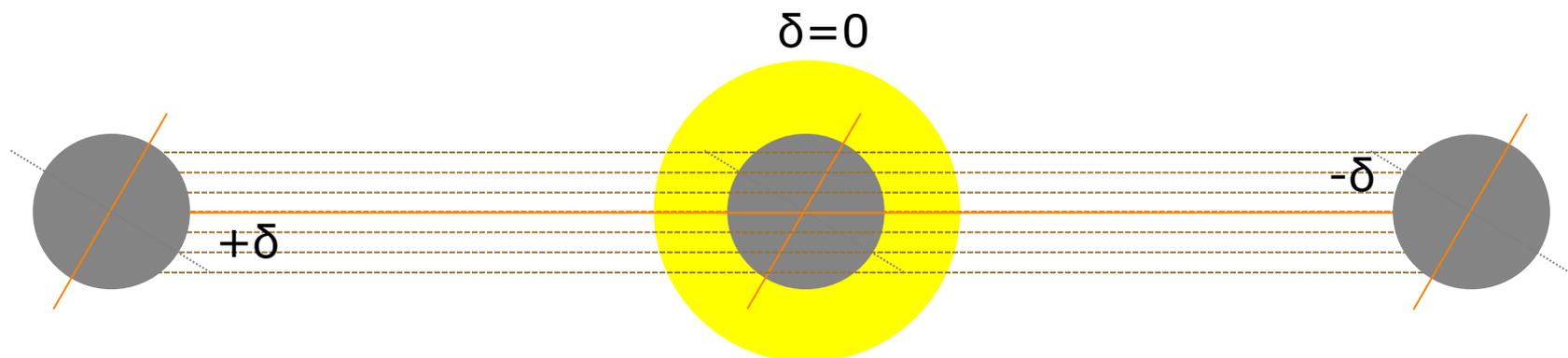
$$P = 282.04^\circ$$

Ângulo orbital (medido a partir do equinócio de verão):

γ = depende do dia do ano.

$$d = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 + \varepsilon \cos\left((\gamma - P)\frac{\pi}{180}\right)} d_0$$

- Declinação solar δ – ângulo entre a direcção Terra-Sol e o equador terrestre

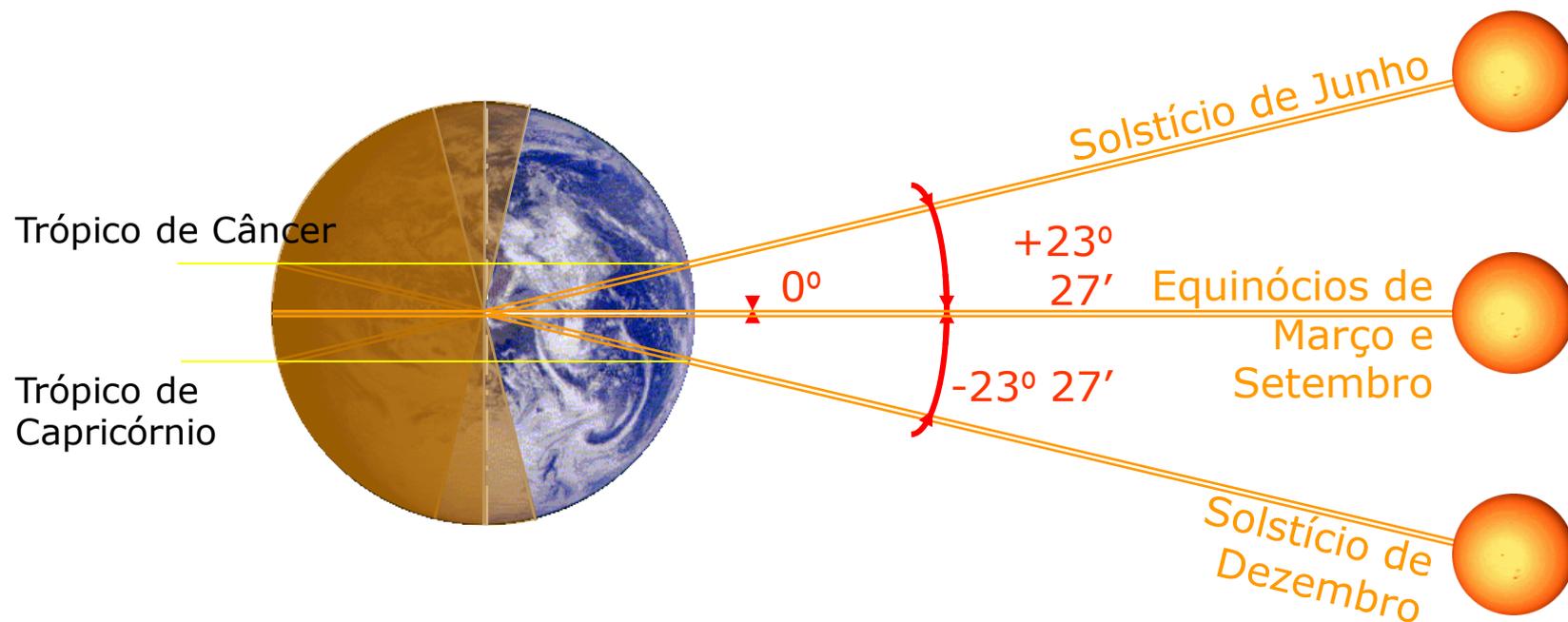


Hem. Norte:
Solstício de
Verão
Dia > Noite

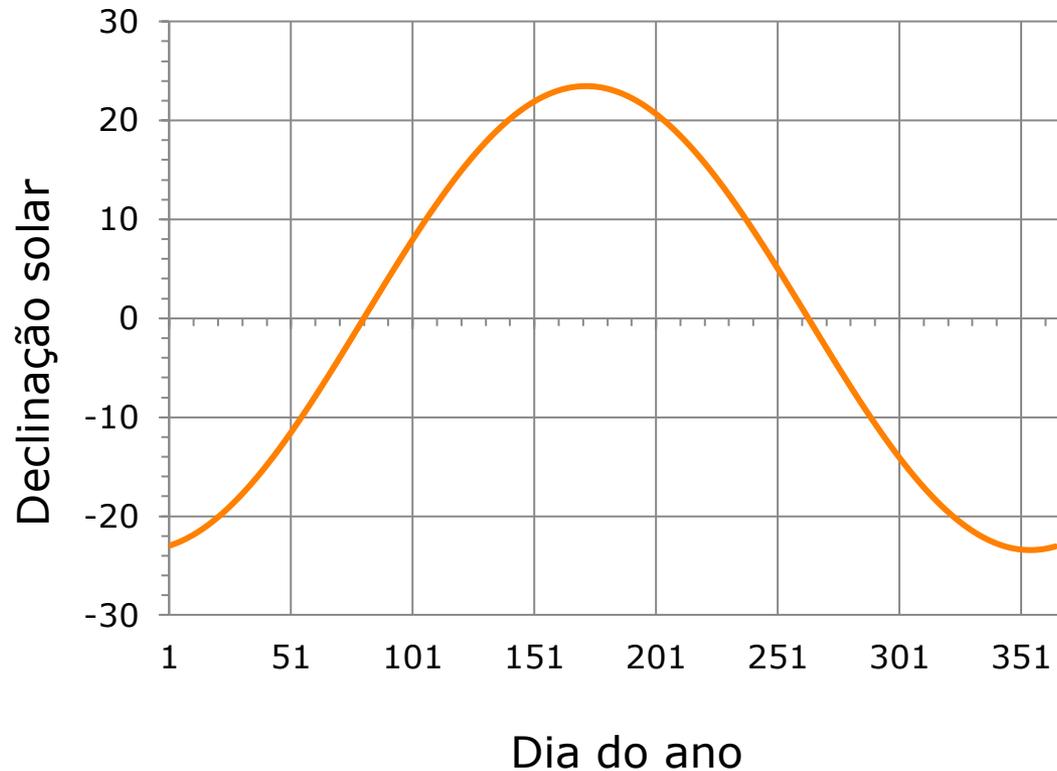
Hem. Norte:
Equinócio de Outono
Duração dia = Duração
noite

Hem. Norte:
Solstício de
Inverno
Dia < Noite

- Declinação solar δ – ângulo entre a direcção Terra-Sol e o equador terrestre



- Declinação solar δ – ângulo entre a direcção Terra-Sol e o equador terrestre



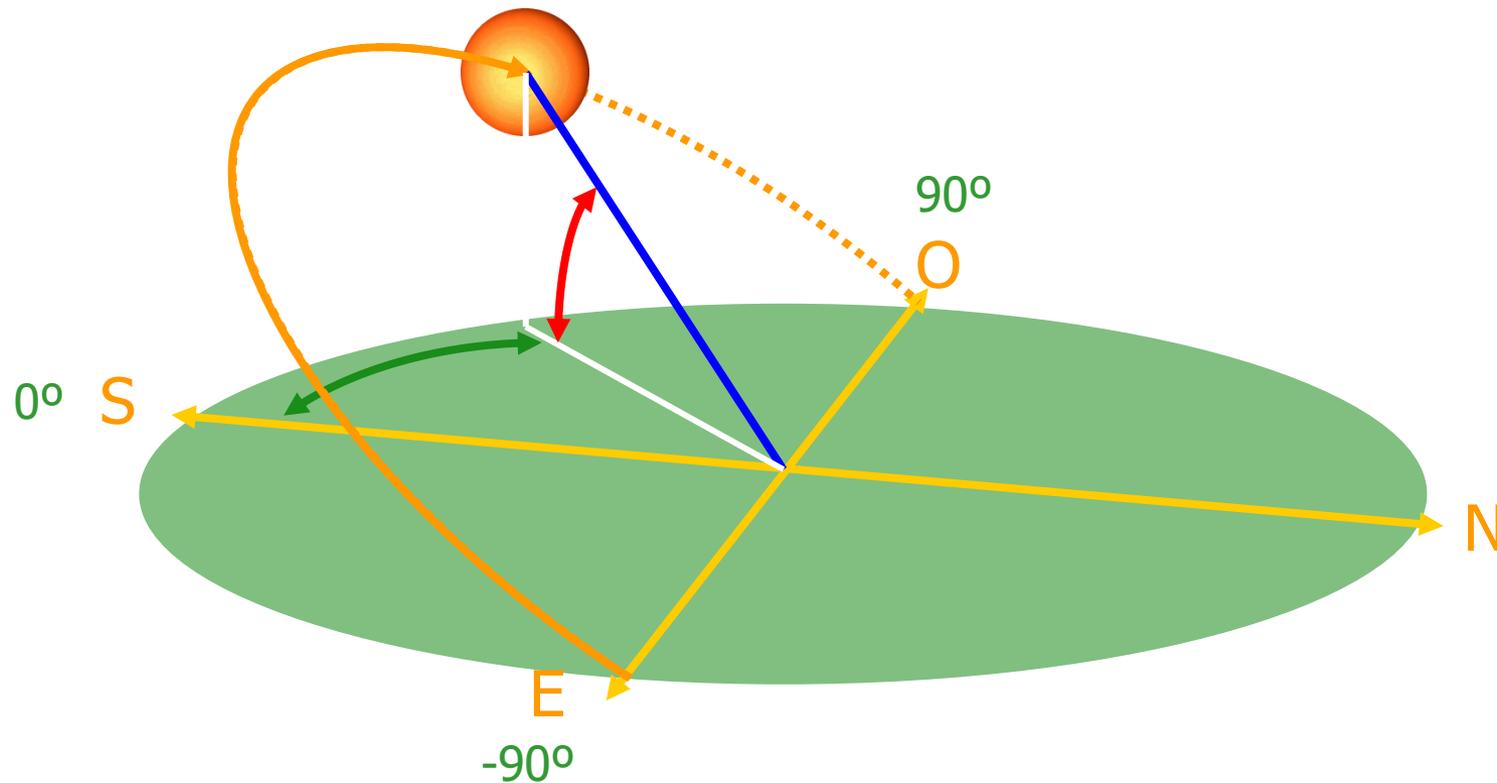
Graus!!

$$\delta = 23^{\circ}27' \sin\left(2\pi\left(\frac{284 + dia}{365}\right)\right)$$

$dia = 1$ para 1 de Janeiro

Coordenadas do sol

- **Altura solar**
- **Azimute solar**



Coordenadas do sol

- **Altura solar**

$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

δ é a declinação solar

ϕ é a latitude do local

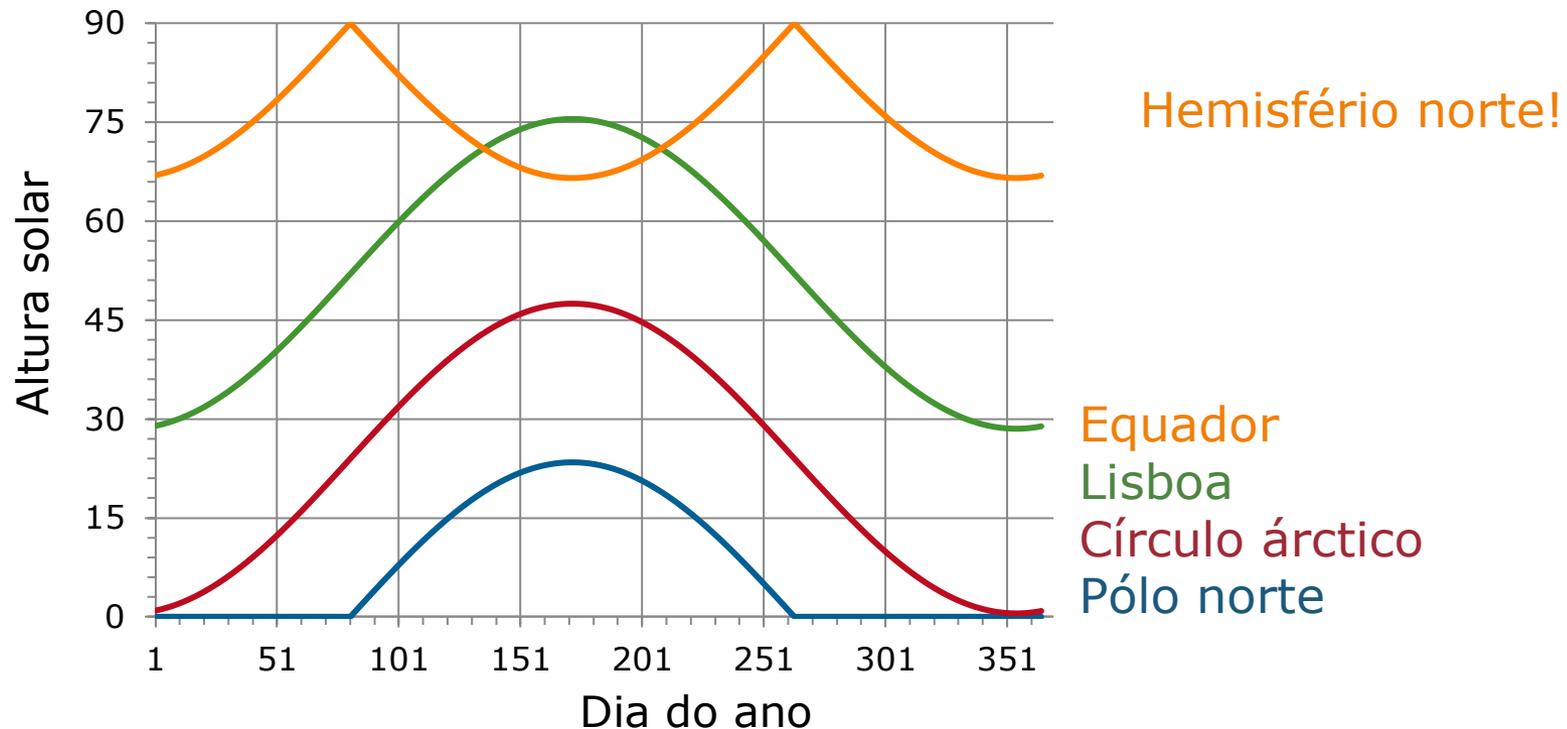
α_s é o ângulo solar local

$$\alpha_s = 15^\circ \times (\text{horasolarlocal} - 12)$$

Qual é a latitude do círculo polar ártico?

Coordenadas do sol

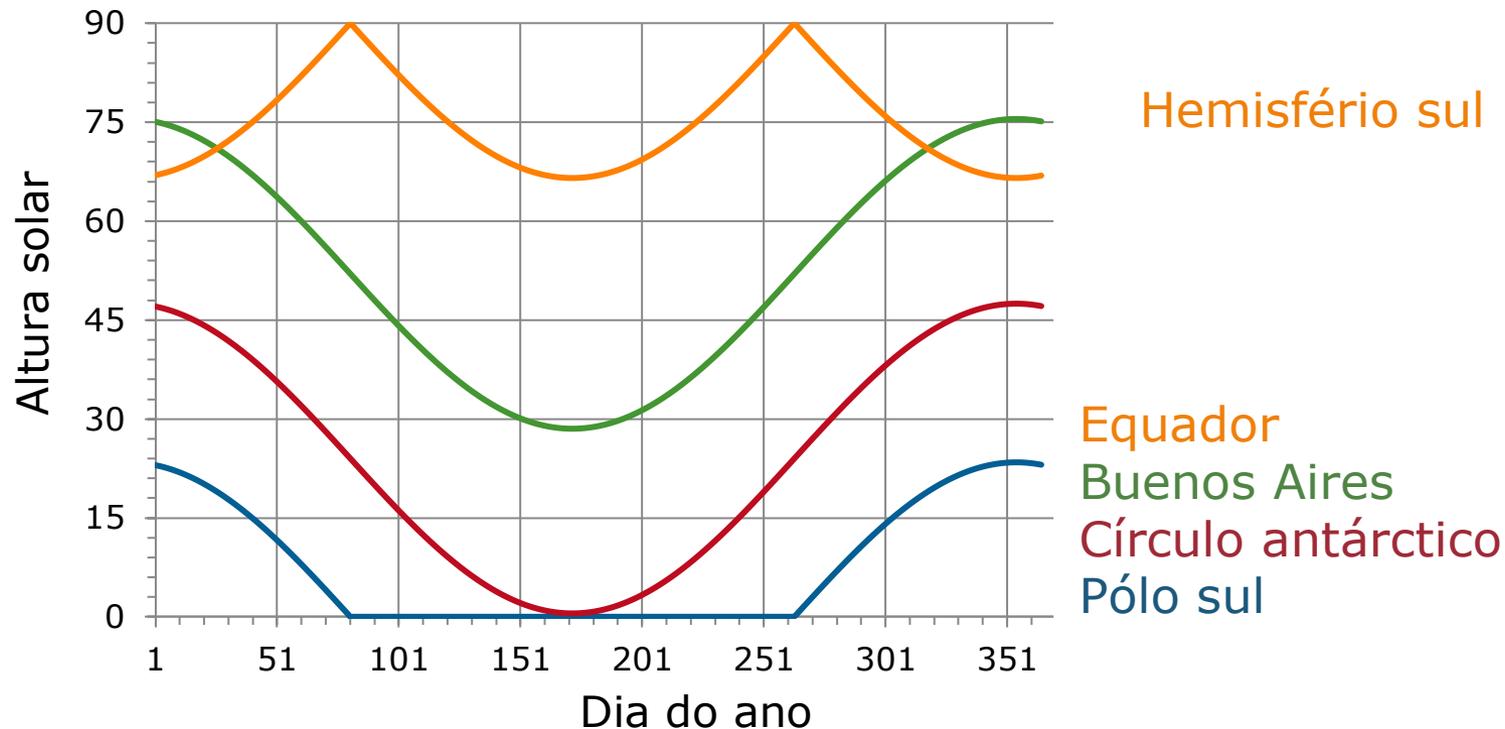
- **Altura** solar às 12h00 (hora solar)



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

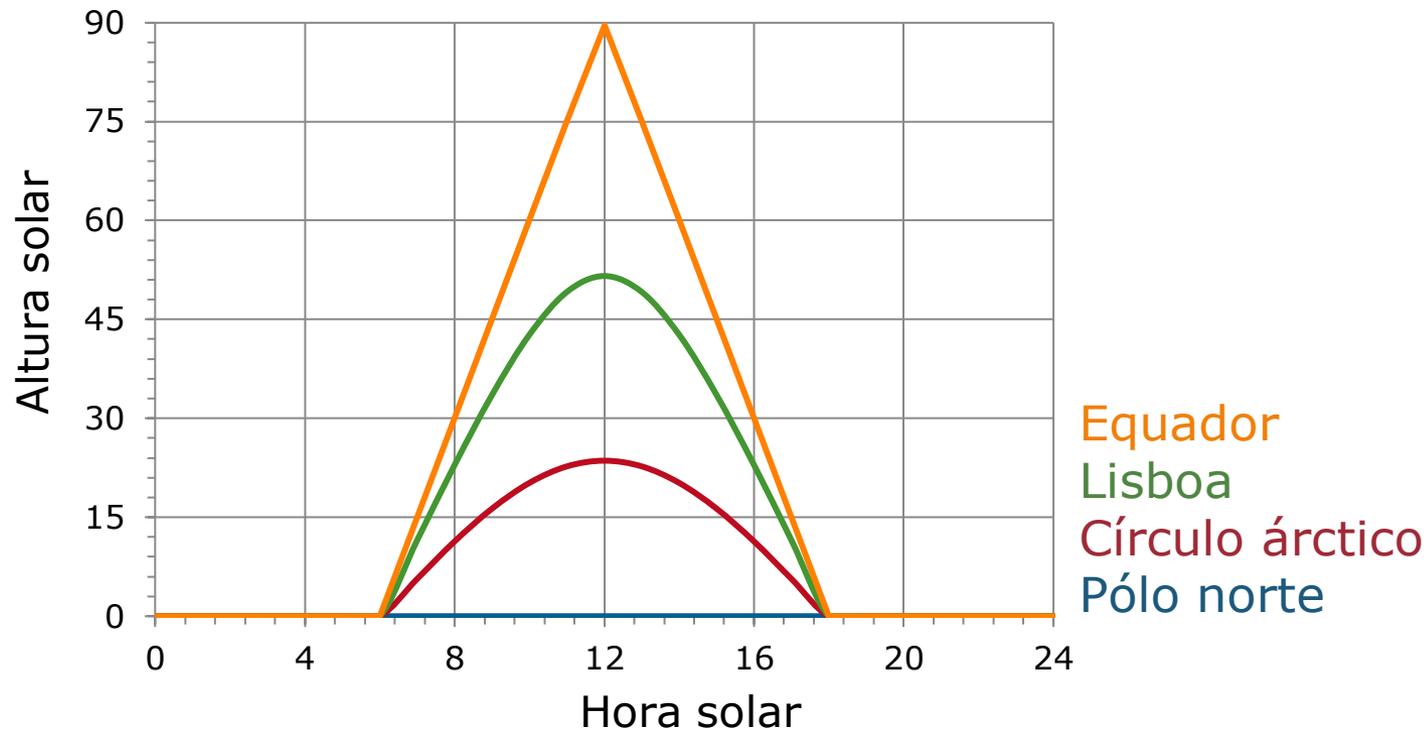
- **Altura** solar às 12h00 (hora solar)



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

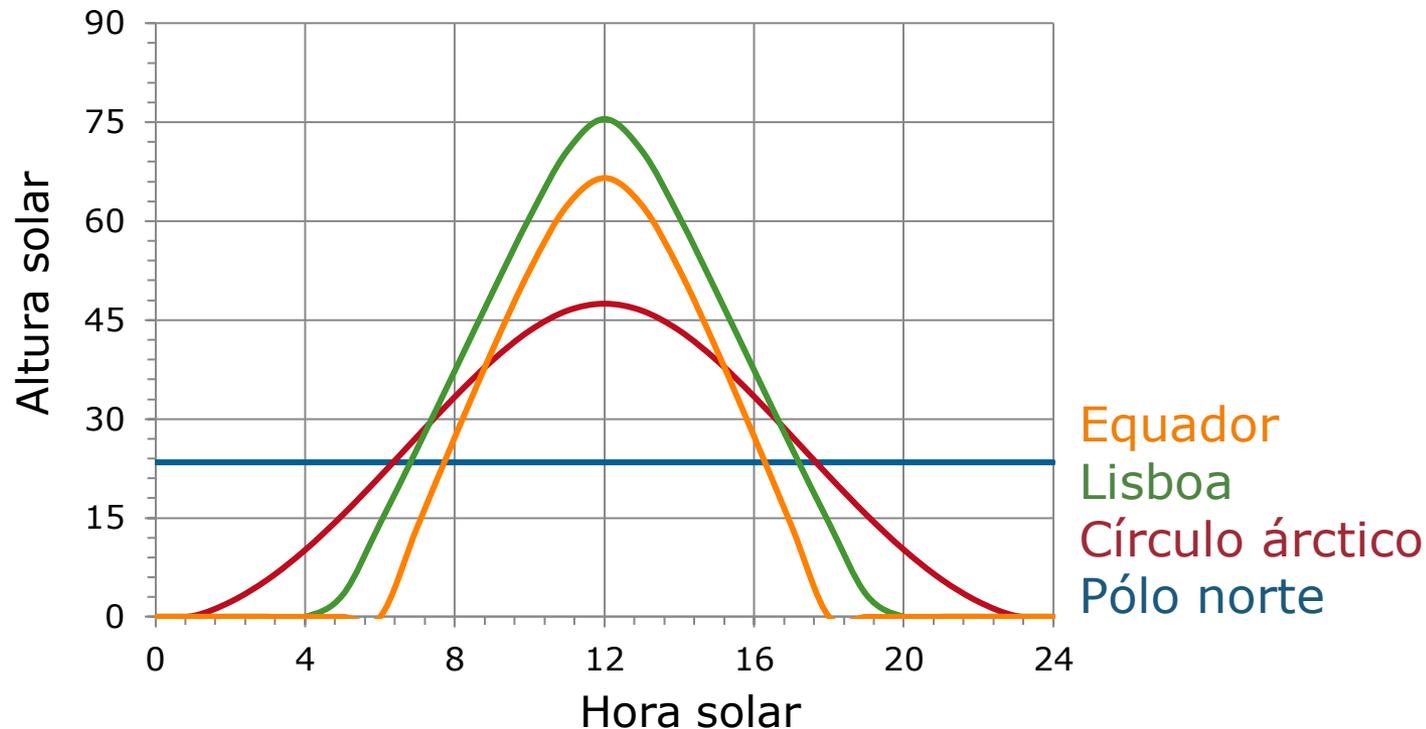
- **Altura** solar dia 80 (Equinócio primavera)



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

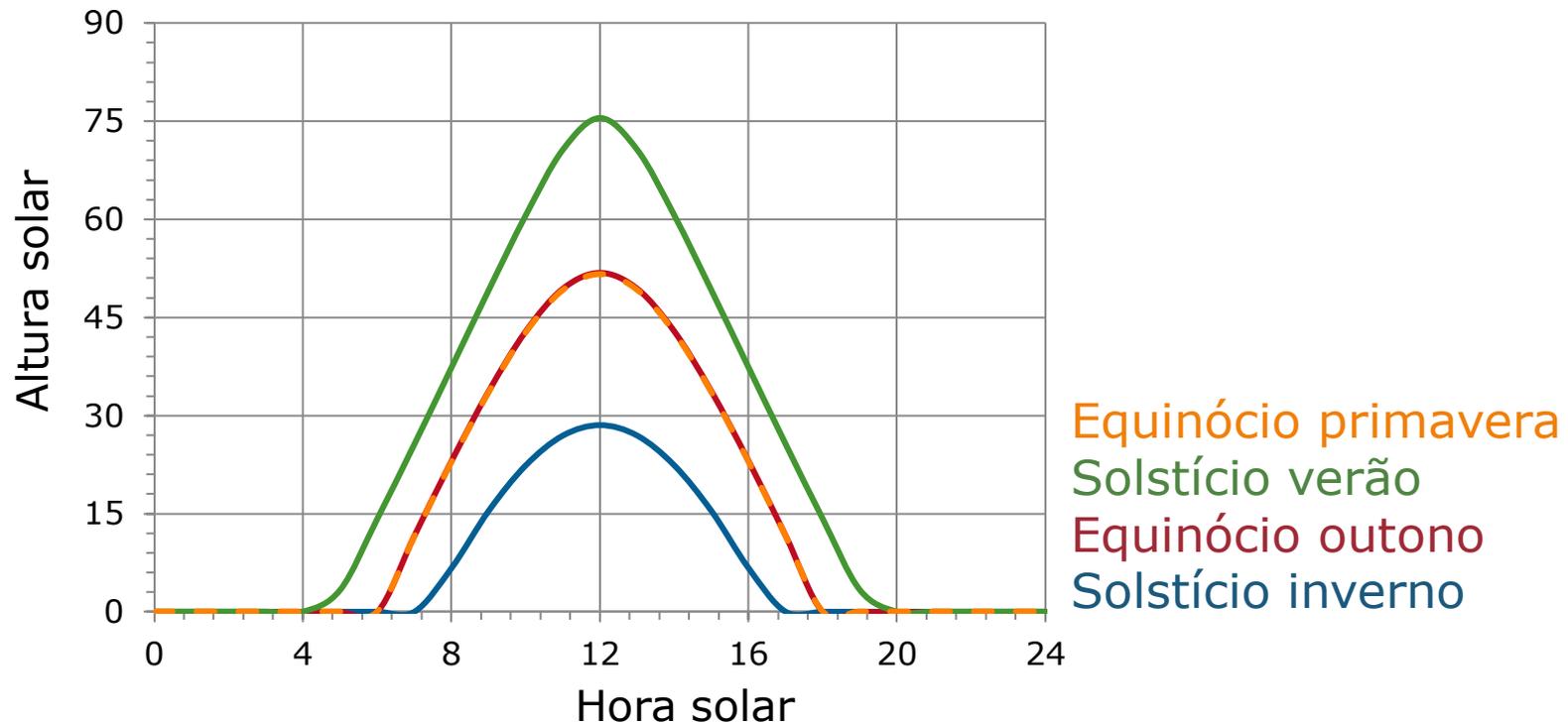
- **Altura** solar dia 172 (Solstício verão)



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

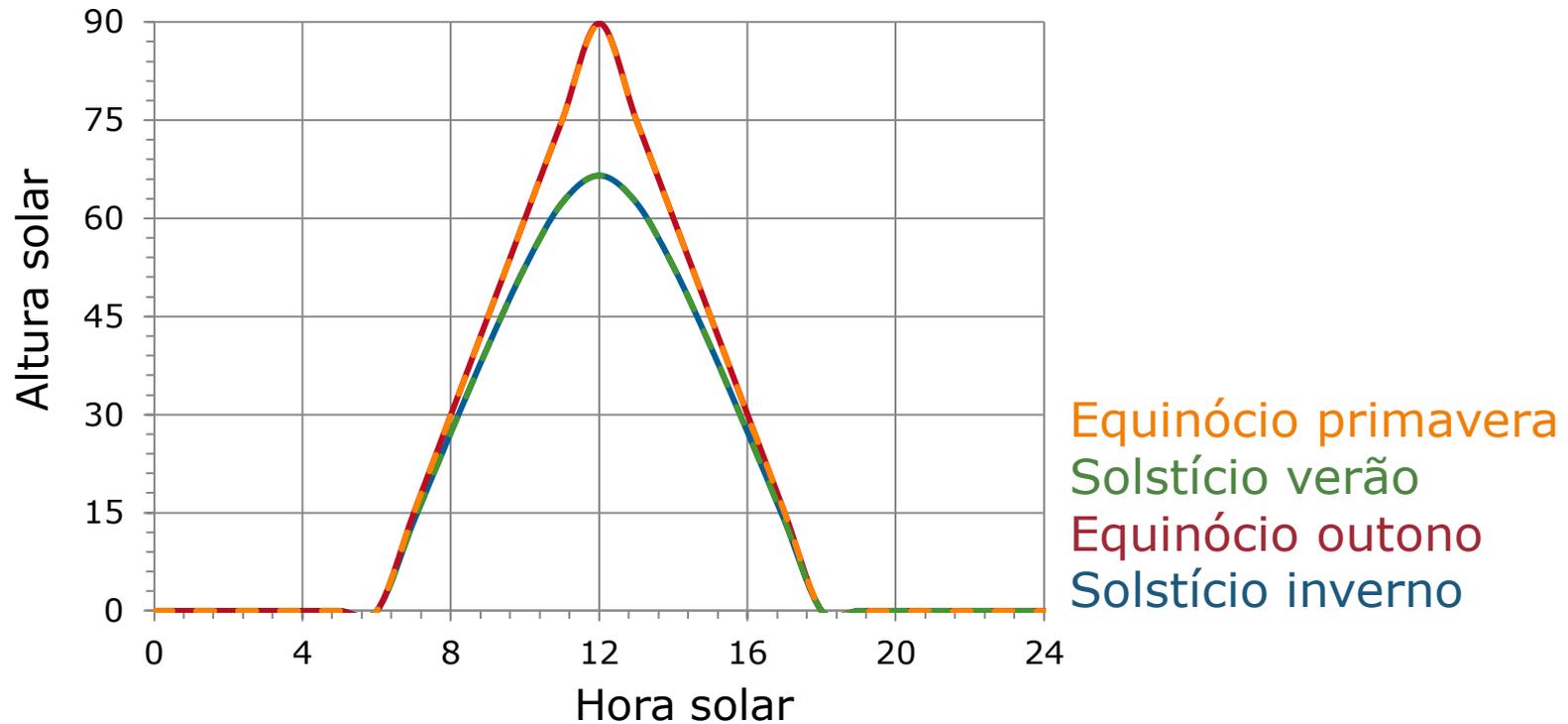
- **Altura** solar Lisboa



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

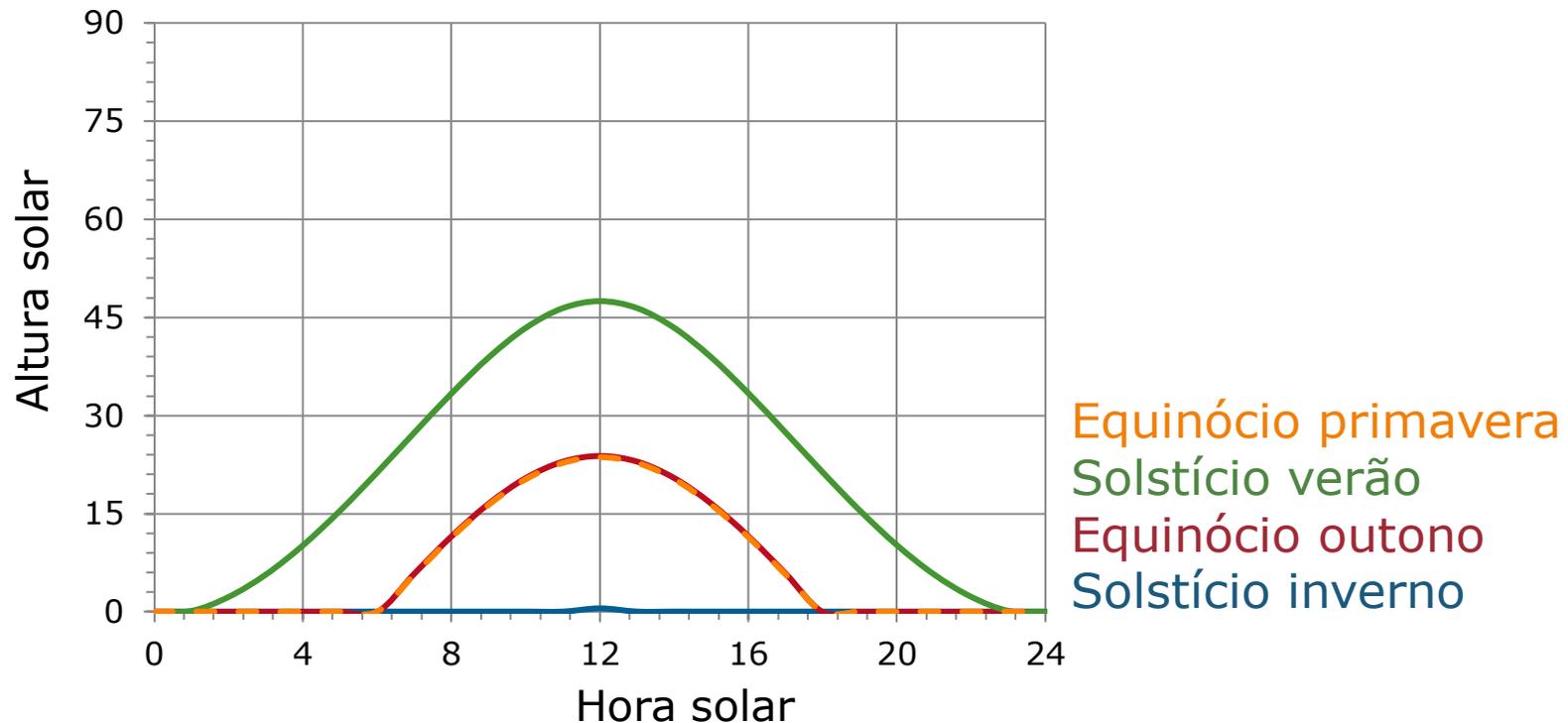
- **Altura** solar Equador



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

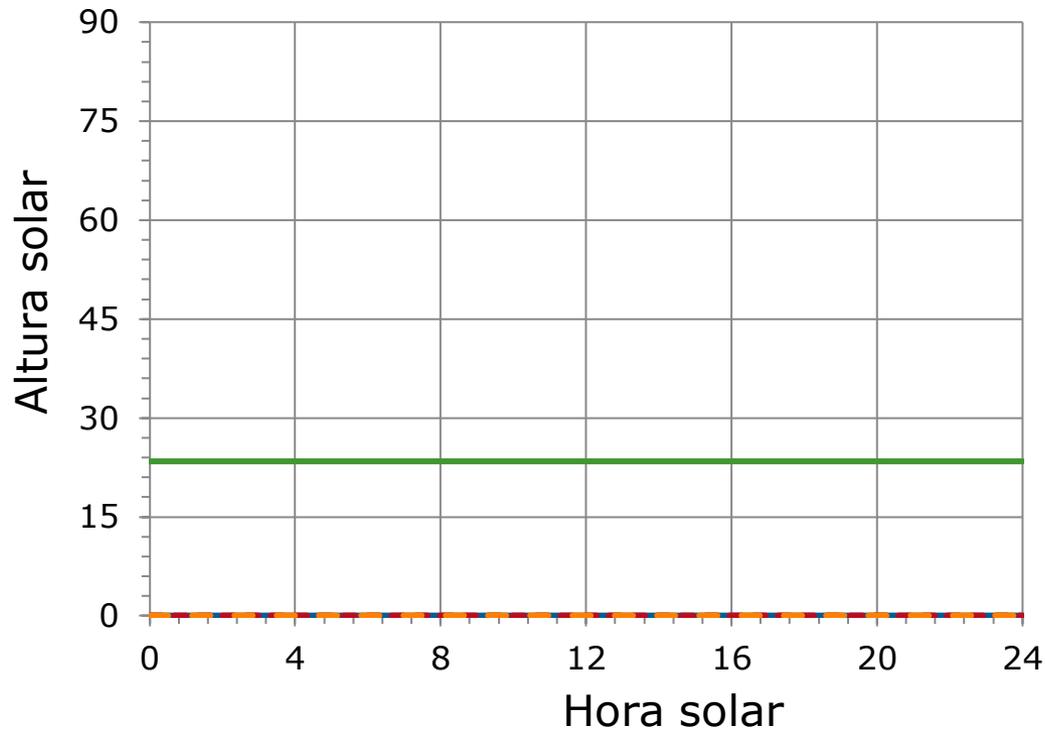
- **Altura** solar círculo polar ártico



$$\sin A_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \alpha_s$$

Coordenadas do sol

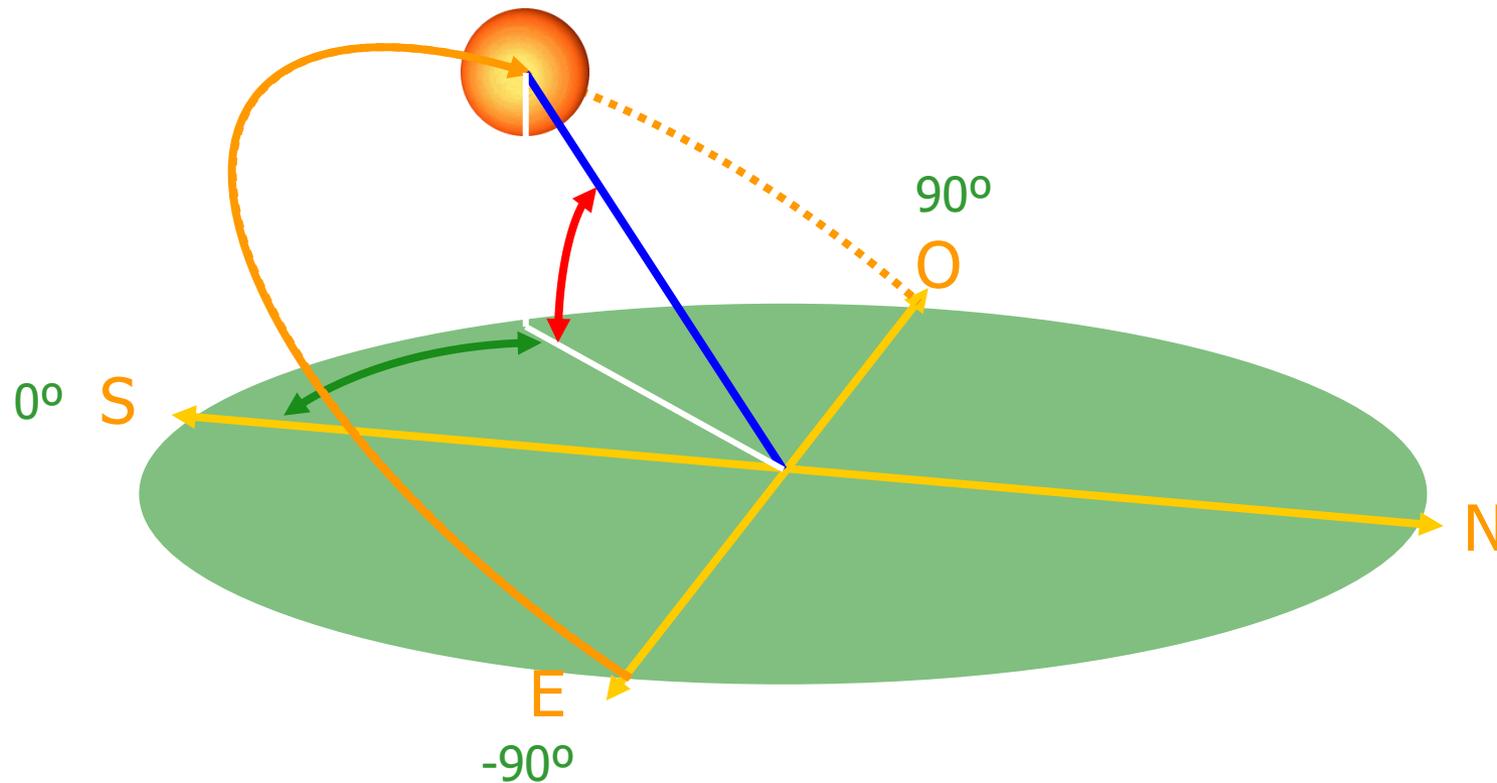
- **Altura** solar pólo norte



Equinócio primavera
Solstício verão
Equinócio outono
Solstício inverno

Coordenadas do sol

- **Altura solar**
- **Azimute solar**



Coordenadas do sol

- **Altura** solar
- **Azimute** solar

$$\cos A_{zs} = \frac{\sin A_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos A_s \cos \phi}$$

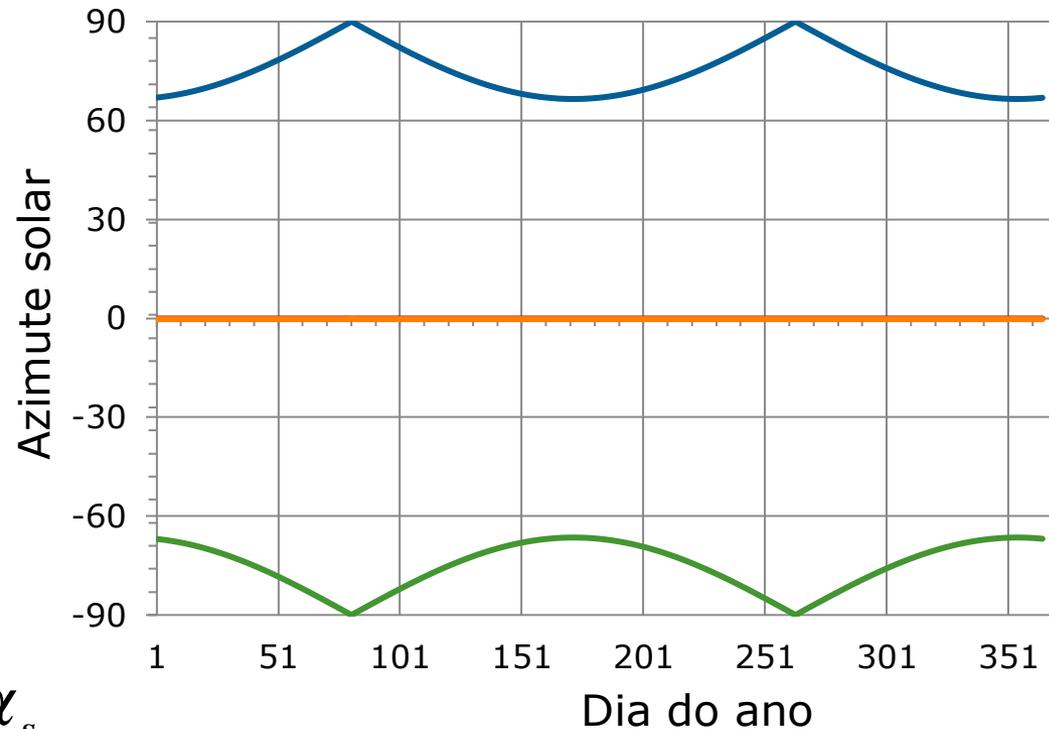
$$\sin A_{zs} = \frac{\cos \delta \sin \alpha_s}{\cos A_s}$$

δ é a declinação solar
 ϕ é a latitude do local
 α_s é o ângulo solar local

Coordenadas do sol

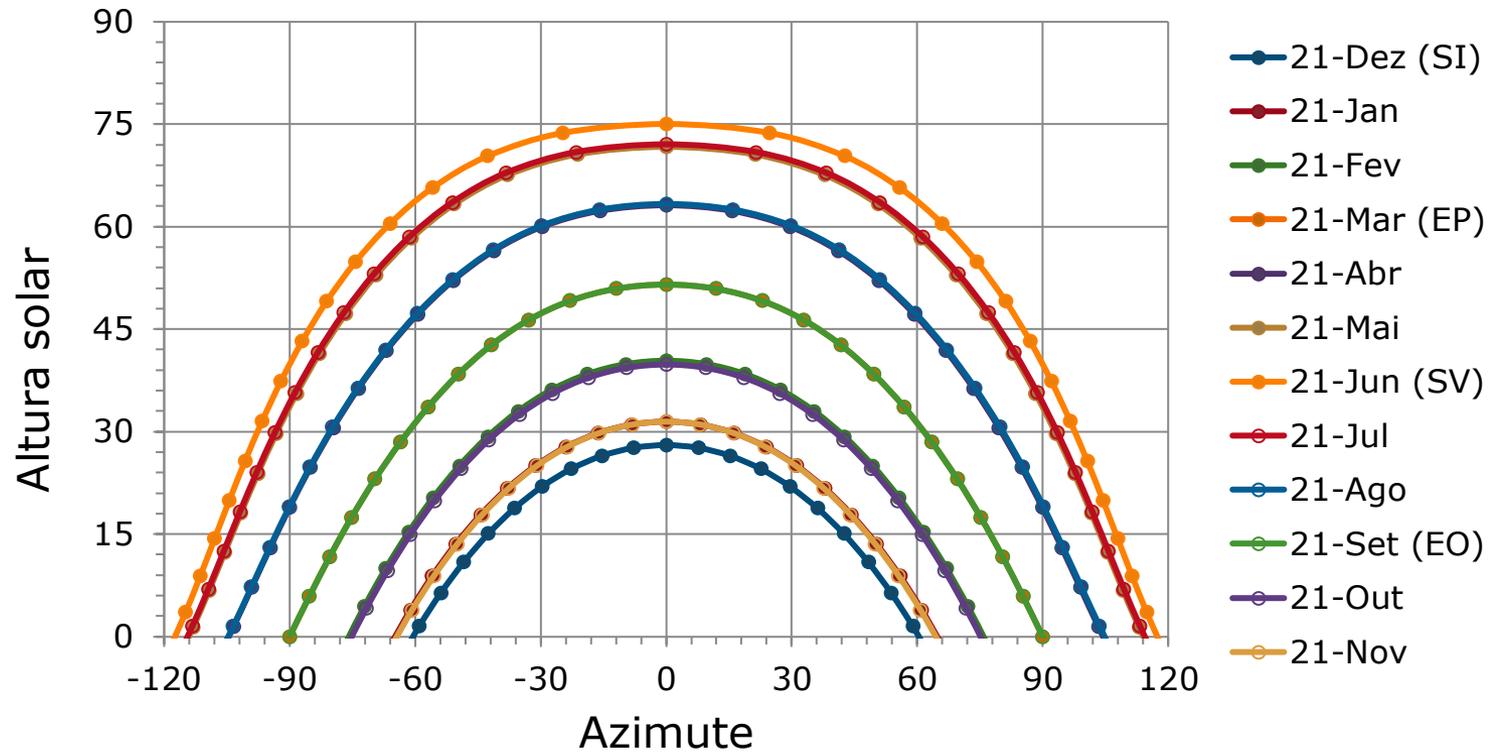
- **Altura** solar
- **Azimute** solar no Equador

18h
12h
6h



$$\sin A_{zS} = \frac{\cos \delta \sin \alpha_s}{\cos A_s}$$

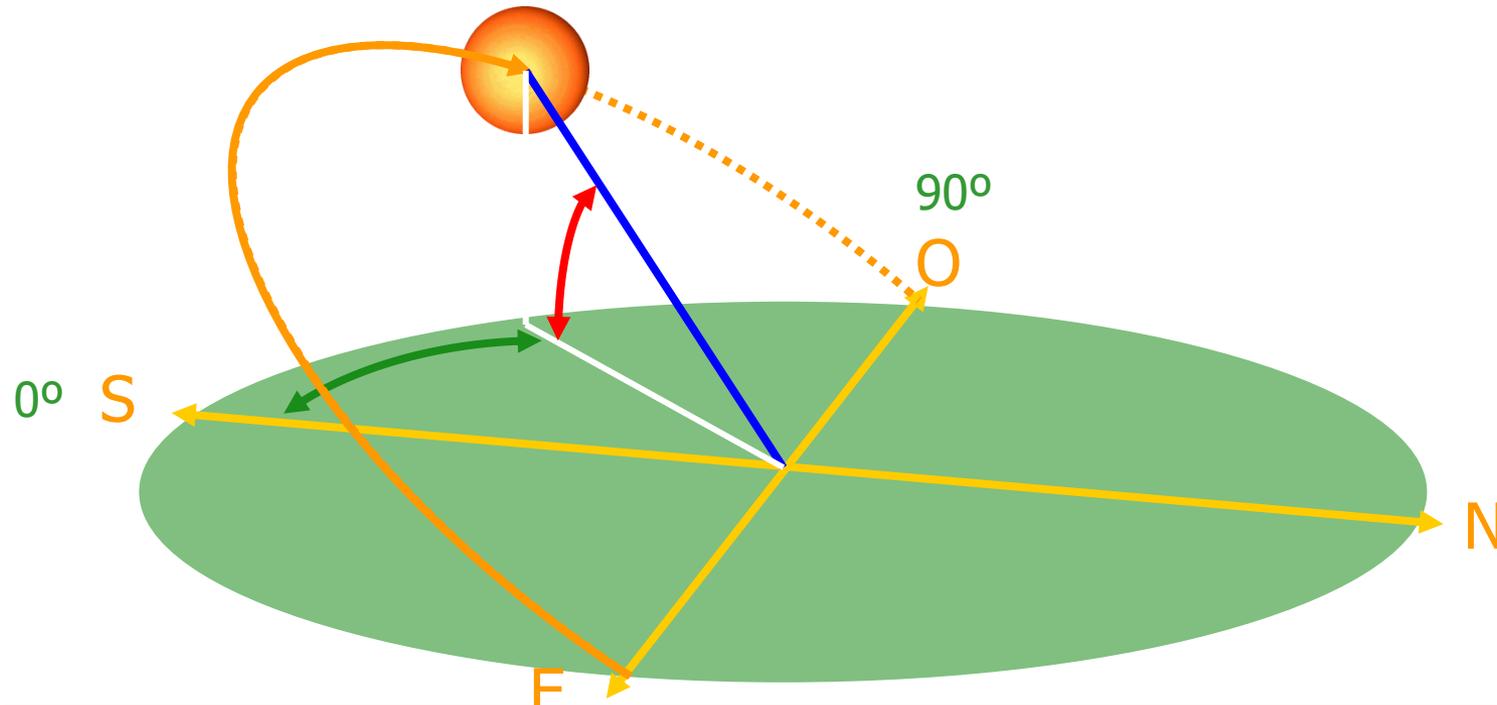
Trajectória do sol



Se radiação directa $I_0 = 1 \text{ kW/m}^2$

(e não houvesse radiação difusa nem reflectida e a absorção fosse igual em todas as latitudes)

$$I_h = I_o \cos(90 - A_s) = I_o \sin A_s$$



Podemos calcular a potência que receberíamos numa superfície horizontal em qualquer sítio em qualquer instante do ano

Energia recebida do sol ao longo de um dia

(e não houvesse radiação difusa nem reflectida e a absorção fosse igual em todas as latitudes)

$$I_h = I_o \cos(90 - A_s) = I_o \sin A_s \quad [\text{kW/m}^2]$$

$$E_{dia} = \int_{dia} I_h dt$$

A isto chamamos
IRRADIÂNCIA

[h/m²]

$$E_{ano} = \int_{ano} I_h dt$$

A isto chamamos
HORAS PICO

[h/m²]

$$\bar{E}_{dia} = \frac{\int_{ano} I_h dt}{365}$$

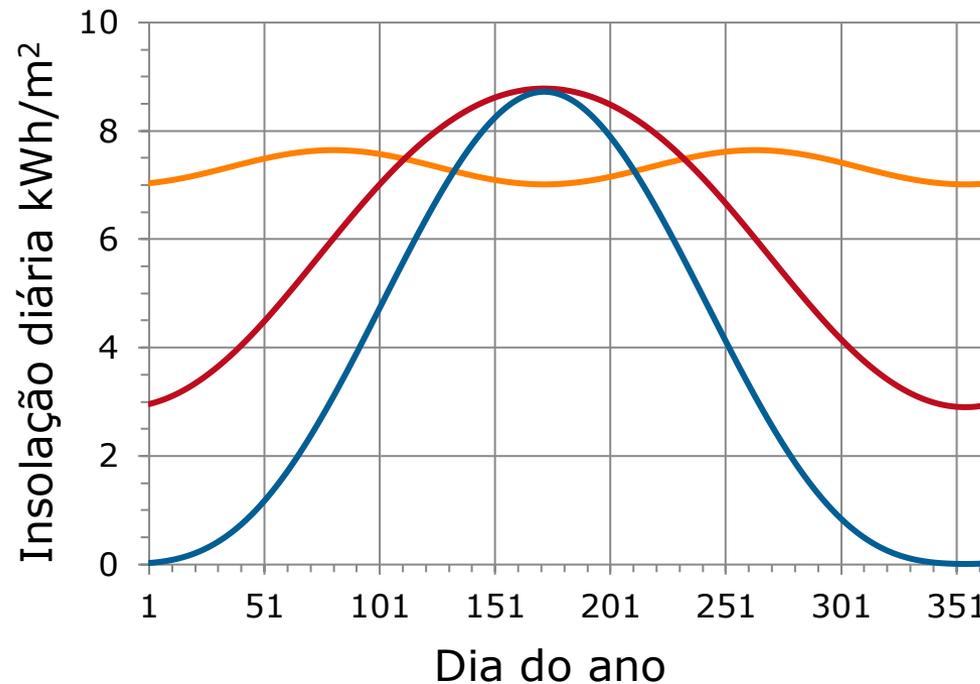
A isto chamamos
INSOLAÇÃO

[h/m²/dia]

Energia recebida do sol ao longo de um dia

(e não houvesse radiação difusa nem reflectida e a absorção fosse igual em todas as latitudes)

$$E_{dia} = \int_{dia} I_h dt$$



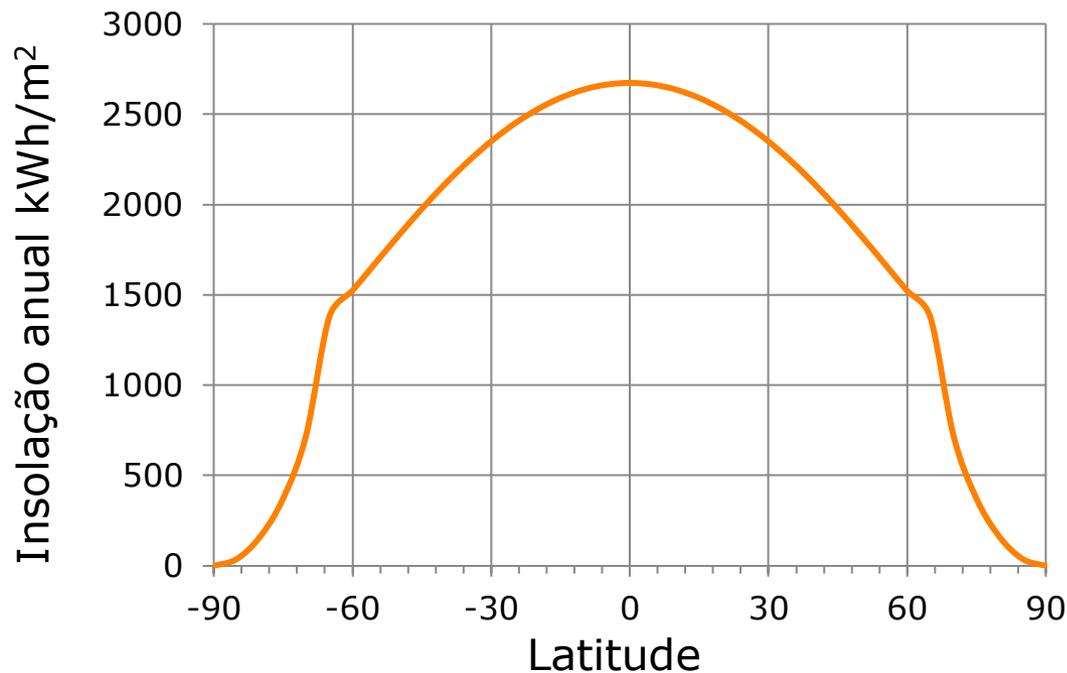
Equador
Lisboa
Círculo ártico

Energia recebida do sol ao longo de um ano

(e não houvesse radiação difusa nem reflectida e a absorção fosse igual em todas as latitudes)

$$E_{dia} = \int_{dia} I_h dt$$

$$E_{ano} = \int_{ano} I_h dt$$



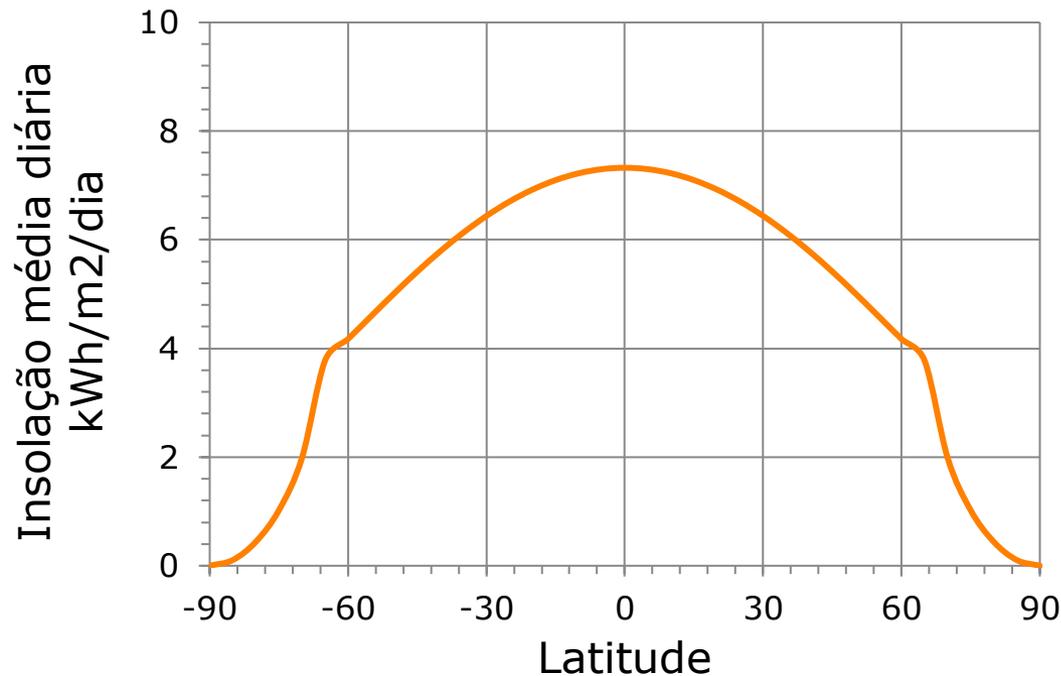
Energia recebida do sol ao longo de um dia

(e não houvesse radiação difusa nem reflectida e a absorção fosse igual em todas as latitudes)

$$E_{dia} = \int_{dia} I_h dt$$

$$E_{ano} = \int_{ano} I_h dt$$

$$\bar{E}_{dia} = \frac{\int I_h dt}{365}$$



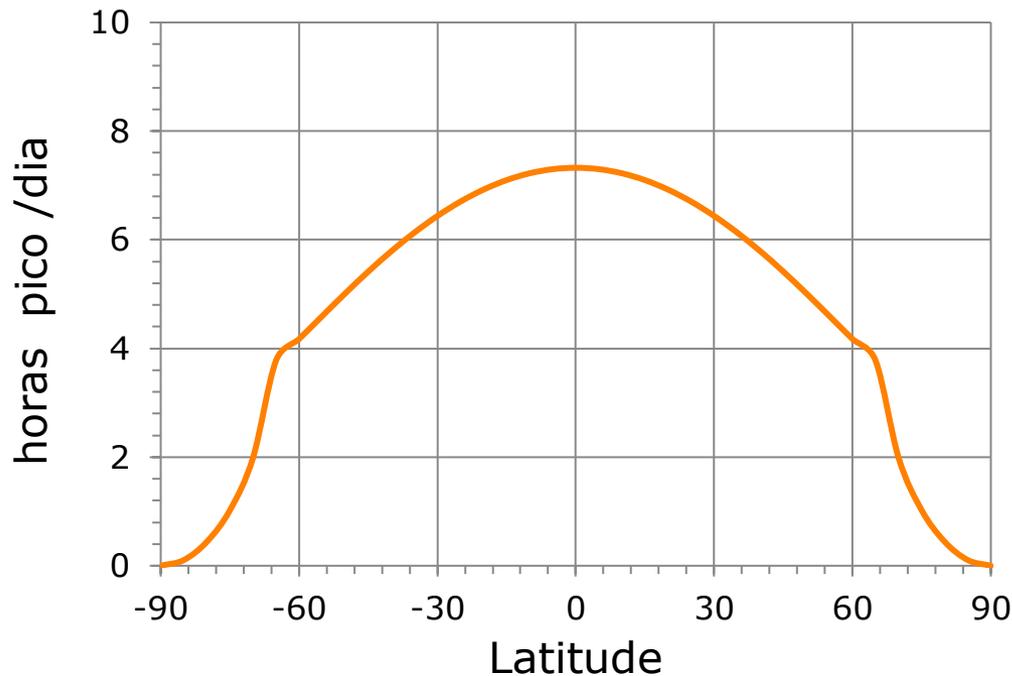
Energia recebida do sol ao longo de um dia

(e não houvesse radiação difusa nem reflectida e a absorção fosse igual em todas as latitudes)

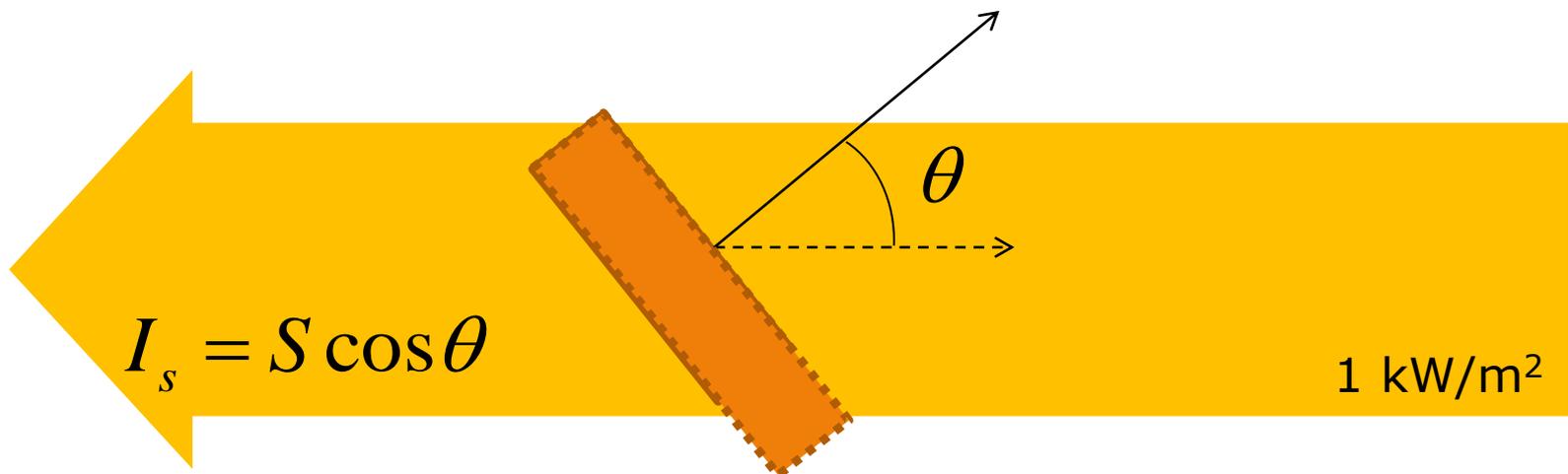
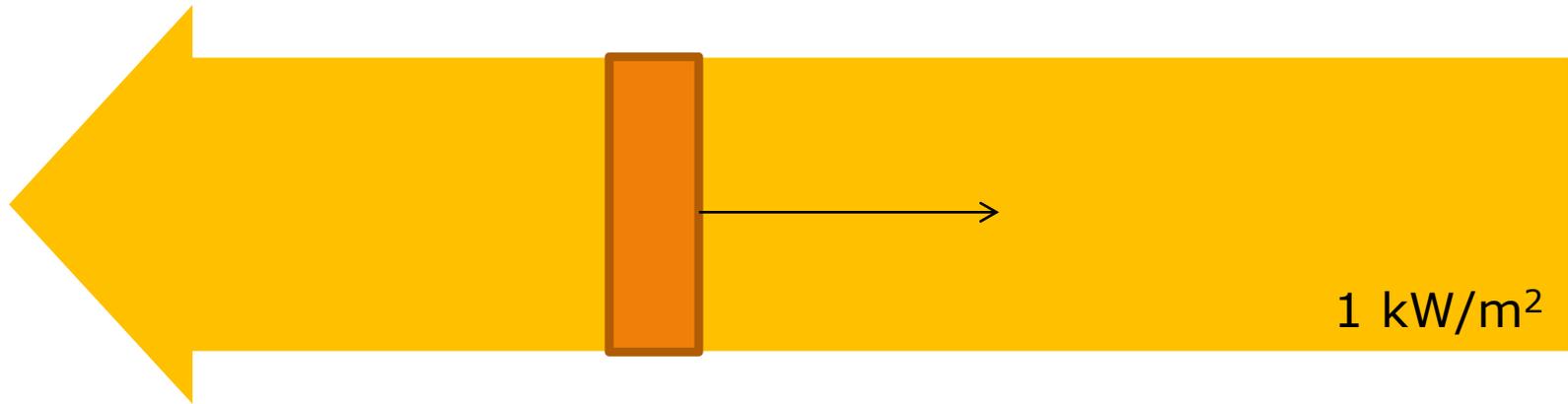
$$E_{dia} = \int_{dia} I_h dt$$

$$E_{ano} = \int_{ano} I_h dt$$

$$\bar{E}_{dia} = \frac{\int I_h dt}{365}$$

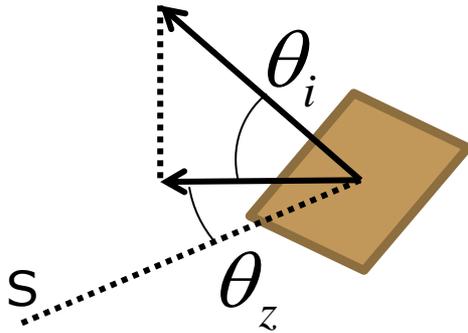


Irradiância depende do ângulo de incidência



Irradiância depende do ângulo de incidência

$$I_S = I_0 (\sin \theta_i \sin A_s + \cos \theta_i \cos A_s \cos(A_{zs} - \theta_z))$$



θ_i - inclinação da superfície

θ_z - azimuth (orientação) da superfície

A_s - altura do sol

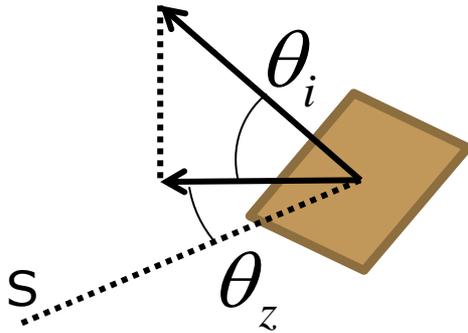
A_{zs} - azimuth do sol

Caso particular superfície **horizontal** ($\theta_i = 90$)

$$I_S = I_0 \sin A_s$$

Irradiância depende do ângulo de incidência

$$I_S = I_0 (\sin \theta_i \sin A_s + \cos \theta_i \cos A_s \cos(A_{zs} - \theta_z))$$



θ_i - inclinação da superfície

θ_z - azimuth (orientação) da superfície

A_s - altura do sol

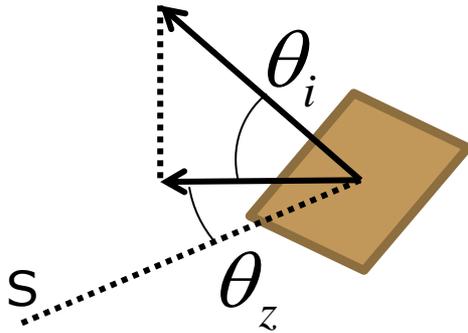
A_{zs} - azimuth do sol

Caso particular superfície **vertical** ($\theta_i = 0$)

$$I_S = I_0 \cos A_s \cos(A_{zs} - \theta_z)$$

Irradiância depende do ângulo de incidência

$$I_S = I_0 \left(\sin \theta_i \sin A_s + \cos \theta_i \cos A_s \cos(A_{zs} - \theta_z) \right)$$



θ_i - inclinação da superfície

θ_z - azimute (orientação) da superfície

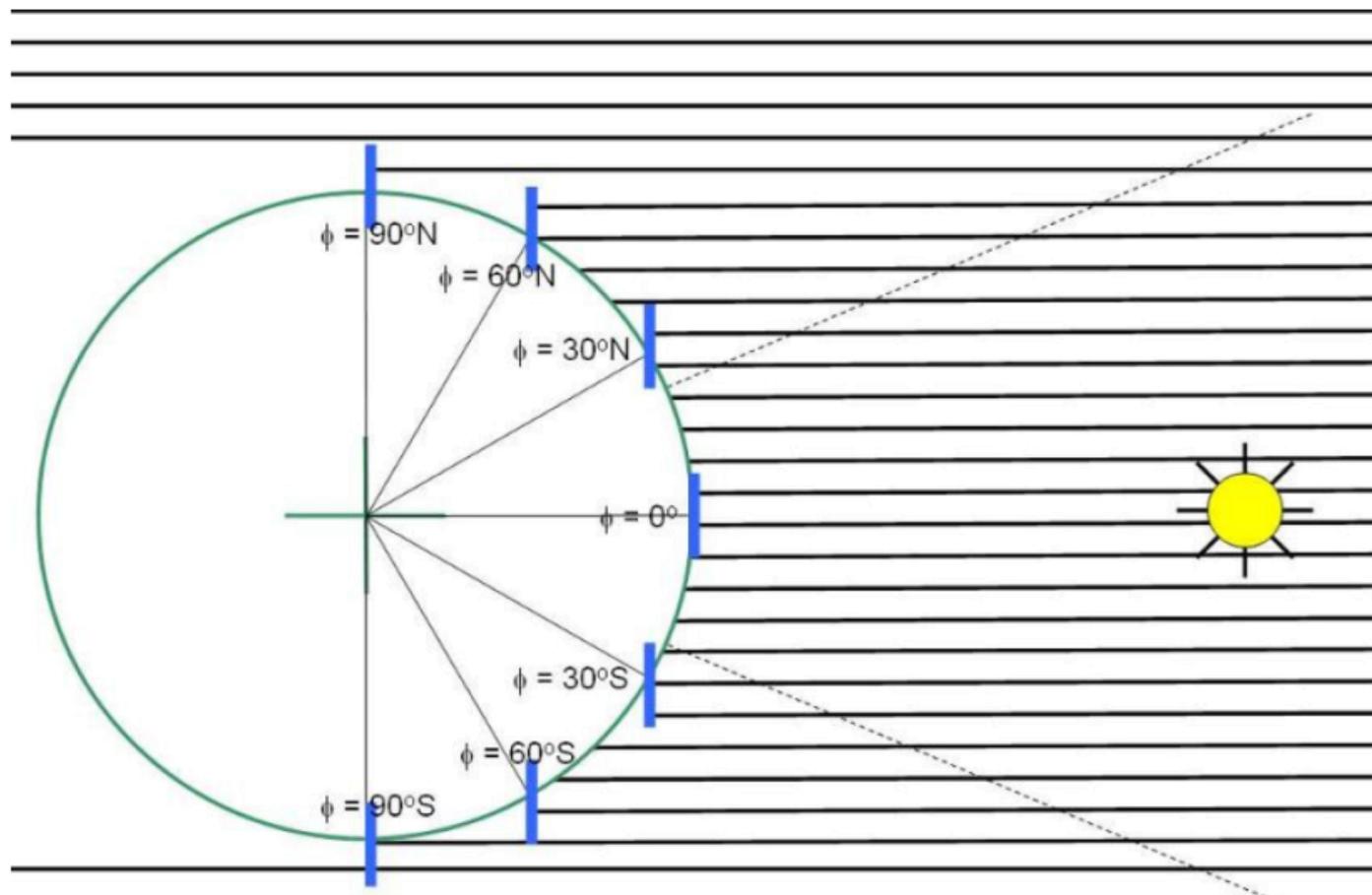
A_s - altura do sol

A_{zs} - azimute do sol

Caso particular superfície **alinhada com o sol**
($\theta_i = A_s$; $\theta_z = A_{zs}$;))

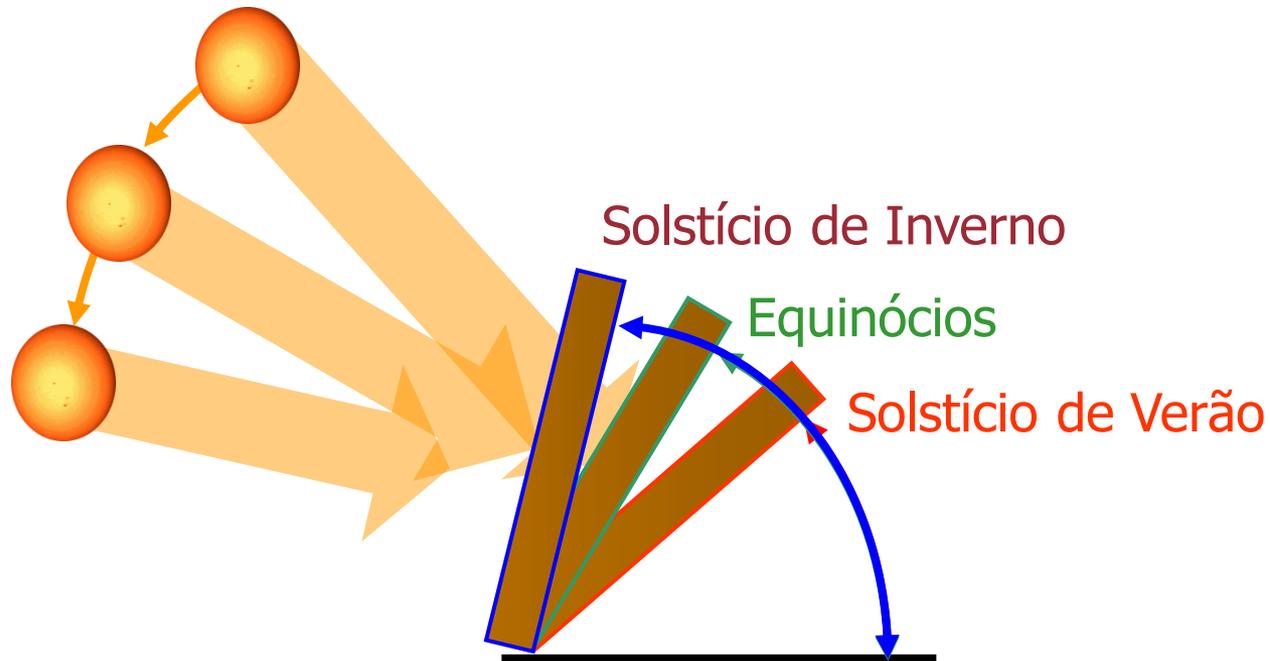
$$I_S = I_0 \left(\sin^2 A_s + \cos^2 A_s \right) = I_0$$

Irradiância depende do ângulo de incidência



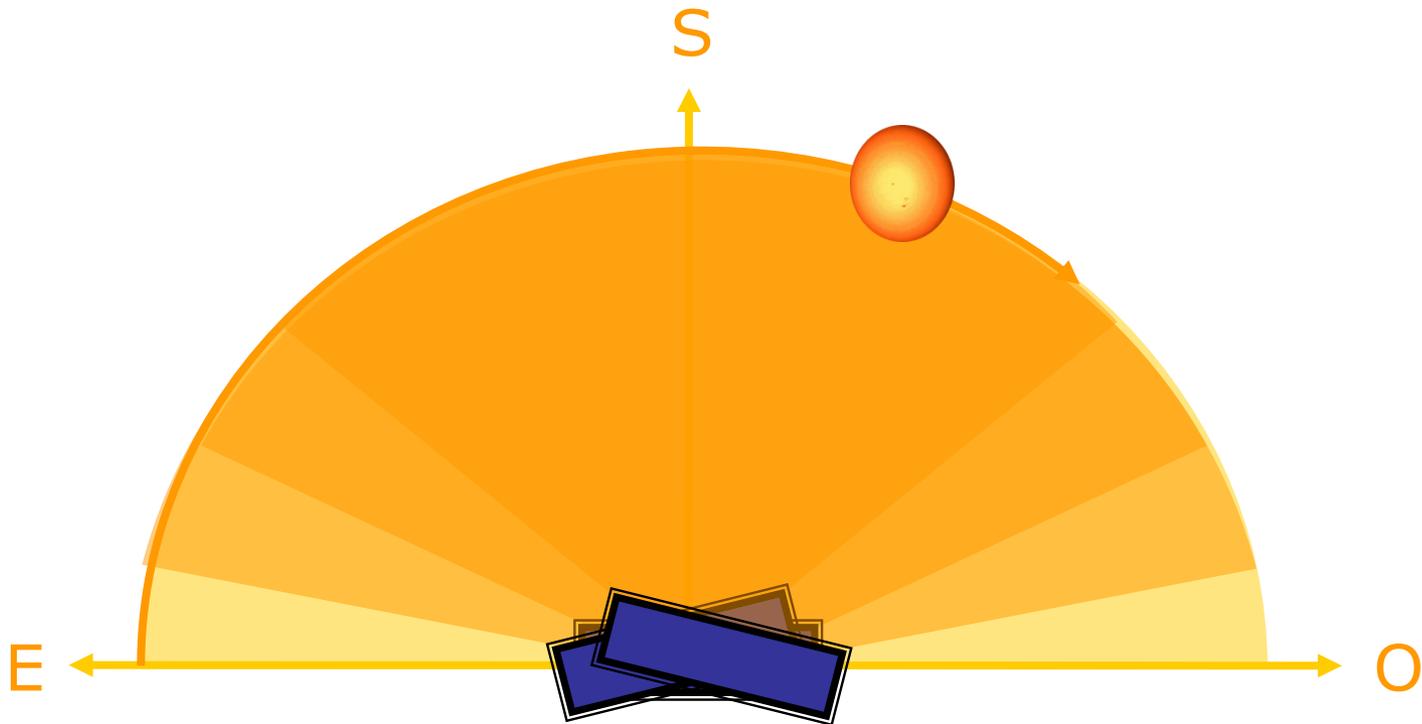
Para maximizar exposição solar
inclinação deve variar com a latitude

Irradiância depende do ângulo de incidência



Inclinação óptima depende da aplicação

Irradiância depende do ângulo de incidência



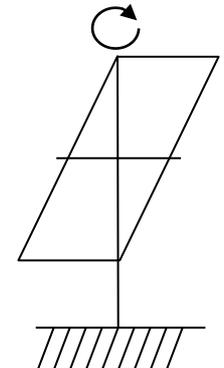
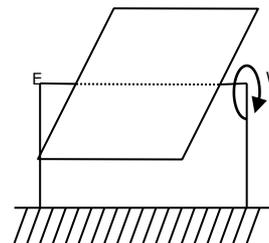
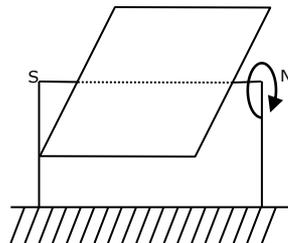
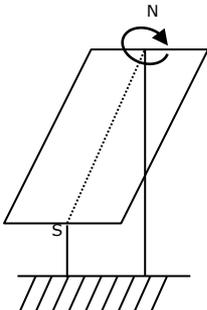
Desvio para Oeste: atraso à captação (1 hora por cada 15°)

Inclinação óptima depende da aplicação

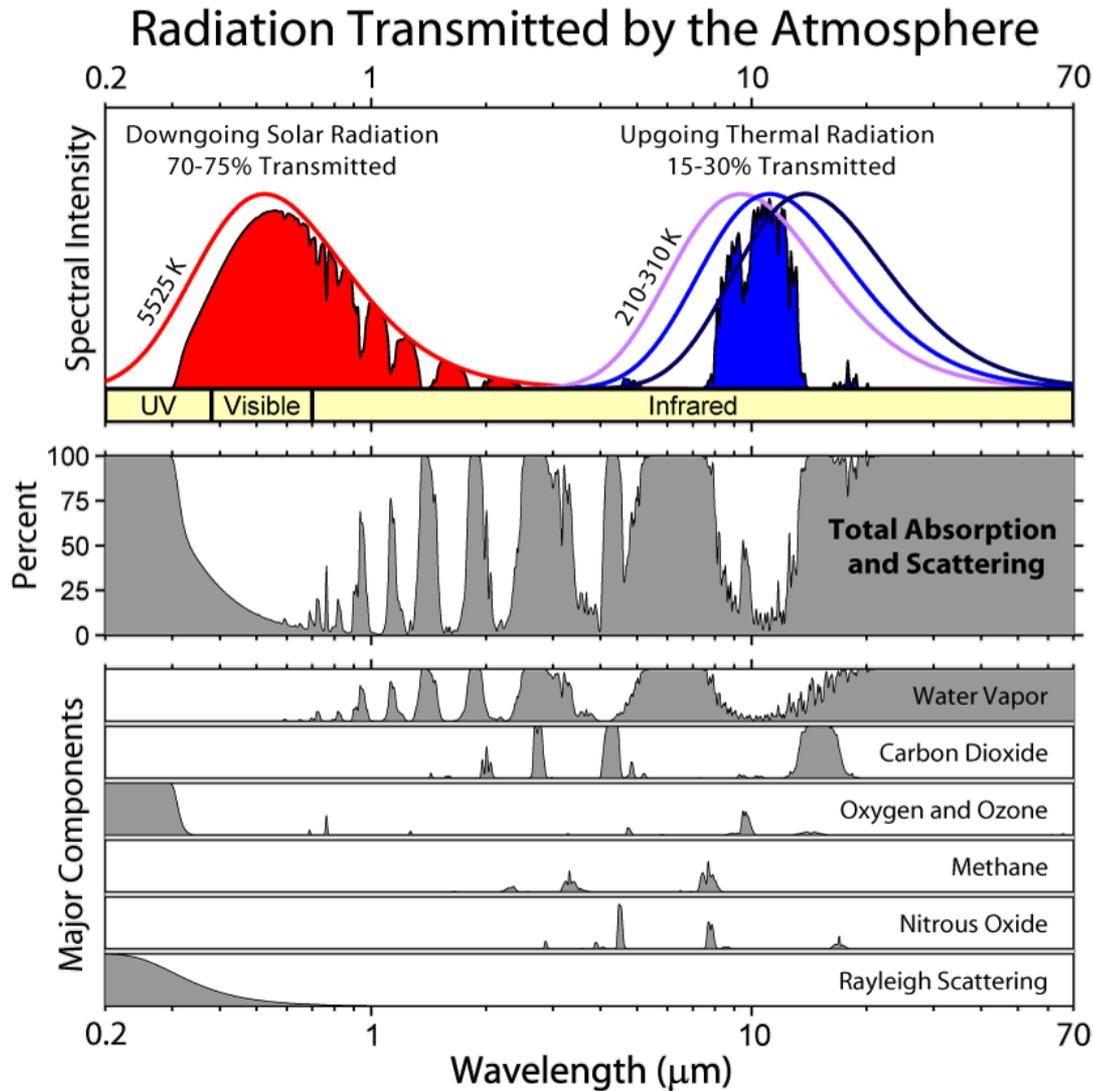
Irradiância depende do ângulo de incidência

Optimização da **inclinação** e **orientação** para o **local** e a **aplicação**.

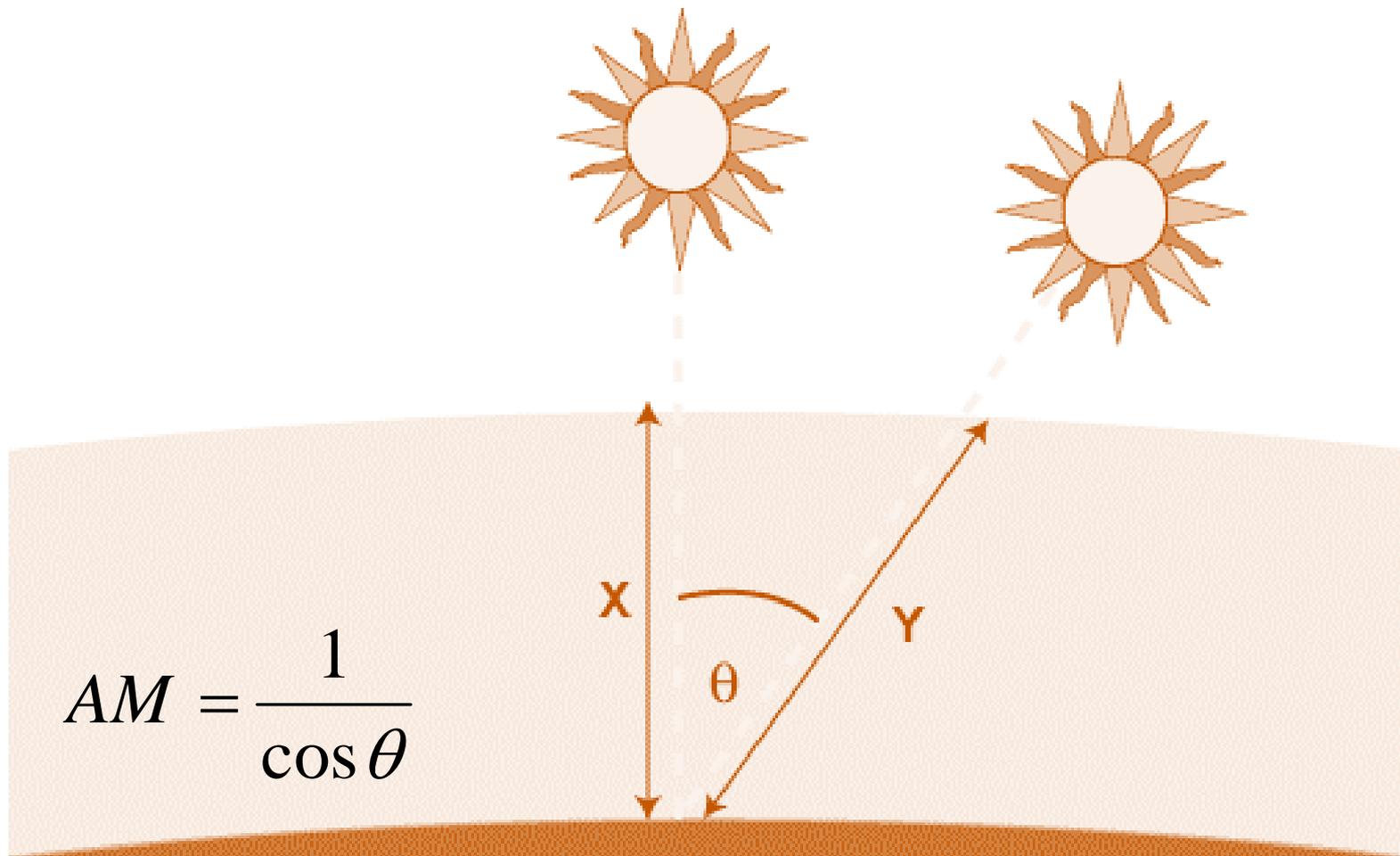
Ou podemos seguir a trajetória ao longo do dia, ou ao longo do ano, usando **seguimento solar**.



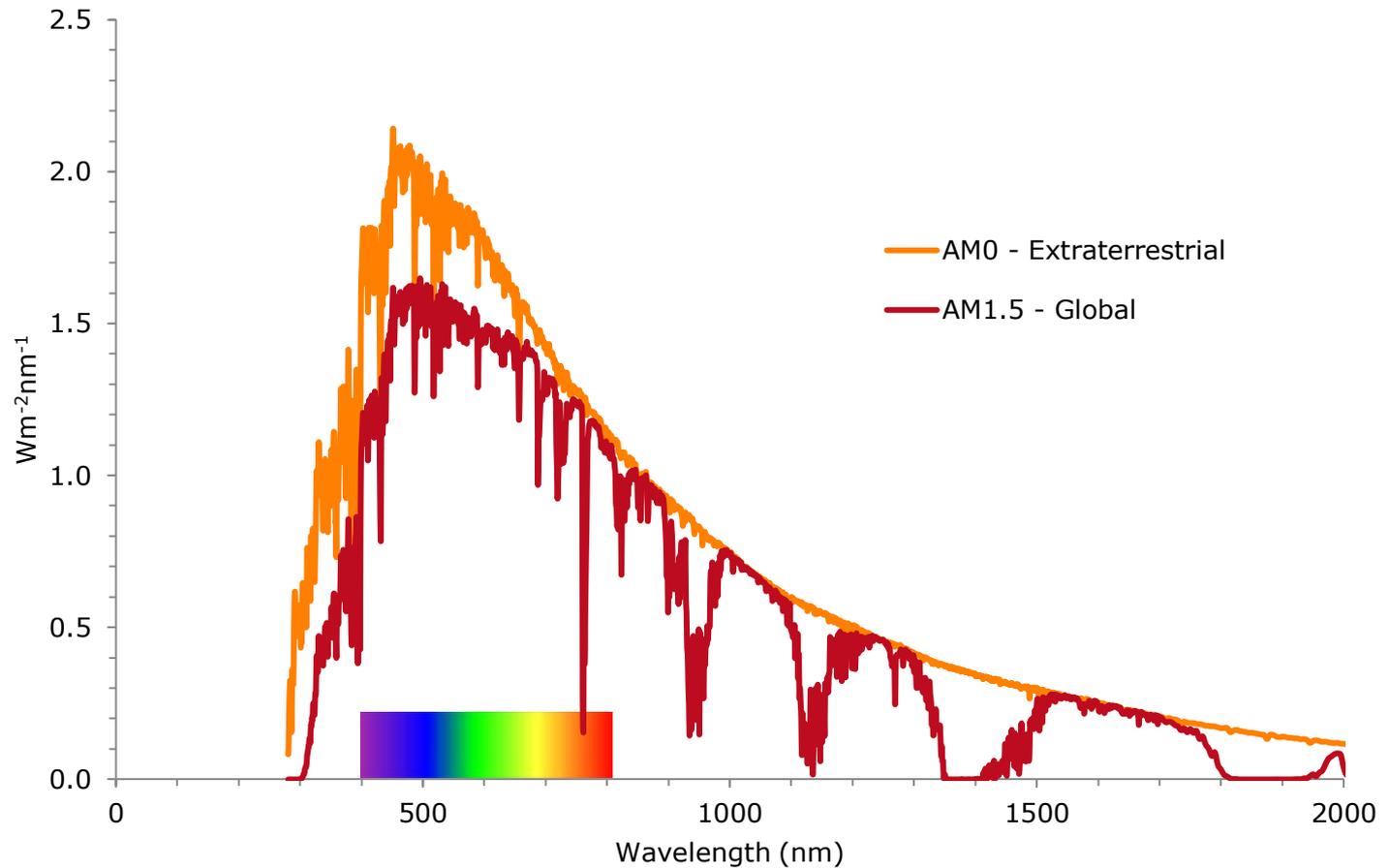
Espectro radiação solar



Absorção proporcional à espessura da atmosfera que radiação atravessa

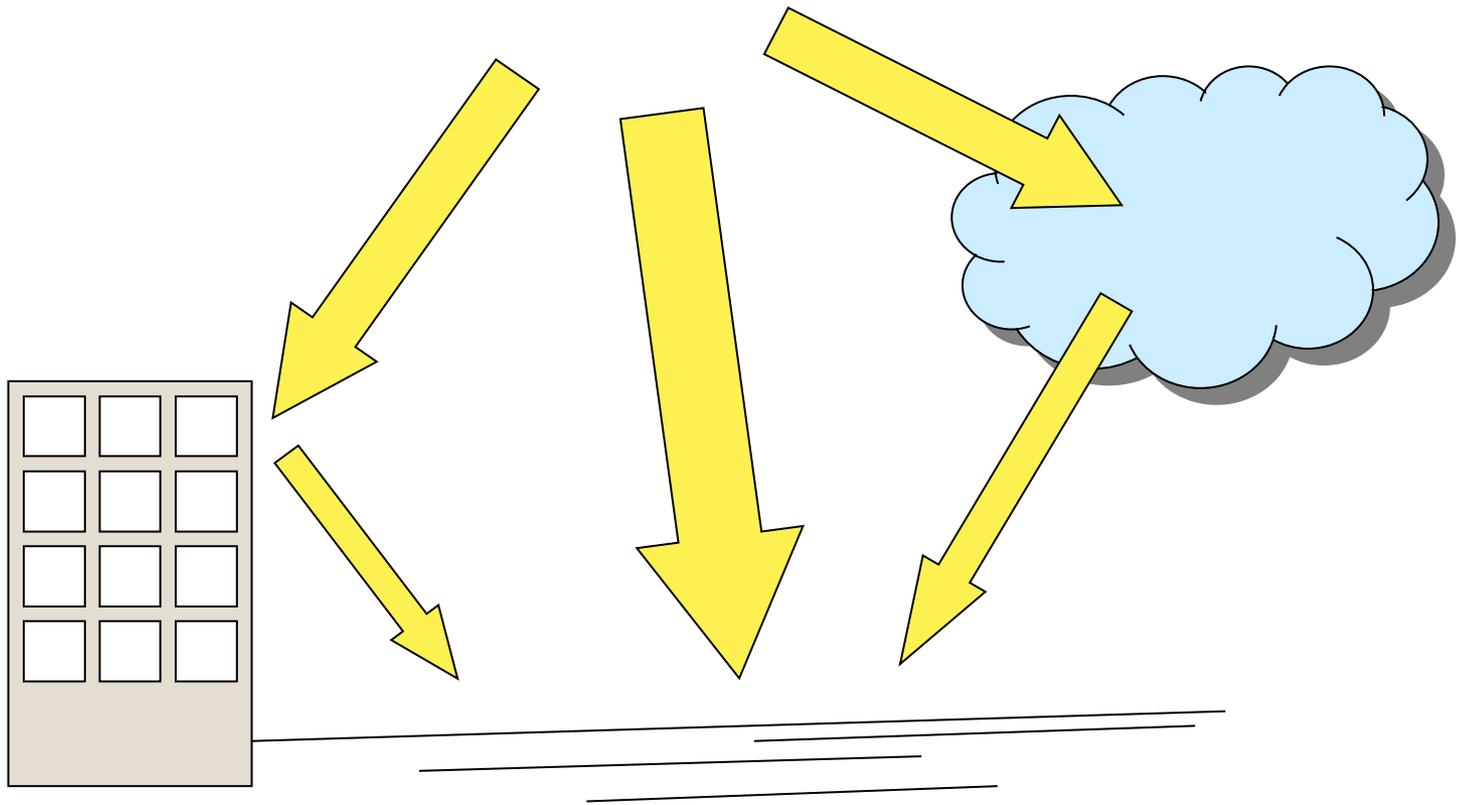


Espectro radiação solar

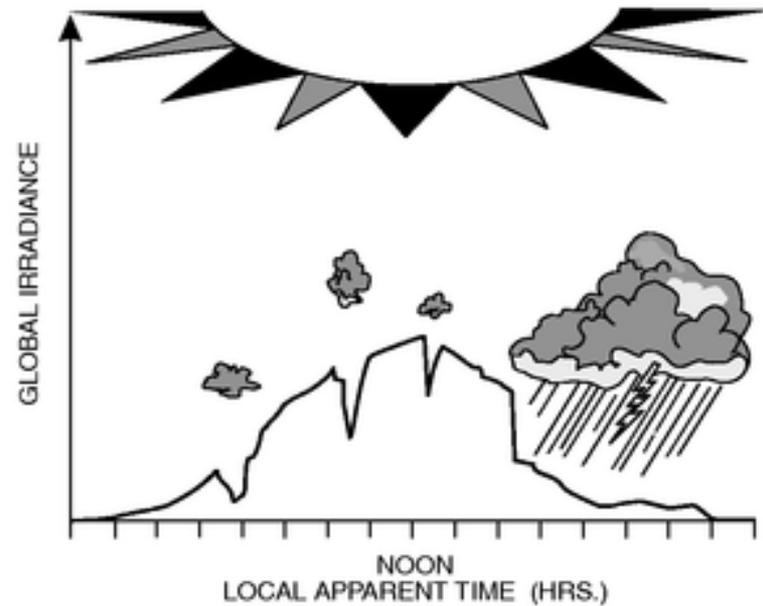
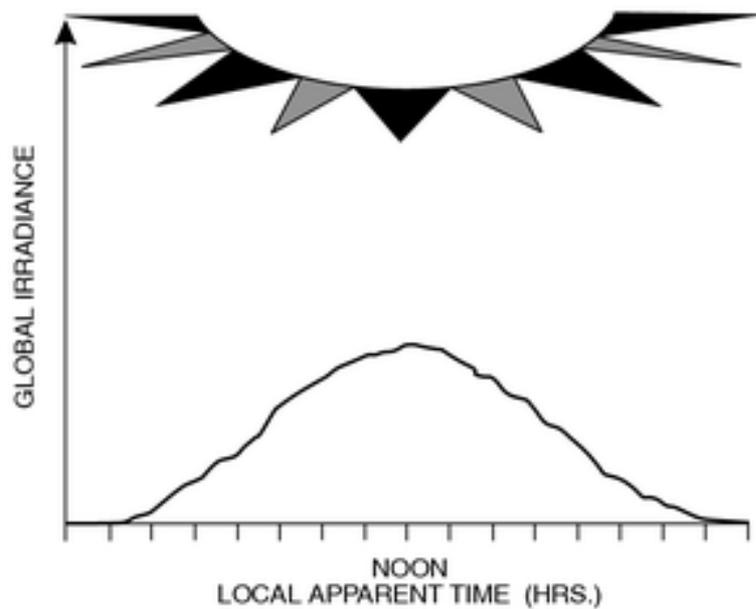


$$\int (AM1.5) d\lambda = 1000 \text{ W/m}^2$$

Radiação solar = directa + difusa + reflectida



Radiação solar = directa + difusa + reflectida



Modelos de radiação difusa

Modelo **isotrópico** – radiação difusa é igual de todas as direcções.

Basta integrar ângulo sólido do céu visível (seria $180 \times 180^\circ$ se superfície horizontal sem obstáculos) e.g. **Sky View Factor** (SVF)

$$\Psi \equiv \frac{I_{d,\beta}}{I_d}$$

← radiação difusa numa superfície inclinação β

← radiação difusa na horizontal

Modelos de radiação difusa

Modelo **isotrópico** – radiação difusa é igual de todas as direcções.

$$\Psi \equiv \frac{I_{d,\beta}}{I_d} = \cos^2(\beta/2)$$

Efeito **horizonte** – radiação difusa mais brilhante junto do horizonte

Efeito **circunsolar** – radiação difusa mais brilhante em torno do disco solar

Estes efeitos dependem da intensidade da radiação difusa!

Modelos de radiação difusa

Modelo *Perez et al*

$$\Psi(I_d, I_b) = (1 - F_1) \cos^2(\beta/2) + F_1 r_b + F_2 \sin \beta$$

F_1 parâmetro que mede efeito circunsolar

F_2 parâmetro que mede efeito horizonte

$$r_b = \frac{\max[0, \cos \theta]}{\max[85^\circ, \sin \alpha]}$$

← ângulo incidência
← altura solar

Dados de radiação medidos

Local	Insolação diária média Wh/m² /dia	Difusa/Global
Lisboa	5020	~28%
Alentejo (interior)	5010	~29%
Braga	4360	~34%
Londres	2950	~55%
Hamburgo	2860	~53%
Níger	6460	~34%

Fonte: PVGIS | <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Dados de radiação medidos

Fonte: PVGIS | <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Dados EUROPA

(resolução 1-km, 1981-1990)

Dados estações meteorológicas (cf Šúri et al., 2005) e
Temperatura ambiente (1995-2003, cf Huld et al., 2006)

Dados Africa, Sudeste Asiático, Mediterraneo

(resolução 2-km, 1985-2004)

Dados satélite HelioClim1 processado com dados Meteosat

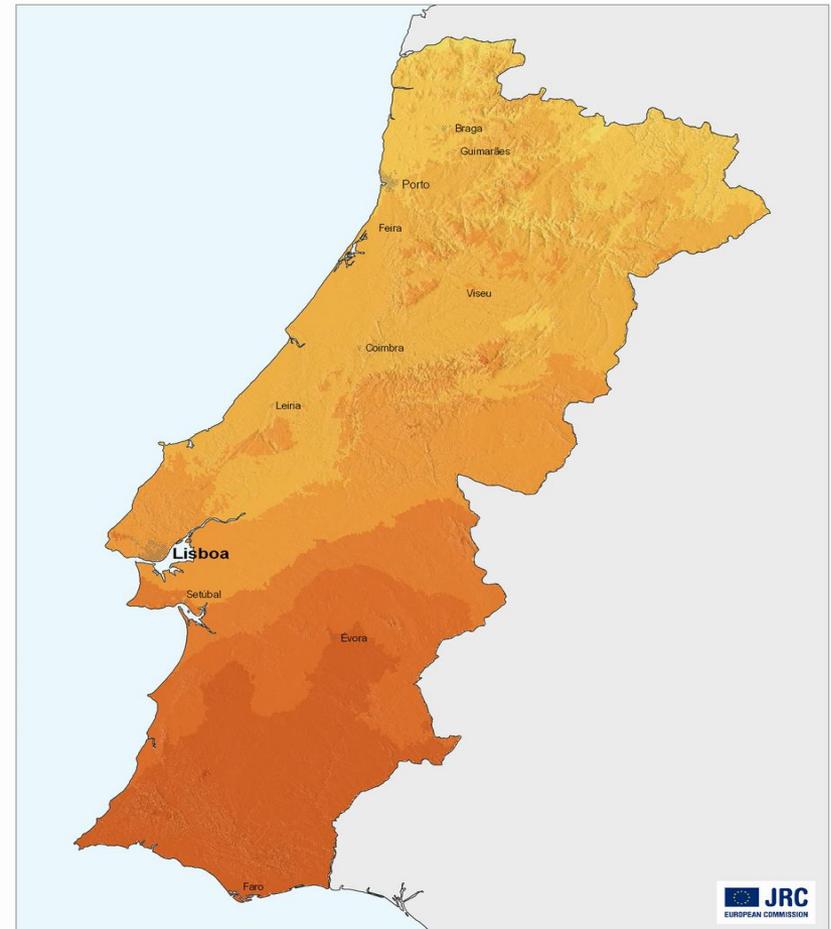
Dados de radiação medidos

Fonte: PVGIS | <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>



Global irradiation and solar electricity potential
Horizontally mounted photovoltaic modules

Portugal

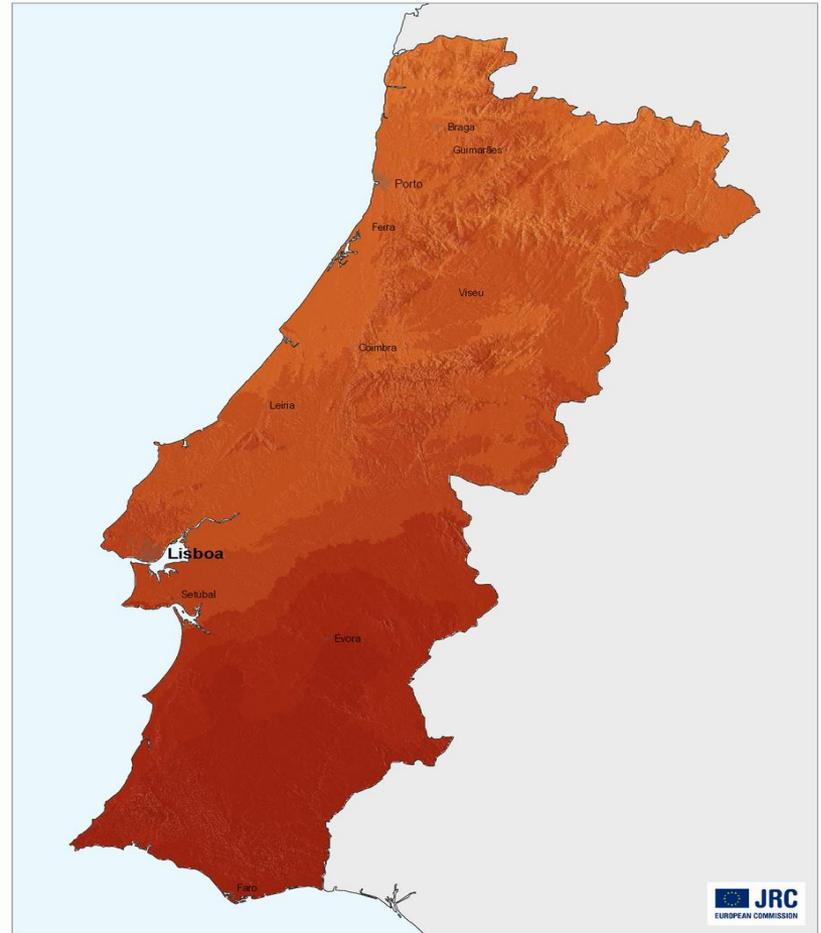


Dados de radiação medidos

Fonte: PVGIS | <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Global irradiation and solar electricity potential
Optimally-inclined photovoltaic modules

Portugal



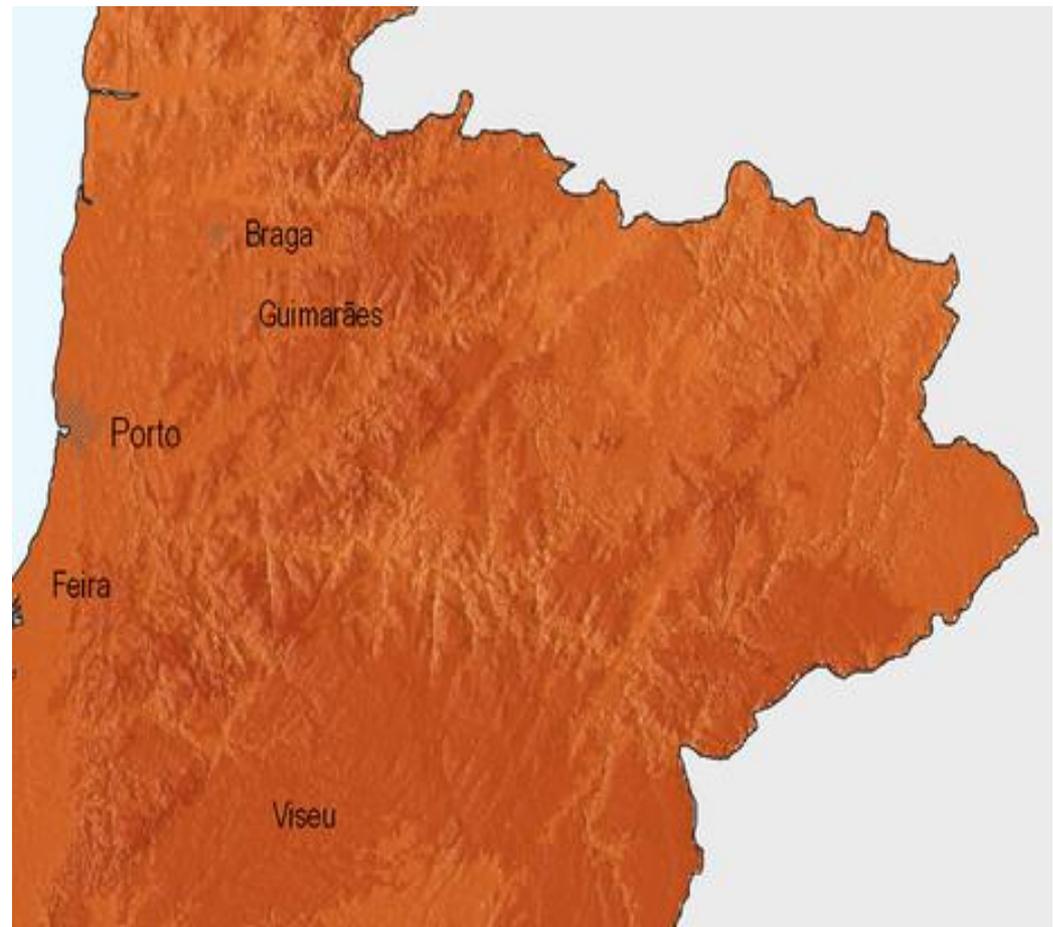
Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]

1700 1800 1900 2000>



Dados de radiação medidos

Fonte: PVGIS | <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>



Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]

1700 1800 1900 2000>



1275 1350 1425 1500>

Monthly Solar Irradiation

PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 38°45'45" North, 9°10'44" West, Elevation: 131 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Optimal inclination angle is: 34 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	H_k	H_{opt}	$H(90)$	I_{opt}	T_L	D/G	T_{24h}	N_{DD}
Jan	2140	3500	3490	62	2.9	0.45	10.5	194
Feb	2710	3790	3280	53	3.1	0.47	11.4	145
Mar	4360	5440	3930	42	3.7	0.37	13.8	75
Apr	5060	5380	3000	25	3.7	0.42	15.2	61
May	6150	5930	2580	14	4.4	0.39	17.8	11
Jun	6910	6320	2340	5	3.8	0.35	21.3	4
Jul	7050	6590	2520	9	3.9	0.32	23.0	2
Aug	6450	6640	3210	21	3.8	0.31	23.5	4
Sep	5070	6010	3930	36	3.4	0.34	21.3	9
Oct	3580	4920	4070	50	3.3	0.38	18.1	37
Nov	2270	3500	3340	59	2.0	0.49	13.7	154
Dec	1900	3200	3300	64	2.0	0.49	11.1	187
Year	4480	5110	3250	34	3.3	0.37	16.7	883

H_k : Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day)

H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m²/day)

$H(90)$: Irradiation on plane at angle: 90deg. (Wh/m²/day)

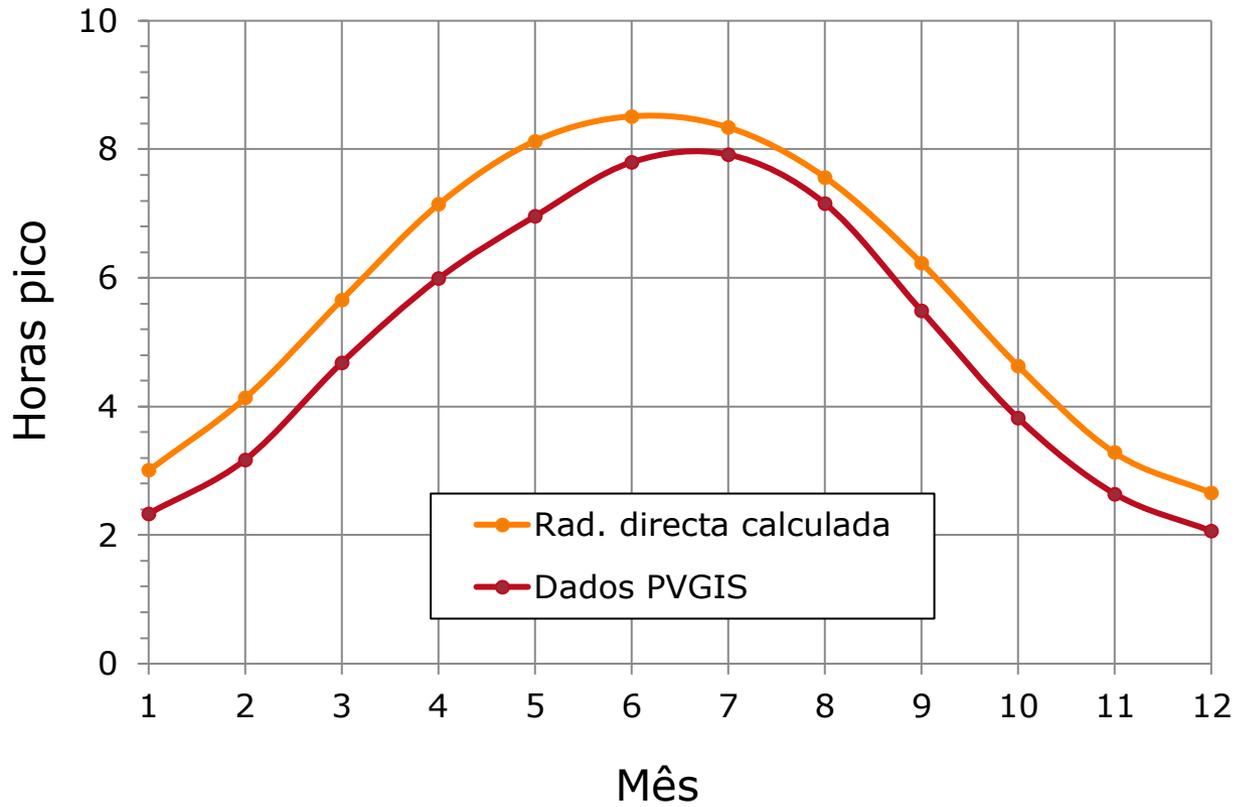
I_{opt} : Optimal inclination (deg.)

T_L : Linke turbidity (-)

D/G : Ratio of diffuse to global irradiation (-)

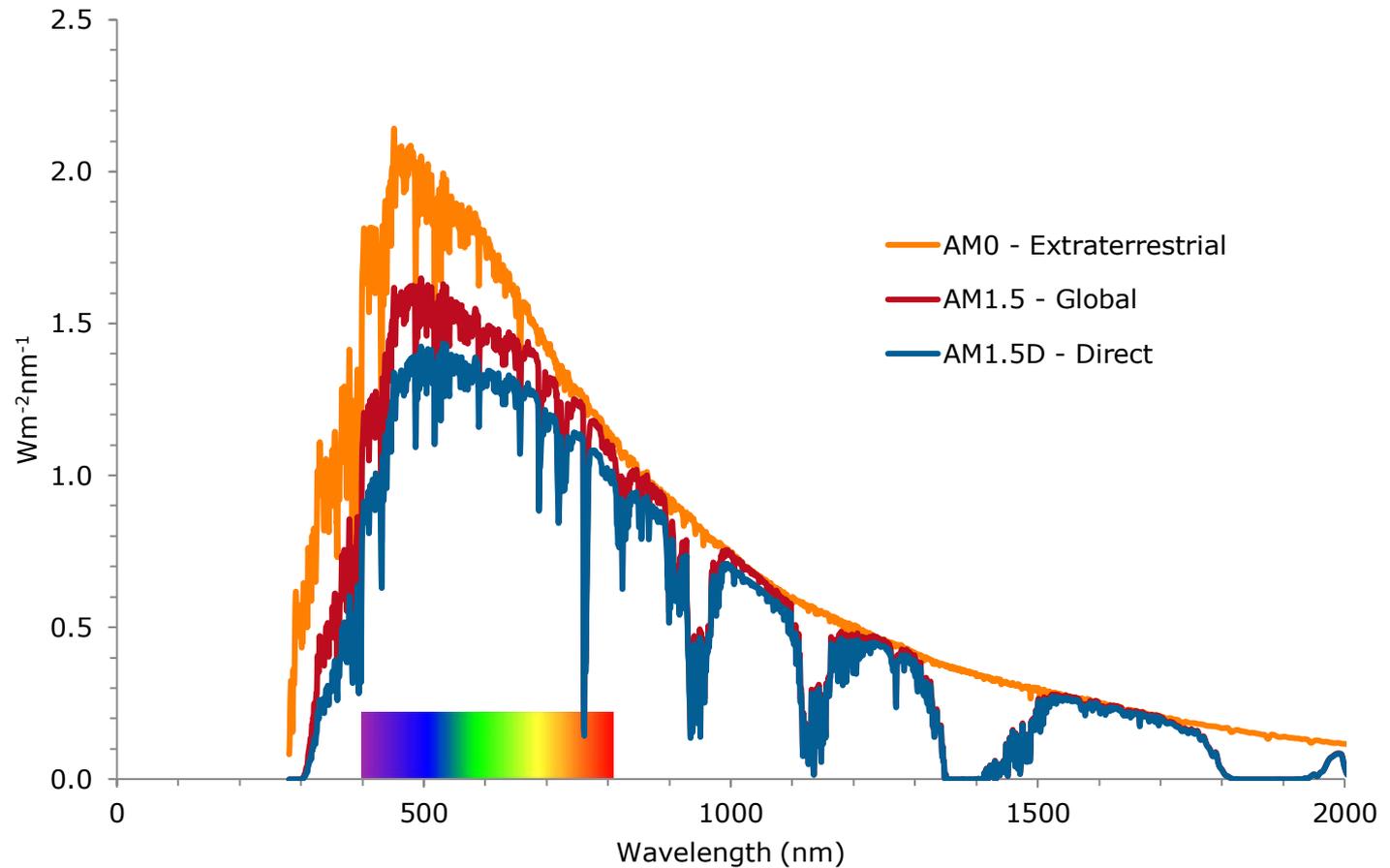
T_{24h} : 24 hour average of temperature (°C)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

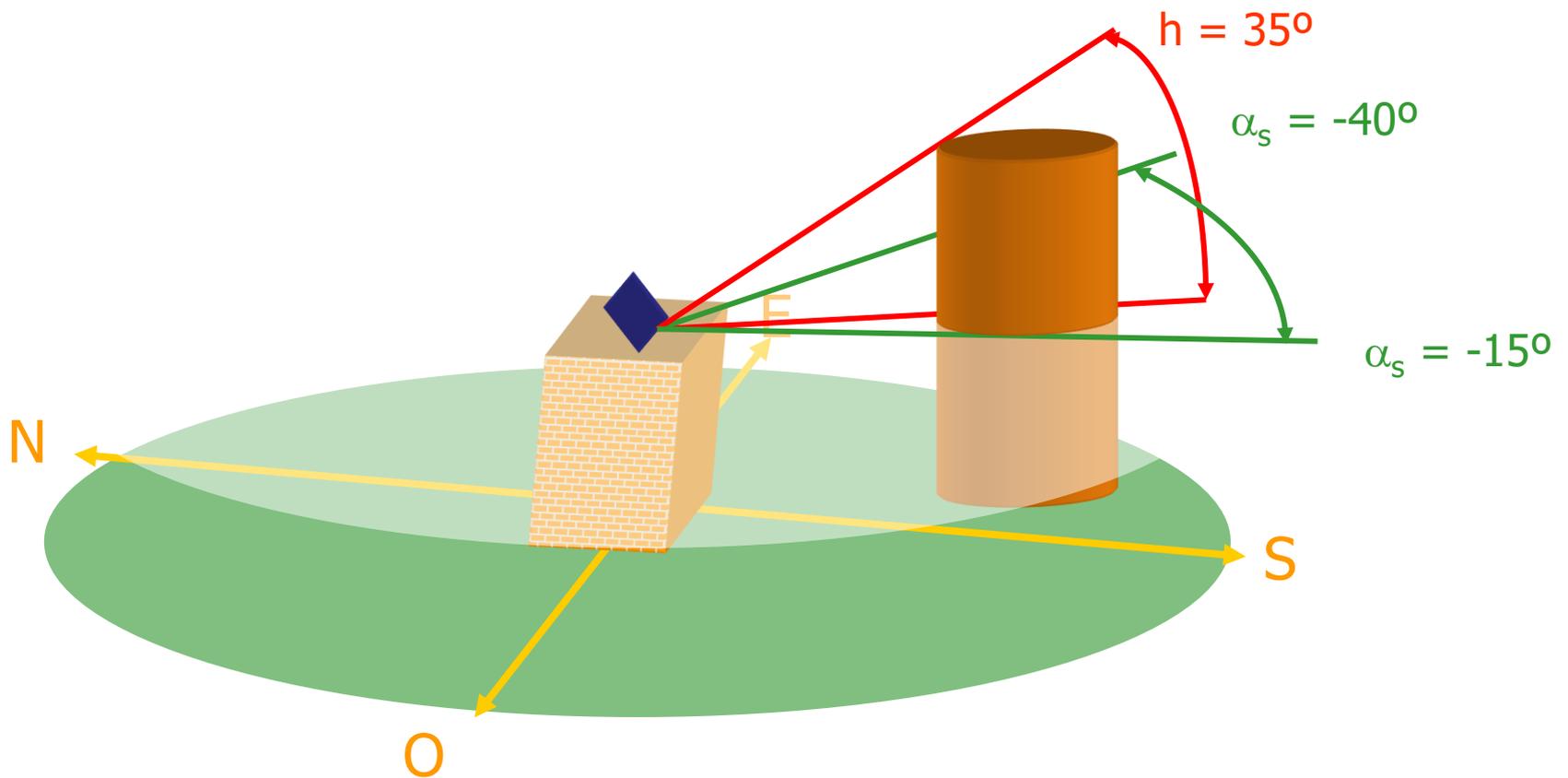


Porque razão são diferentes?

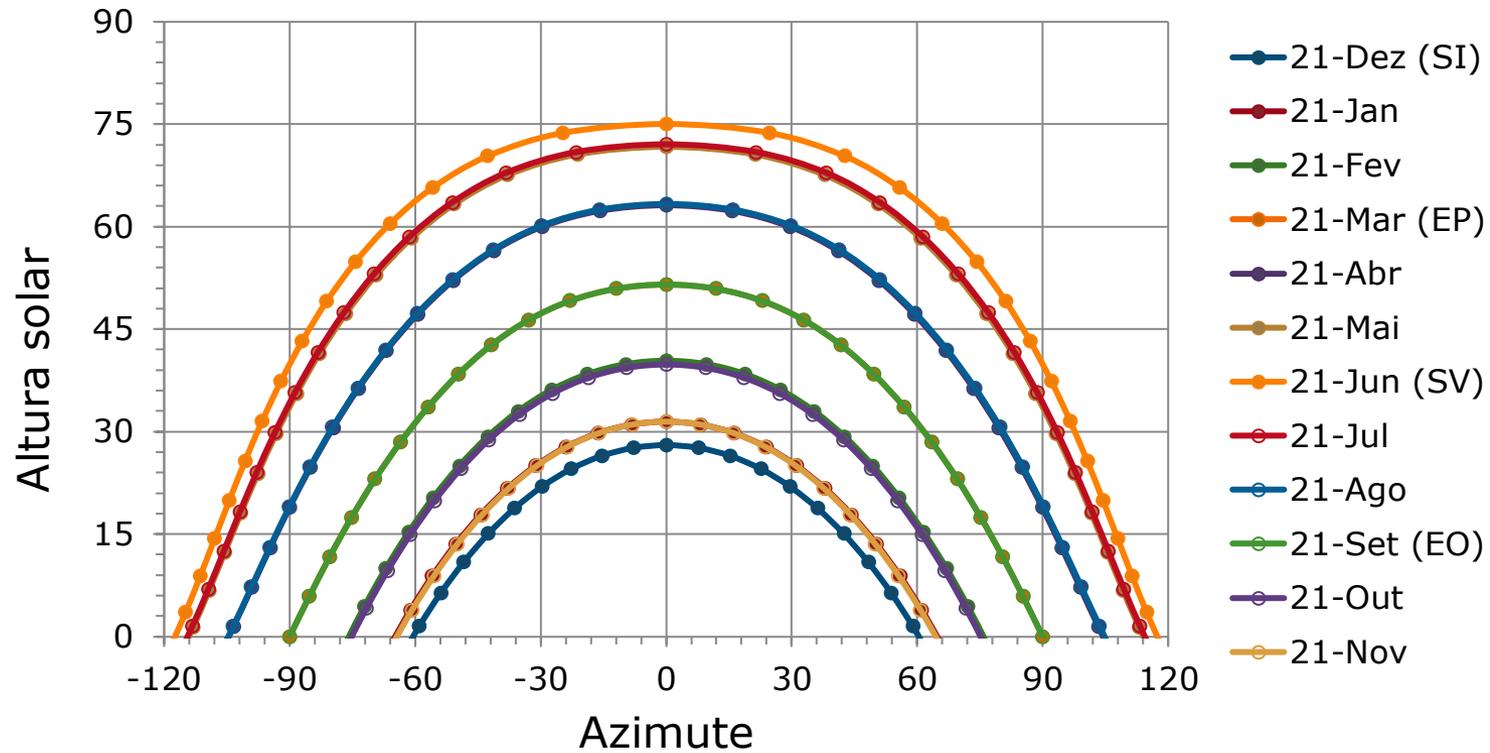
Espectro radiação solar



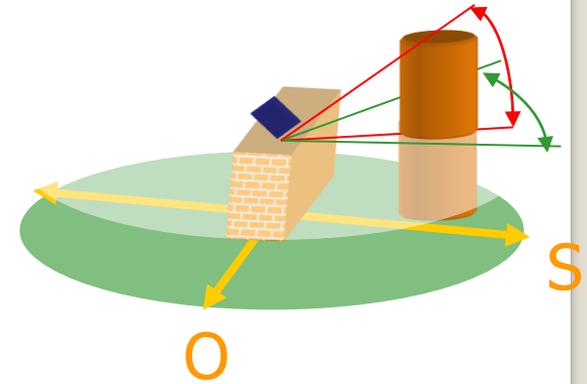
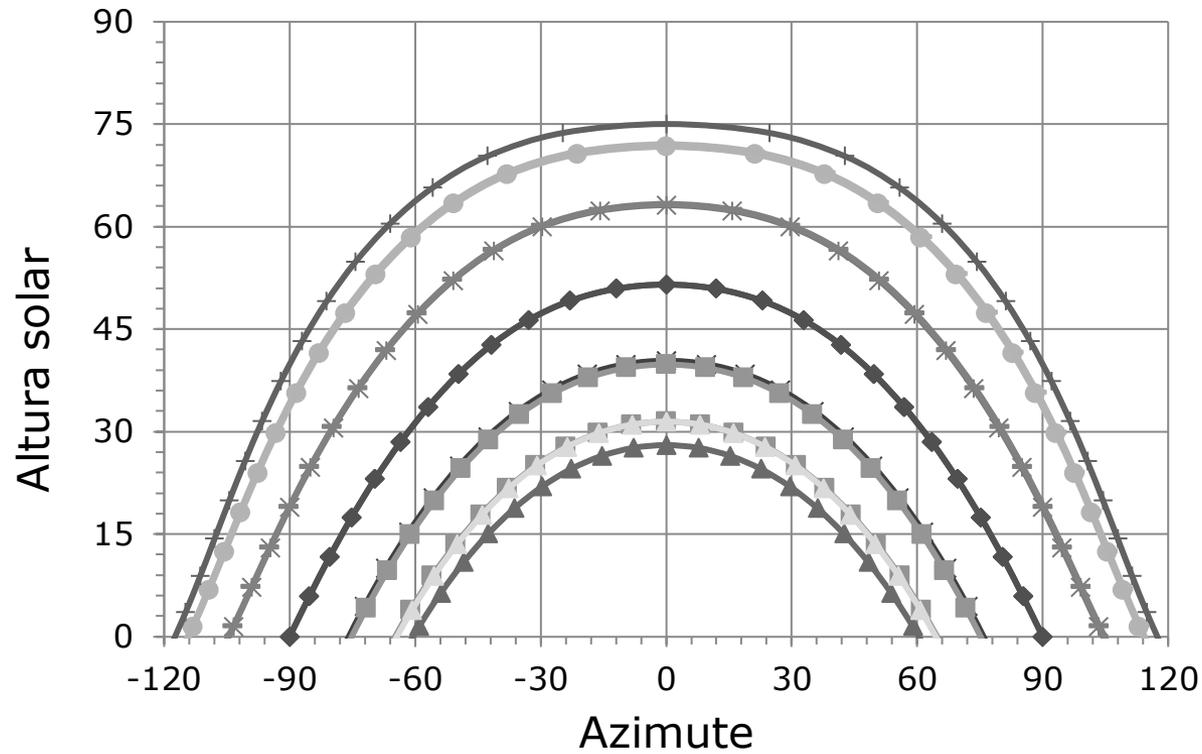
Sombreamentos



Sombreamentos



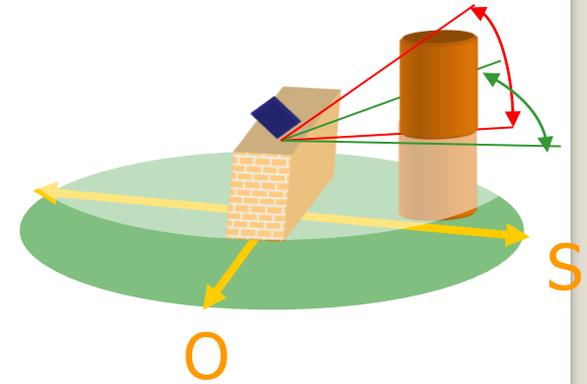
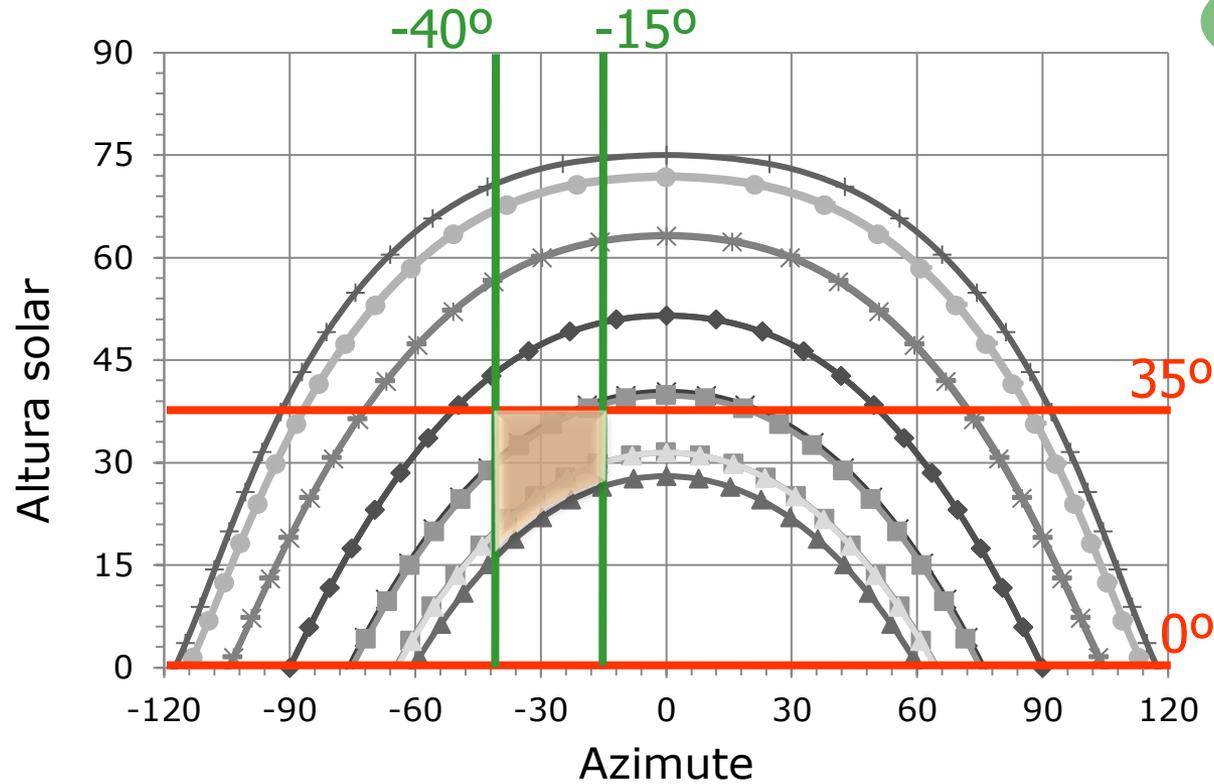
Sombreamentos



$$h < 35^\circ$$

$$-40^\circ < \alpha_s < -15^\circ$$

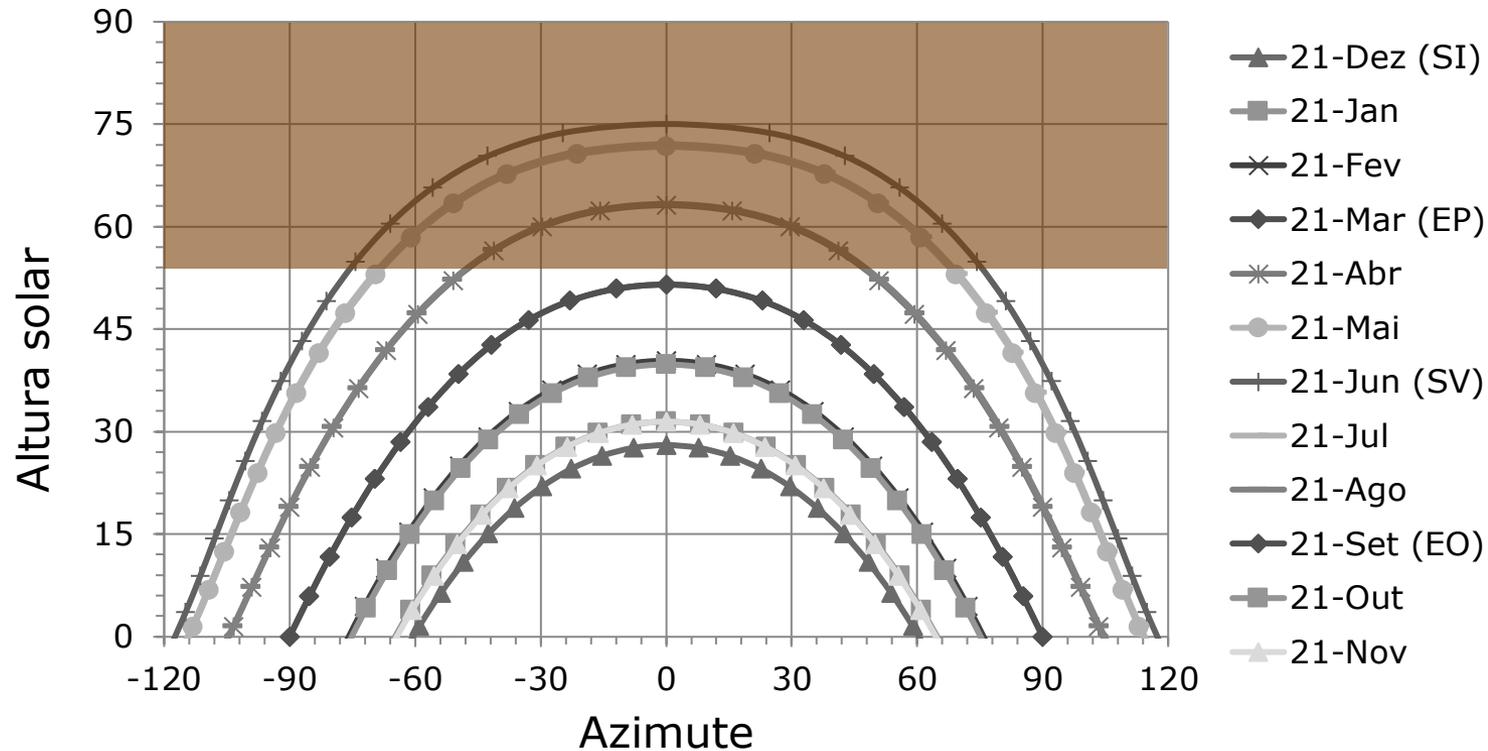
Sombreamentos



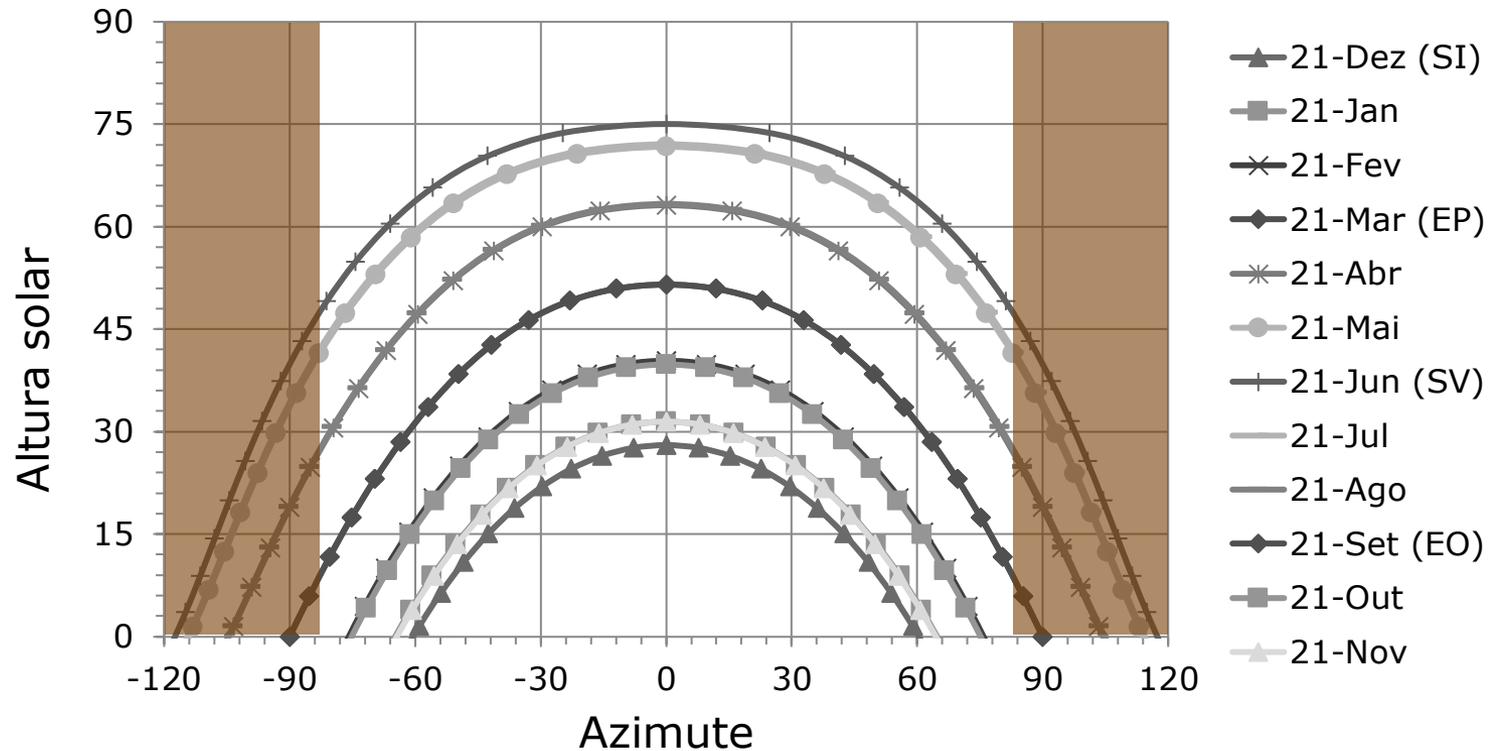
$$h < 35^\circ$$

$$-40^\circ < \alpha_s < -15^\circ$$

Sombreamentos – palas para o verão



Sombreamentos – palas para o verão



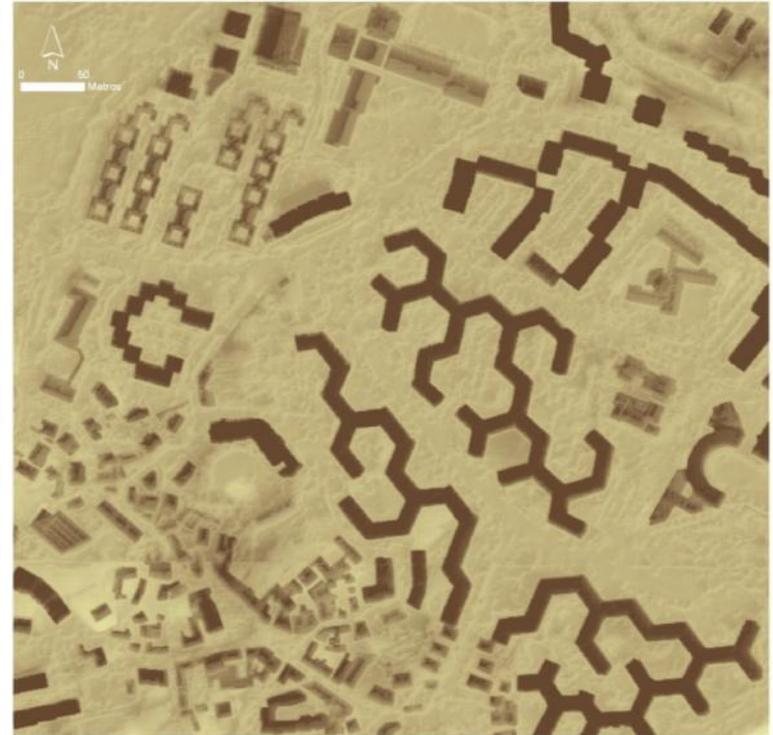
Sombreamentos



Localização da área de estudo

 Área de estudo

Carnaxide (38.43° N, 9.8 W)



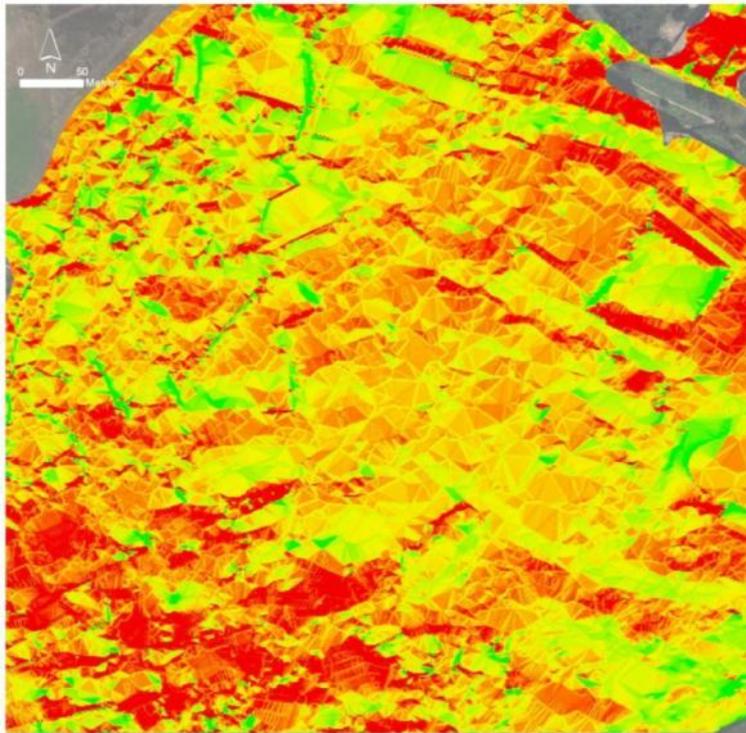
Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSn)

Altura

 Alto : 40,3

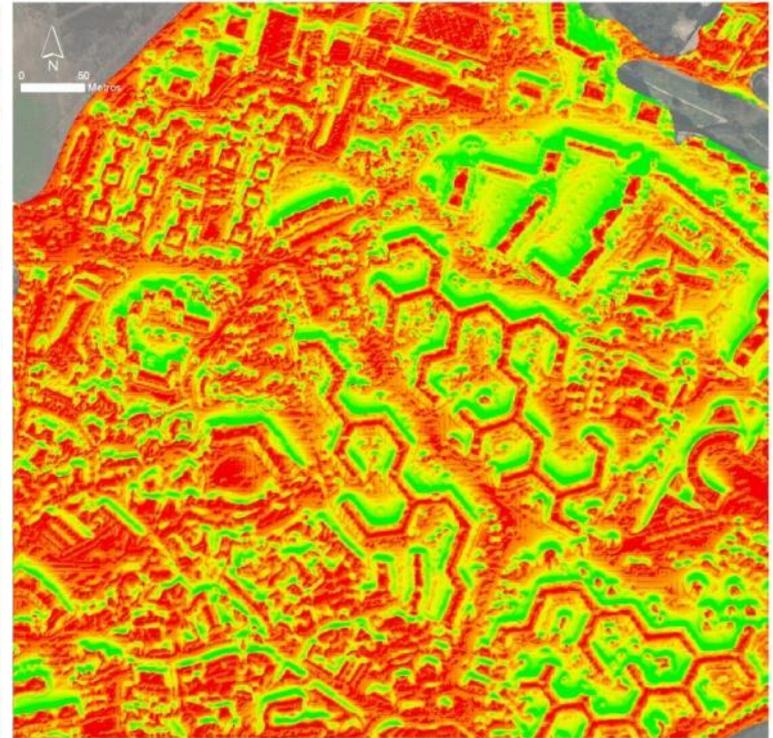
 Baixo : -4,9

Sombreamentos



Mapa solar anual (MDT)

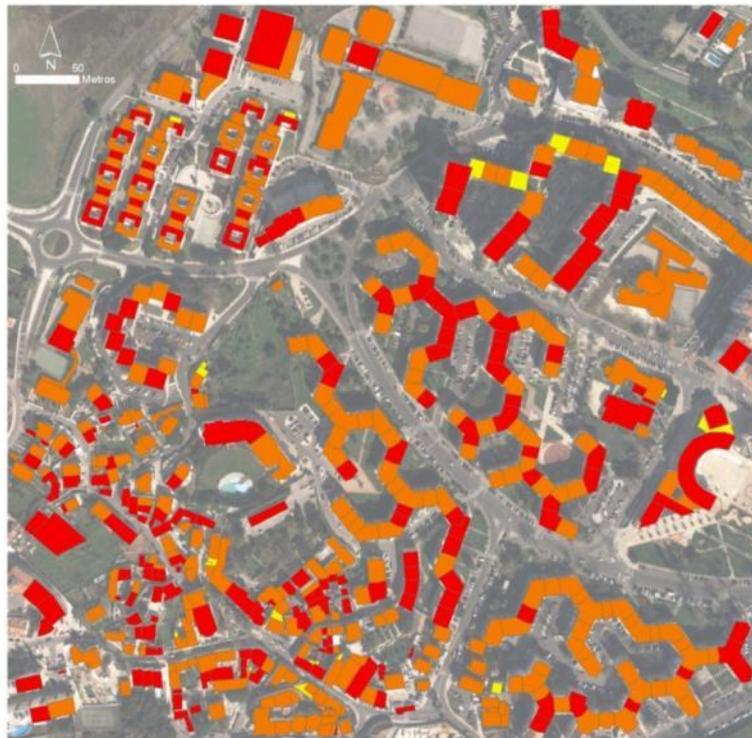
Valor (MWh/m²)
Alto : 1,835
Baixo : 0,478



Mapa solar anual (MDS)

Valor (MWh/m²)
Alto : 1,837
Baixo : 0,038

Sombreamentos



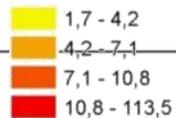
MWh/m2 anual

Valor (MWh/m2)

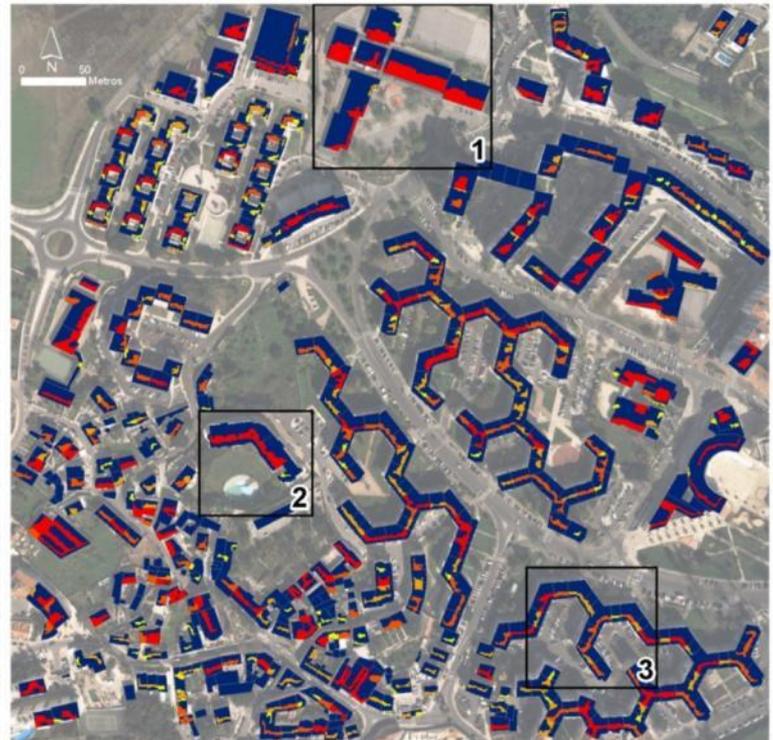


Edifício

MWh anual



Separação de classes em Quart



Resumo

- Irradiância
- Constante solar
- Potencial (incl. desertos)
- Variação anual
- Declinação
- Coordenadas do sol
- Insolação média, diária e anual
- Efeito inclinação/orientação
- Seguimento solar
- Radiação difusa
- Sombreamento