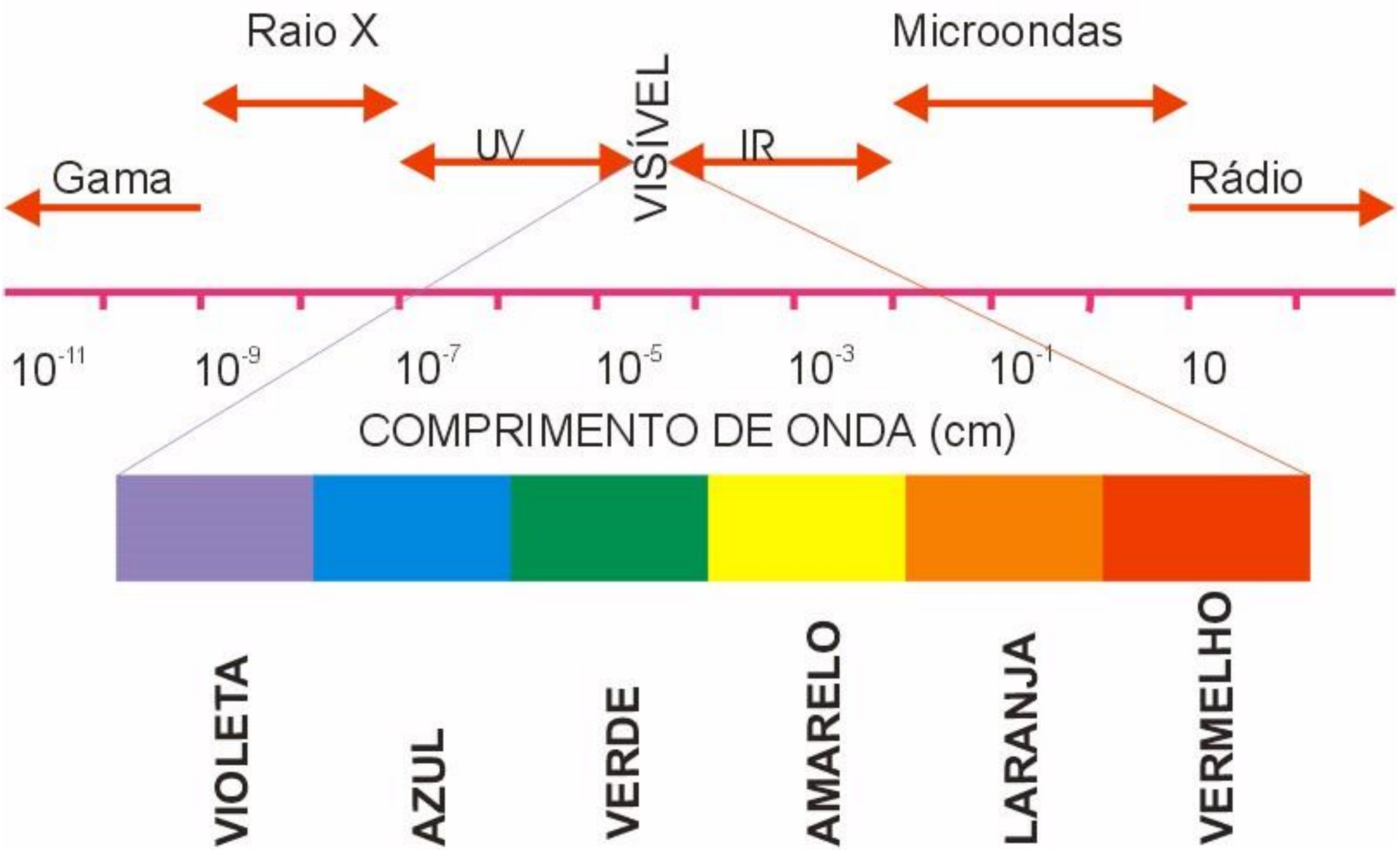
Aula 2 – Bases físicas da radiação solar

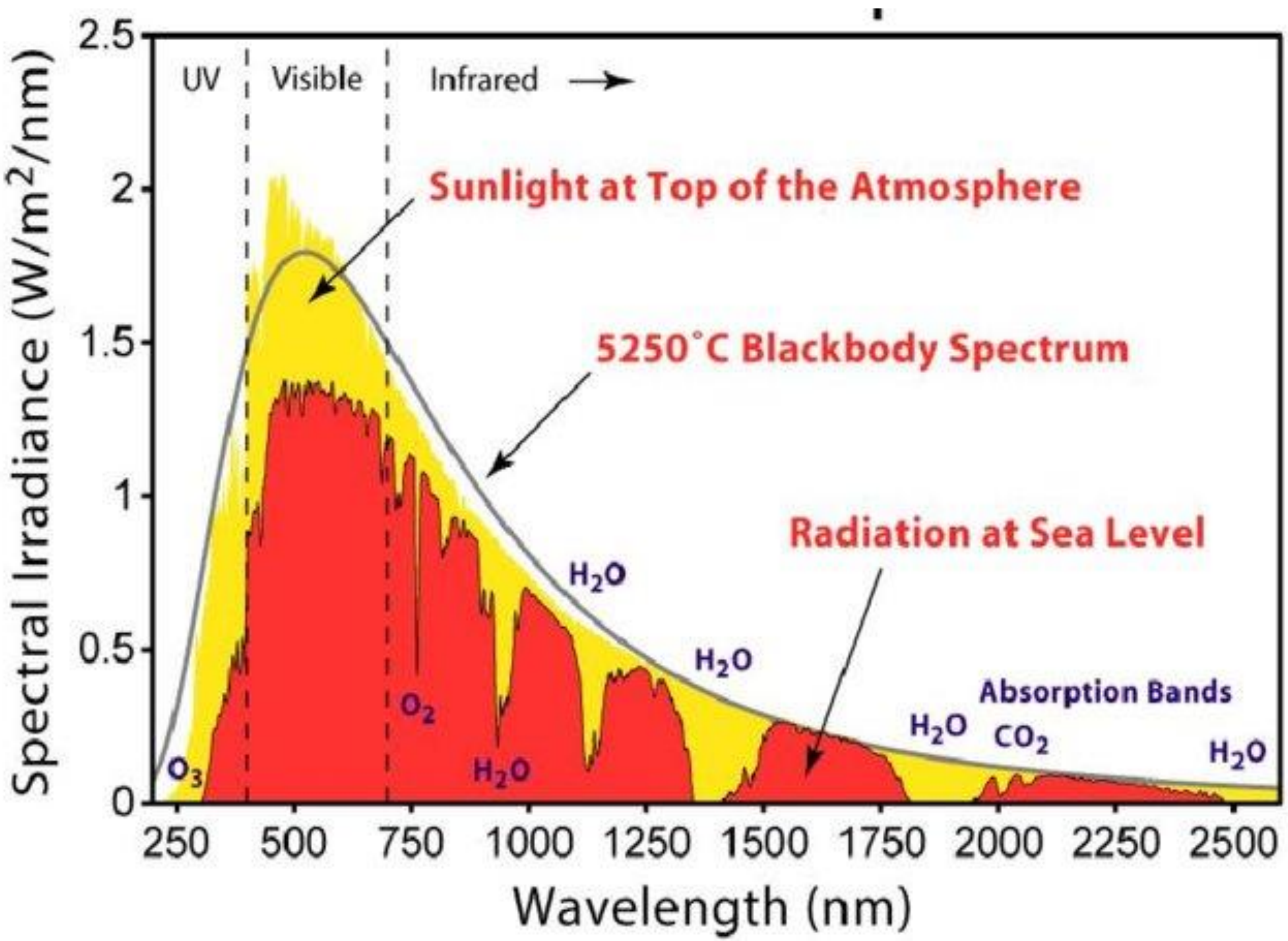
Prof. Fábio Marin

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
Departamento de Engenharia de Biossistemas
LEB 5036 – Microclimatologia Agrícola

Espectro Eletromagnético



Espectro da Radiação Solar



Lei de Planck

(3.3)

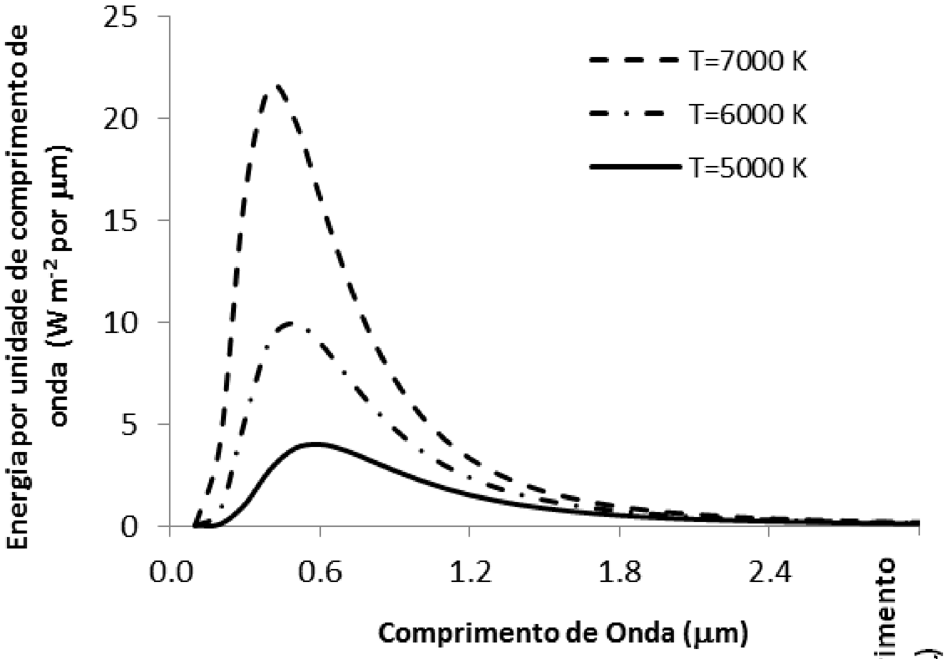
$$E_b = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)} - 1 \right]}$$

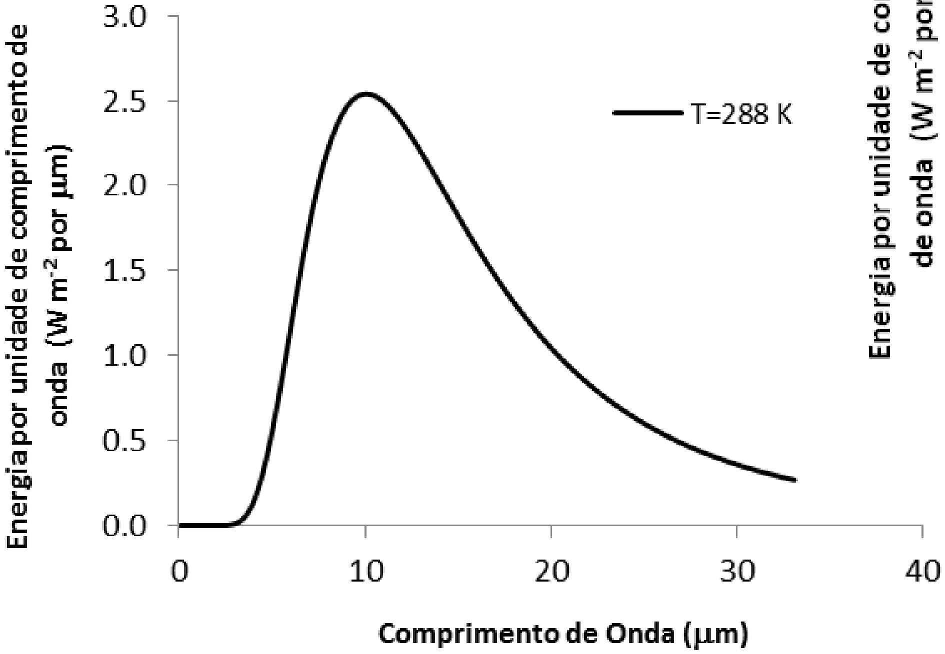
em que E_b é a emitância espectral (W m^{-3}); T é a temperatura do corpo (K); h é a constante de Planck (J s^{-1})e; k é a constante de Boltzmann (1,38 10^{-23} J K^{-1}).

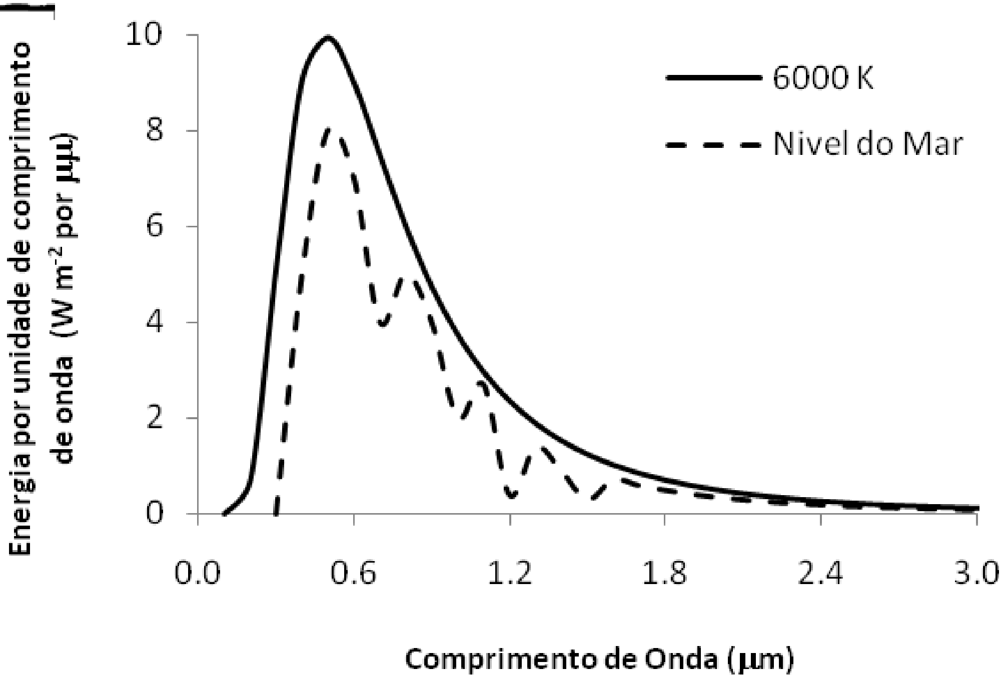
Nota sobre a aplicação da *Lei de Planck*

- O modelo de Planck permite estimar a emissão espectral de um corpo em função de sua temperatura para cada comprimento de onda. Aplicando-a para um temperatura de 6000K (simulando a emitância do Sol) pode-se comparar com o espectro de radiação observado na superfície terrestre, evidenciando o papel importante da atmosfera na determinação da quantidade e qualidade da radiação que atinge a superfície terrestre. Pode-se notar, por exemplo, o papel do ozônio absorvendo ondas na faixa do ultravioleta ($\lambda<400$nm), enquanto o vapor d´água absorve principalmente radiação na faixa do infravermelho ($\lambda>700$nm). A diferença entre as duas linhas informa sobre a absortividade/refletividade de alguns constituintes da atmosfera para diferentes comprimentos de onda, ressaltando as principais faixas espectrais em que atuam o ozônio, vapor d’água e dióxido de carbono.

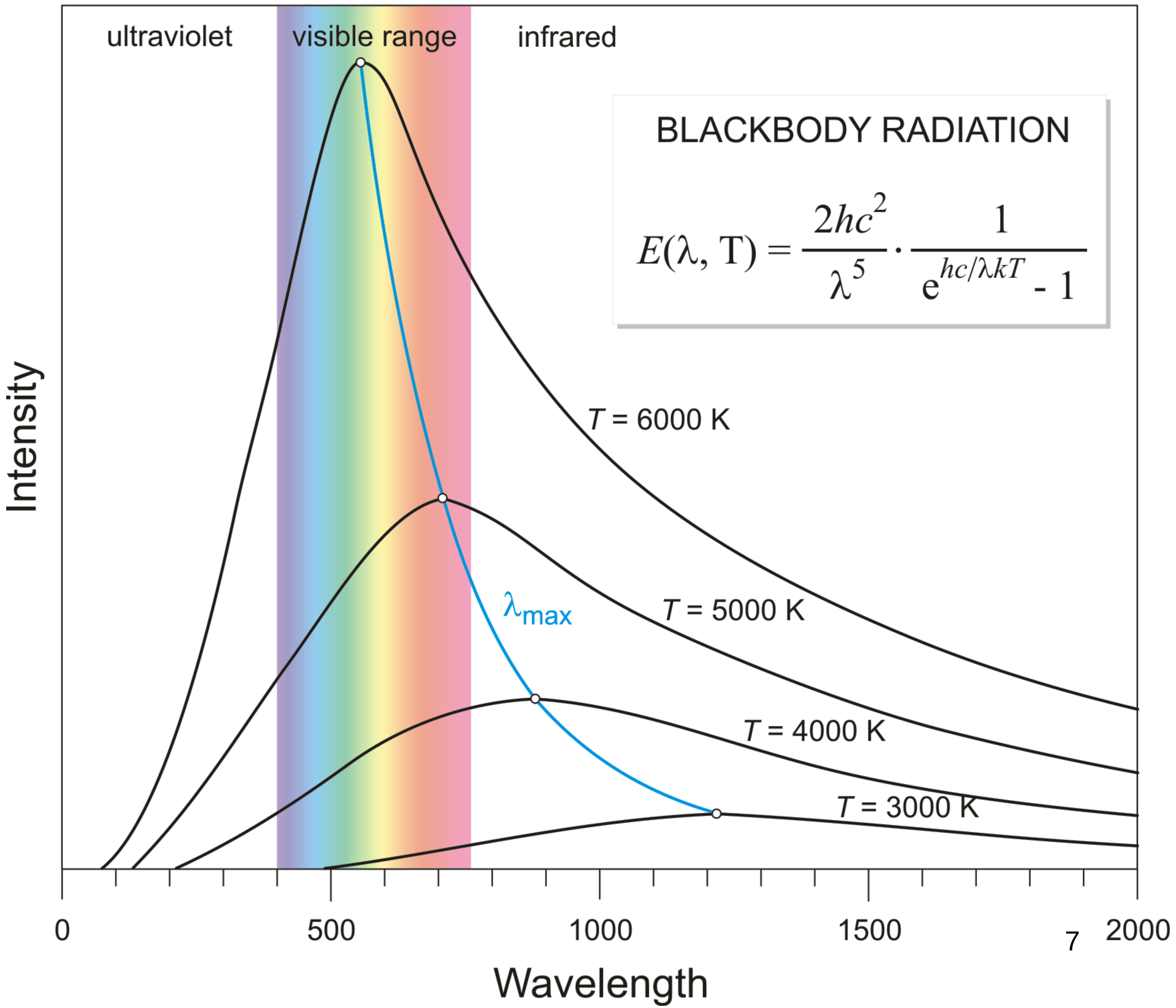
- Observe ao lado a variação da energia emitida em função da temperatura do corpo. A temperatura de 288K corresponde a Terra e a temperatura de 6000K é representativa da temperatura do Sol,
- Abaixo, é possível comparar a quantidade de energia recebida pela Terra. A linha cheia dá ideia da energia incidente acima da atmosfera, e a linha pontilhada corresponde ao espectro de radiação abaixo da atmosfera. A diferença entre elas informa sobre o efeito da atmosfera como atenuante (refletindo e absorvendo energia)







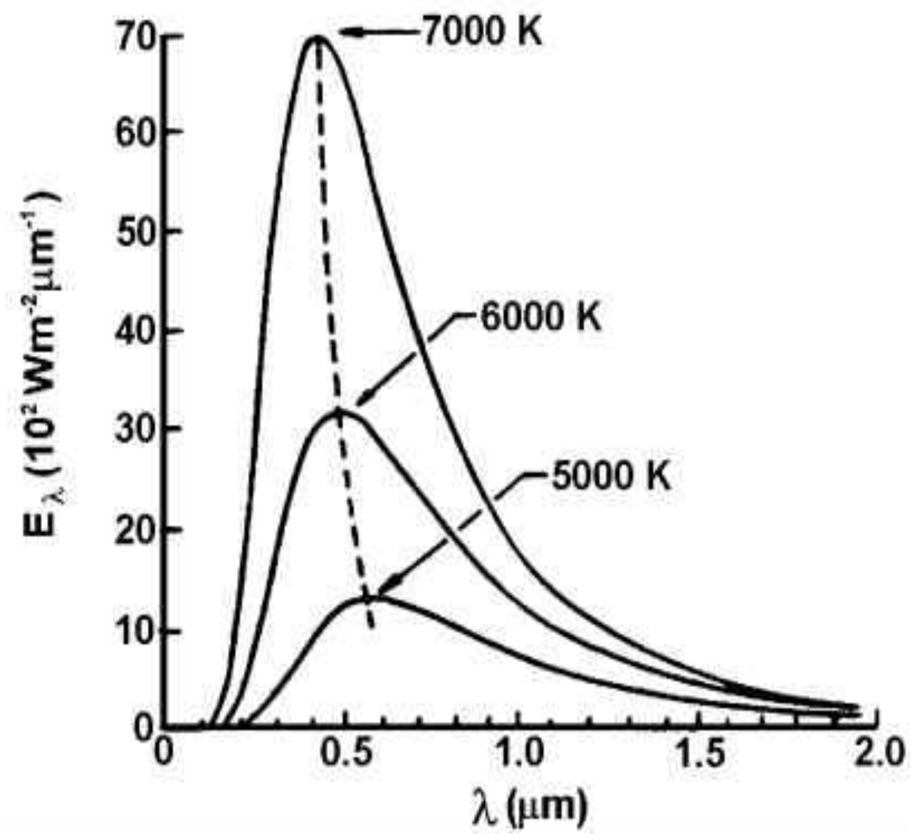
Lei de Planck



Lei do Deslocamento de Wien

O comprimento de onda de máxima emissão relaciona-se com a temperatura na forma:

$$\lambda_m = \frac{2897}{T}$$



Lei de Stefan-Boltzmann

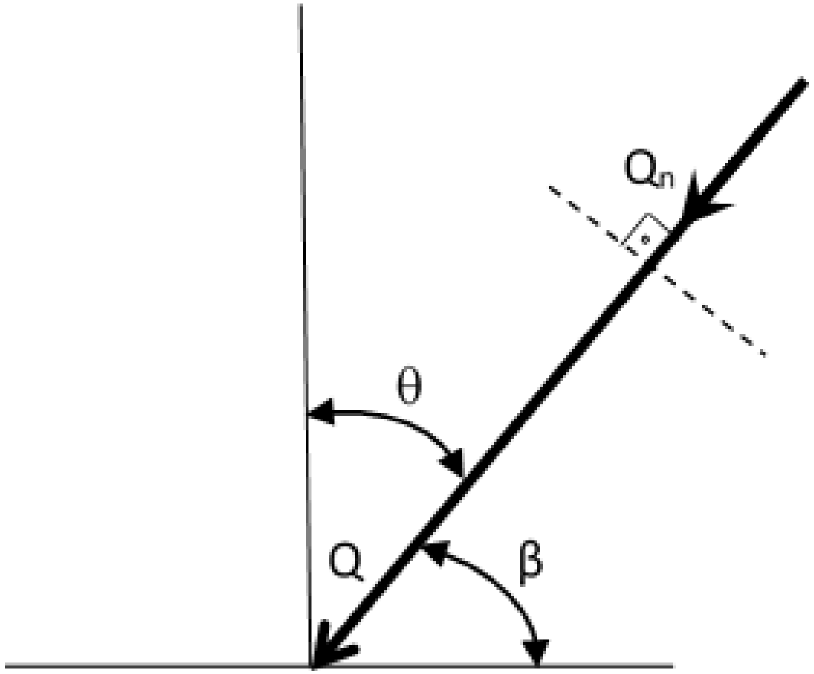
$$E = \varepsilon \, \sigma \, T^4$$

A emissão de radiação de um corpo negro é dada pela expressão, onde σ = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4} (constante de Stepan-Boltzmann). Dela se conclui que corpos com maior temperatura emitem mais energia total por unidade de área que aqueles com menor temperatura. O Sol, com T~6000 K, emite centenas de milhares de vezes mais energia que a Terra, com T~288 K. ε é a emissividade do corpo; admite-se $\varepsilon \cong 1$ para superfícies vegetadas.

Lei de Stefan-Boltzmann

Superfícies	ε
Água	0,92 a 0,96
Areia molhada	0,95
Areia seca	0,89 a 0,90
Gelo	0,82 a 0,99
Solo molhado	0,95 a 0,98
Folhagem de algodoeiro	0,96
Folhagem de cana-de-açúcar	0,97
Folhagem de feijão	0,94
Folhagem de fumo	0,97
Folhagem de milho	0,94

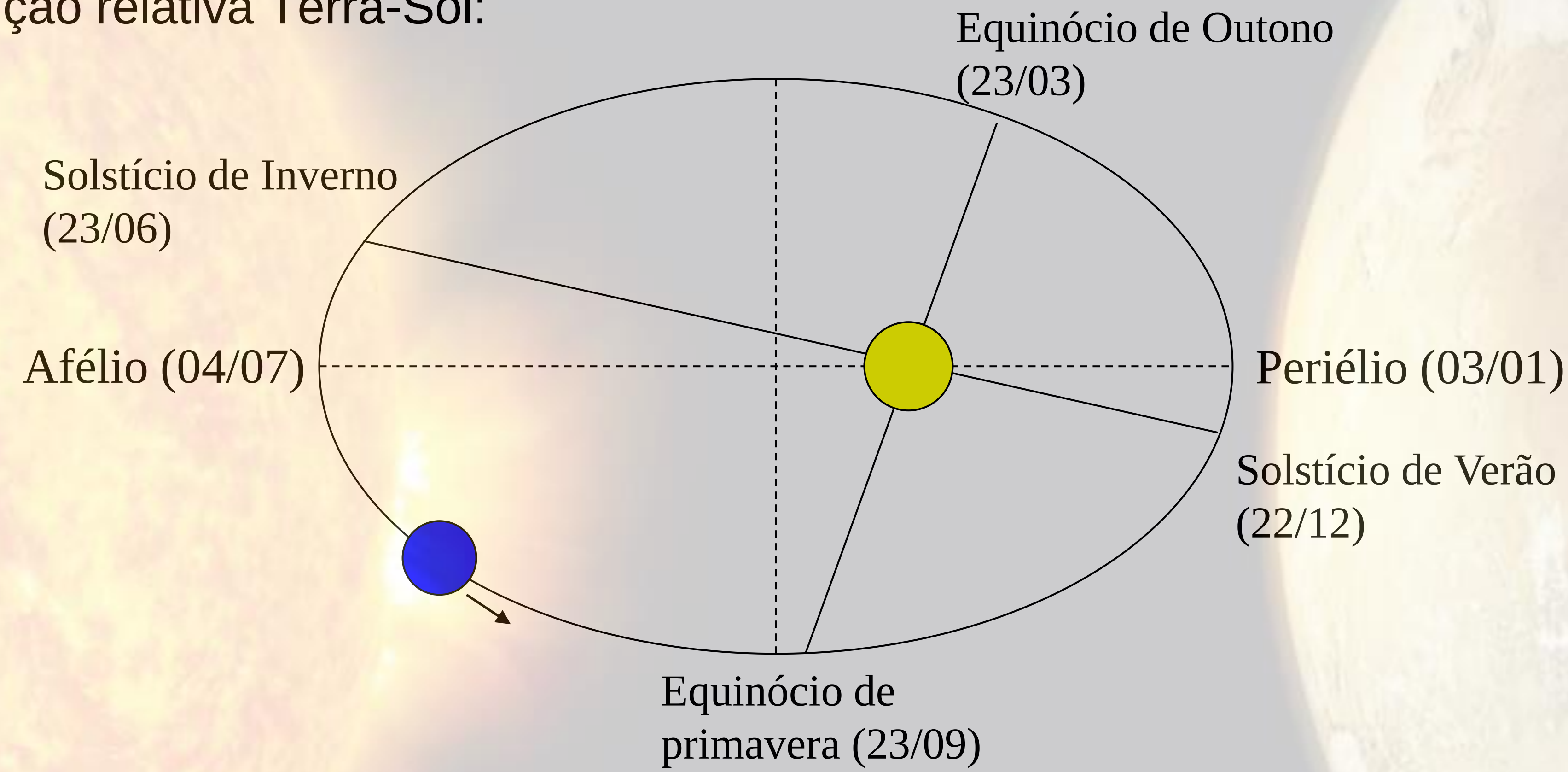
Lei dos Cossenos de Lambert



$$Q = Q_n \cdot \cos\theta = Q_n \cdot sen\beta$$

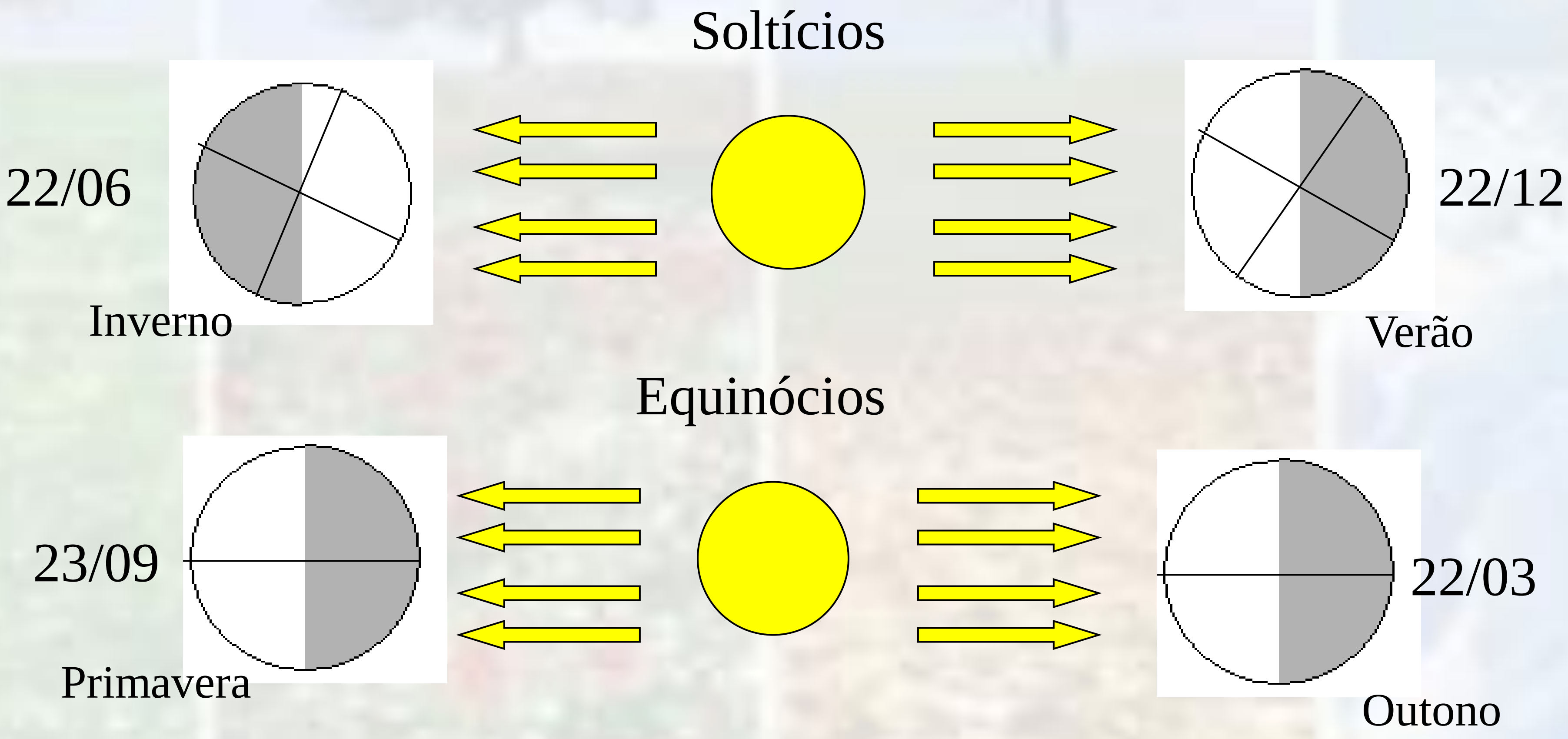
De onde vem a radiação solar? Movimentos de rotação e translação

- Posição relativa Terra-Sol:



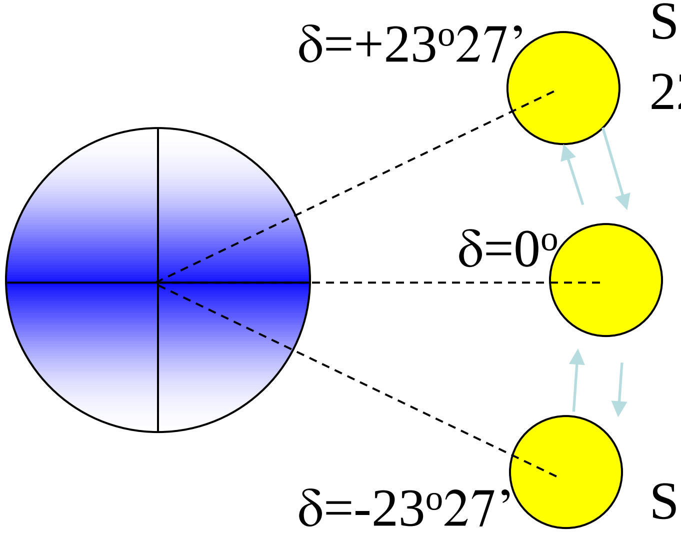
Estimando Qo - Estações do ano

- Posição relativa Terra-Sol:



Estimando Qo - Declinação Solar

- ângulo formado entre uma linha imaginária ligando o centro da Terra ao centro do sol, com o plano do Equador. Ao longo do ano, a declinação varia entre -23º27´ (solstício de verão) e +23º27´ (solstício de inverno). (*Do latim: solstitiu = Sol Parado*).



Solstício de Inverno
22 ou 23 de Junho

Equinócio de Primavera: 22 ou 23 Setem.
Equinócio de Outono: 22 ou 23 de Março

Solstício de Verão
22 ou 23 de Dezembro

Como calcular a Declinação Solar

$$\delta = 23{,}45 sen\left[\frac{360(NDA-80)}{365}\right]$$

A única variável dessa equação é o número do dia do ano (NDA), também conhecido como dia Juliano, e representa a contagem sequencial dos dias do ano desde primeiro de janeiro até 31 de dezembro. Veja no Slide seguinte uma tabela para encontrarmos o valor do NDA a partir de um data (mês e ano).

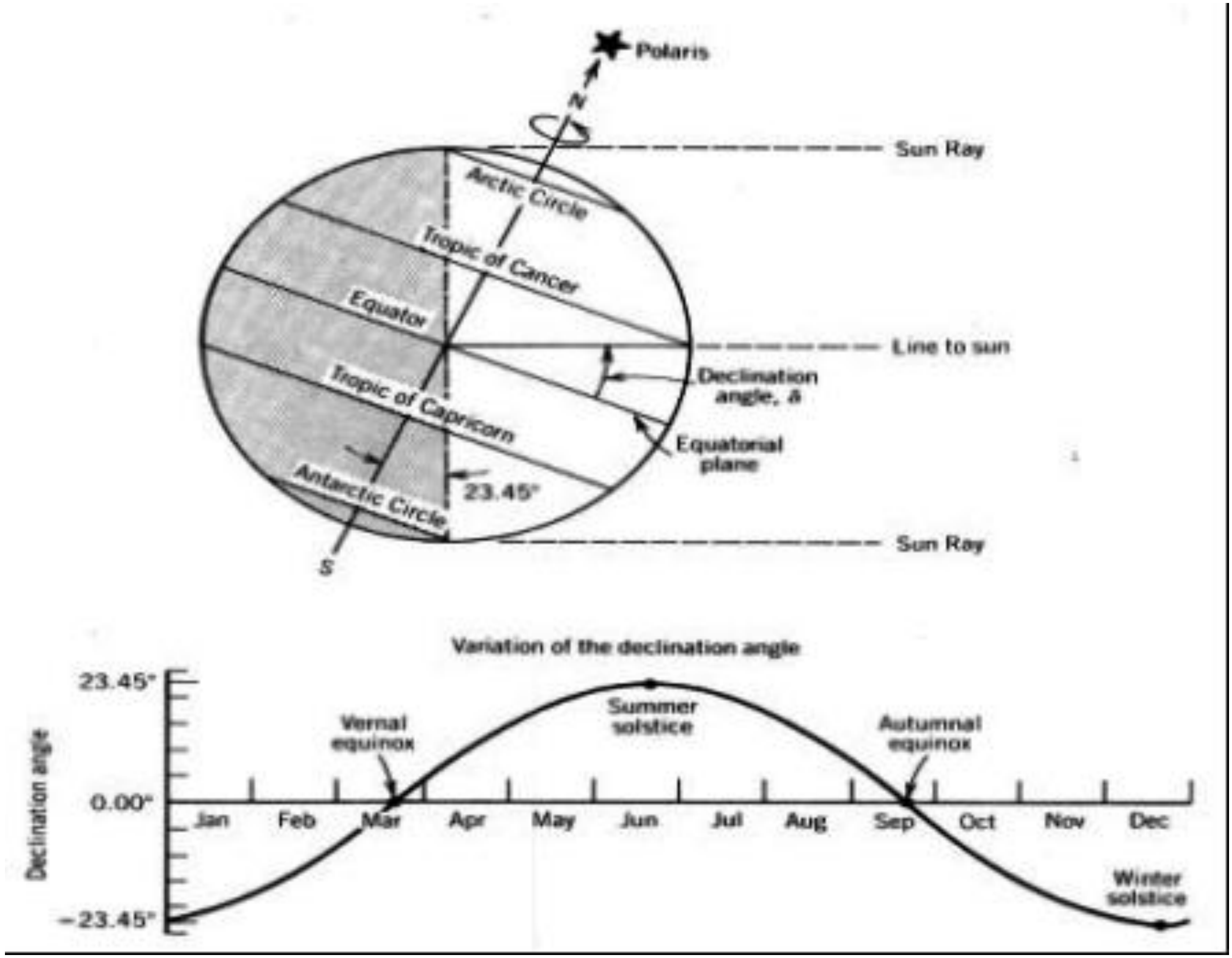
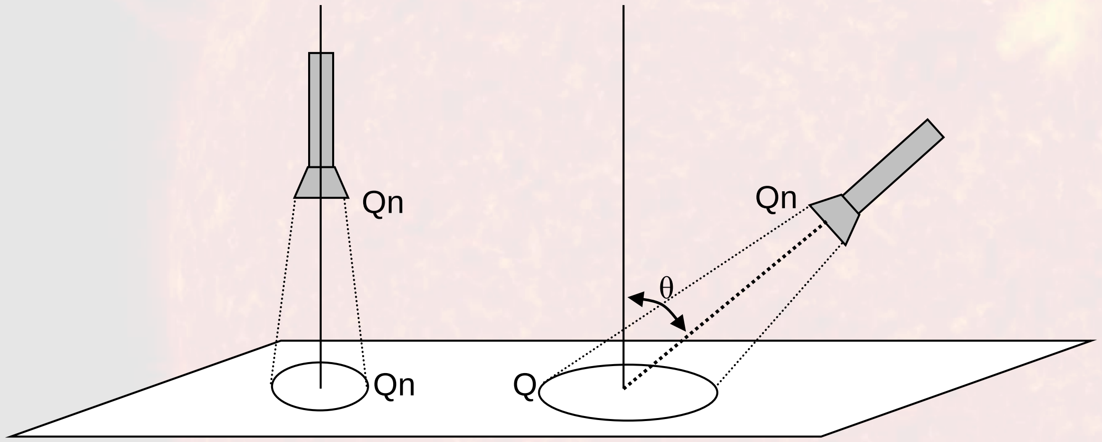


Tabela de NDA

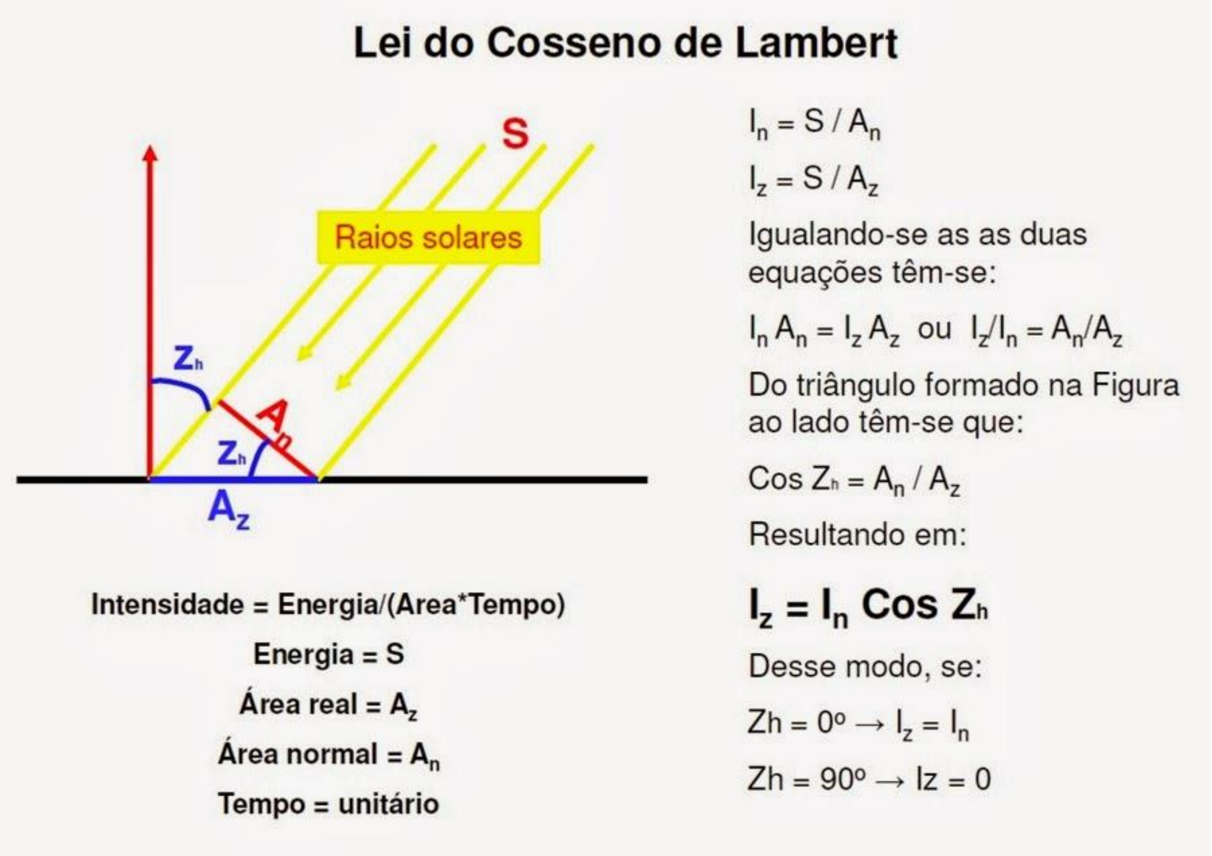
Nas colunas temos os meses e nas linhas temos os dias. Combinando uma linha com uma coluna, encontramos o NDA..

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

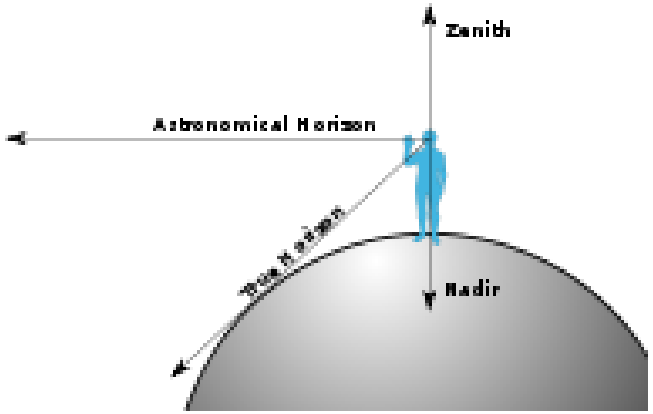
Lei do Cosseno de Lambert



Q<Qn

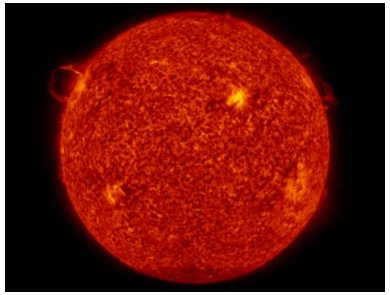


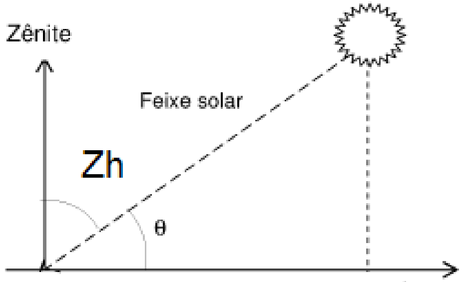
Estimando Qo - Ângulo Zenital (Zh)



- Definição: ângulo formado entre o zênite (linha imaginária que liga um observador localizado sobre a superfície terrestre e o centro da terra e prolonga-se até a esfera celeste) e a direção predominante do feixe (de raios) solar.

Zh = f(latitude, ângulo horário, declinação)





Ângulo Zenital ao Meio-Dia

Quando o sol passa pelo meridiano no local (meio-dia): h = 0 e cos 0 = 1

Assim,

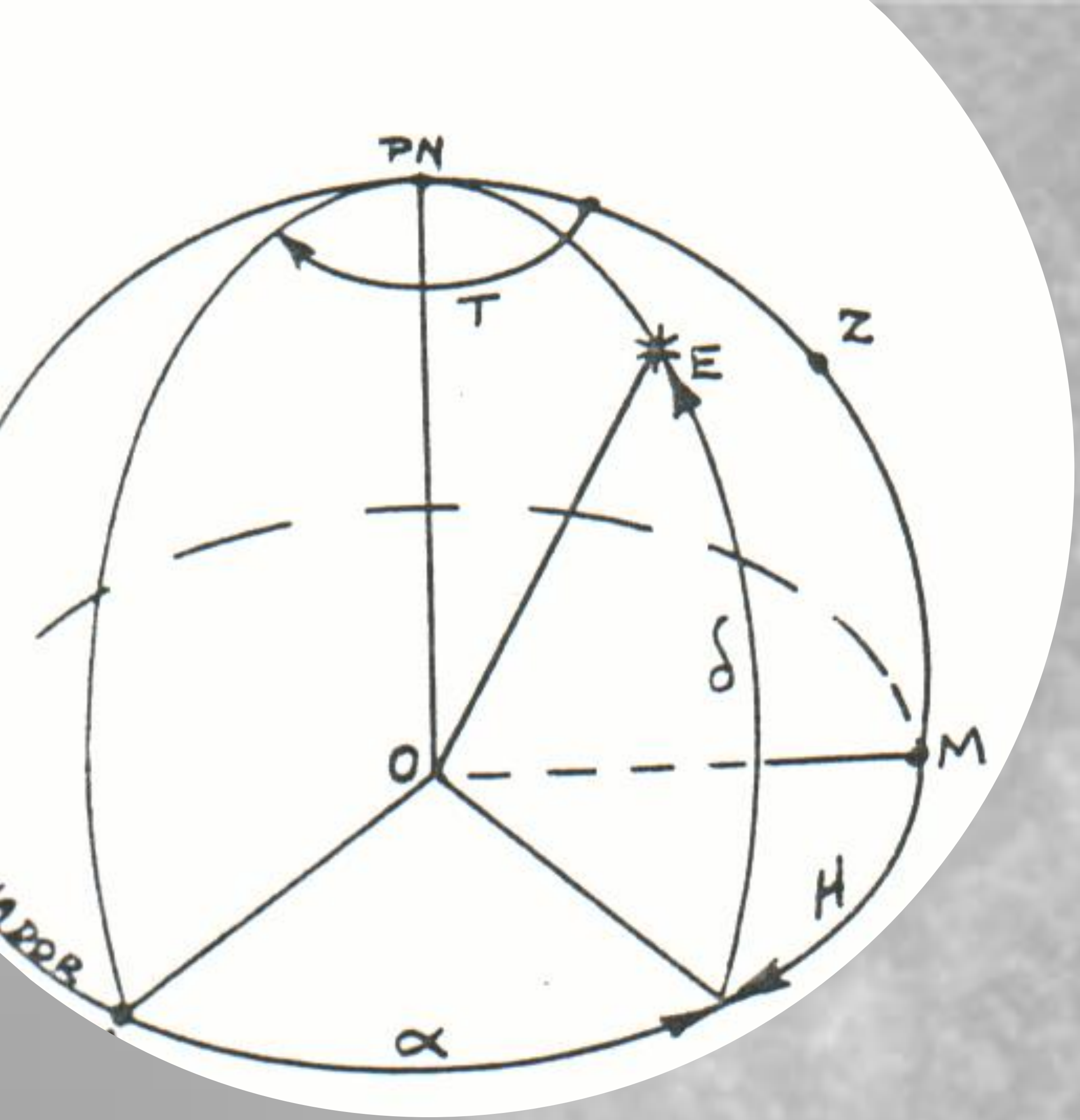
$$\cos Z_{12} = sen\phi . sen\delta + \cos\phi . \cos\delta . 1$$

$$\cos Z_{12} = \cos(\delta - \phi)$$

$$Z_{12} = \delta - \phi$$

a) Calcule a Declinação Solar para hoje em Piracicaba?

b) Calcule a Ângulo Zenital ao meio dia para Hoje em Piracicaba?



Ângulo Horário

- h é ângulo horário do sol – ângulo formado pelo plano meridiano do sol e o plano meridiano do ponto onde está o observador
- h = (hora local – 12)/15º

Estimando Qo - Calculando o Ângulo Zenital do Sol ano nascer do Sol (*hn*)

$$0 = sen\phi . sen\delta + \cos\phi . \cos\delta . \cos\ hn$$

$$\cos\ hn = \frac{(-sen\phi . sen\delta)}{(\cos\phi . \cos\delta)} = -tg\phi . tg\delta$$

$$hn = \arccos(-tg\phi . tg\delta)$$

ϕ é a latitude do local (graus e décimos)

δ é a declinação do sol (graus e décimos)

Zh é o ângulo zenital a cada hora do do dia. No nosso caso, vamos calcular Z para o meio dia e extrapolar para o restante do dia.

Cálculo do Fotoperíodo (N)

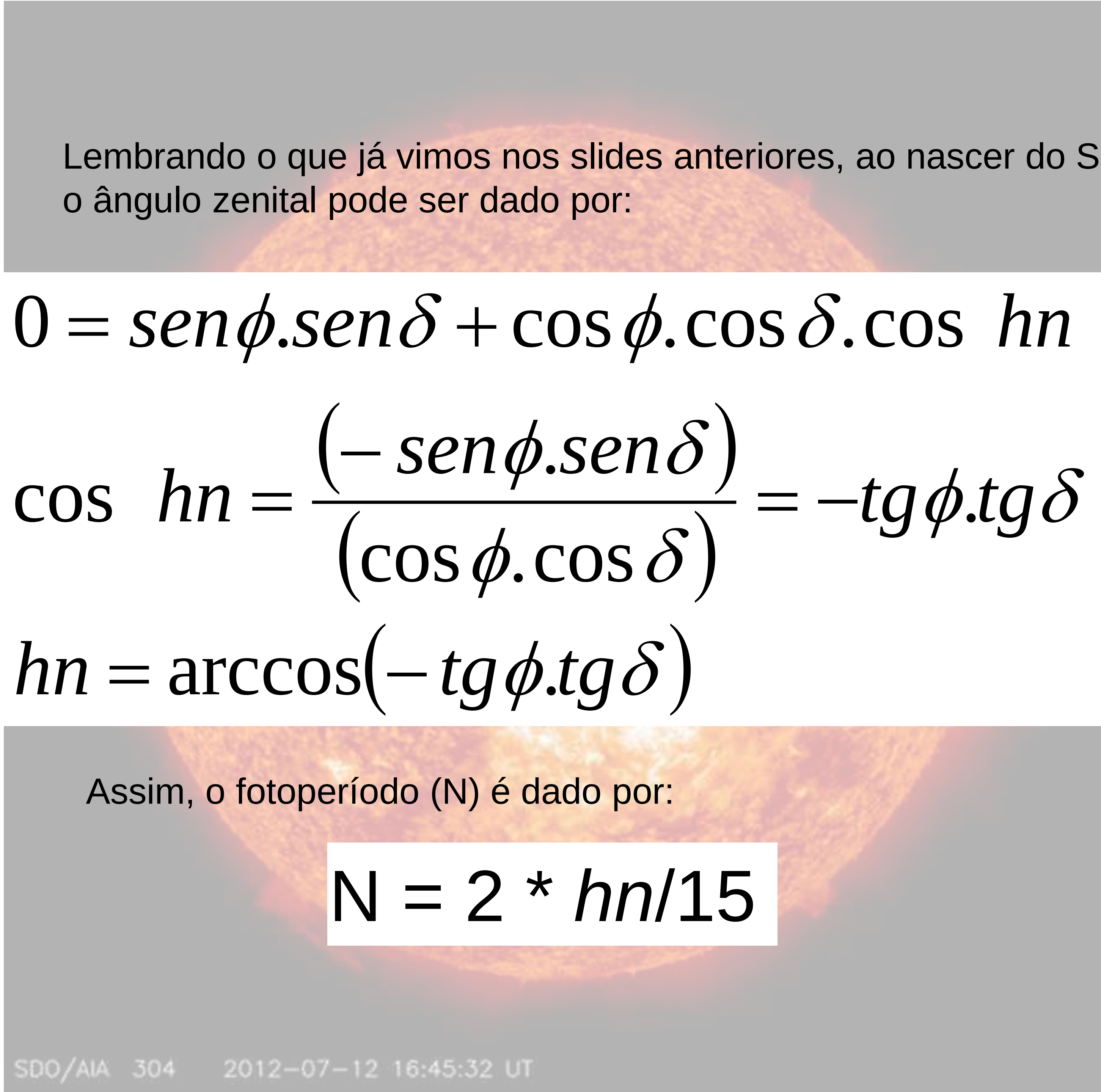
N = hora do pôr-do-sol – hora do nascer-do-sol

Considerando a trajetória simétrica do solo em relação ao meio-dia, podemos admitir que:

N = 2 * hn/15

sendo hn o ângulo horário no nascer do Sol)

Ao nascer, o ângulo zenital é 90 e cos90 = 0. Assim, isolando-se hn da eq. do ângulo zenital (slide 10), tem-se:



Lembrando o que já vimos nos slides anteriores, ao nascer do S
o ângulo zenital pode ser dado por:

$$0 = sen\phi . sen\delta + \cos\phi . \cos\delta . \cos\ hn$$

$$\cos\ hn = \frac{(-sen\phi . sen\delta)}{(\cos\phi . \cos\delta)} = -tg\phi . tg\delta$$

$$hn = \arccos(-tg\phi . tg\delta)$$

Assim, o fotoperíodo (N) é dado por:

$$N = 2 * hn/15$$

Horário do nascer e pôr-do-Sol

- Horário do Nascer do Sol (HNS)
- HNS = 12-N/2

- Horário do Pôr do Sol (PS)
- HPS = 12+N/2

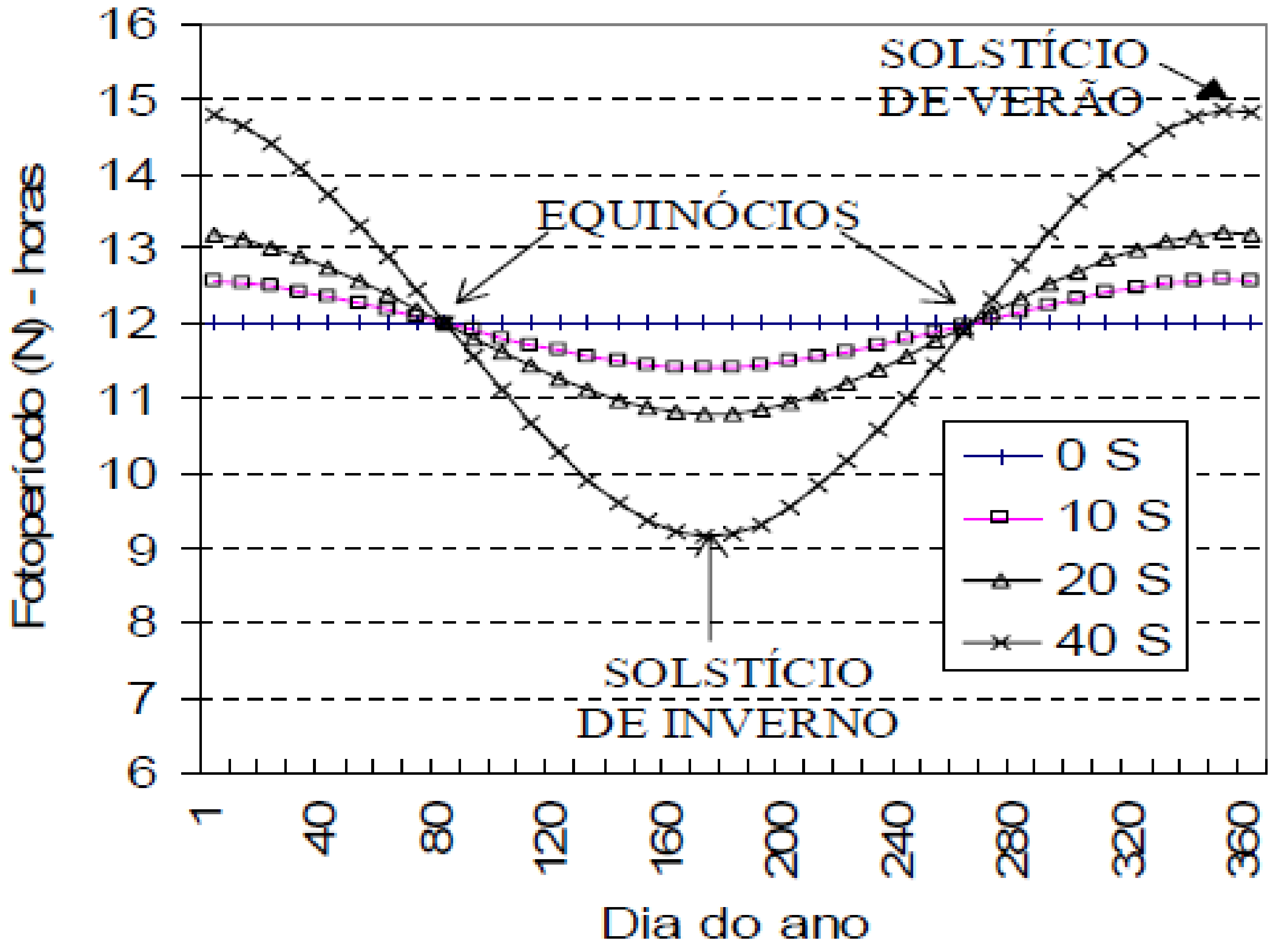


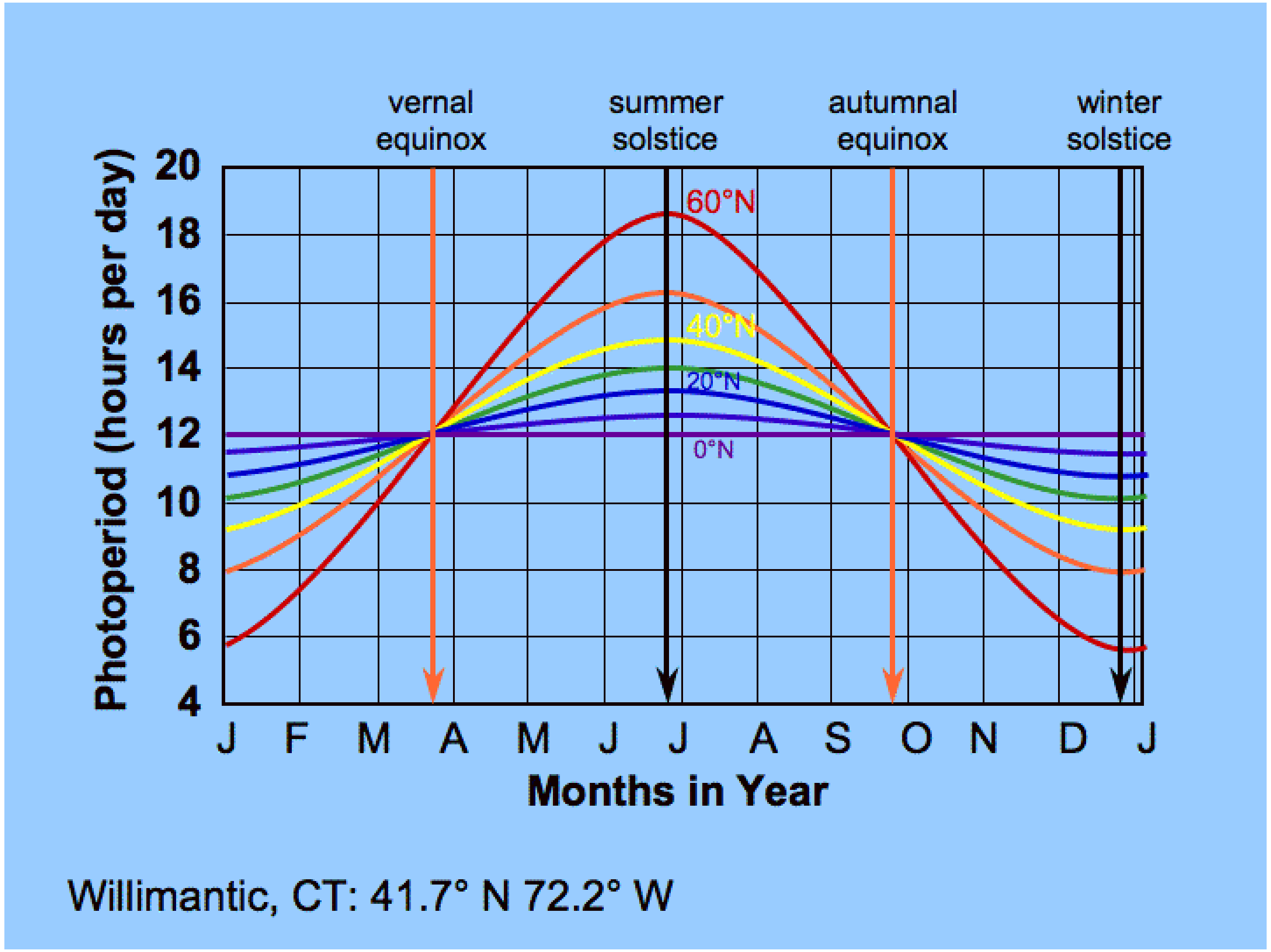
Figura 5.2. Variação anual do fotoperíodo em algumas latitudes do hemisfério sul.

Exemplo de variação do fotoperíodo de locais no hemisfério Sul

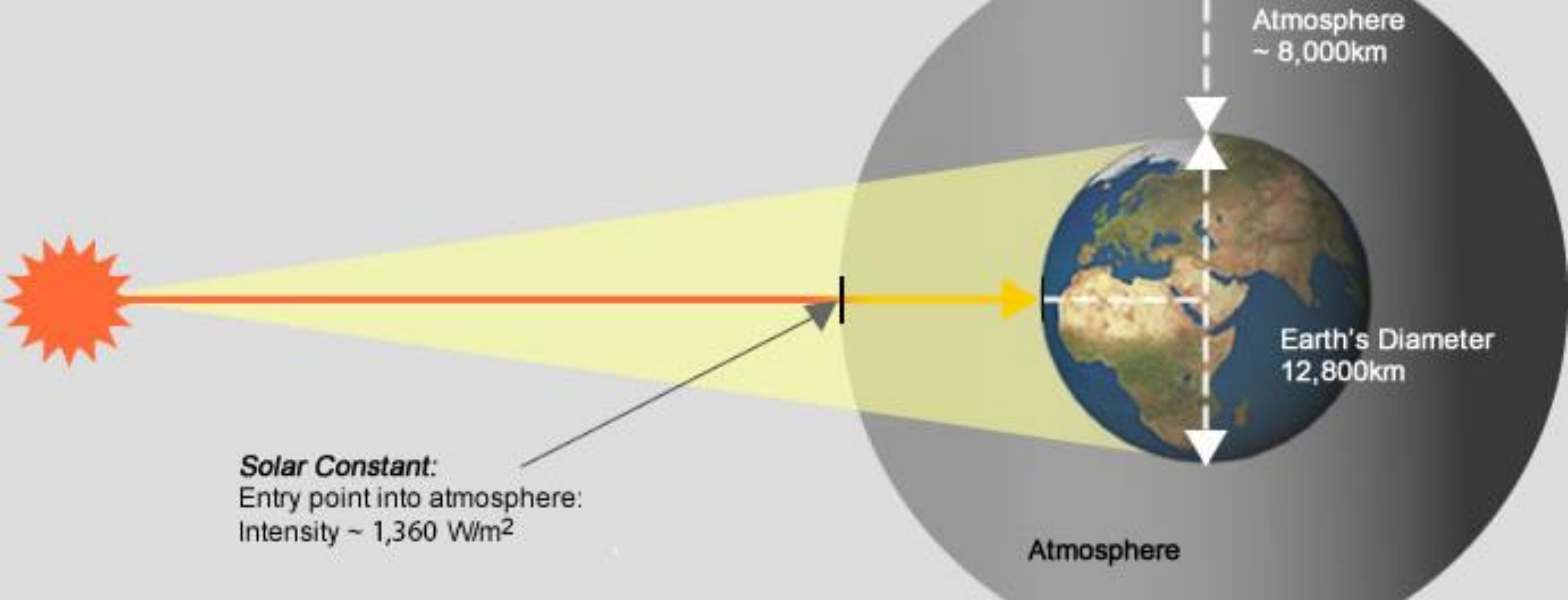
Horário do nascer e pôr-do-Sol

- Horário do Nascer do Sol (HNS)
- HNS = 12-N/2

- Horário do Pôr do Sol (HPS)
- HPS = 12+N/2



Exemplo de variação do fotoperíodo de locais no hemisfério Norte



Constante Solar

- Constante solar (Jo) é um valor que expressa a densidade de fluxo de radiação (energia/área.tempo) em uma superfície perpendicular aos raios solares, acima da atmosfera.

Deduzindo o valor da Constante Solar

Distância Terra-Sol: 1,5 10^8 km

Área da esfera: 4 * π * r^2 = 2,83.10^{23} m^2

Potência do Sol: 3,87 10^{26} W

Jo = 3,87 10^{26} W / 2,83.10^{23} m^2

Jo = 1367 W/ m^2

ou **118,11 MJ/m^2.d**

Corrigindo a Constante Solar em função da distância Terra-Sol

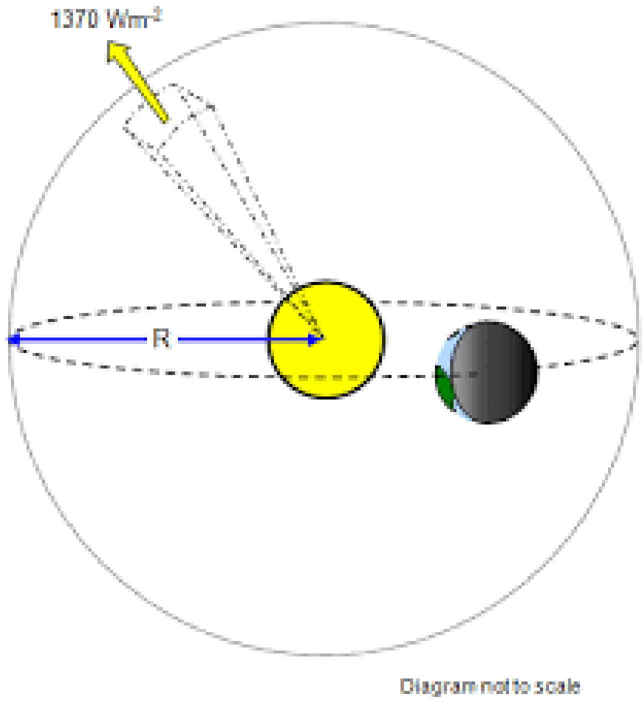
É necessário corrigir Jo pois a Terra não tem uma órbita perfeitamente circular em torno do Sol. O valor médio, como já mencionamos, é de Jo = 1367 W/m^2 ou 118,11 $MJ/m^2.d$, e para corrigir usamos a seguinte equação:

$Jo' = Jo * (d/D)^2$

sendo que Jo' o valor de Jo corrigido pela distância, $(d/D)^2$ representar a razão entre a distância real (r) e a distância média (D) entre a terra e o Sol e pode ser calculado por

$$(d/D)^2 = 1 + 0,033 * \cos(NDA*360/365)$$

Lembrando que NDA é o número do dia do ano e pode ser obtido a partir da Tabela disponível no slide 6



Exercício Rápido

Calcule o valor de Jo' para hoje?

Calcule o fotoperíodo, o horário do nascer e o horário do pôr-do-sol para Piracicaba, no dia de hoje.

Equação Final

$$Qo = \frac{Jo'}{\pi}.\left[\left(\frac{\pi}{180}\right)hn.sen\phi.sen\delta + \cos\phi.\cos\delta.sen\ hn\right]$$

Finalmente, agora podemos calcular o valor da Radiação Extra-Terrestre (Qo)

- Lembrando que: Jo´ é a constante solar corrigida pela distância Terra-Sol, hn é o ângulo horário do nascer do Sol, e ϕ é a latitude, δ é a declinação solar

Revisando - Qo

Constante Solar – máxima densidade de fluxo de radiação em uma superfície perpendicular aos raios solares, fora da atmosfera. Tem valor constante de 1367 W/m^2 ou **118,11** MJ/m^2.d

Ângulo horário do nascer do Sol

$$hn = \arccos(-tg\phi . tg\delta)$$

Latitude

Ângulo horário do nascer do Sol

$$Qo = \frac{Jo}{\pi} . \left(\frac{d}{D}\right)^2 . \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) hn . sen\phi . sen\delta + \cos\phi . \cos\delta . sen\ hn\right]$$

Latitude

Declinação Solar

Razão entre a distância Terra-Sol num determinado dia e a distância média Terra-Sol

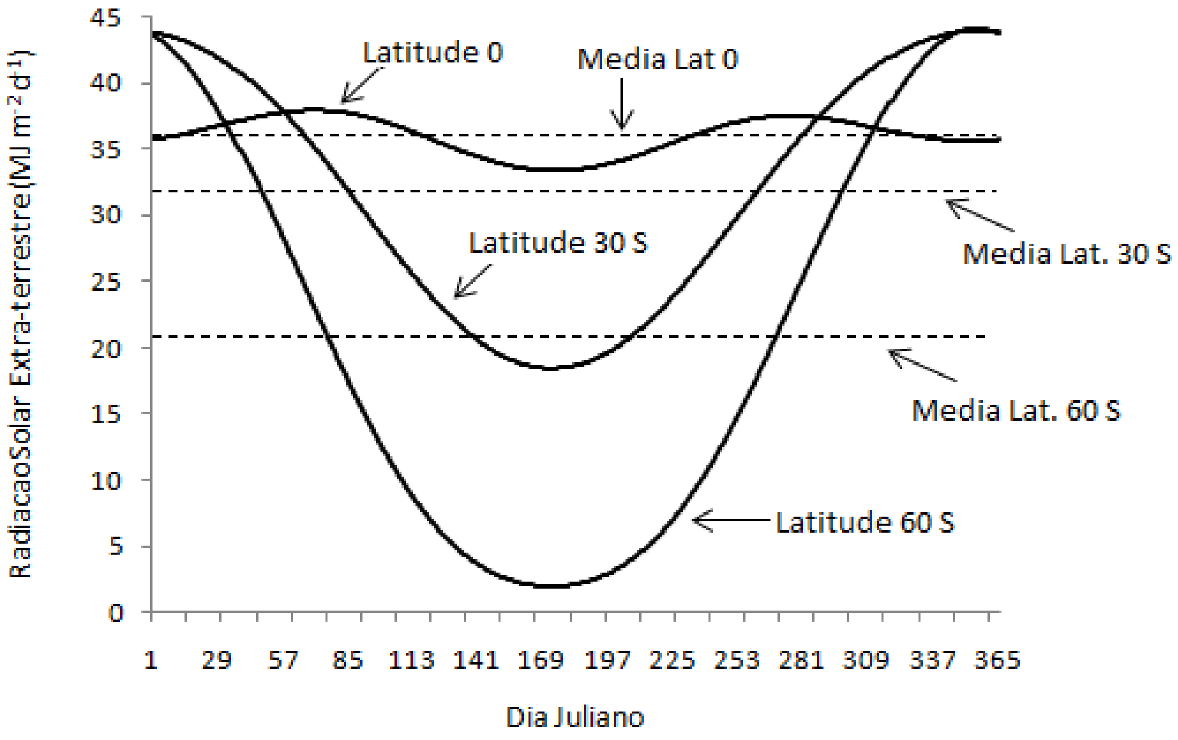
$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0{,}033 . \cos\left(\frac{NDA.360}{365}\right)$$

Declinação Solar

Número do Dia do Ano

$$\delta = 23{,}45 sen\left[\frac{360(NDA - 80)}{365}\right]$$

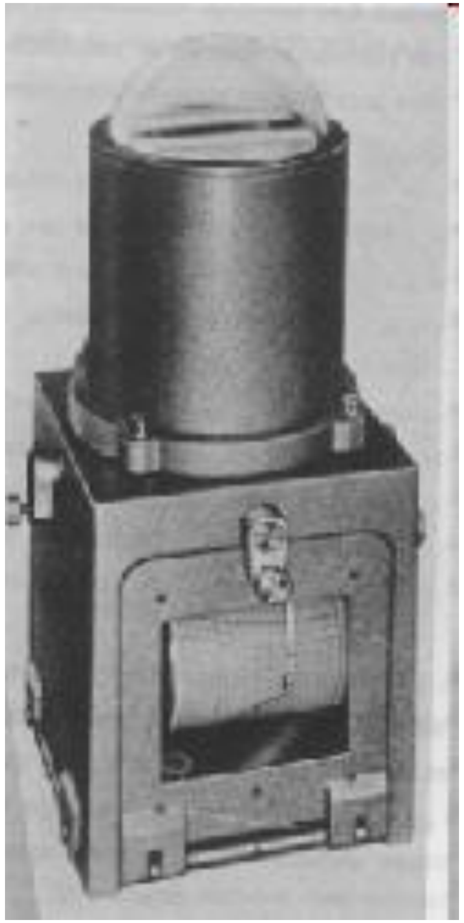
Observe a variação da radiação solar extra-terrestre (Qo) para diferentes latitudes (linha cheia) e o valor médio anual (linhas pontilhadas)



Responda: em qual dos locais a produção de espécies perenes é mais indicada? E das culturas anuais?

Medida da Radiação Solar Global

- Actinógrafo de Robitzch
- Equipamento projetado em 1915 e constituído de duas placas metalicas pintadas de branco e preto. O aquecimento diferencial decorrente da absorcao de radiacao solar promove uma dilatacao diferenciada para transferida por um sistema de alavancas para uma pena.



Medida da Radiação Solar Global

- Piranômetro de Termopar
- O elemento sensor é uma placa com termopares, que geram uma corrente elétrica conforme a superfície se aquece, como consequência da incidência de radiação solar.

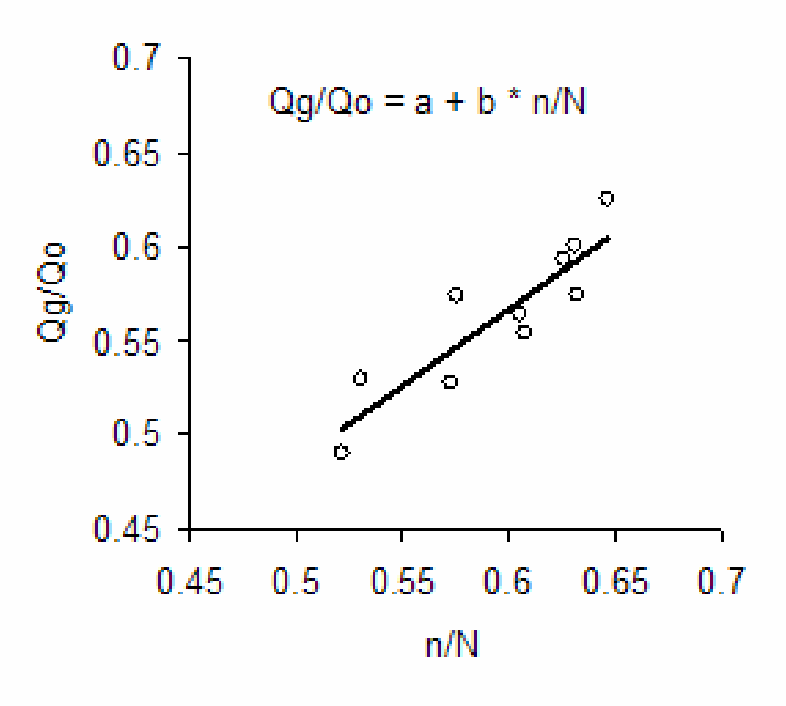
Medida da Radiação Solar Global

- Piranômetro de Fotodiôdo de Silício
- O sensor deste equipamento responde à absorção de radiação solar gerando uma corrente elétrica proporcional.

Estimativa da Radiação Solar Global

Equação de Angstron:

$$Qg = Qo*(a + b*n/N)$$



n é a insolação (horas) – valores medidos;

N é o fotoperíodo (horas) – valores estimados;

a e b são coeficientes dependentes da latitude e das condições atmosféricas do local.

a e b

Nos locais onde não houver dados disponíveis, pode-se fazer a seguinte aproximação:

a = 0,29 * cos ϕ

b = 0,52

TABELA 5.4 Coeficientes a e b da Equação de Angström-Prescott, para algumas localidades brasileiras.

Localidade	Período	a	b
Botucatu - SP	Anual	0,24	0,45
Campinas - SP	Anual	0,23	0,56
Mococa - SP	Anual	0,40	0,41
Monte Alegre do Sul - SP	Anual	0,19	0,61
Piracicaba - SP	Outono-Inverno	0,28	0,51
Piracicaba - SP	Primavera-Verão	0,25	0,50
Pindamonhangaba - SP	Anual	0,28	0,51
Presidente Prudente - SP	Anual	0,19	0,39
Ribeirão Preto - SP	Anual	0,13	0,73
São Luiz - MA	Anual	0,26	0,33
Fortaleza - CE	Anual	0,27	0,36
Teresina - PI	Anual	0,31	0,37
João Pessoa - PB	Anual	0,28	0,36
Recife – PE	Anual	0,30	0,38
Petrolina - PE	Anual	0,32	0,37
Propriá - SE	Anual	0,33	0,41
Paulo Afonso - BA	Anual	0,31	0,33
Irecê – BA	Anual	0,33	0,33
Salvador - BA	Anual	0,29	0,39
Manaus - AM	Anual	0,26	0,49
Viçosa - MG	Anual	0,23	0,38
Alegrete – RS	Anual	0,19	0,49
Cachoeirinha – RS	Anual	0,20	0,56
Cruz Alta – RS	Anual	0,20	0,53
Encruzilhada do Sul – RS	Anual	0,15	0,47
Erechim – RS	Anual	0,19	0,47
Farroupilha – RS	Anual	0,17	0,60
Eldorado do Sul – RS	Anual	0,15	0,47
Ijuí – RS	Anual	0,25	0,46
Júlio de Castilhos – RS	Anual	0,17	0,62
Osório – RS	Anual	0,17	0,50
Pelotas - RS	Anual	0,35	0,46
Quaraí – RS	Anual	0,25	0,38
Rio Grande – RS	Anual	0,27	0,32
Santa Rosa – RS	Anual	0,15	0,55
Santo Augusto – RS	Anual	0,17	0,53
Soledaded – RS	Anual	0,23	0,41
São Gabriel – RS	Anual	0,23	0,45
Taquari – RS	Anual	0,24	0,41
Uruguaiana – RS	Anual	0,24	0,41
Vacaria – RS	Anual	0,25	0,46
Veranópolis - RS	Anual	0,21	0,40

Fonte: Vianello & Alves (1991), Cervellini et al. (1966), Ometto (1981), Lunardi & Cataneo (1994) e Ribeiro et al. (1982), Fontana & Oliveira (1996).

Estimativa da Radiação Solar Global

Método de Hargreaves e Samani (1982):

A amplitude térmica diária tem relação com a incidência de radiação solar, assim:

$$Qg = k \ \sqrt{(T\max - T\min)} \ Qo$$

k é um coeficiente de ajuste variando entre 0,16 $^{o}C^{-0,5}$, para localidades situadas no interior, distantes do oceano; e 0,19 $^{o}C^{-0,5}$ e para localidades litorâneas ou próximas a grandes corpos de água.

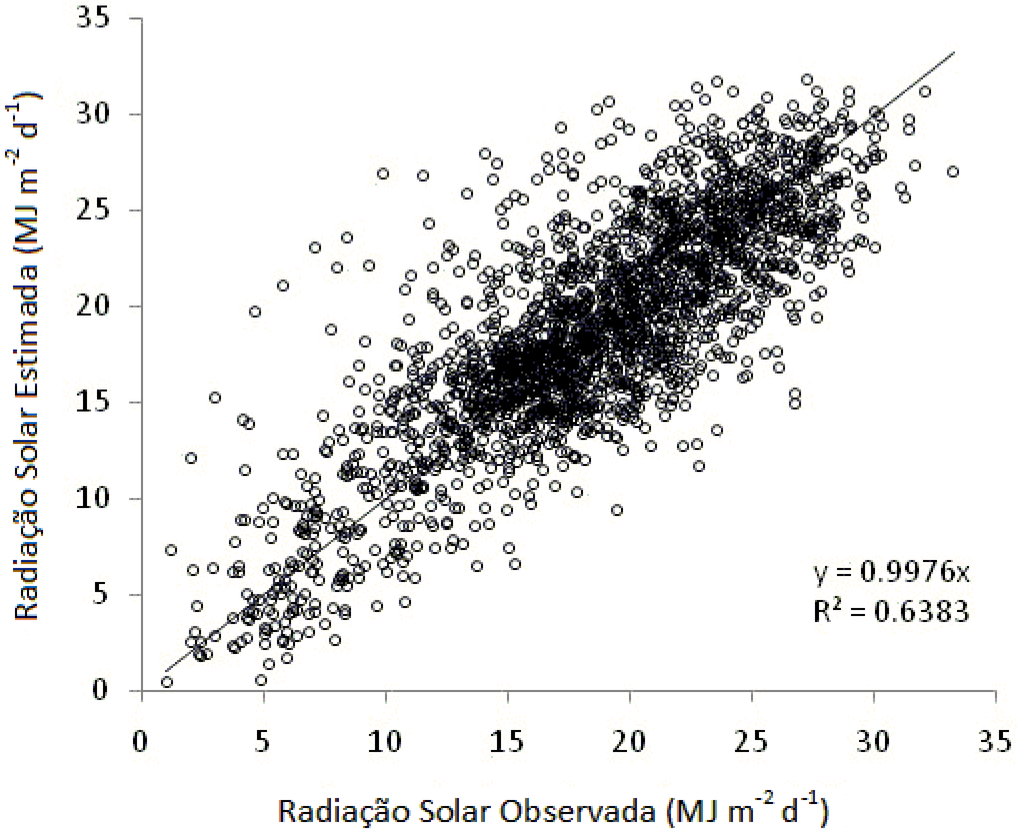
Estimativa da Radiação Solar Global (3.26)

Método de Bristol & Campbel (1982):

$$Qg = Qo \cdot A \cdot [1 - e^{(-B\cdot(T\max - T\min)^{c})}]$$

em que A, B e C são coeficientes empíricos, sendo A=0,7812, B=0,00515, e C=2,2

Método de Bristol & Campbel (1982)



Exercício

Com base nos equações anteriores, calcule Qg pelos três métodos, admitindo n=8,5 h, Tmax = 34 ^oC e Tmin = 17 ^oC.

NDA = 96
LAT = -22,8667^o (Pira)
Declin = 6,3774^o
·Hn = 87,2983^o
$(d/D)^2$ = 0,9973
Qo = 31,8298 MJ/m2.d

Angstron
N = 11,6398h
n = 8,5 h
NDA = 96
a = 0,28
b = 0,51
Qg = 20,7667 MJ/m2.d

Bristol & Campbel
Tmax = 34^{o}C
Tmin = 17^{o}C
A = 0,7812
B = 0,00515
C = 2,2
Qg = 23,0606 MJ/m2.d

Hargreaves
Tmax = 34^{o}C
Tmin = 17^{o}C
K = 0,16
Qg = 20,9981 MJ/m2.d

Leitura

Obrigatória:

Apostila de Meteorologia Agricola. ESALQ. 2007. Caps 5.

Disponível em http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf