



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola  
1º Semestre de 2017



# Radiação Solar e a Produção Vegetal – Parte 2

Prof. Fábio Marin



# Lei de Planck

(3.3)

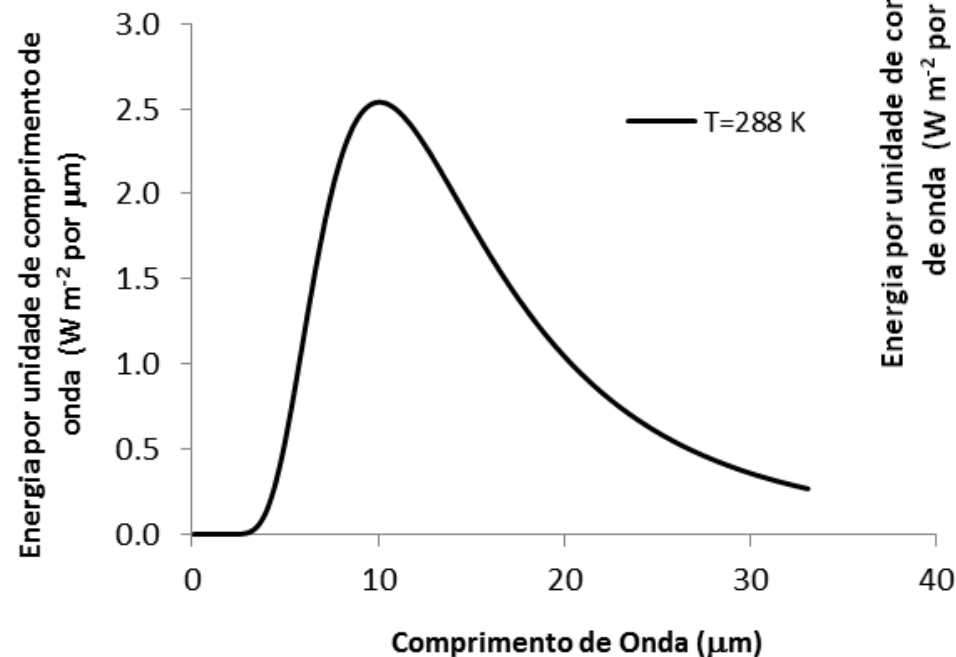
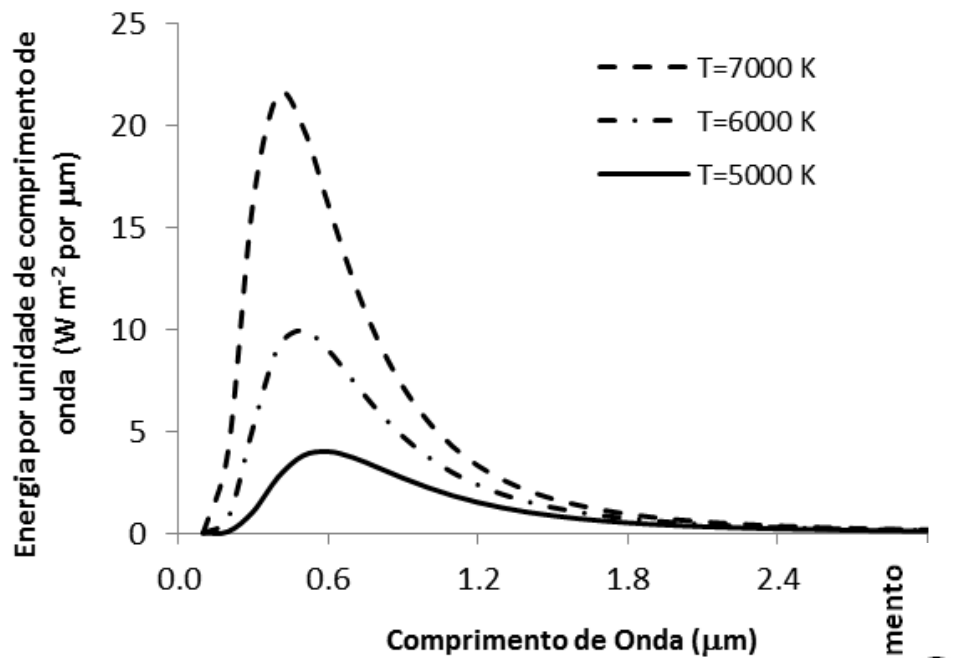
$$E_b = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ e^{\left( \frac{hc}{k\lambda T} \right)} - 1 \right]}$$

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

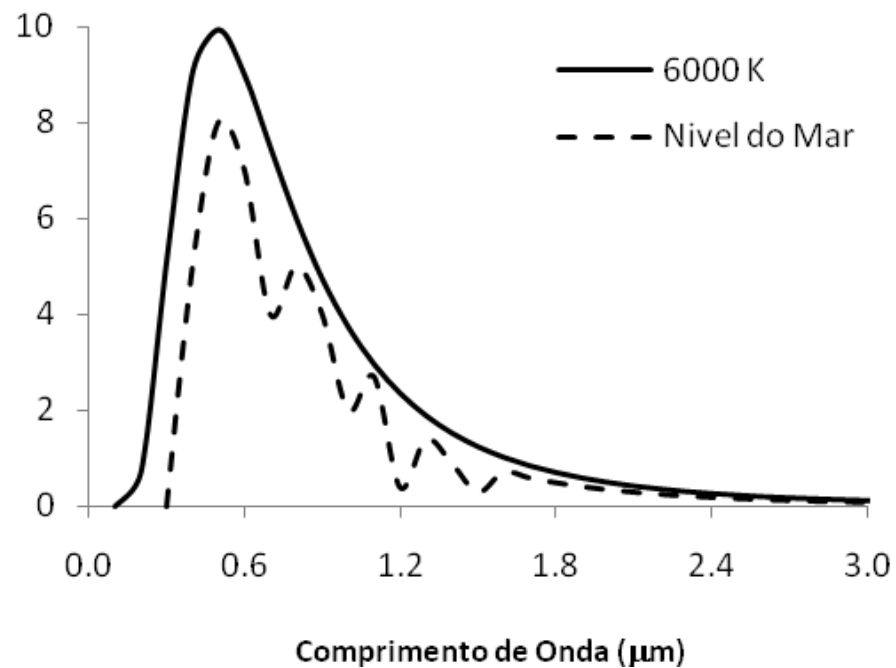
# Aplicação da Lei de Planck

- 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 ( $\lambda < 400\text{nm}$ ), enquanto o vapor d'água absorve principalmente radiação na faixa do infravermelho ( $\lambda > 700\text{nm}$ ). A diferença entre as duas linhas informa sobre a absorvidade/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)



# Espectro da Radiação Solar

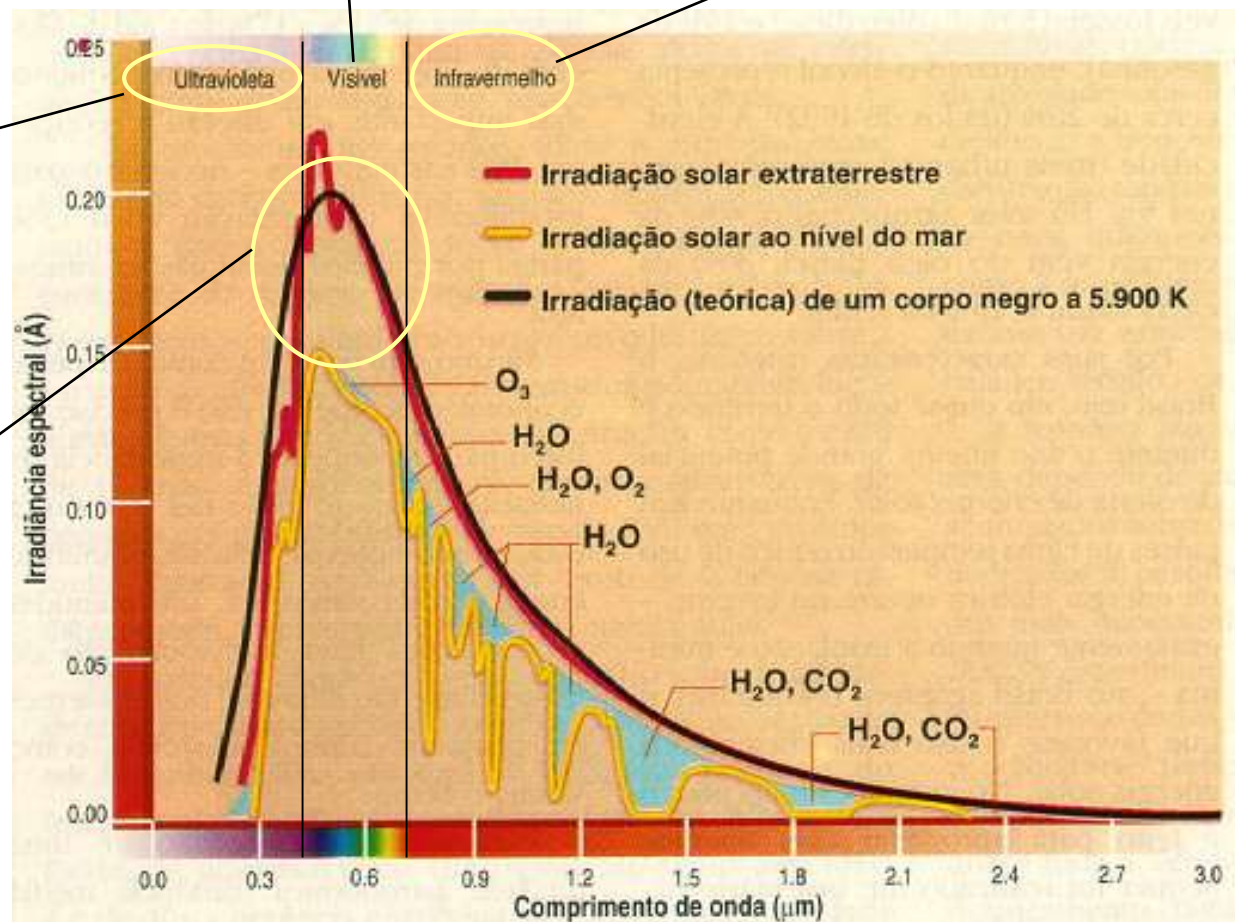
Radiação

Fotossinteticamente Ativa:  $380 > \lambda > 700 \text{ nm}$

$\lambda > 700 \text{ nm}$

$\lambda < 400 \text{ nm}$

Faixa de maior disponibilidade de energia



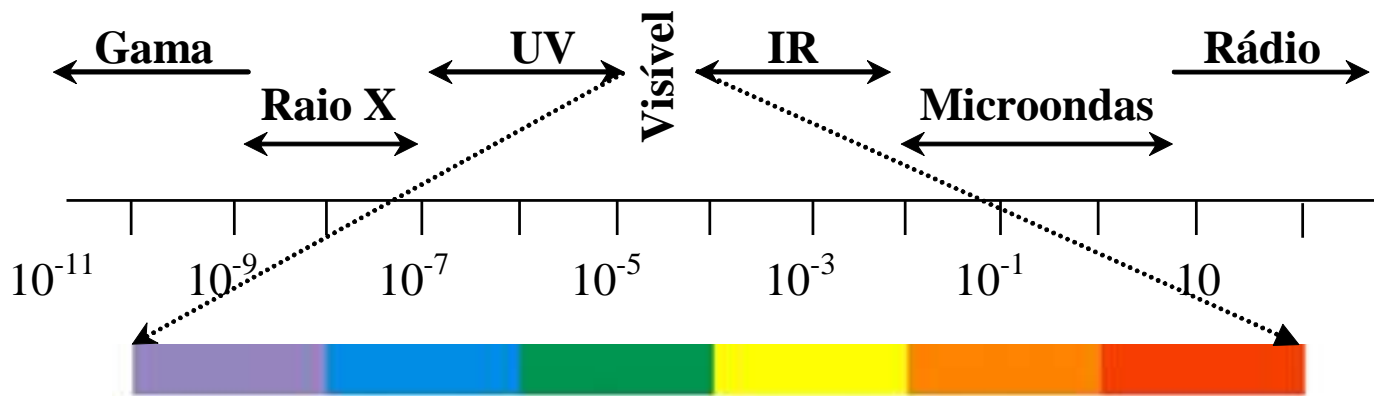
- A energia radiante também comporta-se como uma partícula portadora de energia (fóton), caracterizada por:

$$E = h.f = h.c/\lambda$$

onde h é a constante de Planck ( $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{J.s}$ )

frequência (f) - 1/s (hertz)

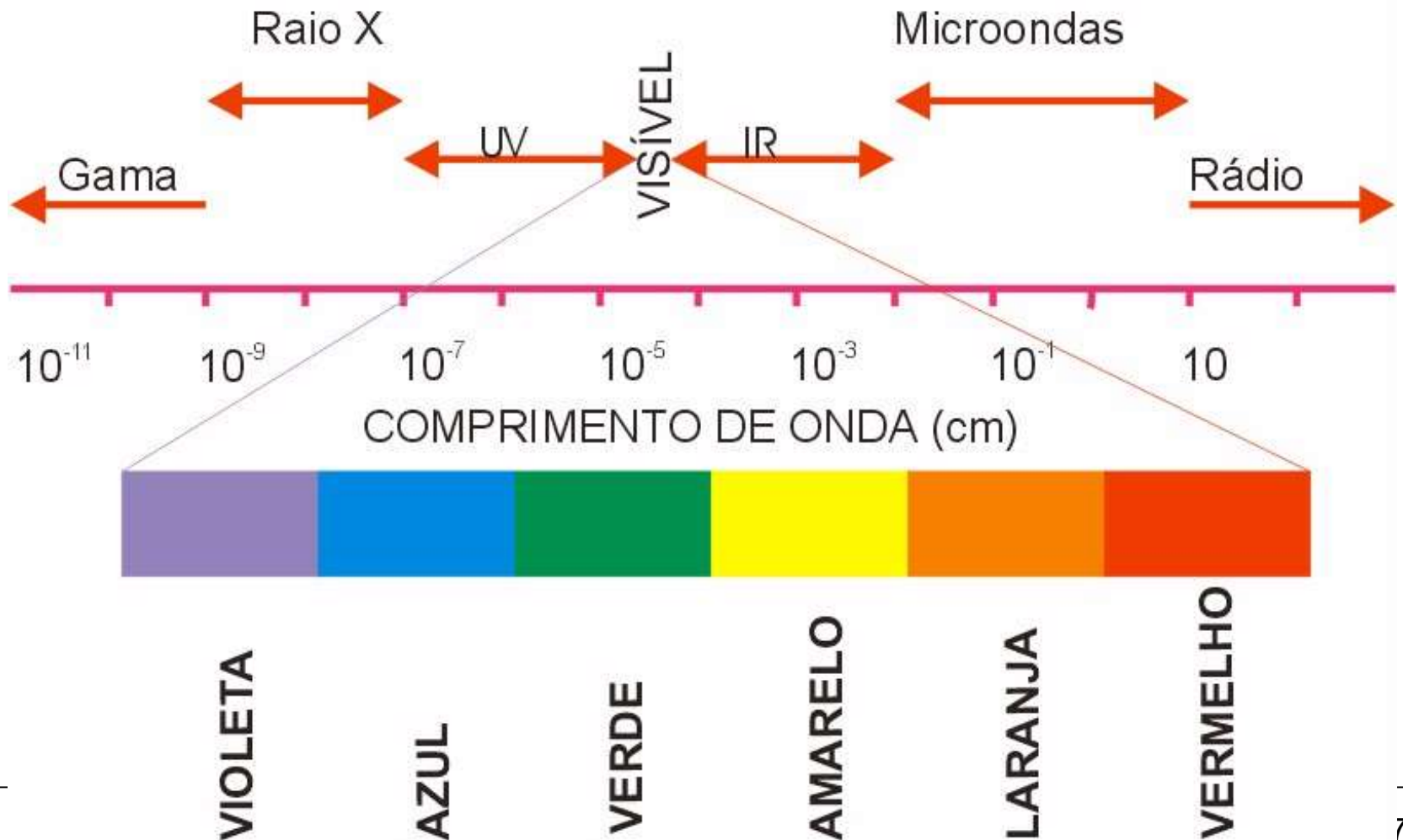
- Espectro eletromagnético:



Cor	Comprimento de onda	Frequência ( $10^{12}$ Hz)
violeta	390 - 455	659 - 769
azul	455 - 492	610 - 659
verde	492 - 577	520 - 610
amarelo	577 - 597	503 - 520
laranja	597 - 622	482 - 503
vermelho	622 - 780	384 - 482



# Espectro Eletromagnético

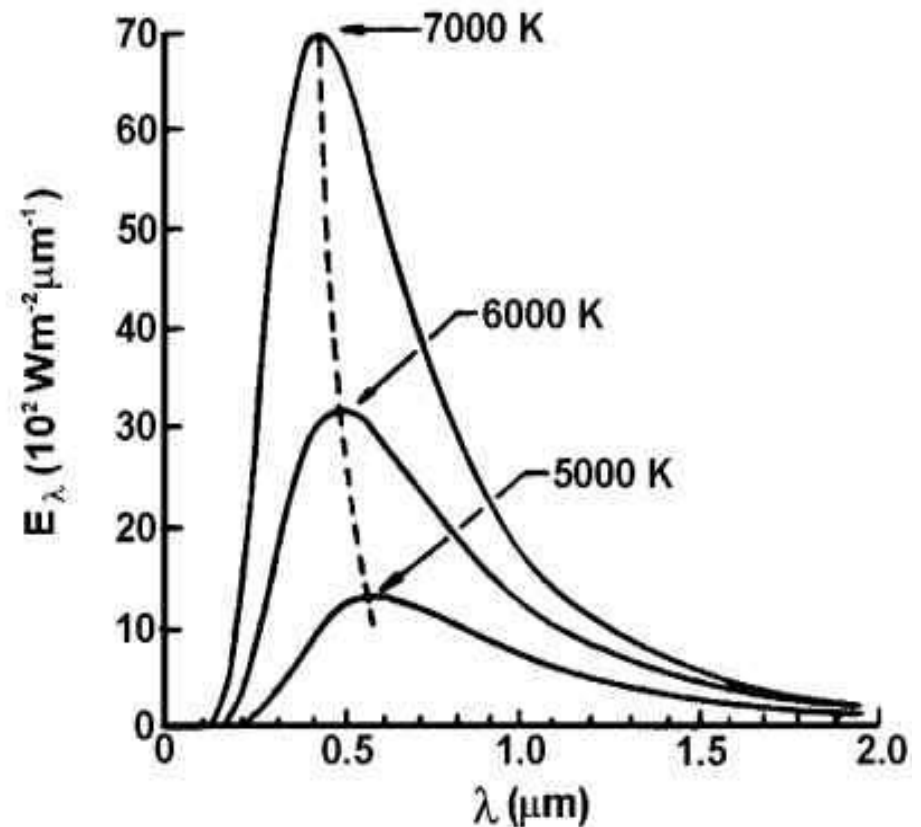


# Derivações da Lei de Planck:

## 1) Lei do Deslocamento de Wien

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

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





# Exercício Rápido

- Calcule o comprimento de onda predominante para a temperatura de 15 °C e de 6000 °C

# Derivações da Lei de Planck:

## 2) Lei de Stefan-Boltzmann

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

A emissão de radiação de um corpo negro é dada pela expressão, onde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  (constante de Stefan-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  $T \sim 6000 \text{ K}$ , emite centenas de milhares de vezes mais energia que a Terra, com  $T \sim 288 \text{ K}$ .  $\varepsilon$  é a emissividade do corpo; admite-se  $\varepsilon \cong 1$  para superfícies vegetadas.

# Derivações da Lei de Planck:

## 2) Lei de Stefan-Boltzmann

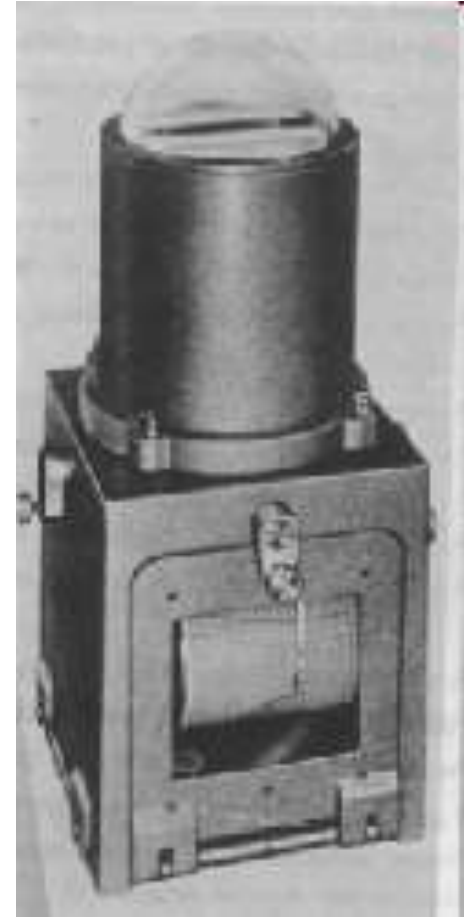
Superfícies	$\varepsilon$
Água	0,92 a 0,96
Areia molhada	0,95
Areia seca	0,89 a 0,90
Gelo	0,82 a 0,99
Solo molhado	0,95 a 0,98
Folhagem de algodoeiro	0,96
Folhagem de cana-de-açúcar	0,97
Folhagem de feijão	0,94
Folhagem de fumo	0,97
Folhagem de milho	0,94

# Exercício Rápido

- Calcule a irradiância de um corpo com temperatura de 15 °C e de 6000 °C.
- Assuma  $\varepsilon = 1$

# Medida da Radiação Solar Global

- Actinógrafo de Robitzch
- Equipamento projetado em 1915 e constituído de duas placas metálicas pintadas de branco e preto. O aquecimento diferencial decorrente da absorção de radiação solar promove uma dilatação 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

Conhecendo-se a relação entre  $Q_g$  e  $Q_o$ , interação com a atmosfera (absorção e difusa) e insolação, podemos realizar como correção entre essas variáveis:

## *Equação de Angstrom-Prescott*

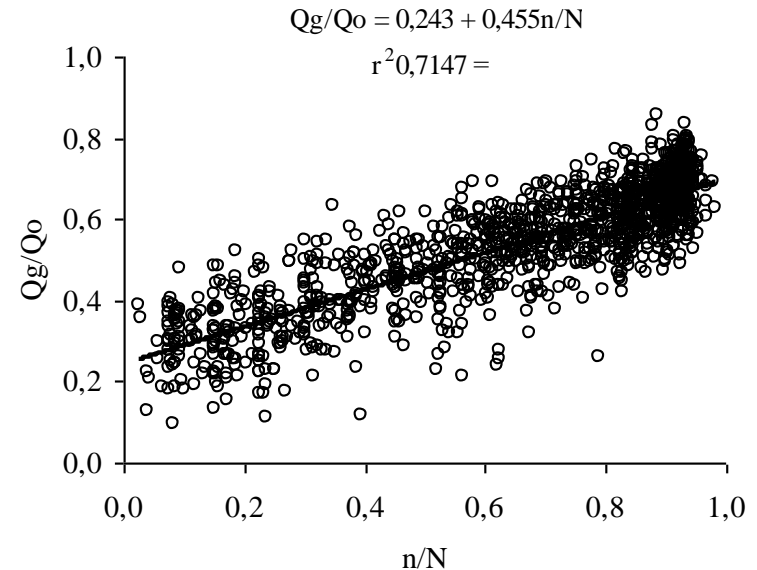
$$Q_g/Q_o = (a + b * n/N)$$

$$Q_g = Q_o * (a + b * n/N)$$

$n$  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.



Determinação dos coeficientes  $a$  e  $b$ , da equação de Angstrom, para Araras/SP. Pilau et al., (2007)



## Exemplo:

Latitude = 27°21'25" Sul

$Q_0 = 35,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

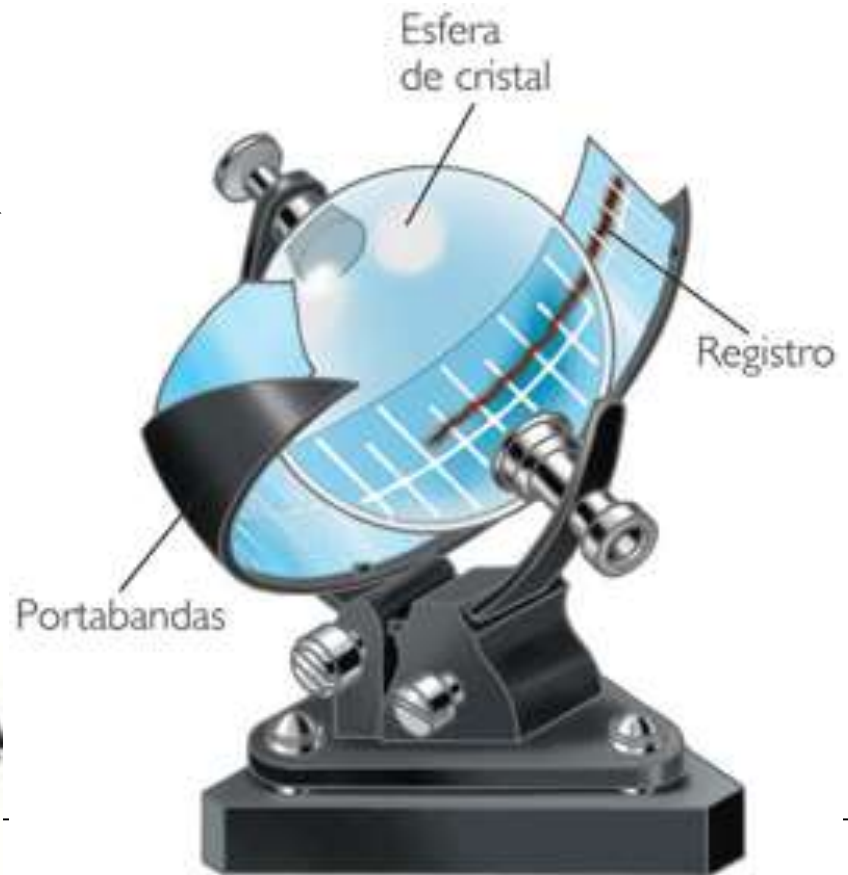
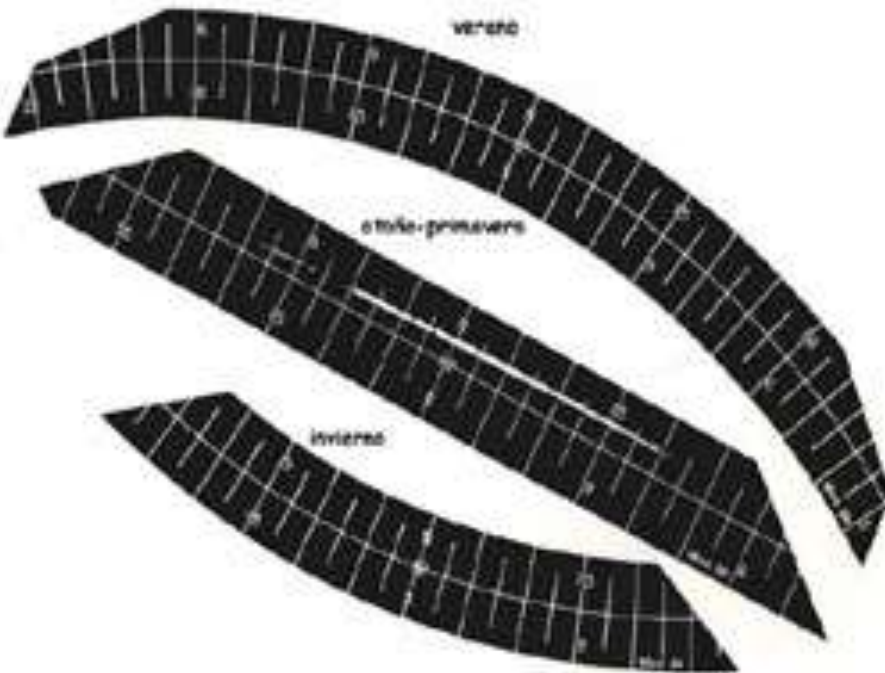
$N = 12\text{h}$

$n = 8,5\text{h}$

$Q_g = ?$

Medida do número de horas de brilho solar ( $n$ )

Heliógrafo - "Registro gráfico"



# a e b

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

$$a = 0,29 * \cos \phi$$

$$b = 0,52$$

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
Soledade - 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:

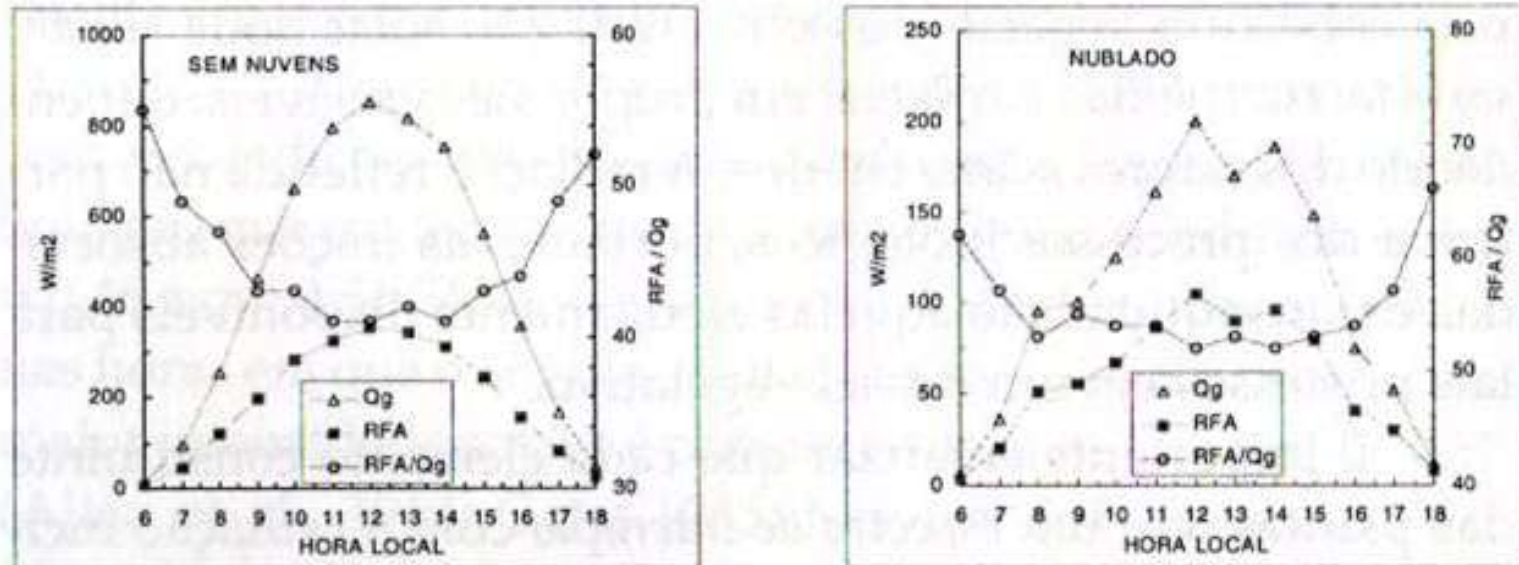
$$Q_g = k \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} Q_o$$

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

# Exercício Rápido

- Com base nos exercícios anteriores, calcule  $Q_g$  pelos dois métodos, admitindo  $n=7,1$  h,  $T_{max} = 32$  °C e  $T_{min} = 19$  °C.

*A proporção de Radiação Fotossinteticamente Ativa muda conforme a nebulosidade.*



**FIGURA 11.1** Variação horária da radiação solar incidente ( $Q_g$ ), da RFA, e da fração  $RFA / Q_g$ , em Piracicaba, SP, para um dia sem nuvens e um nublado. Adaptado de Assunção (1994).

**Dia de céu claro: RFA = 45% de  $Q_g$  (41% a 55%)**  
**Dia de céu nublado: RFA = 56% de  $Q_g$  (52% a 66%).**

# Radiação Absorvida pelo Dossel Vegetativo

- É possível calcular a quantidade de energia absorvida pelas folhas de uma plantação através da Lei de Beer (adaptada por Monsi & Saeki)

$$I = I_0 e^{-k IAF}$$

sendo que K é o coeficiente de extinção, que é função do tipo de folha, da arquitetura da copa e do ângulo de incidência dos raios solares.

# Deduzindo a Lei de Beer

- Quando um feixe monocromático de radiação solar  $I$  atravessa um meio absorvente, ele pode ser atenuado em função da distância percorrida no meio, de modo que a proporcionalidade torna-se válida:

$$\frac{dI_\lambda}{db} \propto -I_{o\lambda} \quad (1)$$

$dI$  é a variação infinitesimal da radiação incidente ( $I_{o,\lambda}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ) com comprimento de onda  $\lambda$  ao atravessar o meio ao longo da distância  $db$  (m).

Para transformar essa proporcionalidade em uma igualdade, pode-se inserir um coeficiente  $k$ , obtendo-se:

$$\frac{dI_\lambda}{db} = -k I_{o\lambda} \quad \rightarrow \quad \frac{db}{dI_\lambda} = \frac{1}{k I_{o\lambda}} \quad (2)$$

Em que  $k$  é um coeficiente adimensional que descreve a habilidade do meio em atenuar a radiação.

Integrando-se a Eq. 2 para a distância  $b$ , tem-se:

$$b = - \int_0^b \frac{1}{k I_{o\lambda}} dI \quad (3)$$

# Deduzindo a Lei de Beer

- Obtendo-se então:

$$b = -\frac{\ln I}{k} + C \quad (4)$$

- Em que C é a constante de integração que pode ser determinada fazendo-se  $b=0$  (assumindo que o meio tem espessura=0) e neste caso  $I=I_0$ , obtendo-se então:

$$0 = \frac{\ln I_0}{k} + C \quad \rightarrow \quad C = -\frac{\ln I_0}{k} \quad (5)$$

- Substituindo (5) em (4):

$$-b = \frac{\ln I}{k} - \frac{\ln I_0}{k} \quad (6)$$

- Isolando-se I tem-se que:  $-b = \frac{1}{k} \ln \frac{I}{I_0}$  (7)

$$I = I_0 e^{-k b} \quad (8)$$

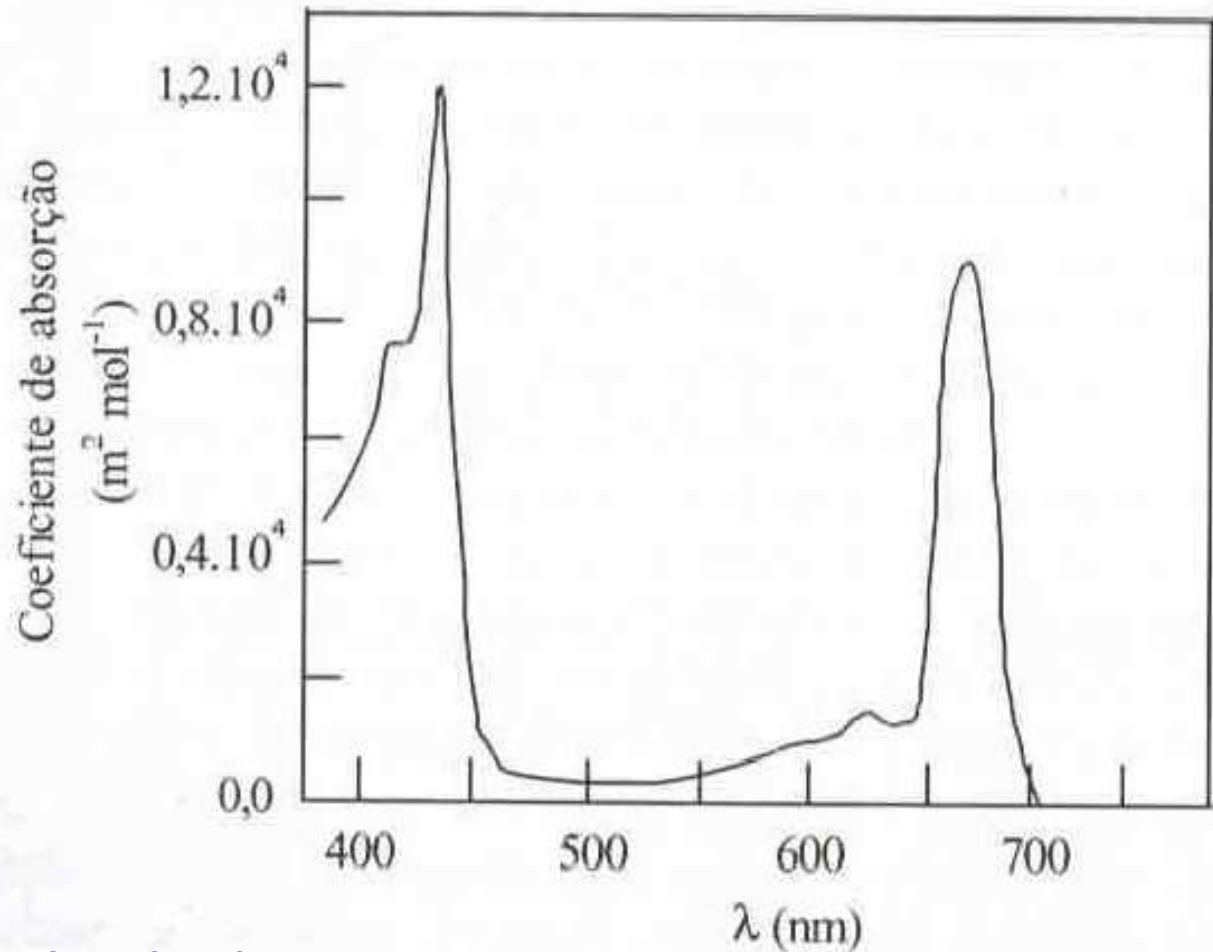


## Espectro de absorção da radiação eletromagnética pela clorofila a dissolvida em solvente orgânico

### Importante:

Você precisa entender os seguintes conceitos:

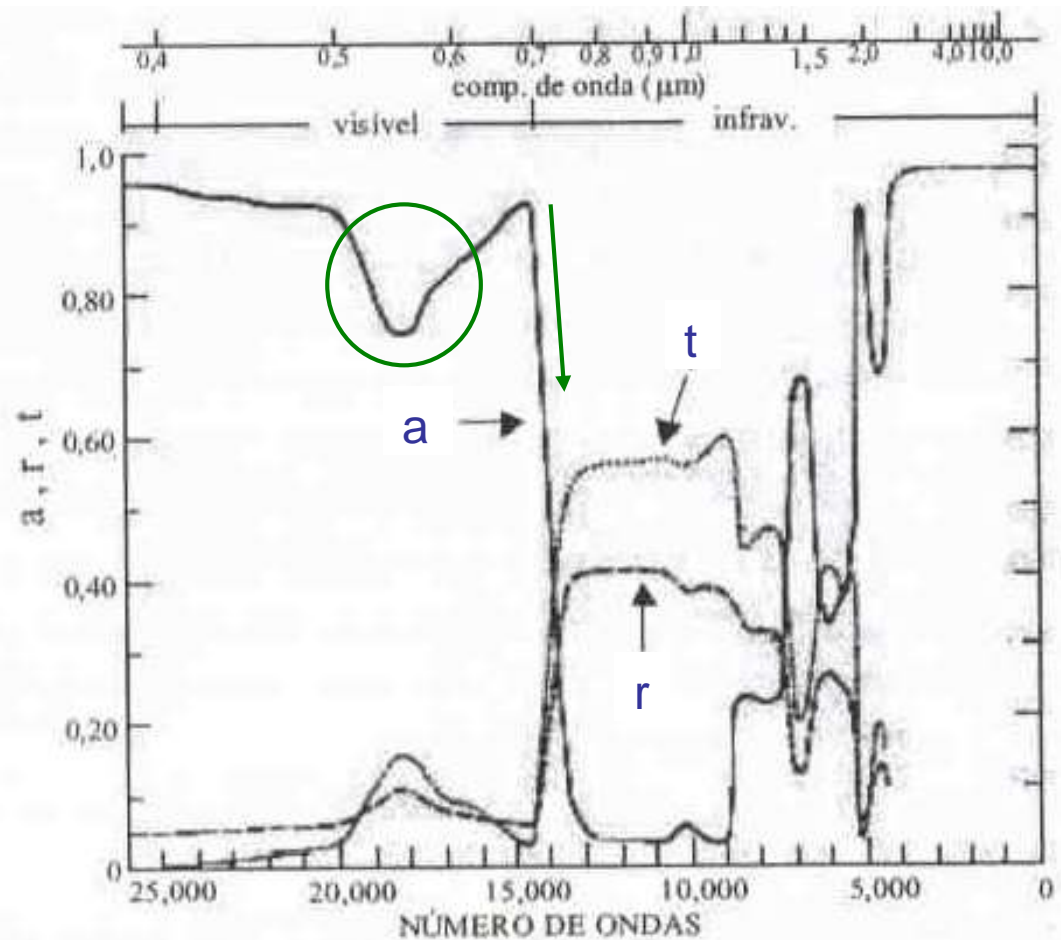
- Absorção
- Reflexão
- Emissão
- Transmissão



Fonte: Angelocci, 2002.

## Folhas largas e verdes: curvas espectrais de absorptância (a), reflectância (r) e transmitância (t)

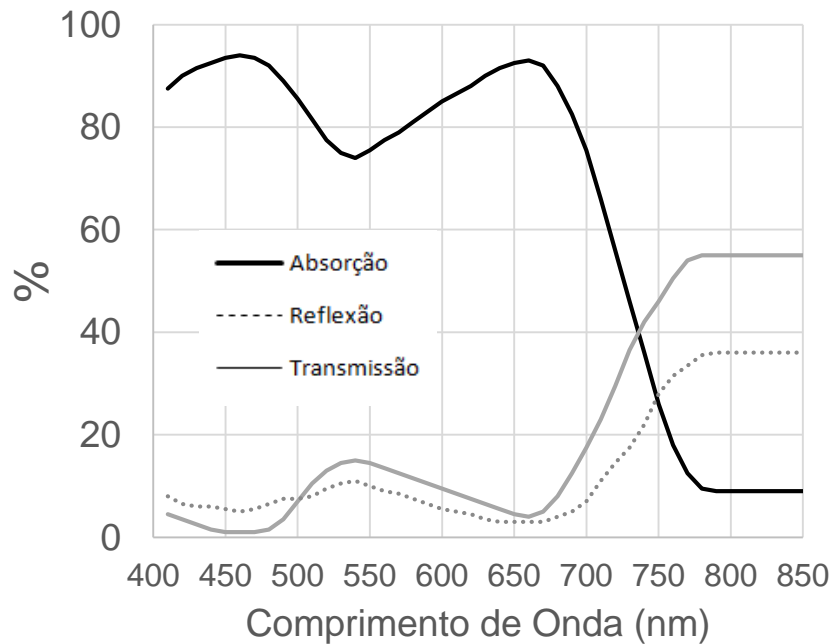
Observe aqui as três linhas representando os comprimentos de onda mais absorvidos, refletidos e transmitidos pelas folhas.



Fonte: Angelocci, 2002 (Adaptado de Gates, 1965)

# Radiação Absorvida pelo Dossel Vegetativo

Observe a variação espectral da refletância, transmitância e absorbância para uma vegetação hipotética



$$\text{Absorção (A)} = (I_0 - I) / I_0$$

$$\text{Transmissão (T)} = I / I_0$$

$$\text{Reflexão (r)} = I_0 (1 - r)$$

Sendo que  $I_0$  é a radiação que incide sobre as folhas e  $I$  a radiação abaixo da folhagem