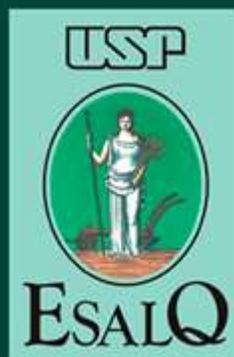


# Tópico 9 – Produtividade Potencial e Atingível

Prof. Fábio Marin

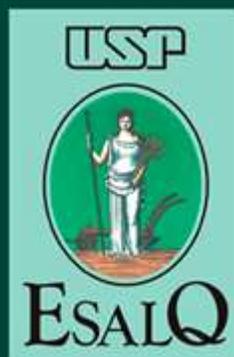
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
Departamento de Engenharia de Biosistemas  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola



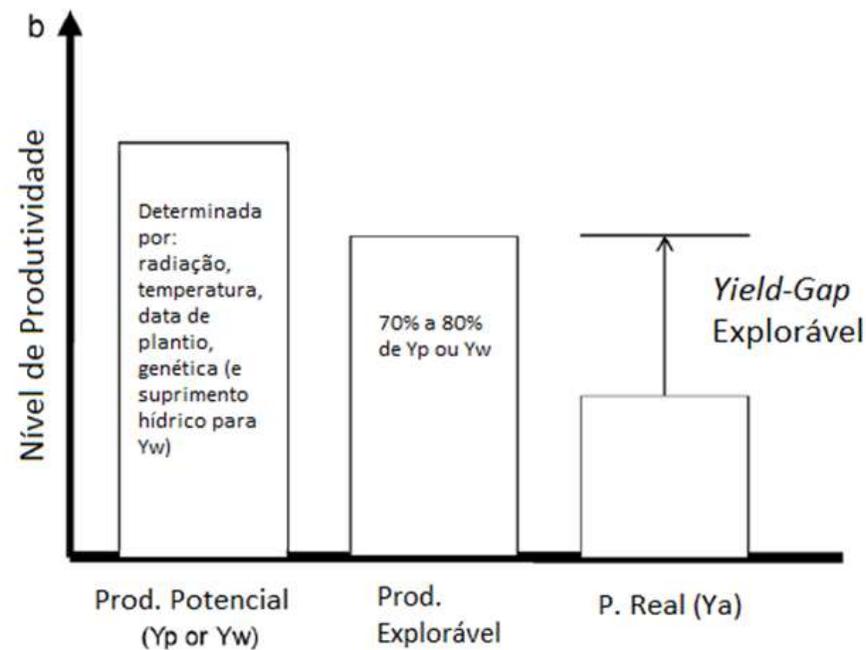
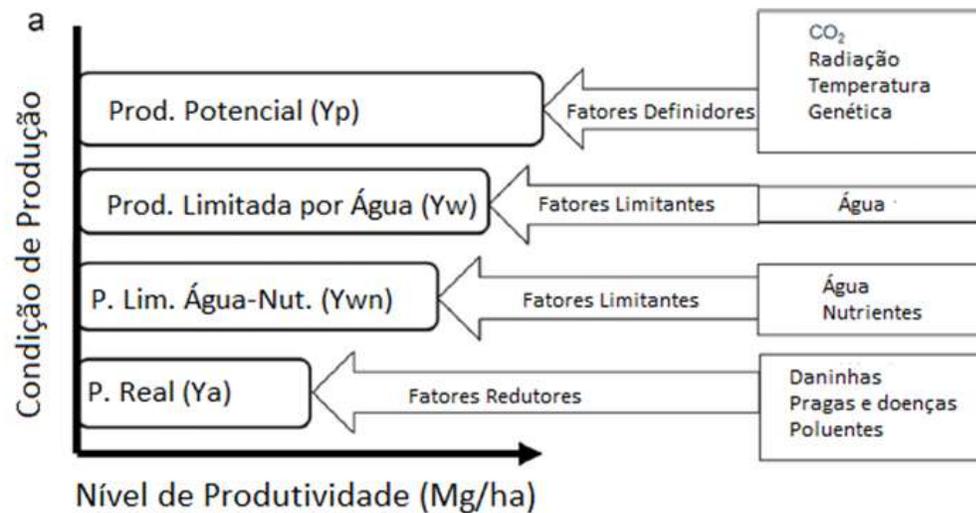
# Parte 1 – Produtividade Potencial

Prof. Fábio Marin

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
Departamento de Engenharia de Biosistemas  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola



# Níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes

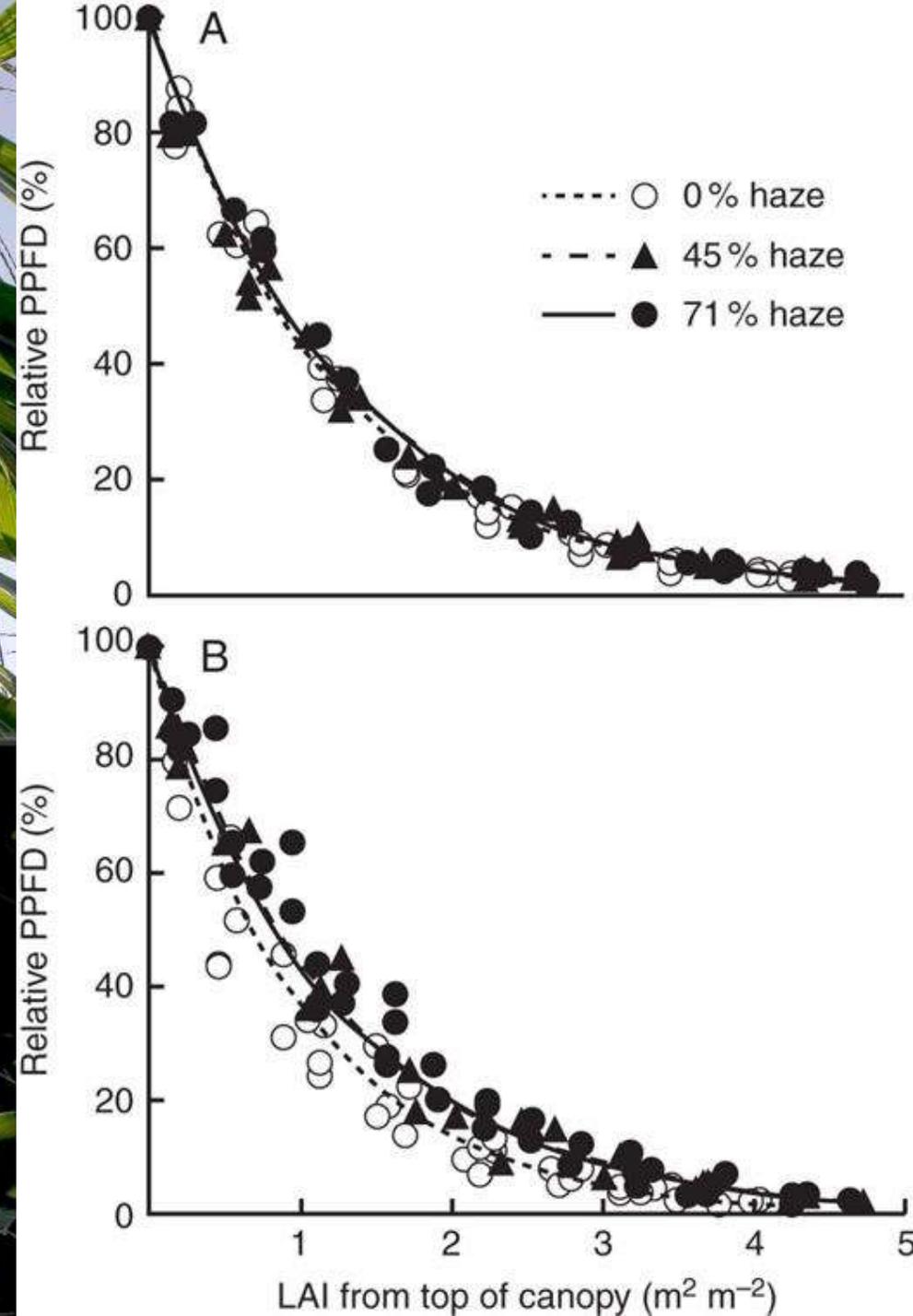


# Como calcular a radiação absorvida por um dossel vegetativo?

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

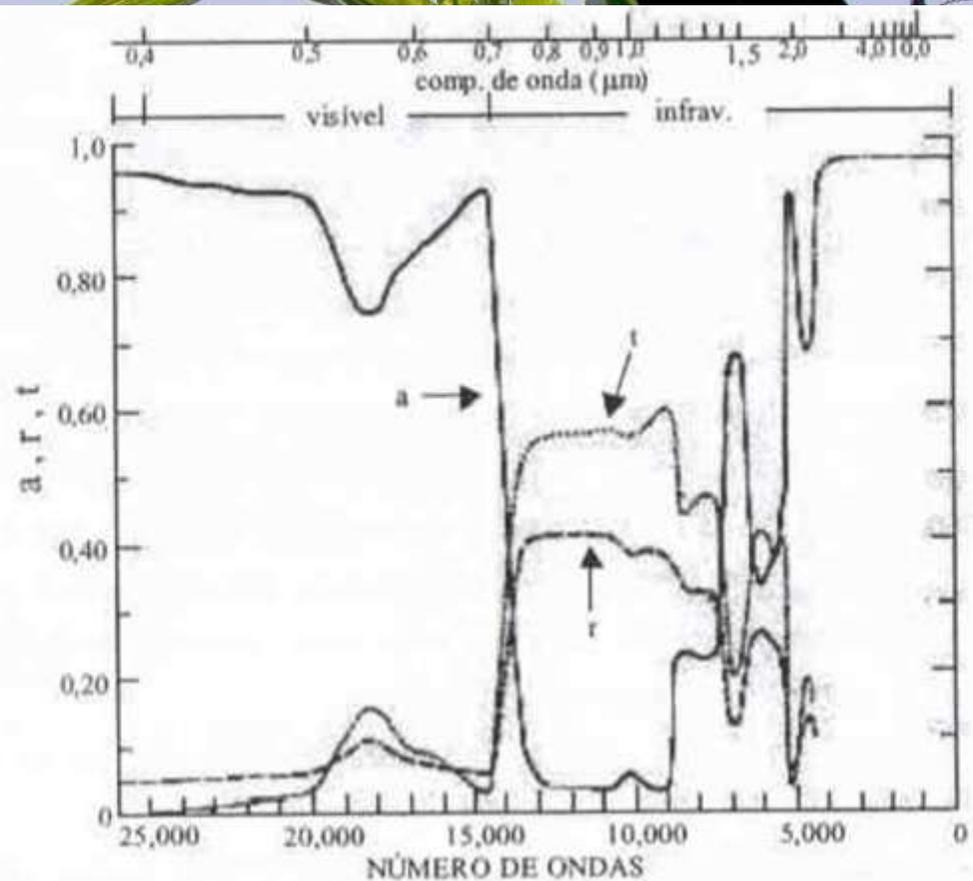
$$I = I_0 e^{-k IAF}$$

sendo que  $k$  é o coeficiente de extinção, que é função do tipo de folha, da arquitetura da copa o do ângulo de incidência dos raios solares,  $IAF$  é o índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ),  $I$  é a radiação abaixo do dossel vegetativo e  $I_0$  é a radiação solar acima do dossel.



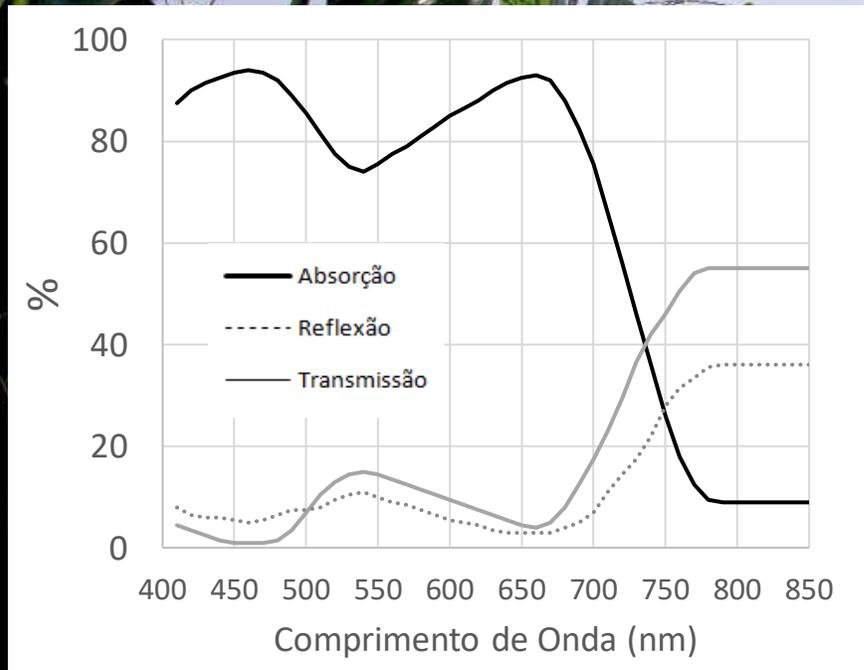
Observe aqui as três linhas representando os comprimentos de onda mais absorvidos, refletidos e transmitidos pelas folhas largas e verdes. As curvas espectrais mostram a variação espectral da absorptância (a), reflectância (r) e transmitância (t)

- Tente identificar no gráfico e entender os seguintes conceitos:
  - Absorção
  - Reflexão
  - Emissão
  - Transmissão



# Radiação Absorvida pelo Dossel Vegetativo

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



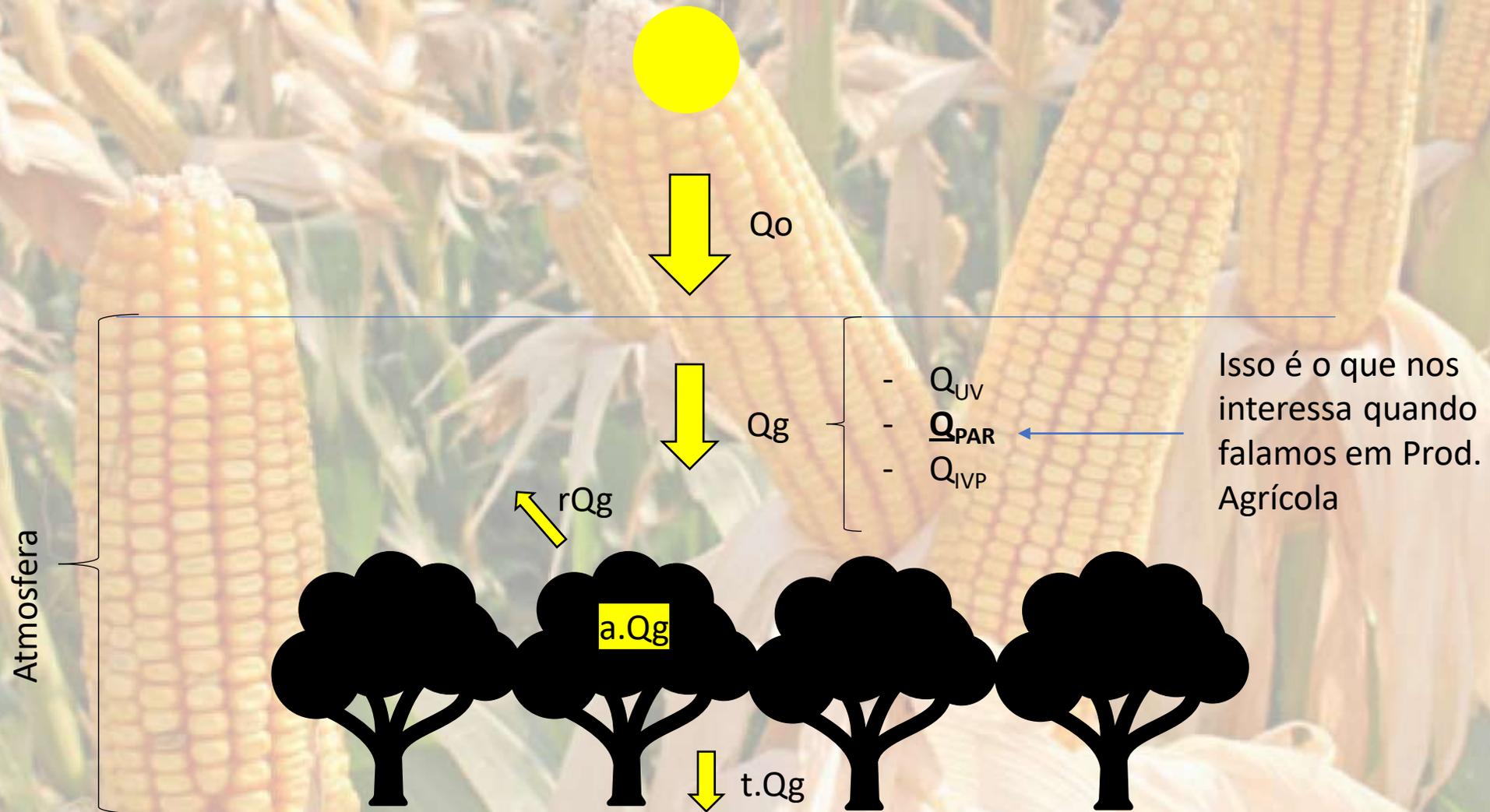
$$\text{Absorção (A)} = (I_0 - I) / I_0$$

$$\text{Transmissão (T)} = I / I_0$$

$$\text{Reflexão (r)} = I_0 (1 - r)$$

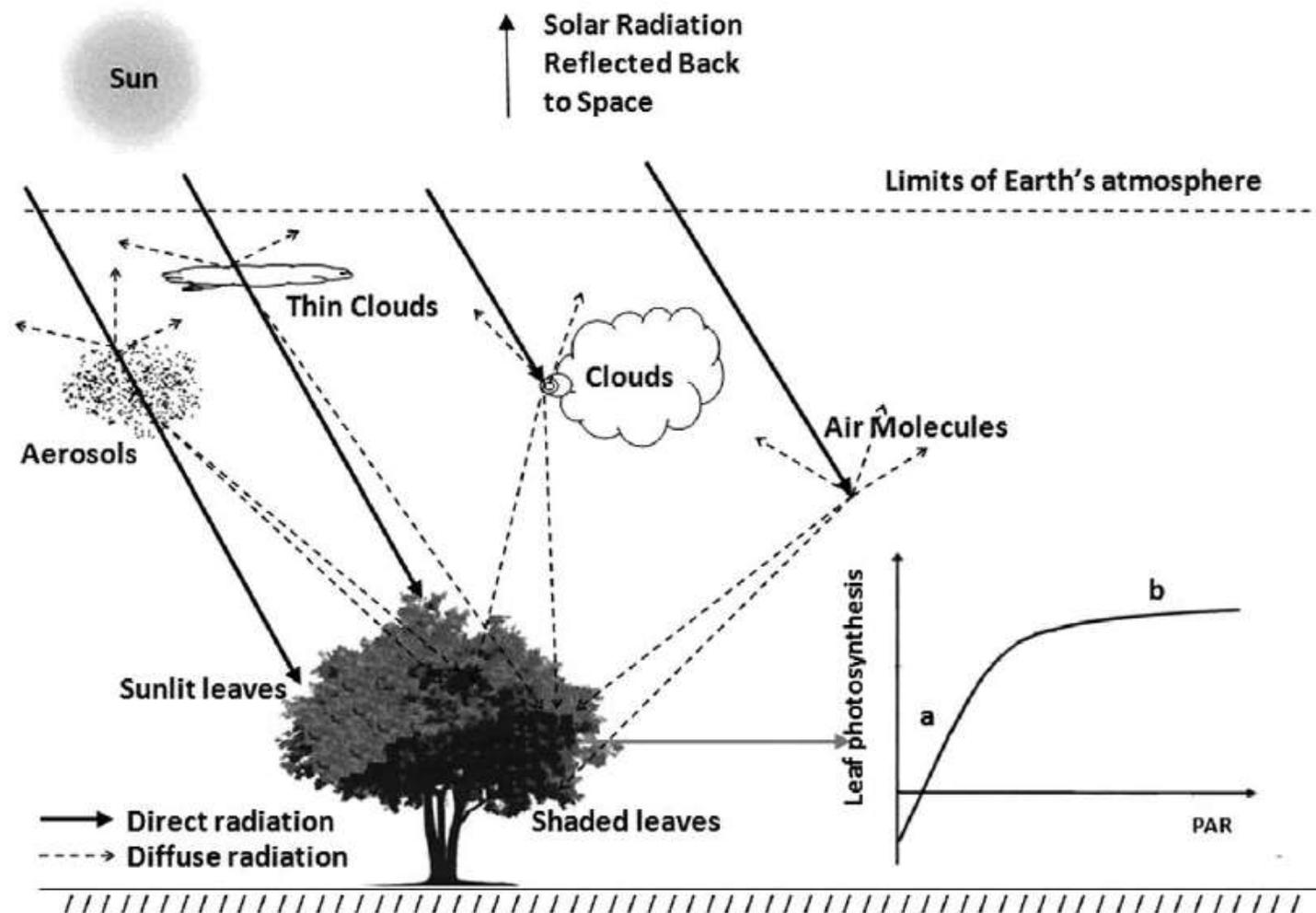
Sendo que  $I_0$  é a radiação que incide sobre as folhas e  $I$  e a radiação abaixo da folhagem

# Interação Radiação - Vegetação



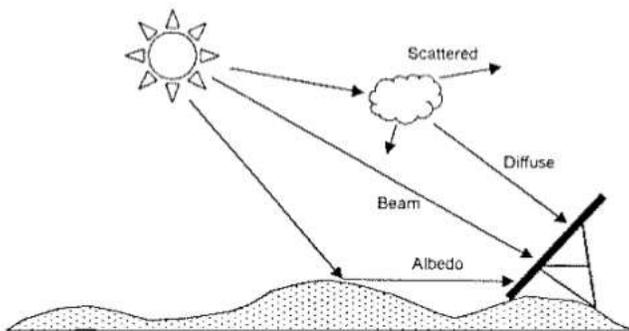
Observe agora um esquema um pouco mais detalhado...

- Representação esquemática da interação entre a radiação solar com a atmosfera, descrevendo a radiação solar direta (linha cheia) e difusa (linha pontilhada), bem como sua interação com a vegetação



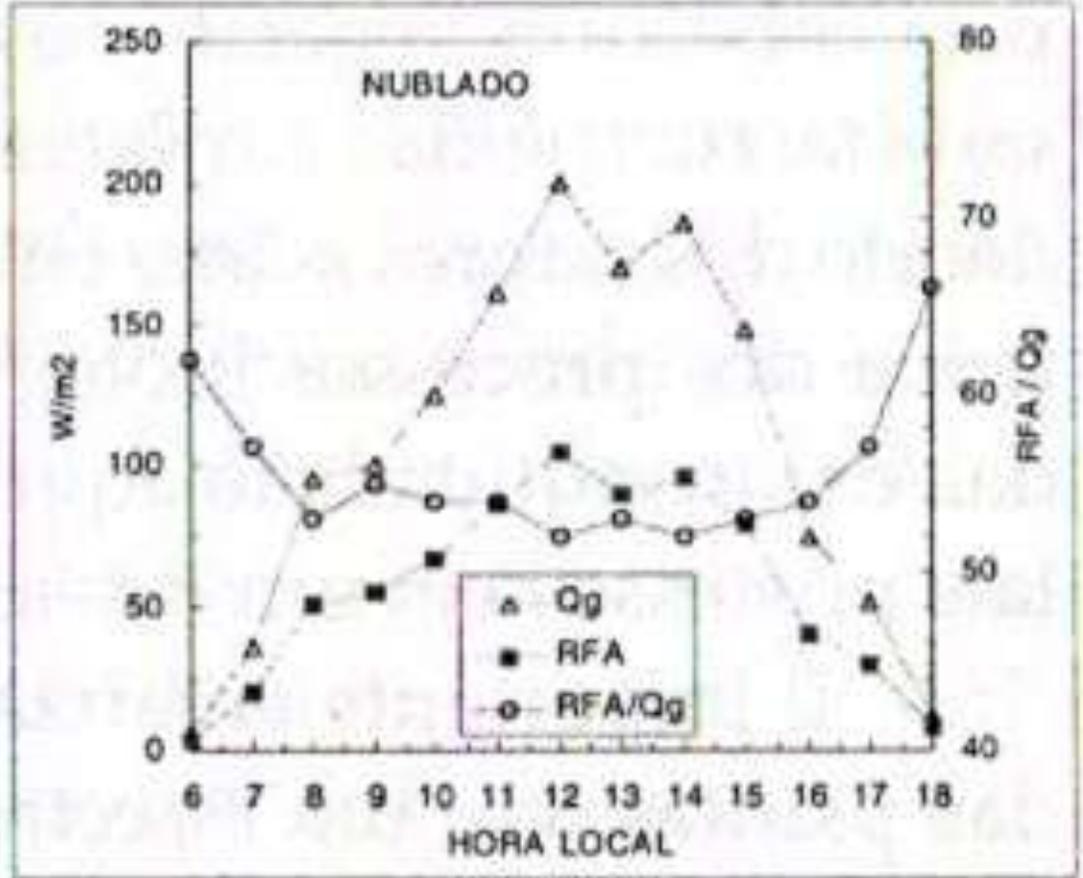
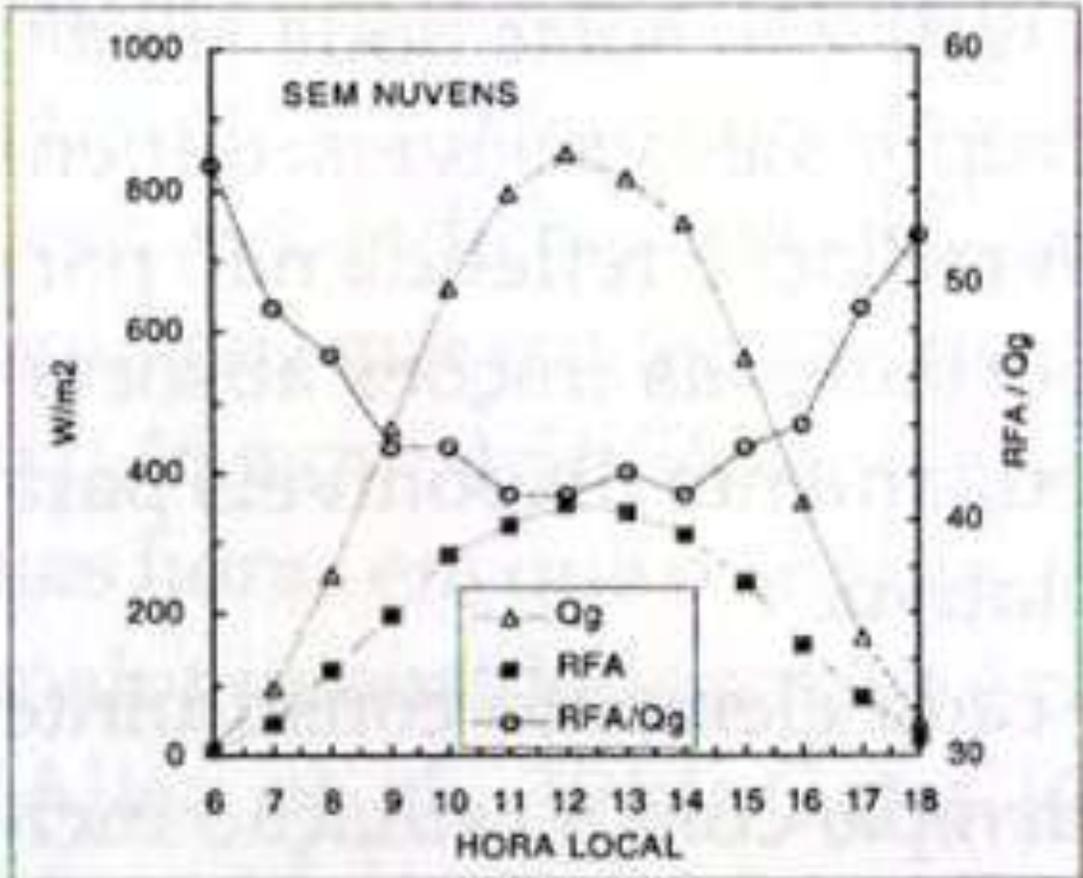
# Radiação direta e difusa

Difference between Beam Radiation and diffuse Radiation



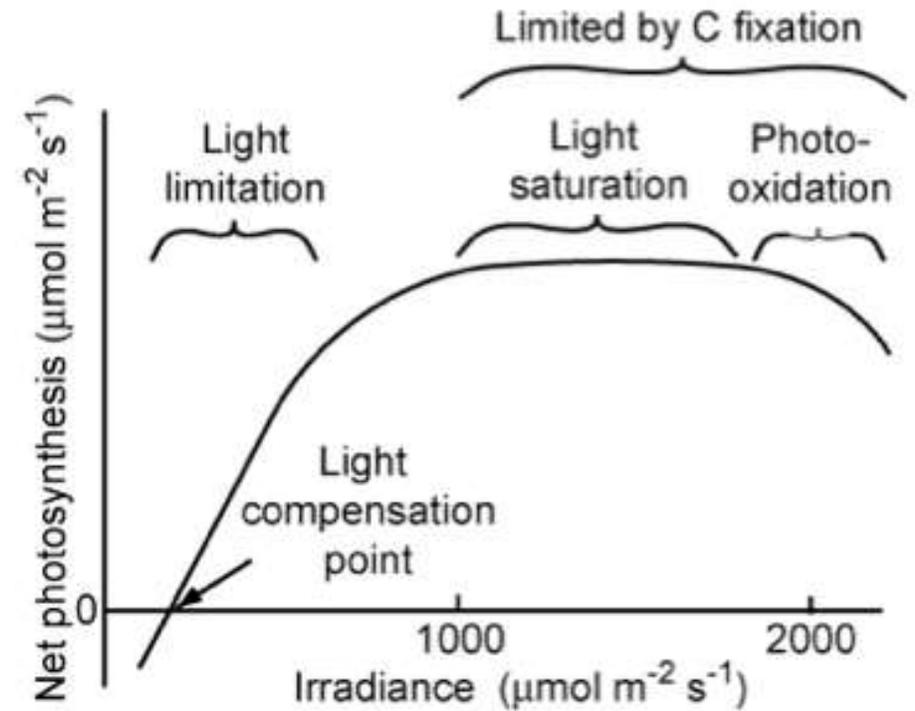
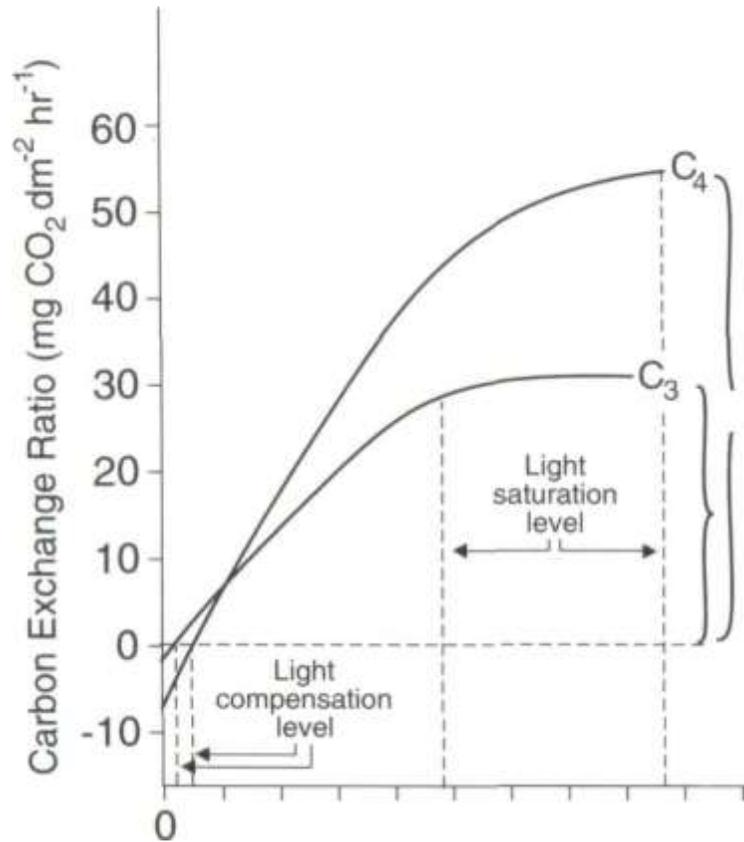
- Quanto ao *processo de difusão* da radiação solar, o efeito dos constituintes atmosféricos apenas muda a direção dos raios solares. Esse processo ocorre nos dias de céu nublado, por exemplo. Nessas situações, que os raios solares vêm de todas as direções possíveis. Evidentemente, esse processo também afeta a quantidade e a qualidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra, pois parte desta radiação é difundida de volta para o espaço sideral.
- Quanto mais limpa estiver a atmosfera, menor será a proporção da radiação solar que sofrerá o processo de difusão. Isso significa que maior proporção dos raios solares atingem *diretamente* a superfície. Essa radiação *direta* é que projeta sombra dos objetos e tem uma direção bem definida (unidirecional) e determinada pelo *ângulo zenital (Z)*.

A proporção de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) muda conforme a nebulosidade: dias nebulosos têm proporcionalmente mais radiação PAR.



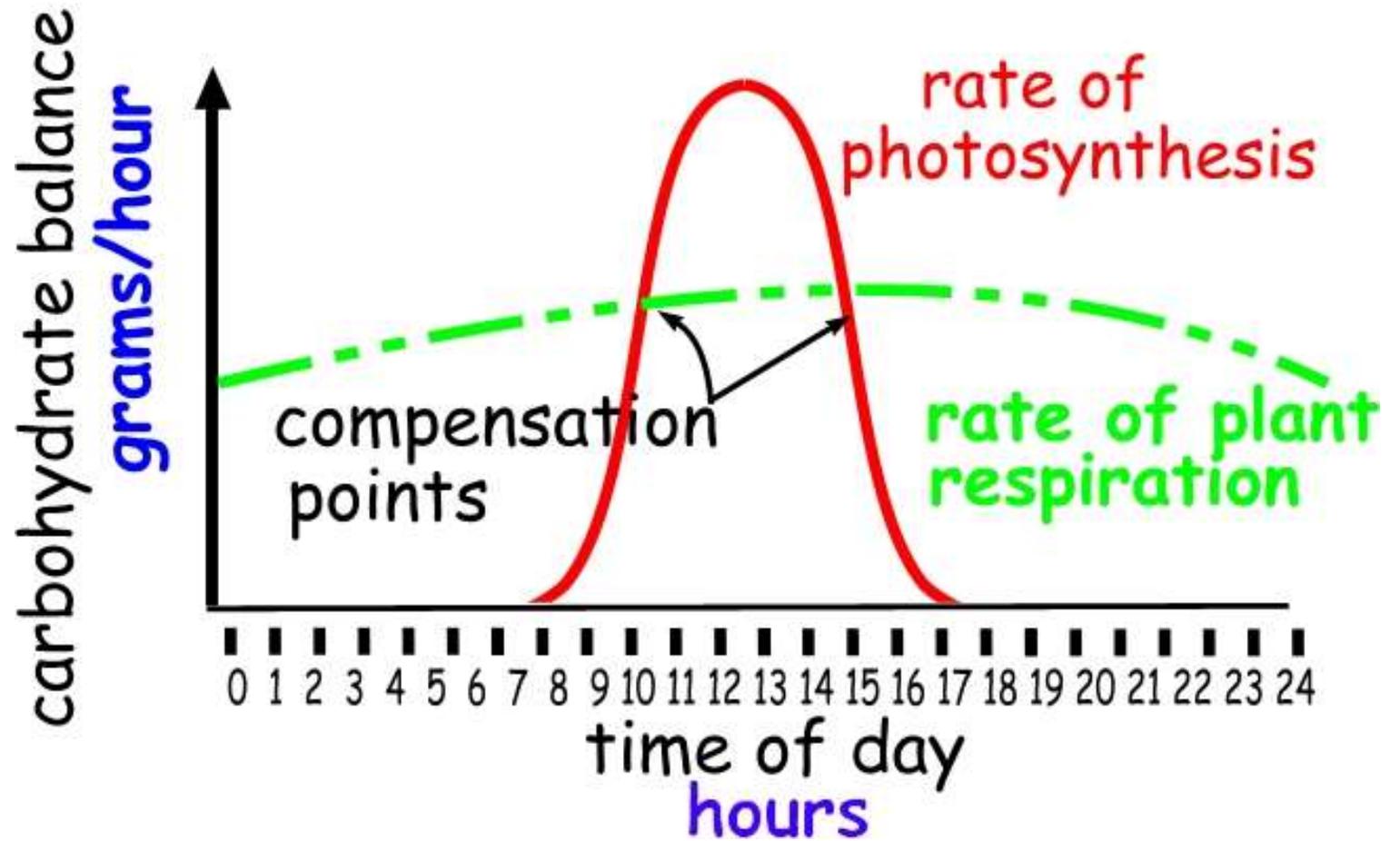
**FIGURA 11.1** Variação horária da radiação solar incidente ( $Q_g$ ), da RFA, e da fração  $RFA / Q_g$ , em Piracicaba, SP, para um dia sem nuvens e um nublado. Adaptado de Assunção (1994).

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

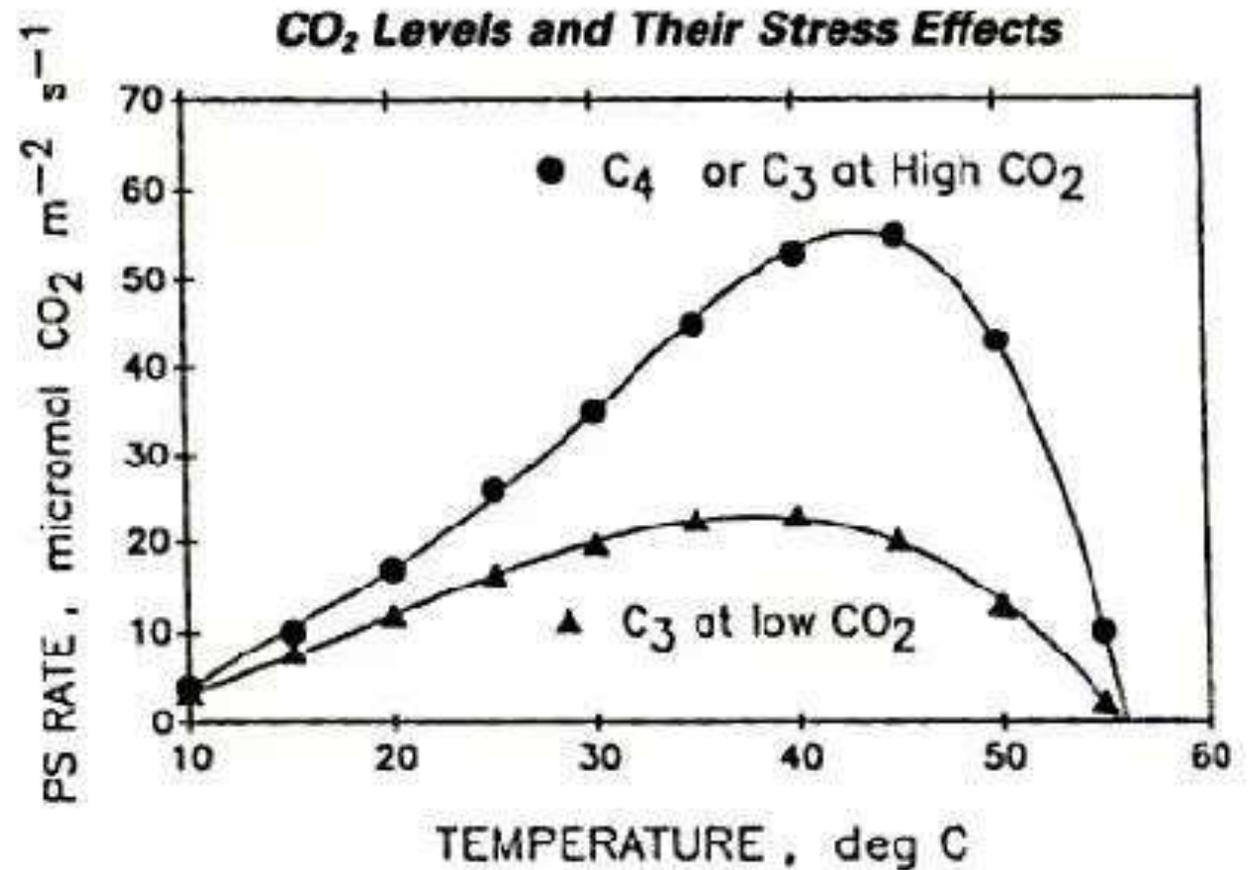


# Produção Vegetal X Radiação Solar

Produção  
Vegetal X  
Radiação  
Solar

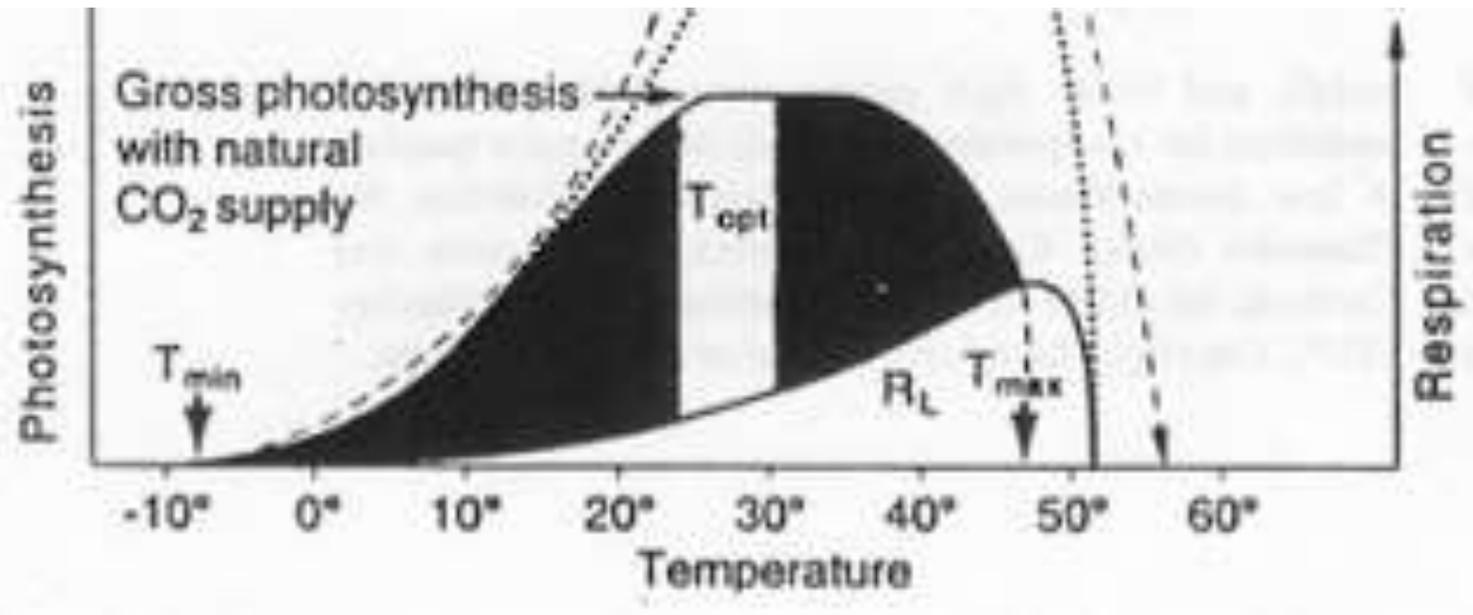


# Produção Vegetal X Temperatura



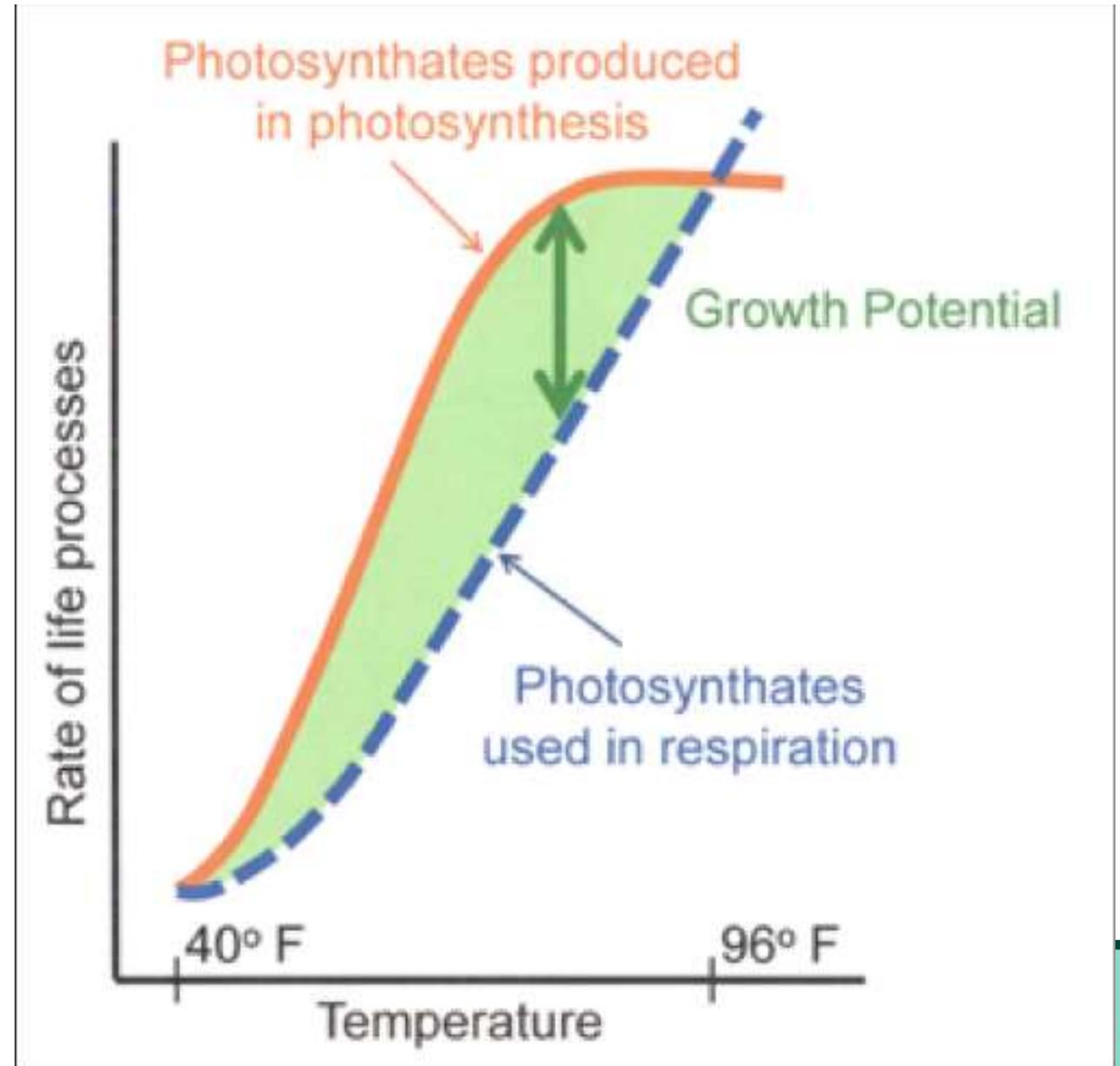
Photosynthetic rate versus temperature for C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> leaves.

# Produção Vegetal X Temperatura



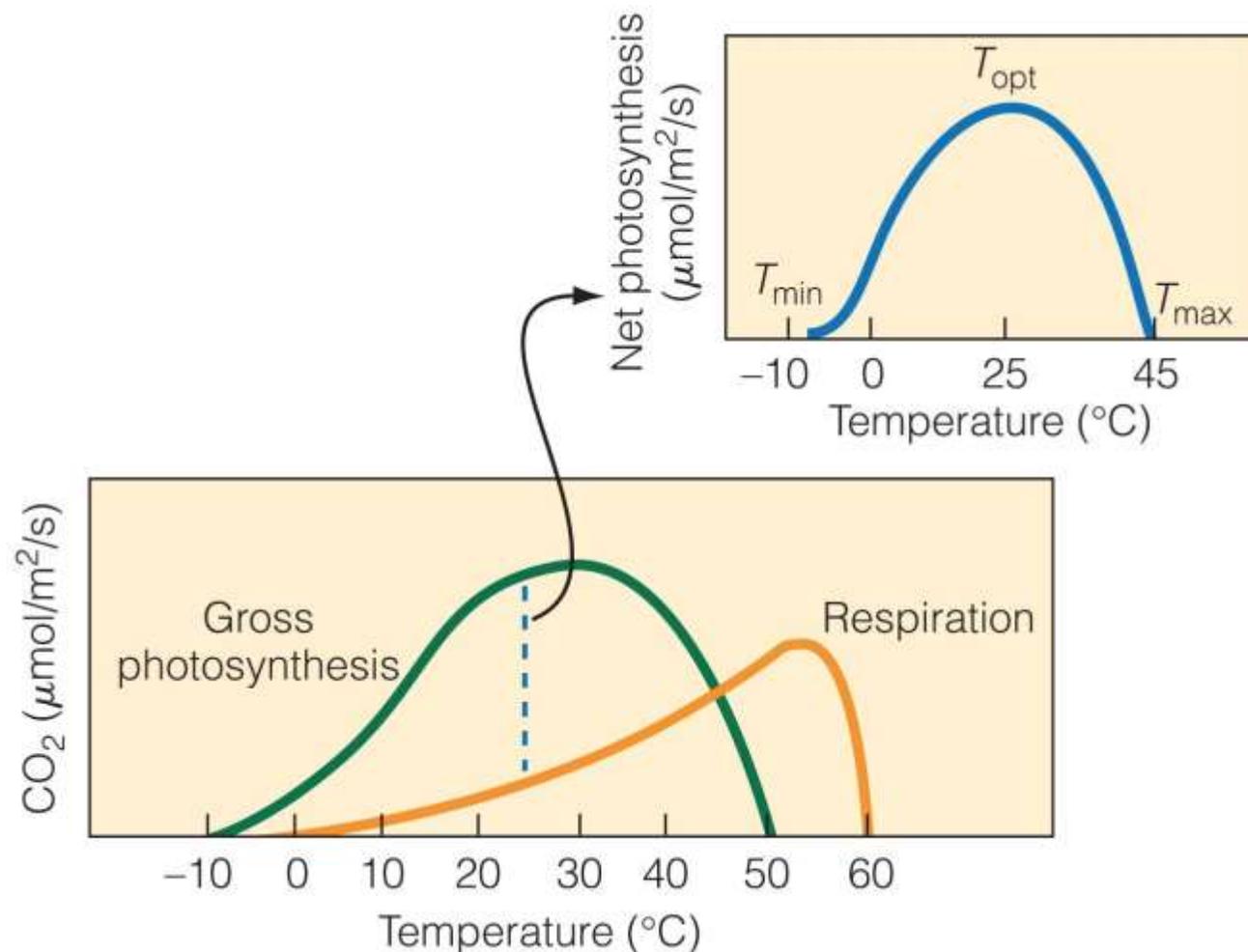
# Produção Vegetal X Temperatura

---



## Produção Vegetal X Temperatura

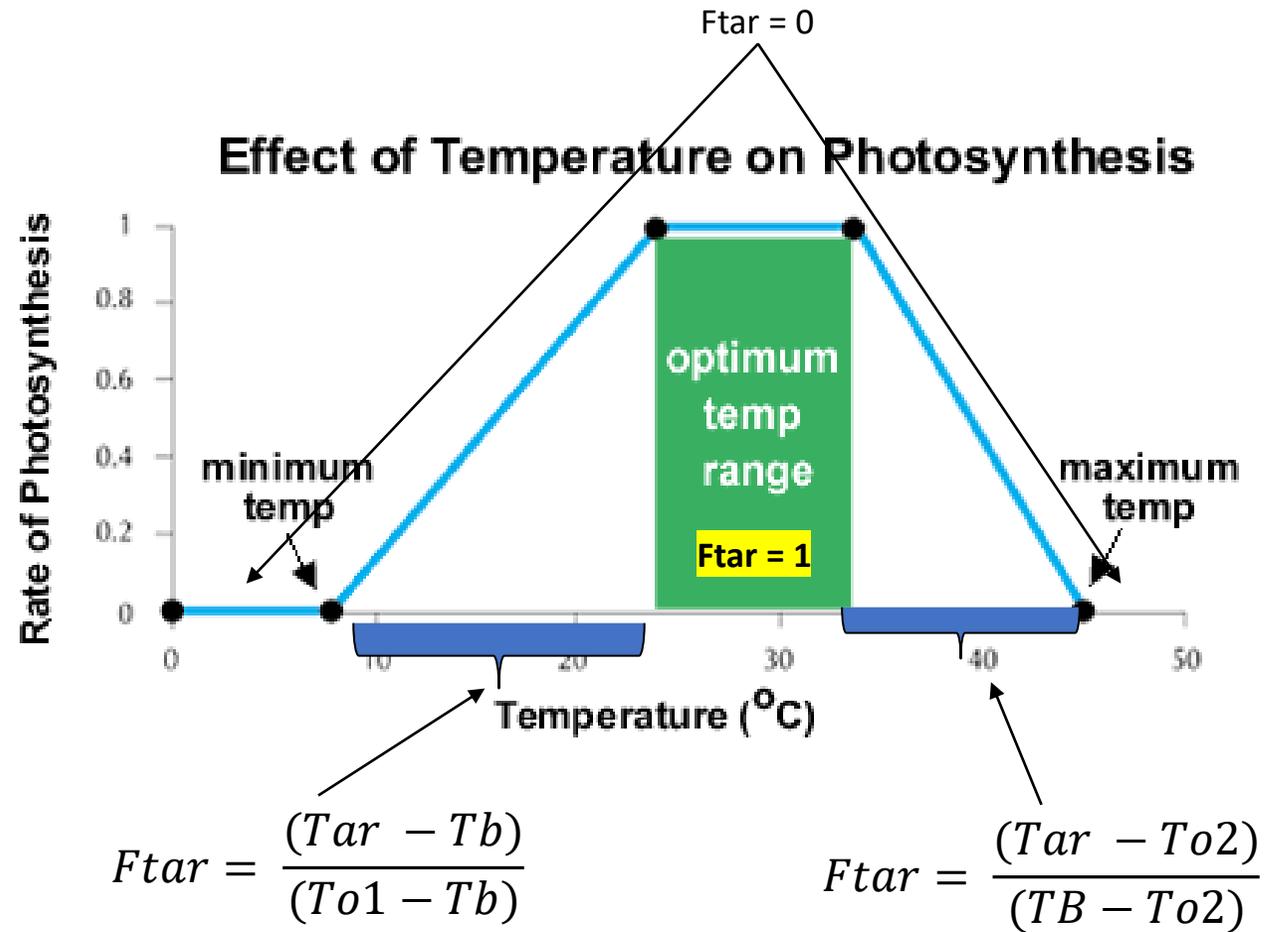
- As temperaturas ideais para a fotossíntese líquida não são necessariamente as mesmas observadas para a fotossíntese bruta.



© 2012 Pearson Education, Inc.

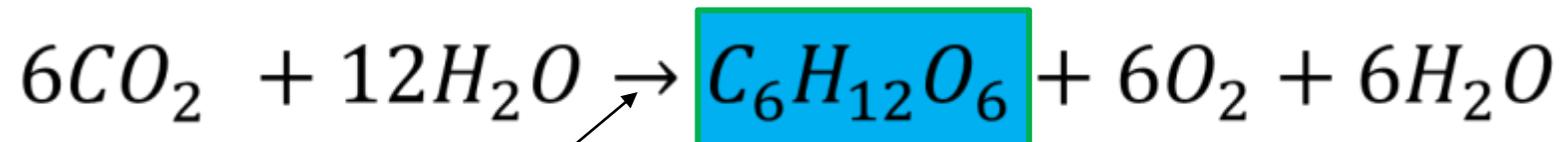
# Produção Vegetal X Temperatura

Como representar matematicamente?



# Eficiência de Conversão (EF)

- Fotossíntese:



Radiação

1g de  $C_6H_{12}O_6$ :

0,404g de Proteínas  
0,33g de Lipídeos  
0,472g de Lignina  
0,826g de Carboidrato estrutural  
1,104g de Ácidos Orgânicos

1 t de Cana-de-Açúcar =  
0,86 t de Feijão  
ou  
0,85 t de Amendoim

## Estimando a Produtividade Potencial (Pp ou Yp)

$$Yp' = aPAR * RUE * EF * IC * FTar * \frac{1}{(1 - U)}$$

Sendo:

Yp' dado em [g/m2.dia]

$$aPAR = PAR * (1 - r - e^{-k*IAF})$$

IC o índice de colheita (adimensional)

U é a umidade do produto (adimensional)

EF é a eficiência de conversão

FTar – Fator de correção pelo efeito da temperatura do ar na fotossíntese (ver slide seguinte)

$$Yp = Yp' \frac{10000}{1000} \text{ [kg/m2.d]}$$

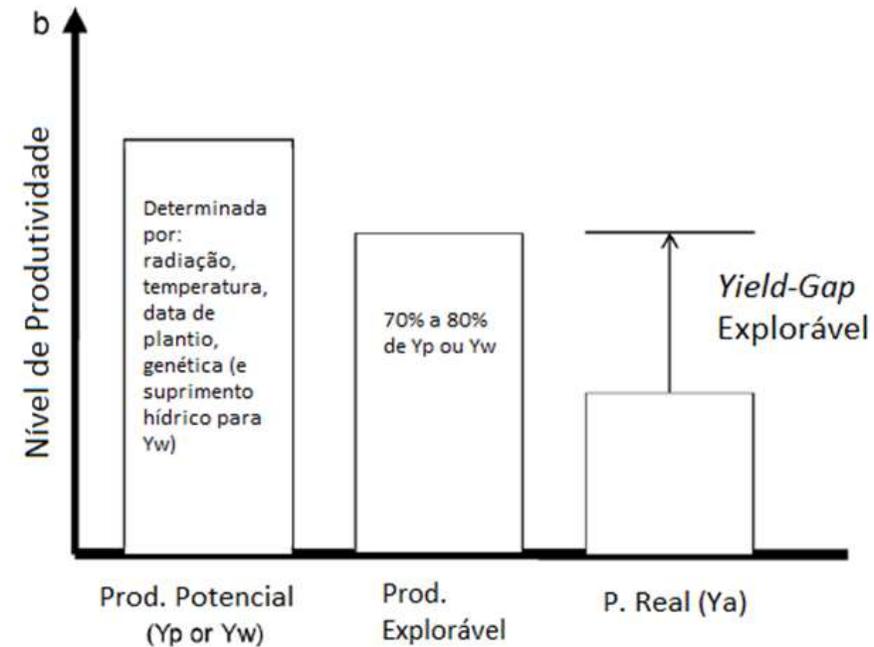
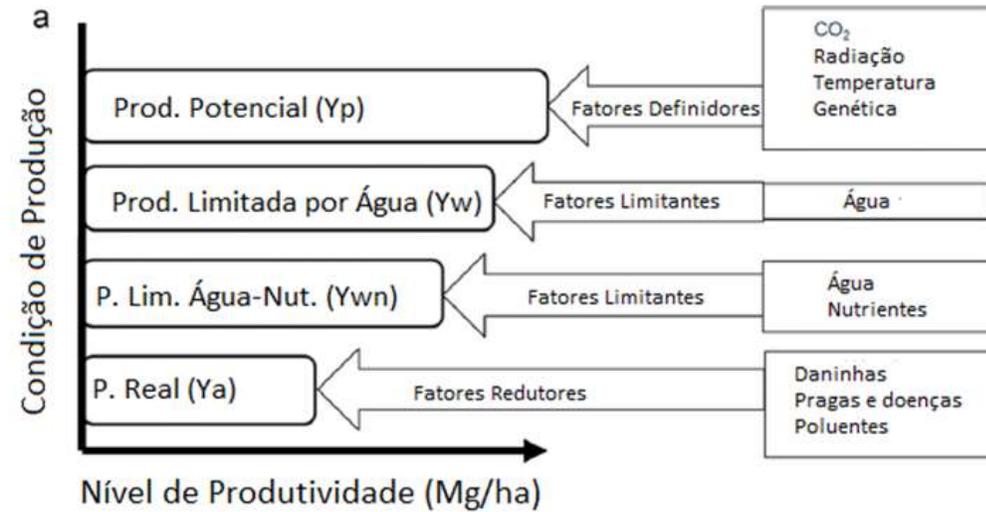
# Parte 2 – Balanço hídrico para estimativa da produtividade atingível

Prof. Fábio Marin

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
Departamento de Engenharia de Biosistemas  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola

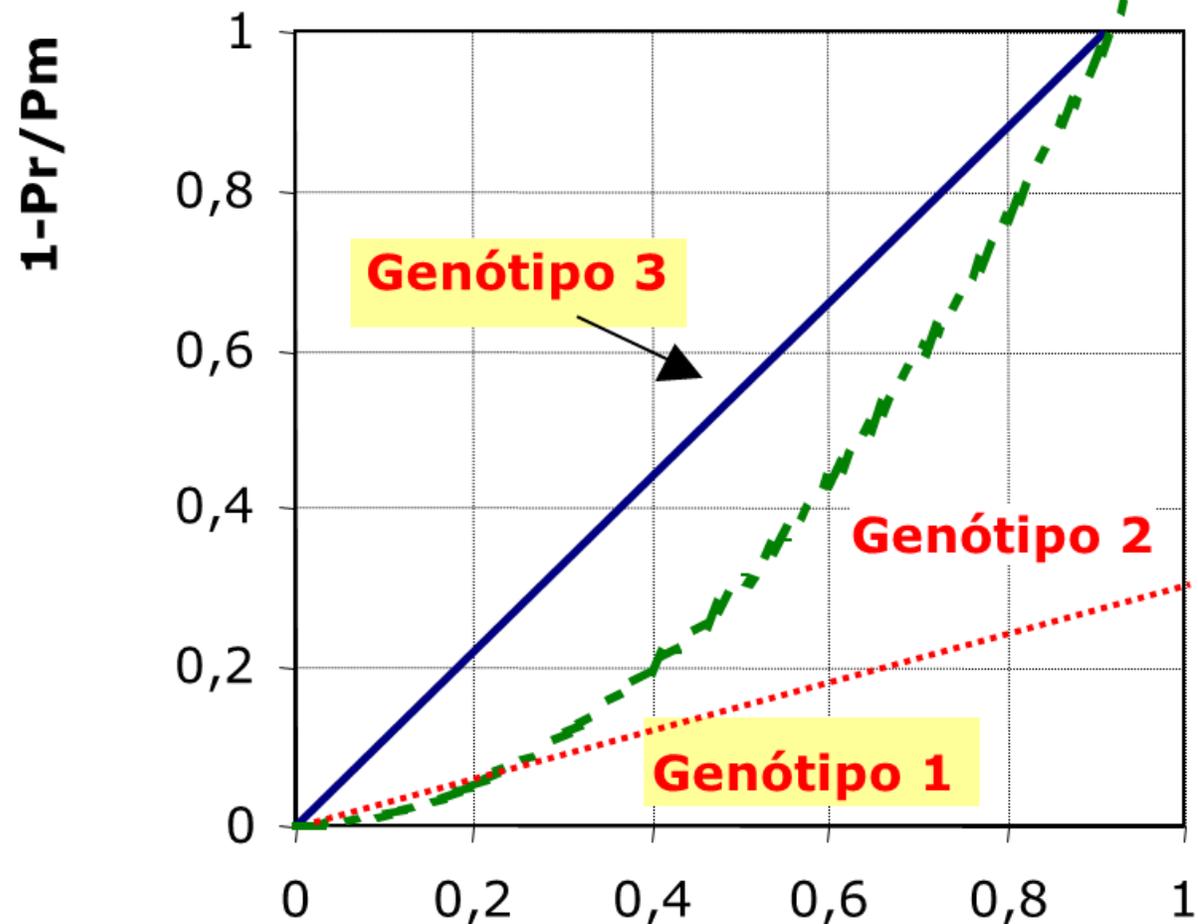


# Níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes



# Quantificando o Efeito da Deficiência Hídrica

- Utiliza-se a evapotranspiração relativa como indicador da suficiência hídrica ao longo do ciclo
- Utiliza-se o fator  $K_y$  como indicador da sensibilidade da cultura (em diferentes fases fenológicas)



Rendimento em grãos

$1-ETr/ETm$

# Valores de $K_y$ para diferentes culturas

<http://www.fao.org/3/a-i2800e.pdf>

Página 7

**TABLE 1** Seasonal  $K_y$  values from *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*.

Crop	$K_y$	Crop	$K_y$
Alfalfa	1.1	Safflower	0.8
Banana	1.2-1.35	Sorghum	0.9
Beans	1.15	Soybean	0.85
Cabbage	0.95	Spring wheat	1.15
Cotton	0.85	Sugarbeet	1.0
Groundnuts	0.70	Sugarcane	1.2
Maize	1.25	Sunflower	0.95
Onion	1.1	Tomato	1.05
Peas	1,15	Watermelon	1.1
Pepper	1.1	Winter wheat	1.05
Potato	1.1		

# Valores de $K_y$ para diferentes culturas e fases fenológicas

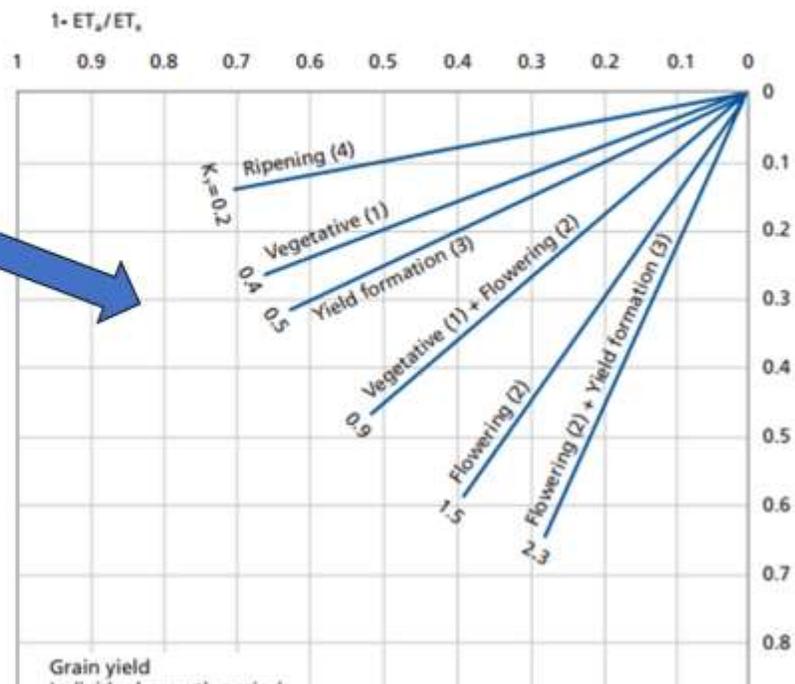
<http://www.fao.org/3/a-i2800e.pdf>

Página 12

**TABLE 2** Comparison of  $K_y$  values between *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33* and IAEA investigations (FAO, 2002) at different stages of crop development. Tr-0000=water deficit occurring during the whole season; Tr-0111=water deficit occurring during initial crop stage; Tr-1011=water deficit occurring during crop development; Tr-1101=water deficit occurring during midseason; Tr-1110=water deficit occurring during late season. Where different values of  $K_y$  are reported by IAEA for the same crop, they refer either to experimental results of different countries or to experimental results of different locations within the same country.

Crop	Tr-0000			Tr-0111			Tr-1011			Tr-1101			Tr-1110		
	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)	FAO	IAEA	(%)
Beans	1.15	0.59	-49	0.20	0.38	90	1.10	1.75	59	0.75	1.44	92	0.20	0.06	-70
	1.15	1.43	24	0.20	0.56	180	1.10	1.35	23	0.75	0.87	16	0.20	0.17	-15
Cotton	0.85	1.02	20	0.20	0.75	275	0.50	0.48	-4					0.25	
	0.85	0.71	-16	0.20	0.80	300	0.50	0.60	20	0.05					
	0.85	0.99	16				0.50	0.76	52						
Groundnut	0.70			0.20			0.80	0.74	-8	0.60			0.20		
Maize	1.25	1.33	6	0.40			1.50			0.50			0.20		
Potato	1.10			0.60	0.40	-33	0.33			0.70	0.46	-34	0.20		
Soybean	0.85			0.20	0.56	180	0.80	1.13	41	1.00	1.76	76			
Sugarcane	1.20			0.75	0.20	-73	1.20			0.50	1.20	140	0.10		
	1.20			0.75	0.40	-47	1.20			0.50	1.20	140			
Sunflower	0.95	0.91	-4	0.40	1.19	198	1.00	0.94	-6	0.80	1.14	43			
Spring wheat	1.15	1.32	15	0.20	0.55	175	0.65	0.90	38	0.55	0.44	-20	0.25		
Winter wheat	1.00	0.87	-13	0.20	2.54	1170	0.60	0.81	35	0.50	0.48	-4	0.62		

**FIGURE 1** Linear water production functions for maize subjected to water deficits occurring during the vegetative, flowering, yield formation and ripening periods. The steeper the slope (i.e. the higher the  $K_y$  value), the greater the reduction of yield for a given reduction in ET because of water deficits in the specific period.



Varição entre fases fenológicas

$K_y$  é um coeficiente de sensibilidade à seca, representando numericamente quanto produtividade é reduzida conforme aumenta a deficiência hídrica para os cultivos. Ele varia entre espécies (sendo maior quanto mais sensível é a cultura) e também entre fases fenológicas, sendo tanto maior quando mais sensível é a fase da cultura.

## Efeito da Deficiência Hídrica

$$Y_a = Y_p * [1 - K_y * (1 - E_{Tr}/E_{Tc})]$$

Equação para o cálculo da Produtividade Atingível ou Prod Limitada por Água

# Duração de fases fenológicas para diferentes culturas e fases fenológicas

## Length of growth stages

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24 provides general lengths for the four distinct growth stages and the total growing period for various types of climates and locations. This information has been supplemented from other sources and is summarized in Table 11.

In some situations, the time of emergence of vegetation and the time of effective full cover can be predicted using cumulative degree-based regression equations or by more sophisticated plant growth models. These types of models should be verified or validated for the local area or for a specific crop variety using local observations.

**TABLE 11. Lengths of crop development stages\* for various planting periods and climatic regions (days)**

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
<b>a. Small Vegetables</b>							
Broccoli	35	45	40	15	135	Sept	Calif. Desert, USA
Cabbage	40	60	50	15	165	Sept	Calif. Desert, USA
Carrots	20	30	50/30	20	100	Oct/Jan	Arid climate
	30	40	60	20	150	Feb/Mar	Mediterranean
	30	50	90	30	200	Oct	Calif. Desert, USA
Cauliflower	35	50	40	15	140	Sept	Calif. Desert, USA
Celery	25	40	95	20	180	Oct	(Semi) Arid
	25	40	45	15	125	April	Mediterranean
	30	55	105	20	210	Jan	(Semi) Arid
Crucifers <sup>1</sup>	20	30	20	10	80	April	Mediterranean
	25	35	25	10	95	February	Mediterranean
	30	35	90	40	195	Oct/Nov	Mediterranean
Lettuce	20	30	15	10	75	April	Mediterranean
	30	40	25	10	105	Nov/Jan	Mediterranean
	25	35	30	10	100	Oct/Nov	Arid Region
	35	50	45	10	140	Feb	Mediterranean

Para encontrar outras cultura, consulte a Tabela 11 disponível em <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm#length%20of%20growth%20stages>



# Duração de fases fenológicas para diferentes culturas e fases fenológicas

TABLE 12. Single (time-averaged) crop coefficients,  $K_c$ , and mean maximum plant heights for non stressed, well-managed crops in subhumid climates ( $RH_{min} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2$  m/s) for use with the FAO Penman-Monteith  $ET_0$ .

Crop	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>a. Small Vegetables</b>	<b>0.7</b>	<b>1.05</b>	<b>0.95</b>	
Broccoli		1.05	0.95	0.3
Brussel Sprouts		1.05	0.95	0.4
Cabbage		1.05	0.95	0.4
Carrots		1.05	0.95	0.3
Cauliflower		1.05	0.95	0.4
Celery		1.05	1.00	0.6
Garlic		1.00	0.70	0.3
Lettuce		1.00	0.95	0.3
Onions				
- dry		1.05	0.75	0.4
- green		1.00	1.00	0.3
- seed		1.05	0.80	0.5
Spinach		1.00	0.95	0.3
Radish		0.90	0.85	0.3
<b>b. Vegetables - Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)</b>	<b>0.6</b>	<b>1.15</b>	<b>0.80</b>	
Egg Plant		1.05	0.90	0.8
Sweet Peppers (bell)		1.05 <sup>2</sup>	0.90	0.7
Tomato		1.15 <sup>2</sup>	0.70-0.90	0.6
<b>c. Vegetables - Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	

Para encontrar outras cultura, consulte a Tabela 12 disponível em <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm#length%20of%20growth%20stages>



# Leitura

## Obrigatória:

Pereira, Angelocci, Sentelhas. Meteorologia Agrícola. Apostila. ESALQ. 2007. Cap 20, com exceção do item 20.5. Disponível em

[http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola\\_Apostila2007.pdf](http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf)

Vianna et al. (2017). Manual do modelo Magé. Disponível em

<http://sites.usp.br/gepema/material-didatico/>