



# LCE 306 – Meteorologia Agrícola

*Prof. Paulo Cesar Sentelhas*

*Prof. Luiz Roberto Angelocci*

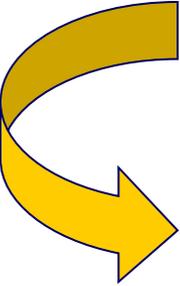
Aula # 10

## Condicionamento Climático da Produtividade Vegetal

Estimativa das Produtividades  
Potencial e Real

ESALQ/USP – 2012

# Agricultura x Clima



Atividade econômica altamente dependente das condições climáticas

Cerca de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo se deve à variabilidade das condições climáticas ao longo do ciclo das culturas, especialmente nas de sequeiro



O impacto do clima não é apenas sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura, mas também nas atividades de manejo, na ocorrência de pragas e doenças e na qualidade dos produtos agrícolas



Turno de Trabalho  
Fotoperíodo



Energia – Rad. Solar

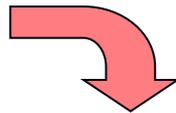


Matéria Prima  
CO<sub>2</sub> e Água



Indústria – Plantas

Temperatura



Matéria Prima  
Nutrientes e Água



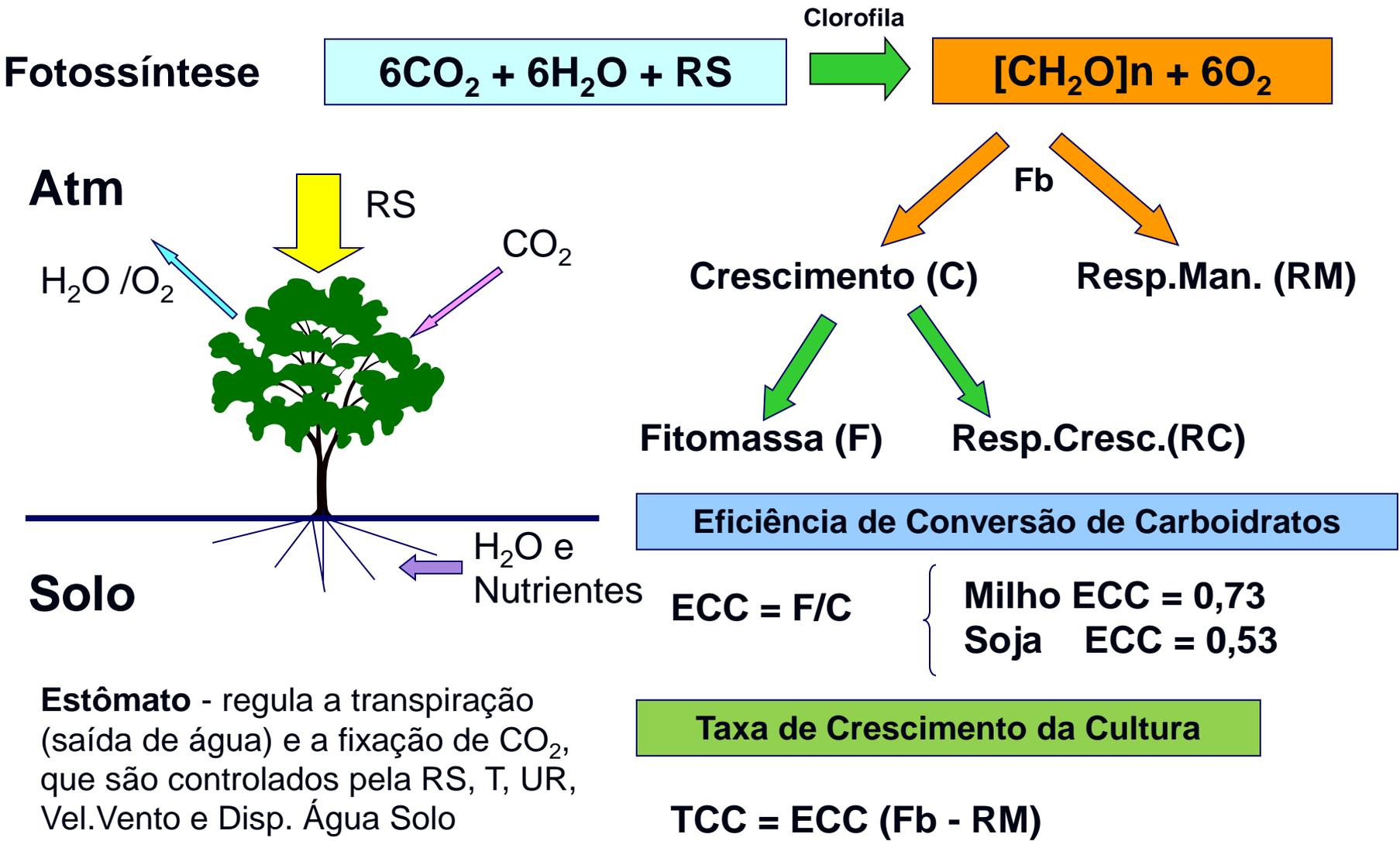
Processo – Fotossíntese



Produto – Biomassa



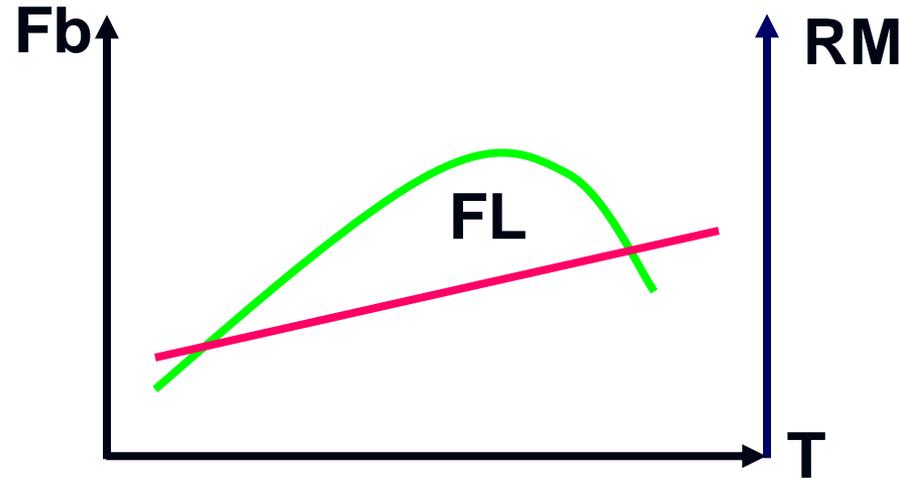
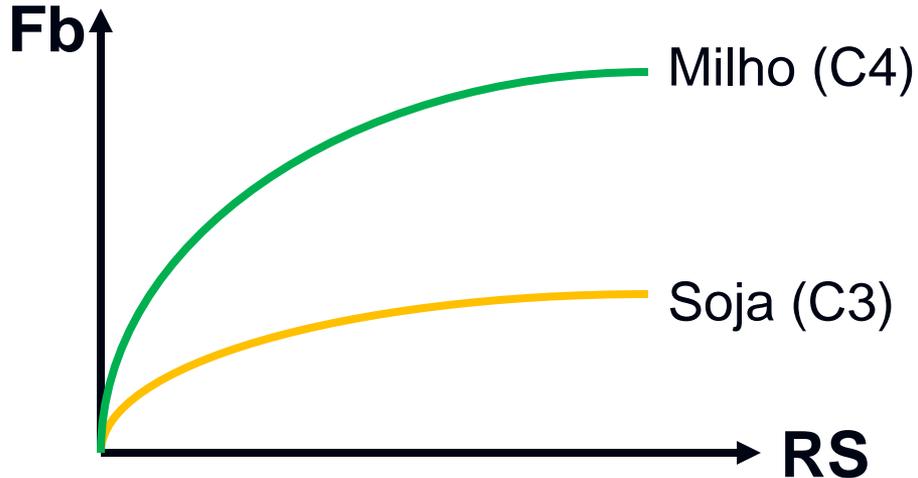
# Base Fisiológica da Produtividade Vegetal



**Estômato** - regula a transpiração (saída de água) e a fixação de CO<sub>2</sub>, que são controlados pela RS, T, UR, Vel.Vento e Disp. Água Solo

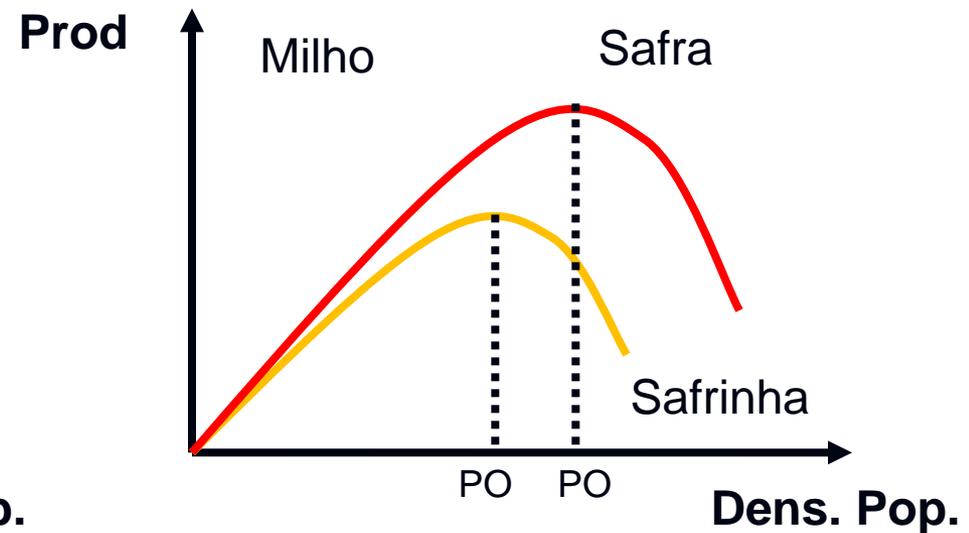
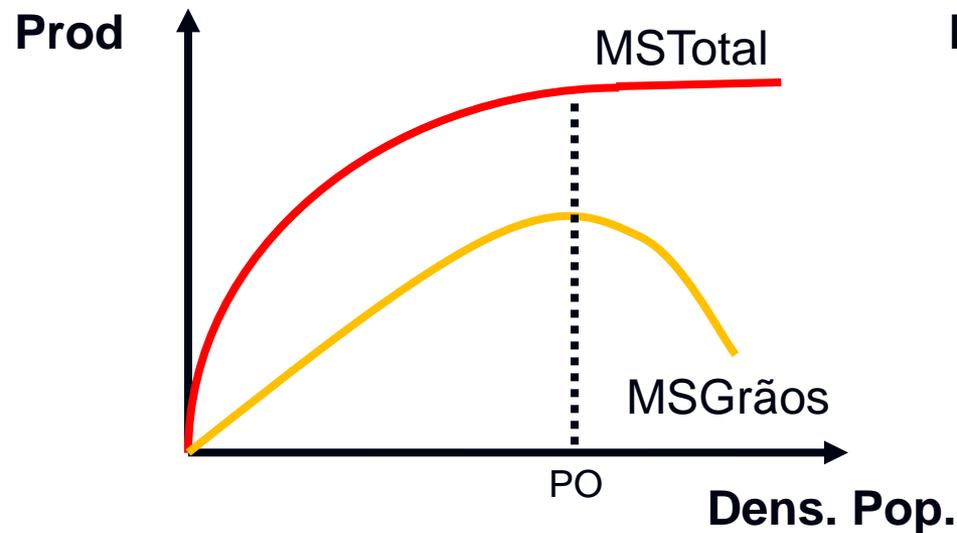
# Influência das Condições Meteorológicas na TCC

$$TCC = ECC (Fb - RM)$$



- Deficiência Hídrica
- Fechamento dos estômatos
- Redução na fixação de CO<sub>2</sub>
- Redução da Fb e FL

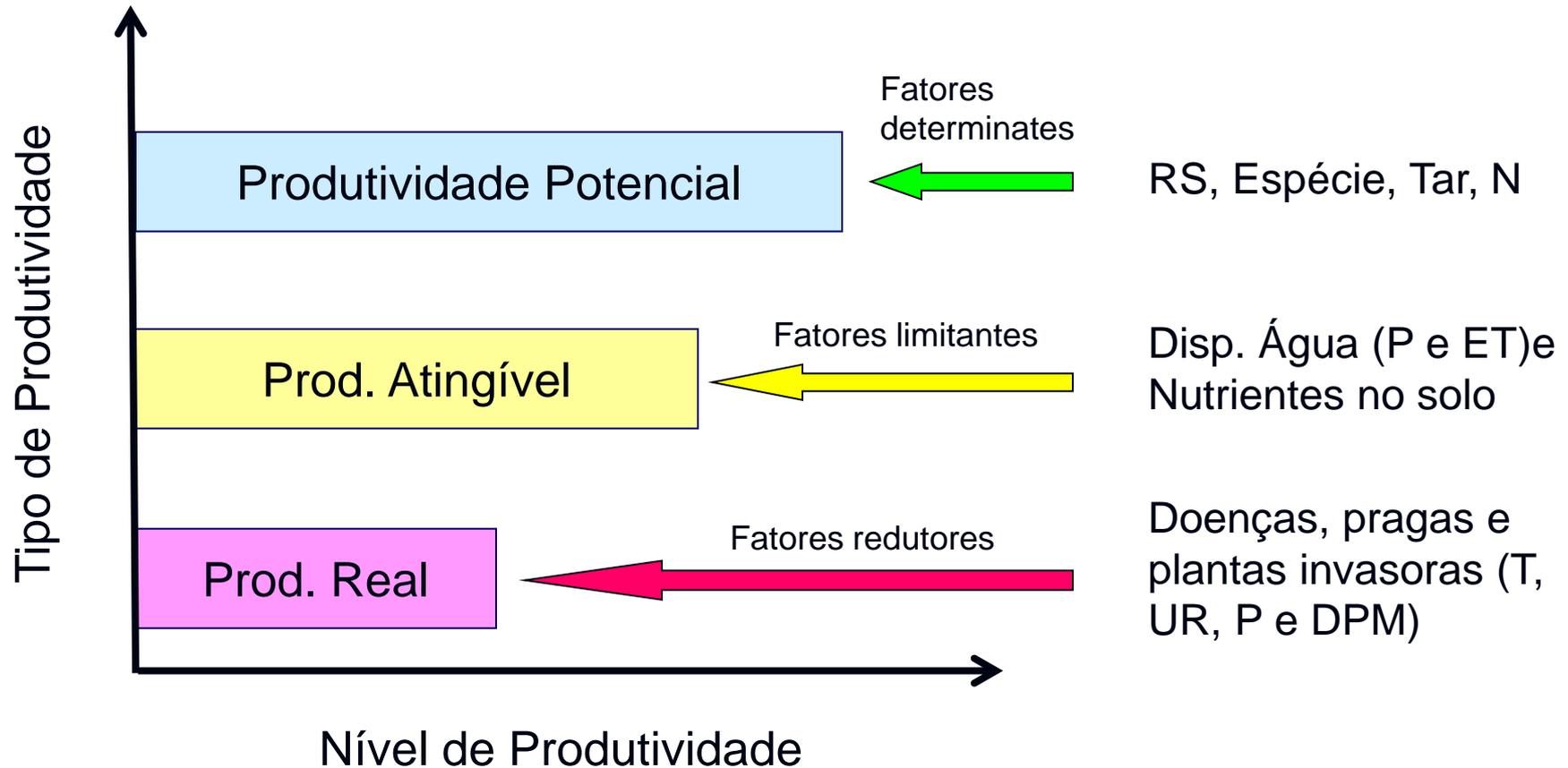
## Influência do Ambiente e da Densidade Populacional na Produtividade (Competição Intraespecífica)



Cultivar	Tipo Prod.	Densidade Populacional (plantas/ha)		
		50mil	33mil	25mil
<b>MILHO</b>				
V1	Área (kg/ha)	4633	3953	3590
Dentado	Planta (g/pl)	92,7	118,6	143,6
V2	Área (kg/ha)	3613	3575	3359
Duro	Planta (g/pl)	72,3	107,2	134,4
H1	Área (kg/ha)	5395	4729	4334
Híbrido	Planta (g/pl)	107,9	141,9	173,2

# Influência do Clima na Produtividade Agrícola

## Tipos e Níveis de Produtividade



Nota-se, portanto, que a produtividade potencial depende basicamente da interação do genótipo com as condições ambientais (RS, Tar, N e  $[CO_2]$ )

## ***Conceito de Produtividade Potencial***

**Obtido por uma variedade altamente produtiva**

**Cultura bem adaptada ao ambiente de crescimento**

**Sem limitação hídrica, nutricional e de salinidade**

**Sem danos significativos causados por pragas e doenças**

# ***Estimativa da Produtividade Potencial***

## ***Modelo da Zona Agroecológica***

O método estima a *Produtividade Potencial Bruta Padrão*  
*Método da Zona Agroecológica (FAO 33, 1994)*

$$PPB_p \text{ [kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}\text{]}$$

### *Conceito*

É a Massa Seca (MS) produzida por uma cultura padrão, cobrindo totalmente o terreno, tendo a radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura como fatores limitantes.

## Estimativa da *Produtividade Potencial Bruta Padrão*

$PPB_p$  [kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>]

$$PPB_p = PPB_c + PPB_n$$

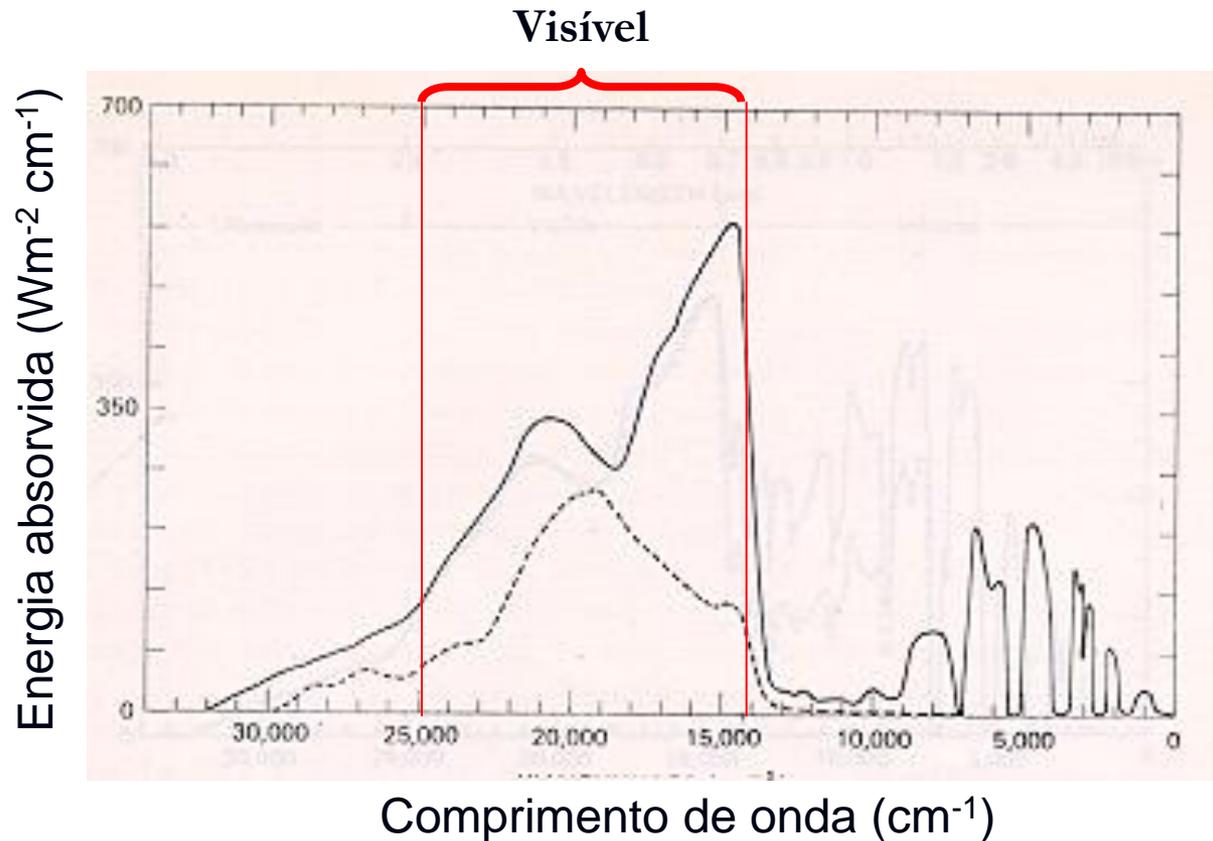


PPB<sub>c</sub> = Prod. no Período de Céu Claro

PPB<sub>n</sub> = Prod. no Período de Céu Nublado



A figura abaixo mostra a diferença de absorção da radiação solar para dias de céu sem nebulosidade (linha cheia) e para dias de céu nublado (linha tracejada), nos diferentes espectros da radiação solar. Observa-se que nos dias de céu limpo a absorção de energia é maior nos comprimentos de onda do azul e do vermelho e, portanto, as plantas tem maiores taxas de fotossíntese. Ao contrário, nos dias de céu nublado as plantas absorvem mais energia no comprimento de onda verde, com menor taxa de fotossíntese. Isso explica o por que das diferentes equações para a estimativa da PPB no método da Zona Agroecológica.



$$PPB_p = PPB_c + PPB_n$$

$PPB_c$  = Prod. Potencial no Período de Céu Claro

$$PPB_c = (107,2 + 0,36 Q_0) n/N cT_c$$

$PPB_n$  = Prod. Potencial no Período de Céu Nublado

$$PPB_n = (31,7 + 0,219 Q_0) (1 - n/N) cT_n$$

$Q_0$  = Radiação Solar Extra-Terrestre [ $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ]

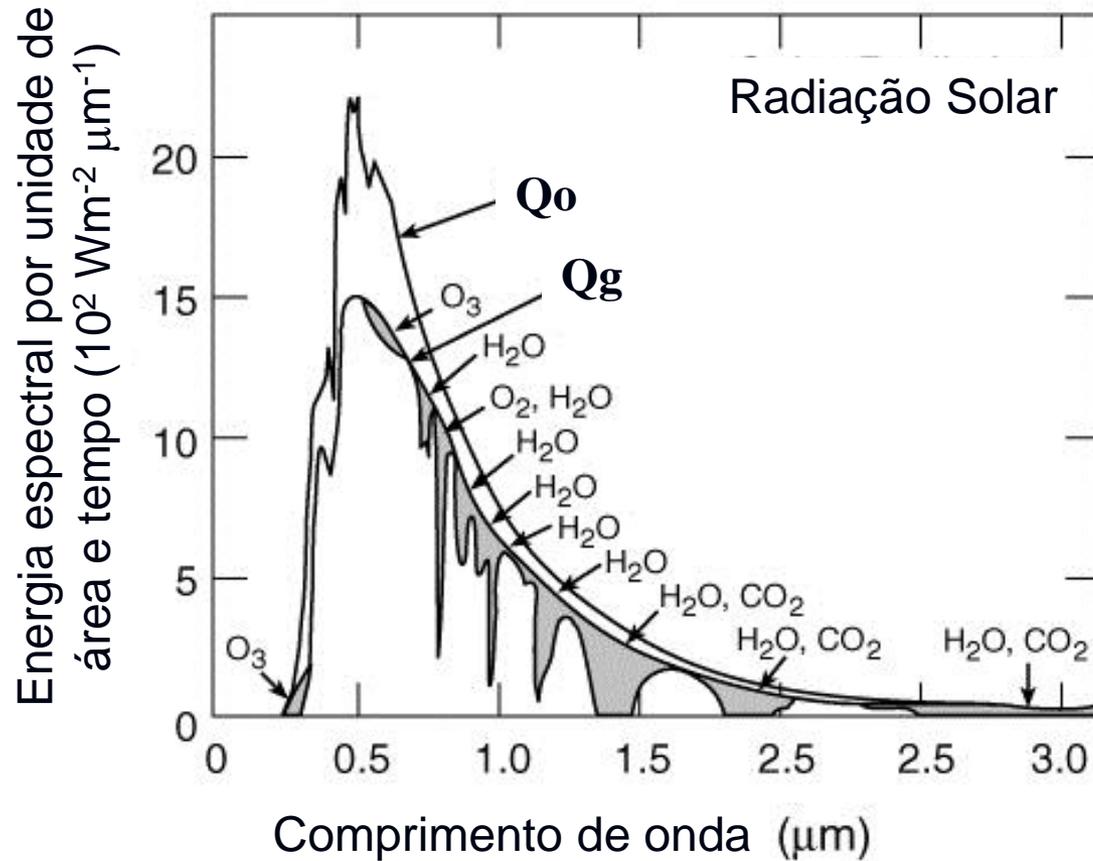
$$Q_0 = f (\text{Latitude e Época do ano})$$

$N$  = Fotoperíodo =  $f$  (*Latitude e Época do Ano*)

$n$  = número efetivo de horas de brilho solar

$cT_c$  e  $cT_n$  = Correções para o efeito da temperatura

As médias de  $Q_0$  e  $n/N$  a serem usadas devem ser calculadas se poderando o número de dias de cada mês dentro do ciclo da cultura.

**$Q_0$  = Radiação Solar Extra-Terrestre [ $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ]**

**$Q_o = \text{Radiação Solar Extra-Terrestre [cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}]$** 

$$Q_o = J_o D \left[ \frac{\pi}{180} h_n \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sinh_n \right]$$

$$J_o = \text{constante solar} = 899,5 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$$

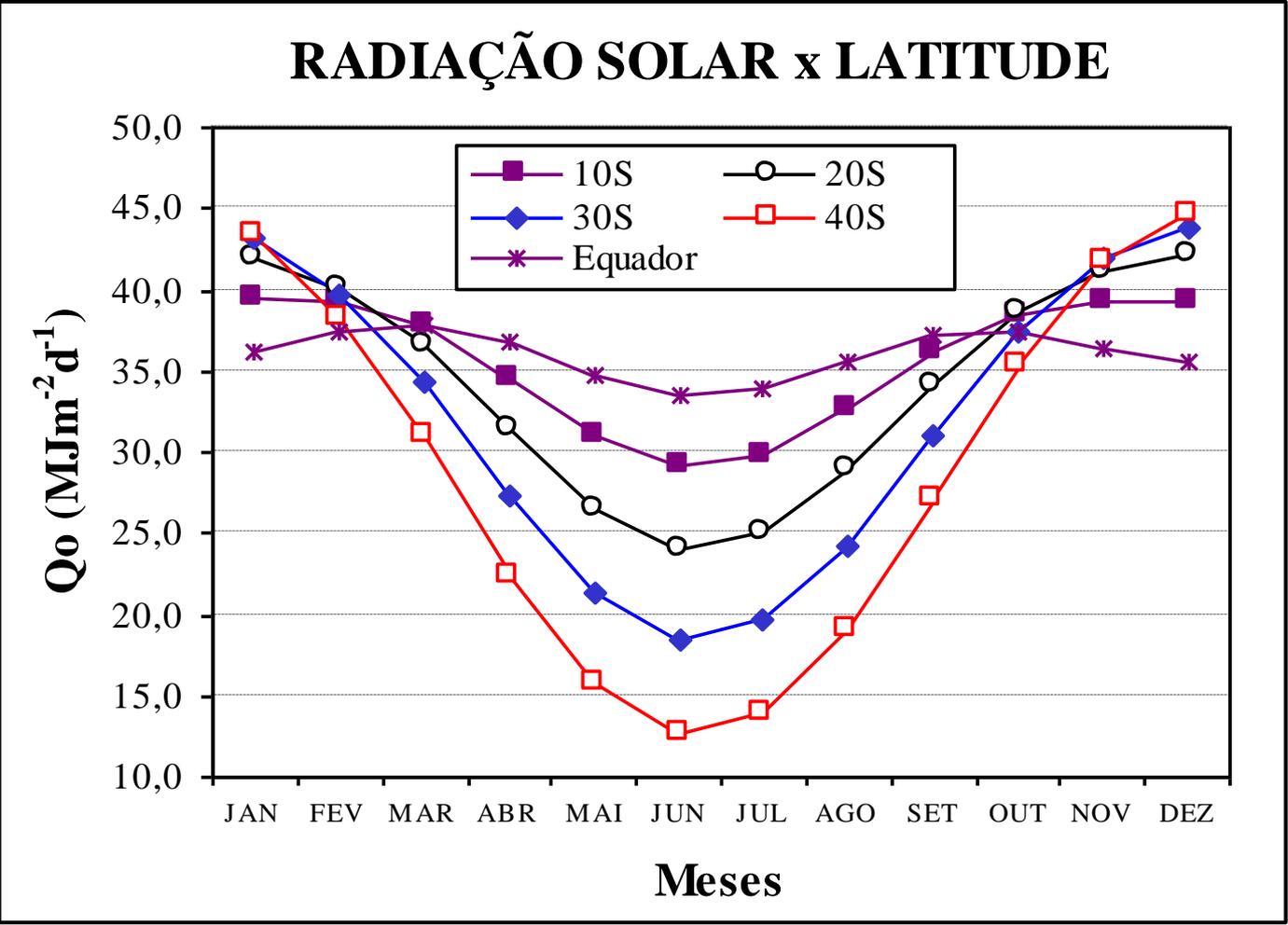
$$D = \text{distância relativa Terra-Sol} = 1 + 0,033 \cos \left[ \frac{(360 \text{ NDA})}{365} \right]$$

$$h_n = \text{ângulo do nascer do Sol relativo ao meridiano} = \arccos [-\text{tg}\phi \text{ tg}\delta]$$

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

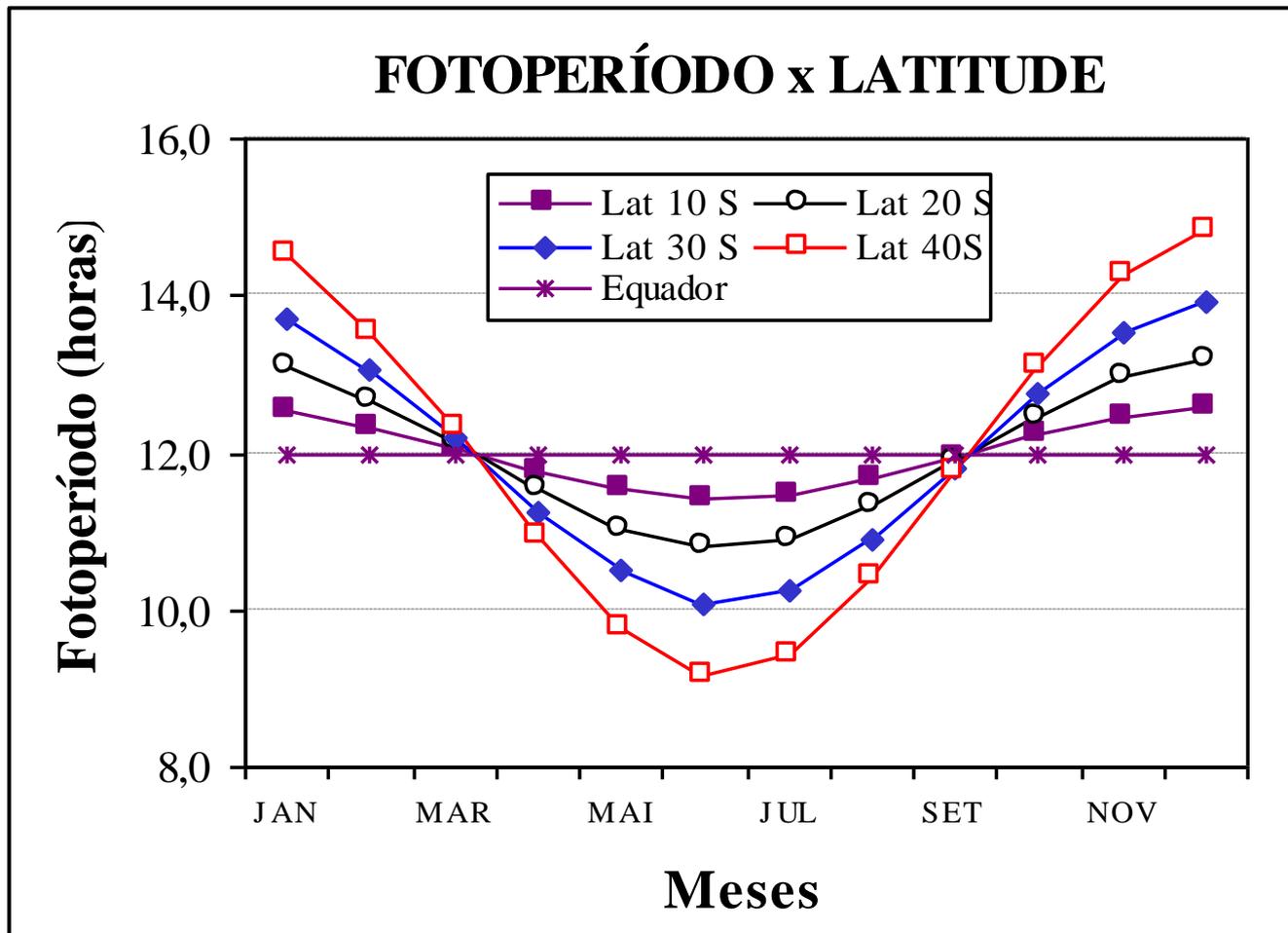
$\phi$  = Latitude local (+ p/ o HN e - p/ o HS)  
NDA = Número do dia do ano (calendário juliano)

# Qo = Radiação Solar Extra-Terrestre



**N = Fotoperíodo [horas/dia]**

$$N = 2 h_n / 15 = 0,1333 h_n$$

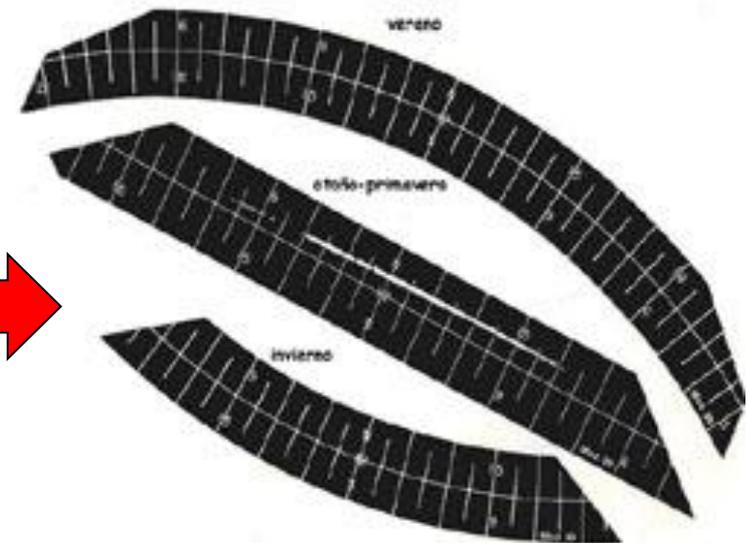


**$n$  = horas efetivas de brilho solar [horas/dia]**



Heliógrafo – equipamento utilizado para a obtenção do número de horas efetivas de brilho solar (radiação solar direta)

Bandas de registro – o sol ao ter seus raios convergidos pela esfera de cristal queima as bandas, registrando o número de horas com brilho solar



## Correções para o efeito da temperatura $cTc$ e $cTn$

Depende:

⇒ Tipo de metabolismo fotossintético (C3, C4, CAM)

⇒ Clima da região de origem da espécie

Grupo 1 – Plantas C3 de inverno (alfafa, feijão, trigo, ervilha, batata)

Grupo 2 – Plantas C3 de verão (algodão, amendoim, arroz, girassol, soja)

Grupo 3 – Plantas C4 (milho, sorgo, cana-de-açúcar, capins, etc.)



**Grupo 1 – Plantas C3 de inverno**

Feijão

Se  $15^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$

$$cT_n = 0,7 + 0,035 T - 0,001 T^2$$

$$cT_c = 0,25 + 0,0875 T - 0,0025 T^2$$



Trigo

Se  $T < 15^{\circ}\text{C}$  ou  $T > 20^{\circ}\text{C}$

$$cT_n = 0,25 + 0,0875 T - 0,0025 T^2$$

$$cT_c = -0,5 + 0,175 T - 0,005 T^2$$

**Grupo 2 – Plantas C3 de verão**

Se  $16,5^{\circ}\text{C} < T < 37^{\circ}\text{C}$

$$cT_n = 0,583 + 0,014 T + 0,0013 T^2 - 0,000037 T^3$$

$$cT_c = -0,0425 + 0,035 T + 0,00325 T^2 - 0,0000925 T^3$$



Soja

Se  $T < 16,5^{\circ}\text{C}$  ou  $T > 37^{\circ}\text{C}$

$$cT_n = -0,0425 + 0,035 T + 0,00325 T^2 - 0,0000925 T^3$$

$$cT_c = -1,085 + 0,07 T + 0,0065 T^2 - 0,000185 T^3$$



Arroz

## Grupo 3 – Plantas C4



Milho

$$\text{Se } T \geq 16,5^{\circ}\text{C}$$

$$cTn = -1,064 + 0,173 T - 0,0029 T^2$$

$$cTc = -4,16 + 0,4325 T - 0,00725 T^2$$

$$\text{Se } T < 16,5^{\circ}\text{C}$$

$$cTn = -4,16 + 0,4325 T - 0,00725 T^2$$

$$cTc = -9,32 + 0,865 T - 0,0145 T^2$$

Sorgo

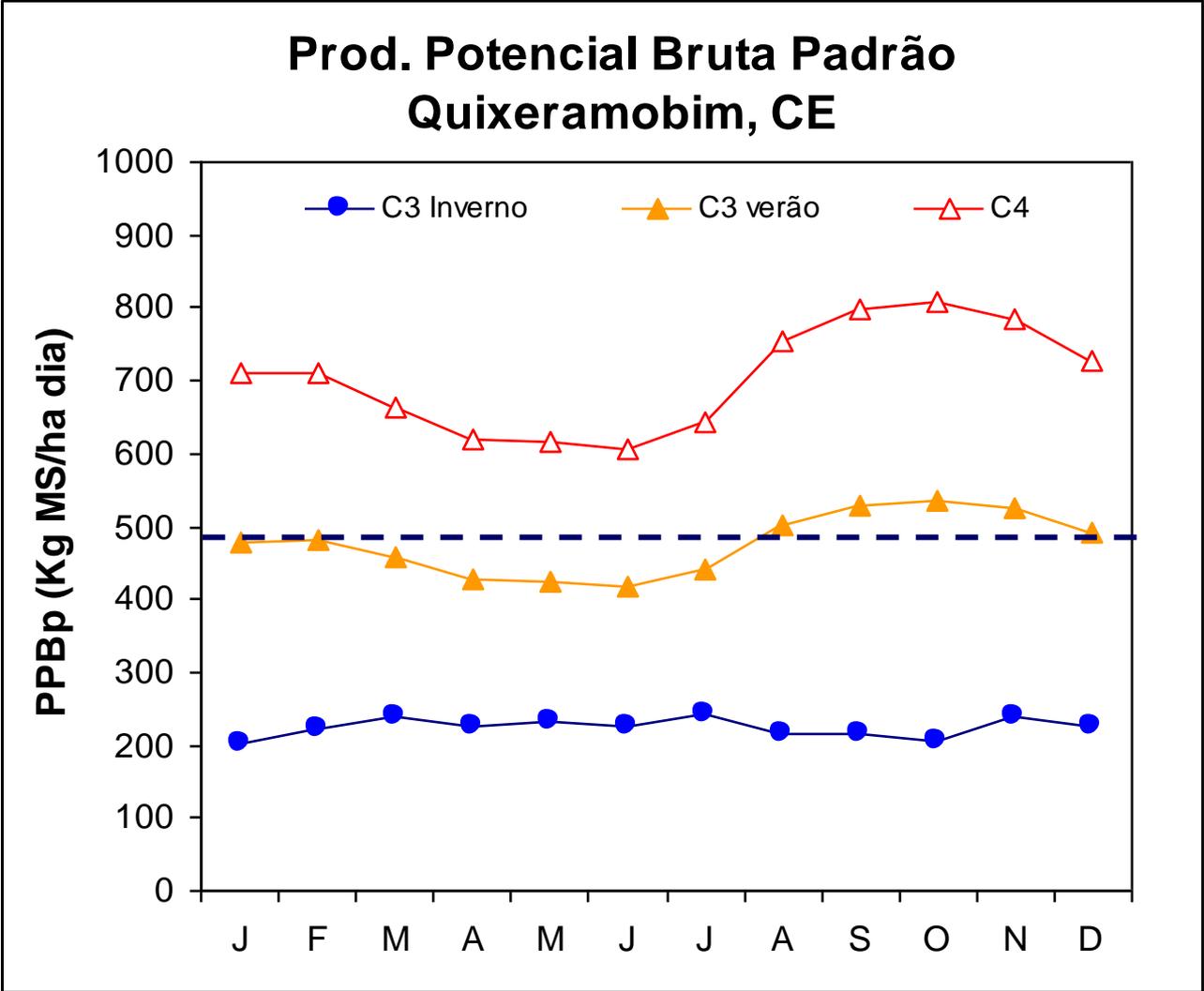


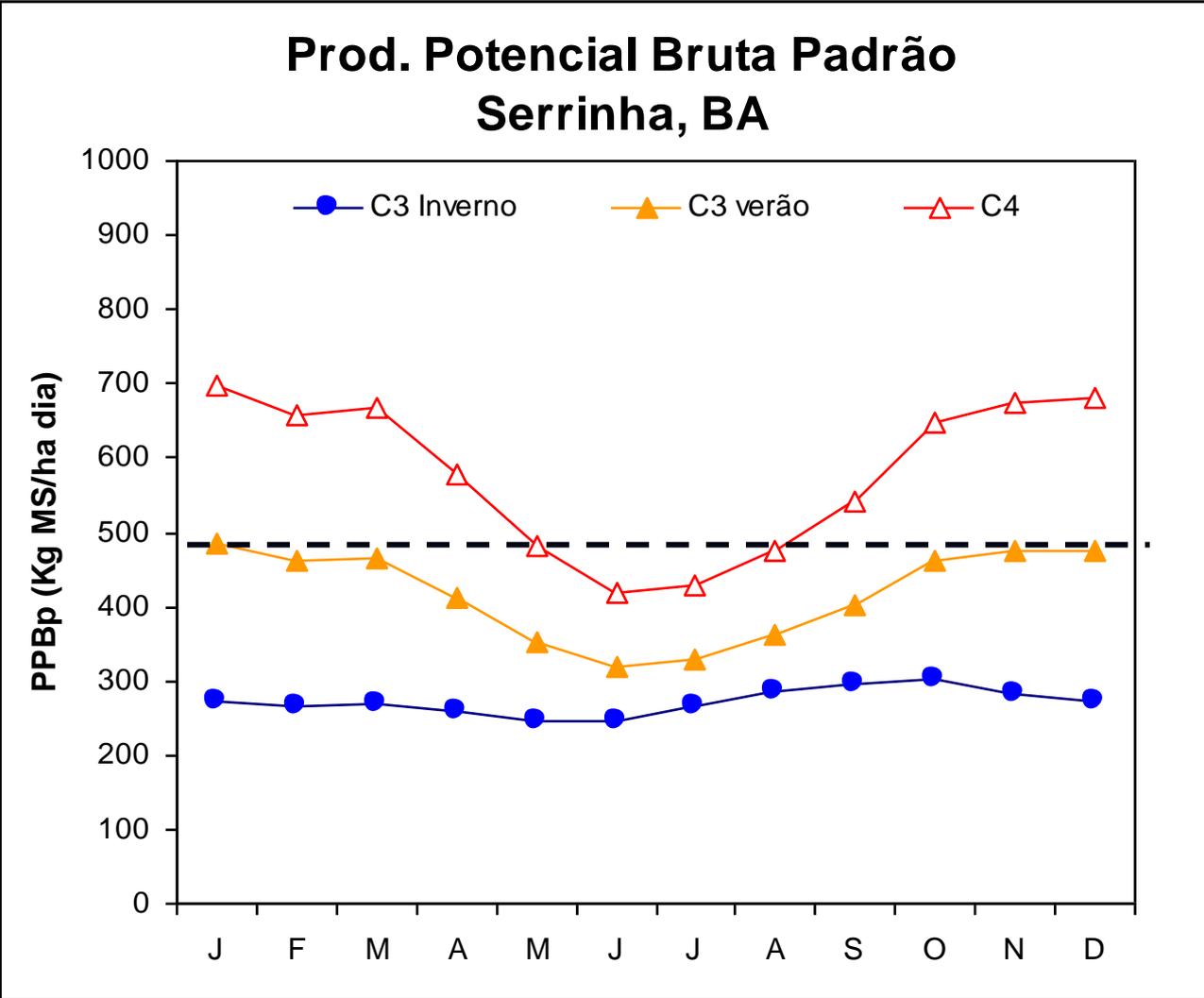
Cana-de-açúcar

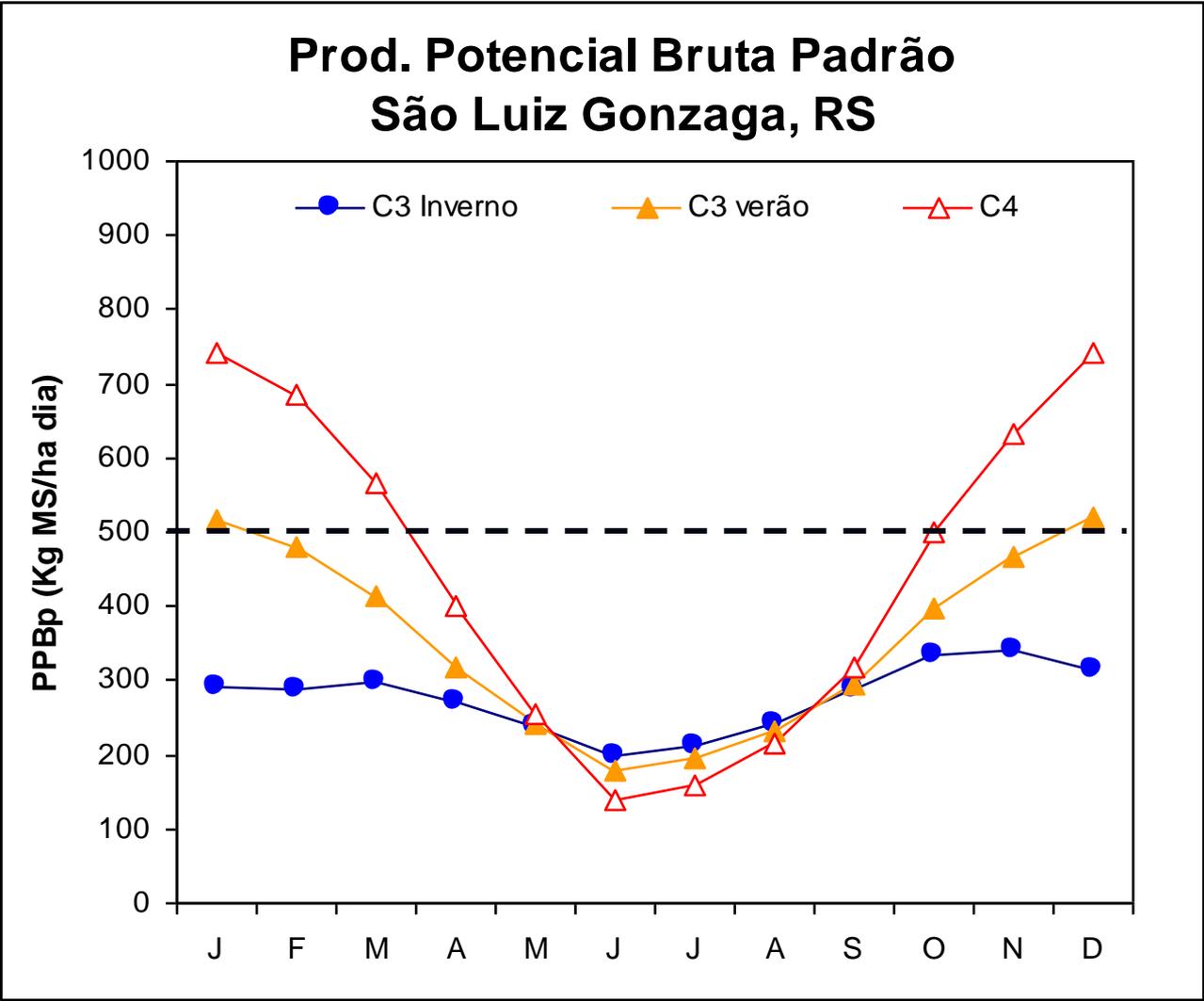


As figuras a seguir, apresentam a variação sazonal da PPBp para três localidades brasileiras, sendo duas no NE e uma no S do país. Nelas podemos observar com as plantas de diferentes grupos (tipos de metabolismo de fixação de  $\text{CO}_2$  atmosférico) respondem às condições ambientais (T, RS, N). As plantas C4 apresentam excelente desempenho em ambientes quentes e com boa disponibilidade de energia, porém, sob condições de baixa temperatura, fotoperíodo curto e menor disponibilidade energética, elas tem desempenho até mesmo inferior às plantas C3, como ocorre no inverno no Rio Grande do Sul. Já as plantas C3 de inverno apresentam um desempenho constante ao longo do ano e nas diferentes localidades, com PPBp entre 200 e 300 kgMS/ha dia.









## Estimativa da *Produtividade Potencial da Cultura*

$PP_f$  [kg MS ha<sup>-1</sup>]

$$PP_f = PPB_p * C_{IAF} * C_{RESP} * C_{COL} * NDC * C_{UM}$$

$C_{IAF}$  = correção para o índice de área foliar máximo da cultura

$C_{RESP}$  = correção para as perdas por respiração (man. e cresc.)

$C_{COL}$  = correção para a parte da planta efetivamente colhida

NDC = número de dias do ciclo da cultura

$C_{UM}$  = correção para considerar a umidade da parte colhida

**OBS: C são índices adimensionais**

$C_{IAF}$  = correção para o índice de área foliar máximo da cultura

*Cultura padrão*  $\Rightarrow IAF_{m\acute{a}x} = 5$

Para  $IAF_{m\acute{a}x} < 5 \Rightarrow C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 IAF_{m\acute{a}x} - 0,0175 IAF_{m\acute{a}x}^2$

Para  $IAF_{m\acute{a}x} \geq 5 \Rightarrow C_{IAF} = 0,5$

$C_{RESP}$  = correção para as perdas por respiração (man. e cresc.)

Para  $T_{med} < 20^{\circ}C \Rightarrow C_{RESP} = 0,6$

Para  $T_{med} \geq 20^{\circ}C \Rightarrow C_{RESP} = 0,5$

$C_{COL}$  = correção para a parte da planta efetivamente colhida

$C_{COL} = \text{Fitomassa colhida} / \text{Fitomassa total}$  (ver Tabela 1)

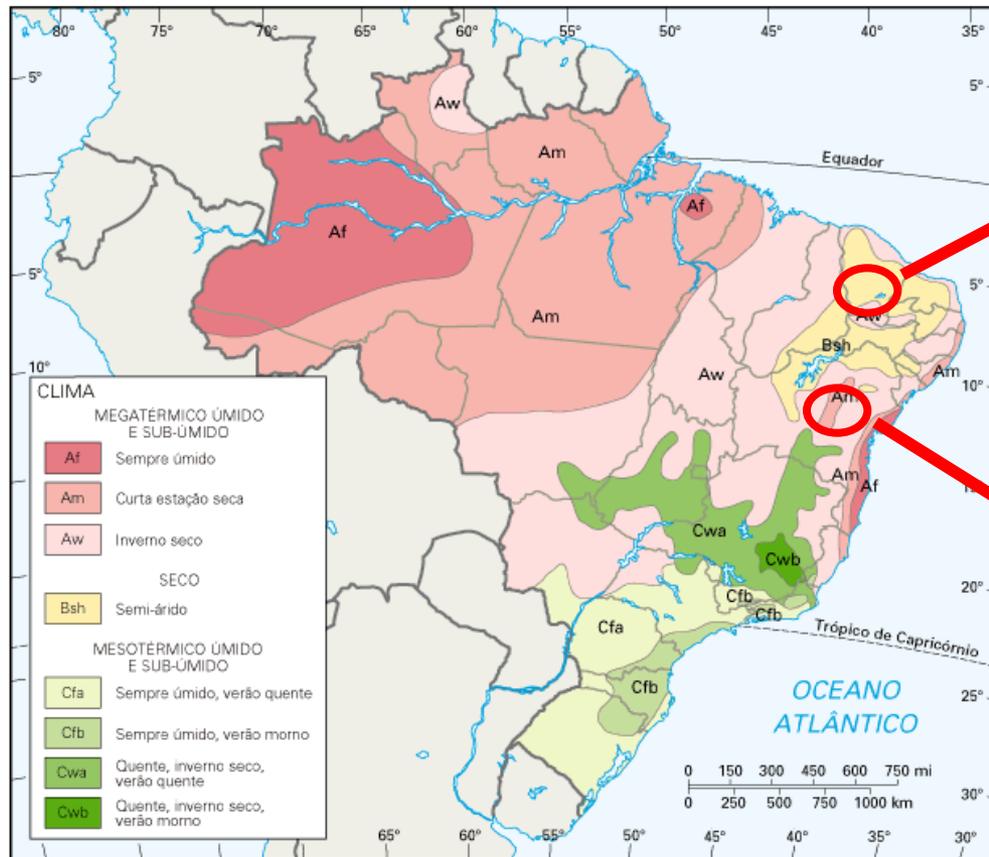
$C_{UM}$  = correção para considerar a umidade da parte colhida

$C_{UM} = 100 / (100 - UM)$  (ver Tabela 1)

**Tabela 1 – Índice de colheita ( $C_{COL}$ ) e teor de umidade (UM) da parte colhida de variedades altamente produtivas**

Cultura	Produto	$C_{COL}$	UM (%)	Cultura	Produto	$C_{COL}$	UM (%)
Abacaxi	Fruto	0,55	80	Feijão	Grão	0,30	10
Algodão	Fibra	0,10	-	Girassol	Grão	0,25	13
Amendoim	Grão	0,30	15	Milho	Grão	0,40	13
Arroz	Grão	0,45	17	Soja	Grão	0,35	8
Cana	Colmo	0,75	80	Sorgo	Grão	0,35	13

## Estudo de Casos – Produtividade Potencial



Quixeramobim, CE

Algodão arbóreo  
(01/Jan)

Serrinha, BA

Feijão de sequeiro  
(01/Mai)

N e Qo estimados pelas equações apresentadas anteriormente, Tmed e n obtidos junto às Normais Climatológicas do INMET (1961-90)



## Quixeramobim, CE



Cultura: Algodão arbóreo  
Semeadura: 01/Jan  
Ciclo: 120 dias

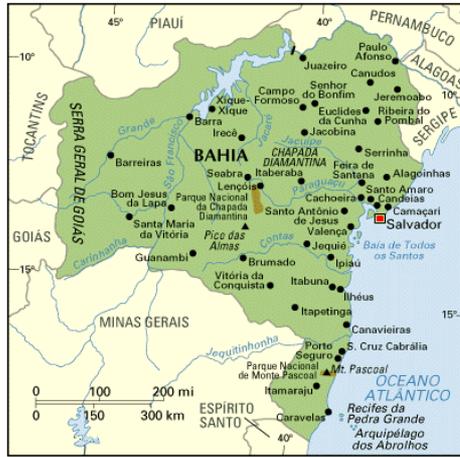


$$\left\{ \begin{array}{l} PPB_p = 461,73 \text{ Kg/ha.dia} \\ T_{med} > 20^\circ\text{C} \Rightarrow C_{RESP} = 0,5 \\ IAF_{m\acute{a}x} = 4 \Rightarrow C_{IAF} = 0,48 \\ C_{COL} = 0,1 \text{ (Fibra)} \\ C_{UM} = 1,0 \text{ (UM = 0\%)} \end{array} \right.$$

$$PP_f = PPB_p * C_{IAF} * C_{RESP} * C_{COL} * NDC * C_{UM}$$

$$PP_f = 461,73 * 0,48 * 0,5 * 0,1 * 120 * 1$$

$$PP_f = 1.330 \text{ kg de pluma / ha}$$



## Serrinha, BA



Cultura: Feijão de sequeiro  
Semeadura: 01/Mai  
Ciclo: 90 dias



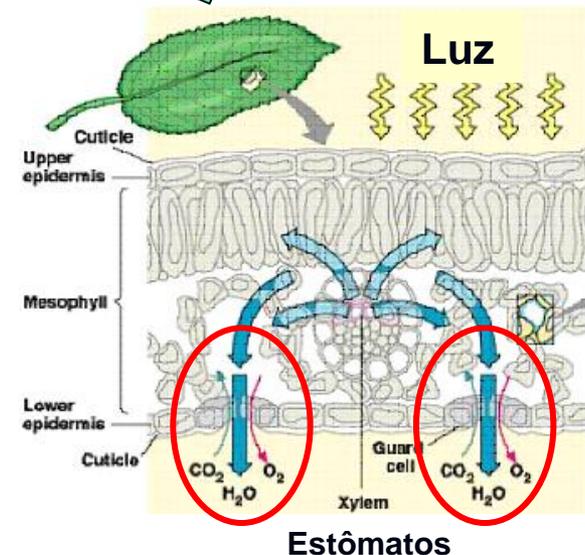
$$\left. \begin{aligned} PPB_p &= 252,18 \text{ Kg/ha.dia} \\ T_{med} > 20^\circ\text{C} &\Rightarrow C_{RESP} = 0,5 \\ IAF_{m\acute{a}x} = 3 &\Rightarrow C_{IAF} = 0,40 \\ C_{COL} &= 0,3 \text{ (Gr\~{a}os)} \\ C_{UM} &= 1,11 \text{ (UM = 10\%)} \end{aligned} \right\}$$

$$PP_f = PPB_p * C_{IAF} * C_{RESP} * C_{COL} * NDC * C_{UM}$$

$$PP_f = 252,18 * 0,40 * 0,5 * 0,3 * 90 * 1,11$$

$$PP_f = 1.513 \text{ kg de gr\~{a}os / ha}$$

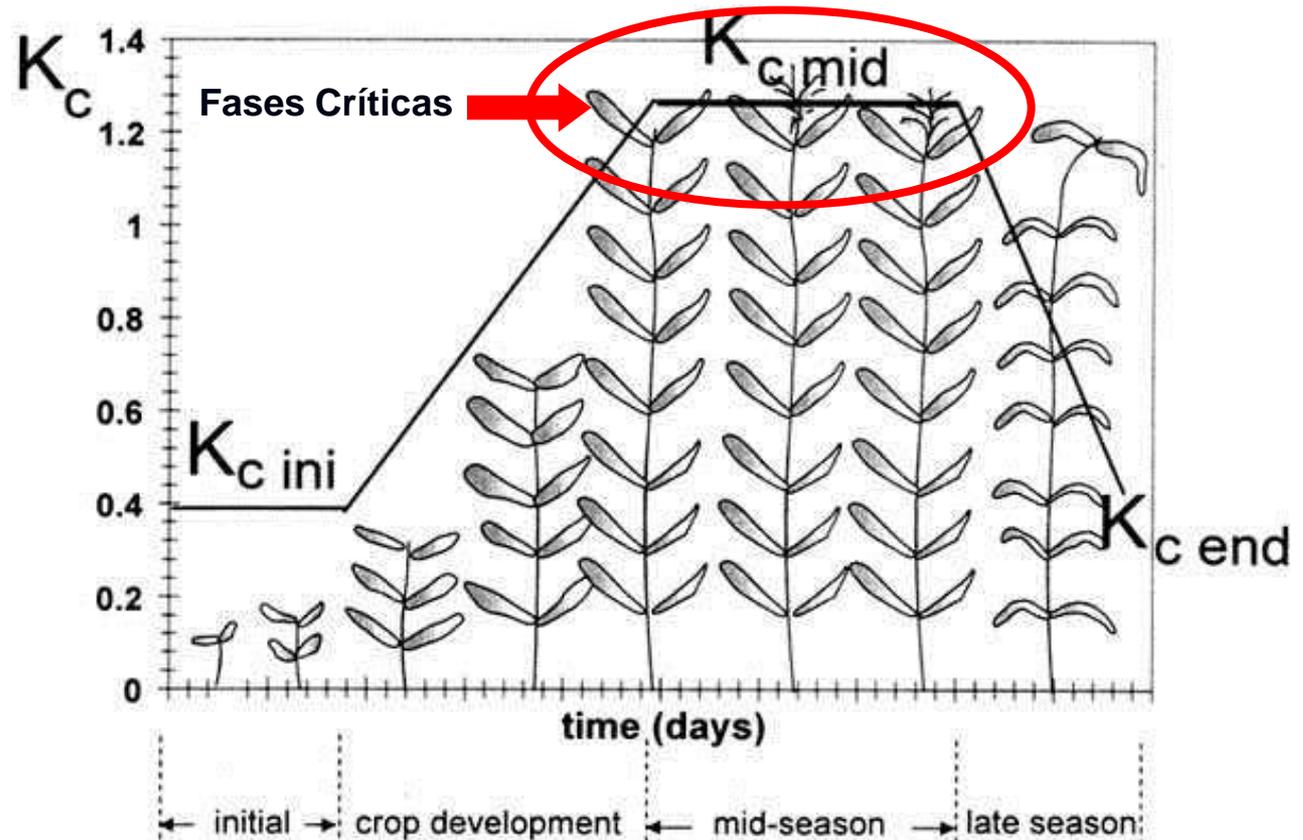
## Efeito do Déficit Hídrico no Rendimento das Culturas Modelo FAO – Boletim 33 (1979)



A deficiência hídrica induz a adaptações morfológicas e fisiológicas, como o fechamentos dos estômatos, reduzindo a fotossíntese, afetando adversamente o crescimento e o rendimento das culturas

Em geral, as culturas são mais sensíveis à deficiência hídrica durante a emergência (semeadura à germinação), floração e a frutificação, do que durante as fases de desenvolvimento vegetativo e a maturação.

Isso está associado ao consumo de água pelas plantas que é mais acentuado nas fases de floração e frutificação (fases críticas). A figura abaixo indica o consumo hídrico relativo ( $K_c$ ) para uma cultura anual hipotética

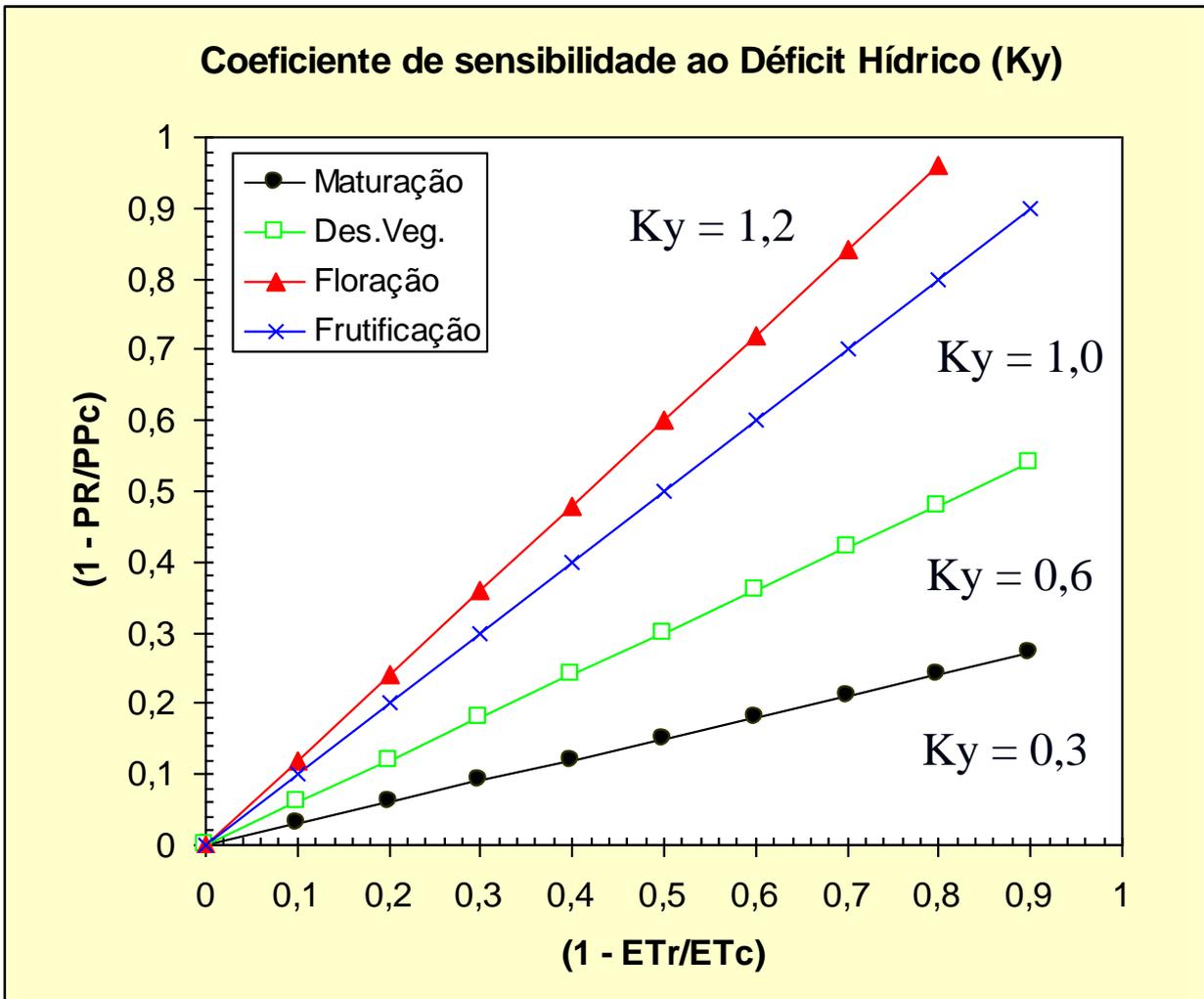


$$K_c = ET_c / ET_o$$

ou

$$ET_c = K_c ET_o$$

Essa diferença na resposta ao déficit hídrico, como mostra a figura abaixo, levou à introdução do conceito de *Coefficiente de Sensibilidade ao Déficit Hídrico* [ $Ky = (1 - PR/PPc) / (1 - ETr/ETc)$ ]



## Modelo FAO - Proposto por Doorenbos & Kassam (1979)

$$K_y = (1 - PR/PP_c) / (1 - E_{Tr}/E_{Tc})$$

$$(1 - PR/PP_c) = K_y (1 - E_{Tr}/E_{Tc})$$

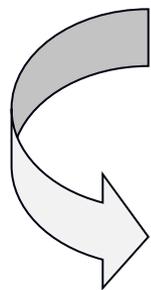
$$PR/PP_c = 1 - K_y (1 - E_{Tr}/E_{Tc})$$



$$PR = PP_c [1 - K_y (1 - E_{Tr}/E_{Tc})]$$

O modelo estima o rendimento (PR) em função da produtividade potencial (PP<sub>c</sub>) e do déficit hídrico relativo (1 - E<sub>Tr</sub>/E<sub>Tc</sub>) que ocorre em cada fase do desenvolvimento, representada pelo K<sub>y</sub>. Além da PR, o modelo também pode fornecer a quebra relativa de rendimento (Q = 1 - PR/PP<sub>c</sub>), a qual não exige a determinação de PP<sub>c</sub>. Esse modelo pode ser aplicado na avaliação dos riscos climáticos associados às diferentes épocas de semeaduras em diferentes locais e, ainda, na avaliação da viabilidade de irrigação em regiões de secas esporádicas ou sazonais.

Além das informações requeridas para a estimativa da PPc, o modelo de D&K (1979) necessita de dados de ETc e de ETr.



## Determinação de ETc

**Clima**



RS, T, V,  
UR

+

**Cultura de referência**



Gramado sem  
deficiência hídrica

=

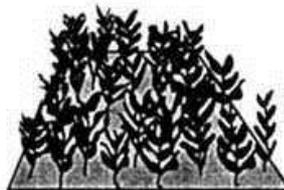
ET<sub>0</sub>



ET<sub>0</sub>

x

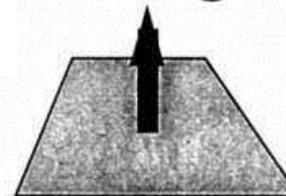
**Kc**

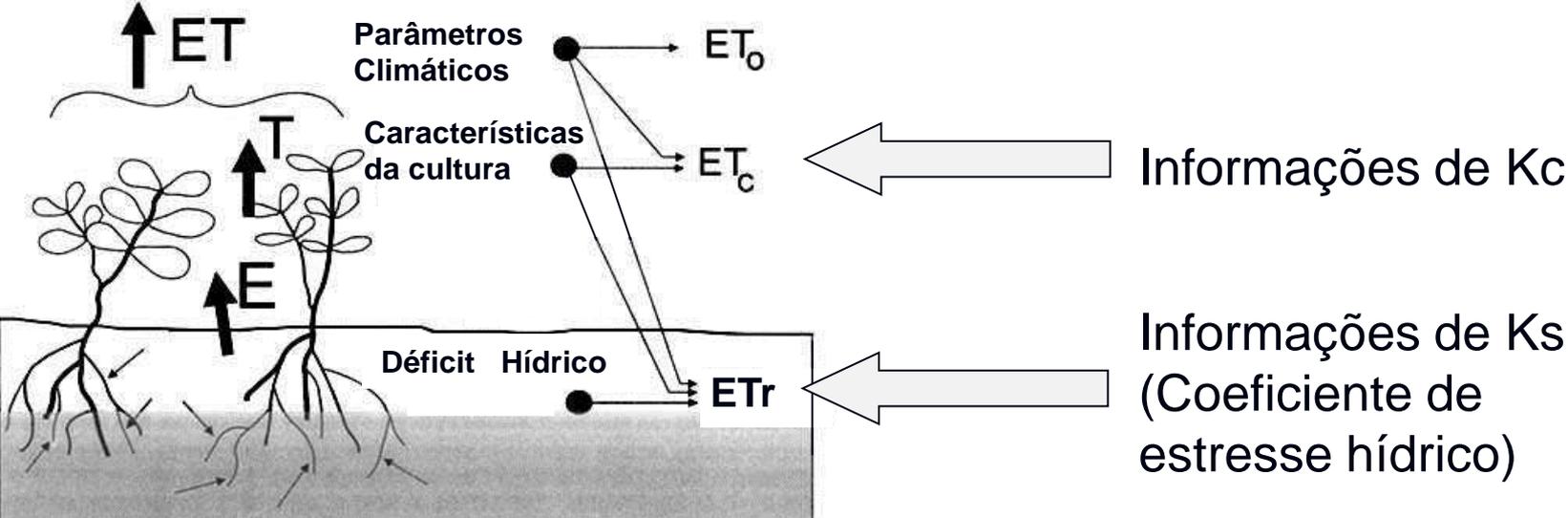


Cultura em condições  
hídricas ideais

=

ET<sub>c</sub>



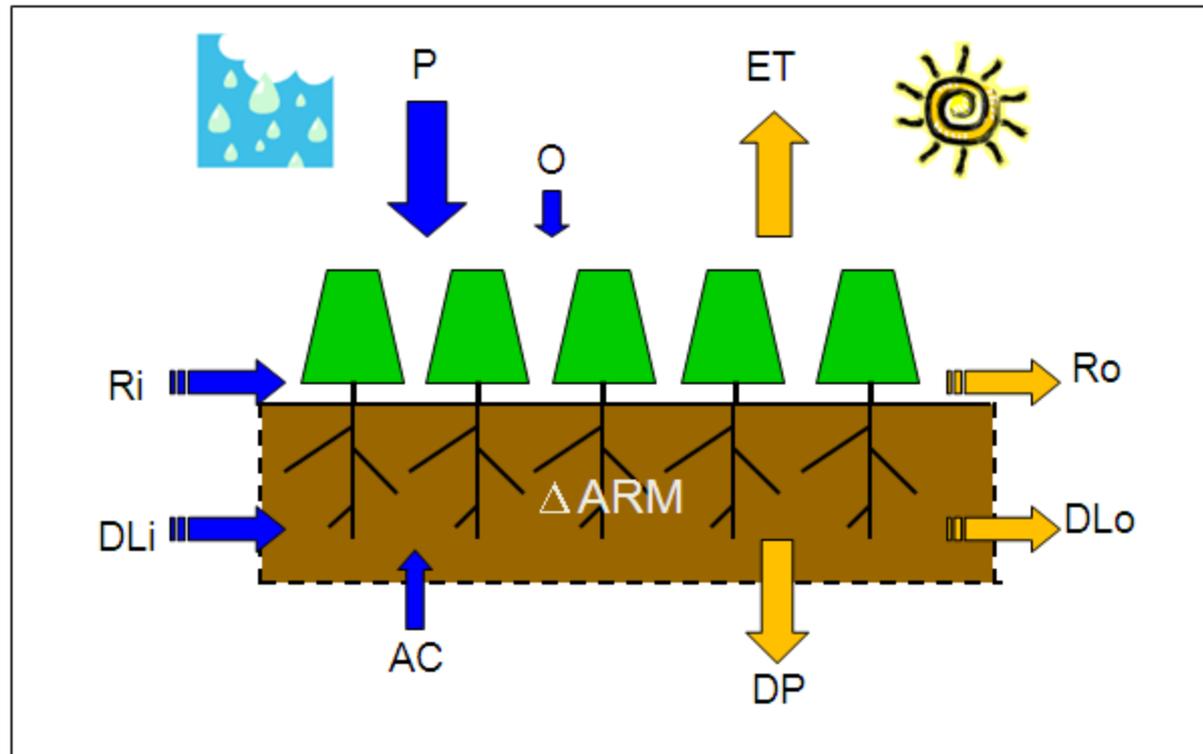


**Determinação de  $ET_r$**

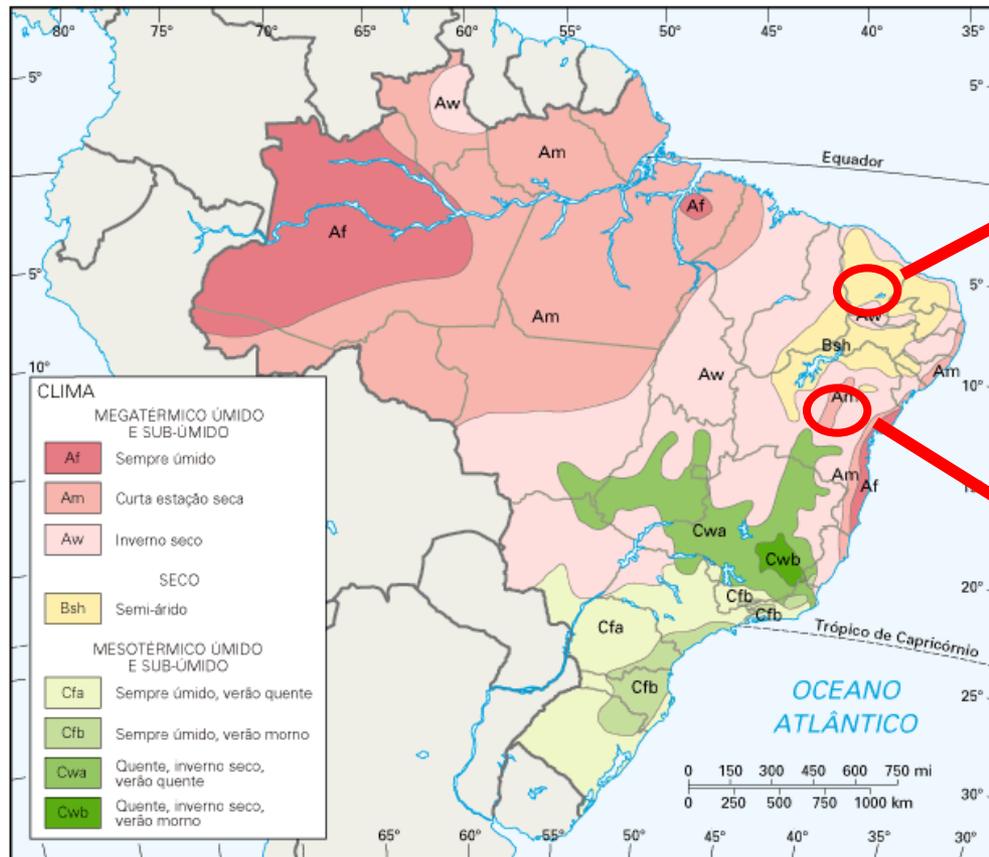
$$ET_0 \times K_c \times K_s = ET_r$$

The diagrammatic equation shows  $ET_0$  multiplied by  $K_c$  and  $K_s$  to equal  $ET_r$ . The  $K_c$  and  $K_s$  terms are represented by a trapezoidal area containing plants, labeled "Déficit hídrico". The result  $ET_r$  is represented by a trapezoidal area with an upward arrow.

A forma mais simples de se obter os valores de  $ETo$ ,  $ETc$  e  $ETr$ , é com o emprego de equações de estimativa da  $ETo$ , adoção de valores de  $Kc$  tabelados para obter  $ETc$  e, finalmente, se empregando o balanço hídrico climatológico aplicado à cultura, para estimativa da  $ETr$ .



## Estudo de Casos – Produtividade Real e Quebra de rendimento



Quixeramobim, CE

Algodão arbóreo  
(01/Jan)

Serrinha, BA

Feijão de sequeiro  
(01/Mai)

N e Qo estimados pelas equações apresentadas anteriormente, Tmed e n obtidos junto às Normais Climatológicas do INMET (1961-90), ETo e ETc estimadas pelo método de Camargo et al. (1999), também conhecido como Thornthwaite-Temperatura Efetiva, e ETr estimada pelo balanço hídrico de cultura.



## Quixeramobim, CE



Cultura: Algodão arbóreo  
Semeadura: 01/Jan  
Ciclo: 120 dias



PPc = 1.330 Kg/ha  
ETr/ETc (DV) = 0,80  
ETr/ETc (FL) = 0,63  
ETr/ETc (MT) = 0,71

Fase Fenológica	Duração (dias)	ETr/ETc	Ky
Estabelecimento	12	-	-
Des. Vegetativo	24	0,80	0,20
Floração	54	0,63	0,50
Frutificação	20	-	-
Maturação	10	0,71	0,25



## Quixeramobim, CE



$$PR = PPc [1 - Ky (1 - ETr/ETc)]$$

$$PR_{DV} = 1.330 [1 - 0,20 (1 - 0,80)] = 1.276,80$$

$$PR_{FL} = 1.276,8 [1 - 0,50 (1 - 0,63)] = 1,040,50$$

$$PR_{FL} = 1.040,5 [1 - 0,25 (1 - 0,71)] = 965,10$$

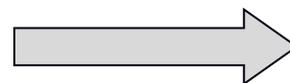
$$PR_{final} = 965,1 \text{ Kg/ha e } Q = 27,4\%$$



## Serrinha, BA



Cultura: Feijão de sequeiro  
Semeadura: 01/Mai  
Ciclo: 90 dias

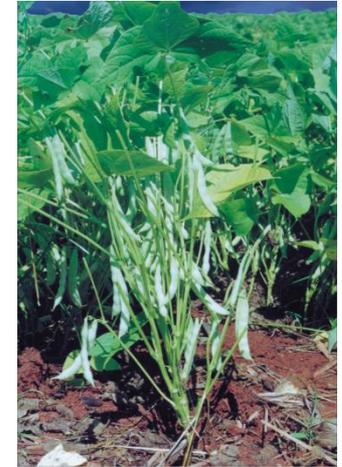


PPc = 1.513 Kg/ha  
ETr/ETc (DV) = 0,80  
ETr/ETc (FL) = 0,63  
ETr/ETc (MT) = 0,71

Fase Fenológica	Duração (dias)	ETr/ETc	Ky
Estabelecimento	10	-	-
Des. Vegetativo	20	0,75	0,20
Floração	15	0,55	1,10
Frutificação	25	0,82	0,75
Maturação	20	0,33	0,20



## Serrinha, BA



$$PR = PPc [1 - Ky (1 - ETr/ETc)]$$

$$PR_{DV} = 1.513 [1 - 0,20 (1 - 0,75)] = 1.437,35$$

$$PR_{FL} = 1.437,35 [1 - 1,1 (1 - 0,55)] = 725,86$$

$$PR_{FL} = 725,86 [1 - 0,20 (1 - 0,33)] = 628,60$$

$$PR_{final} = 628,60 \text{ Kg/ha e } Q = 58,5\%$$

O modelo de PP não  
leva em consideração  
as diferenças entre as  
variedades

As informações relativas a  
solo (fertilidade e outras  
limitações) não são  
levadas em consideração

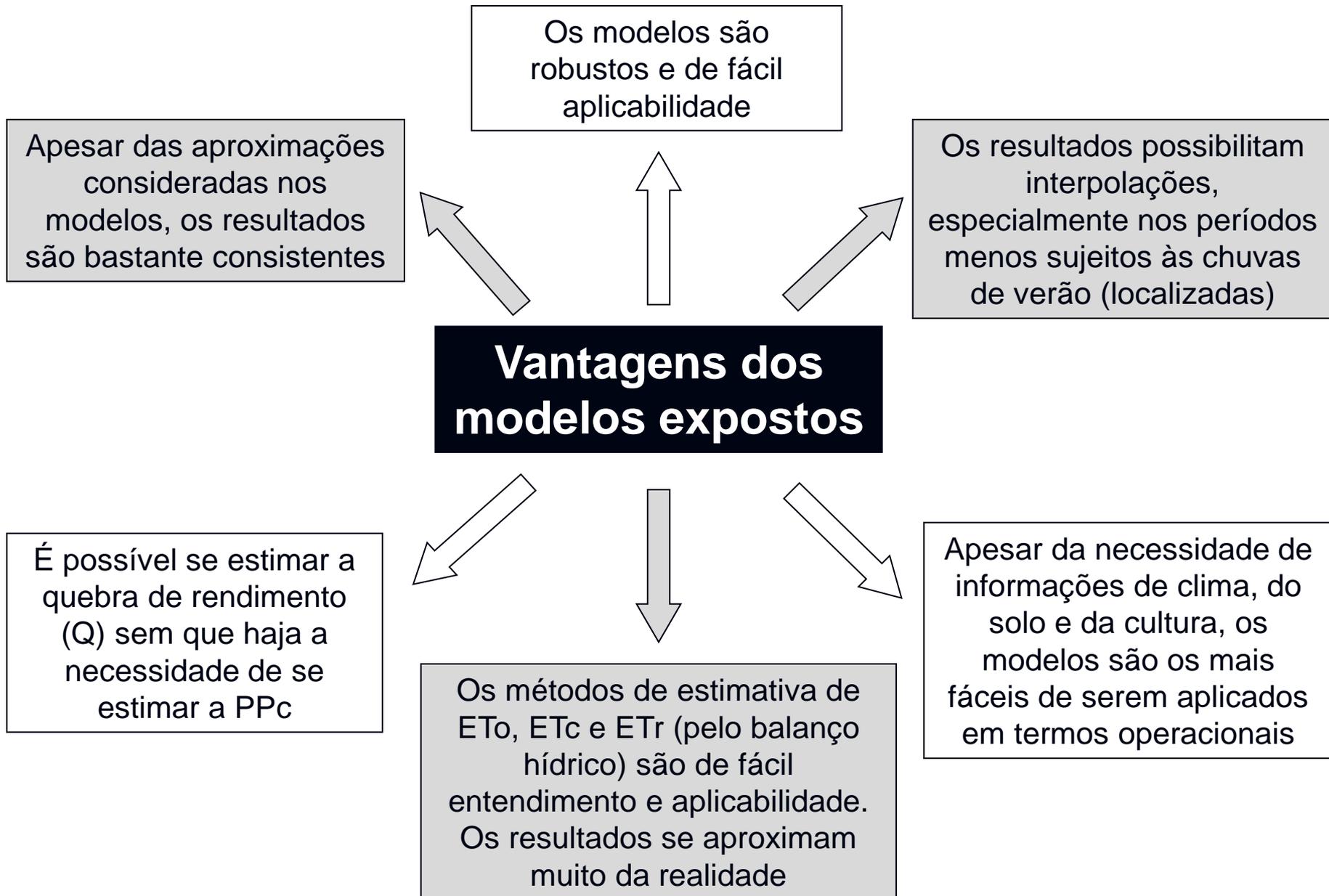
Ocorrência de pragas e  
doenças não são  
computadas por esses  
modelos

## Limitações dos modelos expostos

Para a aplicação dos  
modelos, há necessidade  
de dados de insolação,  
obtidos apenas em  
estações met. completas

Apesar de apresentar  
resultados consistentes em  
estudos prévios, esses modelos  
não foram largamente testados  
nas condições brasileiras,  
especialmente na Região NE

Para se obter o balanço  
hídrico da cultura, há  
necessidade de  
levantamento de  
informações de clima, do  
solo e da cultura



## **Teste rápido #10**

- 1) Conceitue as produtividades potencial, atingível e real. Defina os fatores que as condicionam. Indique qual delas é normalmente obtida em condições operacionais de produção.
- 2) O que significa o coeficiente de sensibilidade  $K_y$ ? Conceitualmente como ele pode ser determinado? Por que ele varia com as fases fenológicas das culturas?
- 3) Quais as principais vantagens e desvantagens dos modelos de estimativa da produtividade potencial e real?
- 4) Com os dados disponíveis no próximo slide determine a PPf e a PR da cultura da soja em Pindorama (SP – Lat: 23G13M).

Dados para o exercício 4: Cultura soja, ciclo = 130 dias, semeadura = 15/11, IAF máximo = 3,5.

Mês	Tmed (oC)	Qo (cal/cm2d)	n (h)	N (h)
Nov	24,2	980	6,9	13,1
Dez	24,3	1020	5,6	13,3
Jan	24,7	1018	6,0	13,2
Fev	24,9	975	6,4	12,7
Mar	24,6	897	6,6	12,1

Fase Fenológica	Duração (dias)	ETr/ETc
Estabelecimento	10	-
Des. Vegetativo	40	0,98
Florescimento	30	0,73
Frutificação	35	0,80
Maturação	15	-