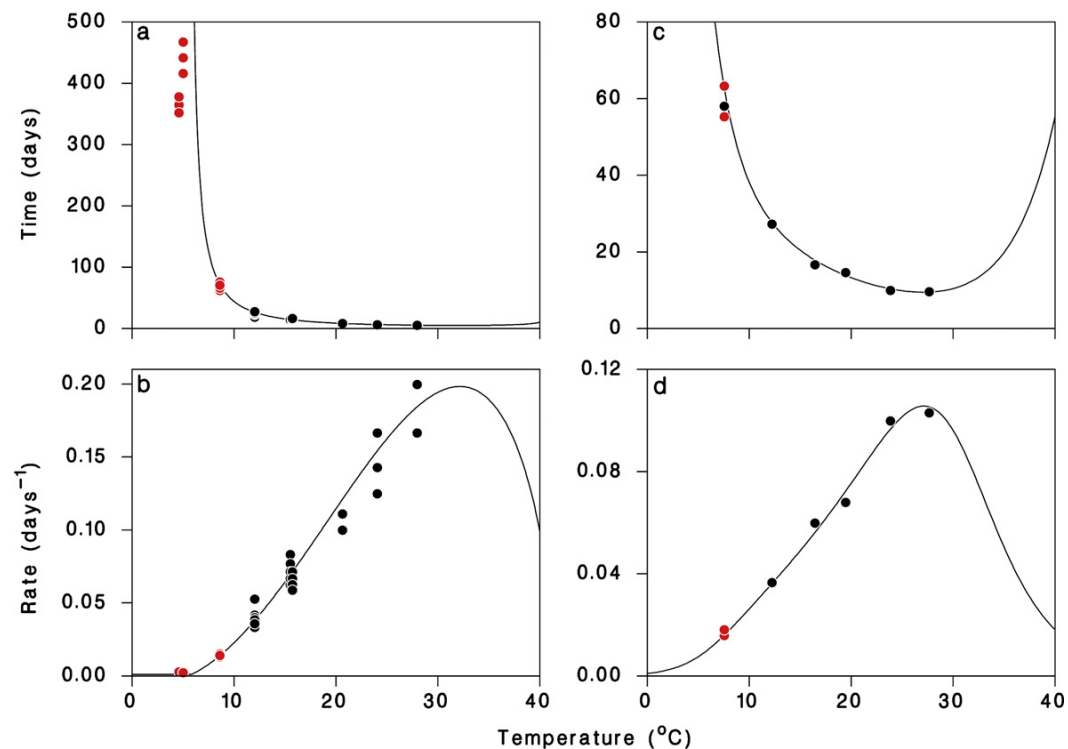


# 1100222 - Modelagem de Crescimento de Culturas Agrícolas

## LEB5048 - Modelagem de Culturas Agrícolas I

### Modelando o efeito da temperatura em sistemas biológicos



Prof. Fábio R Marin

Prof. Quirijn de Jong van Lier

1100222 - Modelagem de Crescimento de Culturas Agrícolas  
LEB5048 - Modelagem de Culturas Agrícolas I



**ESALQ**  
Escola Superior de Agricultura  
Luiz de Queiroz  
Universidade de São Paulo



# INTRODUÇÃO

- Temperatura - energia interna de uma substância ou um corpo qualquer, vulgarmente associado às sensações de frio e calor; mais especificamente é a medida da [energia cinética](#) associada ao movimento (vibração) aleatório das partículas.
- Diversas das propriedades físicas da matéria (densidade, solubilidade, pressão de vapor, condutividade hidráulica etc), tanto em estado sólido, líquido ou gasoso, são dependentes da temperatura do sistema. A temperatura do sistema também influencia as propriedades químicas, controlando a velocidade das reações e o metabolismo nos seres vivos.
- É um dos principais fatores determinantes da distribuição e desenvolvimento das plantas e animais .



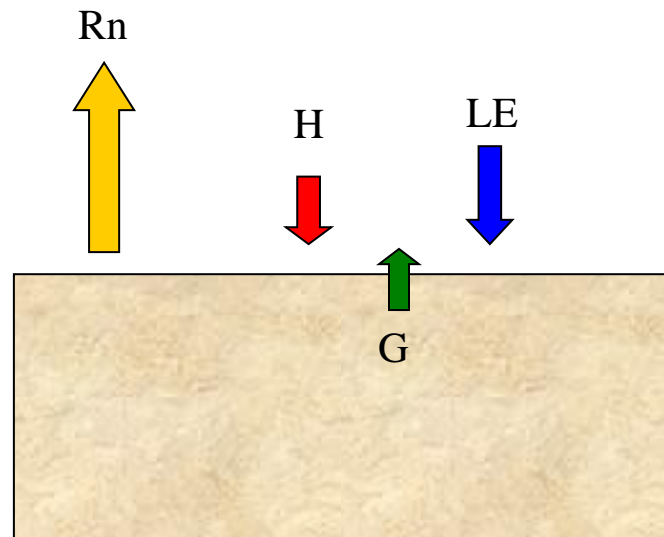
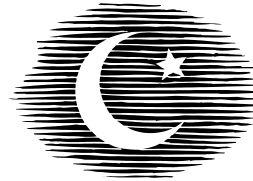
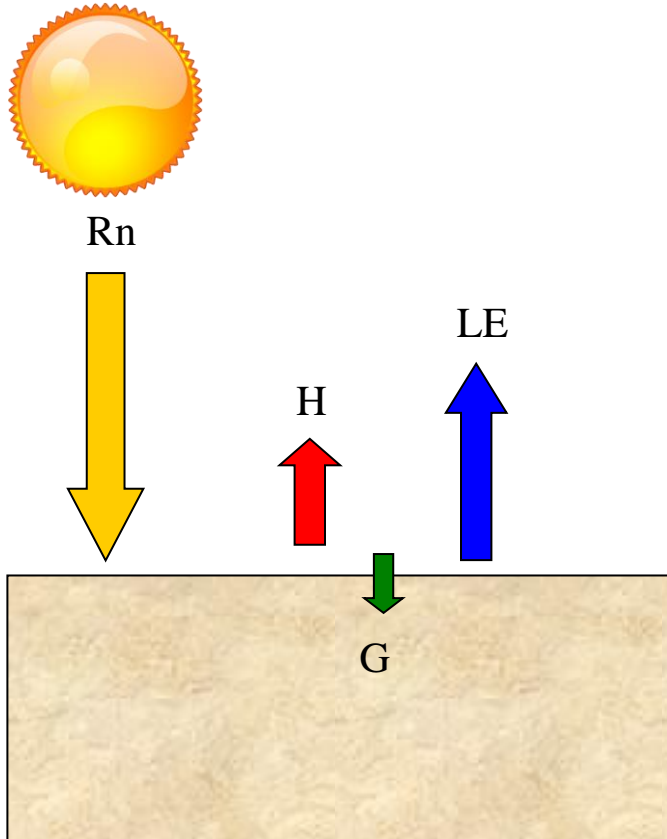
**Rn = Saldo de Radiação**

**H = Fluxo de Calor Sensível**

**LE = Fluxo de Calor Latente**

**G = Fluxo de Calor no Solo**

*A composição e a magnitude do balanço de energia é altamente dependente da umidade do solo e do ar*



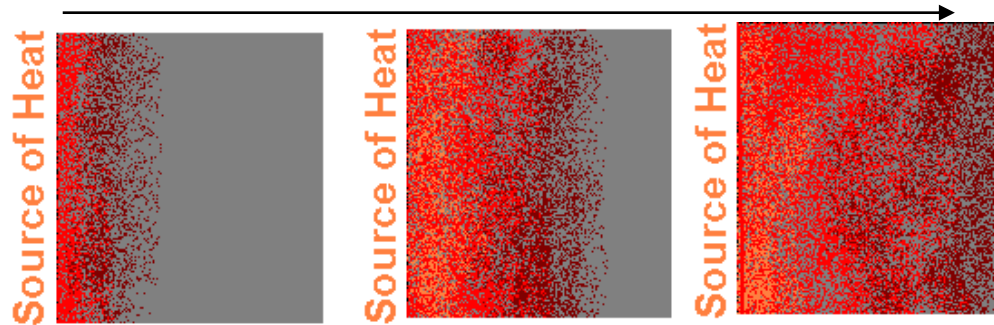
Temperatura do ar e do solo são resultado do balanço de radiação e energia



# Mecanismos de aquecimento da atmosfera

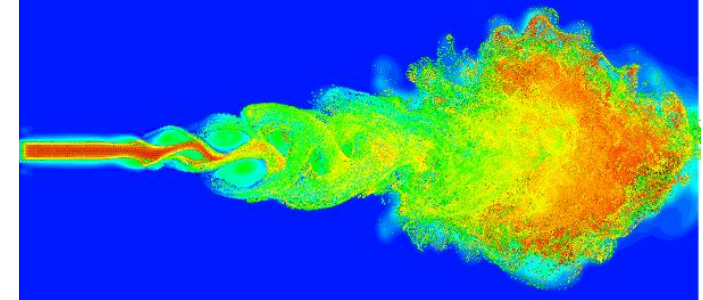
Aquecimento da atmosfera próxima à superfície terrestre por transporte de energia:

→ **Condução molecular** – troca de calor sensível por contato entre as “moléculas”, com extensão superficial limitada (máximo de 3m);



Rapidly moving (HOT) molecules  
Molecules being bumped and heated up  
Cold Molecules

→ **Difusão turbulenta**: processo “eficiente” de transporte de energia, com movimento ascendente de parcelas de ar aquecidas – dispersão de CO<sub>2</sub>, vapor d’água e poeira.

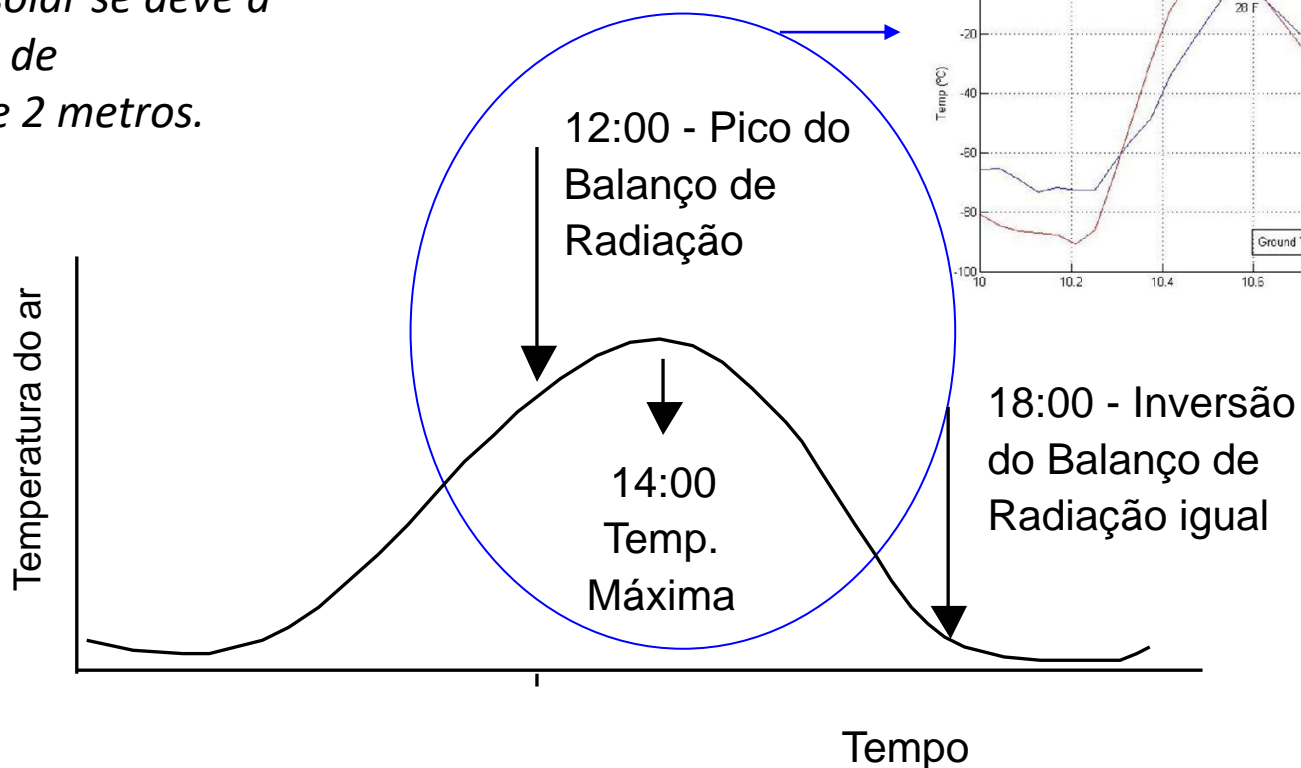




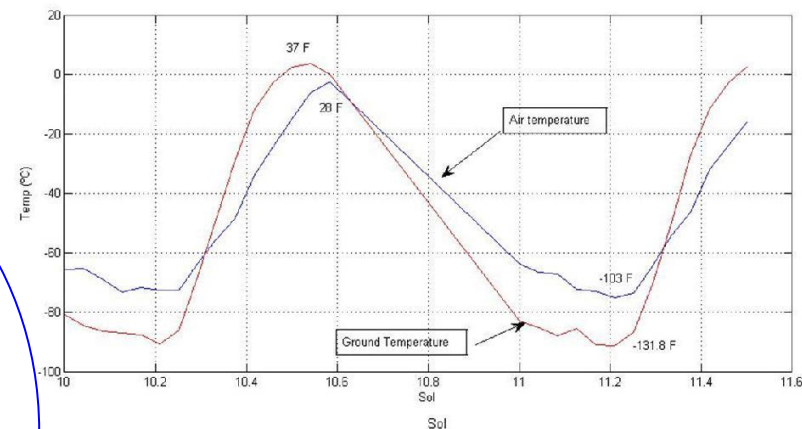
# Variação Temporal da Temperatura do Ar

→ **Diária:** Função do Balanço de Radiação na Superfície

*Obs: O “atraso” no registro da temperatura do ar em relação ao pico de radiação solar se deve a altura de medida, de aproximadamente 2 metros.*



GROUND AND AIR TEMPERATURE SENSOR



# A temperature do solo é importante para

- Germinação de sementes
- Crescimento de raízes e brotações
- Perfilhamento
- Atividade microbiana
- Absorção de água e nutrientes
- Evaporação da água
- Nitrificação no solo







## A temperature do solo é controlada por

- Radiação solar que atinge o solo
- Umidade do solo, cor, textura
- Inclinação e exposição do terreno
- Cobertura vegetal

# Temperatura do Solo

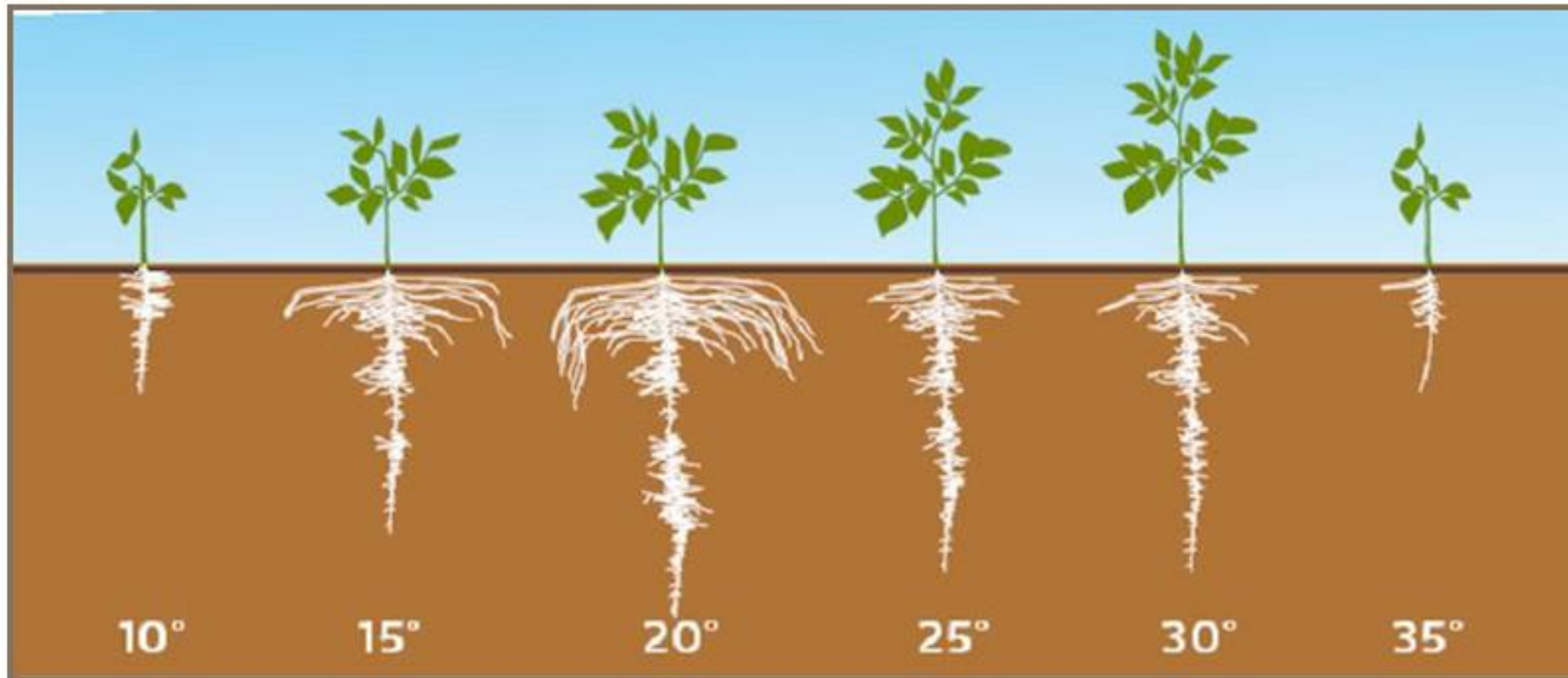
- O *tipo de solo* é outro fator intrínseco e está relacionado à textura, estrutura e composição do solo. Assim, desconsiderando-se os aspectos discutidos nos *slides* anteriores, os solos arenosos tendem a apresentar maior amplitude térmica diária nas camadas superficiais e menor profundidade de penetração das ondas de calor, em função de sua menor *condutividade térmica*.
- A variação temporal da temperatura do solo depende também de sua *capacidade volumétrica de calor* (C):

$$C = \rho c = 1,92 F_{\text{Min}} + 2,51 F_{\text{MO}} + 4,18 F_{\text{água}}$$

- em que  $F_{\text{min}}$ ,  $F_{\text{mo}}$  e  $F_{\text{água}}$  são respectivamente frações volumétricas das partículas minerais, da matéria orgânica, e da água retida no solo

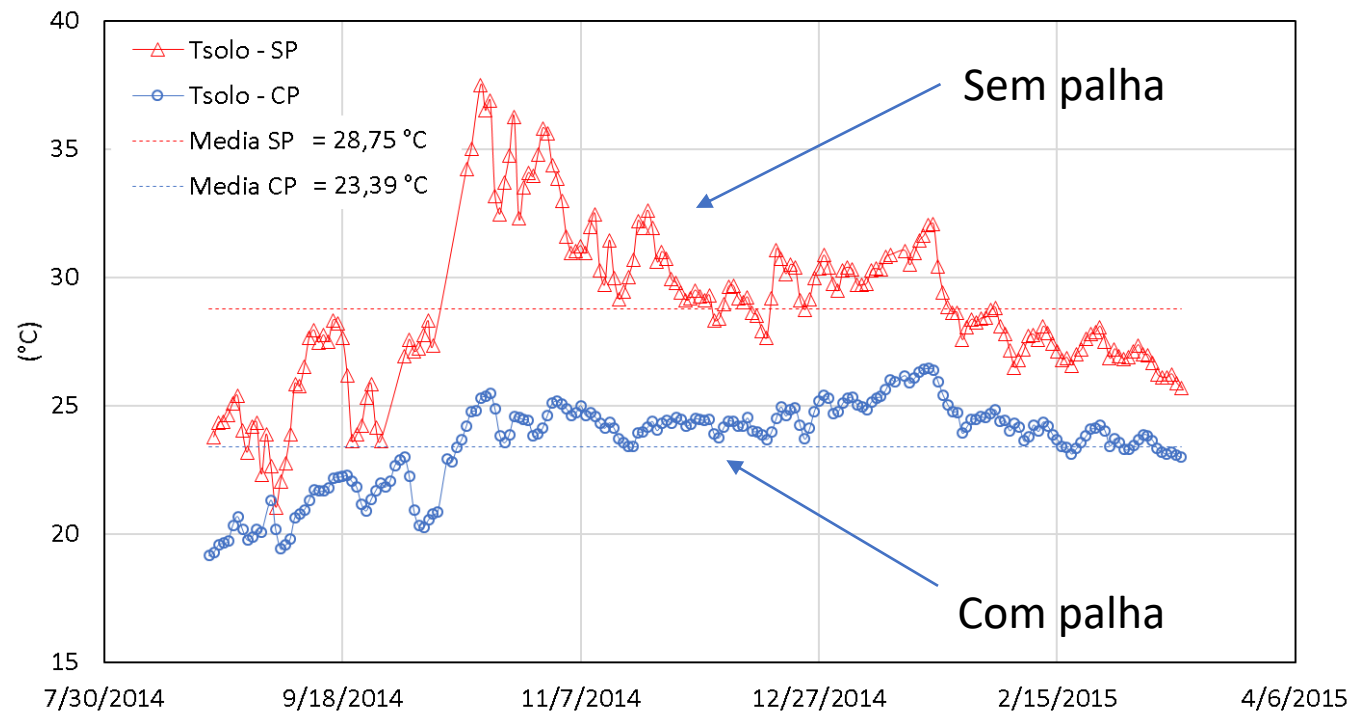


# Efeito da temperatura do solo no crescimento radicular



REF: Sattelmacher et al., 1990

# Efeito da palhada de cana sobre a temperatura do solo



Vianna et al (2020). Modelling the trash blanket effect on sugarcane growth and water use. Computers and Electronics in Agriculture.

# A temperatura como fator agronômico

- A taxa das reações metabólicas é regulada basicamente pela temperatura do ar, afetando, desse modo, tanto o crescimento como o desenvolvimento das plantas.
- Um dos primeiros estudos relacionando temperatura e desenvolvimento vegetal foi realizado por Reaumur, na França, por volta de 1735. Ele observou que o ciclo de uma mesma cultura/variedade variava entre localidades e também entre diferentes anos.
- Ao fazer o somatório das temperaturas do ar durante os diferentes ciclos, ele observou que esses valores eram praticamente constantes, definindo isso como ***Constante Térmica da Cultura (CT)***.





# Taxas de reações enzimáticas e temperatura

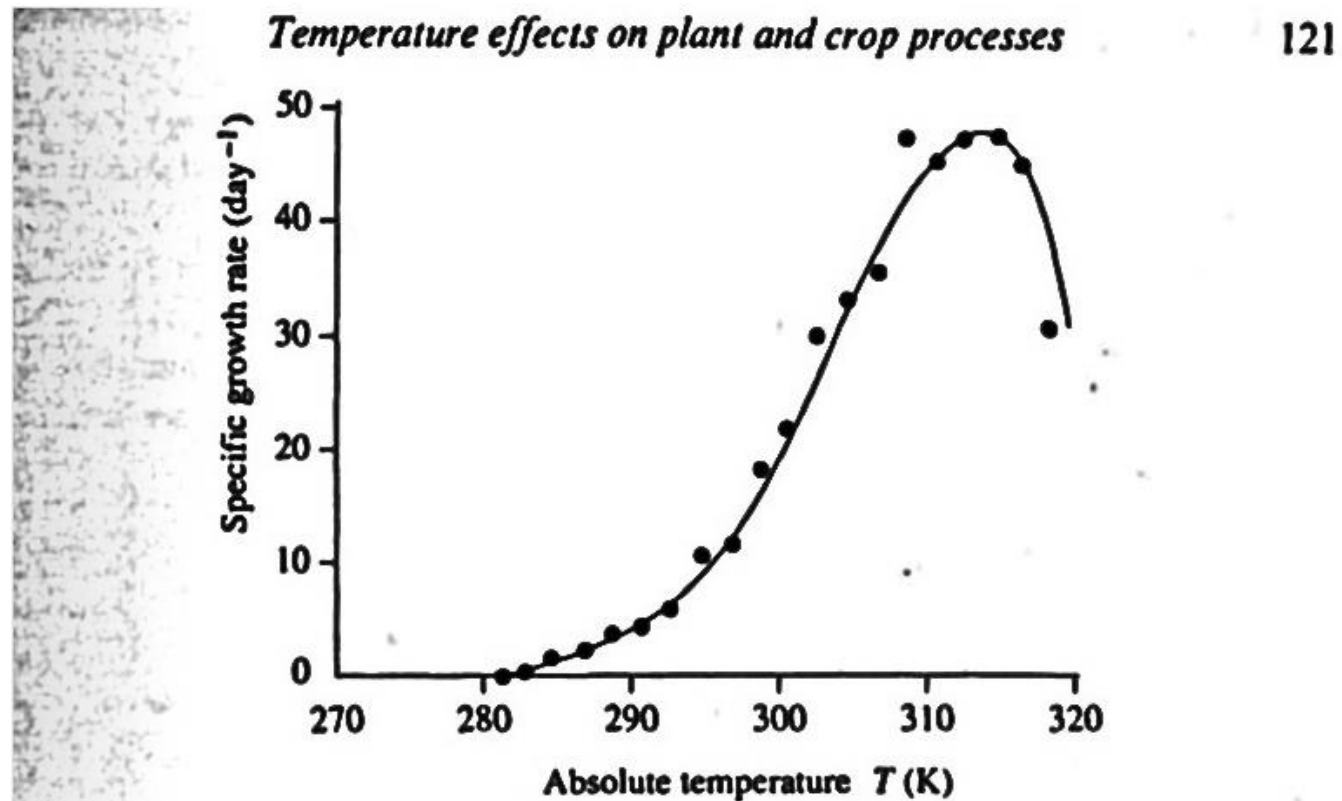
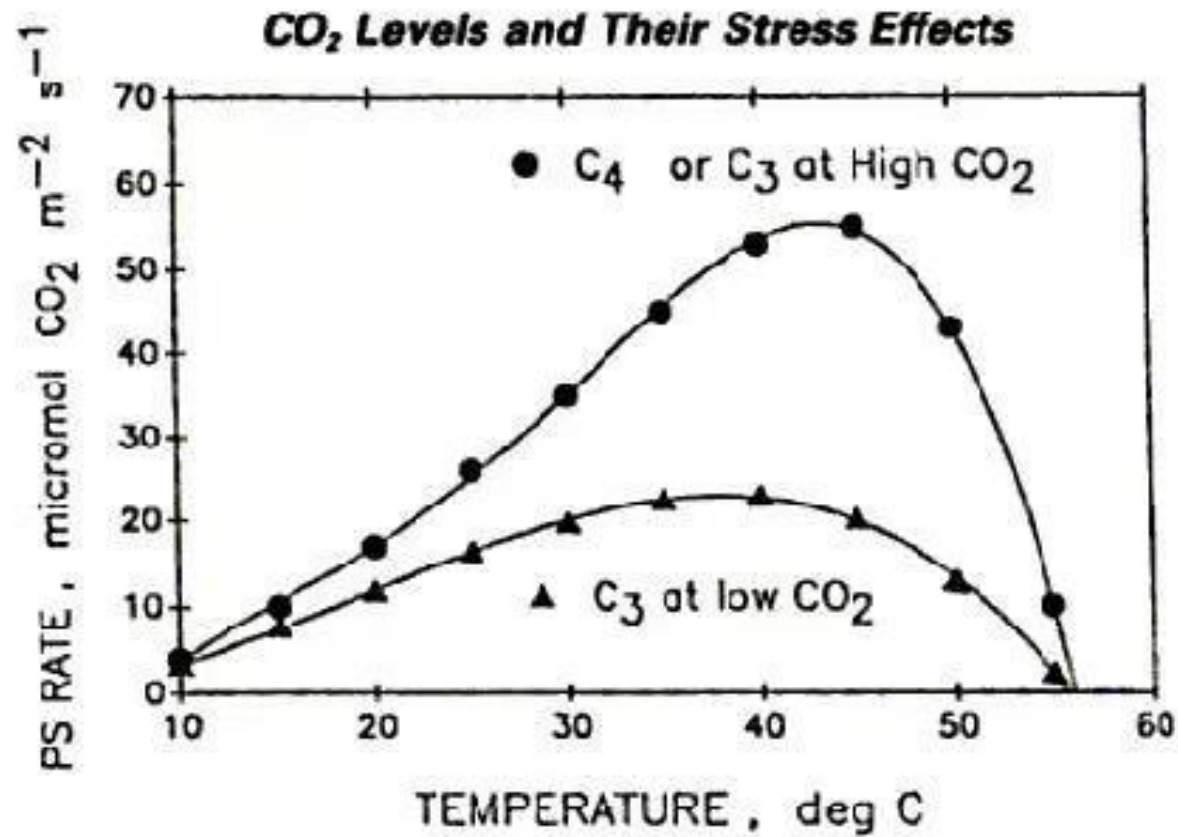


Fig. 5.1. Temperature response of the specific growth rate of *Escherichia coli* (adapted from the data of Ingraham (1958)). The curve has been drawn by eye.

Fonte: Thornley & Johnson, 1990

# Produção Vegetal X Temperatura



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

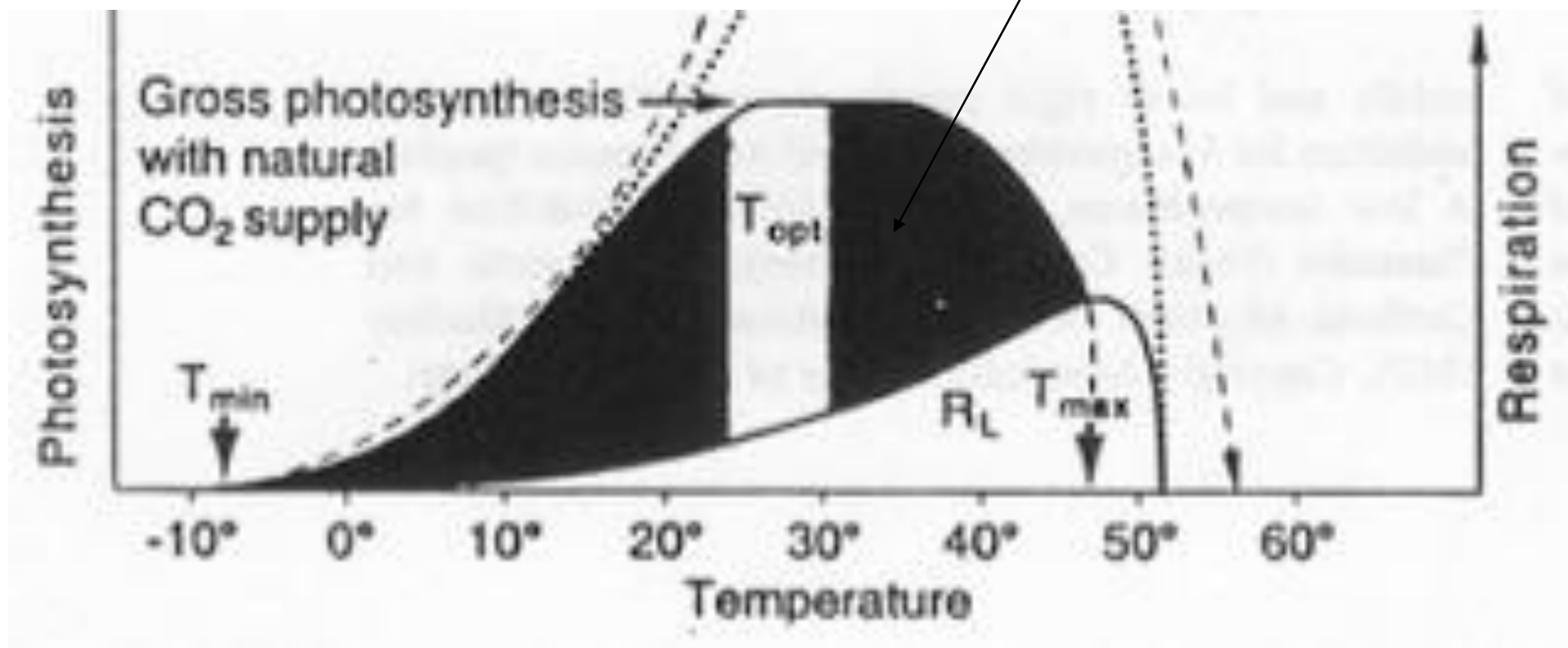
1100222 - Modelagem de Crescimento de Culturas Agrícolas  
LEB5048 - Modelagem de Culturas Agrícolas I



**ESALQ**  
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz  
Universidade de São Paulo

# Produção Vegetal X Temperatura

*Fotossíntese "Líquida"*

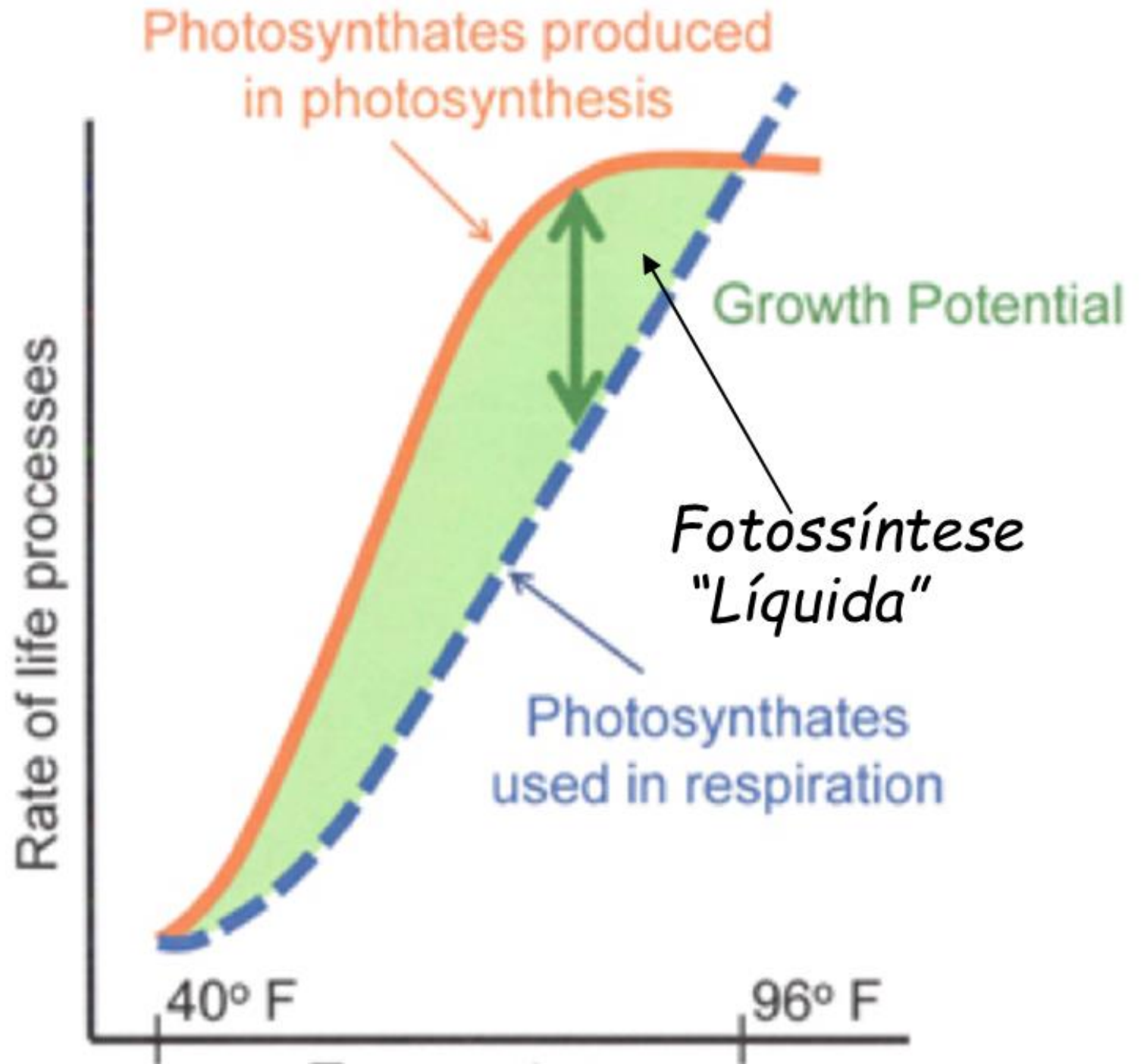




# Produção Vegetal X Temperatura

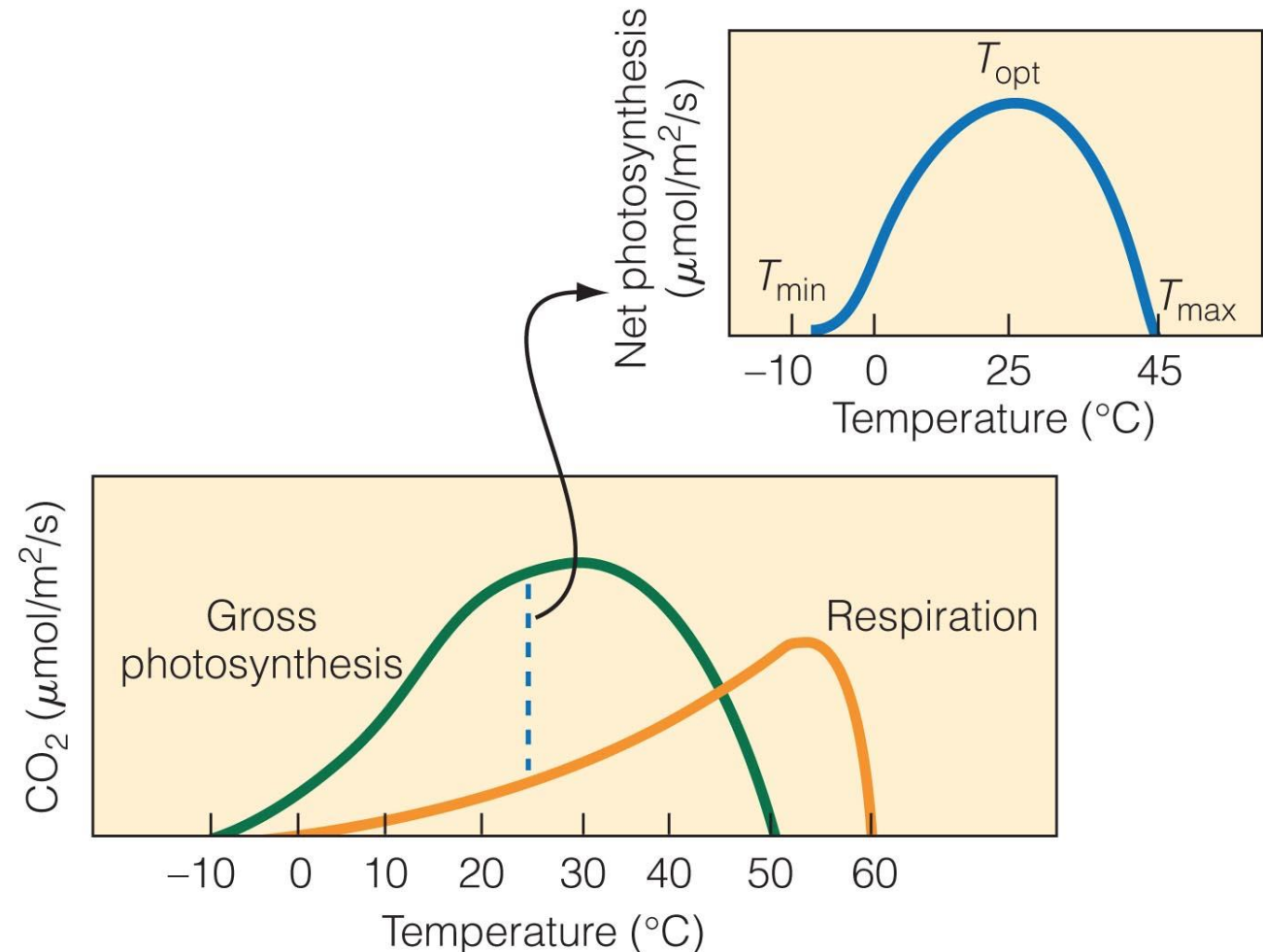
A taxa de fotossíntese normalmente apresenta uma relação parabólica negativa com a temperatura, crescendo a partir de um valor de temperatura (temperatura base inferior), atingindo um pico de fotossíntese num ponto mais elevado de temperatura (temperatura ótima), e passando a decrescer após este valor até atingir um valor nulo novamente (temperatura base superior).

11002



# Produção Vegetal X Temperatura

Observe que as temperaturas cardinais ( $T_b$ ,  $T_{otima}$  e  $T_B$ ) para a fotossíntese líquida não são necessariamente as mesmas observadas para a fotossíntese bruta.

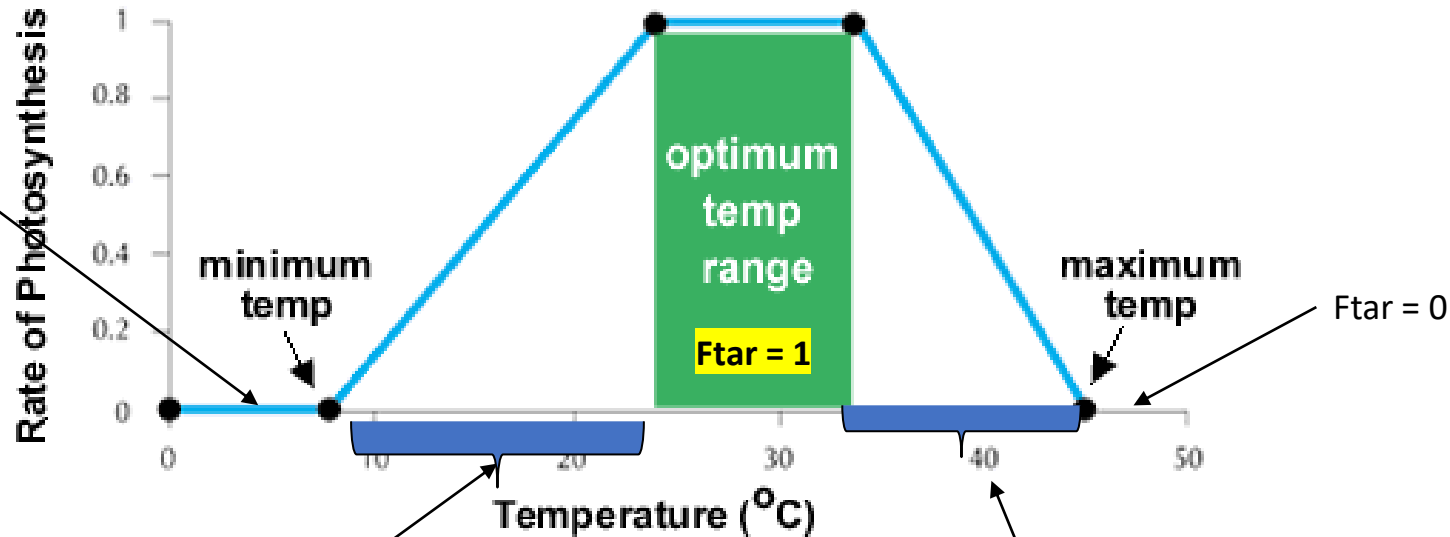


© 2012 Pearson Education, Inc.

# Produção Vegetal X Temperatura

Como representar matematicamente?

## Effect of Temperature on Photosynthesis



$$F_{tar} = \frac{(T_{ar} - T_b)}{(T_{o1} - T_b)}$$

$$F_{tar} = \frac{(T_{ar} - T_{o2})}{(T_B - T_{o2})}$$

Simplificação usado para estimativa de produtividade. A temperatura do ar, portanto, influi em dois aspectos principais no nosso modelo de produtividade:

- No desenvolvimento, controlando a duração do ciclo;
- Na taxa de crescimento, controlando o acúmulo de matéria seca.





# Estimando a temperatura do ambiente

$$\bullet \overline{T}_{dia}(t) = \left( \overline{T}_{ano} + T_{amp} \cdot \text{sen} \left[ 2\pi \frac{(t-t_c)}{365} \right] \right)$$

em que  $t$  é o tempo (em dias),  $t_c$  é a defasagem da curva senoidal,  $T_{amp}$  é a amplitude térmica anual.

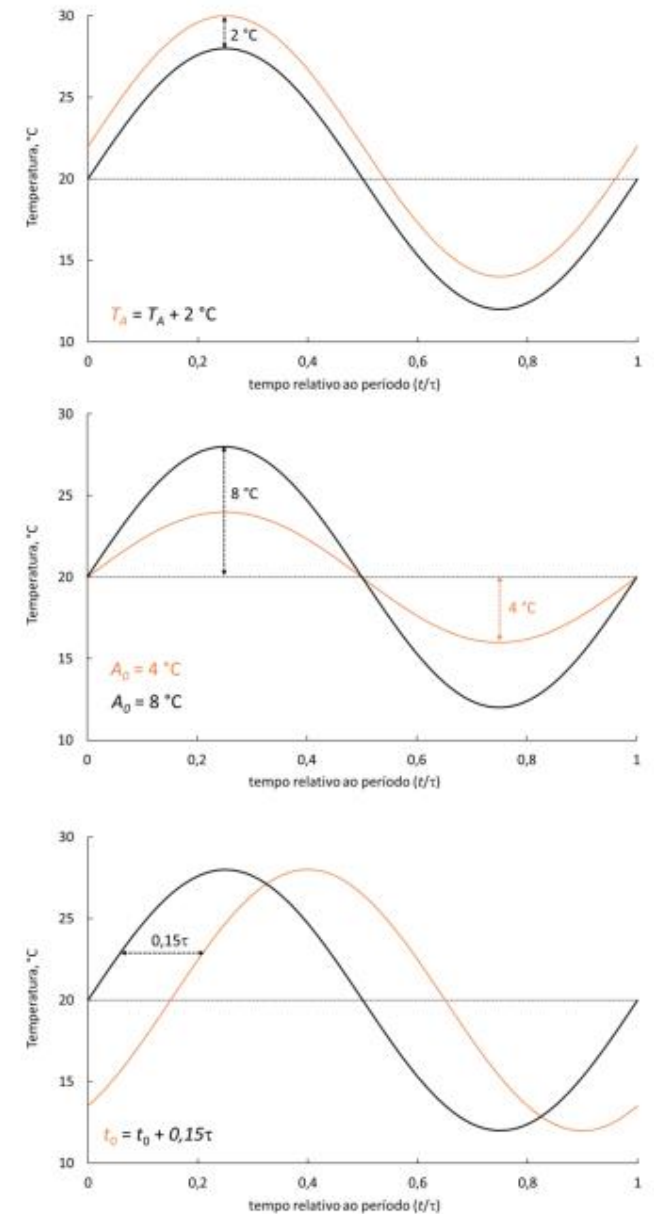


Figura 8.8 - Ilustração do efeito dos parâmetros  $T_a$ ,  $A_0$  e  $t_0$  da Eq. [8.36] na descrição da temperatura na superfície do solo ao longo de um período cíclico (p.e. um dia ou um ano). [http://cena.usp.br/publicacao/fisica\\_solo\\_baseada\\_processos.pdf](http://cena.usp.br/publicacao/fisica_solo_baseada_processos.pdf)

# Estimando a temperatura horária

- Parton and Logan. 1981. A model for diurnal variation in soil and air temperature. Agric. For. Meteorol. 23:205-216.

Daytime 
$$T(t) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot \sin\left[\pi \frac{(t - 12 + d/2)}{d + 2p}\right]$$

d = daylength, h

p = time from noon when maximum temperature occurs, h

---

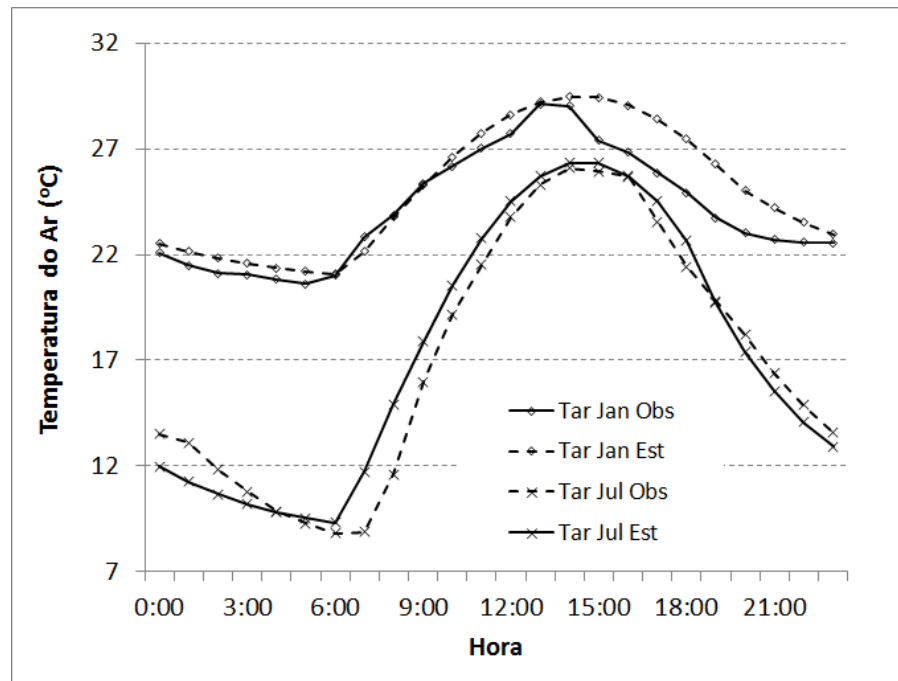
Night time 
$$T(t) = \frac{T_{\min} - T_{\text{sunset}} \cdot \exp(-n/T_C) + (T_{\text{sunset}} - T_{\min}) \cdot \exp(-(t - t_{\text{sunset}})/T_C)}{1 - \exp(-n/T_C)}$$

n = night length (24-d), h

$T_C$  = nocturnal time coefficient, about 4 h



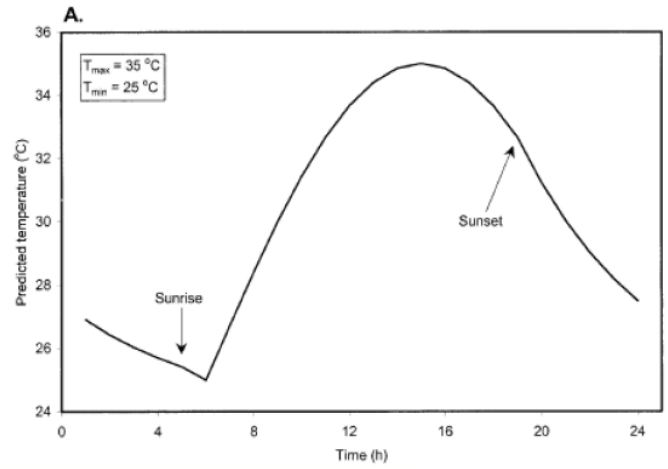
# Estimando a temperatura do ambiente



Varição horária da temperatura ao longo do dia

**Figura 7.6.** Temperatura do ar medida e estimada pelo método de Parton e Logan (1981) em Piracicaba-SP, em um dia de janeiro (Jan) e julho (Jul) (Vianna et al., 2013).

# Estimando a temperatura do ambiente



Variação horária da temperatura ao longo do dia

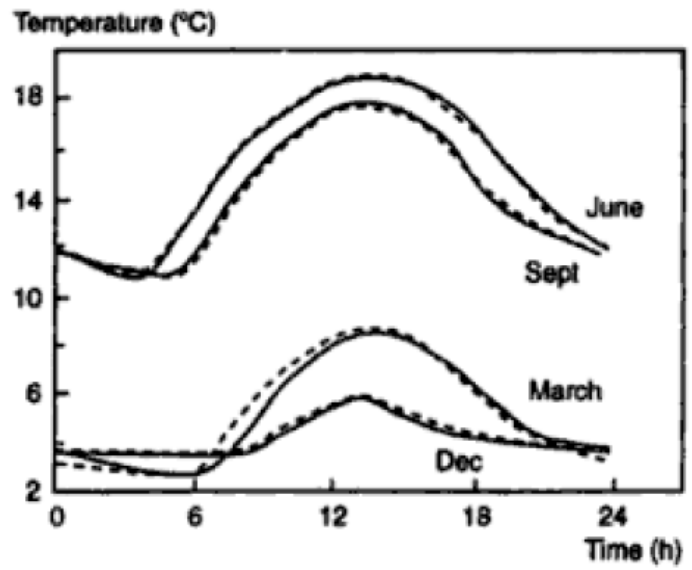
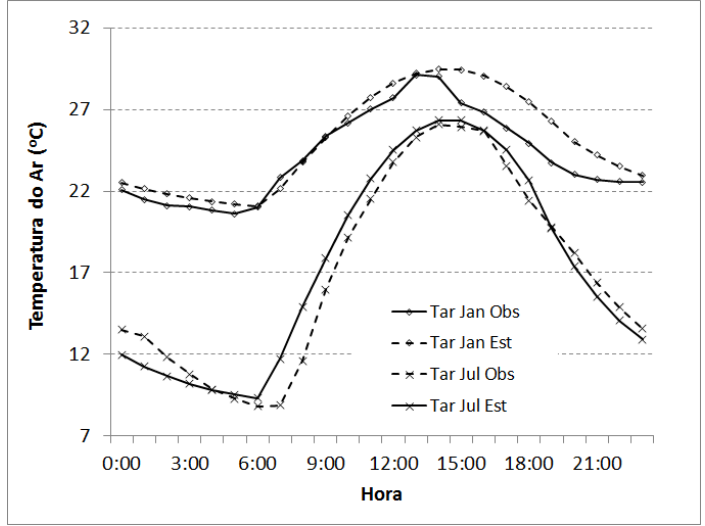


Figure 3.3. The average daily progression of air temperature in the months December, March, June and September in De Bilt, The Netherlands (solid lines). The broken line is the result of Eqns 3.9 and 3.10.



1100222 - Modelagem de Crescimento de Culturas Agrícolas  
 Figura 7.6. Temperatura do ar medida e estimada pelo método de Penman-Monteith em um dia de janeiro (Jan) e julho (Jul).



# Conceito de Graus-Dia

- Imagine um experimento em que uma cultivar foi cultivada sob diferentes temperaturas. A duração da fase entre a semeadura e o florescimento foi registrado, obtendo-se a Figura ao lado:

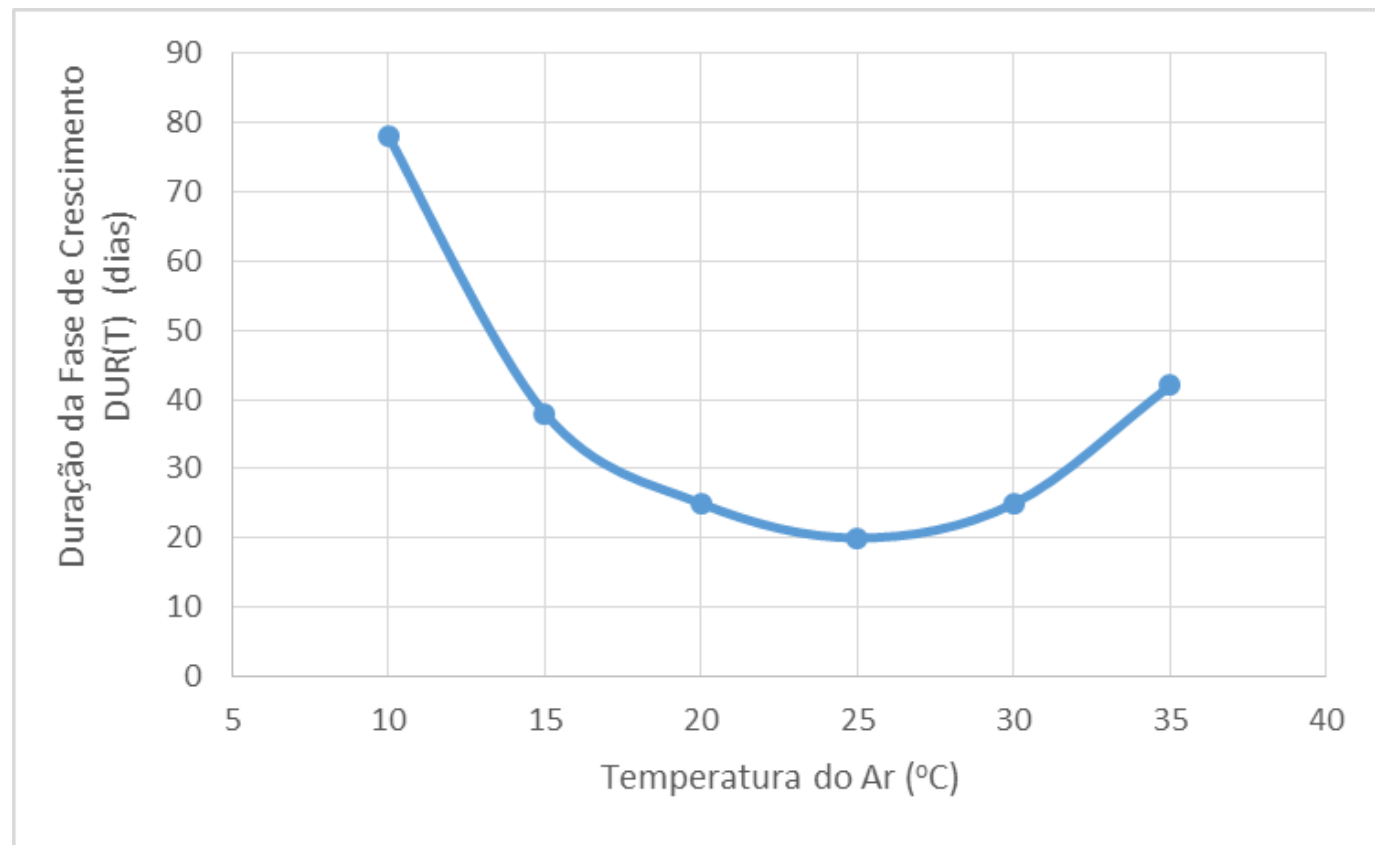
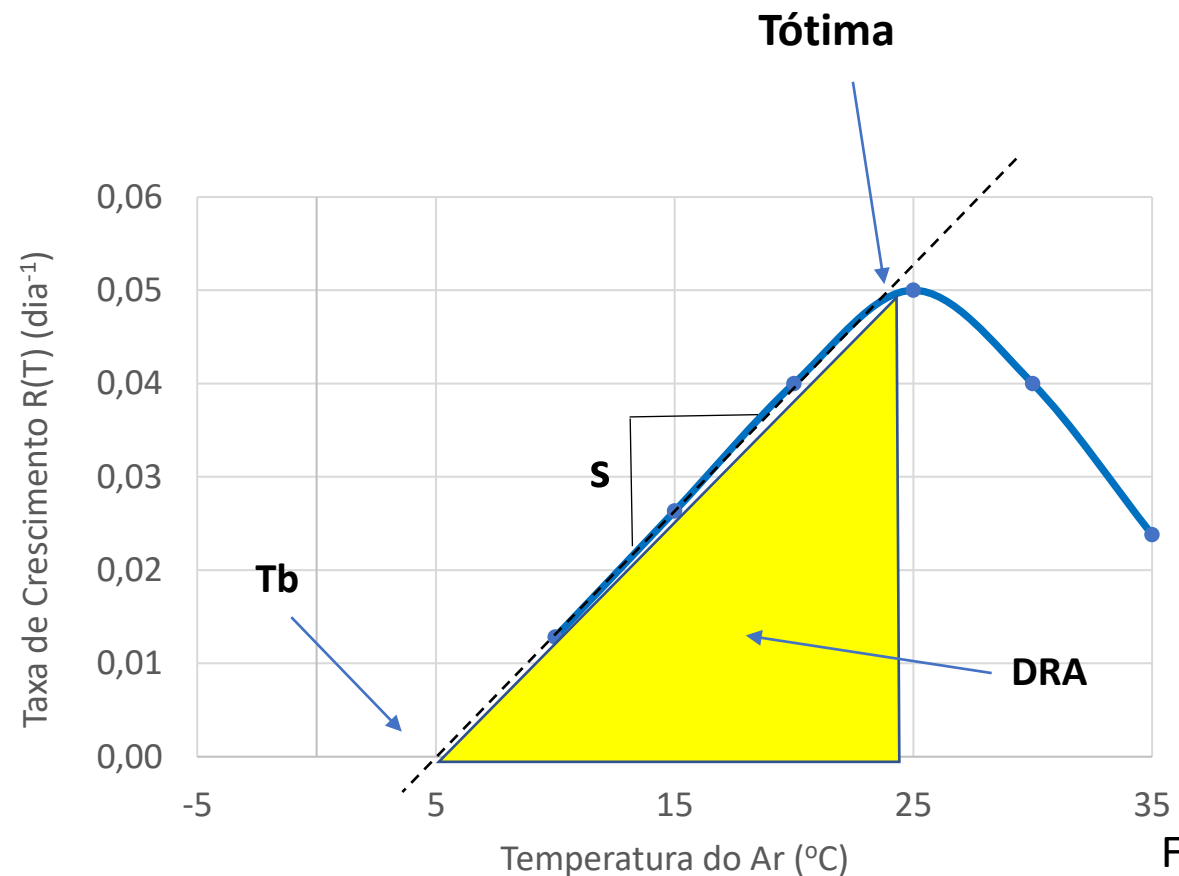


Fig 1

# Conceito de Graus-Dia

- Invertendo-se a duração da fase ( $DUR(T)$ ) obtém-se a taxa de desenvolvimento ( $R(T)$ ) em função da temperatura. A Figura abaixo ilustra uma relação típica de  $R(T)$  em função da temperatura, calculada a partir dos dados da Figura ao lado.



# Conceito de Graus-Dia

Integrando  $R(T)$  ao longo do tempo, pode-se obter o desenvolvimento acumulado de um organismo e, quando o desenvolvimento acumulado é igual a 1 o desenvolvimento está completo. Assumindo-se  $R(T)$  é linear com a temperatura, pode-se escrever

$$R(T) = s(T - T_b)$$

em que  $s$  é o coeficiente angular da linha pontilhada na Figura 2 e  $T_b$  é a intersecção com o eixo x. Note que a unidade de  $s$  é  $\text{dia}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Para temperatura abaixo de  $T_b$  o desenvolvimento acumulado é zero. Lembrando que quando o desenvolvimento relativo acumulado (DRA) é igual a 1, então  $\text{DRA} = \text{Constante térmica (CT)}$  e o evento biológico estará completo. É possível computar DRA em função dessa relação linear da seguinte forma:

$$\text{DRA} = \int_{t(\text{semeadura})}^{t(\text{colheita})} R(T) dt = \int_{t(\text{semeadura})}^{t(\text{colheita})} s(T - T_b) dt$$

# Conceito de graus-dia

Essa equação pode ser simplificada admitindo que  $s$  é constante e DRA é igual a 1 (ou seja 100% do ciclo foi concluído):

$$\frac{1}{s} = \int_{t(\text{semeadura})}^{t(\text{colheita})} (T - T_b) dt$$

Lembrando que  $dT$  pode ser aproximado para  $\Delta t$  numa notação finitesimal, e que quando  $\Delta t=1$  pode-se acumular  $(T-T_b)$  até um somatório térmico ( $1/s$ ). Este somatório ( $=1/s$ ) representa o número de graus-dia necessário para a conclusão de uma dada fase ou mesmo do ciclo de crescimento, sendo também conhecida como **Constante Térmica (CT)**. Para cômputo diário (GD) do número de graus-dias acumulados, pode-se então usar a seguinte expressão:

$$GD = (T - T_b) nd$$

em que  $T$  (maiúsculo) é a temperatura média do período;  $nd$  representa o número de dias do período;  $t$  (minúsculo) é o tempo e  $T$  é a temperatura do ar.



Na Tabela abaixo, temos alguns valores de CT e Tb para algumas culturas.

Lista de  
temperaturas  
basais e  
constantes  
térmicas para  
diversas culturas

| Cultura               | Variedade/Cultivar | Período/Sub-período      | Tb (°C) | CT (°Cd) |
|-----------------------|--------------------|--------------------------|---------|----------|
| <b>Arroz</b>          | IAC4440            | Semeadura-Maturação      | 11,8    | 1985     |
|                       |                    | Semeadura-Emergência     | 18,8    | 70       |
|                       |                    | Emergência-Floração      | 12,8    | 1246     |
|                       |                    | Floração-Maturação       | 12,5    | 402      |
| <b>Abacate</b>        | Raça Antilhana     | Floração-Maturação       | 10,0    | 2800     |
|                       | Raça Guatemalense  | Floração-Maturação       | 10,0    | 3500     |
|                       | Híbridos           | Floração-Maturação       | 10,0    | 4200     |
| <b>Feijão</b>         | Carioca 80         | Emergência-Floração      | 3,0     | 813      |
| <b>Girassol</b>       | Contisol 621       | Semeadura-Maturação      | 4,0     | 1715     |
|                       | IAC-Anhady         | Semeadura-Maturação      | 5,0     | 1740     |
| <b>Milho Irrigado</b> | AG510              | Semeadura-Flor.Masculino | 10,0    | 800      |
|                       | BR201              | Semeadura-Flor.Masculino | 10,0    | 834      |
|                       | BR106              | Semeadura-Flor.Masculino | 10,0    | 851      |
|                       | DINA170            | Semeadura-Flor.Masculino | 10,0    | 884      |
| <b>Soja</b>           | UFV-1              | Semeadura-Maturação      | 14,0    | 1340     |
|                       | Paraná             | Semeadura-Maturação      | 14,0    | 1030     |
|                       | Viçoja             | Semeadura-Maturação      | 14,0    | 1230     |
| <b>Cafeeiro</b>       | Mundo Novo         | Florescimento-Maturação  | 11,0    | 2642     |
| <b>Videira</b>        | Niagara Rosada     | Poda-Maturação           | 10,0    | 1550     |
|                       | Itáli/Rubi         | Poda-Maturação           | 10,0    | 1990     |

# Modelando a fenologia das culturas

- Fenologia pode ser definida como o estudo do progresso dos estágios de desenvolvimento de uma cultura, e como tais estágios são influenciados por fatores ambientais.
- Modelar o desenvolvimento fenológico é prever o momento de ocorrência de diferentes estágios fenológicos da cultura, como a emergência, florescimento ou maturação.



# Modelando a fenologia das culturas

- Background:
  - Definindo as fases fenológicas

**Table 6.1.** Important phenological stages in wheat based on a combination of Feeks (Large, 1954) and Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974) methods.

| Stage   | Definition (observed in 50% of plants)              |
|---|---|
| Emergence (EM)                                    | Appearance of coleoptile (any part) at soil surface |
| Beginning of tillering (TL)                       | First tiller visible                                |
| Stem elongation (SE)                              | First node visible                                  |
| Termination of leaf production on main stem (TLM) | Ligule of flag leaf visible                         |
| Ear emergence (EE)                                | Awns or ear visible from flag leaf sheath           |
| Anthesis (ANT)                                    | Half of anthers opened in spikes                    |
| Physiological maturity (PM)                       | Spike and plant have lost their green color         |
| Harvest maturity (HM)                             | Plant is dry and grains are hard and dry            |

**Table 6.2.** Important phenological stages in soybean based on a Fehr and Caviness (1977) method.

| Stage                    | Definition (observed in 50% of plants)  |
|--------------------------|---|
| Emergence (VE)           | Cotyledons above the soil surface   |
| Beginning flowering (R1) | One open flower at any node on the main stem  |
| Beginning pod (R3)       | Pod 5 mm long at one of the four uppermost nodes on the main stem with a fully developed leaf   |
| Beginning seed (R5)      | Seed 3 mm long in a pod at one of the four uppermost nodes on the main stem with a fully developed leaf   |
| Beginning maturity (R7)  | One normal pod on the main stem that has reached its mature pod color   |
| Full maturity (R8)       | 95% of the pods have reached their mature pod color. (5–10 days of drying weather are required after R8 for the soybean moisture levels to be reduced to less than 15%) |



# Modelando a fenologia das culturas

- Os principais aspectos da modelagem da fenologia de culturas são:
  - A habilidade em se prever o estágio de desenvolvimento é importante para decisões de manejo da cultura, como a aplicação de herbicidas, fertilizantes, pesticidas, planejamento da colheita etc.
  - A predição da duração do ciclo da cultura é necessário para encontrar cultivares com um período de crescimento desejado que permita aos produtores otimizar a produtividade em função de episódios de seca, ondas de calor ou geadas.
  - O aumento da temperatura decorrente da elevação da concentração de CO<sub>2</sub> tornarão necessários ajustes nas respostas fenológicas das culturas.

