



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola  
1º Semestre de 2018 - Prof. Fábio Marin



# EVAPOTRANSPIRAÇÃO

# Evapotranspiração - Definições

## Definições:

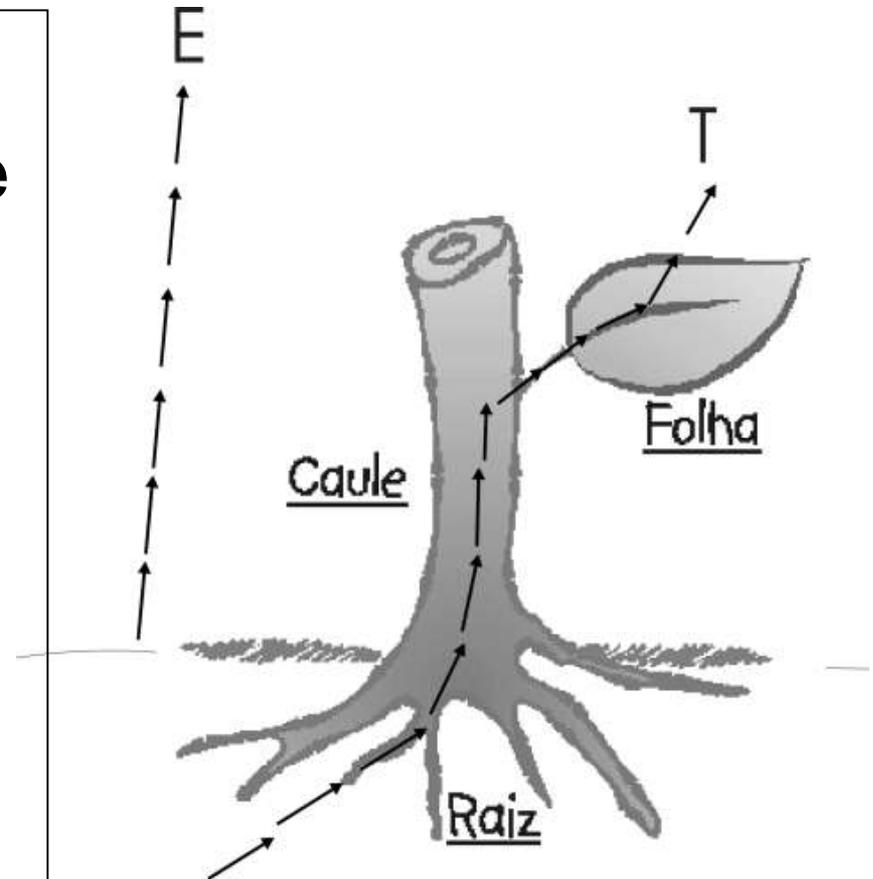
- ✓ **Evaporação (E)** – Processo físico através do qual um líquido passa para o estado de vapor, que ocorre nos oceanos, lagos, rios, solo e vegetação.
- ✓ **Transpiração (T)** – Processo de evaporação que ocorre através da superfície das plantas, especialmente das folhas. Nas folhas, a transpiração ocorre através dos estômatos.
- ✓

# Evapotranspiração - Definições

## Evapotranspiração (ET)

– Processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera através da evaporação (E) e da transpiração (T)

$$ET = E + T$$



# A Força Motriz da

## ET

Diferença de potencial entre os diferentes compartimentos que compõem o percurso da água:  
solo-planta-atmosfera

**Potencial total ( $\Psi$ )** é a soma dos potenciais parciais:

### Potenciais parciais:

Temperatura ( $\Psi_t$ )

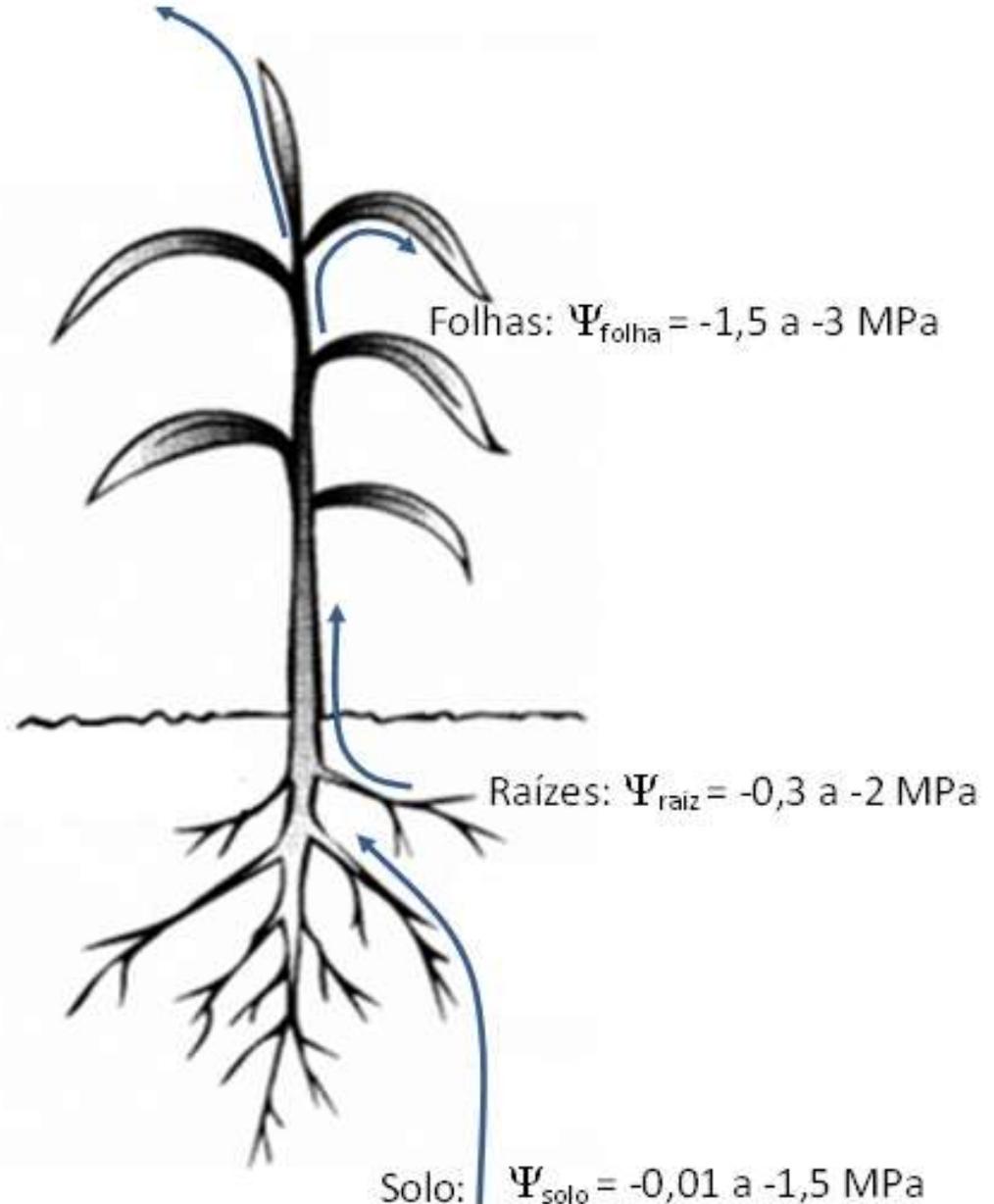
Soluto ( $\Psi_s$ )

Gravitacional ( $\Psi_g$ )

Mátrico ( $\Psi_\tau$ )

Pressão ( $\Psi_p$ )

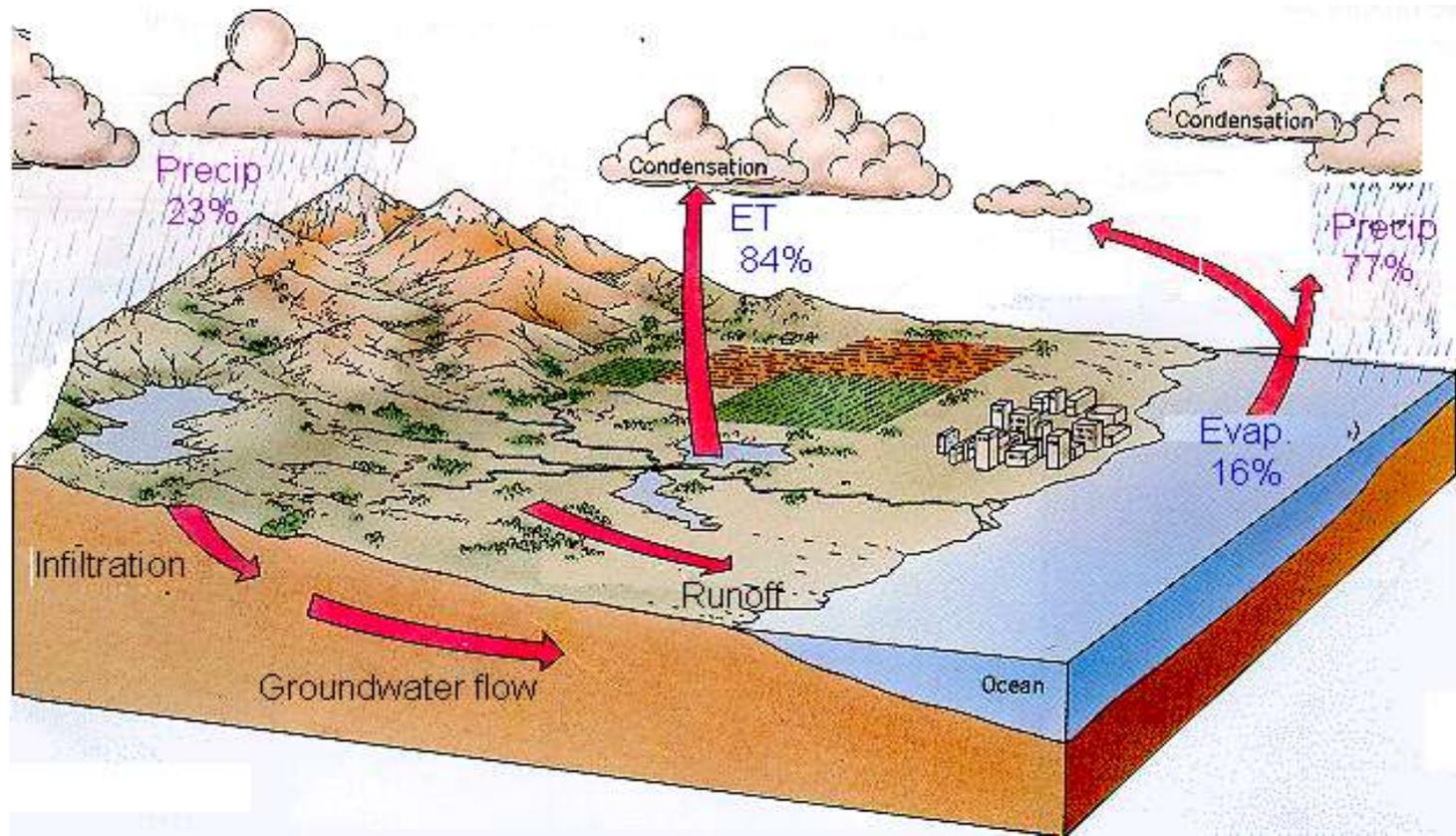
Atmosfera:  $\Psi_{atmosfera} = -50 \text{ MPa}$



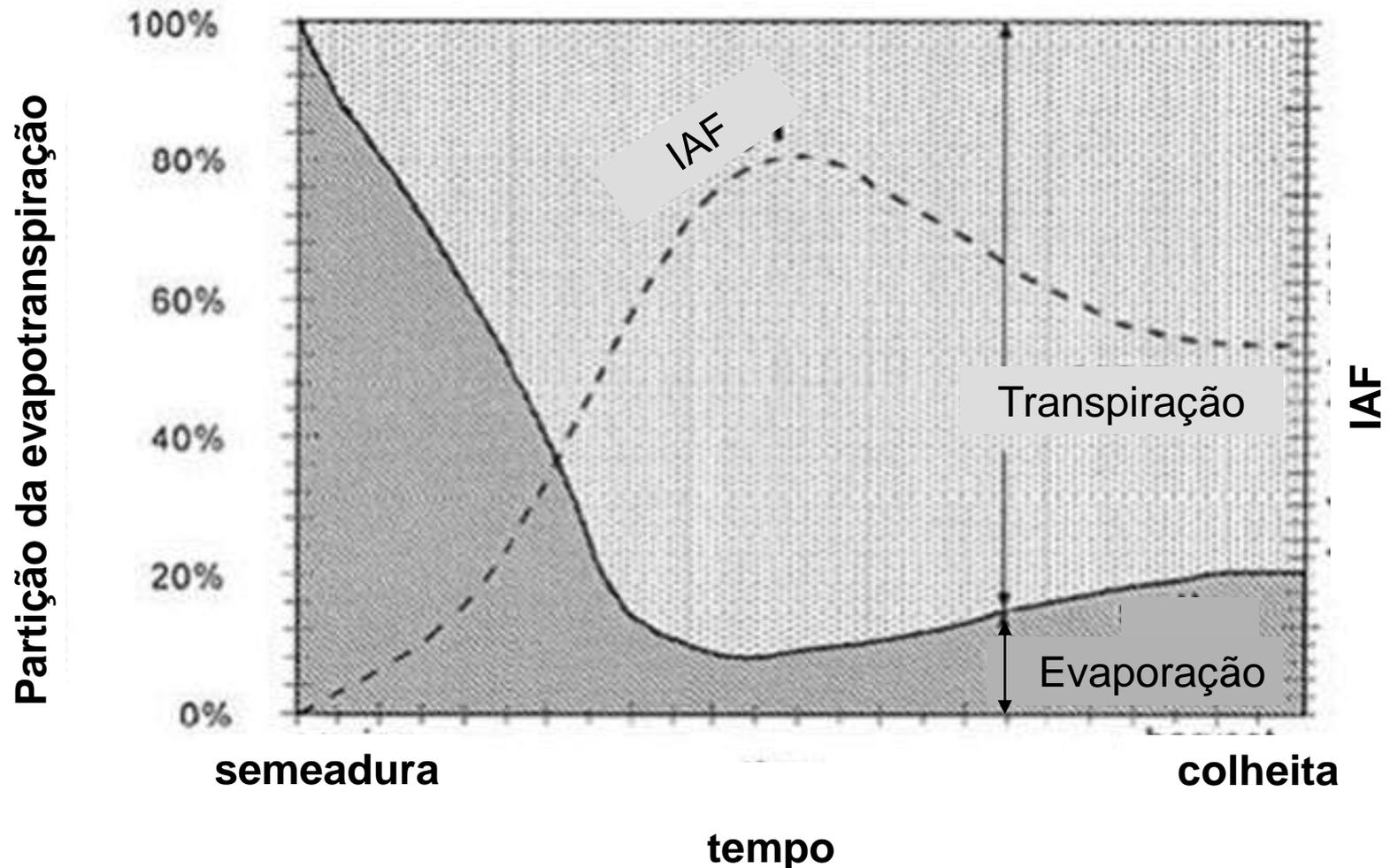
- ✓ **Potencial Térmico** ( $\Psi_T$ ): função da variação do potencial químico da água devido à diferença entre a temperatura do sistema em um determinado estado e a temperatura da água no estado tomado como padrão. Desprezado por considerar-se que os processos são isotérmicos ou quase. Temperatura de referência tomada como a própria temperatura do sistema.
- ✓ **Potencial de Solutos** ( $\Psi_s$ ): representa o efeito dos solutos dissolvidos sobre o potencial hídrico. As moléculas dipolares da água são atraídas e retidas pelos solutos (cátions e ânions), induzindo um decréscimo na atividade da água. Assim, o potencial osmótico tem quase sempre valor negativo.  $\Psi_s$  é zero quando a água é pura.
- ✓ **Potencial de Pressão** ( $\Psi_p$ ): quando a pressão for positiva há aumento do  $\Psi$ . Pressão positiva dentro da célula equivale ao potencial de turgescência. O  $\Psi_p$  pode ser também igual a zero, como nas células em estado de plasmólise incipiente.
- ✓ **Potencial Mátrico** ( $\Psi_m$ ): define as influências que as forças superficiais e espaços (colóides, proteínas, macromoléculas, etc.) presentes nas células e espaços intercelulares. O  $\Psi_m$  é, em geral, negativo, podendo ser zero em sistemas isentos de partículas coloidais.
- ✓ **Gravidade** – O  $\Psi_g$  representa o potencial gravitacional e expressa a ação do campo gravitacional sobre a energia livre da água. Ele é definido como o trabalho necessário para manter a água suspensa em determinado ponto em relação a atração da gravidade.

# Evapotranspiração

é parte importante do ciclo hidrológico e representa a água que retorna à atmosfera na forma de vapor



# Partição da evapotranspiração em culturas agrícolas



# Conceitos Evapotranspiração

## **Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) –**

Lâmina que seria utilizada por uma superfície coberta por vegetação hipotética, com altura de 8-15cm, albedo de 23%, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem restrição de água.

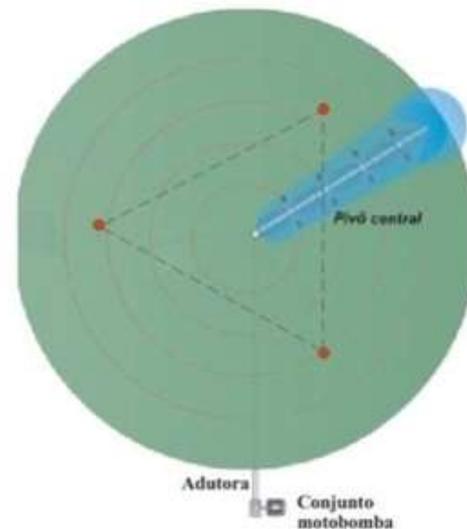
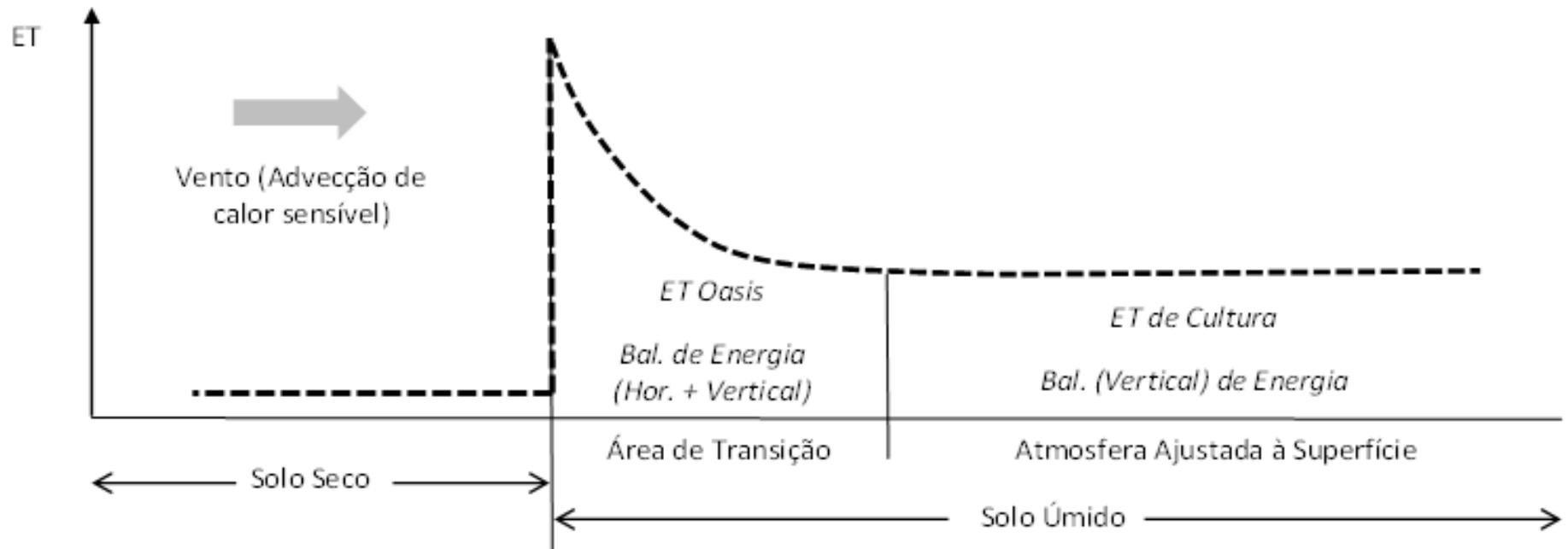
**(ET<sub>o</sub>)** - função de variáveis meteorológicas (radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, etc.). Desse modo, é também uma variável meteorológica.

# Evapotranspiração - Definições

**Evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>)** – quantidade de água efetivamente utilizada por uma superfície vegetada.

$$E_{To} \geq E_{Tr}$$

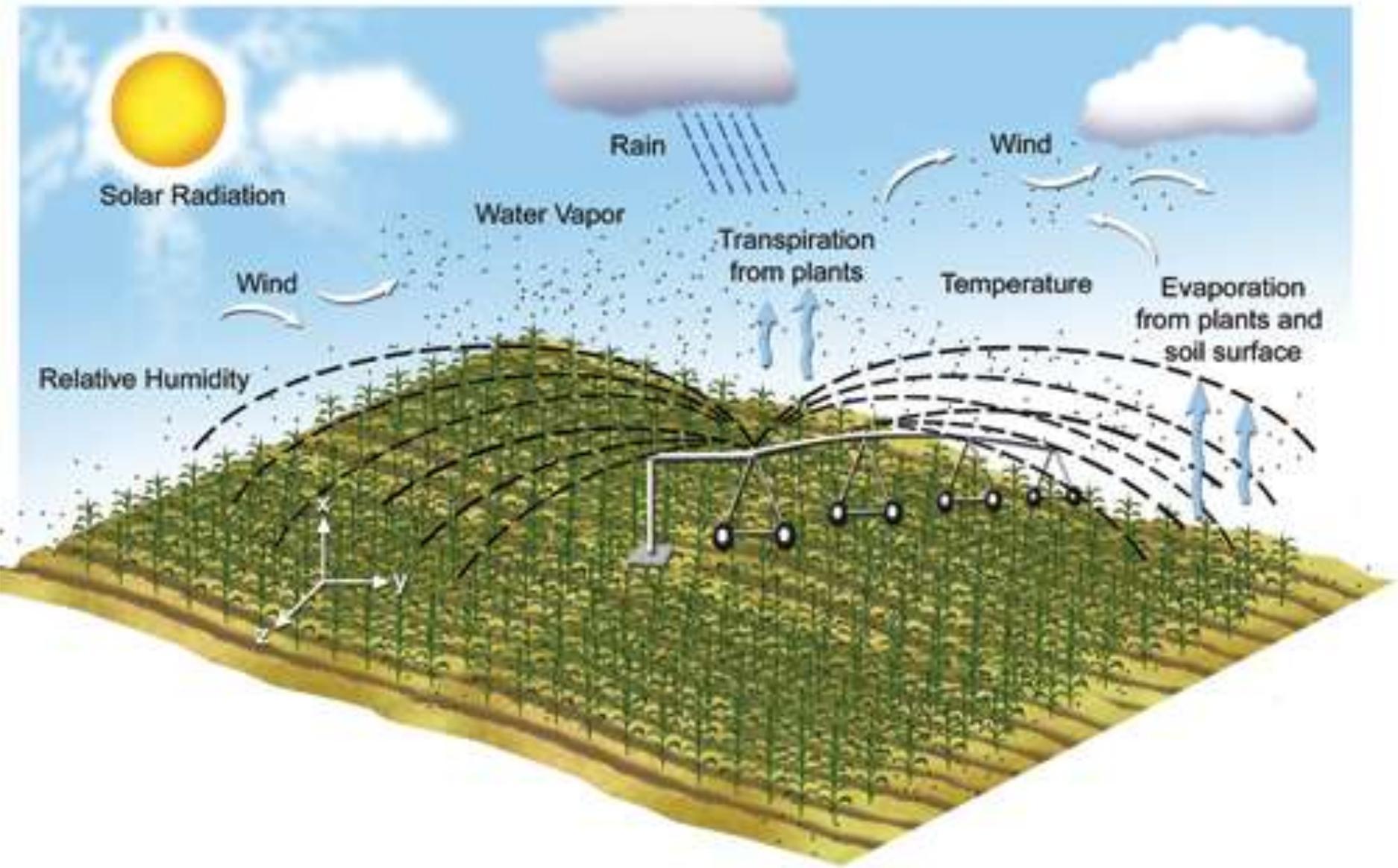
# Evapotranspiração de Oasis



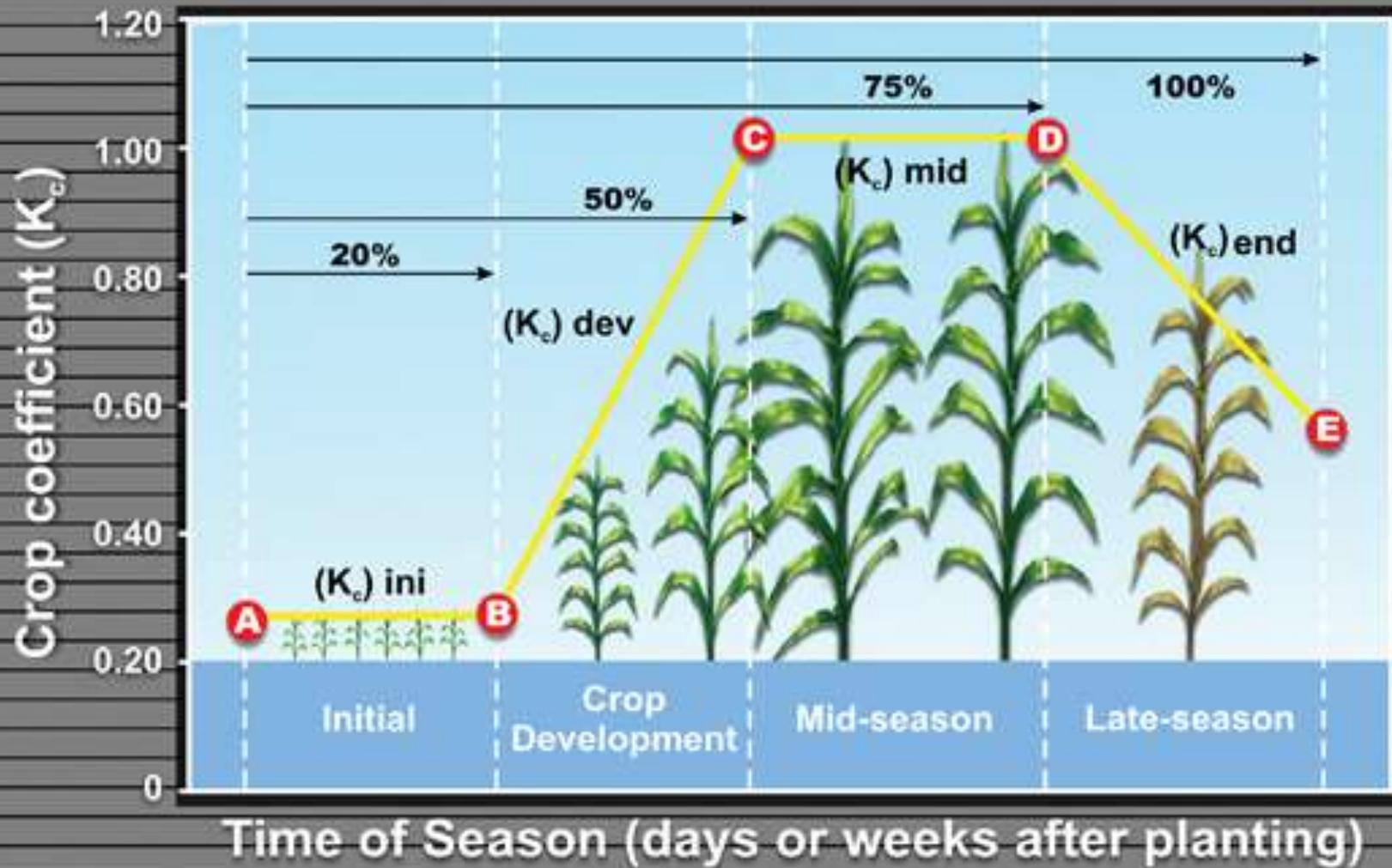
# Evapotranspiração - Definições

**Evapotranspiração de cultivo (ET<sub>c</sub>)** – é a evapotranspiração de uma cultura em dada fase de seu desenvolvimento, sem restrição hídrica, em condições ótimas de crescimento e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes. Assim ET<sub>c</sub> depende das condições meteorológicas, expressas por meio da ETP (ou ET<sub>o</sub>), do tipo de cultura (maior ou menor resistência à seca) e da área foliar. Como a área foliar da cultura padrão é constante e a da cultura real varia, o valor de K<sub>c</sub> também irá variar.

$$ET_c = K_c * ETP$$



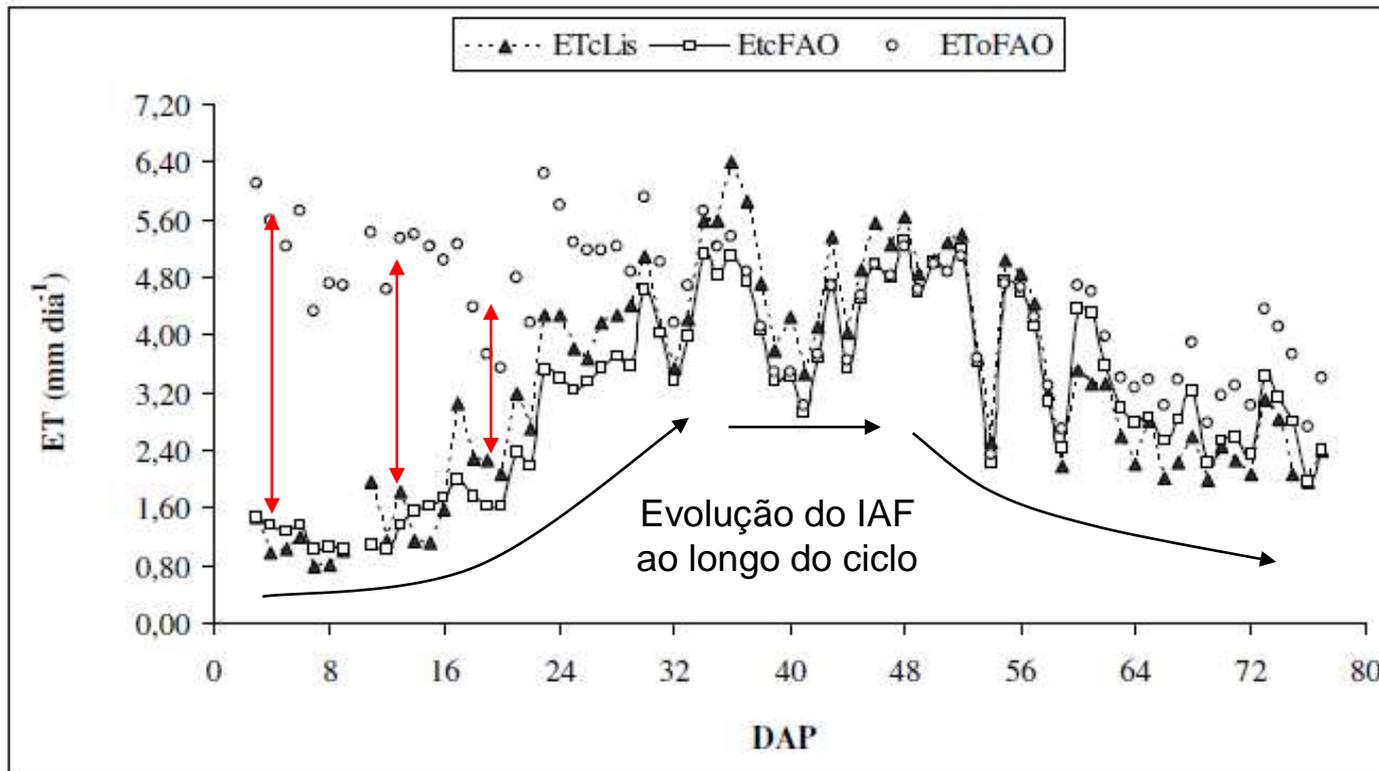
**Evapotranspiração e os fatores que impactam nos processos (evaporação e transpiração) em uma área irrigada por pivô central.**



**ETcLis** – Evapotranspiração da cultura medida

**ETcFAO** – Evapotranspiração da cultura estimada ( $ETc = Kc \times ETo$ )

**EToFAO** – Evapotranspiração de referência



Fonte: FIGUEIRÊDO et al., 2009

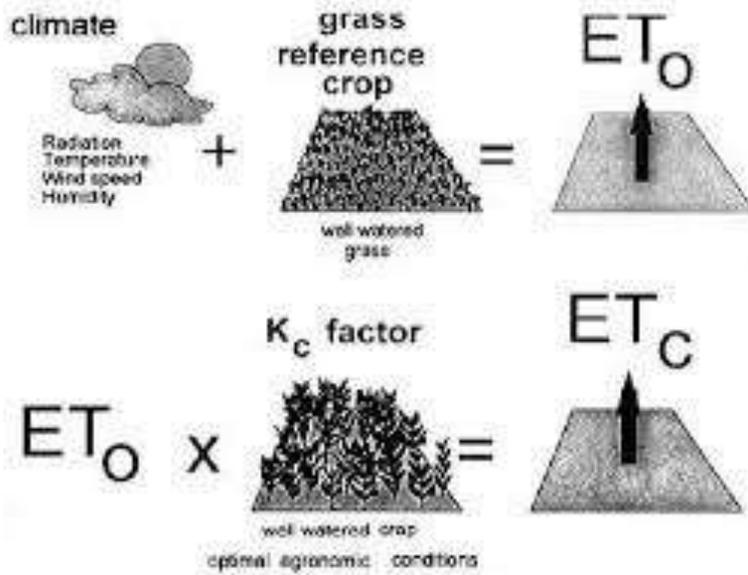
Observe a ascensão de ETc ao longo do ciclo acompanhando o IAF da cultura

# Coeficiente de Cultivo

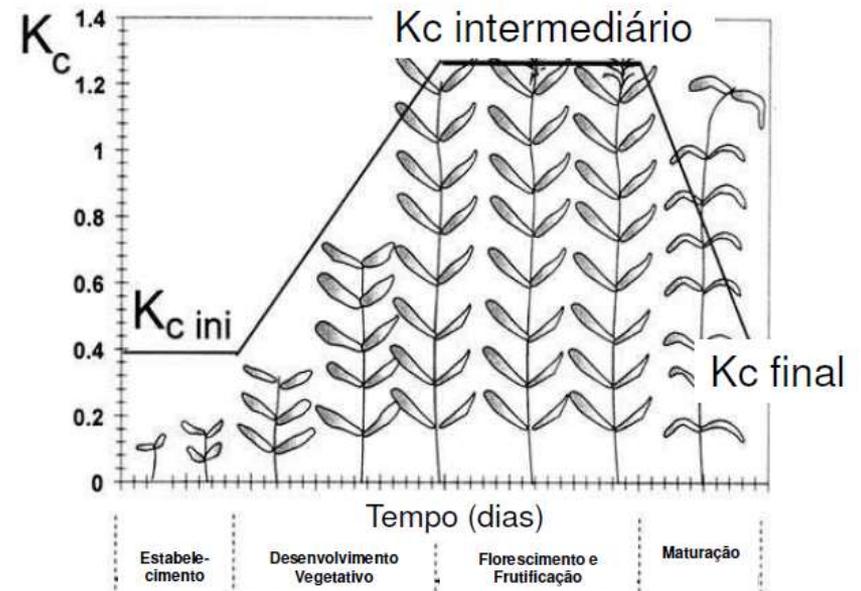
<b>Cultura</b>	<b>Kc Inicial</b>	<b>Kc Interm.</b>	<b>Kc Final</b>
Cevada	0.30	1.15	0.25
grão de bico	0.40	1.00	0.35
algodão	0.35	1.15-1.20	0.70-0.50
Milho	0.30	1.20	0.35
Amendoim	0.40	1.15	0.60
Sorgo	0.30	1.00-1.10	0.55
Amendoim	0.40	1.15	0.50
Girassol	0.35	1.15	0.35
Trigo	0.30	1.15	0.25

# Resumo

## ET<sub>o</sub> e ET<sub>c</sub>



## K<sub>c</sub>



# Fatores Determinantes

- Climáticos

- Saldo de Radiação
- Temperatura
- Umidade do Ar
- Vento

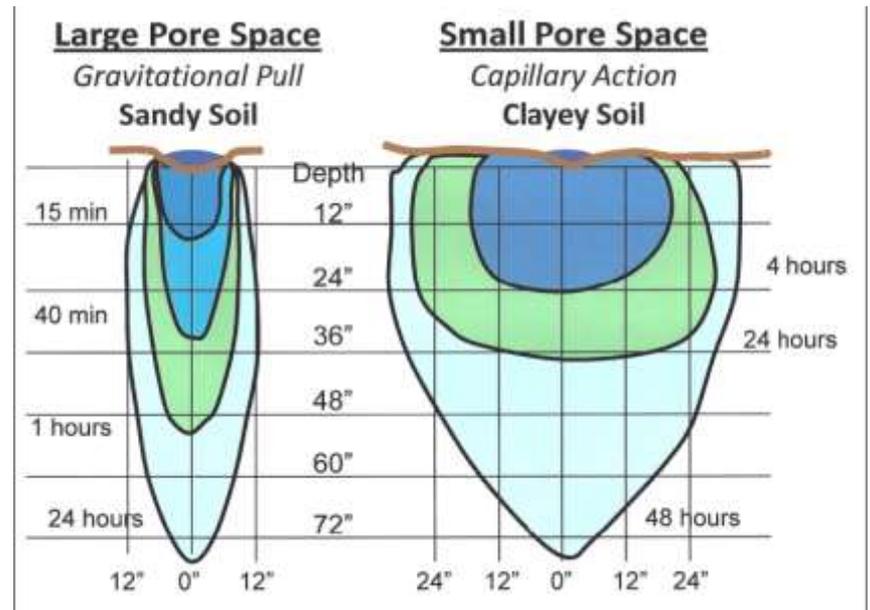
- Planta

- Espécie
- Coeficiente de Reflexão
- Estádio de Desenvolvimento
- Altura da Planta
- Prof. Sistema Radicular

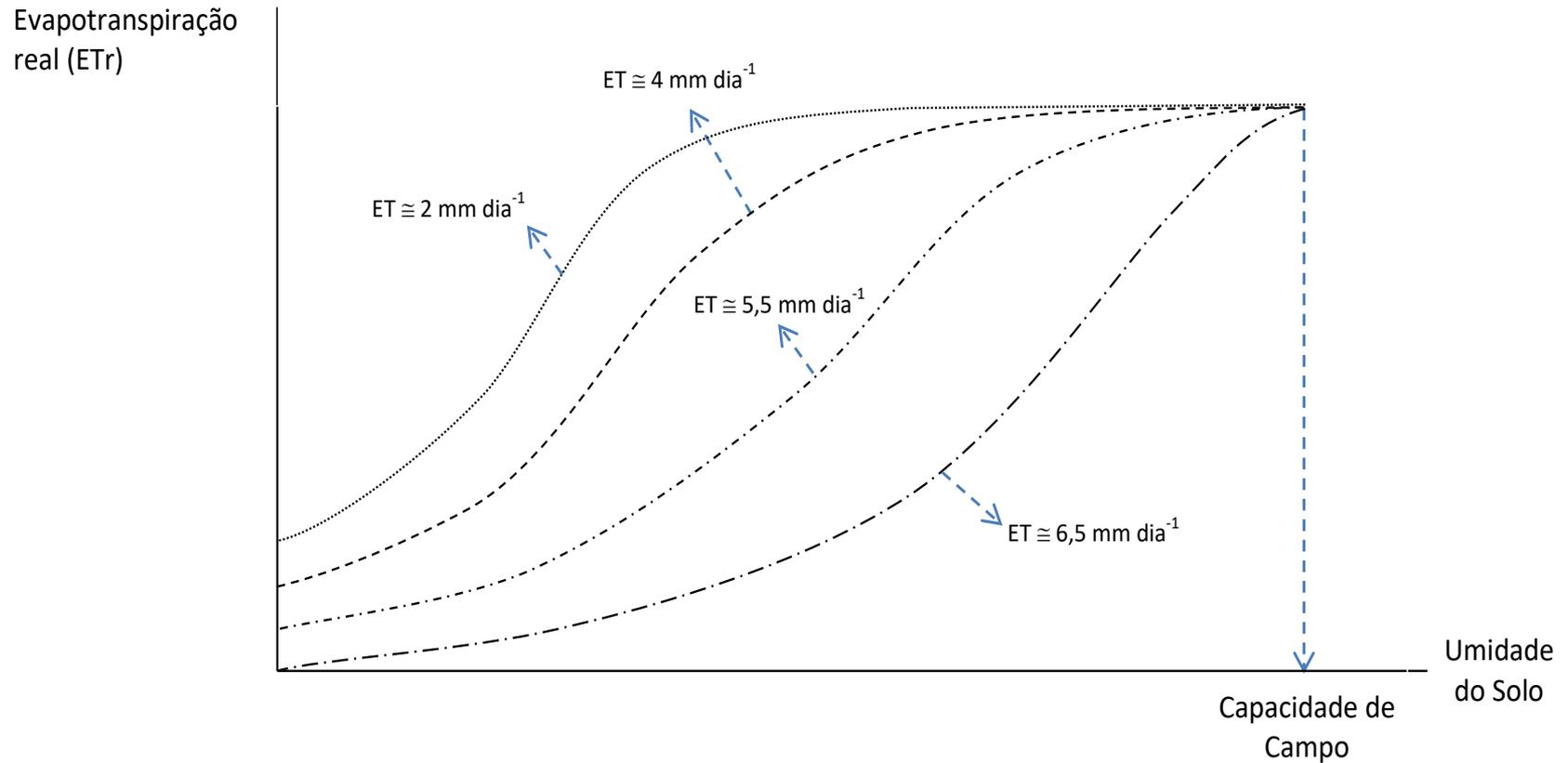


# Fatores Determinantes

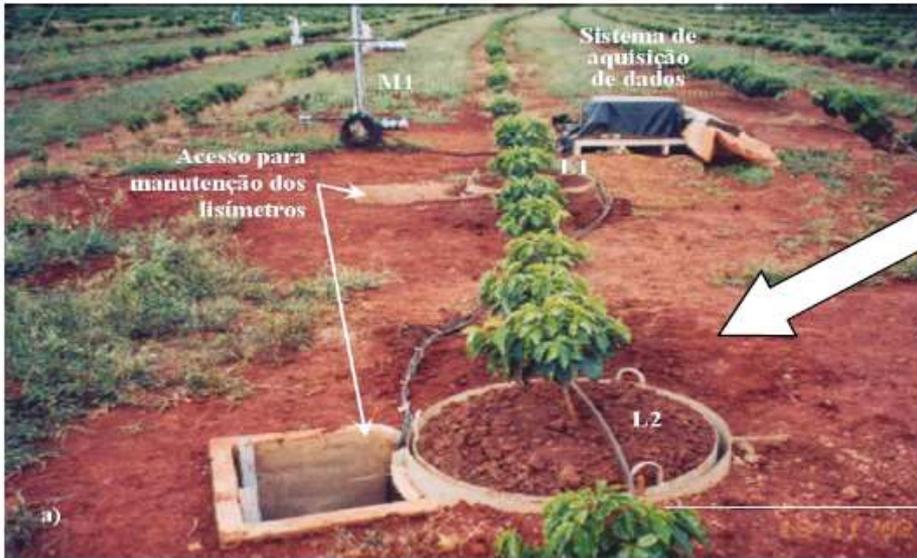
- Manejo e Solo
  - Espaçamento e Densidade de Plantio
  - Orientação do Plantio
  - Capacidade de Armazenamento do Solo
  - Impedimento Físicos/Químicos



# Inter-relação Demanda Atmosférica – Suprimento de Água no Solo



# Medida da Evapo(transpi)ração



Lisímetro de pesagem para a medida da ET do cafeeiro

Lisímetro de pesagem – sistema de medida com células de carga.



# Medida da Evapo(transpi)ração



Medida da ETc com o Sistema de Razão de Bowen em Citros



Medida da ETc com o Sistema de Razão de Bowen em Cafezal



Medida da ET com o Sistema da Correlação de Turbilhões em Floresta

# Estimativa de ETo

## Método de Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot s \cdot (SR - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot DPV}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

em que SR é o saldo de radiação ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), G é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); DPV é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa);  $\Delta$  é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ); T é a temperatura média diária ( $^\circ\text{C}$ );  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $u_2$  é a velocidade do vento ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) medida a 2m da superfície do solo.  $ET_o$  é dado em  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$

# Estimativa de ETo

## Método de Penman-Monteith

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \longrightarrow$$

Z é a altitude em metros, P é a pressão atmosférica em kPa

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \longrightarrow$$

P é a pressão atmosférica em kPa;  $\gamma$  é a constante psicrométrica kPa/°C

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \longrightarrow$$

$\Delta$  é a tangente à curva de saturação de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>], e T é a temperatura do ar [°C],

# Exercício

Exercício: Calcule a ETo com o método de Penman-Monteith para os dois dias abaixo descritos:

Data	NDA	Temp. Med (°C)	UR Med (%)	Vel. Vento (u2) (m/s)	Saldo de Rad.(SR) (MJ/m2.d)	Fluxo de Calor no solo (G) (MJ/m2.d)
10/01/2015	10	29.9	82.6	0.6	15.7	0.3
14/05/2015	135	20.1	92.1	0.7	6.3	0.2

# Estimativa de ETo

## Método de Camargo com temperatura efetiva (Tef)

$$ETo = 0,01 * Qo * Tef * ND$$

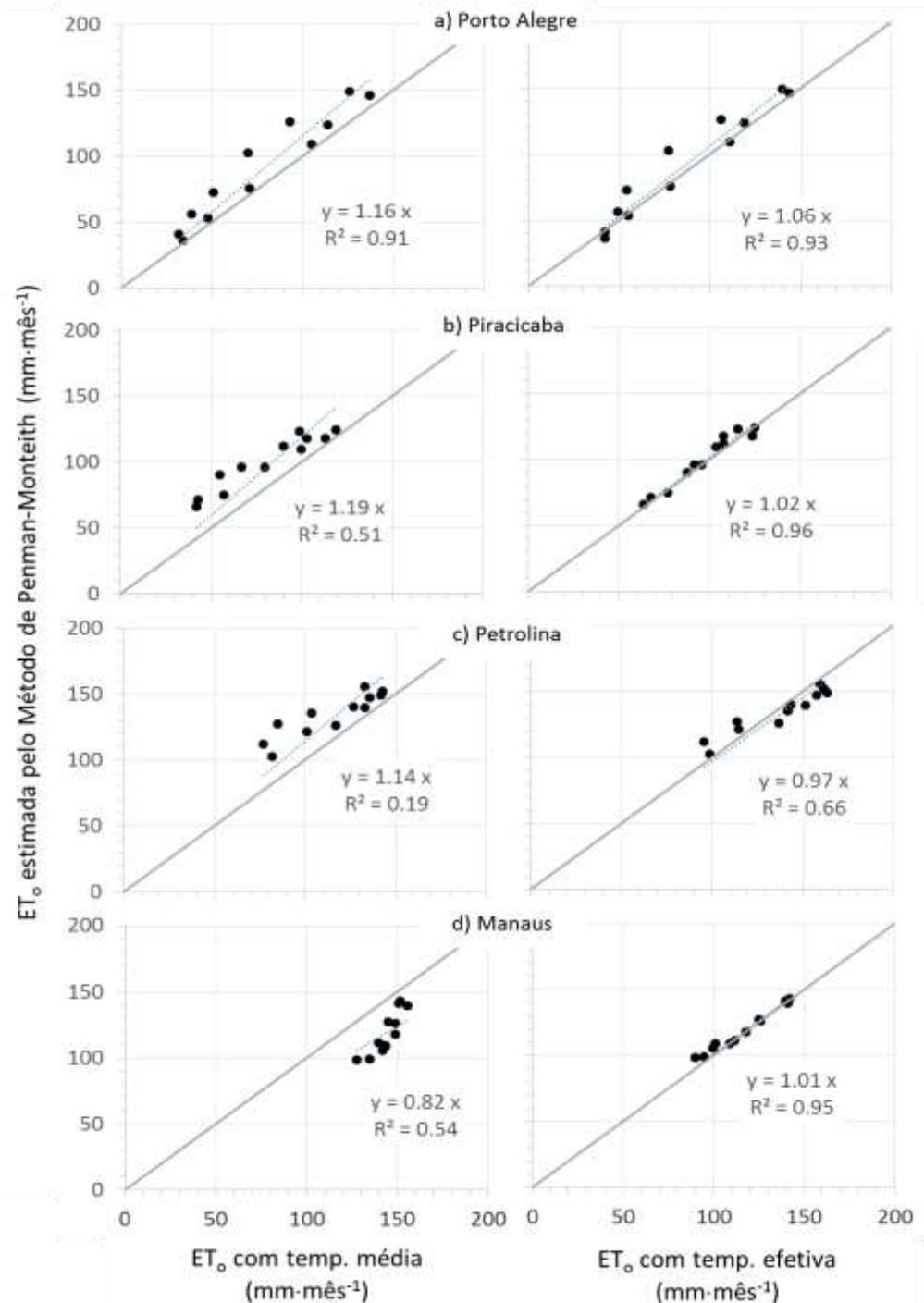
Qo é a Radiação Solar Extra-Terrestre, convertida em mm/dia

Tef é a Temperatura efetiva do ar em °C

$$Tef = 0,36*(3*Tmax-Tmin)$$

ND é o Número de dias do período considerado

# Desempenho do Método de Camargo



CAMARGO, AP; MARIN, FR; SENTELHAS, PC; PICINI, AG Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 7(2), 251-257, 1999.

# Estimativa de ETo

## Método do Tanque Classe A

$$ETo = Kp.ECA$$

TABELA 12.4 Coeficiente para Tanque Classe A (Kp), para diferentes bordaduras de vegetação baixa ao redor do tanque, e níveis de umidade relativa e velocidade do vento em 24 horas. Fonte: Doorenbos & Kassam (1994).

Vento (km/dia)	Bordadura (m)	Umidade Relativa do Ar		
		< 40%	40% a 70%	> 70%
	1	0,55	0,65	0,75
Leve	10	0,65	0,75	0,85
< 175	100	0,70	0,80	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85
	1	0,50	0,60	0,65
Moderado	10	0,60	0,70	0,75
175 a 425	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80
	1	0,45	0,50	0,60
Forte	10	0,55	0,60	0,65
425 a 700	100	0,60	0,65	0,70
	1000	0,65	0,70	0,75
	1	0,40	0,45	0,50
Muito Forte	10	0,45	0,55	0,60
> 700	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,55	0,60	0,65

Para facilitar a interpolação dos valores de Kp na Tabela 12.4 e a determinação da ETP em sistemas informatizados, Snyder (1992) obteve a seguinte equação de regressão linear múltipla:

$$Kp = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376 U + 0,0045 UR \quad (12.16)$$

em que: B é a bordadura (em metros); U a velocidade do vento (km d<sup>-1</sup>); e UR a umidade relativa média diária, em %.

# Estimativa de ETo

## Método de Thornthwaite (1948)

$$ETo = 16 * (10 * Tn / I)^a$$

Tn = temperatura média do mês n (°C);

I = índice de calor

$$I = \sum_{N=1}^{12} (0,2 * Tn)^{1,514}$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,791 * 10^{-2} * I + 0,492$$

# Método de estimativa da ETo

Disponibilidade de dados climáticos: somente será possível o uso de determinado método se houverem dados disponíveis para tal.

Escala de tempo: deve-se considerar a escala de tempo a ser utilizada. Para escalas mensais, as equações empíricas apresentam resultados tão satisfatórios como as equações de base física.

Condição climática do local: certos métodos somente se aplicam a certas condições climáticas, apresentando grandes distorções nos ambientes para os quais eles não foram desenvolvidos. Ex: o método de Thornthwaite subestima ETP em climas secos e H&S superestima ETP em climas úmidos.

# Exercício

- a) Calcule a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), em Piracicaba, acumulada em cada decêndio, pelo método de Camargo com Temperatura Efetiva, entre novembro de 2014 e abril de 2015.
- b) A partir dos coeficientes de cultura para milho, determine a evapotranspiração da cultura, simulando uma semeadura em 15 de novembro (ciclo total de 120 dias para colheita). Qual foi a ET<sub>c</sub> acumulada? Consulte <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm#TopOfPage> para encontrar valores de K<sub>c</sub>.

Mês	Decêndio	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	Q <sub>o</sub> (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	ET <sub>o</sub>	k <sub>c</sub>	ET <sub>c</sub>
NOV	1	30,4	17,8	40,8			
NOV	2	32,8	18,4	41,6			
NOV	3	31,5	20,3	42,1			
DEZ	1	33,6	20,9	42,5			
DEZ	2	31,9	18,5	42,7			
DEZ	3	33,1	21,7	42,8			
JAN	1	35,7	21,2	42,6			
JAN	2	33,2	20,1	42,3			
JAN	3	34,3	20,4	41,8			
FEV	1	36,3	21,0	41,1			
FEV	2	31,5	20,0	40,1			
FEV	3	32,3	19,9	38,9			
MAR	1	31,7	19,5	37,4			
MAR	2	32,9	19,8	35,8			
MAR	3	30,7	18,3	34,0			
ABR	1	32,3	17,7	32,1			
ABR	2	29,8	18,2	30,2			
ABR	3	26,4	15,0	28,3			