

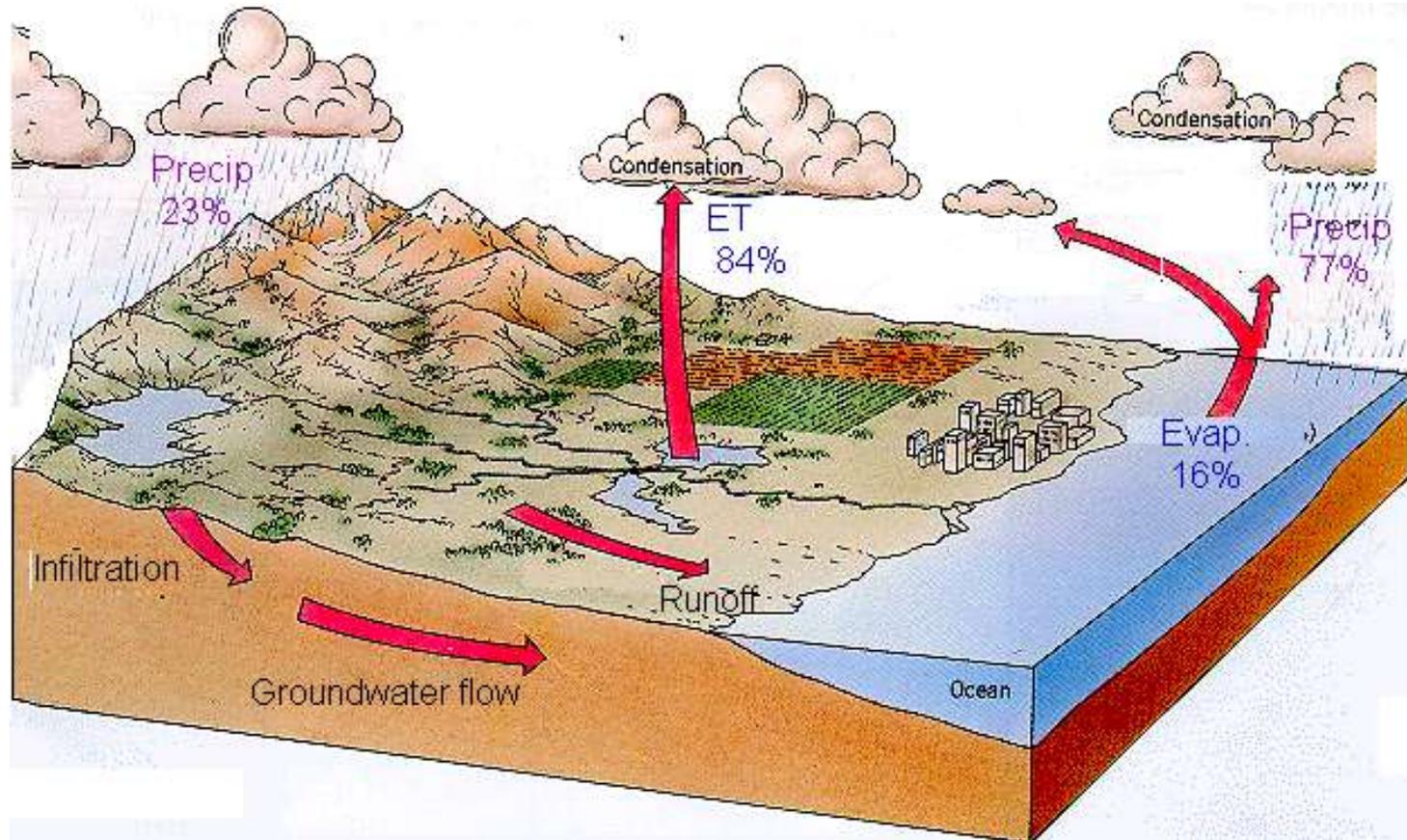


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS
LEB 5036 – Micrometeorologia de Sistemas Agrícolas
Prof. Fábio Marin

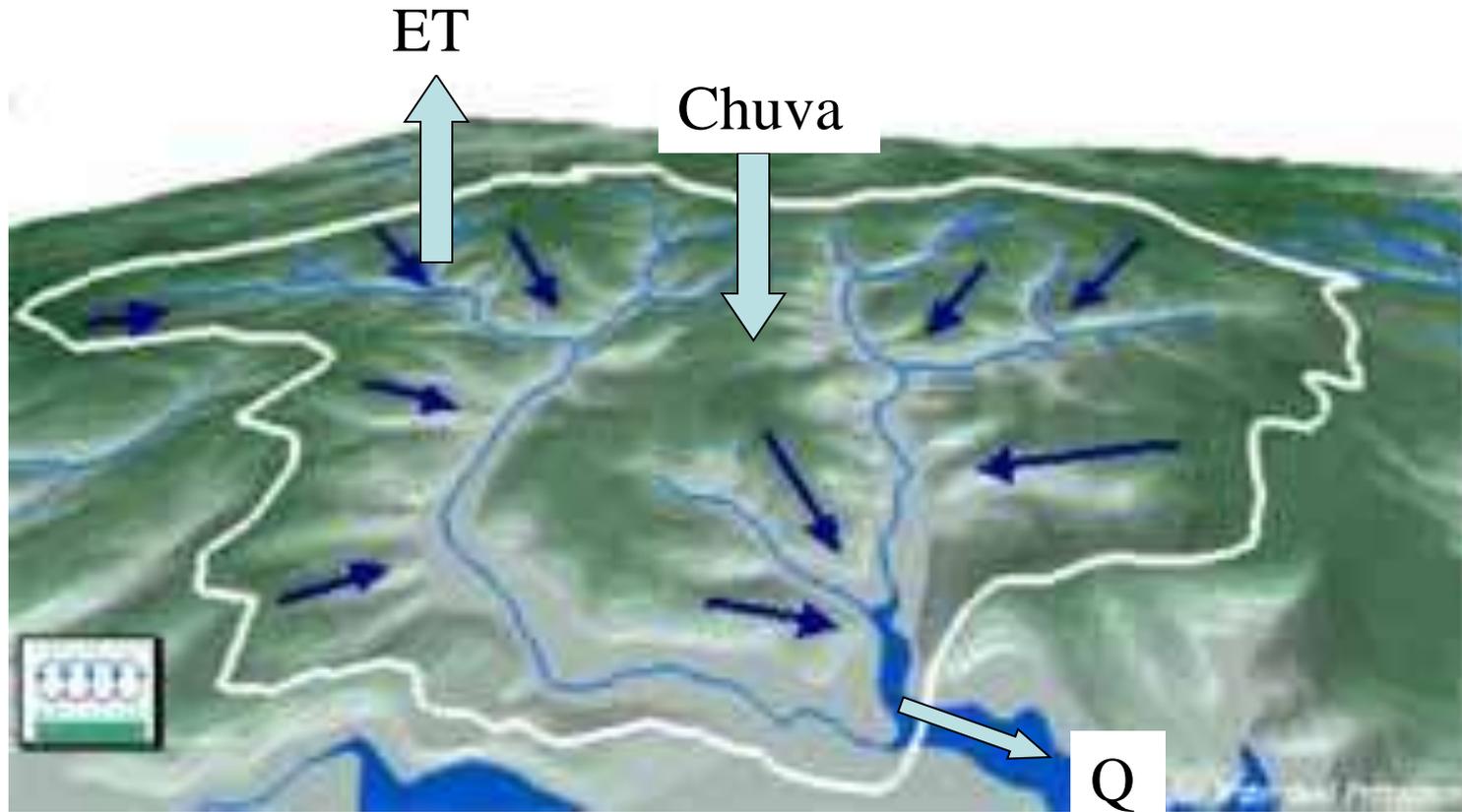


EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Evapotranspiração - o ciclo hidrológico



Evapotranspiração - o ciclo hidrológico



Evapotranspiração - Definições

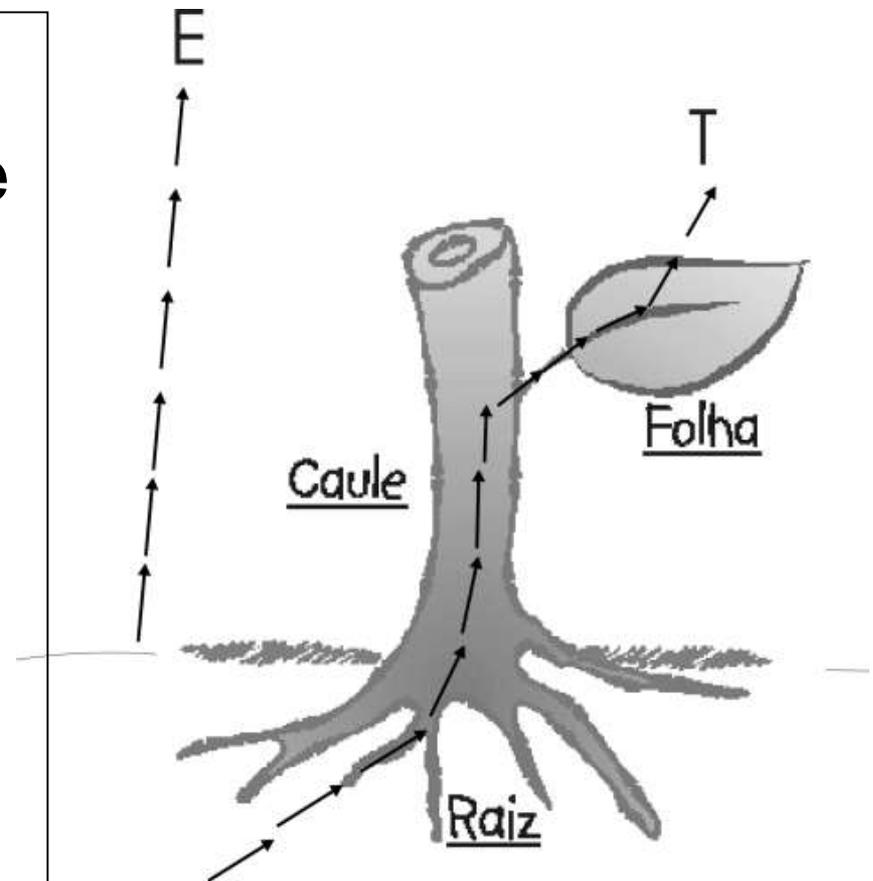
- ✓ **Evaporação (E)** – Processo físico através do qual um líquido passa para o estado de vapor, que ocorre nos oceanos, lagos, rios, solo e vegetação.
- ✓ **Transpiração (T)** – Processo de evaporação que ocorre através da superfície das plantas, especialmente das folhas. Nas folhas, a transpiração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

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

Potencial total (Ψ) é a soma dos potenciais parciais:

Potenciais parciais:

Temperatura (Ψ_t)

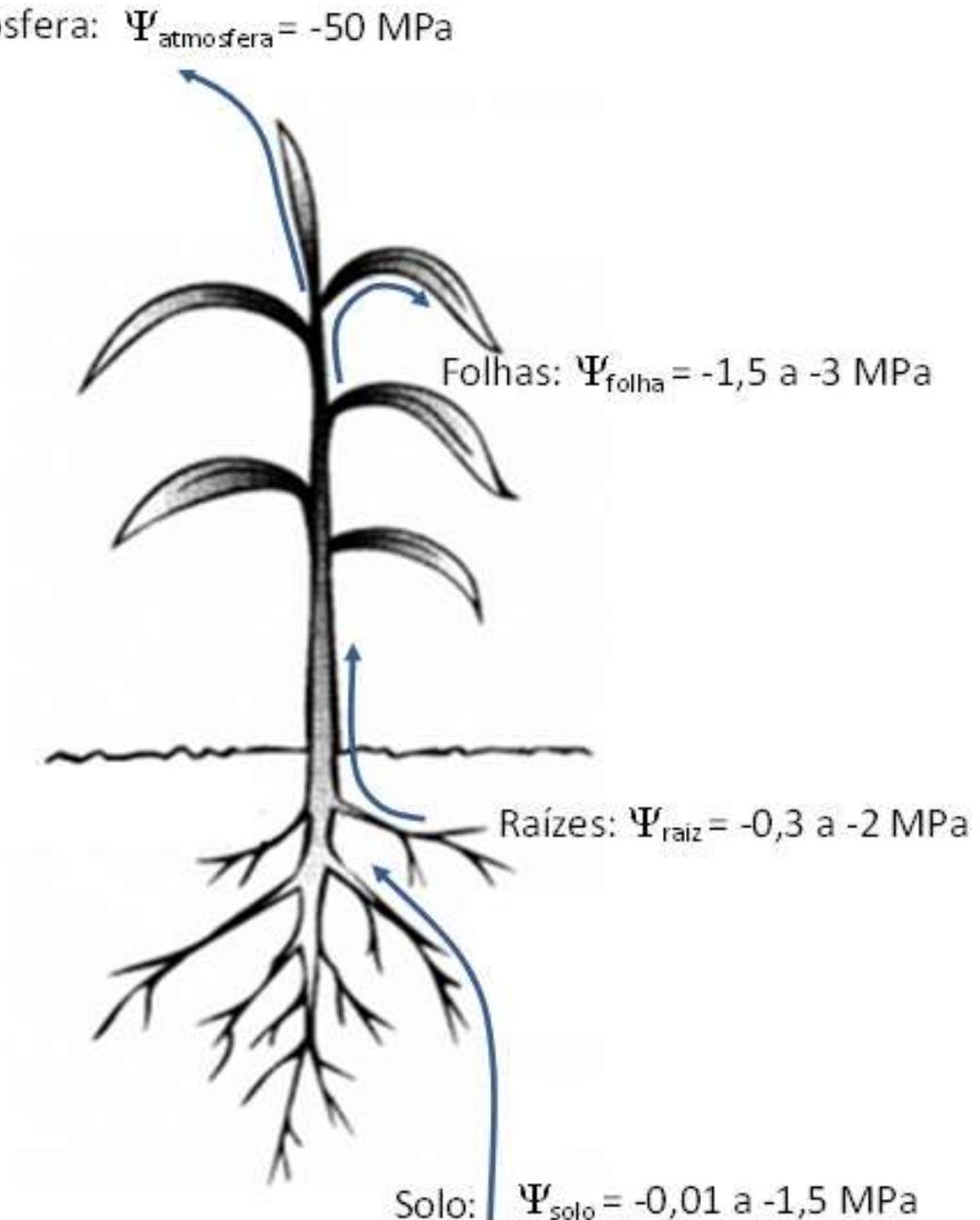
Soluto (Ψ_s)

Gravitacional (Ψ_g)

Mátrico (Ψ_τ)

Pressão (Ψ_p)

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



- ✓ **Potencial Térmico** (Ψ_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** (Ψ_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. Ψ_s é zero quando a água é pura.
- ✓ **Potencial de Pressão** (Ψ_p): quando a pressão for positiva há aumento do Ψ . Pressão positiva dentro da célula equivale ao potencial de turgescência. O Ψ_p pode ser também igual a zero, como nas células em estado de plasmólise incipiente.
- ✓ **Potencial Mátrico** (Ψ_m): define as influências que as forças superficiais e espaços (colóides, proteínas, macromoléculas, etc.) presentes nas células e espaços intercelulares. O Ψ_m é, em geral, negativo, podendo ser zero em sistemas isentos de partículas coloidais.
- ✓ **Gravidade** – O Ψ_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 - Definições

Evapotranspiração de Referência (ET_o) –

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.

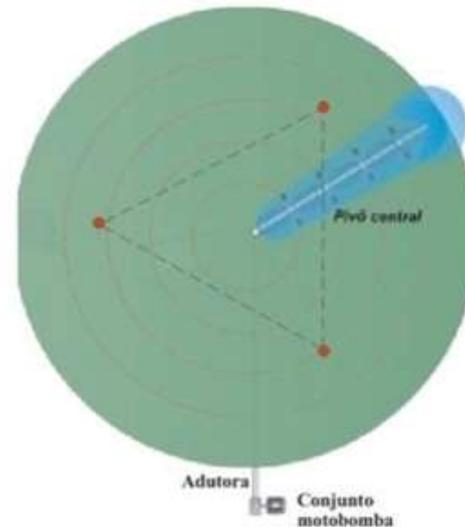
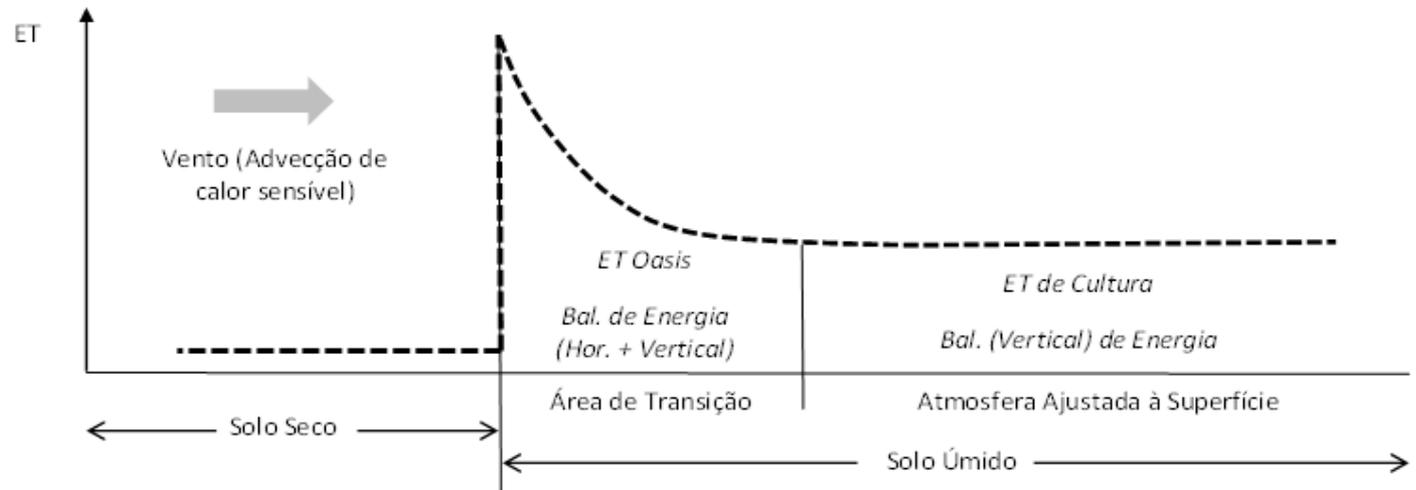
(ET_o) - função de variáveis meteorológicas (radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, etc.). Desse modo, é também uma variável meteorológica.

Evapotranspiração - Definições

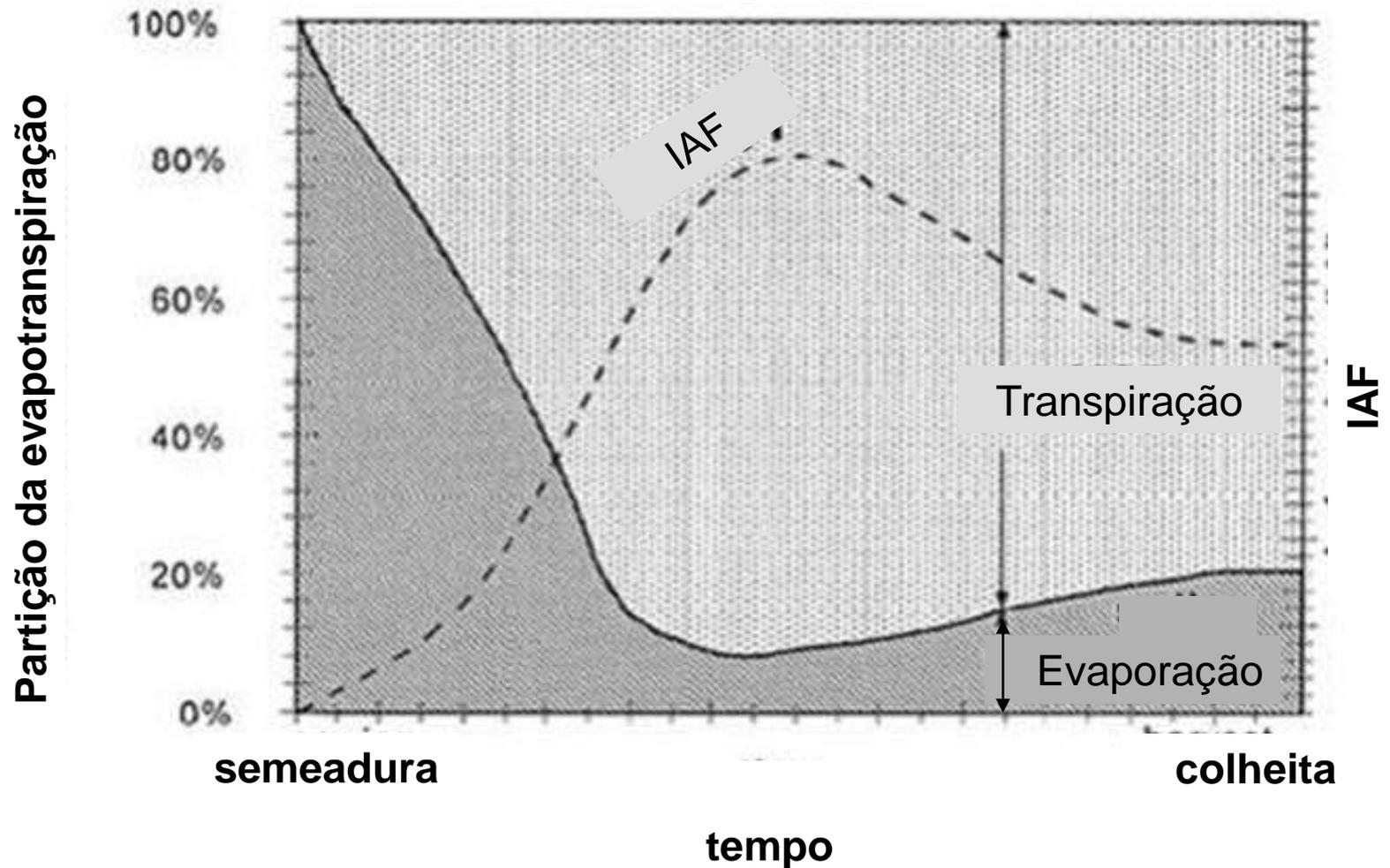
Evapotranspiração real (ET_r) – quantidade de água efetivamente utilizada por uma superfície vegetada.

$$ET_o \geq ET_r$$

Evapotranspiração de Oasis



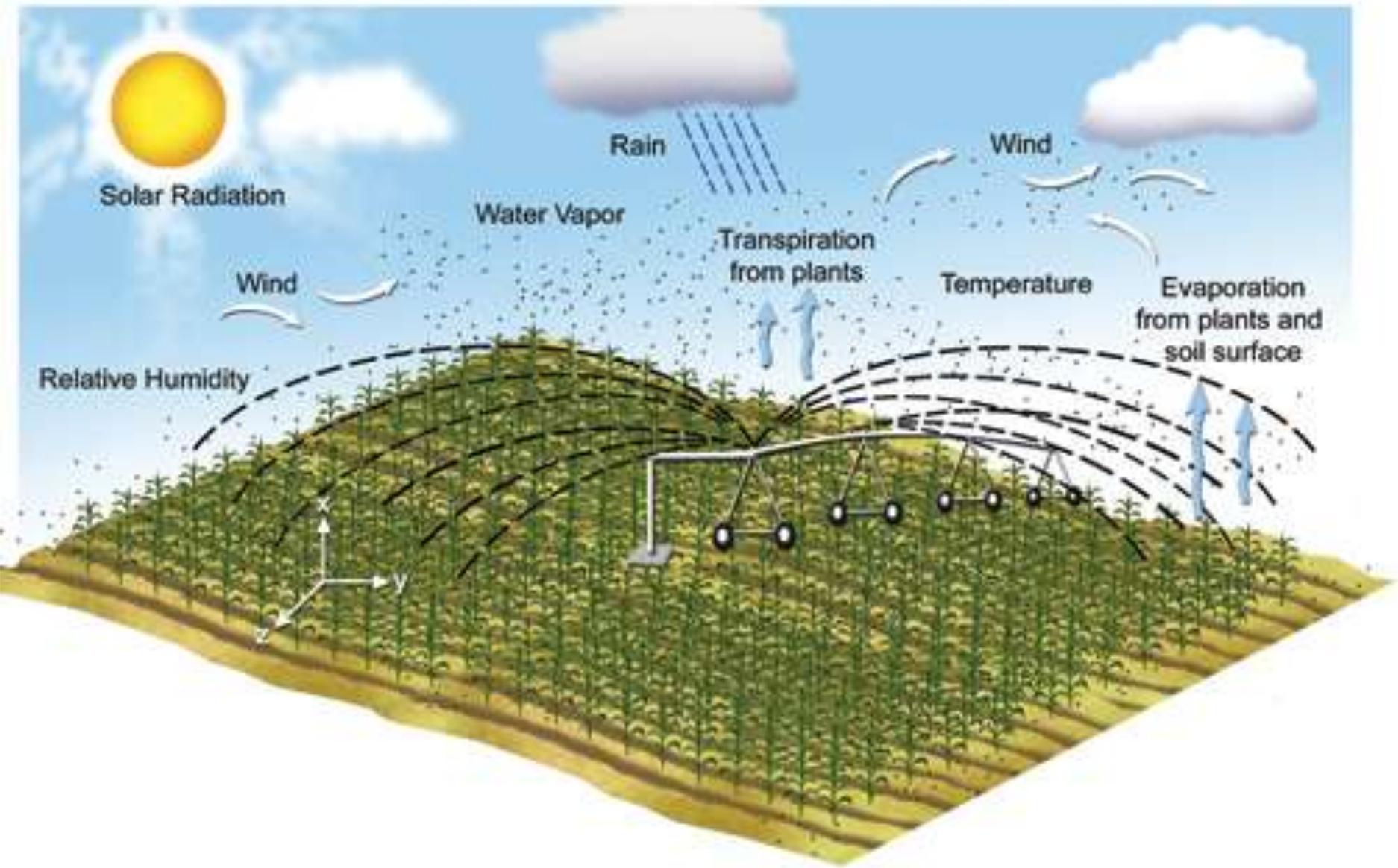
Evaporação e Transpiração



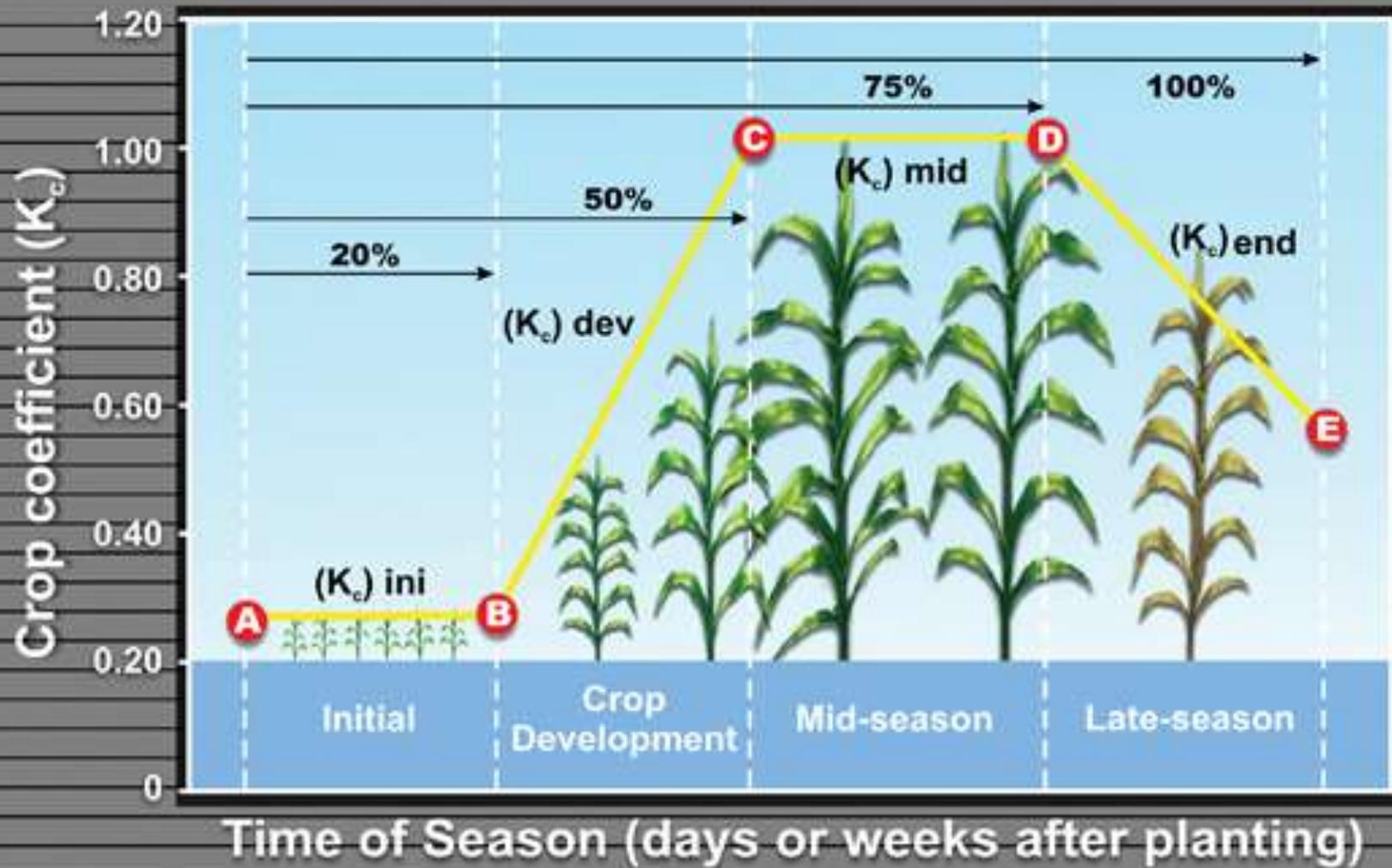
Evapotranspiração - Definições

Evapotranspiração de cultivo (ET_c) – 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_c depende das condições meteorológicas, expressas por meio da ETP (ou ET_o), 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_c também irá variar.

$$ET_c = K_c * ETP$$



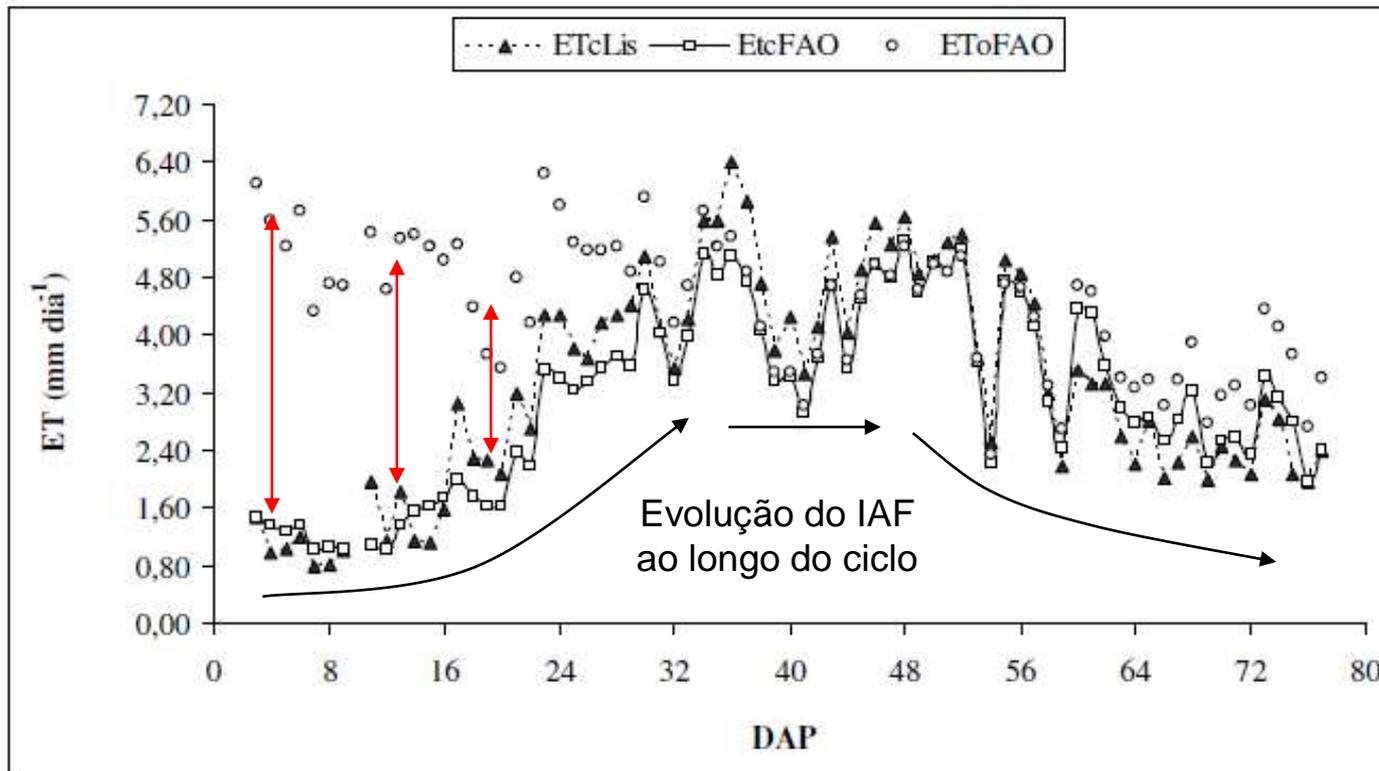
Evapotranspiração e os fatores que impactam nos processos (evaporação e transpiração) em uma área irrigada por pivô central.



ETcLis – Evapotranspiração da cultura medida

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

EToFAO – Evapotranspiração de referência



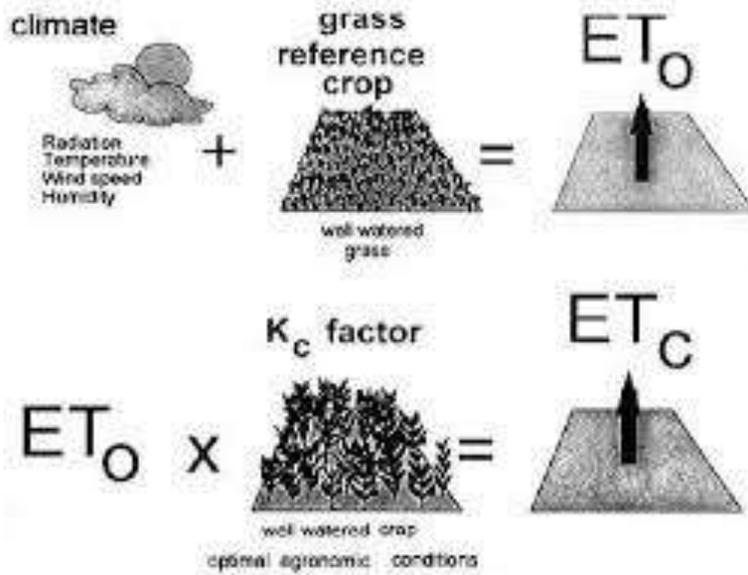
Fonte: FIGUEIRÊDO et al., 2009

Coeficiente de Cultivo

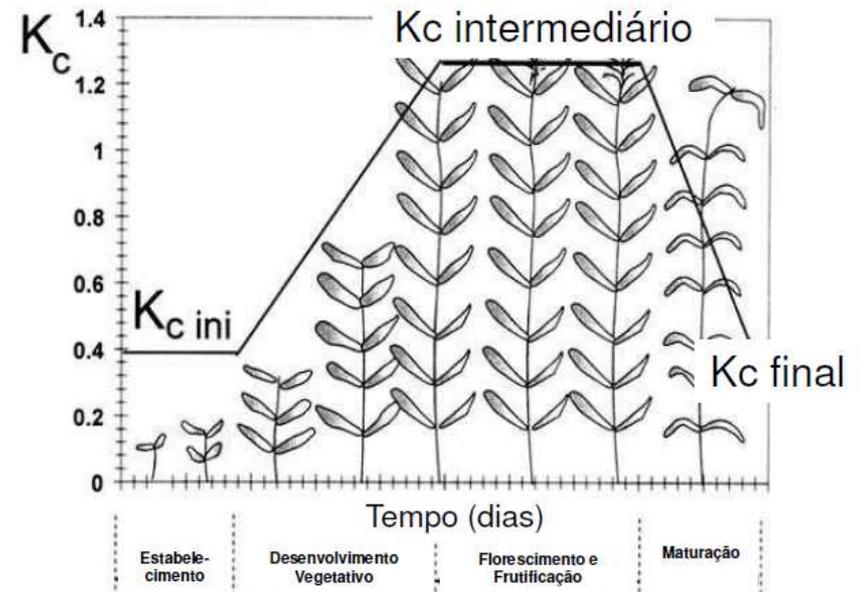
Cultura	Kc Inicial	Kc Interm.	Kc Final
Cevada	0.30	1.15	0.25
grão de bico	0.40	1.00	0.35
algodão	0.35	1.15-1.20	0.70-0.50
Milho	0.30	1.20	0.35
Amendoim	0.40	1.15	0.60
Sorgo	0.30	1.00-1.10	0.55
Amendoim	0.40	1.15	0.50
Girassol	0.35	1.15	0.35
Trigo	0.30	1.15	0.25

Resumo

ET_o e ET_c



K_c



Fatores Determinantes

- Climáticos

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

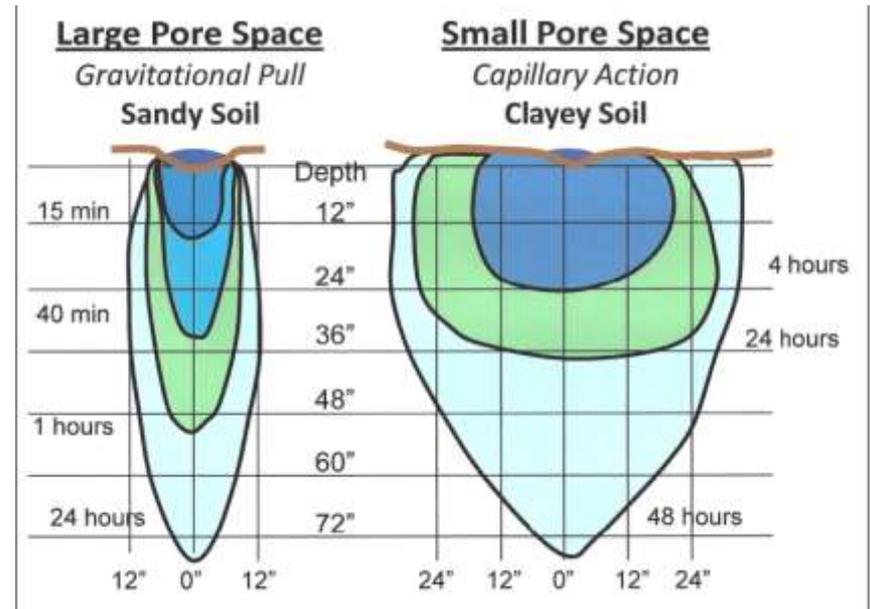
- Planta

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

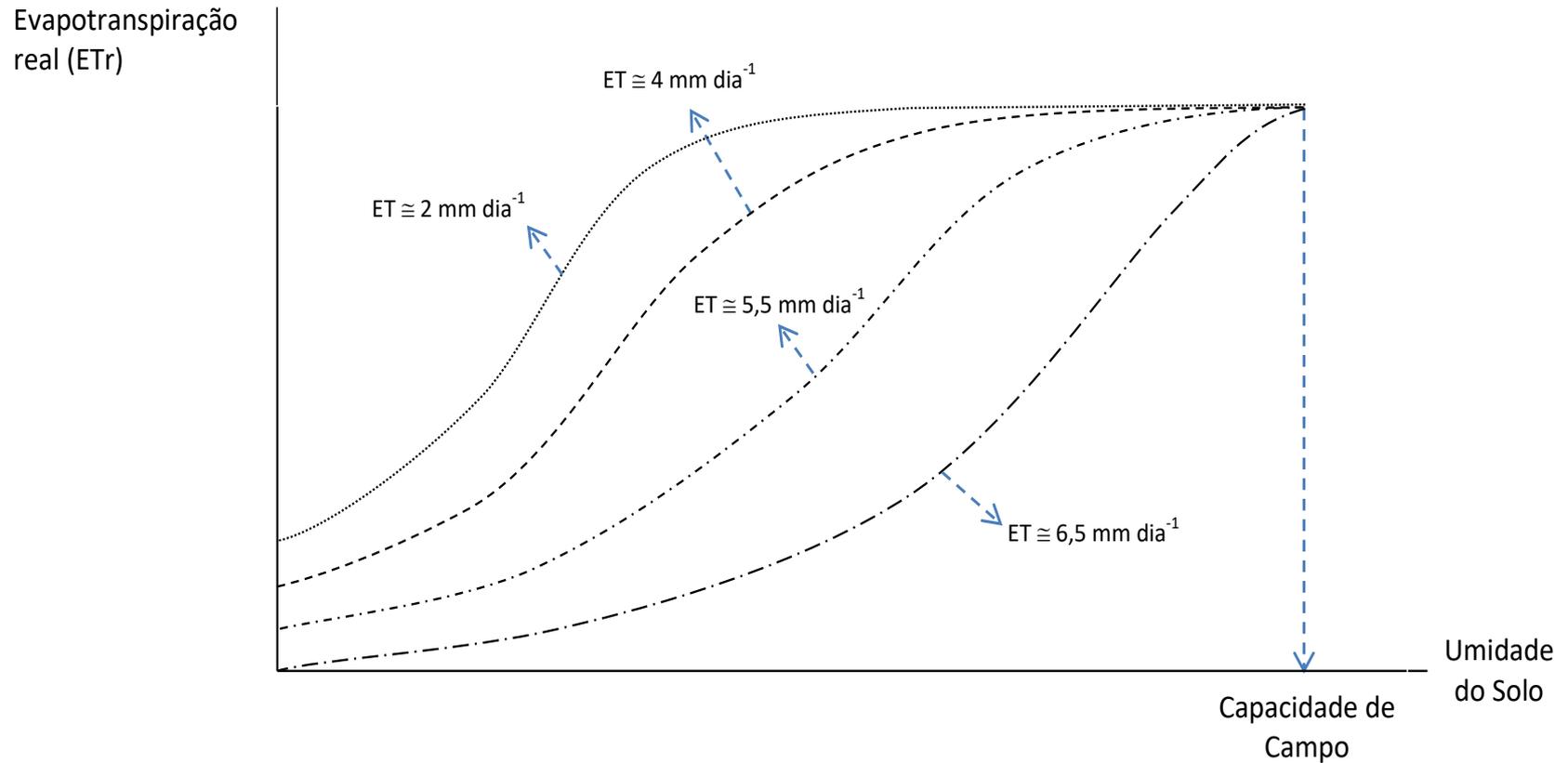


Fatores Determinantes

- 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

A evaporação é medida com tanques evaporimétricos, onde obtém-se a lâmina de água evaporada de uma determinada área.



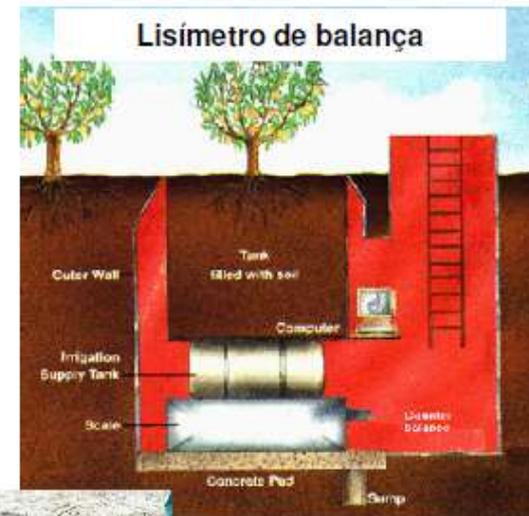
O tanque de 20m² é utilizado para medir a evaporação (E₂₀). Suas medidas se assemelham às obtidas em lagos. Portanto, sofre pouca influência de fatores externos, dado o grande volume de água que ele contém.



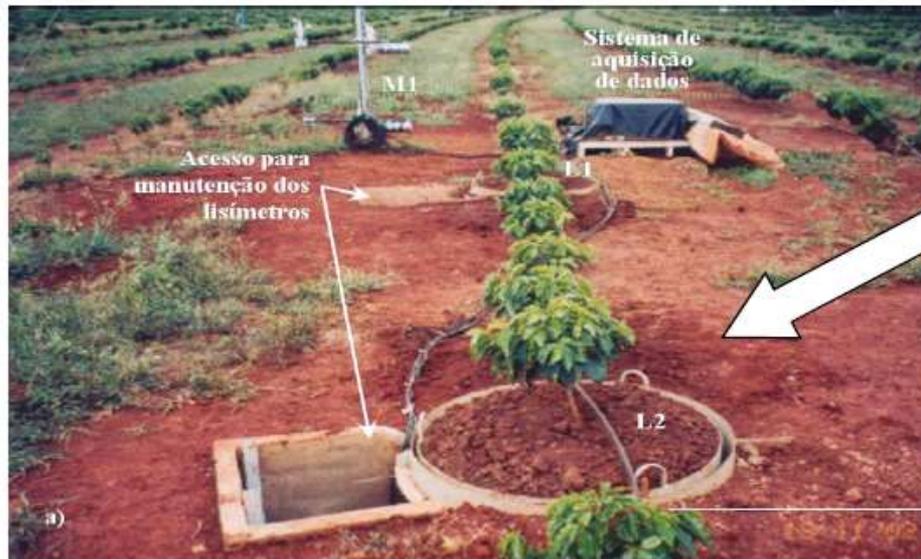
$$E_{\text{Lago}} = E_{20}$$

Medida da Evapo(transpi)ração

A evapotranspiração é medida com tanques vegetados denominados de lisímetros ou evapotranspirômetros, que servem para determinar qualquer tipo de ET.



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); s é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T é a temperatura média diária ($^\circ\text{C}$); γ 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; γ é a constante psicrométrica kPa/°C

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

Δ é a tangente à curva de saturação de vapor [kPa °C⁻¹], e T é a temperatura do ar [°C],

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 (m/s)	Saldo-Rad (MJ/m2.d)	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

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)

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

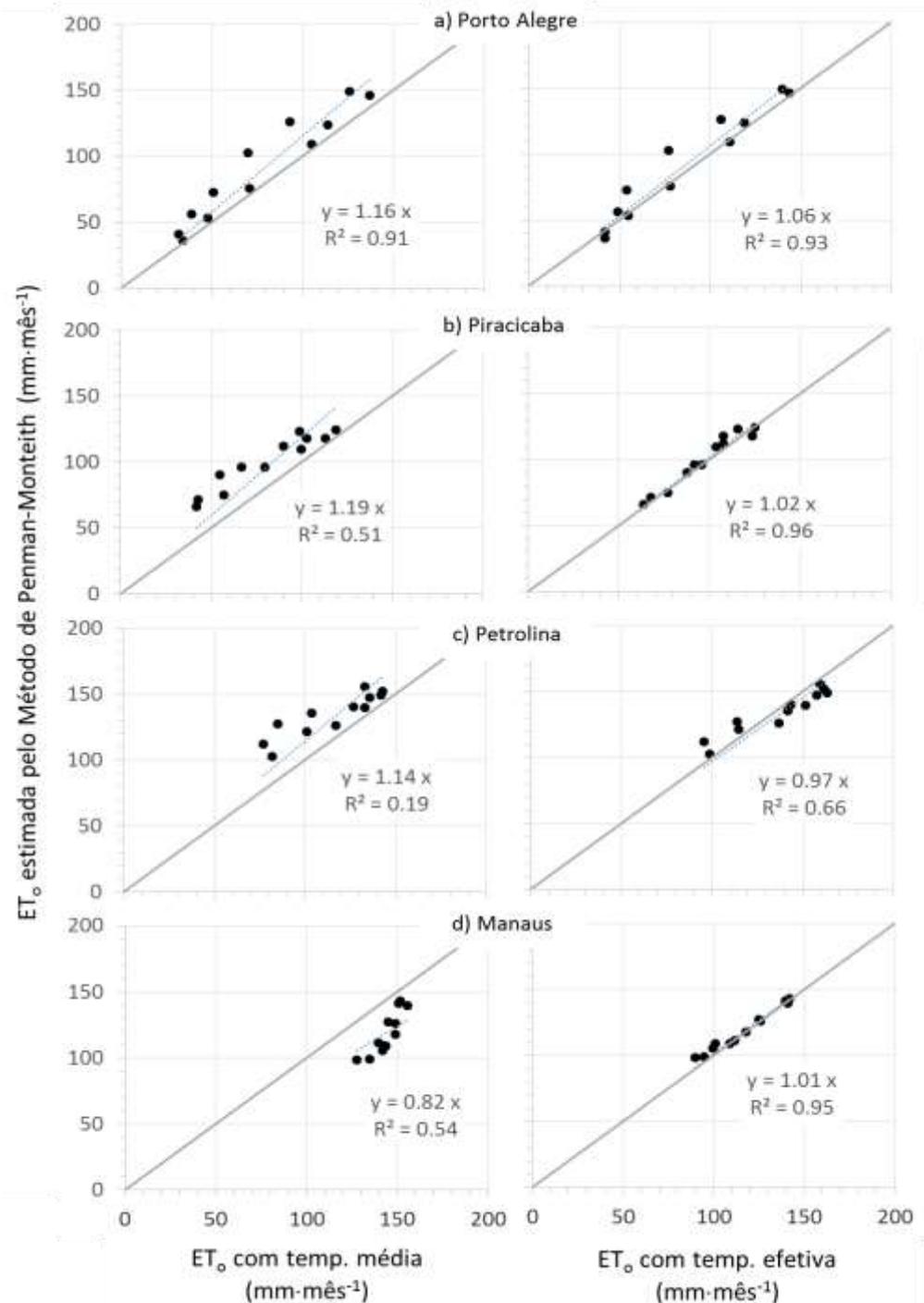
Qo é a Radiação Solar Extra-Terrestre, convertida em mm/dia

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⁻¹); 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.