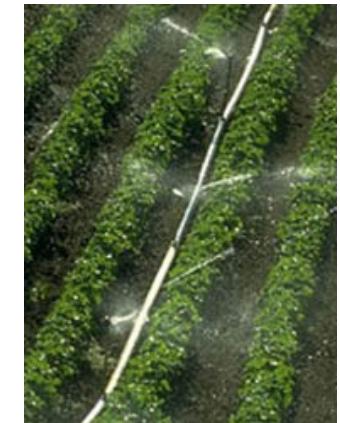


LCE 306 – Meteorologia Agrícola

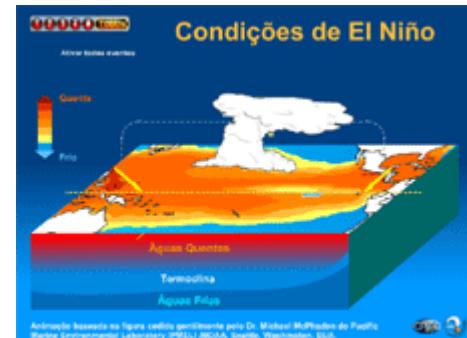
Prof. Paulo Cesar Sentelhas

Prof. Luiz Roberto Angelocci

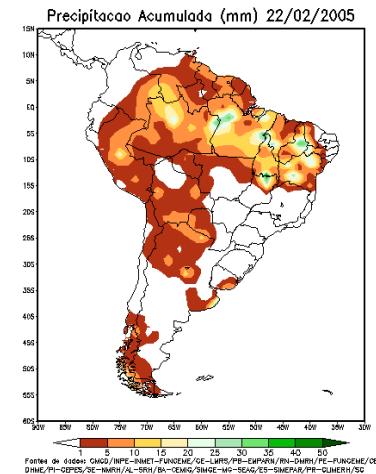


Aula # 8

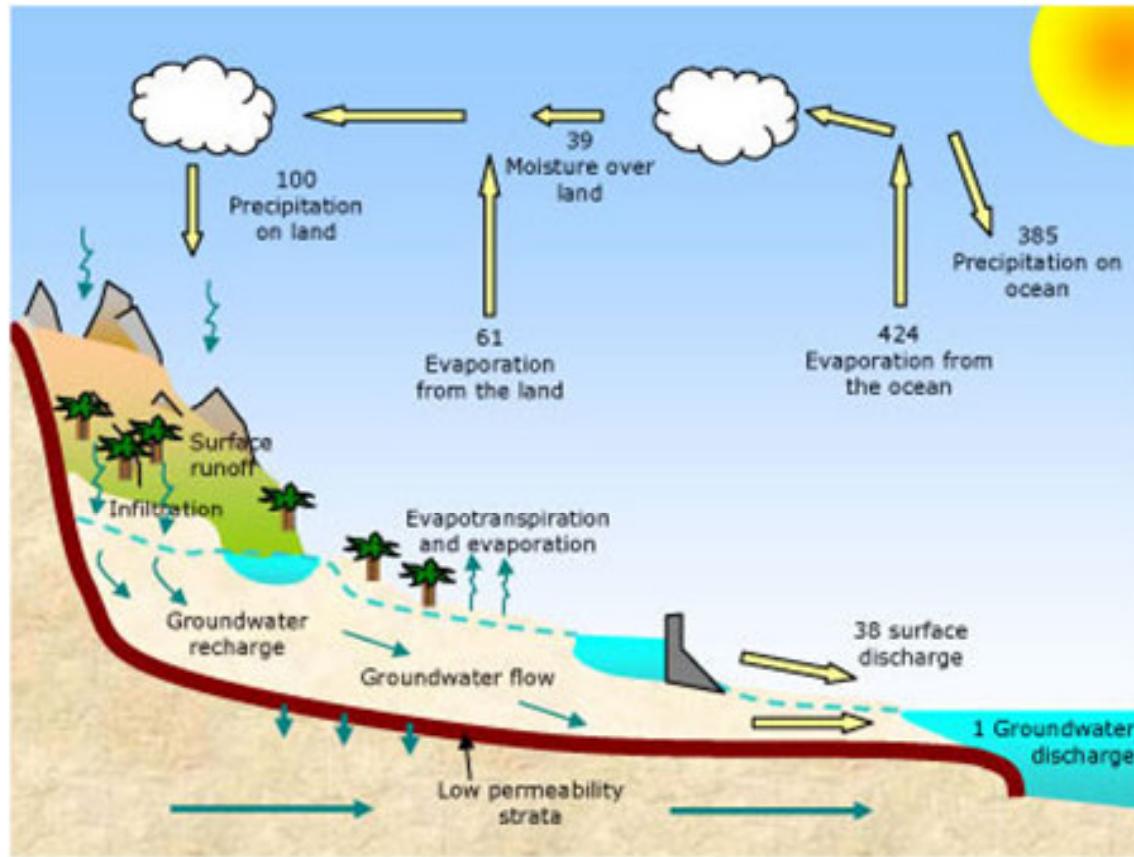
Evapotranspiração – Definições e Conceitos



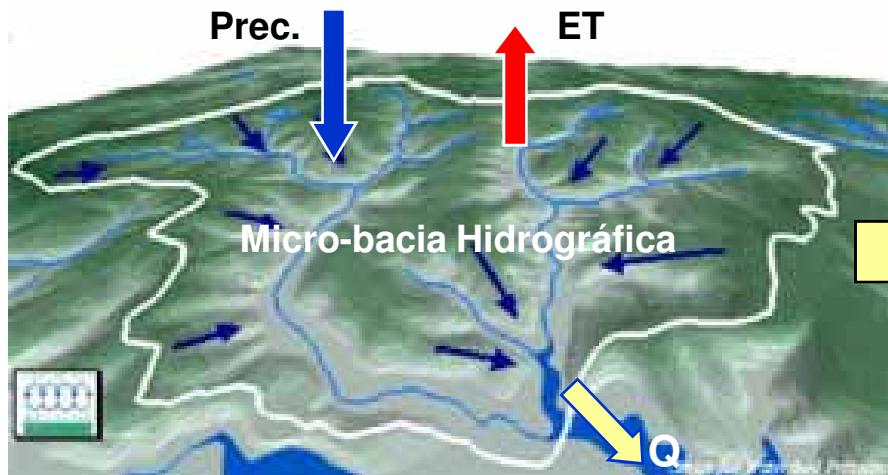
ESALQ/USP – 2009



A importância da ET no ciclo hidrológico

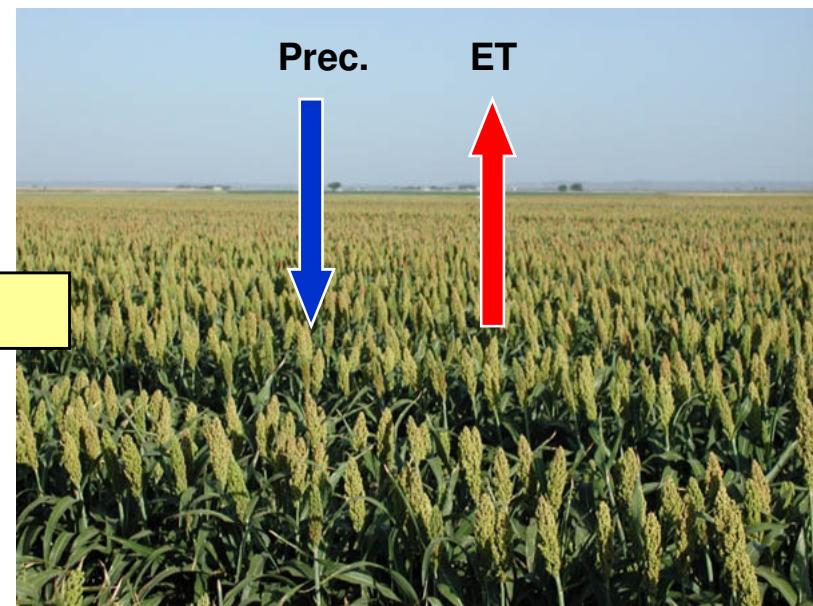


A evapotranspiração é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor, tendo papel importantíssimo no Ciclo Hidrológico em termos globais. Esse processo envolve a evaporação da água de superfícies de água livre (rios, lagos, represas, oceano, etc), dos solos e da vegetação úmida (que foi interceptada durante uma chuva) e a transpiração dos vegetais.

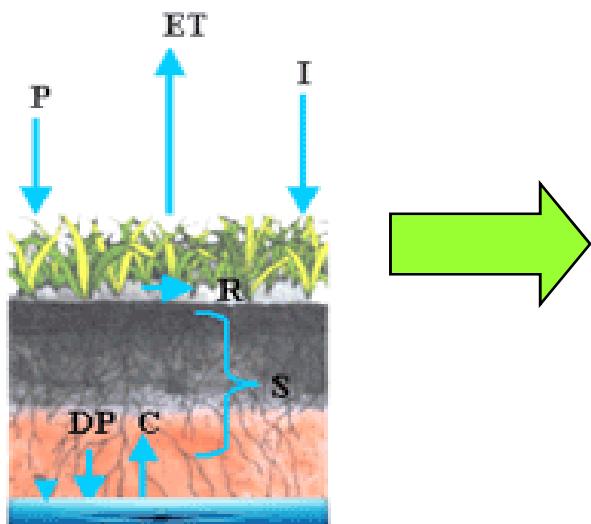
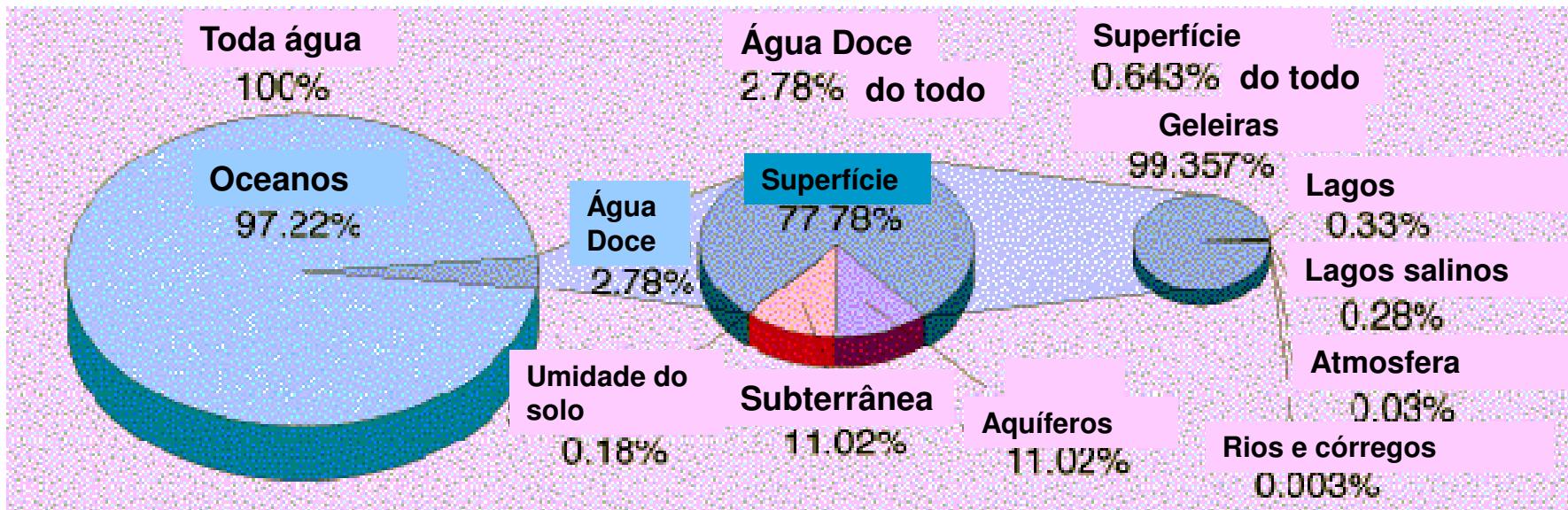


Em uma escala intermediária, a ET assume papel fundamental no balanço hídrico de micro-bacias hidrográficas, juntamente com a precipitação. O balanço entre a água que entra na micro-bacia pela chuva e que sai por ET, irá resultar na vazão (Q) do sistema de drenagem.

Em uma escala local, no caso de uma cultura, a ET da cultura se restringe aos processos de evaporação da água do solo e da vegetação úmida e de transpiração das plantas. O balanço entre a água que entra na cultura pela chuva e a que sai por ET, irá resultar na variação do armazenamento de água no solo, que por sua vez condicionará o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento da cultura.

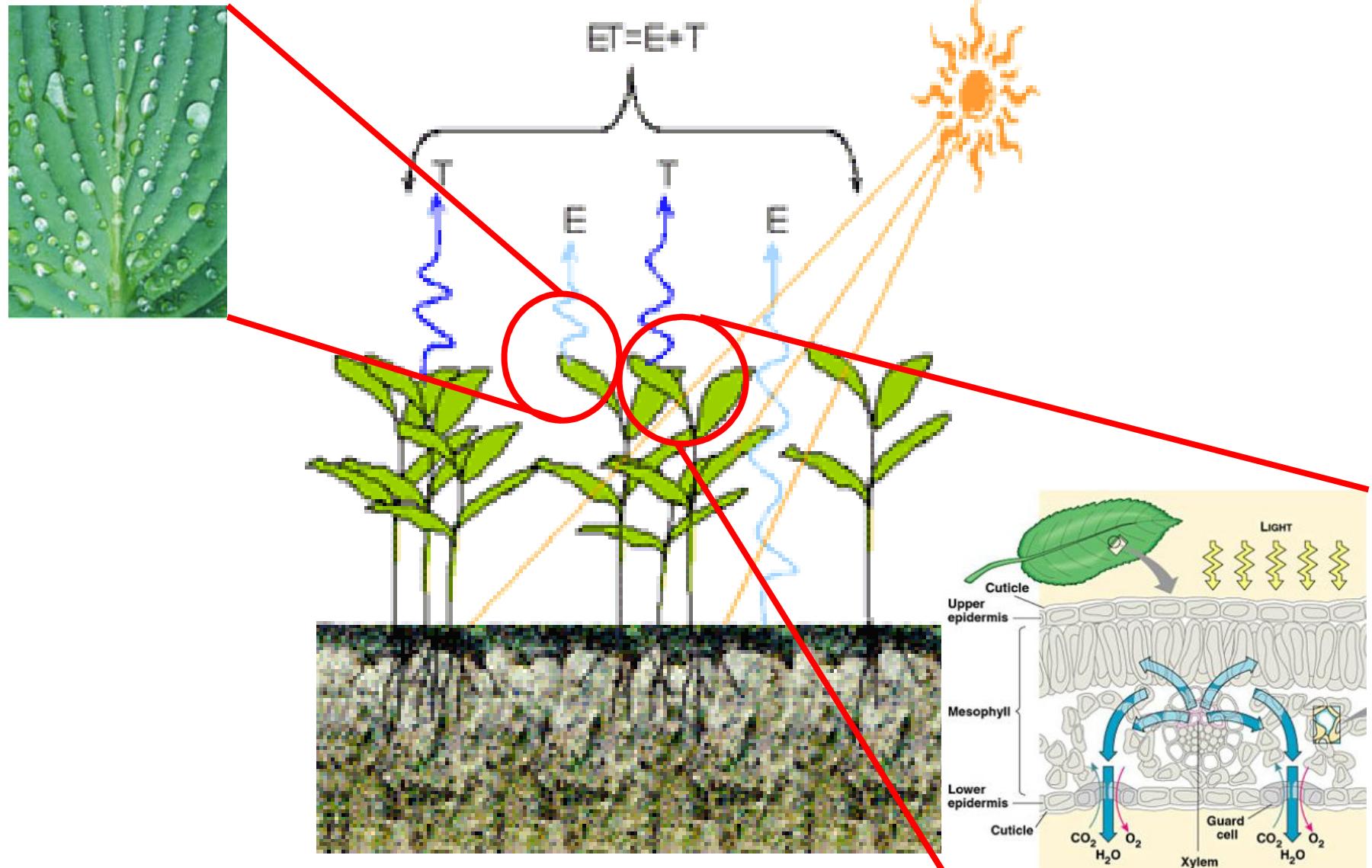


A importância da ET na agricultura



De toda água doce superficial do mundo (0,643% do total de água no globo), apenas 51,8% (0,333% do total) está disponível para ser usada. Da água doce que realmente é utilizada, 70% o é na prática da irrigação. Portanto, racionalizar o uso da água na agricultura, por meio da correta determinação da ET da cultura é imprescindível.

Definição de evaporação, transpiração e evapotranspiração



Definição de Evaporação

A evaporação é um processo físico de mudança de fase, passando do estado líquido para o estado gasoso. A evaporação de água na atmosfera ocorre de oceanos, lagos, rios, do solo e da vegetação úmida (evaporação do orvalho ou da água interceptada das chuvas)

Evaporação da água das superfícies de água livre, vegetação úmida ou do solo



Para que ocorra evaporação da água há a necessidade de energia. Essa energia é chamada de calor latente de vaporização (λE), que em média corresponde a:



$$\lambda E = 2,45 \text{ MJ/kg}$$

(a 20°C)

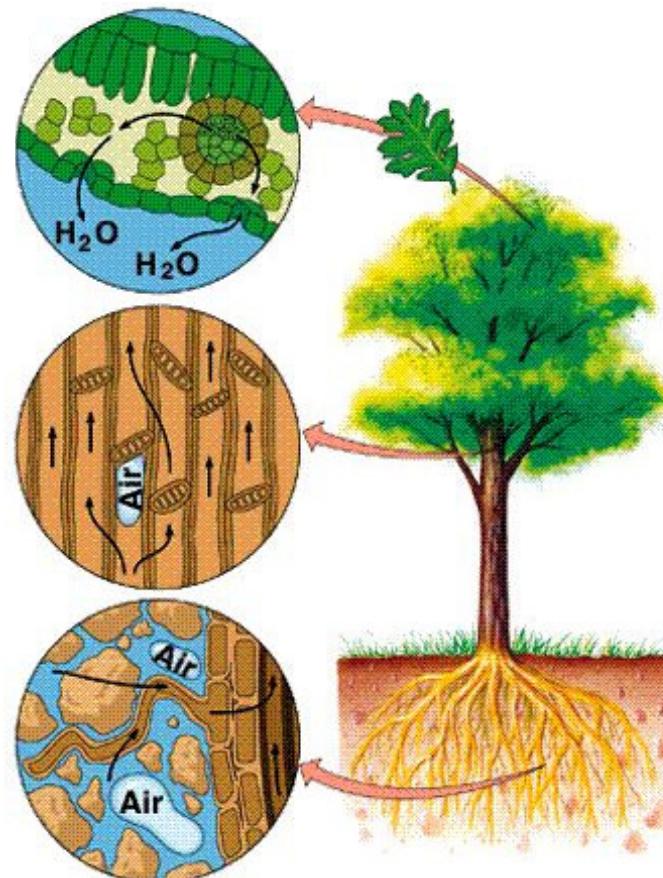
Definição de Transpiração

A transpiração é um processo biofísico pelo qual a água que passou pela planta, fazendo parte de seu metabolismo, é transferida para a atmosfera preferencialmente pelos estômatos, obedecendo uma série de resistências desde o solo, passando pelos vasos condutores (xilema), mesófilo, estômatos e finalmente indo para a atmosfera.

Transpiração – Teoria da Coesão

Evaporação

O abaixamento do potencial hídrico da atmosfera (ar) promove a evaporação das paredes celulares. Isso promove a redução do potencial hídrico nas paredes celulares e no citoplasma



$$\Psi_{\text{ar}} = -100 \text{ a} - 1000 \text{ atm}$$

$$\Psi_{\text{folhas}} = -5 \text{ a} - 40 \text{ atm}$$

Coesão (no xilema)

A coluna de água no xilema é mantida por coesão das moléculas de água nos vasos. Bolhas de ar bloqueia o movimento

Absorção de água (do solo)

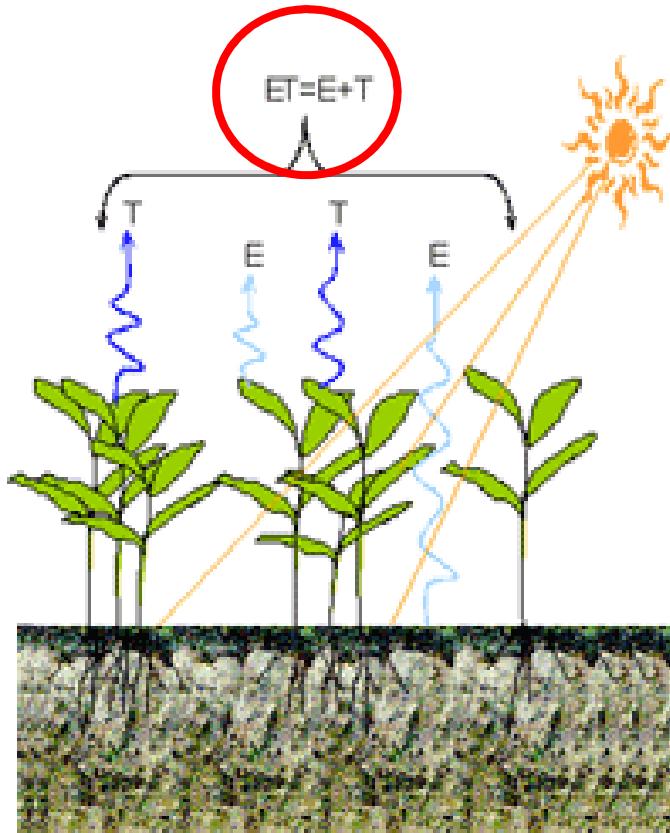
O menor potencial hídrico das raízes provoca a entrada de água. A área de absorção depende da quantidade de radículas. A água se move através da endoderme por osmose

$$\Psi_{\text{raiz}} = -1 \text{ a} - 10 \text{ atm}$$

$$\Psi_{\text{solo}} = -0,1 \text{ a} - 2 \text{ atm}$$

Definição de Evapotranspiração

Como é praticamente impossível se distinguir o vapor d'água proveniente da evaporação da água no solo e da transpiração das plantas, a evapotranspiração é definida como sendo o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e da vegetação úmida e por transpiração das plantas.



Fatores Determinantes da Evaporação e da Evapotranspiração



Fatores Meteorológicos/Climáticos

Saldo de radiação (R_n)

Temperatura do ar (Tar)

Umidade do ar (UR ou Δe)

Velocidade do vento (U)

Fatores Dependentes do Sistema Evaporante

a) Superfície de água livre

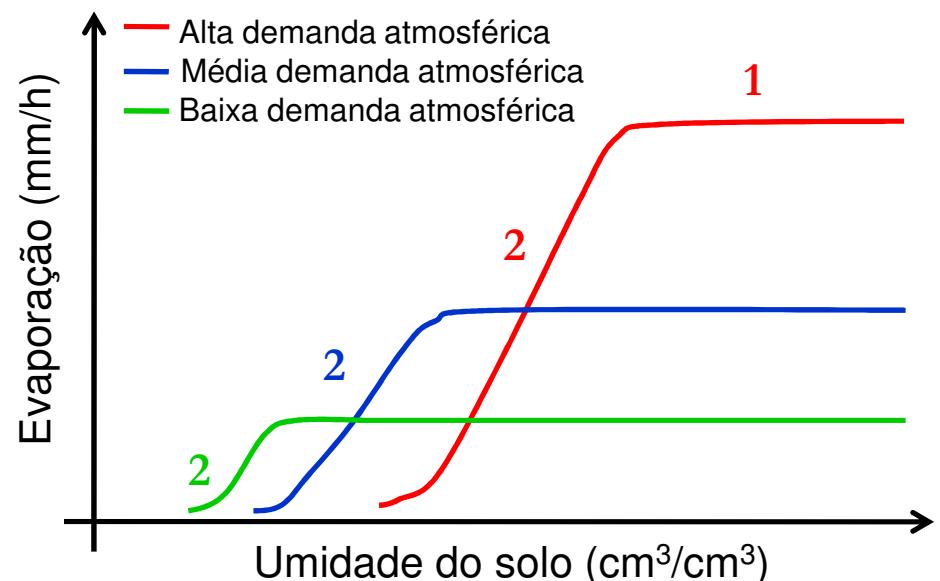
- Pureza da água
- Extensão e Profundidade
- Tipo (formato e material)
- Exposição à radiação solar e ao vento



b) Solo Desnudo

- Textura e Estrutura
- Disponibilidade hídrica

Estágio 1 – Evaporação depende apenas das condições meteorológicas
Estágio 2 – Evaporação depende das condições intrínsecas do solo



Fatores Dependentes do Sistema Evaporante

c) Solo vegetado (evapotranspiração)

- Fatores da Cultura:

Altura das plantas

Área foliar

Tipo de cultura

Albedo

Profundidade das raízes

- Fatores de Manejo e do Solo:

Espaçamento/densidade de plantio

Orientação de plantio

Plantio direto

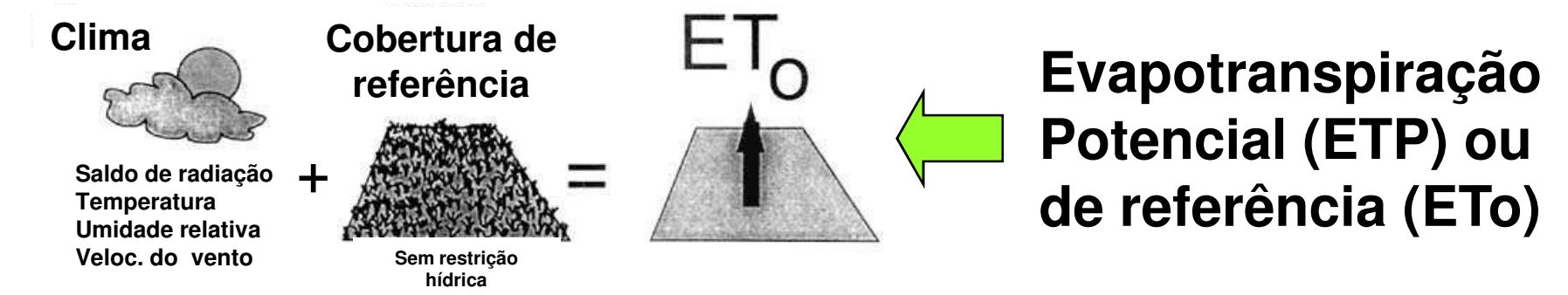
Capacidade de água disponível (CAD)

Impedimentos físicos/químicos

Uso de quebra-ventos



Conceitos de Evapotranspiração



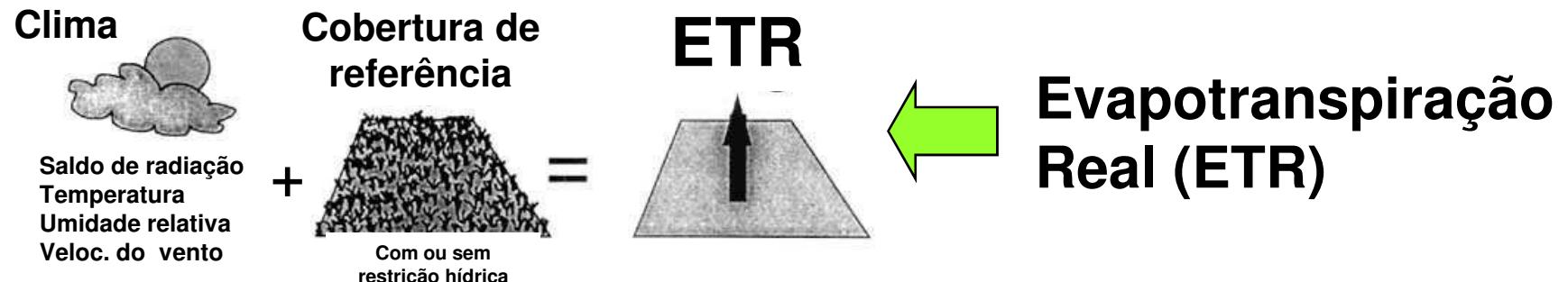
ETP ou ETo

é a evapotranspiração de uma extensa superfície vegetada com vegetação rasteira (normalmente gramado), em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 8 e 15cm ($IAF \approx 3$), sem restrição hídrica e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes. Nesse caso a ET depende apenas das variáveis meteorológicas, sendo portanto ETP uma variável meteorológica, que expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes.



Condição de ETP ou ETo

20/12/2004



ETR

é a evapotranspiração nas mesmas condições de contorno de ETP, porém, com ou sem restrição hídrica. Nesse caso:

$$\text{ETR} \leq \text{ETP}$$

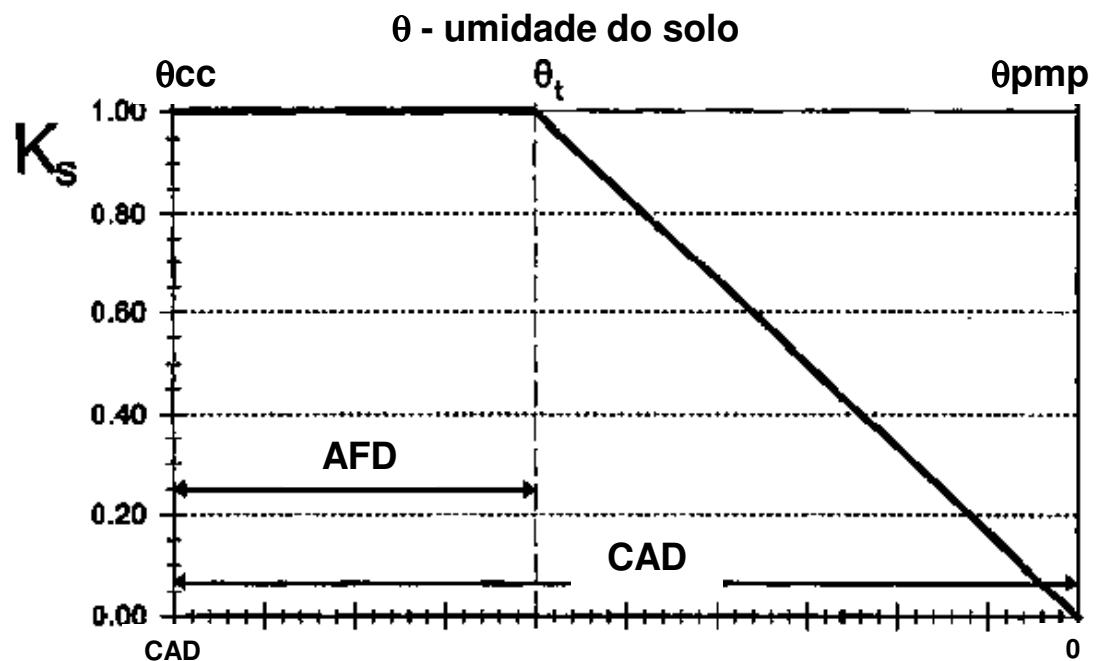
Pode-se dizer que:

$$\text{ETR} = \text{ETP} * K_s$$

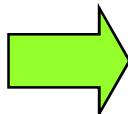
$$\text{Se } K_s = 1 - \text{ETR} = \text{ETP}$$

$$\text{Se } K_s < 1 - \text{ETR} < \text{ETP}$$

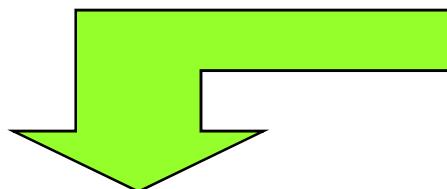
Percentagem de redução de ET com a umidade do solo (K_s)



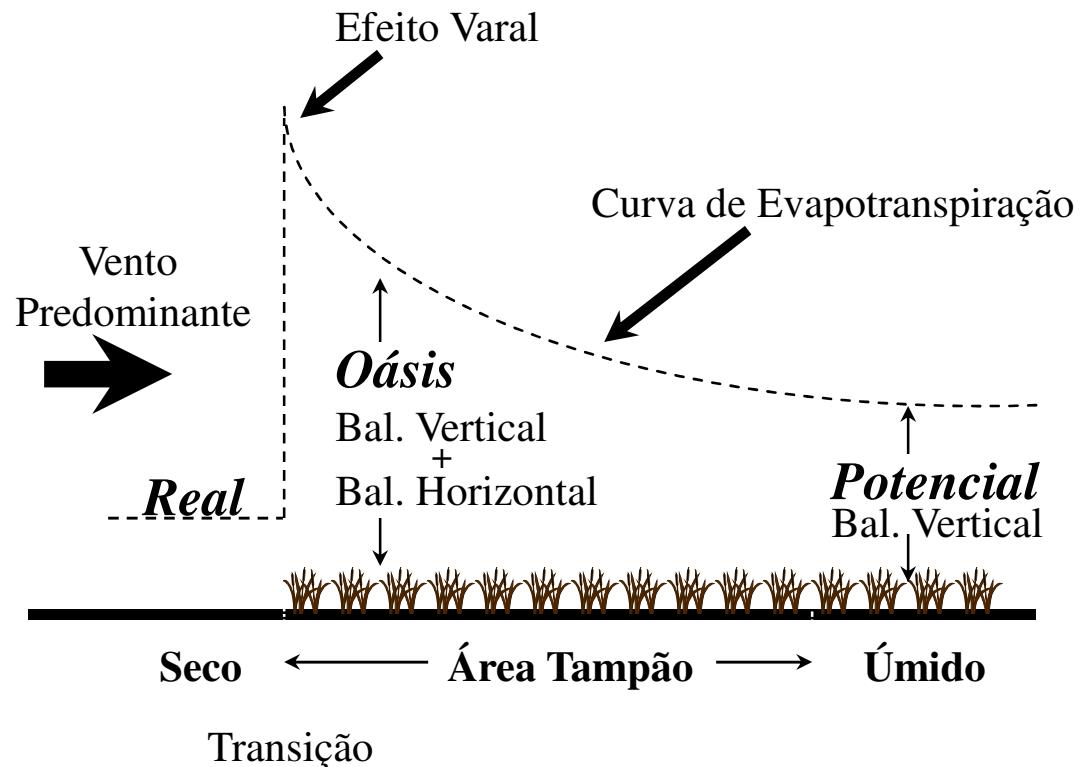
Evapotranspiração de Oásis (ETO)



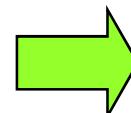
é a evapotranspiração de uma área vegetada úmida (irrigada) que é circundada por uma extensa área seca, de onde provém energia por advecção (calor sensível, H'), a qual aumenta a quantidade de energia disponível para a ET.



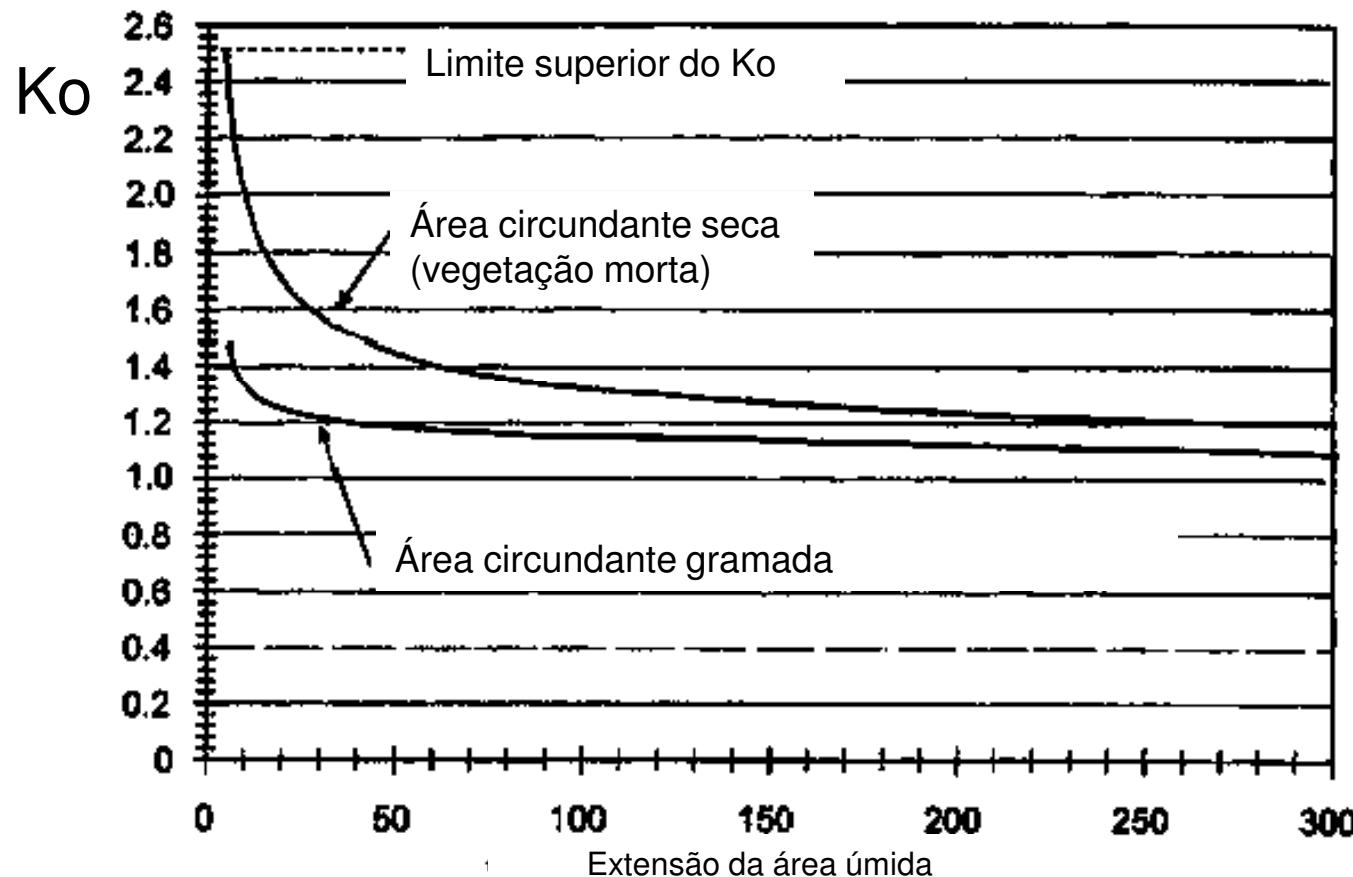
A figura ao lado mostra os diferentes tipos de ET descritos anteriormente. Na área seca tem-se ETR, limitada pelas condições de umidade do solo. Na área irrigada (bordadura ou área tampão) tem-se ETO, a qual é condicionada pelos balanços vertical (R_n) e horizontal (H') de energia. No centro da área úmida tem-se ETP, a qual depende única e exclusivamente do balanço vertical de energia.



Evapotranspiração de Oásis (ETO)

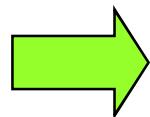


$$\text{ETO} = \text{ETP} * \text{Ko}$$



Dados válidos para $UR = 30\%$, $U_{2m} = 2 \text{ m/s}$, altura da vegetação úmida = 2m e IAF = 3.

Evapotranspiração de Cultura (ETc)



$$ETo \times$$

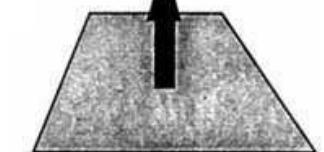
Coeficiente de Cultura (Kc)



Cultura sem restrição hídrica e em condições ótimas de desenvolvimento

Fonte: FAO (1980)

ET_C



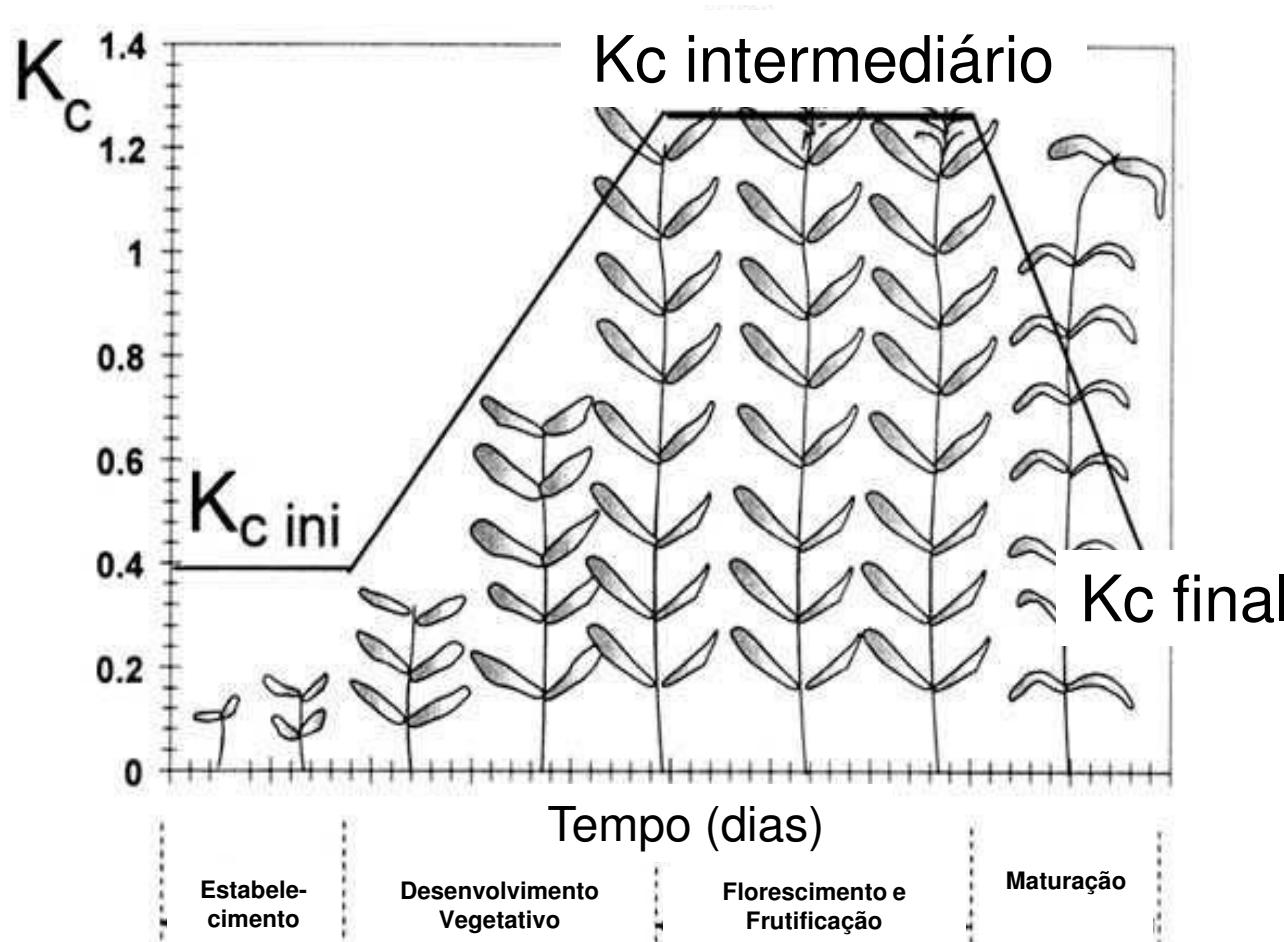
ETc

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 ETc depende das condições meteorológicas, expressas por meio da ETP (ou ETo), 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 Kc também irá variar.



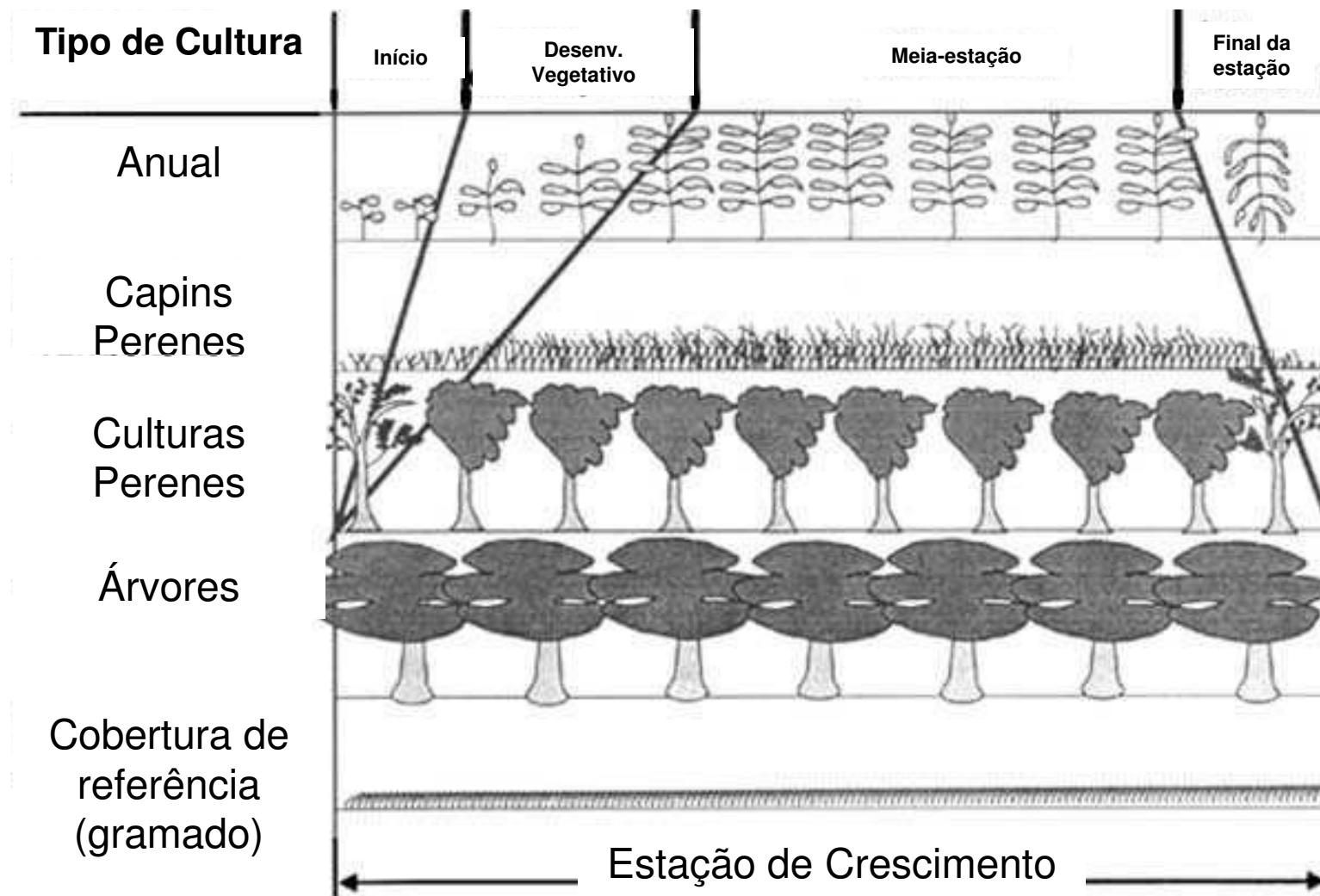
$$ETc = Kc * ETP$$

Variação de Kc com o desenvolvimento de culturas



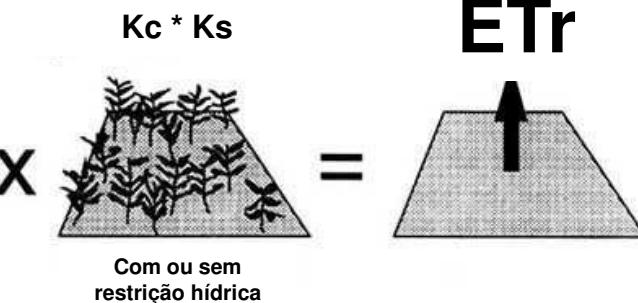
Observa-se que os valores de Kc acompanham basicamente a área foliar da cultura. No caso das culturas anuais o Kc_{ini} varia de 0,3 a 0,5, Kc intermediário de 0,8 a 1,2, e o Kc final de 0,4 a 0,7, dependendo do tipo de cultura. No caso de culturas perenes ou árvores, os valores de Kc também irão variar de acordo com o IAF e o tipo de cultura. Veja a seguir as diferenças nos estágios de desenvolvimento entre os diversos tipos de cultura, inclusive a de referência.

Comparação dos estágios de desenvolvimento (e do IAF) de diferentes tipos de cultura e da cultura de referência



Evapotranspiração real da Cultura (ETr)

$$\text{ET}_O \times K_c * K_s$$

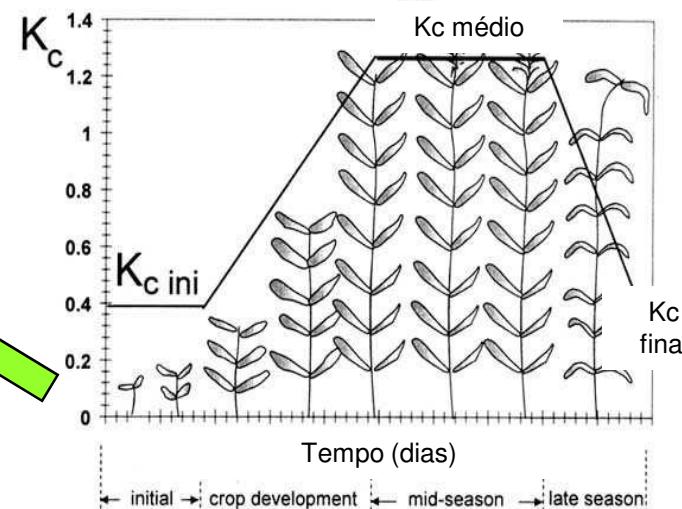
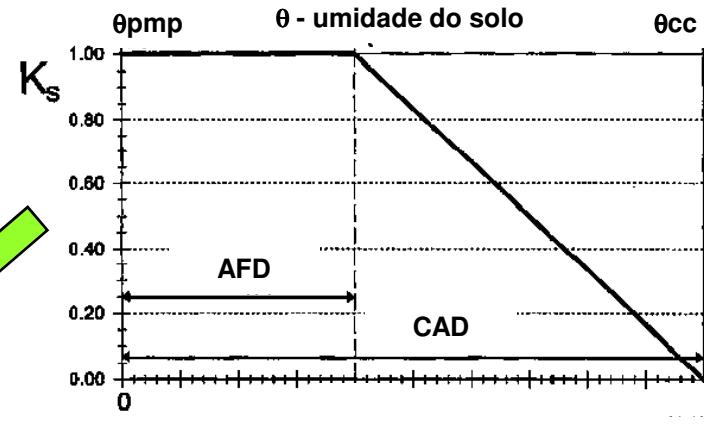


ETr

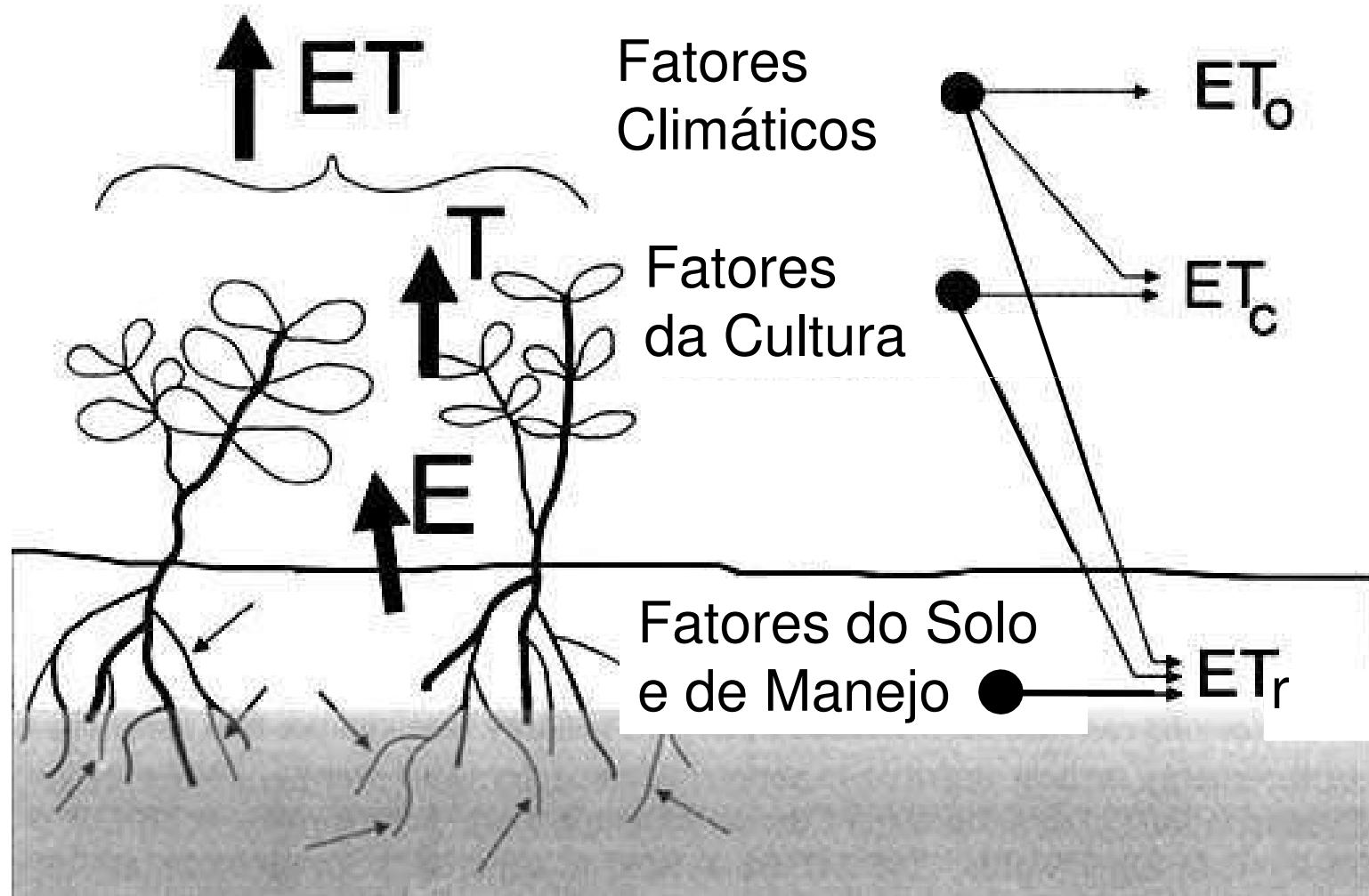
é a evapotranspiração nas mesmas condições de contorno de ETc, porém, com ou sem restrição hídrica. Nesse caso:

$$\text{ETr} \leq \text{ETc}$$

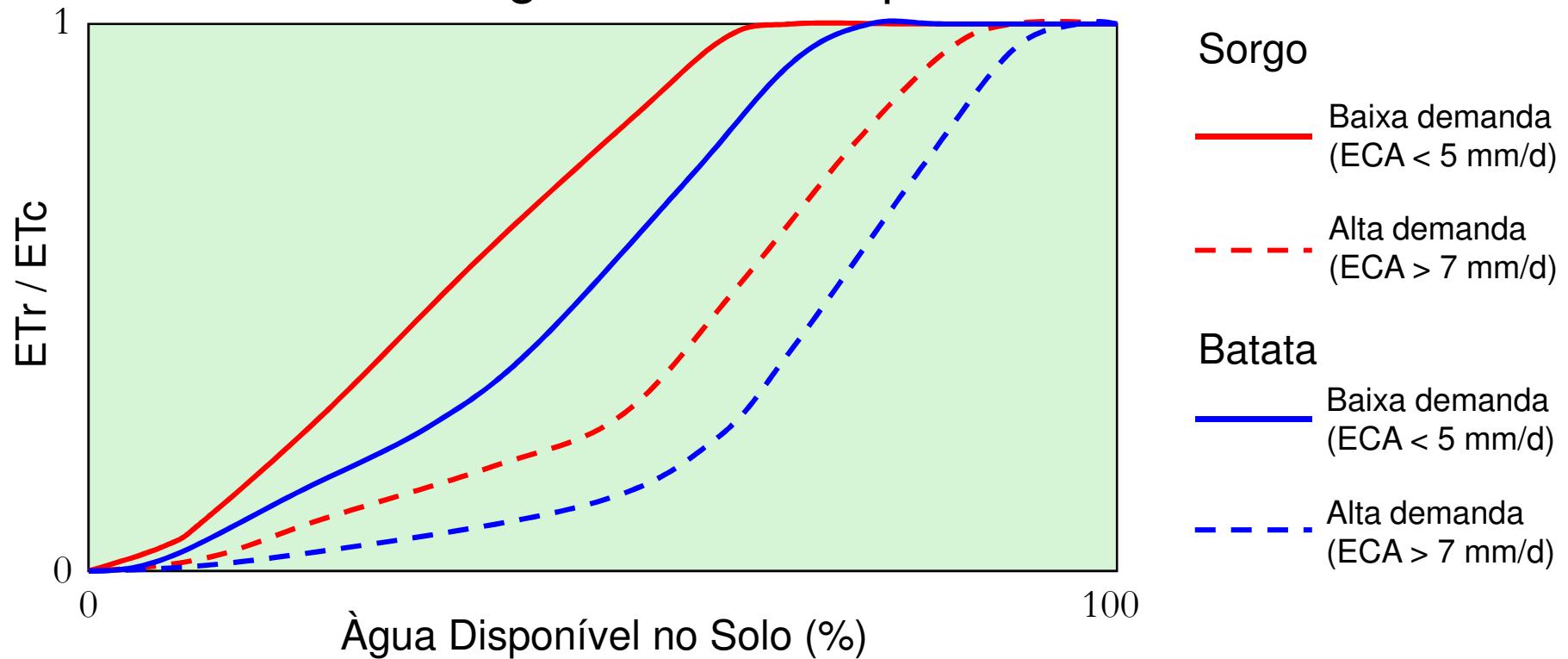
$$\text{ETr} = \text{ETP} * K_c * K_s$$



Conceitos de Evapotranspiração e seus Fatores Determinantes



Inter-relação ET- demanda atmosférica – disponibilidade de água no solo – tipo de cultura



O solo é um reservatório ativo que, dentro de certos limites, controla a taxa de uso da água pelas plantas, sempre associada com a demanda hídrica atmosférica. A Figura acima mostra que as plantas de sorgo conseguem, numa condição de baixa demanda, manter $ETr/ETc = 1$ até cerca de 65% da água disponível. Para uma condição de alta demanda, isso só ocorreu até cerca de 85%. Isso se deve à limitação da planta em extrair água do solo na mesma taxa em que ela evapotranspira. Para uma cultura mais sensível, como a batata, o mesmo ocorre, porém com diferenças significativas, como pode-se observar na figura.

Medida da Evaporação

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.



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

Tanque Classe A



Área de 1,15 m²



Tanque GGI-3000
(área de 3000 cm²)



Como os tanques Classe A e o GGI-3000 são menores e contém um volume de água muito menor do que o tanque de 20m², o volume de água evaporado nesses evaporímetros costuma ser superior. A relação entre as evaporações que ocorrem nesses três tipos de tanque evaporimétricos são apresentados a seguir.

Tanque Classe A



**Tanque GGI-3000
(área de 3000 cm²)**



Existe uma proporcionalidade entre esses três tanques de medida da evaporação. Essa relação entre eles foi determinada para Piracicaba por Oliveira (1971):

$$E20 = 0,76 \cdot ECA = 0,95 \cdot EGGI$$

Já Volpe e Oliveira (2003) em Jaboticabal obtiveram as seguintes relações:

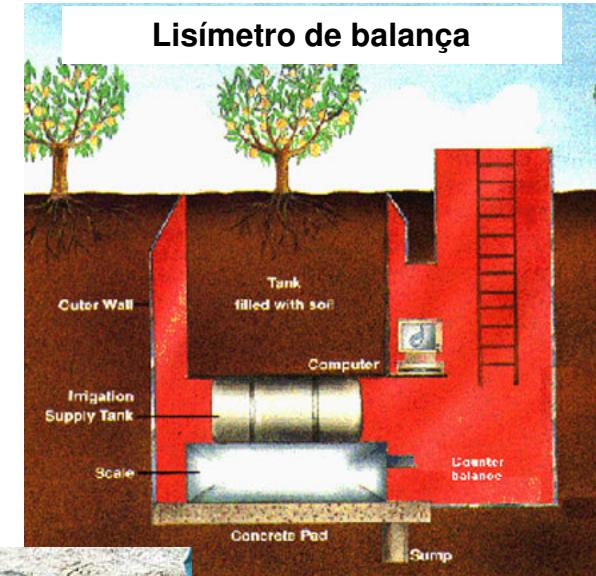
$$E20 = 0,75 \cdot ECA = 0,85 \cdot EGGI$$

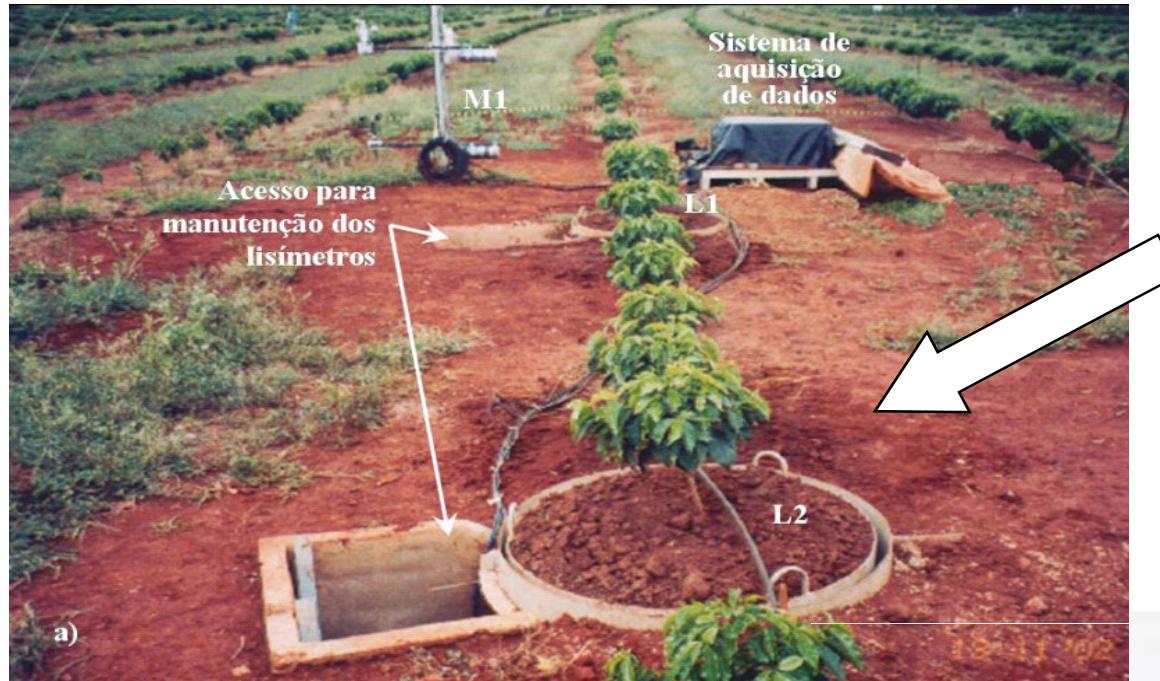
Como as relações apresentadas por Volpe e Oliveira (2003) para Jaboticabal foram baseadas numa série de dados mais longa, essas parecem ser mais confiáveis.

Exemplo: $E20 = 5 \text{ mm/d}$ irá corresponder a $ECA = 6,7 \text{ mm/d}$ e $EGGI = 5,9 \text{ mm/d}$

Medida da Evapotranspiração

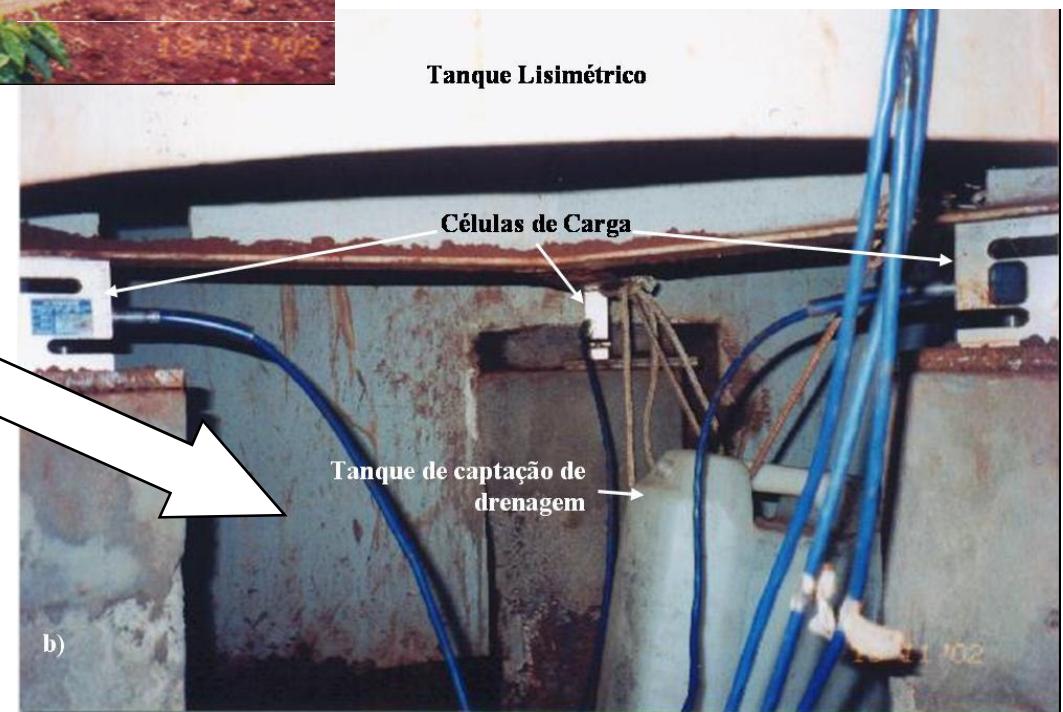
A evapotranspiração é medida com tanques vegetados denominados de lisímetros ou evapotranspirômetros, que servem para determinar qualquer tipo de ET.





Lisímetro de pesagem para a medida da ET do cafeeiro

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





Lisímetros de Lençol Freático Constante

Lisímetro plantado com cebola

Tanques intermediários com bóia

Tanque alimentador (medida)





Estimativa da ETP ou ETo

Como a medida da ETP é muito onerosa e trabalhosa, servindo apenas para fins experimentais, para fins práticos o mais comum é se lançar mão da estimativa da ETP a partir de dados meteorológicos observados em estações agrometeorológicas convencionais ou automáticas.

Existem diversos métodos disponíveis para a estimativa da ETP. Trataremos aqui dos que vem sendo mais empregados no Brasil, entre eles os métodos de Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo (com temperatura efetiva), Camargo, Hargreaves e Samani, Tanque Classe A, Priestley-Taylor e Penman-Monteith, sendo este último o método padrão internacional, de acordo com o Boletim Irrigation and Drainage 56 da FAO.



Métodos de Estimativa da ETP ou ET₀

Método de Thornthwaite

Método empírico baseado apenas na temperatura média do ar, sendo esta sua principal vantagem. Foi desenvolvido para condições de clima úmido e, por isso, normalmente apresenta sub-estimativa da ETP em condições de clima seco. Apesar dessa limitação, é um método bastante empregado para fins climatológicos, na escala mensal. Esse método parte de uma ET padrão (ET_p), a qual é a ET para um mês de 30 dias e com N = 12h. A formulação do método é a seguinte:

$$ET_p = 16 (10 T_m/l)^a \quad (0 \leq T_m < 26,5^{\circ}C)$$

$$ET_p = -415,85 + 32,24 T_m - 0,43 T_m^2 \quad (T_m \geq 26,5^{\circ}C)$$

$$l = 12 (0,2 T_a)^{1,514} \quad \text{sendo } T_a = \text{temp. média anual normal}$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} l - 7,71 \cdot 10^{-5} l^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} l^3$$

$$ETP = ET_p * COR \quad (\text{mm/mês})$$

$$COR = N/12 * NDP/30 \quad \text{sendo } N = \text{fotoperíodo do mês em questão}$$

$$NDP = \text{dias do período em questão}$$

Método de Thornthwaite

Exemplo

Local: Piracicaba (SP) – latitude 22°42'S

Janeiro – Tmed = 24,4°C, N = 13,4h, NDP = 31 dias, Ta = 21,1°C

$$I = 12 (0,2 \cdot 21,1)^{1,514} = 106,15$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} (106,15) - 7,71 \cdot 10^{-5} (106,15)^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} (106,15)^3 = 2,33$$

$$ET_p = 16 (10 \cdot 24,4 / 106,15)^{2,33} = 111,3 \text{ mm/mês}$$

$$ETP = 111,3 * COR$$

$$COR = 13,4 / 12 * 31 / 30$$

$$ETP = 111,3 * 13,4 / 12 * 31 / 30 = 128,4 \text{ mm/mês}$$

$$ETP = 128,4 \text{ mm/mês ou } 4,14 \text{ mm/dia}$$

Método de Thornthwaite-Camargo – Temperatura Efetiva

É o método de Thornthwaite, porém adaptado por Camargo et al. (1999) para ser empregado em qualquer condição climática. Para tanto, utiliza-se uma temperatura efetiva (Tef), que expressa a amplitude térmica local, ao invés da temperatura média do ar. A vantagem é que nessa nova formulação a ETP não é mais subestimada em condições de clima seco. A desvantagem é que há agora necessidade de dados de Tmax e Tmin. Assim como no método original de Thornthwaite, esse método parte de uma ET padrão (ETp), a qual é a ET para um mês de 30 dias e com N = 12h. A formulação do método é a seguinte:

$$ETp = 16 (10 Tef/I)^a \quad (0 \leq Tef < 26,5^{\circ}C)$$

$$ETp = -415,85 + 32,24 Tef - 0,43 Tef^2 \quad (Tef \geq 26,5^{\circ}C)$$

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

$$I = 12 (0,2 Ta)^{1,514} \quad \text{sendo } Ta = \text{temp. média anual normal}$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

$$ETP = ETp * COR \quad (\text{mm/mês})$$

$$COR = N/12 * NDP/30 \quad \text{sendo } N = \text{fotoperíodo do mês em questão}$$

$$NDP = \text{dias do período em questão}$$

Método de Thornthwaite-Camargo – Temperatura Efetiva

Exemplo

Local: Piracicaba (SP) – latitude 22º42'S

Julho – Tmax = 26°C, Tmin = 13°C, N = 10,6h, NDP = 31 dias, Ta = 21,1°C

$$I = 12 (0,2 \cdot 21,1)^{1,514} = 106,15$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} (106,15) - 7,71 \cdot 10^{-5} (106,15)^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} (106,15)^3 = 2,33$$

$$Tef = 0,36 (3 \cdot 26 - 13) = 23,4^{\circ}\text{C}$$

$$ETp = 16 (10 \cdot 23,4 / 106,15)^{2,33} = 100,9 \text{ mm/mês}$$

$$ETP = 100,9 * \text{COR}$$

$$\text{COR} = 10,6/12 * 31/30$$

$$ETP = 100,9 * 10,6/12 * 31/30 = 92,1 \text{ mm/mês}$$

ETP = 92,1 mm/mês (3,0 mm/dia)

Utilizando-se Tmed \Rightarrow ETP = 60,2 mm/mês (1,9 mm/dia)

Método de Camargo

Método empírico, baseado no método de Thornthwaite. Sendo assim, apresenta as mesmas vantagens e restrições desse método. Apesar disso, tem uma vantagem a mais que é não necessitar da temperatura média anual normal. No entanto, considera a irradiância solar extraterrestre (Qo), a qual é fornecida por tabelas.

$$ETP = 0,01 * Qo * Tmed * NDP$$

Qo = irradiância solar extraterrestre (mm/d)

Valores de Qo (mm/d) para latitudes Sul

Lat	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	14,5	15,0	15,2	14,7	13,9	13,4	13,5	14,2	14,9	14,9	14,6	14,3
10	15,9	15,7	15,0	13,8	12,4	11,6	11,9	13,0	14,4	15,3	15,7	15,7
20	16,7	16,0	14,5	12,4	10,6	9,6	10,0	11,5	13,5	15,3	16,2	16,8
30	17,2	15,7	13,5	10,8	8,5	7,4	7,8	9,6	12,2	14,7	16,7	17,6

Método de Camargo

Exemplo

Local: Piracicaba (SP) – latitude 22º42'S

Janeiro – Tmed = 24,4ºC, Qo = 16,9 mm/d, NDP = 31 dias

$$\text{ETP} = 0,01 * 16,9 * 24,4 * 31 = 127,8 \text{ mm/mês (4,12 mm/d)}$$

Método de Hargreaves & Samani

Método empírico, desenvolvido para a região de clima seco. Baseia-se na temperatura média do ar e na amplitude térmica. Tem como vantagem a sua aplicabilidade em climas áridos e semi-áridos, como no nordeste do Brasil. A desvantagem é sua limitação de uso para tais condições, apresentando super-estimativa em climas úmidos.

$$\text{ETP} = 0,0023 * \text{Qo} * (\text{Tmax} - \text{Tmin})^{0,5} * (17,8 + \text{Tmed}) * \text{NDP}$$

Qo = irradiância solar extraterrestre (mm/d)

Método de Hargreaves & Samani

Exemplo

Local: Piracicaba (SP) – latitude 22°42'S

Jan – Tmed = 24,4°C, Tmax = 32°C, Tmin = 18,8°C, Qo = 16,9 mm/d, NDP = 31 dias

$$\text{ETP} = 0,0023 * 16,9 * (30 - 18,8)^{0,5} * (24,4 + 17,8) * 31 = 170,2 \text{ mm/mês (5,5 mm/d)}$$

Jul – Tmed = 19,5°C, Tmax = 26°C, Tmin = 13°C, Qo = 9,6 mm/d, NDP = 31 dias

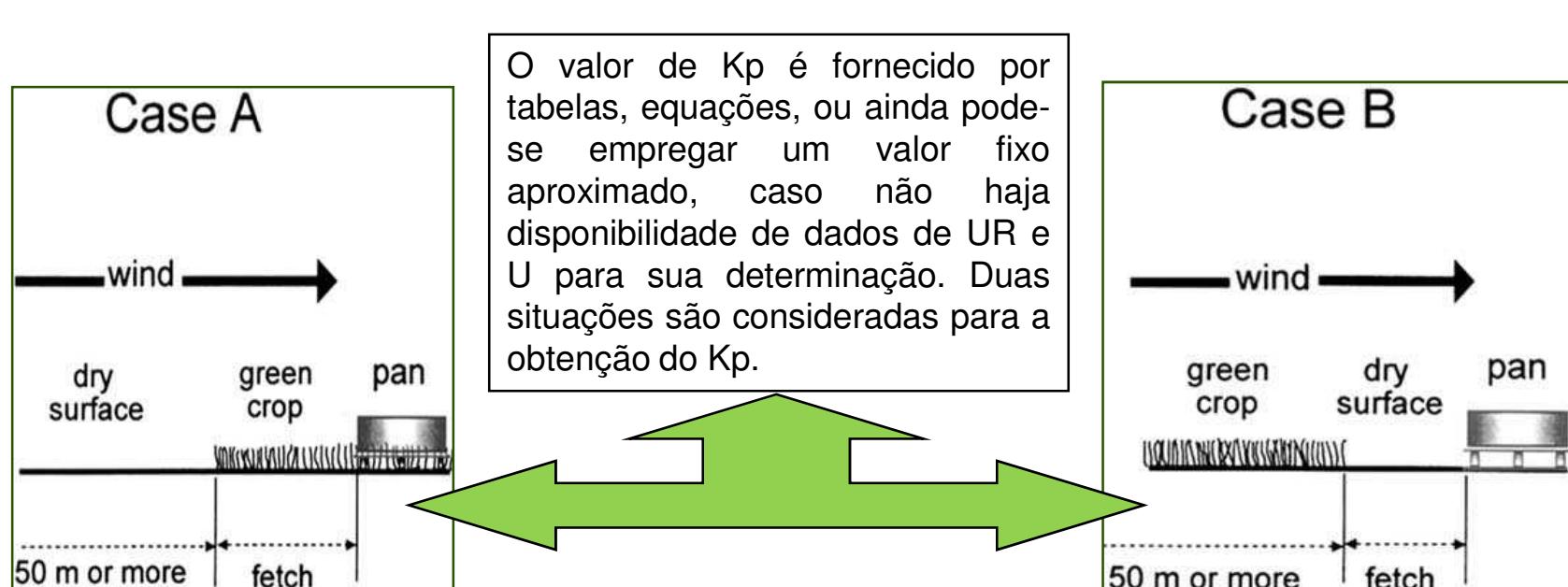
$$\text{ETP} = 0,0023 * 9,6 * (26 - 13)^{0,5} * (19,5 + 17,8) * 31 = 92,0 \text{ mm/mês (3,0 mm/d)}$$

OBS: Observe que para o mês úmido (janeiro) em Piracicaba, o método de H&S superestimou a ETP em relação aos demais métodos. Por outro lado, no período seco do ano (julho), o método apresentou um resultado muito próximo do obtido pelo método de Thornthwaite-Camargo-Tef, mostrando sua boa estimativa para tais condições.

Método do Tanque Classe A

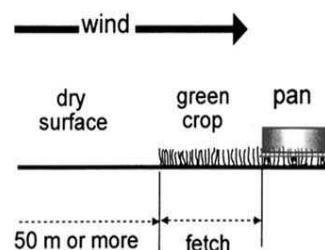
Método empírico, baseado na proporcionalidade existente a evaporação de água do tanque classe A (ECA) e a ETP, visto que ambas dependem exclusivamente das condições meteorológicas. A conversão de ECA em ETP depende de um coeficiente de proporcionalidade, denominado coeficiente do tanque (K_p). K_p depende por sua vez de uma série de fatores, sendo os principais o tamanho da bordadura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento.

$$\text{ETP} = \text{ECA} * K_p$$



Valores de K_p para o Caso A

Case A

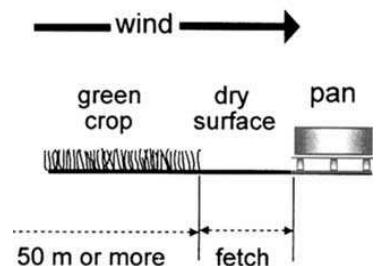


Vento (km/d)	Bordadura	<40%	UR	
			40 a 70%	>70%
Leve (<175)	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
Moderado (175 a 425)	1000	0,75	0,85	0,85
	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80

Vento (km/d)	Bordadura	<40%	UR	
			40 a 70%	>70%
Leve (<175)	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,55	0,65	0,75
Moderado (175 a 425)	1000	0,50	0,60	0,70
	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,45	0,55	0,60

Valores de K_p para o Caso B

Case B



Além das tabelas, Kp pode ser determinado pela seguinte equação:

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

B = bordadura, em m; U = velocidade do vento, em km/d;
UR = umidade relativa do ar, em %

Além disso pode-se adotar um valor fixo de Kp, quando não se dispõe dos dados de B, U e UR:

$$Kp = 0,7 \text{ a } 0,8$$

Método do Tanque Classe A

Exemplo

Local: Piracicaba (SP) – latitude 22°42'S

25/02/2001 – ECA = 5,6 mm/d, UR = 68%, U = 2,0 m/s (172,8 km/d), B = 10m

Kp Tabelado para o Caso A – Kp = 0,75 \Rightarrow ETP = 0,75 * 5,6 = 4,2 mm/d

Método do Priestley-Taylor

Método físico, baseado no método original de Penman. O método de P&T considera que a ETP proveniente do termo aerodinâmico, ou seja, do poder evaporante do ar, é uma porcentagem da ETP condicionada pelo termo energético. Assim, mesmo levando em consideração o balanço de energia, esse método apresenta um componente empírico.

$$\text{ETP} = 1,26 \ W (Rn - G) / \lambda$$

Rn = saldo de radiação (MJ/m²d)

G = Fluxo de calor no solo = 0,03 Rn (MJ/m²d)

W = 0,407 + 0,0145 T (para 0°C < T < 16°C)

W = 0,483 + 0,01 T (para T > 16°C)

λ = 2,45 MJ/kg

Exemplo

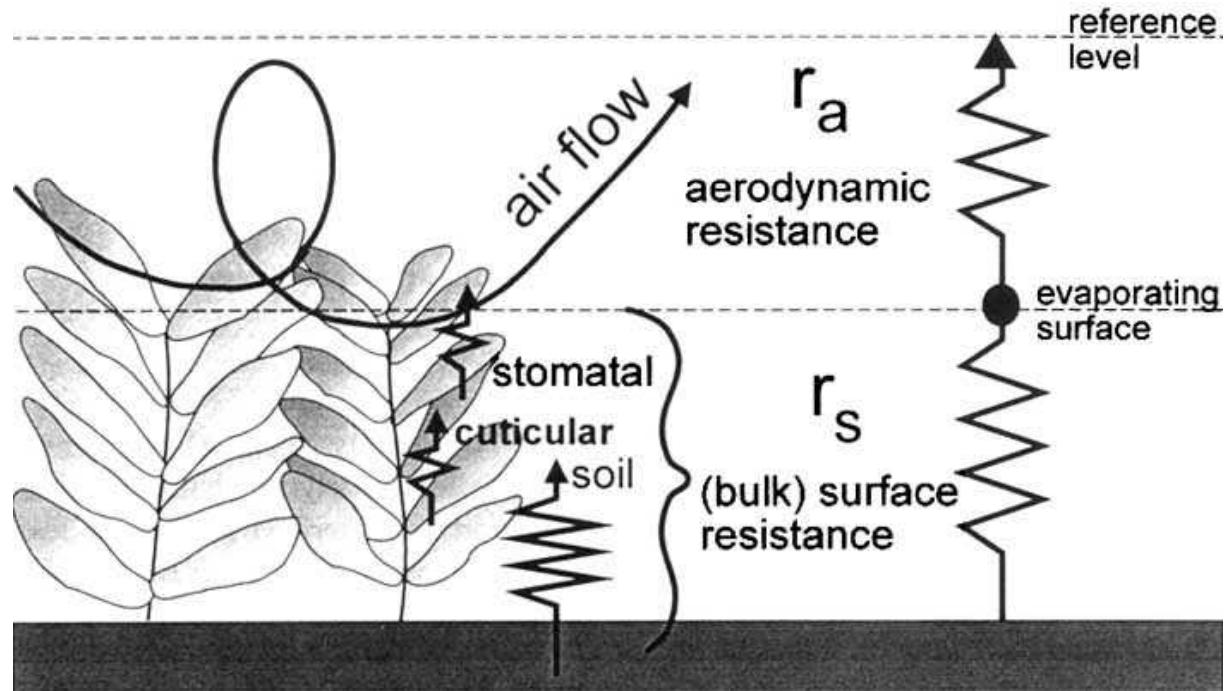
Local: Piracicaba (SP) – latitude 22°42'S

25/02/2001 – Rn = 15 MJ/m²d, G = 0,45 MJ/m²d, Tmed = 25°C (W = 0,733)

$$\text{ETP} = 1,26 * 0,733 * (15 - 0,45) / 2,45 \Rightarrow \text{ETP} = 5,5 \text{ mm/d}$$

Método do Penman-Monteith

Método físico, baseado no método original de Penman. O método de PM considera que a ETP é proveniente dos termo energético e aerodinâmico, os quais são controlados pelas resistências ao transporte de vapor da superfície para a atmosfera. As resistências são denominadas de resistência da cobertura (r_s) e resistência aerodinâmica (r_a). Para a cultura padrão, $r_s = 70$ s/m.



A figura acima mostra o conjunto de resistências que controlam o transporte de vapor para a atmosfera. A r_s é o conjunto das resistências dos estômatos, cutícula e do solo.

Método do Penman-Monteith

$$\text{ETp} = [0,408 s (Rn - G) + \gamma 900/(T+273) U_{2m} \Delta e] / [s + \gamma (1 + 0,34 U_{2m})]$$

$$s = (4098 es) / (237,3 + T)^2$$

$$es = (es^{T_{\max}} + es^{T_{\min}}) / 2$$

$$es^T = 0,611 * 10^{[(7,5*T)/(237,3+T)]}$$

$$ea = (UR_{\text{med}} * es) / 100$$

$$UR_{\text{med}} = (UR_{\max} + UR_{\min})/2$$

$$T = (T_{\max} + T_{\min})/2$$

Método do Penman-Monteith

Dia 30/09/2004

$R_n = 8,5 \text{ MJ/m}^2\text{d}$, $G = 0,8 \text{ MJ/m}^2\text{d}$, $T_{max} = 30^\circ\text{C}$, $T_{min} = 18^\circ\text{C}$, $U_{2m} = 1,8 \text{ m/s}$,
 $UR_{max} = 100\%$ e $UR_{min} = 40\%$

$$es_{T_{max}} = 0,611 * 10^{[(7,5*30)/(237,3+30)]} = 4,24 \text{ kPa}$$

$$es_{T_{min}} = 0,611 * 10^{[(7,5*18)/(237,3+18)]} = 2,06 \text{ kPa}$$

$$es = (4,24 + 2,06)/2 = 3,15 \text{ kPa}$$

$$T = (30 + 18)/2 = 24^\circ\text{C}$$

$$s = (4098 * 3,15) / (237,3 + 24)^2 = 0,1891 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$$

$$UR_{med} = (100 + 40)/2 = 70\%$$

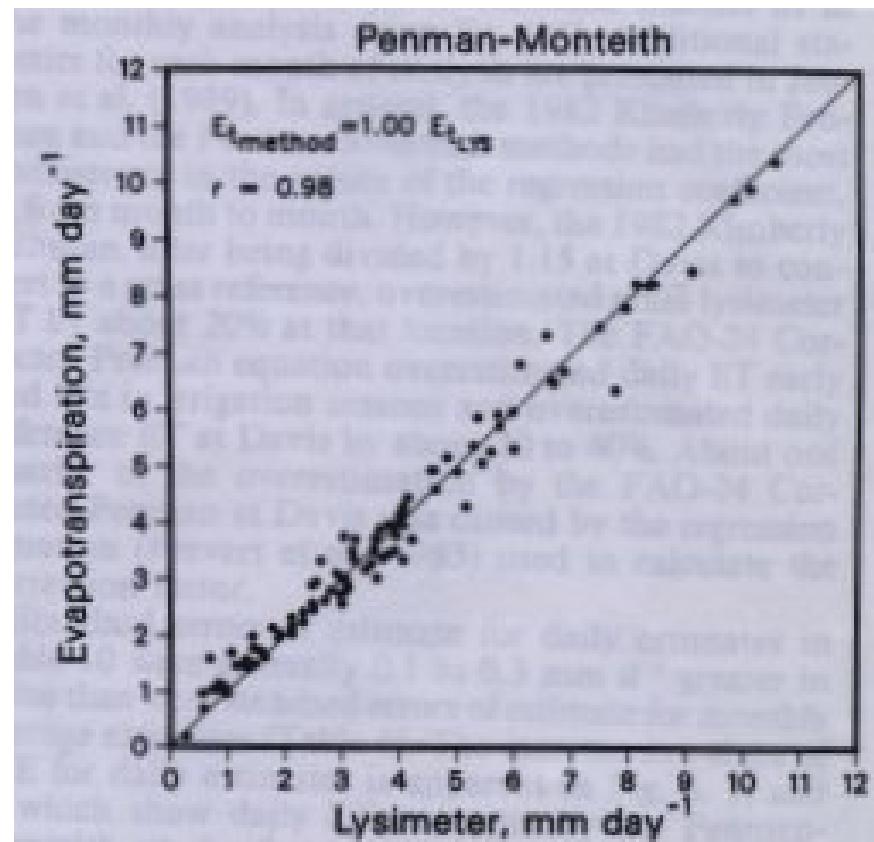
$$ea = (70 * 3,15)/100 = 2,21 \text{ kPa}$$

$$\Delta e = 3,15 - 2,21 = 0,94 \text{ kPa}$$

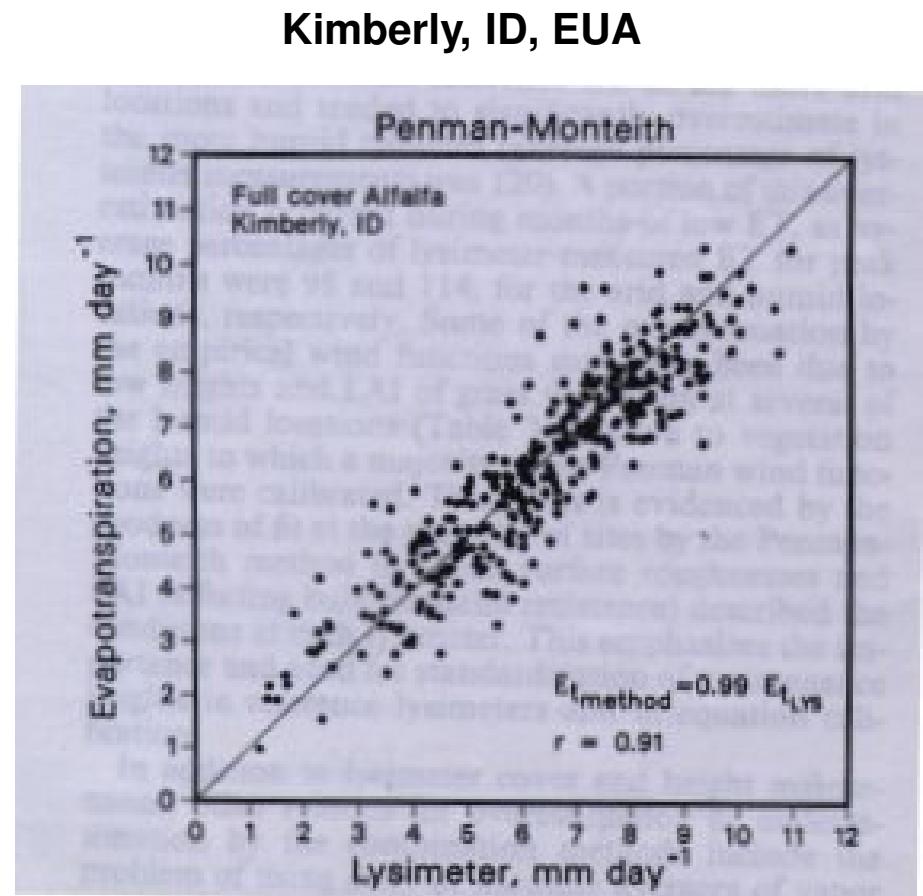
$$ETP = [0,408 * 0,1891 * (8,5 - 0,8) + 0,063 * 900 / (24 + 273) * 1,8 * 0,94] / [0,1891 + 0,063 * (1 + 0,34 * 1,8)]$$

$$\boxed{\mathbf{ETP = 3,15 \text{ mm/d}}}$$

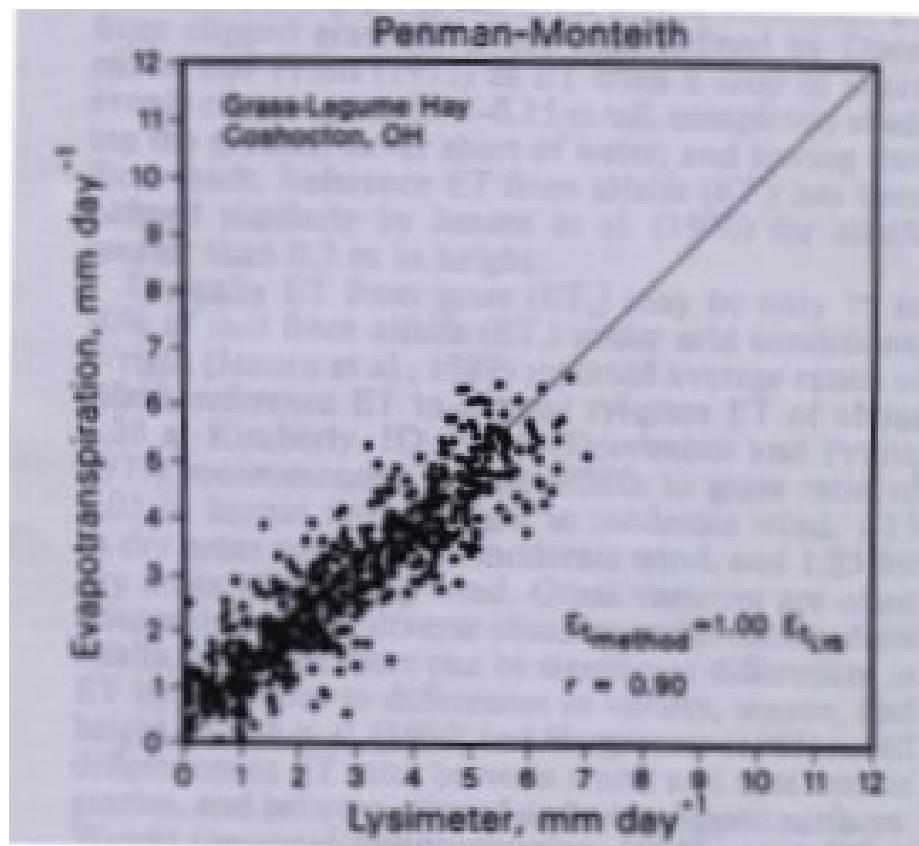
Avaliação do Método de Penman-Monteith para estimativa da ETo em diferentes condições climáticas



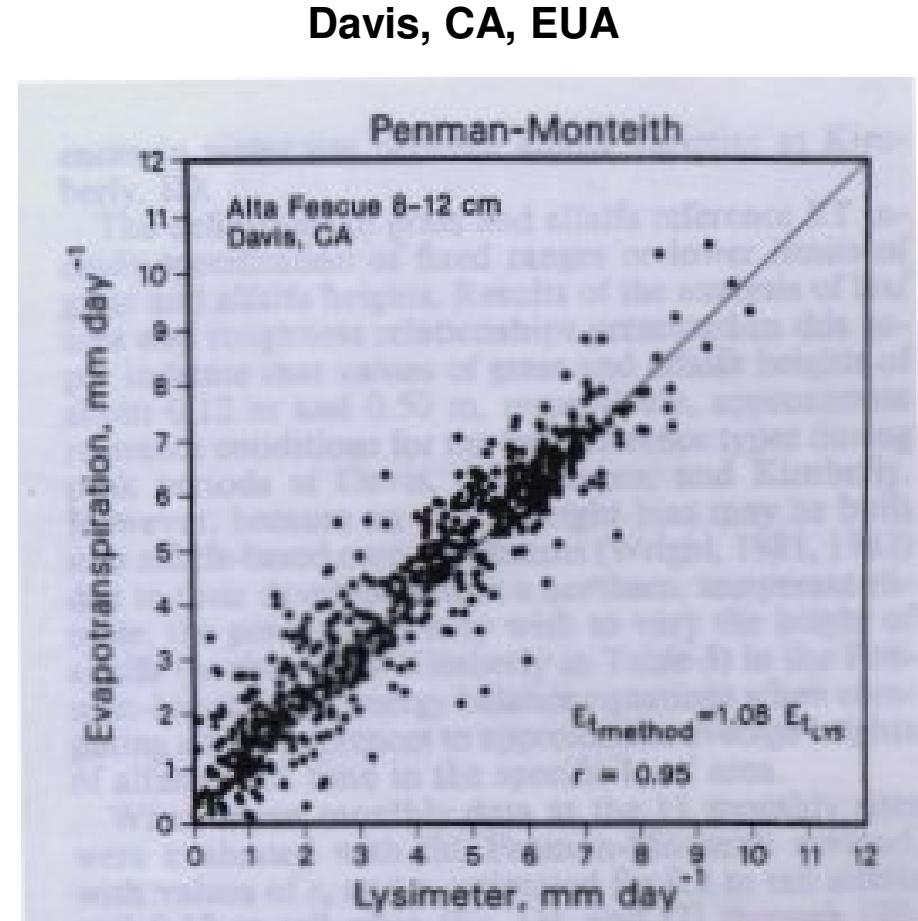
Média p/ 11 localidades nos EUA



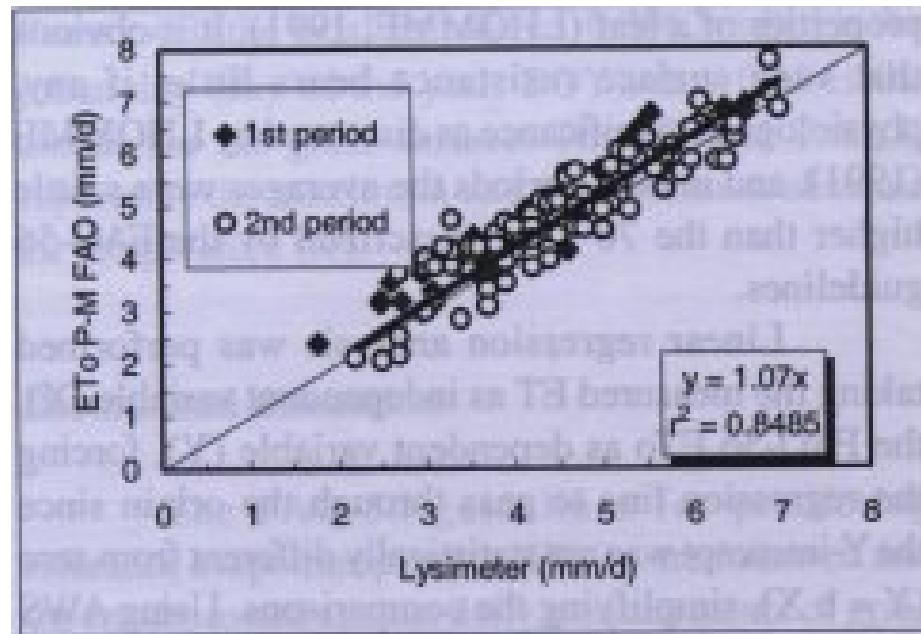
Avaliação do Método de Penman-Monteith para estimativa da ETo em diferentes condições climáticas



Coshocton, OH, EUA

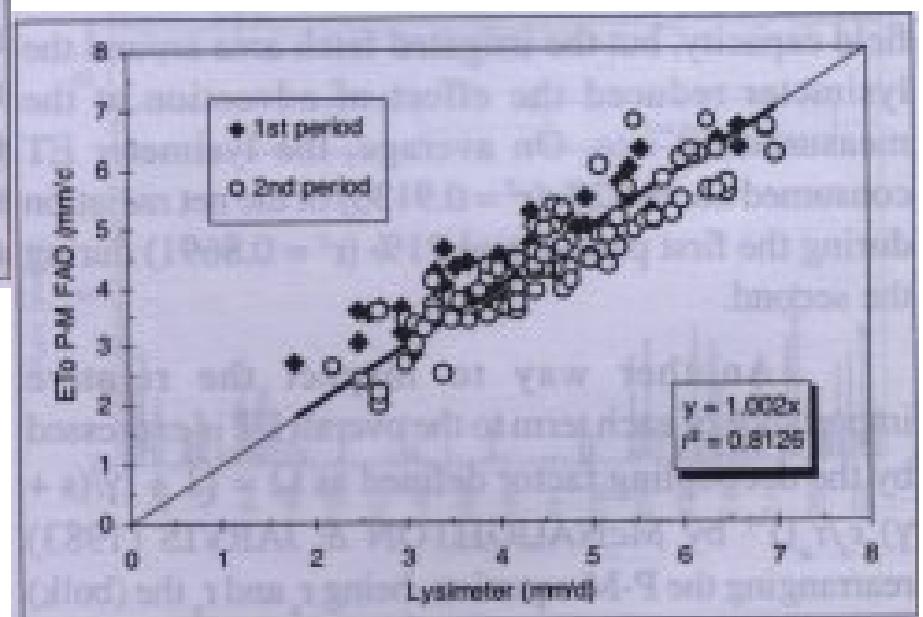


Avaliação do Método de Penman-Monteith para estimativa da ETo em diferentes condições climáticas



Piracicaba, SP
Com dados da estação automática

Piracicaba, SP
Com dados da estação convencional



Critérios para Escolha de um Método de Estimativa da ETP

A escolha de um método de estimativa para um determinado estudo deverá ser baseada nos seguintes aspectos:

- a) Disponibilidade de dados meteorológicos – este aspecto define o tipo de método que poderá ser empregado em determinado local. Os métodos empíricos que usam a temperatura do ar são os mais empregados, em função da temperatura ser uma variável facilmente disponível. Já o método de Penman-Monteith tem sua aplicação restrita às localidades que dispõe de todas as variáveis meteorológicas
- b) Condição climática do local – este aspecto deve ser considerado quando se optar pelos métodos empíricos já que normalmente esses tem sua aplicação restrita para climas secos ou climas úmidos. Já os métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor e tanque Classe A tem aplicação mais universal.
- c) Escala temporal das estimativas – o método de Thornthwaite foi concebido para estimativas mensais, não tendo sensibilidade para estimativas diárias. Por outro lado, os métodos físicos e o do tanque Classe A se aplicam bem à escala diária.

Teste rápido #8

- 1) Defina ETP, ETR, ETO, mostrando quais são os fatores que as condicionam. Faça um esquema gráfico mostrando esses três tipos de ET.
- 2) Liste todos os fatores determinantes da ET, relacionados ao clima, cultura e solo/práticas de manejo.
- 3) Comente a relação entre ET, demanda atmosférica, tipo de cultura e disponibilidade de água no solo.
- 4) Numa propriedade existe um tanque GGI3000 que fornece dados de EGII. Como vc faria para converter essa informação em ETP, se não houvesse nenhum outro equipamento nessa propriedade.
- 4) Vá ao site do DCE e entre na base de dados da estação convencional. Escolha um ano e obtenha os dados mensais de Tmed, Tmax e Tmin. Calcule os valores de ETP mensal usando os métodos de Thornthwaite-original e Thornthwaite-Camargo – Tef. Apresente os dados na forma gráfica e discuta-os.