



**Escola Politécnica**

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

**Universidade de São Paulo**

**PHA 3307**  
**Hidrologia Aplicada**

**Evaporação e Evapotranspiração**

**Aula 10**

Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mélo Jr.  
Prof. Dr. Joaquin I. B. Garcia

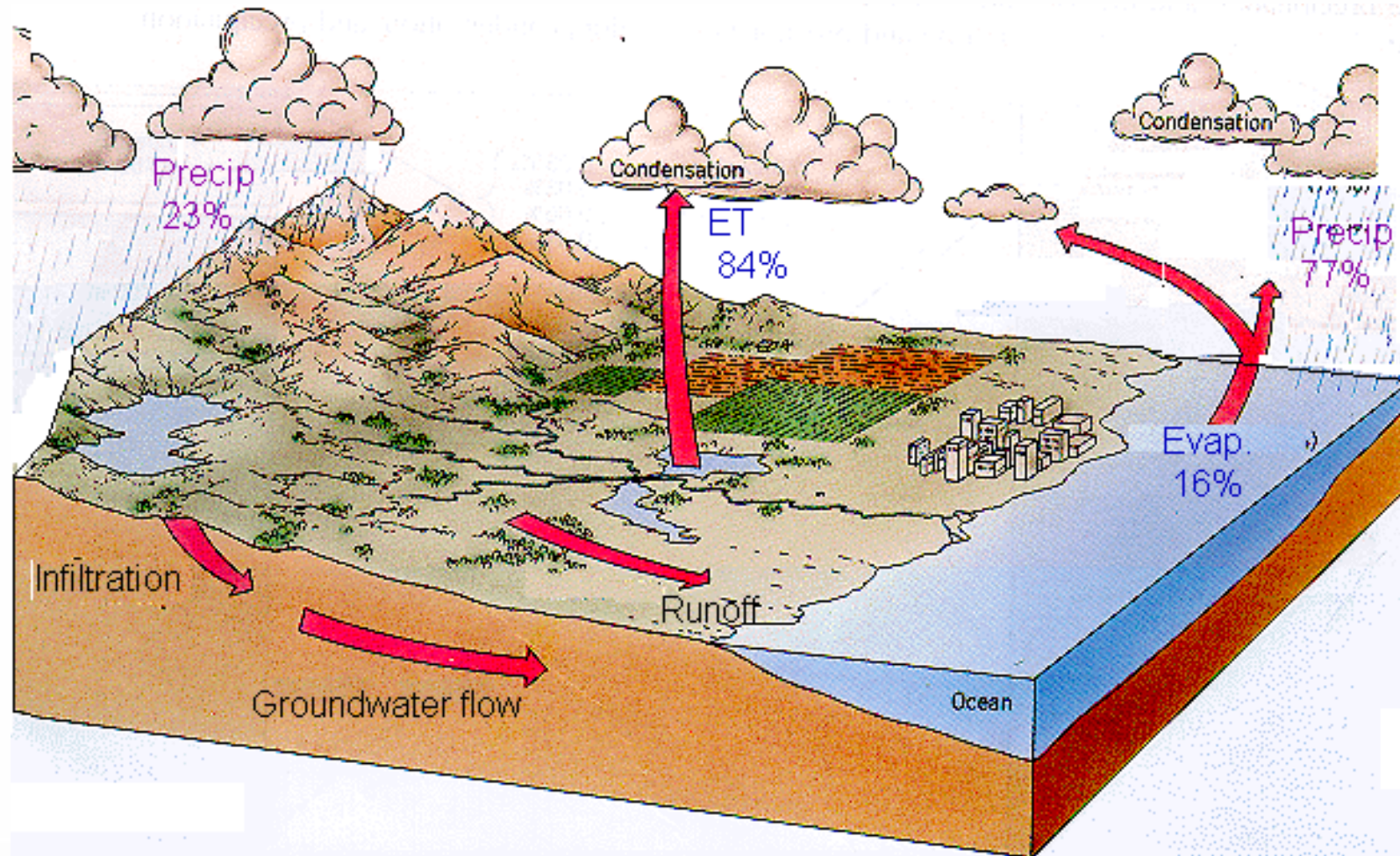
**LabSid**

Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões  
Recursos Hídricos e Meio Ambiente

1. Conhecer os processos de evaporação e transpiração.
2. Conhecer os métodos de medição de evaporação e evapotranspiração.
3. Conhecer os métodos de cálculo de evaporação e evapotranspiração.
4. Aplicar a equação de Blaney-Cridlle.



# Importância da ET no ciclo hidrológico





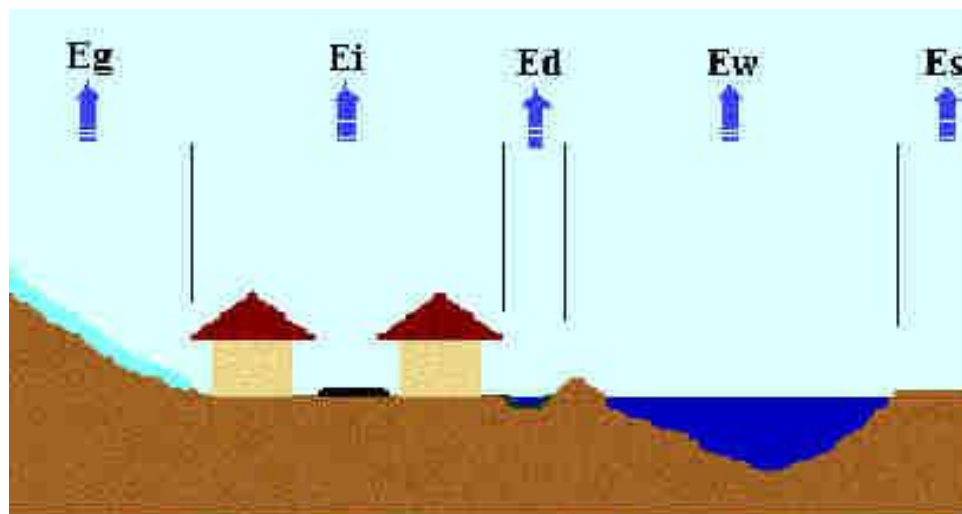
## Cálculo de Necessidades de Irrigação



## Perdas de Água em Reservatório



- É a transformação da água do estado líquido para o de vapor, a partir de uma superfície líquida, solo nu ou vegetação sobre solo.



$E_g$  = Evaporação de superfícies com neve ou glaciais;

$E_i$  = Evaporação de água interceptada em coberturas vegetais ou em construções;

$E_d$  = Evaporação de água não infiltrada em depressões do solo.

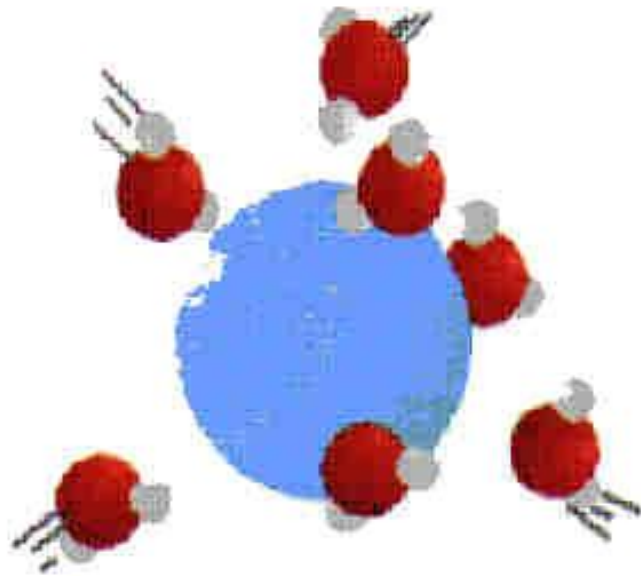
$E_w$  = Evaporação de superfícies de água;

$E_s$  = Evaporação do solo nu.

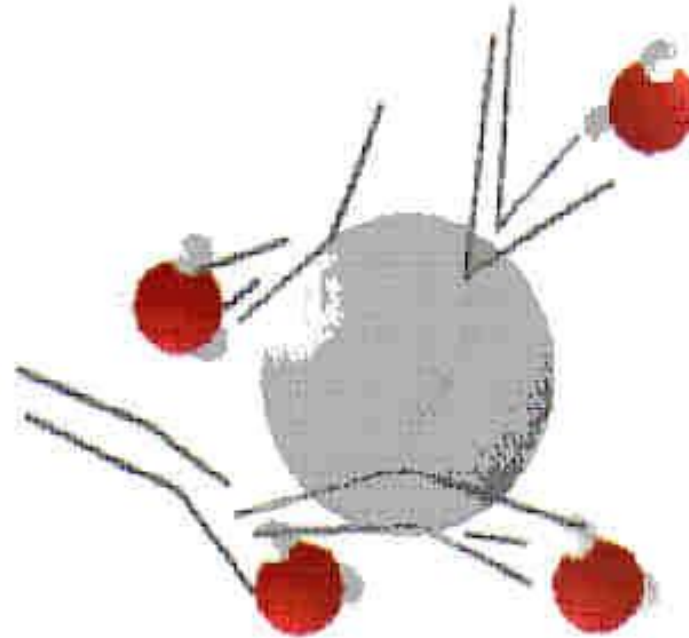


# Processo Físico da Evaporação

Água líquida  
(força de atração intermolecular)



Vapor D'água  
(calor latente de evaporação)



$$\lambda = 2,501 - 0,002361 \cdot T$$

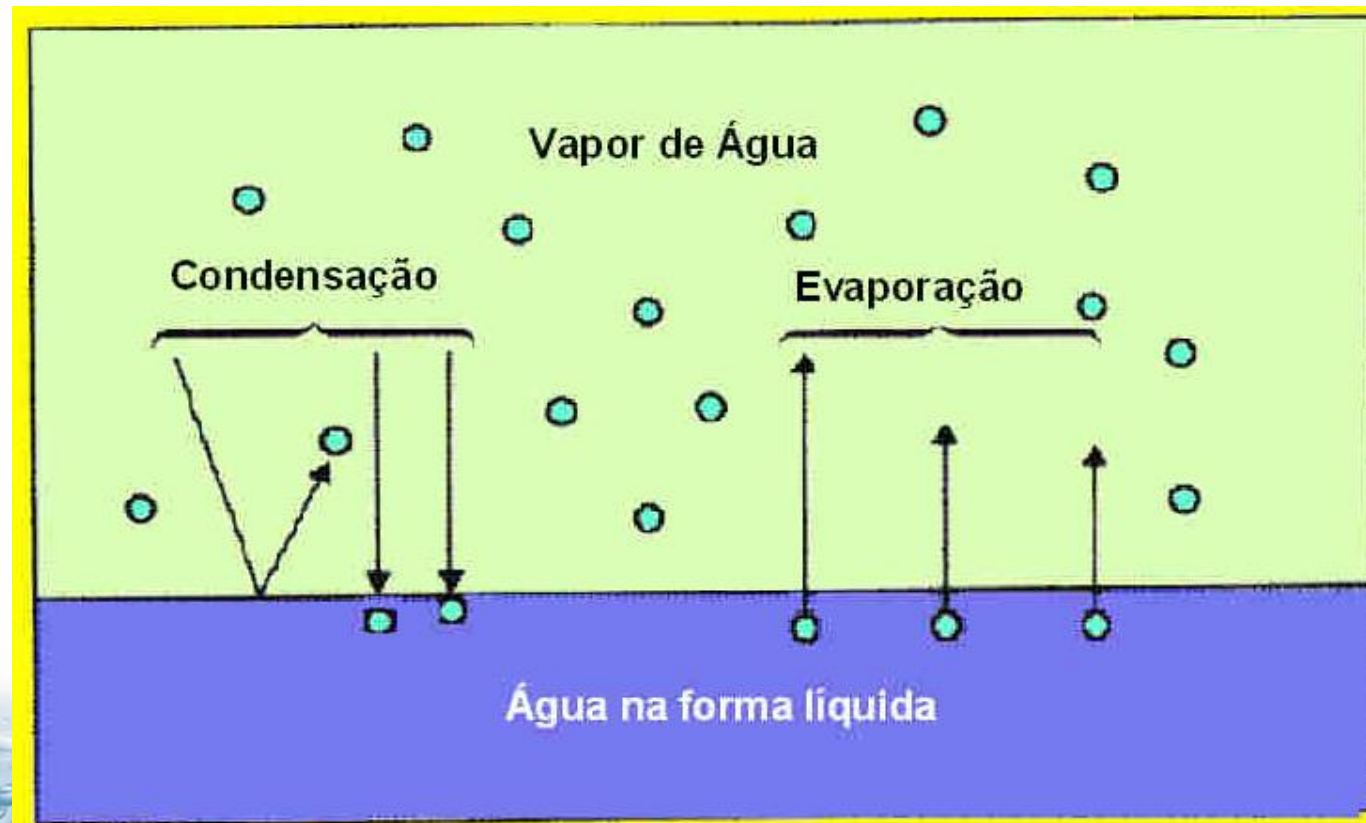
$\lambda$  - MJ/kg;  
T - °C

$$T = 100 \text{ °C } \lambda = 2,261 \text{ MJ/kg}$$



# Movimento da Molécula de Água entre as Superfícies da Água e o Ar <sup>7</sup>

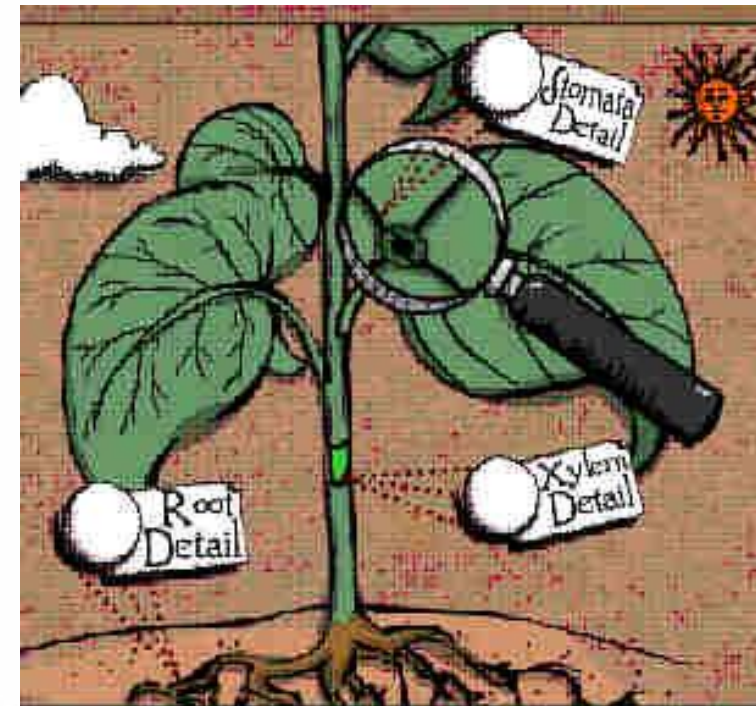
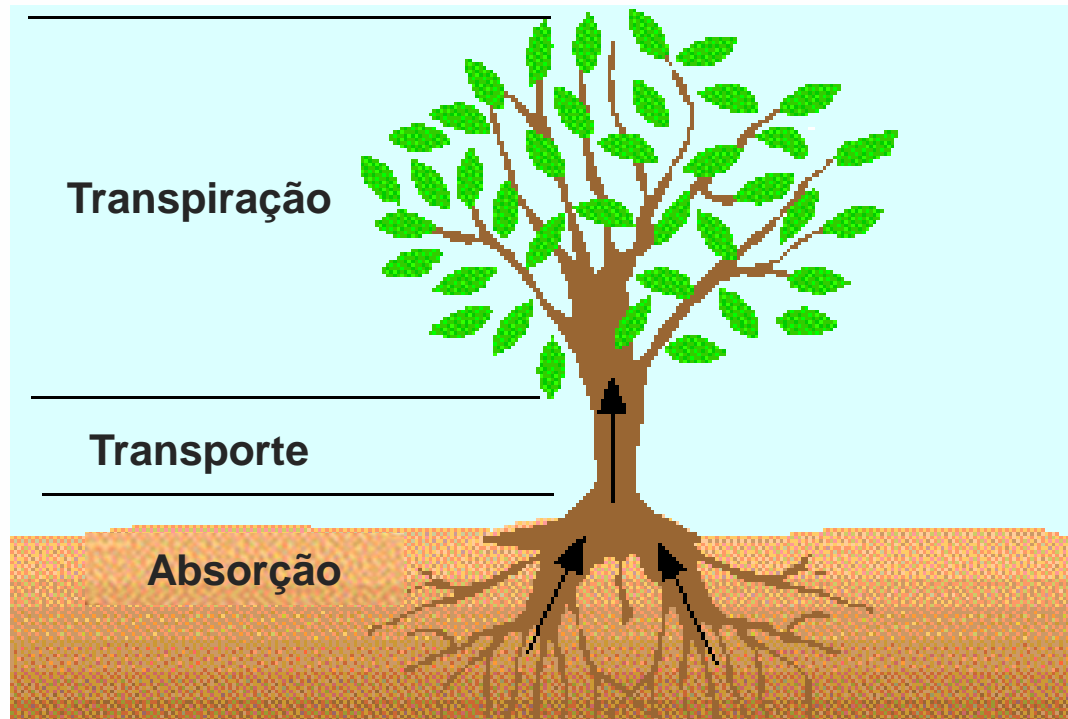
- Quando a taxa de saída de moléculas é maior que a de entrada está ocorrendo evaporação
- Quando as taxas de condensação e vaporização se igualam não há evaporação (o ar está saturado)



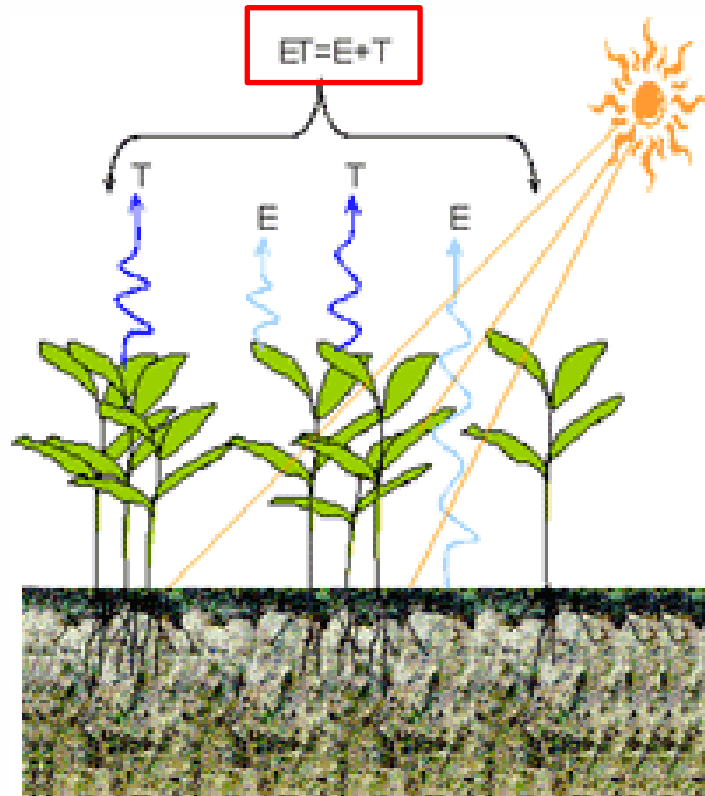


# Transpiração

- É a parte da evapotranspiração que vai para a atmosfera a partir do solo através das plantas







## ■ Fatores atmosféricos intervenientes

- Radiação solar
- Temperatura
- Umidade do ar
- Velocidade do vento

- As taxas de evaporação, transpiração e evapotranspiração são dadas em unidades de altura divididas por unidade de tempo : mm/dia, mm/mês, etc.

## Tanque Classe A - TCA



## Tanque GGI 3000



D = 61,8 cm

## Tanque 20 m<sup>2</sup> - T20



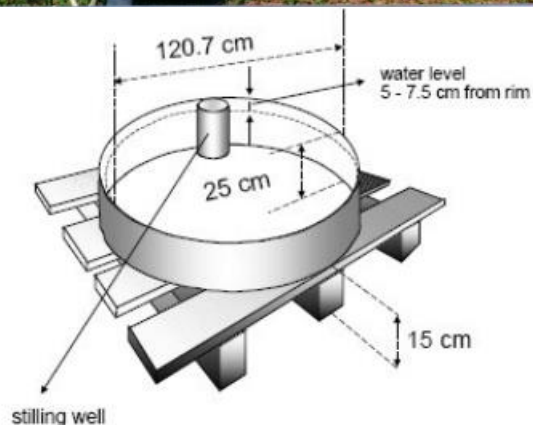
D = 5,05 m

- Menor volume de água armazenado
- Volume evaporado é maior que no T20

$$E_{T20} = 0,75 \cdot E_{TCA} = 0,85 \cdot E_{GGI}$$

Volpe e Oliveira (2003)

- Grande volume de água reduz o efeito de fatores externo
- Retirado o efeito da insolação nas laterais do tanque
- valores medidos são mais próximos dos reais observados em lagos







Fonte: Sabesp



- Método do Tanque Evaporimétrico
- Balanço de Massas ou Aerodinâmico
- Balanço de Energia
- Sensoriamento Remoto
- Equações Empíricas



- Correlaciona a evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) com a evaporação medida no tanque (E<sub>p</sub>)
- A superfície de água livre do tanque perde mais água do que uma cultura, por isso os valores de evaporação do tanque (E<sub>p</sub>) devem ser corrigidos

$$ET_p = E_t \cdot k_p$$

$$k_p = 0,482 + 0,024 \cdot \ln B - 0,00037 \cdot U + 0,0045 \cdot UR$$

K<sub>p</sub> - coeficiente do tanque, depende do tipo de tanque e de outros parâmetros meteorológicos

B - bordadura (m)

U - velocidade do vento (km/dia)

UR - umidade relativa (%)

Mês	k <sub>p</sub>
Janeiro	0,74
Fevereiro	0,80
Março	0,69
Abril	0,75
Mai	0,63
Junho	0,75
Julho	0,72
Agosto	0,69
Setembro	0,66
Outubro	0,80
Novembro	0,79
Dezembro	0,87

## Equação de Thornthwaite-Holzman (1939)

$$E_a = B \cdot (e_s - e_a)$$

$$B = \frac{0,622 \cdot K^2 \cdot \rho_a \cdot u_2}{p \cdot \rho_w \cdot \left[ \ln \frac{z_2}{z_0} \right]^2}$$

$$\rho_a = 3,486 \cdot \frac{p}{275 + T}$$

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp \left( \frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T} \right)$$

$$e_a = e_s - \lambda(T_{max} - T_{min})$$

$$\gamma = 0,0016286 \cdot \frac{p}{\lambda}$$

$$\lambda = 2,501 - 0,002361 \cdot T$$

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$E_a$  – evaporação, m

$K$  – constante de Von Karman (adm associado à velocidade sobre uma parede permeável, varia de 0,38 a 0,41; média = 0,4)

$\rho_a$  – densidade do ar, kg/m<sup>3</sup> (1,19 kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  – densidade da água, kg/m<sup>3</sup> (997 kg/m<sup>3</sup>)

$e_s$  – pressão de saturação de vapor, kPa

$e_a$  – pressão parcial de vapor do ar, kPa

$u_2$  – velocidade do vento numa elevação a partir da superfície, m/s

$p$  – pressão atmosférica, kPa

$z_2$  – altura a partir da superfície, m

$z_0$  – rugosidade, m (0,0003 m)

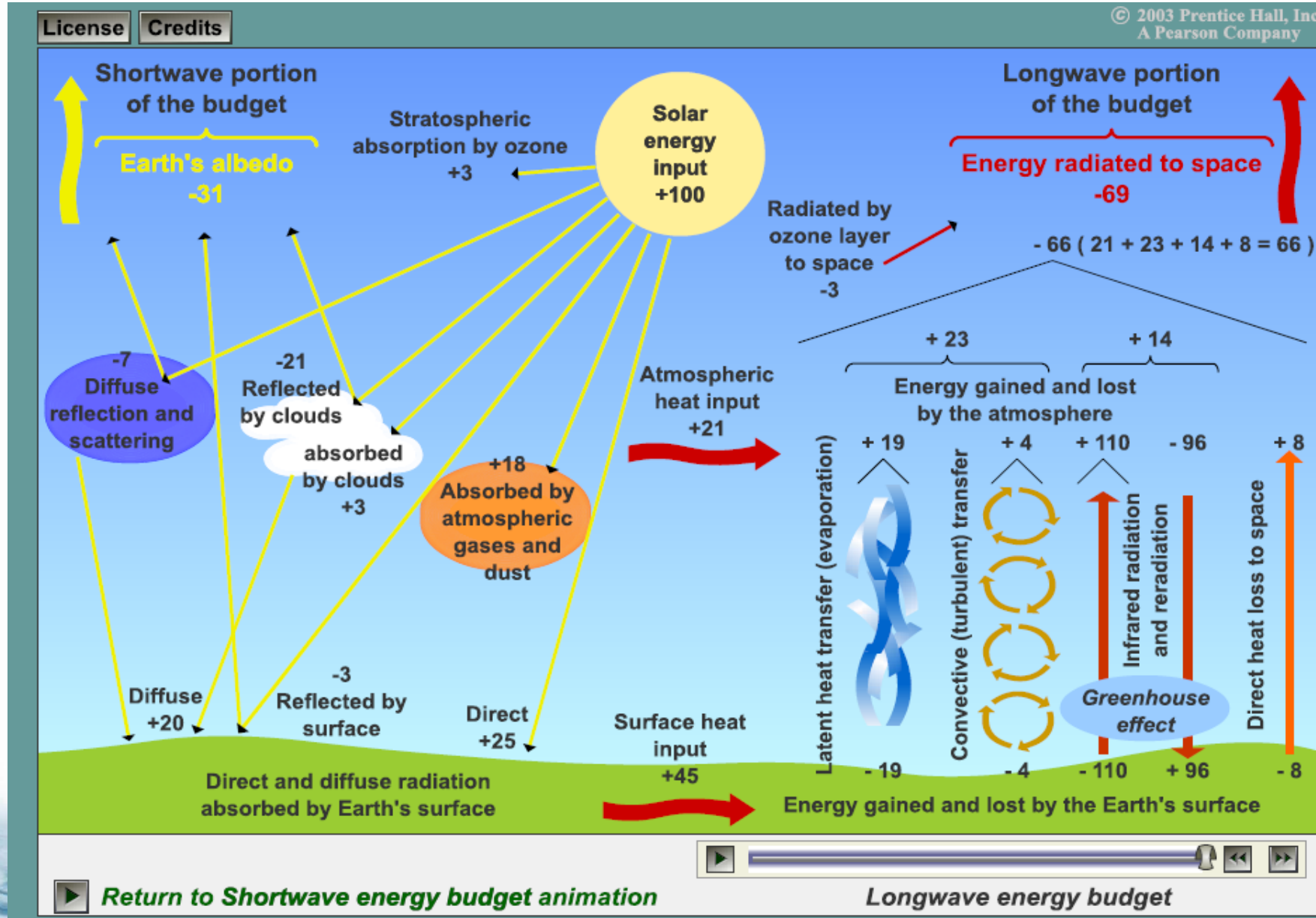
$T$  – temperatura do ar a 2 m (°C)

$\gamma$  – constante psicrométrica aerodinâmica (kPa/°C)

$\lambda$  – calor latente de vaporização (MJ/kg)



# Balanço de Energia - Equação de Penman



$$ET_p = \frac{0,408 \cdot (R_L - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(237,3 + T)^2}$$

$ET_p$  – evapotranspiração potencial (mm/dia)

$\Delta$  - Taxa de variação da  $e_s$  com a temperatura do ar ( kPa/°C)

$R_L$  – radiação líquida na superfície (MJ/m<sup>2</sup>.s)

$G$  – fluxo de energia para o solo (MJ/m<sup>2</sup>.s)

$u_2$  – velocidade do vento numa elevação a partir da superfície, m/s

$\gamma$  - constante psicrométrica aerodinâmica (kPa/°C)



- Combinação da evaporação da superfície do solo e da transpiração dos vegetais
- Fatores intervenientes
  - Suprimento de energia
  - Transporte de vapor
  - Suprimento de umidade para a superfície evaporativa

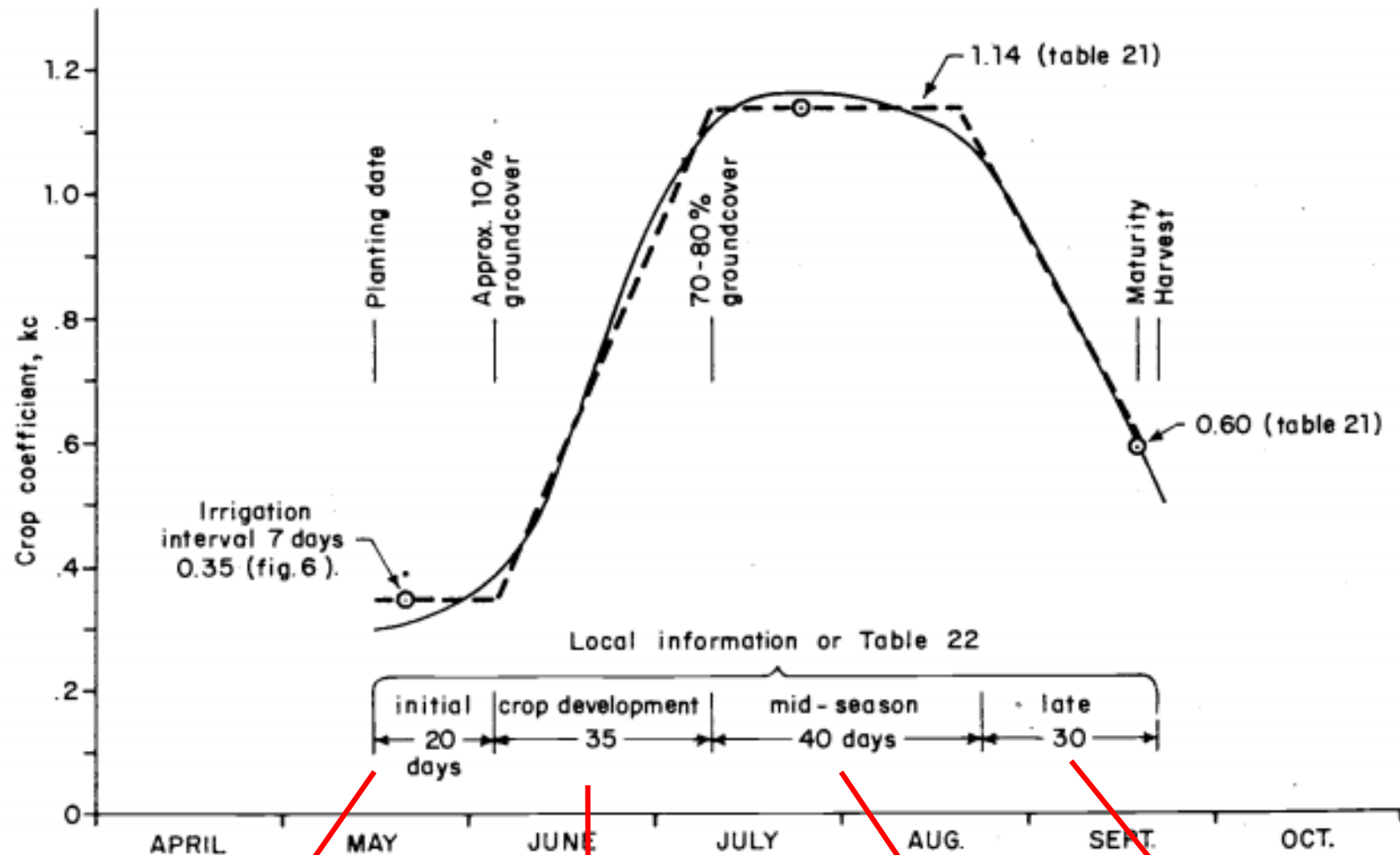
- **Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)**
  - Perda de água de uma superfície totalmente coberta com grama, em fase de crescimento ativo, bem suprida de umidade, no centro de uma área tampão irrigada
- **Evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>)**
  - Perda de água de uma superfície vegetada, em qualquer estágio de desenvolvimento, em condições não restritivas de umidade no solo
  - Representa a máxima perda de água da cultura
- **Evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>)**
  - Perda de água de uma superfície vegetada em quaisquer condições de vegetação e suprimento de água



- ET<sub>p</sub>: perda de água pelas culturas em diferentes situações e locais
- Devido a diferenças da interface cultura-atmosfera entre a grama e outras culturas, e em diferentes estágios de desenvolvimento, definiu-se relacionar a ET<sub>p</sub> com a ET<sub>o</sub> através de um coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>)

$$ET_p = ET_o \cdot k_c$$

# Curva Kc para culturas anuais



Emergência até 10% desenvolvimento vegetativo

10 a 80% de desenvolvimento vegetativo

80 a 100% desenvolvimento vegetativo

Maturação



# Coeficientes de Cultura ( Kc)

Coeficientes de Cultura ( Kc)

(Doorenbos e Kassam, 1979)

Cultura	I	II	III	IV	V	Período total de crescimento
<b>Banana</b>						
tropical	0.40 - 0.50	0.70 - 0.85	1.00 - 1.20	0.90 - 1.00	0.75 - 0.85	0.70 - 0.80
subtropical	0.50 - 0.65	0.80 - 0.90	1.00 - 1.20	1.00 - 1.15	1.00 - 1.15	0.85 - 0.95
<b>Feijão</b>						
verde	0.30 - 0.40	0.65 - 0.75	0.95 - 1.05	0.90 - 0.95	0.85 - 0.95	0.85 - 0.90
seco	0.30 - 0.40	0.70 - 0.80	1.05 - 1.20	0.65 - 0.75	0.25 - 0.30	0.70 - 0.80
<b>Repolho</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	0.95 - 1.10	0.90 - 1.00	0.80 - 0.95	0.70 - 0.80
<b>Algodão</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	1.05 - 1.25	0.80 - 0.90	0.65 - 0.70	0.80 - 0.90
<b>Amendoim</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	0.95 - 1.10	0.75 - 0.85	0.75 - 0.85	0.75 - 0.80
<b>Milho</b>						
verde	0.30 - 0.50	0.70 - 0.80	1.05 - 1.20	1.00 - 1.15	0.95 - 1.10	0.75 - 0.80
grãos	0.30 - 0.50	0.80 - 0.85	1.05 - 1.20	0.90 - 0.95	0.55 - 0.60	0.75 - 0.90
<b>Cebola</b>						
seca	0.40 - 0.60	0.70 - 0.80	0.95 - 1.10	0.85 - 0.90	0.75 - 0.85	0.80 - 0.90
verde	0.40 - 0.60	0.60 - 0.70	0.95 - 1.05	0.95 - 1.05	0.95 - 1.05	0.65 - 0.80
<b>Ervilha</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.85	1.05 - 1.20	1.00 - 1.15	0.95 - 1.10	0.80 - 0.95
<b>Pimenta</b>	0.30 - 0.40	0.60 - 0.75	0.95 - 1.10	0.85 - 1.00	0.80 - 0.90	0.70 - 0.80
<b>Batata</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	1.05 - 1.20	0.85 - 0.95	0.70 - 0.75	0.75 - 0.90
<b>Arroz</b>	1.10 - 1.15	1.10 - 1.10	1.10 - 1.10	0.95 - 1.05	0.95 - 1.05	1.05 - 1.20
<b>Açafrão</b>	0.30 - 0.40	0.70 - 0.80	1.05 - 1.20	0.65 - 0.70	0.20 - 0.25	0.65 - 0.70
<b>Sorgo</b>	0.30 - 0.40	0.70 - 0.75	1.00 - 1.15	0.75 - 0.80	0.50 - 0.55	0.75 - 0.85
<b>Soja</b>	0.30 - 0.40	0.70 - 0.80	1.00 - 1.15	0.70 - 0.80	0.40 - 0.50	0.75 - 0.90
<b>Beterraba</b>	0.40 - 0.50	0.75 - 0.85	1.05 - 1.20	0.90 - 1.00	0.60 - 0.70	0.80 - 0.90
<b>Cana de açúcar</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 1.00	1.00 - 1.20	0.75 - 0.80	0.50 - 0.60	0.85 - 1.05
<b>Fumo</b>	0.30 - 0.40	0.70 - 0.80	1.00 - 1.20	0.90 - 1.00	0.75 - 0.85	0.85 - 0.95
<b>Tomate</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	1.05 - 1.25	0.80 - 0.95	0.60 - 0.65	0.75 - 0.90
<b>Melancia</b>	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	0.95 - 1.05	0.80 - 0.90	0.65 - 0.75	0.75 - 0.85
<b>Trigo</b>	0.30 - 0.40	0.70 - 0.80	1.05 - 1.20	0.65 - 0.75	0.20 - 0.25	0.80 - 0.90
<b>Alfafa</b>	0.30 - 0.40	----	----	----	1.05 - 1.20	0.85 - 1.05

1- Intervalo inferior: sob alta umidade ( > 70%) e vento fraco ( v < 5m/s)

2- Intervalo superior: sob baixa umidade ( Min < 20%) e vento forte ( v > 5m/s)

- Se houver água disponível no solo e o fluxo de água na planta atender à demanda atmosférica:  $E_{Tr} = E_{Tp}$
- Se houver restrição de água no solo e a demanda atmosférica não for atendida:  $E_{Tr} < E_{Tp}$  (produção será afetada).
- $E_{Tp}$  é utilizada para calcular a demanda climática máxima de uma cultura em projetos de irrigação.



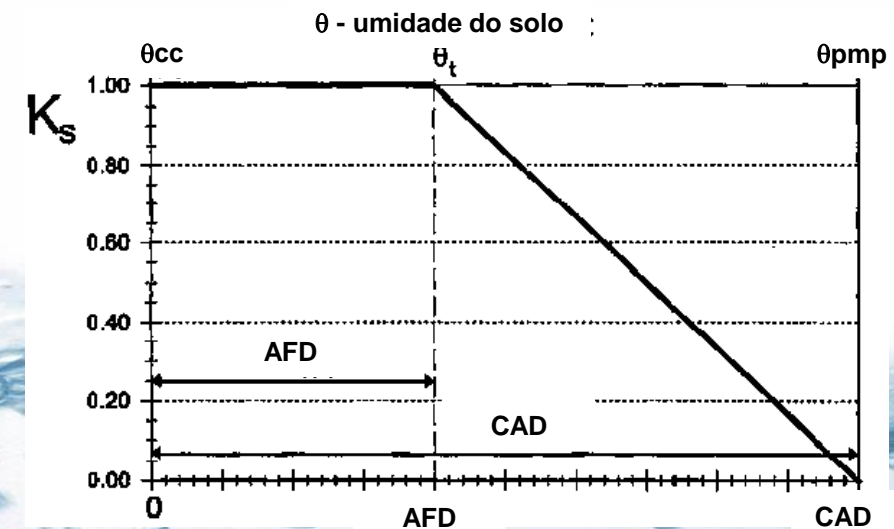
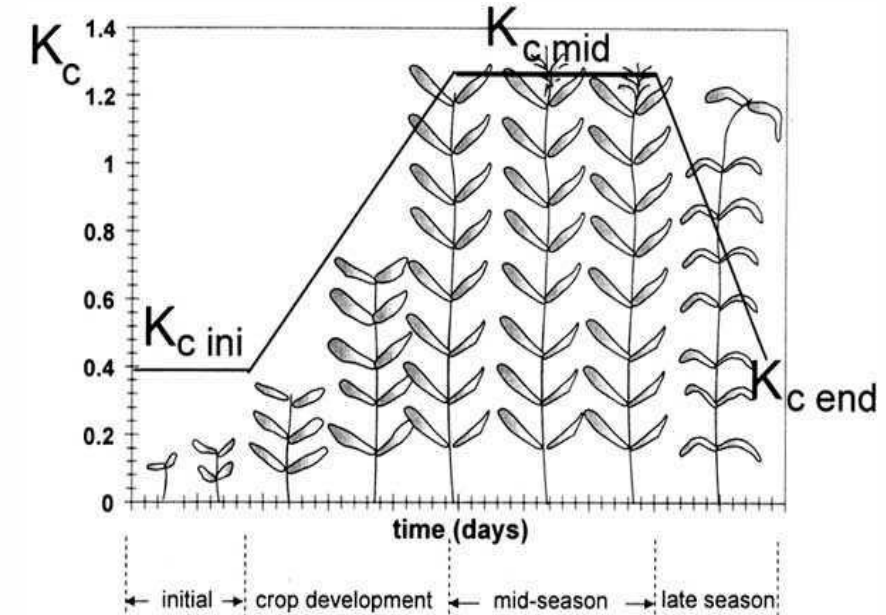
## Porcentagem de redução de ET com a umidade do solo ( $K_s$ )

$E_{Tr}$  é a evapotranspiração nas mesmas condições de contorno de  $E_{Tp}$ , porém, com ou sem restrição hídrica. Nesse caso:  $E_{Tr} \leq E_{Tp}$

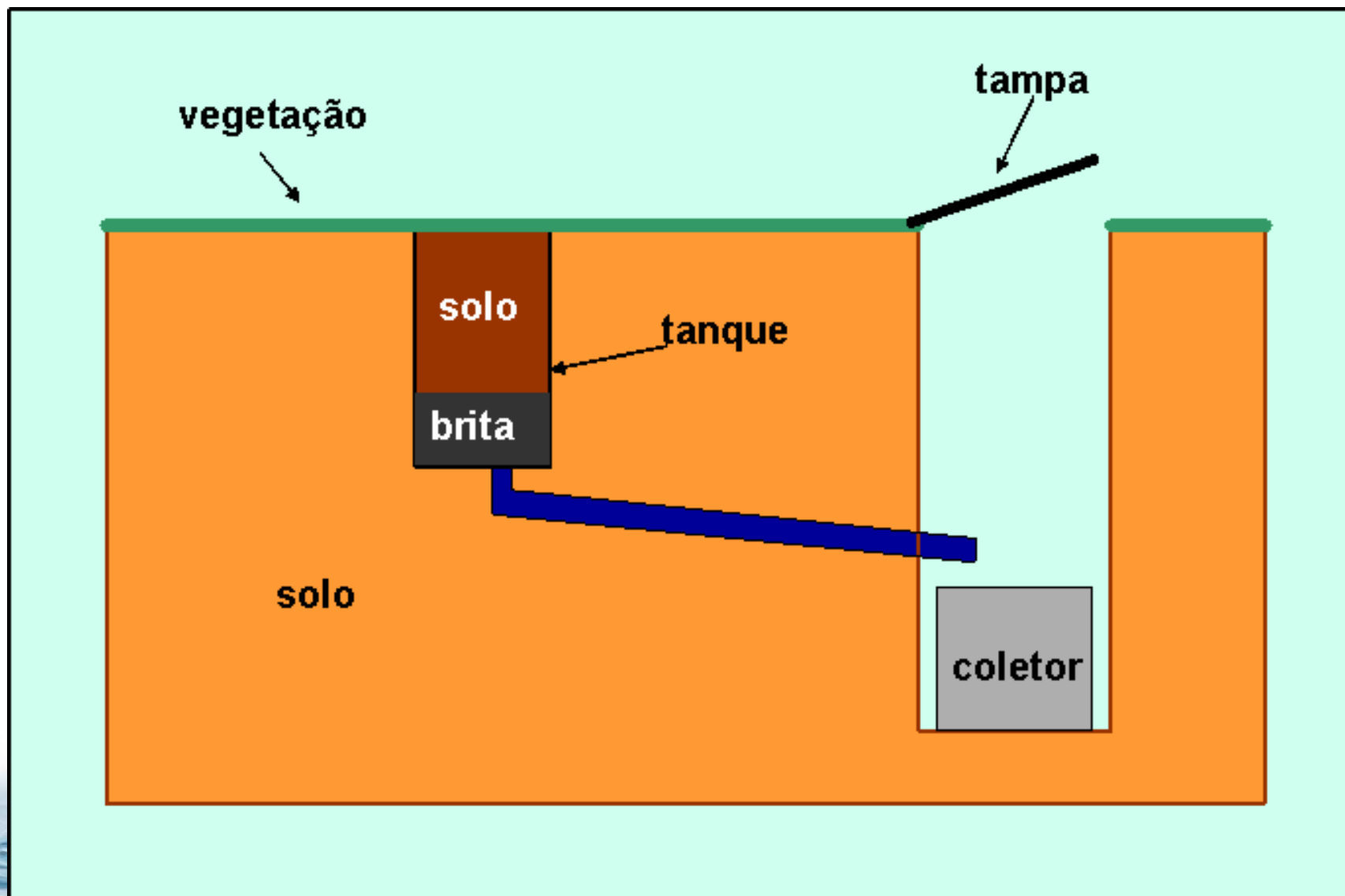
$$E_{Tp} = E_{To} \cdot k_c$$

$$E_{Tr} = E_{Tp} \cdot K_s$$

$$E_{Tr} = E_{To} \cdot k_c \cdot k_s$$



## Lisímetro



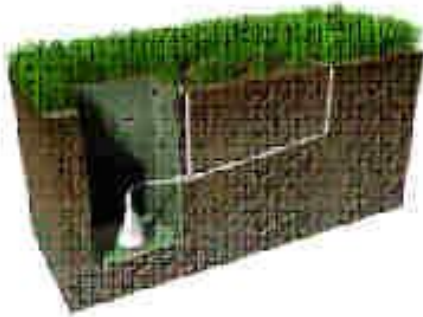


## Lisímetros

Lysimeter Types



Weighing



Zero-tension



Tension

©The COMET Program



- Método do Tanque Evaporimétrico
- Balanço de Massas ou Aerodinâmico
- Balanço de Energia
- Sensoriamento Remoto
- Equações Empíricas
  - Thornthwaite
  - Blaney Criddle
  - Hargreaves
  - Papadakis
  - Hamon
  - Outras



# Equação de Blaney-Criddle

$$ET_r = k_c \cdot p \cdot (0,46 \cdot t + 8,13)$$

ET<sub>r</sub> = Uso Consuntivo da cultura (mm/mês)

k<sub>c</sub> = coeficiente de cultura (adimensional)

p = percentagem mensal de horas de insolação em relação ao total anual (%)

t = temperatura média mensal do ar (°C)

Latitude South	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
0°	8.49	7.67	8.49	8.22	8.49	8.22	8.49	8.49	8.19	8.49	8.22	8.49
2°	8.55	7.71	8.49	8.19	8.44	8.17	8.43	8.44	8.19	8.52	8.27	8.55
4°	8.64	7.76	8.50	8.17	8.39	8.08	8.20	8.41	8.19	8.56	8.33	8.65
6°	8.71	7.81	8.50	8.12	8.30	8.00	8.19	8.37	8.18	8.59	8.38	8.74
8°	8.79	7.84	8.51	8.11	8.24	7.91	8.13	8.32	8.18	8.62	8.47	8.84
10°	8.85	7.86	8.52	8.09	8.18	7.84	8.11	8.28	8.18	8.65	8.52	8.90
12°	8.91	7.91	8.53	8.06	8.15	7.79	8.08	8.26	8.17	8.67	8.58	8.95
14°	8.97	7.97	8.54	8.03	8.07	7.70	7.08	8.19	8.16	8.69	8.65	9.01
16°	9.09	8.02	8.56	7.98	7.96	7.57	7.94	8.14	8.14	8.76	8.72	9.17
18°	9.18	8.06	8.57	7.93	7.99	7.50	7.88	8.90	8.14	8.80	8.80	9.24
20°	9.25	8.09	8.58	7.92	7.83	7.41	7.73	8.05	8.13	8.83	8.85	9.32
22°	9.36	8.12	8.58	7.89	7.74	7.30	7.76	8.03	8.13	8.86	8.90	9.38
24°	9.44	8.17	8.59	7.87	7.60	7.24	7.58	7.99	8.12	8.89	8.96	9.47
26°	9.52	8.28	8.00	7.81	7.56	7.07	7.49	7.87	8.11	8.94	9.10	9.61
28°	9.61	8.31	8.61	7.79	7.49	6.99	7.40	7.85	8.10	8.97	9.19	9.74
30°	9.69	8.33	8.63	7.75	7.43	6.94	7.30	7.80	8.09	9.00	9.24	9.80
32°	9.76	8.36	8.64	7.70	7.39	6.85	7.20	7.73	8.08	9.04	9.31	9.87
34°	9.88	8.41	8.65	7.68	7.30	6.73	7.10	7.69	8.06	9.07	9.38	9.99
36°	10.06	8.53	8.67	7.61	7.10	6.59	6.99	7.59	8.06	9.15	9.51	10.21
38°	10.14	8.61	8.68	7.59	7.03	6.46	6.87	7.51	8.05	9.19	9.60	10.34
40°	10.24	8.65	8.70	7.54	6.96	6.33	6.73	7.46	8.04	9.23	9.69	10.42
42°	10.39	8.72	8.71	7.49	6.85	6.20	6.60	7.39	8.01	9.27	9.79	10.57
44°	10.52	8.81	8.72	7.44	6.73	6.04	6.45	7.30	8.00	9.34	9.91	10.72
46°	10.68	8.88	8.73	7.39	6.61	5.87	6.30	7.21	7.98	9.41	10.03	10.90
48°	10.85	8.98	8.76	7.32	6.45	5.69	6.13	7.12	7.96	9.47	10.17	11.09
50°	11.03	9.06	8.77	7.25	6.31	5.48	5.98	7.03	7.95	9.53	10.32	11.30

Fonte: Blaney e Criddle (1962)

A Fazenda Bela Vista, situada no centro geográfico do Estado de São Paulo (Latitude  $22^{\circ}$  S), deseja irrigar 200 ha de algodão ( $K_c = 0.65$ ).

A figura e a tabela mostram a relação entre a "chuva efetiva" (quantidade de água efetivamente aproveitada pela planta) em função da chuva mensal. A tabela de cálculo mostra as principais características climáticas de interesse.



## Curva de Infiltração

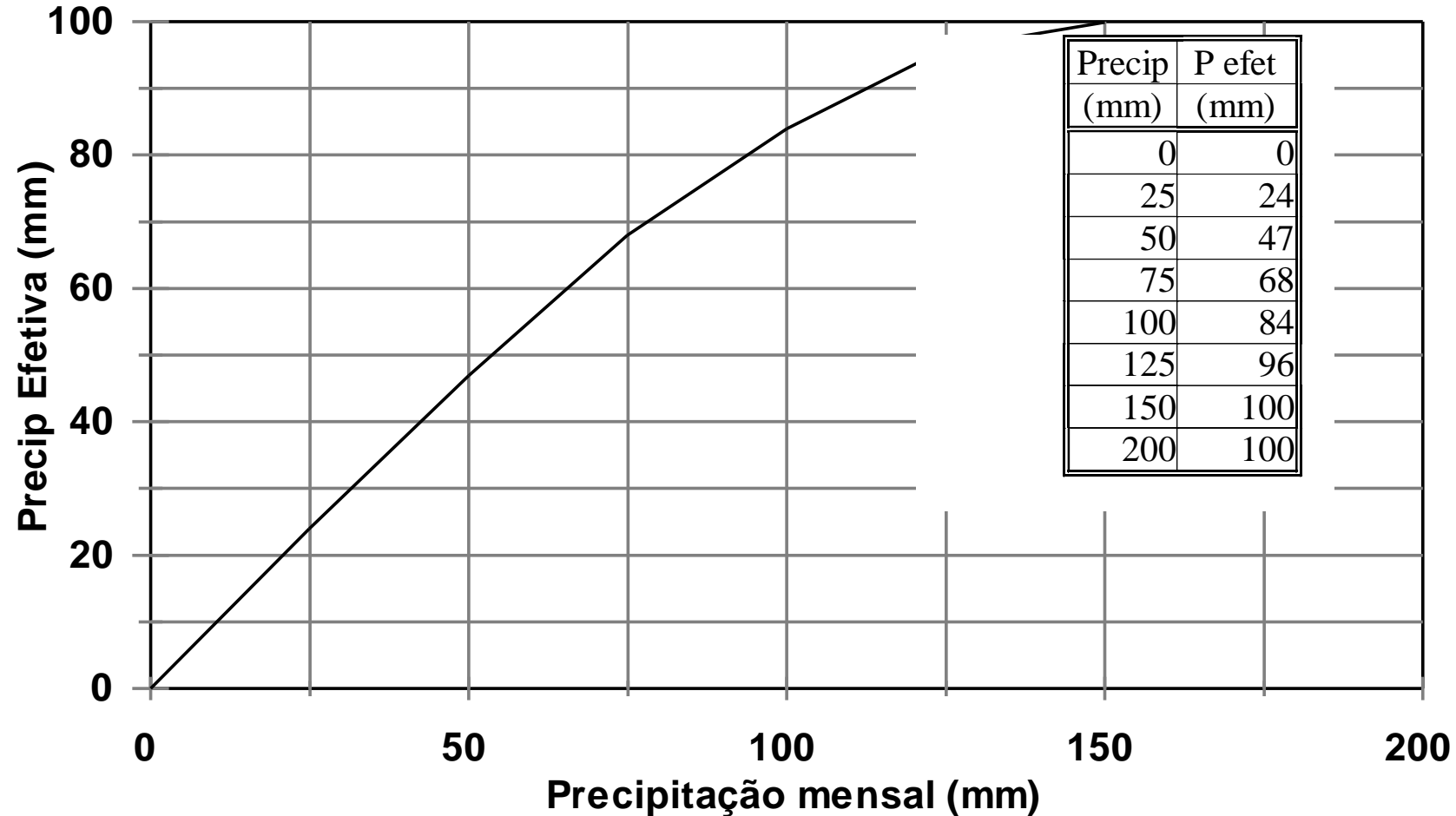


Figura 1

- Quais são as necessidades de irrigação, em cada mês e os totais anuais do ano seco e do ano médio?
- Qual deverá ser a capacidade do sistema de bombeamento (em  $m^3/s$ )? (Admita que todos os 200 ha precisem ser irrigados, no máximo em 10 dias e que o regime de funcionamento das bombas é de 12 horas diárias)

				Ano	Seco			Ano	Médio	
Mês	Temp	p	Precip	P efet	Evt	Irrig	Precip	P efet	Evt	Irrig
	(° c)	(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	28	9.35	180				220			
2	28	8.22	200				210			
3	26	8.59	90				160			
4	25	7.86	70				110			
5	23	7.75	70				80			
6	21	7.33	10				70			
7	21	7.62	10				50			
8	20	7.95	15				50			
9	22	8.11	50				80			
10	22	8.83	90				120			
11	23	8.97	110				130			
12	25	9.42	160				170			
	TOTAL	100	1055				1450			



Fim

## Referências

- Blaney, H.F.; Criddle, W.D. Determining consumptive use and irrigation water requirements. U.S. Department Agricultural Research Service. Tech Bull 1275. 1962. 59p.
- Doorenbos, J.; Kassam, A.H. Yield response to water. Irrigation and Drainage, Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1979.
- Thornthwaite, C.W.; Holzman, B. The determination of evaporation from land and water surfaces. **Monthly Weather Review** 67(1): 4-11, 1939.
- Volpe, C.A.; Oliveira, A.L.de. Relações entre a evaporação medida em diferentes evaporímetros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 245-252, 2003.

**LabSid**