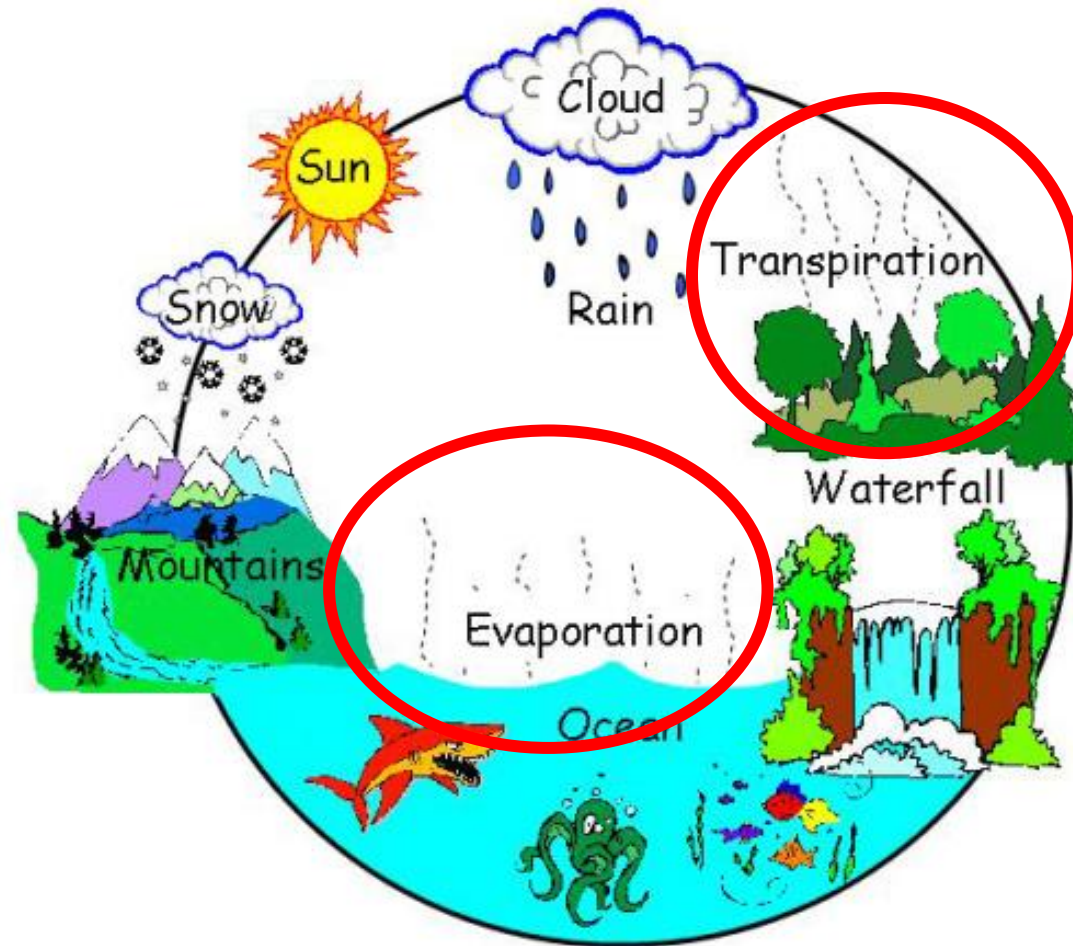


6 –Evaporação

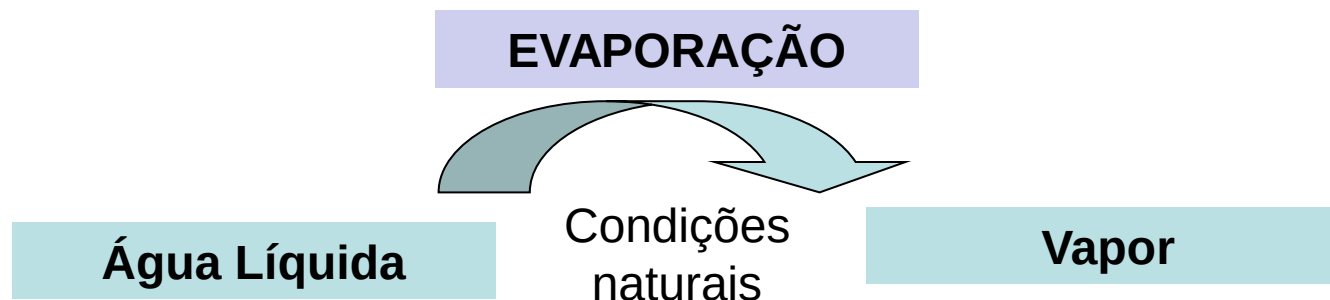
- Entender o fenômeno
- Estudar as formas de medir
- Estimar evaporação e evapotranspiração

Evaporação e Evapotranspiração

Ciclo hidrológico

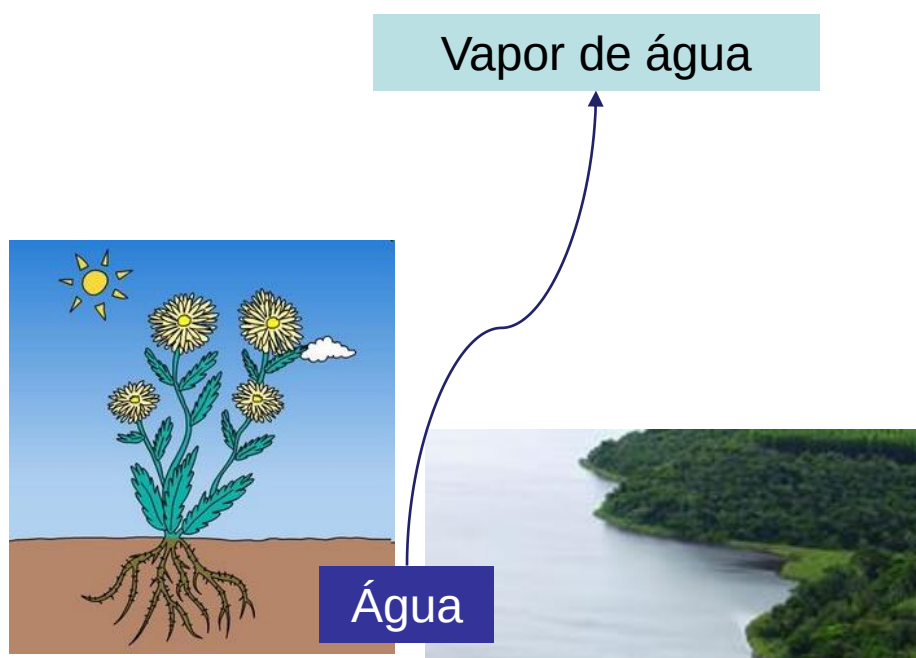


6.1 - Introdução



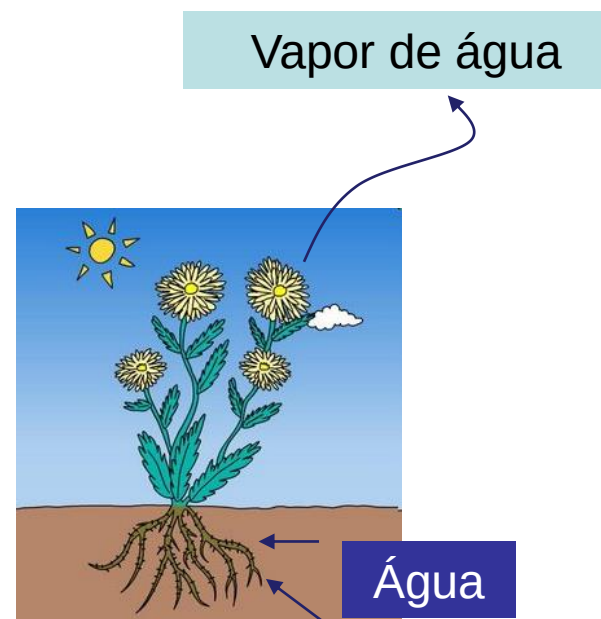
- Força de atração entre as partículas dos corpos
- Energia cinética média das partículas
$$E_{\text{sólidos}} < E_{\text{líquidos}} < E_{\text{gases}}$$
- Mudança de sólido $\rightarrow$ líquido $\rightarrow$ gasoso
Corresponde AUMENTO da energia cinética das partículas
- Condições básicas para ocorrência do mecanismo:
 - Existência de uma fonte de energia
 - Existência de um gradiente de concentração de vapor (uma diferença entre a pressão de saturação de vapor e a pressão de vapor do ar)

EVAPORAÇÃO



TRANSPIRAÇÃO

Evaporação devido ação fisiológica dos vegetais



EVAPORAÇÃO

+

TRANSPIRAÇÃO

=

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Projeto: Rios voadores

Nuvens com potencial de precipitação que influenciam nas chuvas do S e SE



O projeto busca identificar a origem desse vapor de água e definir a importância do papel da evapotranspiração da floresta amazônica nas chuvas que caem nessas regiões.



Projeto: Rios voadores

<http://www.riosvoadores.com.br/>

- Aviador, eng. e ambientalista Gérard Moss; Pedro Dias (USP); financiamento: Petrobrás
- Coleta de amostras de vapor de água
- Rios Voadores, correntes de vapor que percorrem milhares de quilômetros transportando umidade do Oceano e da Amazônia para as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil

Maior evaporação do Oceano



Ventos alísios empurram até Cordilheira



Cordilheira redireciona para sul-sudeste



Projeto: Rios voadores

- **Medições em 10 e 11/02/2009:**

- Estimativa de vazão deste rio imaginário: 3200 m³/s
- Vazão equivale a 115 dias de consumo médio da cidade de SP

- **12 Vôos, mais de mil amostras coletadas (08/07-03/09)**

- Todas as vezes que o “rio” passou por cima de uma cidade, a média no aumento de vapor de água ficou entre 10% e 15%. Ex.: Ribeirão Preto: aumento 60% da precipitação

- **Evapotranspiração diária na Floresta Amazônica: ~20 bilhões de m³**

- Cada árvore: ~300 litros/dia

Vazão média

- Rio Tietê: 116 m³/s
- Rio São Francisco: 2.800 m³/s
- Rio Amazonas: 209.000 m³/s

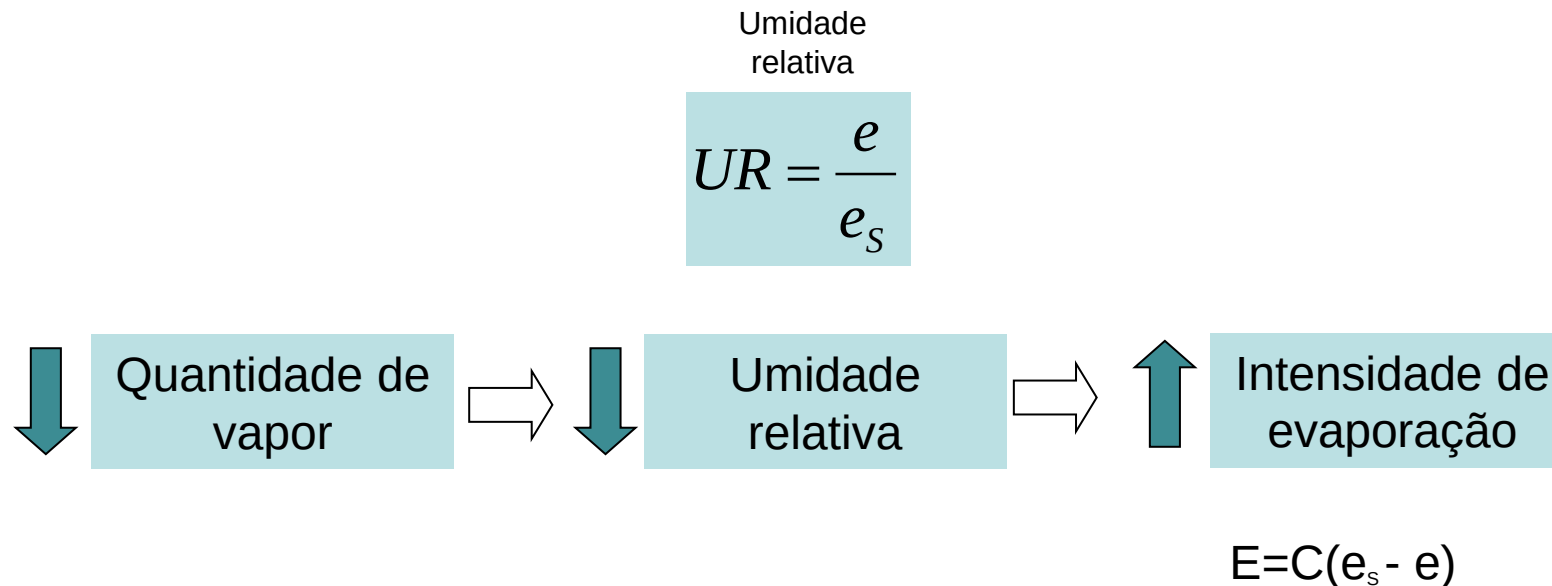
6.2 - Grandezas características

- Perdas por evaporação (ou por transpiração)
 - Quantidade de água evaporada por unidade de área horizontal durante um período de tempo
 - Expressa em mm
- Intensidade de evaporação – E (ou de transpiração)
 - Velocidade com que se processam as perdas por evaporação
 - Expressa em mm/h; mm/d
 - Depende da diferença entre:
 - tensão de saturação de vapor de água no ar atmosférico (e_s) e
 - tensão real de vapor de água (e)
 - Lei de Dalton: $E = K_c (e_s' - e)$
 - ↓
Constante que depende dos diversos fatores que influenciam na evaporação

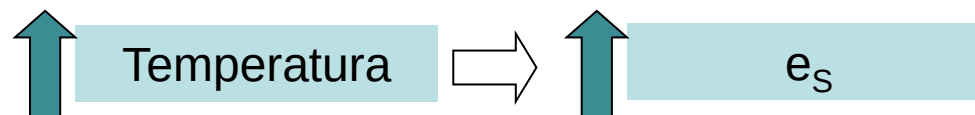
- **Evapotranspiração potencial:**
 - *Máxima* evapotranspiração nas condições atmosféricas reinantes.
 - Com base nas condições climáticas e características das plantas é possível estimar a EVT potencial.
- **Evapotranspiração real:**
 - Evapotranspiração realmente ocorrida com a variabilidade do ciclo da planta (resistência das plantas) e da disponibilidade hídrica no solo existente (umidade do solo).
- **Evapotranspiração de referência:**
 - Evapotranspiração de uma superfície extensa de capim verde (8-15 cm) uniforme em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e com abundância de água

6.3 - Fatores intervenientes

- Grau de umidade relativa do ar atmosférico (%)
 - Relação entre quantidade de vapor de água presente e a quantidade de vapor de água se, no mesmo volume, estivesse saturado de umidade.



- Temperatura

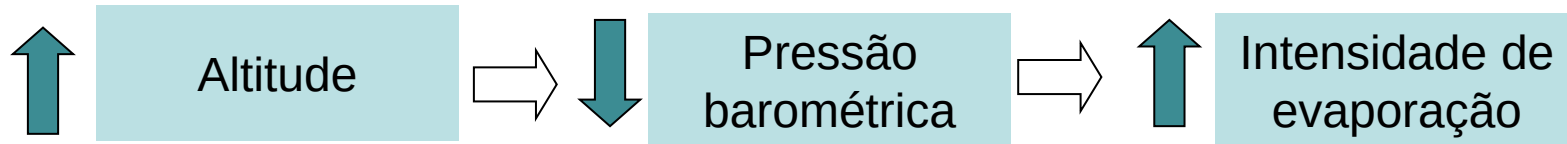


<i>Temperatura</i> (graus Celsius)	<i>Pressão do vapor, p_0</i> (atmosferas)
0	0,0062
5	0,0089
10	0,0125
15	0,0174
20	0,0238
25	0,0322
30	0,0431
35	0,0572
40	0,0750

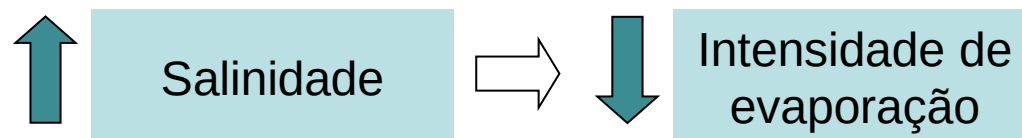
Dobro

$$1\text{mbar} = 100\text{Pa} = 10,2\text{kgf/m}^2 = 9,87\text{E-}4 \text{ atm} = 0,75\text{mmHg} = 0,01\text{mca}$$

- Vento —→ Por quê?
- Radiação solar
- Pressão barométrica
 - Influência pequena, não é considerada na maioria dos fenômenos hidrológicos. Significante para grandes variações de altitude.



- Salinidade da água
 - Em igualdade de todas as outras condições: Redução de 2 a 3% da intensidade de evaporação



Evaporação na superfície do solo

Fatores intervenientes

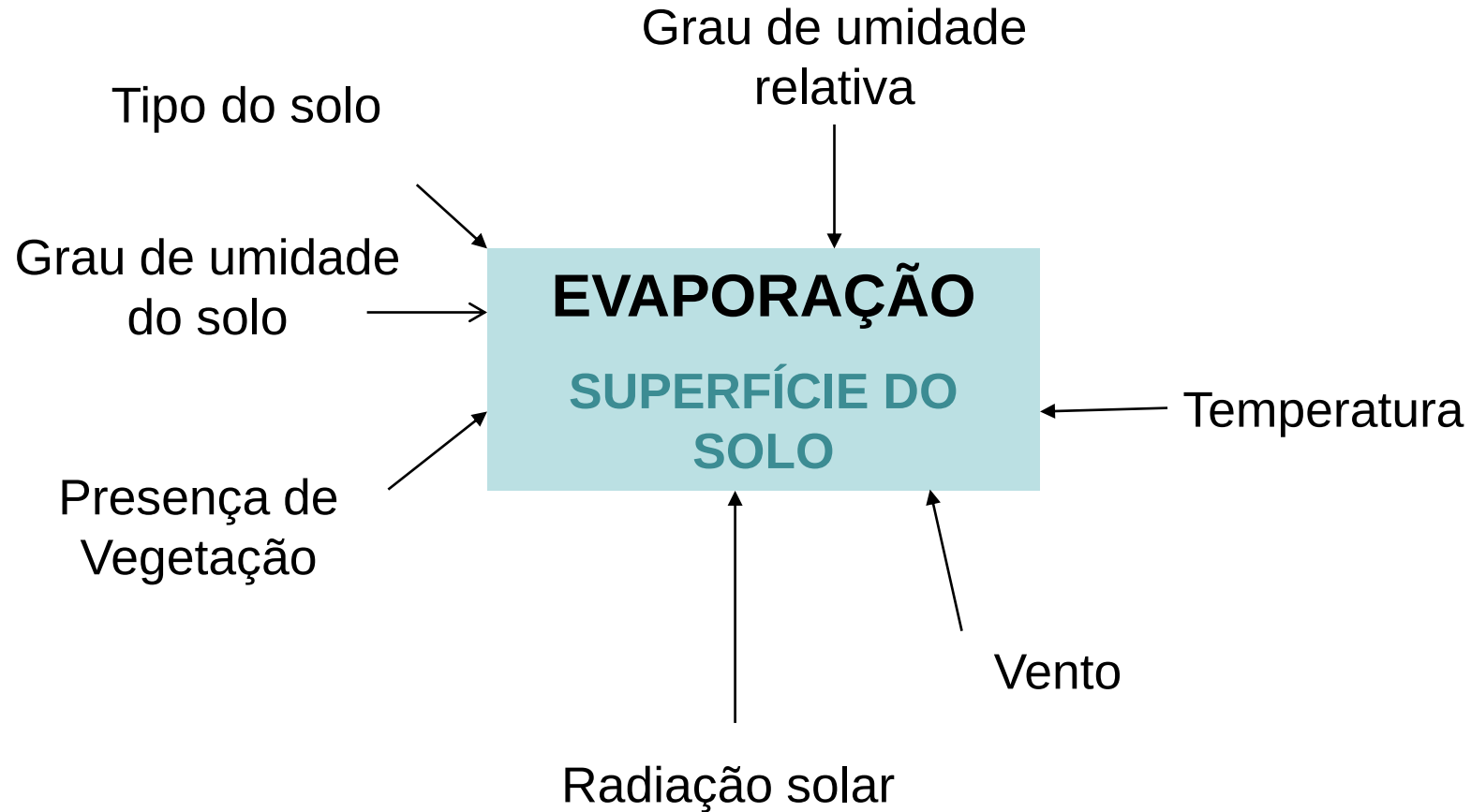
6

- **Tipo de solo** Pode ser
 - Solos arenosos saturados: $EV > EV_{\text{sup águas}}$
 - Solos argilosos saturados: Redução de 75%
- **Grau de umidade do solo**
 - Solos alimentados pelo aquífero freático: EV menor
 - Se profundidade do aquífero freático for maior que altura de ascensão da água por capilaridade: EV nula
- **Presença de Vegetação**
 - Menor evaporação na superfície do solo
 - Porém maior Transpiração

Evaporação da **superfície do solo**

Fatores intervenientes

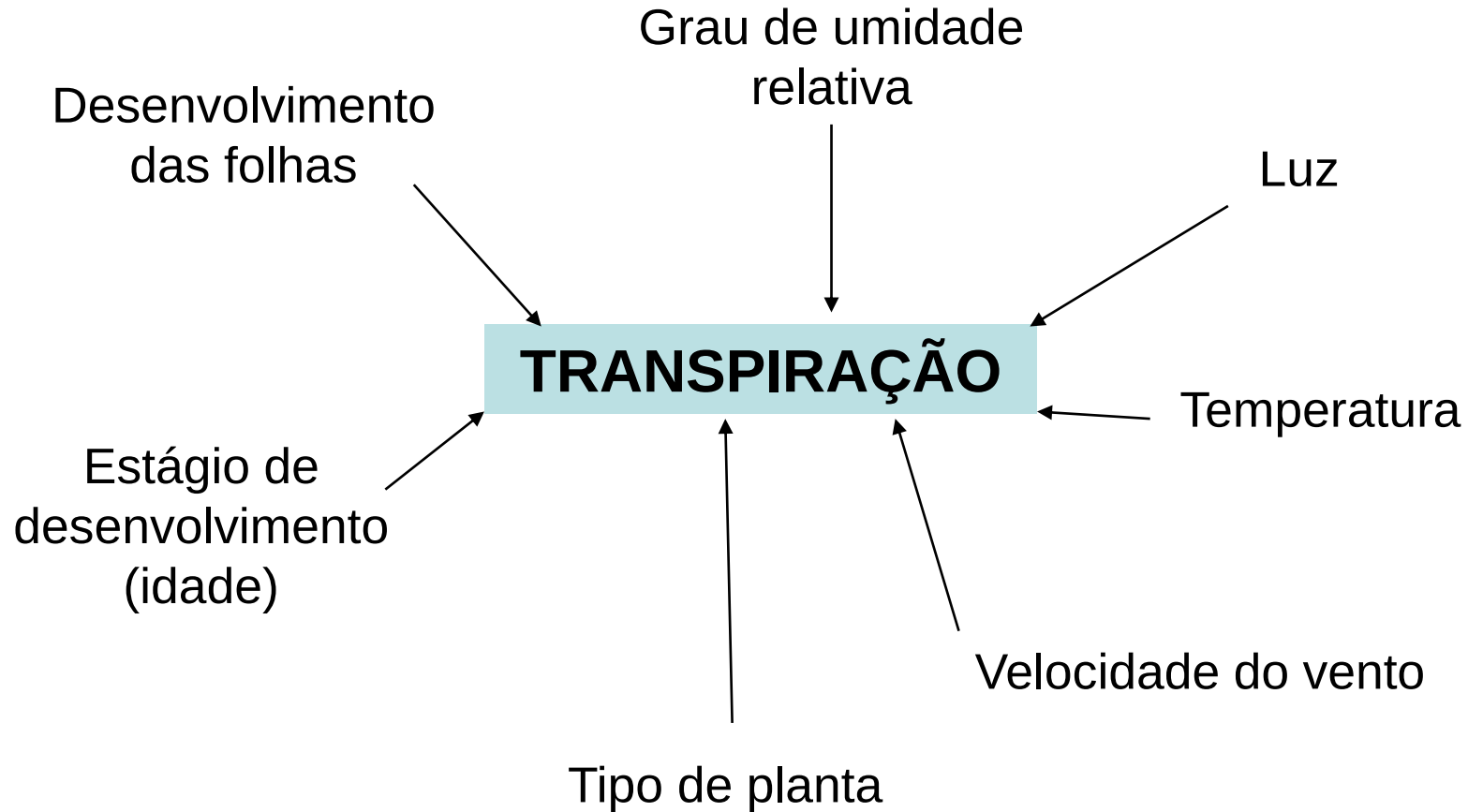
6



Transpiração

Fatores intervenientes

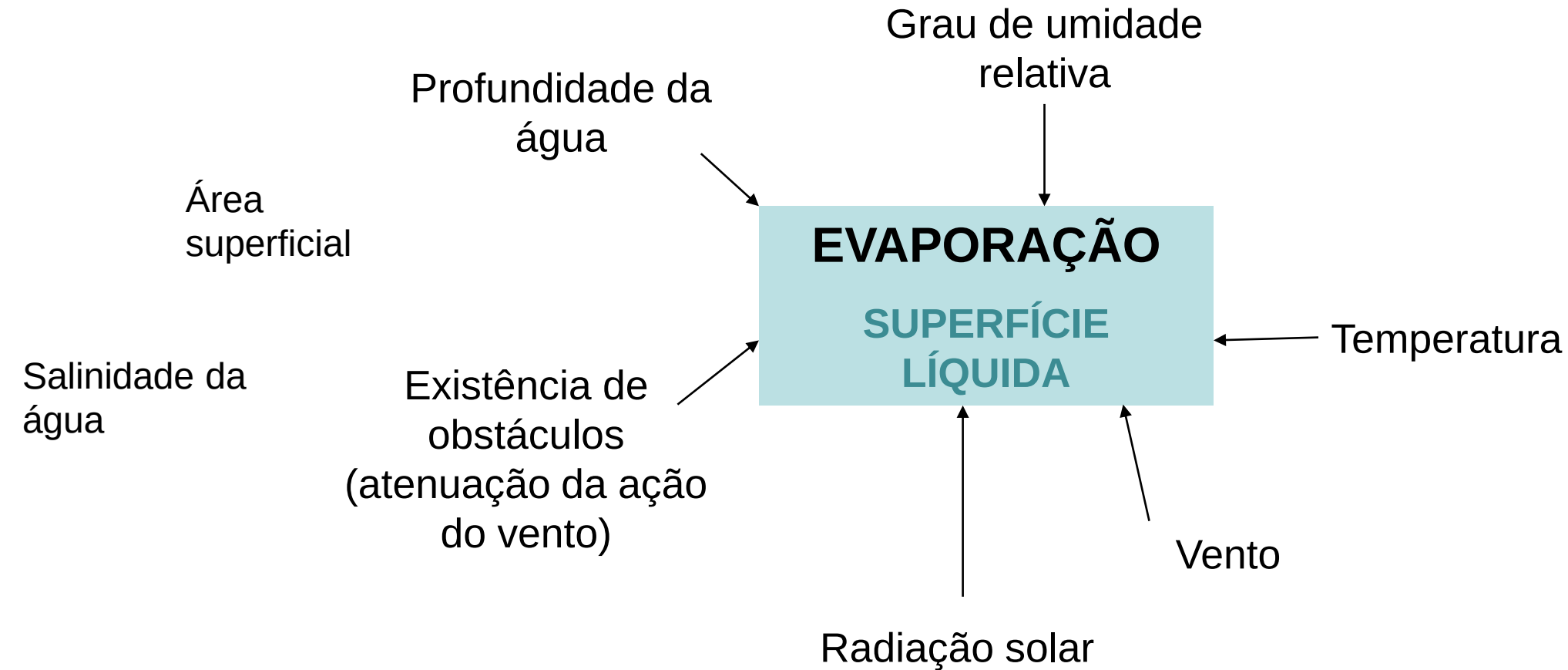
6



Evaporação da **superfície líquida**

Fatores intervenientes

6



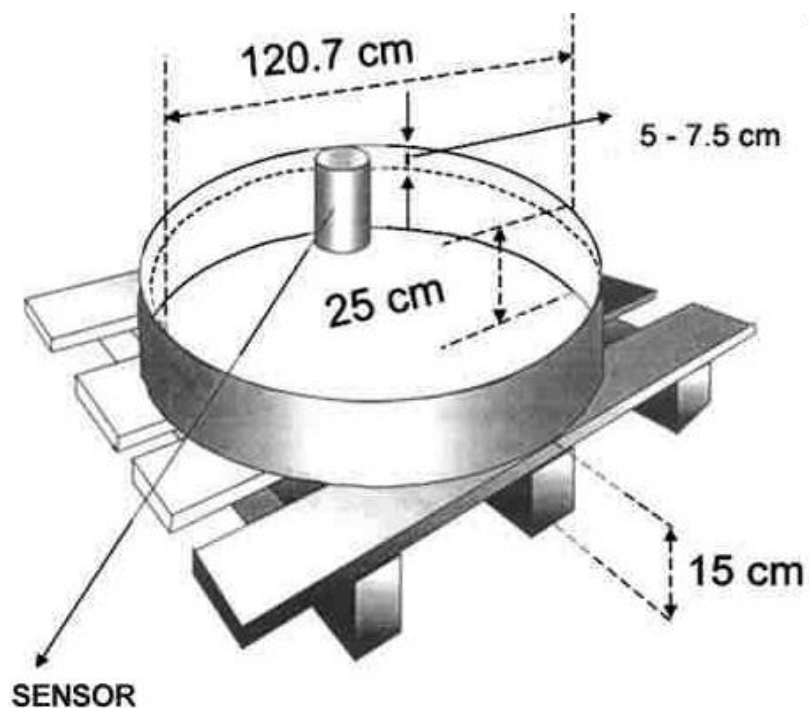
6.4 - Determinação da evaporação

- Evaporação da superfície líquida
 - Evaporímetros – Tanques classe A
 - Evaporímetro Piche
 - Atmômetro Livingstone
 - Fórmulas empíricas
- Evaporação da superfície do solo
 - Lisímetros
 - Superfícies naturais de evaporação
 - Caixas cobertas de vidro
 - Fórmulas empíricas

Evaporímetro Tanque Classe A

Evaporação de um reservatório x Evaporação do Tanque Classe A:

oscila entre 0,6 e 0,8, sendo 0,7 o valor mais utilizado.



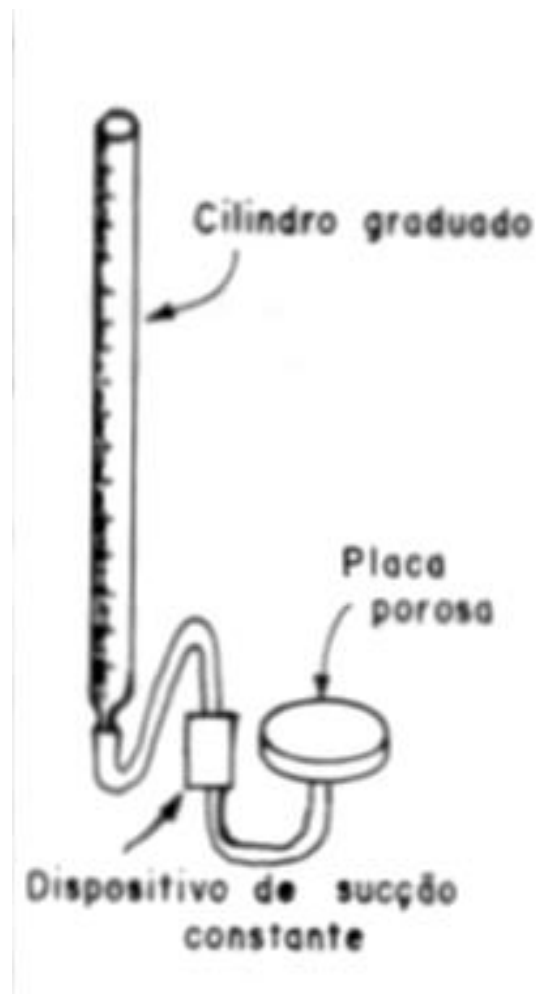
**Grandezas de
influência:**

Temperatura

Vento

Umidade

Evaporímetro Piche



Intensidade de Evaporação da Superfície Líquida

Primeira equação para o cálculo da evaporação de uma superfície foi proposta por Dalton (1802):

Intensidade de
evaporação (E)

$$E = K_c (e_s - e)$$

Tensão de vapor

Tensão de saturação de vapor

Determinado para cada localidade,
depende de vários elementos
meteorológicos

Fórmulas empíricas

Maioria se baseia na Lei de Dalton.

Fórmula de Rohwer (do Bureau of Agricultural Engineering, US)

$$E = 0,771(1,465-0,0186B)(0,44+0,118W) (e_s - e_a)$$

Fórmula de Meyer (do Minnesota Resources Commission, 1942)

$$E = C (1+0,10w) (e_s - e_a)$$

Fórmula dos Serviços Hidrológicos da URSS

$$E = 0,15n (1+0,072w) (e_s - e_a)$$

Fórmula de Fitzgerald

$$E = 12(1+0,31w) (e_s - e_a)$$

Onde:

B – pressão barométrica

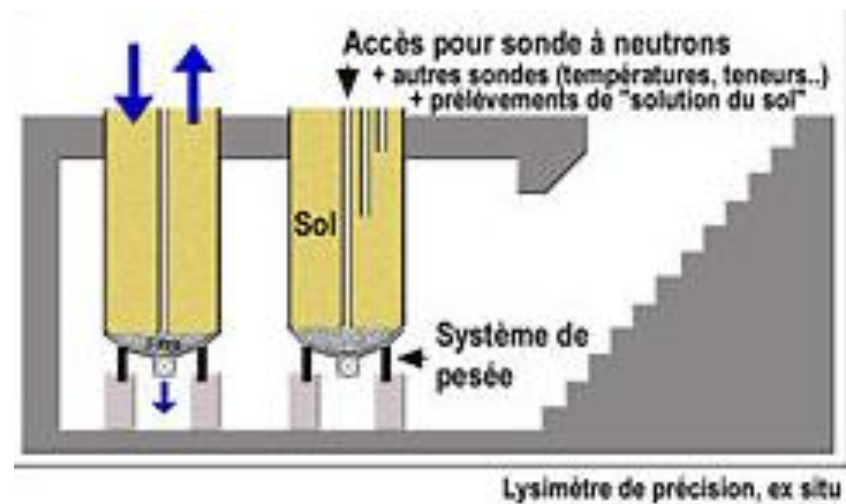
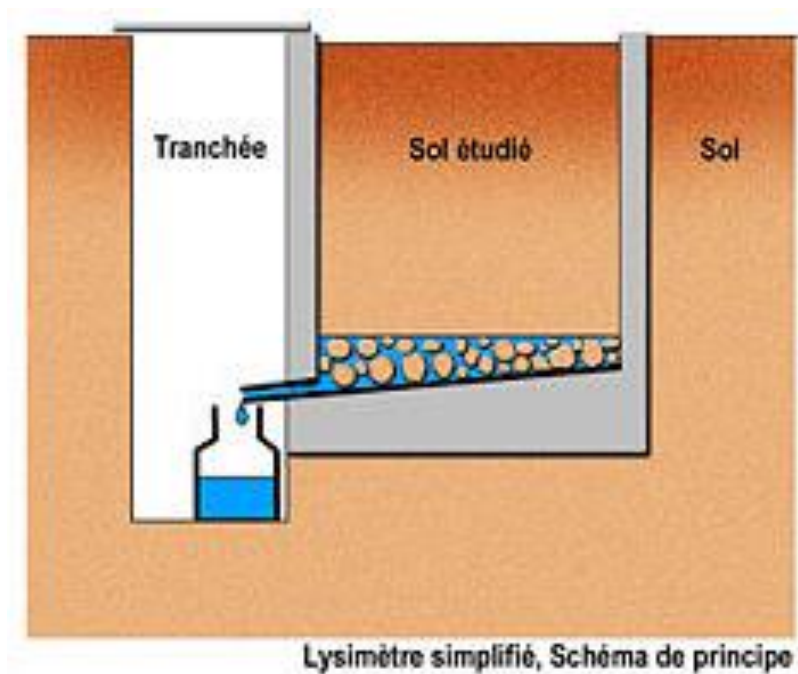
W – velocidade do vento a superfície do solo

w – velocidade do vento medida a 2m da superfície do solo

e_s – tensão de vapor média de ar saturado à temperatura da superfície da água, em polegadas de mercúrio

e_a – tensão de vapor média de ar saturado à temperatura do ponto de orvalho, em polegadas de mercúrio

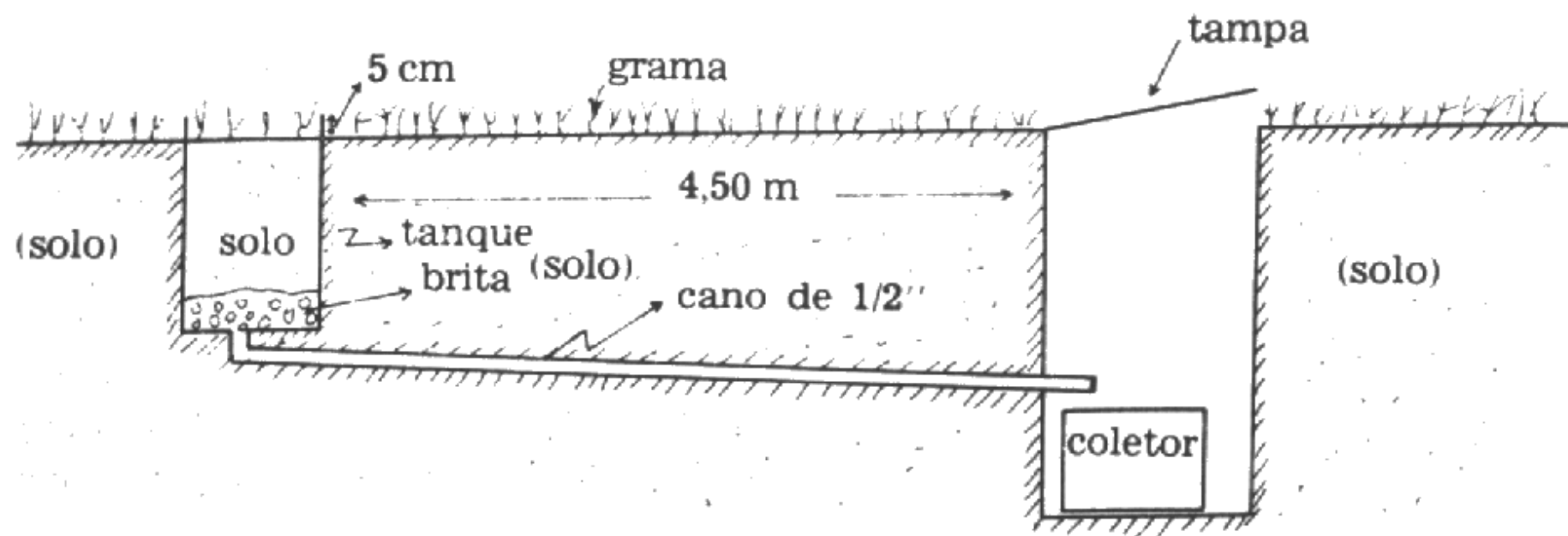
Lisímetro



Balanço Hídrico:

$$P - Q_{\text{sup}} - Q_{\text{inf}} - \mathbf{EVT} = \Delta S$$

↓
Armazenamento
(Pelo sistema de balança)



Lisímetro



<http://www.cuencarural.com/frutihorticultura/frutihorticultura/riego-por-goteo-en-plantas-jovenes-de-peral/>

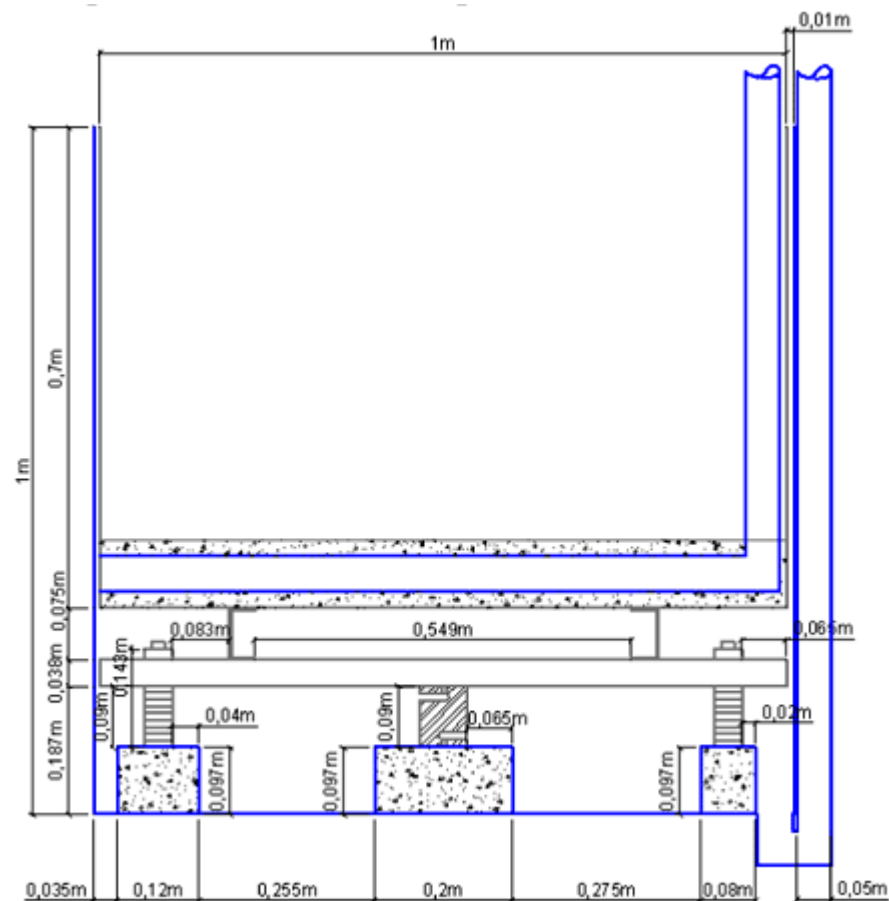


FIGURA 2. Corte transversal do esquema de instalação do lisímetro de pesagem.

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162007000300005

Lisímetro

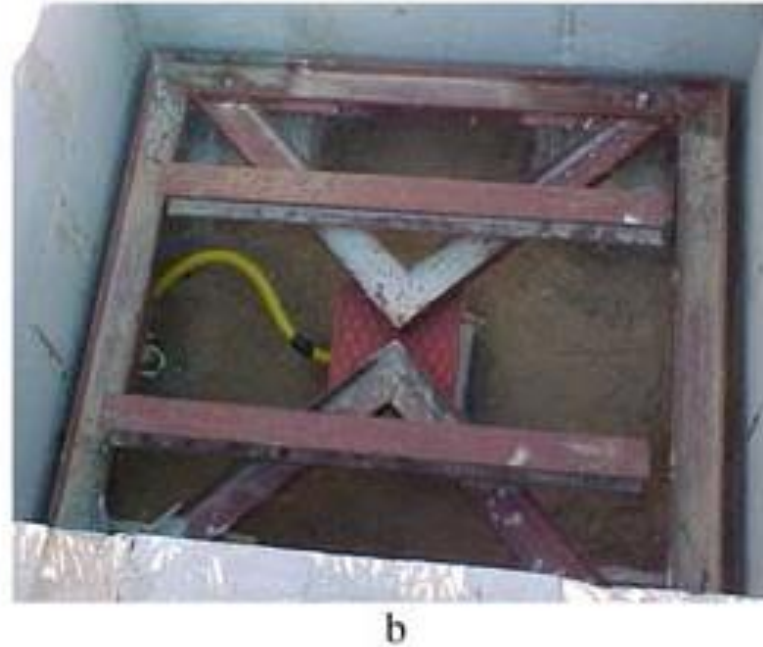
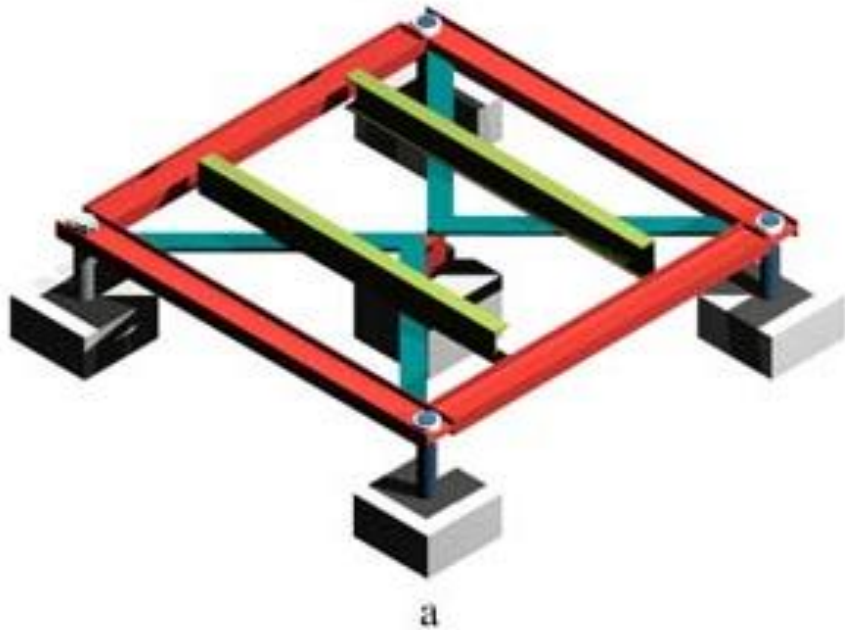


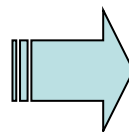
FIGURA 1. Base de fixação do lisímetro, com a célula de carga no centro da estrutura: (a) vista tridimensional, e (b) foto no local.

Lisímetro de pesagem com célula de carga, instalado em Seropédica – RJ

Fonte: Carvalho et al. 2007

Intensidade de Evaporação da Superfície do solo

Maioria dos solos **não saturados** de umidade, as taxas de evaporação **variam muito pouco com as características do solo.**



Estudo de **expressões** que permitem avaliar a evaporação de **solos desprovidos de vegetação, sem a interferência de lençol de água.**

Fórmula de Turc (Centro Nacional de Pesquisas Agronômicas da França)

$$E = \frac{P + S}{1 + \frac{(P + S)^2}{L}}$$

$$L = \frac{1}{16} (T + 2\sqrt{I})$$

E – Evaporação em um período de 10 dias (mm)

P – Precipitação no mesmo período (mm)

S – Quantidade de água susceptível de ser evaporada no mesmo período, seguida às precipitações (valor varia de 10mm para solos úmidos a 1 mm para um solo seco)

T – Temperatura média do ar (°C)

I – Radiação solar global (cal/cm²/dia)

6.5 - Medida da transpiração

- Fitômetro

- Recipiente estanque contendo terra para alimentar a planta
- Tampa evita a entrada de água da chuva e perdas por evaporação
- Adição de quantidades conhecidas de água
- Perdas por transpiração:

[Peso inicial] + [Peso da água adicionada] – [Peso final]

6.6 - Métodos de estimativas

- Método do balanço hídrico
- Baseados na temperatura:
 - Método de Thornthwaite
 - Método de Blaney-Criddle
- Baseados na evaporação potencial:
 - Método aerodinâmico (EV)
 - Método do balanço energético (EV)
 - Método combinado – Penman (EV e EVT)
 - Método de Penman-Bavel
- Baseados em dados do Tanque Classe A

a) Método de Thornthwaite

Desenvolvido com base em dados restritos do hemisfério Norte:

- evapotranspiração medida;
- temperatura média mensal;
- para dias com 12 horas de brilho solar e
- mês com 30 dias.

F_c = Fator de correção em função da latitude e mês do ano

$$ETP = F_c \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I} \right)^a$$

Onde:

- ETP = Evapotranspiração potencial (mm/mês)
- T = Temperatura média do mês (°C)
- $a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49239$
- I = índice anual de calor, correspondente a soma de doze índices mensais;
- T_i = Temperatura média do mês i (°C)

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

Tabela A3. Fator de correção F_c do método de Thornthwaite (UNESCO,1982)

latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
10 N	0,98	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5 N	1,00	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
0	1,02	0,94	1,04	1,01	1,01	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5 S	1,04	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10 S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15 S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20 S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25 S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30 S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35 S	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40 S	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29

Correção dos valores da evapotranspiração para cada tipo de cultura:

$$ETP_{\text{cultura}} = K_c \cdot ETP$$

Onde:

ETP_{cultura} = Evapotranspiração potencial da cultura (mm/mês)

ETP = Evapotranspiração potencial (mm/mês)

K_c = coeficiente de cultura

Valores de K_c

Tabelados para diferentes culturas nos seus vários estágios de desenvolvimento

Culturas	Período de crescimento (meses)	Coeficientes de evapotranspiração "k"	
		Litoral	Zona Árida
Algodão	7	0,60	0,65
Arroz	3-4	1,00	1,20
Batata	3	0,65	0,75
Cereais menores	3	0,75	0,85
Feijão	3	0,60	0,70
Milho	4	0,75	0,85
Pastos	—	0,75	0,85
Citrus	—	0,50	0,65
Cenoura	3	0,60	—
Tomate	4	0,70	—
Hortaliças		0,60	—

Exemplo 1

Para uma latitude de 20° S, calcule o valor da ETP pelo **Método de Thornthwaite** para cada mês, sabendo que a bacia é coberta por pasto. Região litorânea.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	MAi	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	26,9	26,1	25,2	23,6	20,5	14,9	15,0	20,7	24,7	26,3	27,1	27,6
EVP (mm/ mês)												

$$ETP = K_c \cdot F_c \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I} \right)^a$$



Tabela:

Tabela A3

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,492$$

Exemplo 1 - Solução

Para uma latitude de 20° S, calcule o valor da ETP pelo **Método de Thornthwaite** para cada mês, sabendo que a bacia é coberta por pasto. Região litorânea.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	MAi	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	26,9	26,1	25,2	23,6	20,5	14,9	15,0	20,7	24,7	26,3	27,1	27,6
EVP (mm/mês)	121	97	93	71	47	18	19	50	83	108	118	131

$$ETP = K_c \cdot F_c \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I} \right)^a$$



Tabela A3 – 20°S

Tabela: Pasto litoral = 0,75

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} = 124,37$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,492 = 2,83$$

b) Método de Blaney-Criddle

Foi desenvolvido originalmente para estimativas de uso consuntivo em regiões semi-áridas

$$ETP = (0,457 \cdot T + 8,13) \cdot p$$

Onde:

ETP = Evapotranspiração potencial mensal (mm/mês);

T = Temperatura diária média em °C (no mês)

p = Percentagem de horas diurnas do mês sobre o total de horas diurnas do ano

Correção para o tipo de cultura:

$$ETP_{\text{cultura}} = K_c \cdot ETP$$

Quadro 1.9 - Valores da porcentagem mensal das horas de luz solar (p), para as latitudes Norte e Sul, segundo Blaney-Criddle

lat N	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
48°	6,1	6,4	8,3	9,2	10,6	10,8	10,8	9,9	8,4	7,5	6,2	5,8
44	6,4	6,6	8,3	9,0	10,3	10,4	10,5	9,7	8,4	7,6	6,5	6,2
40	6,7	6,8	8,3	8,9	10,0	10,1	10,2	9,5	8,4	7,8	6,7	6,5
36	7,0	6,9	8,3	8,8	9,8	9,8	10,0	9,4	8,4	7,9	6,9	6,8
32	7,2	7,0	8,4	8,8	9,7	9,6	9,8	9,3	8,3	8,0	7,1	7,0
28	7,4	7,1	8,4	8,7	9,5	9,4	9,6	9,2	8,3	8,0	7,3	7,2
24	7,6	7,2	8,4	8,6	9,3	9,2	9,4	9,0	8,3	8,1	7,4	7,4
20	7,8	7,3	8,4	8,5	9,2	9,0	9,3	8,9	8,3	8,2	7,6	7,6
16	7,9	7,4	8,4	8,4	9,0	8,8	9,1	8,8	8,3	8,2	7,7	7,8
12	8,1	7,5	8,4	8,4	8,9	8,7	8,9	8,8	8,3	8,3	7,9	8,0
8	8,2	7,6	8,5	8,3	8,7	8,5	8,8	8,7	8,2	8,4	8,0	8,2
4	8,4	7,7	8,5	8,3	8,6	8,4	8,6	8,6	8,2	8,4	8,1	8,3
0	8,5	7,7	8,5	8,2	8,5	8,2	8,5	8,5	8,2	8,5	8,2	8,5
lat S	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
4°	8,6	7,8	8,5	8,2	8,4	8,1	8,4	8,4	8,2	8,5	8,3	8,7
8	8,8	7,9	8,5	8,1	8,3	7,9	8,2	8,3	8,2	8,6	8,5	8,8
12	8,9	8,0	8,5	8,0	8,1	7,7	8,1	8,2	8,2	8,7	8,6	9,0
16	9,1	8,0	8,6	8,0	8,0	7,6	7,9	8,1	8,2	8,7	8,7	9,1
20	9,3	8,1	8,6	7,9	7,8	7,4	7,8	8,0	8,1	8,8	8,9	9,3
24	9,4	8,2	8,6	7,8	7,7	7,2	7,6	7,9	8,1	8,9	9,0	9,5
28	9,6	8,3	8,6	7,7	7,5	7,0	7,4	7,8	8,1	8,9	9,2	9,8
32	9,9	8,4	8,7	7,7	7,4	6,8	7,2	7,6	8,1	9,0	9,4	10,0
36	10,1	8,5	8,7	7,6	7,2	6,6	7,0	7,5	8,0	9,1	9,5	10,3
40	10,3	8,6	8,7	7,5	6,9	6,3	6,8	7,3	8,0	9,2	9,7	10,5

Exemplo 2

Para uma latitude de 20° S , calcule o valor da ETP pelo **Método de Blaney-Criddle** para cada mês, sabendo que a bacia é coberta por pasto. Região litorânea.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	MAi	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	26,9	26,1	25,2	23,6	20,5	14,9	15,0	20,7	24,7	26,3	27,1	27,6
EVP (mm/ mês)												

$$ETP = K_c (0,457 \cdot T + 8,13) \cdot p$$

↓ Tabela

↓ Quadro 1.9

Exemplo 2 - Solução

Para uma latitude de 20° S , calcule o valor da ETP pelo **Método de Blaney-Criddle** para cada mês, sabendo que a bacia é coberta por pasto. Região litorânea.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	MAi	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	26,9	26,1	25,2	23,6	20,5	14,9	15,0	20,7	24,7	26,3	27,1	27,6
EVP (mm/ mês)	142	122	127	112	102	83	88	106	118	133	137	145

$$ETP = K_c (0,457 \cdot T + 8,13) \cdot p$$

↓ Tabela: Pasto litoral = 0,75

↓ Quadro 1.9 – 20°S

Método de Blaney-Criddle

Comparação dos dois métodos

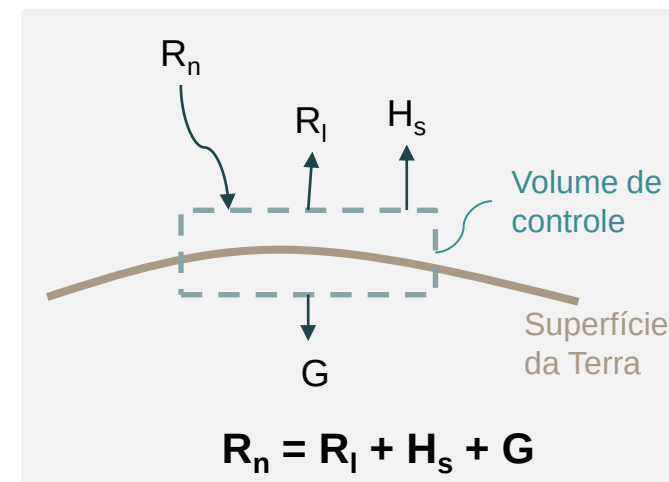
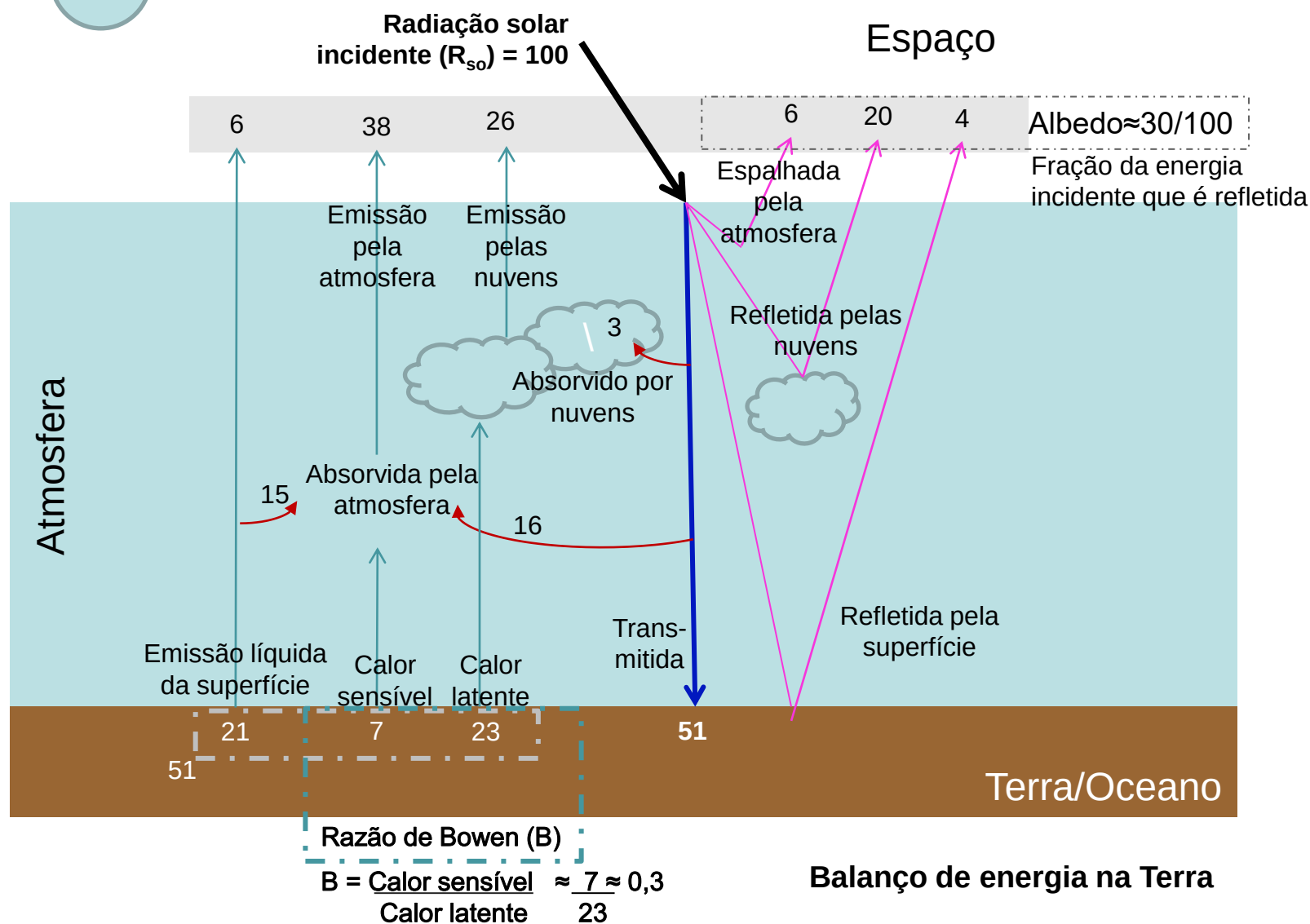
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	MAi	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	26,9	26,1	25,2	23,6	20,5	14,9	15,0	20,7	24,7	26,3	27,1	27,6
EVP (mm/ mês)	Método de Thornthwaite											
	121	97	93	71	47	18	19	50	83	108	118	131
EVP (mm/ mês)	Método de Blaney-Criddle											
	142	122	127	112	102	83	88	106	118	133	137	145
Diferen ça (%)	18	25	37	58	117	356	353	111	41	24	16	10

c) Método do Balanço Energético

Baseia-se no princípio de conservação de energia:

Para um dado sistema, durante determinado tempo, o ganho de energia menos a perda (sob várias formas) deve ser igual ao armazenamento.

Balanço Energético



R_n : Radiação líquida, energia disponível na superfície do solo.

R_l : Calor latente, energia requerida durante uma mudança de estado $\rightarrow$ energia para a evaporação

H_s : Fluxo de calor sensível, fluxo sem evaporação

G : Fluxo de calor para o solo, $G \approx 0$

$$R_n = R_l + H_s + G$$

- $G \approx 0$
- Razão de Bowen (B): $B = \frac{\text{calor sensível}}{\text{calor latente}} = \frac{H_s}{R_l} \rightarrow H_s = B R_l$

$$\left. \begin{aligned} R_n &= R_l + H_s + G \\ R_n &= R_l + B R_l \\ R_n &= R_l (1 + B) \end{aligned} \right\}$$

Sendo: $R_l = EV \rho \lambda$

$$R_n = R_l (1 + B)$$

$$R_n = EV \rho \lambda (1 + B)$$

EVP: Evaporação potencial

ρ : Massa específica da água (kg/m³)

λ : calor latente de vaporização

$\lambda = f(T)$

$\lambda = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 T$

T em °C e λ em J/kg

Isolando EVP:

$$EV = \left(\frac{R_n}{\lambda \rho} \right) \left(\frac{1}{1 + B} \right)$$

Er = "Equivalente água"
da radiação líquida

Fração evaporativa

Método do Balanço Energético

$$EVP = 86,4 \times 10^6 \left(\frac{R_n}{\lambda \cdot \rho_w} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + B} \right)$$

Conversão de unidades

Er = "Equivalente água" da radiação líquida

Fração evaporativa

Onde:

EVP = Evaporação potencial diária (mm/dia)

R_n = Radiação líquida (W/m^2);

λ = Calor latente de vaporização (J/kg)

$$\lambda = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T ;$$

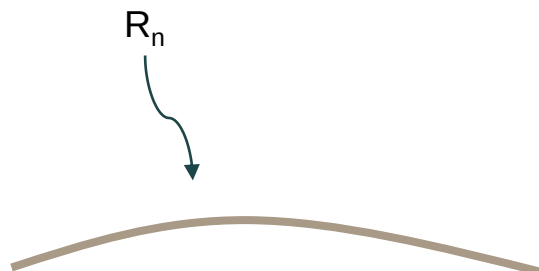
ρ_w = massa específica da água (kg/m^3);

T = Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

B = Razão de Bowen = razão entre calor sensível e calor latente
função da declividade da curva $e_s = f(T)$

Estimativa da radiação líquida (R_n)

- Energia disponível na superfície do solo
- Saldo de balanço de radiação; diferença entre o total de fluxo de radiação ascendente e descendente.
- Resultado das trocas de energia que se estabelecem na atmosfera condicionadas pelo fluxo de radiação emitida pelo sol (predominantemente em ondas curtas) e pela radiação terrestre de ondas longas emitidas pela superfície da Terra.



$$R_n = \overset{\substack{\text{(Transmitida)} \\ \text{Radiação de} \\ \text{onda curta}}}{R_s(1 - \alpha)} + \overset{\substack{\text{(Emitida)} \\ \text{Radiação de} \\ \text{onda longa}}}{R_{ei} - R_{e0}}$$

Emitida da atmosfera
Emitida pela terra

$$R_s = R_0 \left(0,25 + 0,5 \frac{n}{N} \right)$$

$$R_{ei} - R_{e0} = -f \varepsilon \sigma T^4$$

Lei de Stefan-Bolzman

$$f = 0,9 (n/N) + 0,1 \text{ (regiões áridas)}$$

$$f = 0,67 (n/N) + 0,33 \text{ (regiões úmidas)}$$

Radiação R_A no limite externo da atmosfera em caloria/cm²/dia.

Latitude	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
N90	0	0	55	518	903	1077	944	605	136	0	0	0
80	0	3	143	518	875	1060	930	600	219	17	0	0
60	86	234	424	687	866	983	892	714	494	258	113	55
40	358	538	663	847	930	1001	941	843	719	528	397	318
20	631	795	821	914	912	947	912	887	856	740	666	599
Equador	844	963	878	876	803	803	792	820	891	866	873	829
20	970	1020	832	737	608	580	588	680	820	892	986	978
40	998	963	686	515	358	308	333	453	648	817	994	1033
60	947	802	459	240	95	50	77	187	403	648	920	1013
80	981	649	181	9	0	0	0	0	113	459	917	1094
S90	995	656	92	0	0	0	0	0	30	447	932	1110



Tecnologia e Informações Ambientais



[Página Inicial](#) [Tempo](#) [Clima](#) [Produtos e Serviços](#) [Institucional](#) [Notícias](#) [Simepar em tempo](#) [Editais](#) [Fale Conosco](#)

METEOROLOGIA



Tempo



Clima

MONITORAMENTO DO TEMPO



Satélite GOES



Satélite EUMETSAT



Radar



Raios



Estações Meteorológicas

OUTRAS INFORMAÇÕES



Nascer e Pôr do Sol

Selecionar uma Cidade

Horários de Nascer e Pôr do Sol

Cidade	Nascer	Pôr
Apucarana	06:41	18:13
Cascavel	06:50	18:20
Curitiba	06:34	18:03
Foz do Iguaçu	06:55	18:24
Francisco Beltrão	06:49	18:18
Guarapuava	06:42	18:12
Londrina	06:39	18:12
Maringá	06:43	18:15
Paranaguá	06:31	18:00
Paranavaí	06:45	18:18
Pato Branco	06:48	18:16
Ponta Grossa	06:37	18:07
Toledo	06:51	18:21
Umuarama	06:49	18:21

Exercício

6

Estimar a evaporação para o mês de Março em um local a 20° Sul de latitude, Temperatura de 18°C e umidade relativa de 60%. O percentual de insolação é 40%, o albedo é 0,06 e a razão de Bowen é 0,3. A velocidade do vento a 2m de altura é de 5 m/s.

a) Pelo método do balanço energético

Exemplo

Estimar a evaporação para o mês de Março em um local a 20° Sul de latitude, Temperatura de 18°C e umidade relativa de 60%. O percentual de insolação é 40%, o albedo é 0,06 e a razão de Bowen é 0,3. A velocidade do vento a 2m de altura é de 5 m/s.

$$EVP = 86,4 \times 10^6 \left(\frac{R_n}{\lambda \cdot \rho_w} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + B} \right)$$

Onde:

EVP = Evaporação potencial diária (mm/dia)

R_n = Radiação líquida (W/m²);

λ = Calor latente de vaporização (J/kg)

$$\lambda = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T ;$$

ρ_w = massa específica da água (kg/m³);

$$\rho_w = 977 \text{ kg/m}^3$$

T = Temperatura do ar (°C);

B = Razão de Bowen = razão entre calor sensível e calor latente

função da declividade da curva $e_s = f(T)$

a.1) Radiação líquida

$$R_n = R_s(1 - \alpha) + R_{ei} - R_{e0}$$

$$R_s = R_0 \left(0,25 + 0,5 \frac{n}{N} \right)$$

$$R_{ei} - R_{e0} = -f \varepsilon \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$$

$$\varepsilon = \text{emissividade da atmosfera} = 0,34 - 0,14 e^{-0,5}$$

e = tensão de vapor em kPa

$$\text{Umidade} = h = e/e_0$$

$$f = 0,9 (n/N) + 0,1 \text{ (regiões áridas)}$$

$$R_n = 135,89 \text{ W/m}^2$$

$$\text{a.2) } EVP = 3,76 \text{ mm/d} = 112,85 \text{ mm/mês}$$

d) Método aerodinâmico

Baseado na difusão do vapor.

Só em condições especiais, a equação geral da difusão possui solução simples.

Entretanto, com condições de contorno adequadas → equação simples

Fórmula de Dalton (1802)

$$E = K_T (e_s' - e)$$

Tensão de vapor

Tensão de vapor de saturação
à **temperatura da água**

Coeficiente de transporte de massa

Umidade
relativa

$$UR = \frac{e}{e_s}$$

f(T)

Dificuldade:

Em geral não se conhece a temperatura da água, somente a do ar.

Solução:

Eliminar a temperatura da água entre as equações da energia e aerodinâmico: método combinado.

Às vezes, usa-se a temperatura da água igual à temperatura do ar próxima à superfície líquida.

EVP = Evaporação potencial (mm/dia);

e_s = Tensão de vapor de saturação à **temperatura da água** (Pa)

$$e_s = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}\right) \quad e_s \text{ em Pa e } T \text{ em } ^\circ\text{C}$$

T = Temperatura (°C)

$$e = \text{Tensão de vapor real (Pa)} \quad e = UR \cdot e_s ;$$

K_T = Coeficiente de transporte de massa [mm/(d.Pa)]

$$K_T = \frac{0,102 \cdot u}{\left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2}$$

u = Velocidade do vento na altura z_2 (m/s);

z_2 = Altura da medição da velocidade do vento (geralmente é adotado 2 m a partir da superfície);

z_1 = Altura de rugosidade da superfície natural:

Água:	0,03 cm
Grama/capim:	0,1-2,0 cm
Capim alto:	2,0-5,0 cm

Exercício

Mesmo do anterior

6

Estimar a evaporação para o mês de Março em um local a 20° Sul de latitude, Temperatura de 18°C e umidade relativa de 60%. O percentual de insolação é 40%, o albedo é 0,06 e a razão de Bowen é 0,3. A velocidade do vento a 2m de altura é de 5 m/s.

b) Pelo método aerodinâmico

$$EVP = 5,445 \text{ mm/d} = 163,35 \text{ mm/mês}$$

e) Método Combinado de Penman

$$EVP = \left[\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot E_r + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \cdot E_a \right]$$

Onde:

EVP = Evaporação potencial (mm/dia);

E_r = Evaporação calculada pelo método do balanço de energia (mm/dia);

E_a = Evaporação calculada pelo método aerodinâmico (mm/dia);

Δ - Derivada da função de saturação de vapor de água (Pa/°C)

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

γ – constante psicrométrica (Pa/°C)

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P \quad (\text{psicrômetro ventilado})$$

P - pressão atmosférica (Pa)

$$P = 0,1013 \exp(-z/8200), \text{ sendo } z \text{ a altura acima do mar (m)}$$

Exercício

Mesmo do anterior

6

Estimar a evaporação para o mês de Março em um local a 20° Sul de latitude, Temperatura de 18°C e umidade relativa de 60%. O percentual de insolação é 40%, o albedo é 0,06 e a razão de Bowen é 0,3. A velocidade do vento a 2m de altura é de 5 m/s.

c) Pelo método combinado

$$EVP = 4,277 \text{ mm/d} = 128,304 \text{ mm/mês}$$

6.7 - Método do balanço hídrico

Estudo em bacias hidrográficas

- Método de estimativa simples com base nos dados precipitação e vazão de uma bacia.

- A equação da continuidade:

$$S(t+1) = S(t) + (P - E - Q)dt$$

S – armazenamento água subterrânea

- Desprezando a diferença entre $S(t+1) - S(t)$

$$Q = P - E$$

- Simplificação aceita para dt longos como um ano ou seqüência de anos.

Obs.: Já foi visto (no Tema - Balanço Hídrico) que, para evapotranspiração, no caso de reservatórios em regiões úmidas, grandes erros impedem a utilização deste método na prática.

Referências bibliográficas

- Pinto et al. 1976. Hidrologia Básica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- Tucci. Material de aula.
- Villela & Mattos. 1975. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGrawHill.
- Mauad & Wendland. Hidrologia e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia de São Carlos.
- Rios Voadores. <http://www.riosvoadores.com.br/>
- Ruy Sant'Ana. Exercícios.