



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA
Universidade de Lisboa

Departamento de Ciências e
Engenharia de Biosistemas

RECURSOS HÍDRICOS

EVAPORAÇÃO, INTERCEPÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO

- Conceitos
- Métodos de medição
- Fórmulas para estimação
- Evapotranspiração de referência – método FAO

Secção de Engenharia Rural

1

CONCEITOS

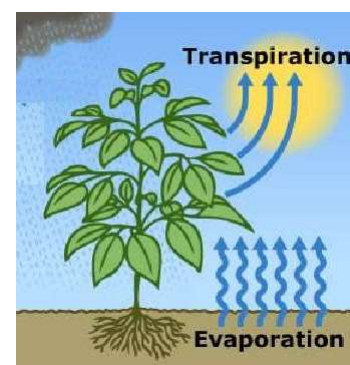
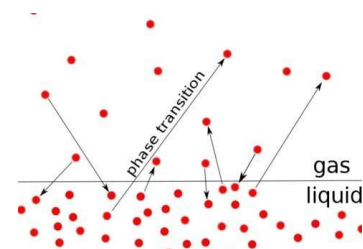
Evaporação (E): processo físico, em que a água passa do estado líquido para o estado gasoso

A evaporação pode ocorrer a partir de superfícies livres de água (lagos, rios) ou superfícies molhadas (solo, plantas) e todos os obstáculos que interceptam água

Transpiração (T): perda de água na forma de vapor pelas plantas (e animais)

É um processo com base física mas também fisiológica, já que é controlada pela abertura dos estomas

Evapotranspiração de um coberto vegetal (ET): transpiração das plantas + evaporação do solo



Secção de Engenharia Rural

2

Importância do conhecimento da evaporação/evapotranspiração/intercepção:

- São termos do **balanço hidrológico**, pelo que o seu conhecimento é indispensável para a avaliação das **disponibilidades hídricas**
- A evaporação é responsável por **perdas de água** importantes nos reservatórios (albufeiras, lagoas), pelo que devem ser consideradas na fase de dimensionamento de barragens e outros reservatórios, assim como durante a sua gestão
- Na avaliação das **necessidades de rega** (projecto e gestão de regadios colectivos ou individuais)

Secção de Engenharia Rural

3

EVAPORAÇÃO

= processo físico, em que a água passa do estado líquido para o estado gasoso

Evaporação potencial (EP)

Taxa máxima de evaporação que ocorre no caso da superfície evaporante estar saturada. É um processo puramente físico, pelo que depende apenas de factores climáticos

Para haver evaporação de água:

- Água ➤ plantas, solo, superfície livre de massas de água (lagos, rios)
- Energia (calor latente de evaporação) ➤ R_n varia com Latitude
Estação do ano
Hora do dia
Nebulosidade
- Remoção do vapor de água
 - gradiente de humidade ➤ $e_s \text{ superfície} - (e_s - e_a)_{ar}$ Temperatura do ar e da superfície evaporante
 - transporte (difusão / convecção) ➤ velocidade do vento

Secção de Engenharia Rural

4

MEDIÇÃO/ESTIMAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

Medição directa

- Evaporímetros
- Tinas evaporimétricas
- Balanço hidrológico

Medição indirecta/Fórmulas

- Método do balanço de energia
- Método aerodinâmico
- Método das flutuações instantâneas
- Método de combinação

Secção de Engenharia Rural

5

Evaporímetro de Piche

Instalado em abrigo meteorológico.
Menor correlação com a evaporação de grandes superfícies de água que as tinas



Disco de papel poroso



$$E_{tina} = 915,245 + 0,422E_{Piche}$$

valores anuais, mm
S do país

Secção de Engenharia Rural

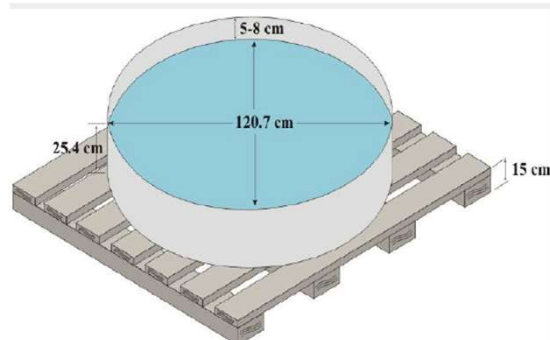
6

Tinas evaporimétricas



Tina Classe A

Secção de Engenharia Rural



Estrado de madeira (ou superfície isolante): para minimizar as trocas de energia com o solo

A evaporação é determinada através da equação do balanço:

$$P + Q - E = \Delta A$$

- E – evaporação
- P – precipitação
- Q – água usada para repor o nível na tina
- ΔA – variação da água armazenada na tina

7



$$E = K_{tina} E_{tina}$$

- E – evaporação do lago/albufeira
- K_{tina} – coeficiente da tina
- E_{tina} – evaporação medida na tina

Valores de K_{tina} em Portugal:

- Outubro e Novembro: 0.7
- Dezembro a Março: 0.6
- Abril e Maio: 0.7
- Junho a Setembro: 0.8

$K_{tina} < 1$ porque:

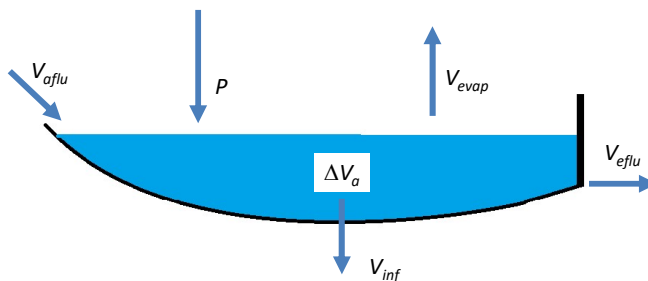
- Energia recebida pelos lados e fundo → maior temperatura da água → maior evaporação
- Efeito de oásis (transporte de energia por massas de ar provenientes das zonas circundantes)
- Efeito do bordo sobre a turbulência do ar

Secção de Engenharia Rural

8

Método do balanço hidrológico (= balanço de massa)

$$\Delta V_a = P + V_{aflu} - (V_{inf} + V_{eflu} - V_{evap})$$



- ΔV_a – variação do armazenamento de água
- P – precipitação
- V_{aflu} – volume afluente
- V_{eflu} – volume efluente
- V_{inf} – volume infiltrado
- V_{evap} – volume evaporado

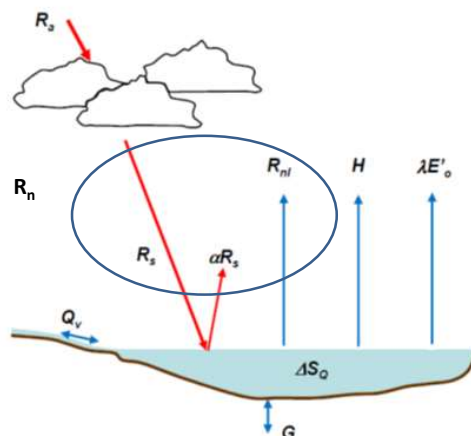
Secção de Engenharia Rural

9

Método do balanço de energia

- R_a – radiação no topo da atmosfera
- R_s – radiação solar
- α – albedo
- R_{nl} – radiação líquida de longo comprimento de onda
- H – fluxo de calor sensível
- λE_o – fluxo de calor latente
- G – fluxo de calor para o leito
- Q_v – energia transportada pelo fluxo superficial, subsuperficial e precipitação
- ΔS_Q – taxa de variação do armazenamento de energia da massa de água

$$\Delta S_Q = R_n + Q_v - H - \lambda E_o - G$$



Unidades: W/m^2
(densidade de fluxo)

Secção de Engenharia Rural

10

$$\Delta S_Q = R_n + Q_v - H - \lambda E_o - G$$

$$\downarrow \quad \swarrow \quad \downarrow$$

$$f(T) \quad \quad \approx 0$$

Mas podem não ser negligenciáveis em lagos pouco profundos

$$\rightarrow \Delta S_Q = \rho c \Delta T / \Delta t$$

$$\rightarrow Q_v = \sum \rho c Q_i T_i \quad \text{Quer os caudais quer as temperaturas são difíceis de obter}$$

$$R_n = R_s (1 - \alpha) - R_{nl}$$

Uma maneira de conseguir resolver o balanço é recorrer à razão de Bowen:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{T_w - T_a}{e_w - e_a} \quad \rightarrow \quad \lambda E = \frac{R_n + Q_v - \Delta S_Q}{(1 + \beta)}$$

- o método, quando aplicado à escala mensal e medição correcta de todos os termos pode conduzir a estimativas com um erro de 5 a 10%
- devido à dificuldade e custo, é normalmente usado para calibrar outros métodos mais expeditos (ex: tinas evaporimétricas)

Secção de Engenharia Rural

11

Métodos de medição da evaporação baseados nas equações de fluxo

- estes métodos utilizam medições de variáveis meteorológicas em **um** ou **dois** níveis acima da superfície evaporante.
- os resultados de medições instantâneas (**20/min** a **20/s**, consoante o método utilizado) são integrados por períodos inferiores a uma hora.
- são aplicáveis de um modo geral em superfícies extensas e uniformes de modo a evitar advecção e variações da rugosidade.
- a utilização destes métodos exige:
 - equipamentos adequados para armazenamento e processamento dos dados
 - instrumentos de medição de grande rigor e sensibilidade (elevado preço)

Secção de Engenharia Rural

12

Método aerodinâmico

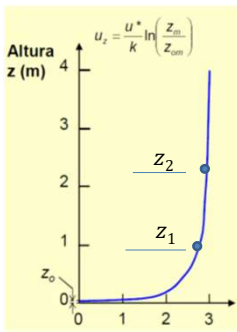
Baseia-se nas equações de transporte (de vapor de água, de calor sensível e da quantidade de movimento)

$$E = -\rho_a K_w \frac{dq}{dz} \qquad H = -\rho_a K_H \frac{dT}{dz} \qquad \tau = \rho_a K_M \frac{du}{dz}$$

q = massa de vapor / massa de ar (Humidade específica)

Havendo medições em 2 níveis z_1 e z_2

$$E = -\rho_a K_w \frac{q_2 - q_1}{z_2 - z_1} \qquad \tau = \rho_a K_M \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1}$$



$$u_2 - u_1 = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$$

$$u_* = \frac{k(u_2 - u_1)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}$$

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho_a} \quad (\text{por definição})$$

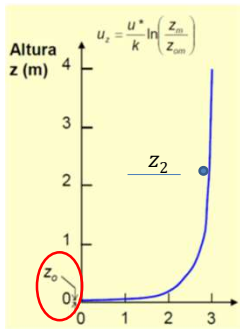
$$\frac{E}{\tau} = -\frac{K_w}{K_M} \frac{q_2 - q_1}{u_2 - u_1}$$

$$E = \frac{K_w}{K_M} \frac{k^2 \rho_a (q_1 - q_2) (u_2 - u_1)}{\left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)\right]^2}$$

Equação de Thornthwaite- Holtzman

13

$$\frac{K_w}{K_M} \approx 1 \quad \longrightarrow \quad E = \frac{k^2 \rho_a (q_1 - q_2) (u_2 - u_1)}{\left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)\right]^2}$$



Havendo medições só ao nível z_2

Em z_0 $u=0$ e o ar está saturado pelo que:

$$E = \frac{k^2 \rho_a (q_{sat1} - q_2) (u_2)}{\left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)\right]^2}$$

$$q = 0.622 \frac{e}{p_{atm}}$$

$$E = 0.622 \frac{k^2 \rho_a (e_{sat1} - e_2) (u_2)}{p_{atm} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)\right]^2}$$

($M L^{-2} T^{-1}$)

$$E = 0.622 \frac{k^2 \rho_a (e_{sat1} - e_2) (u_2)}{\rho_w p_{atm} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)\right]^2}$$

($L T^{-1}$)

Secção de Engenharia Rural

14

Método das flutuações instantâneas (eddy correlation / eddy covariance)

Baseia-se nas equações de transporte (de vapor de água, de calor sensível e da quantidade de movimento)

Medições num único nível

$$E = \lambda (\overline{\rho_a w})' q'$$

Equipamento caro e muito sensível → usado só em investigação

w – componente vertical da velocidade do vento



Secção de Engenharia Rural

15

Método combinado

Método do Balanço de energia



Método aerodinâmico

$$E = \underbrace{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r}_{\text{termo energético}} + \underbrace{\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a}_{\text{termo aerodinâmico}}$$

Equação de Penman

$$E = \frac{\Delta (R_n) + \gamma (e_s - e_a) f(u)}{\Delta + \gamma}$$

Secção de Engenharia Rural

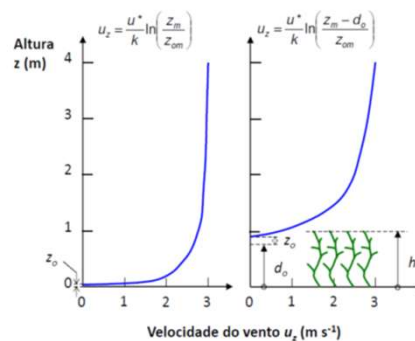
16

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Durante muito tempo, considerou-se que a ET de um coberto bem desenvolvido, cobrindo totalmente o solo e sem limitações de abastecimento hídrico fosse dependente apenas de factores climáticos (as plantas comportar-se-iam simplesmente como "mechas" entre o solo e a atmosfera – vários autores sugeriram usar a Eq de Penman para estimar a ET , surgindo também o conceito de evapotranspiração potencial ETP (na prática equivale a considerar que as plantas se comportam como uma superfície evaporante saturada).

Se esta hipótese se verificasse, bastaria modificar a função do vento, para ter em conta a diferente estrutura do coberto quando comparada com uma superfície livre de água ou solo nu

No entanto, a evapotranspiração de um coberto é sempre inferior à potencial, mesmo se as plantas estiverem bem abastecidas em água (solo à capacidade de campo), dado que a água é evaporada ao nível das câmaras estomáticas e não à superfície da planta (\Rightarrow **a superfície nunca está saturada**).



Secção de Engenharia Rural

17

MEDIÇÃO/ESTIMAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Medição directa

- Lisímetros
- Microlisímetros
- Fluxo de seiva

Fórmulas baseadas nas equações de fluxo

- Método do balanço de energia (razão de Bowen)
- Método aerodinâmico
- Método das flutuações instantâneas
- Equação de Penman-Monteith

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad \beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{T_{a1} - T_{a2}}{e_1 - e_2}$$

$$ET = \frac{k^2 \rho_a (q_1 - q_2) (u_2 - u_1)}{\left[\ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right) \right]^2}$$

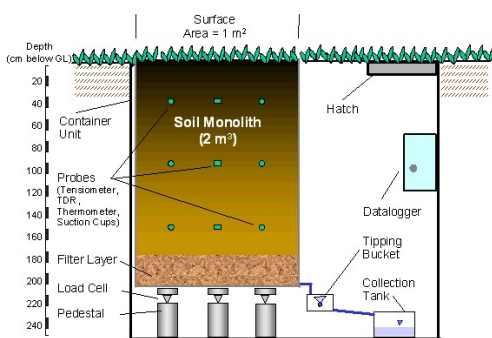
Secção de Engenharia Rural

18

Medição directa da evapotranspiração

Lisímetros

- de pesagem
- de drenagem



Secção de Engenharia Rural

19

Medição da evaporação do solo

Mini-lisímetros



Secção de Engenharia Rural

20

Medição da transpiração

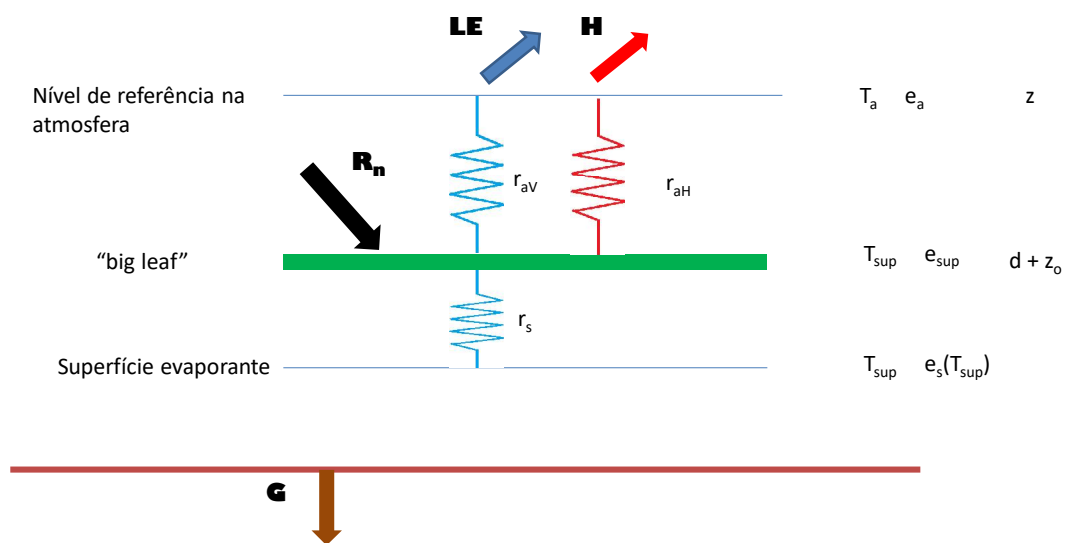
Fluxo de seiva



Secção de Engenharia Rural

21

Método combinado



Secção de Engenharia Rural

22

$$H = \rho_a c_p \frac{T_{sup} - T_a}{r_a} \quad \lambda E = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \frac{e_s(T_{sup}) - e_a}{r_s + r_a} \quad R_n - G = \lambda E + H \quad \Delta = \frac{e_s(T_{sup}) - e_a}{T_{sup} - T_a}$$

↓
Avaliado a T_a

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

Equação de Penman-Monteith

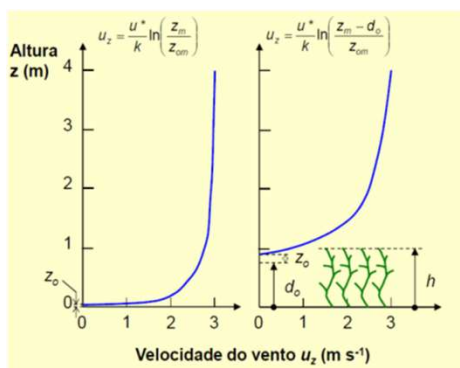
λE – (densidade de) fluxo de calor latente	W/m ²
λ – calor latente de evaporação da água	J/kg
E – fluxo de transpiração	kg m ⁻² s ⁻¹
R_n – fluxo de radiação líquida	W/m ²
G – fluxo de calor para o solo	W/m ²
ρ_a – massa volúmica do ar	kg/m ³
c_p – calor específico do ar a pressão constante	J kg ⁻¹ °C ⁻¹
e_s – pressão de saturação de vapor	Pa
e_a – pressão actual de vapor	Pa
r_a – resistência aerodinâmica	s/m
Δ – decliva da curva $e_s = f(T)$	Pa/°C
γ – constante psicrométrica	Pa/°C
r_s – resistência de superfície	s/m

Secção de Engenharia Rural

23

Estimativa da resistência aerodinâmica

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_M - d}{z_{oM}}\right) \ln\left(\frac{z_H - d}{z_{oH}}\right)}{k^2 u}$$



- z_M – altura de medição da velocidade do vento
- z_H – altura de medição da temperatura e humidade do ar
- z_{oM} – rugosidade aerodinâmica para a quantidade de movimento
- z_{oH} – rugosidade aerodinâmica para o calor (sensível e latente)
- d – altura de deslocamento do plano de referência
- k – constante de von Karman

	Agrícola	Florestal
d_o	0.67 h	0.78 h
z_{oM}	0.123 h	0.076 h
z_{oH}	0.1 z_{oM}	0.368 z_{oM}

Secção de Engenharia Rural

24

Estimativa da resistência de superfície

$$r_s = \frac{r_{st}}{LAI_e}$$

r_s = resistência do copado ($m^{-1}s$)
 r_{st} = valor médio da resistência estomática de uma folha ($m^{-1}s$)
 LAI_e = índice de área foliar efectivo

A utilização de LAI_e toma em consideração que, tipicamente, a maior parte da radiação líquida é absorvida na metade superior de copados densos, sendo mais activa no transporte de vapor de água e de calor que a metade inferior:

$$\begin{cases} LAI_e = LAI, & LAI \leq \frac{LAI_{mx}}{2} \\ LAI_e = \frac{LAI_{mx}}{2}, & LAI > \frac{LAI_{mx}}{2} \end{cases} \quad LAI_{mx} = \text{máximo valor de LAI que a vegetação pode atingir}$$

Secção de Engenharia Rural

25

Modelação da resistência estomática

Modelo de Jarvis

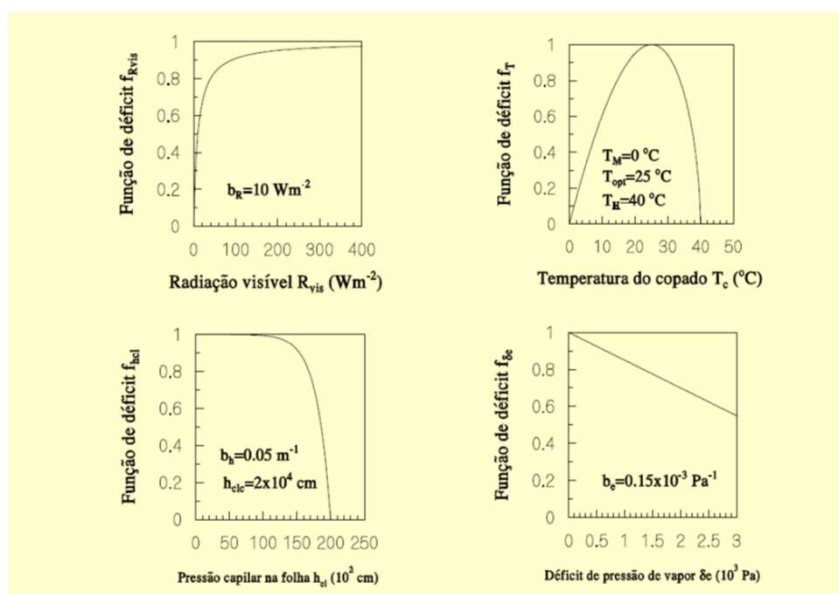
$$r_{st} = \frac{r_{min}}{f_{Rvis} f_T f_{hcl} f_{\delta e} f_{CO2}}$$

r_{min} = resistência estomatal mínima (figura e quadro seguintes)
 f_i = função de stress ambiental, variando de zero à unidade, e representada na Fig. 7
 f_{Rvis} = função de défice de radiação visível
 f_T = função de défice de temperatura
 f_{hcl} = função de défice de pressão capilar na folha
 $f_{\delta e}$ = função de défice de pressão de vapor de água

O valor característico de r_{min} para culturas agrícolas é de 100 sm^{-1} e, com menor confiança, para florestas de resinosas de 1000 sm^{-1} .

Secção de Engenharia Rural

26



Secção de Engenharia Rural

27

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Doorenbos e Pruitt (1977), Allen et al. (1998) (FAO 24, FAO 56)



taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma **altura constante de 0.12 m**, uma **resistência de superfície constante de $70 s m^{-1}$** e um **albedo de 0.23**, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva verde de altura uniforme, em crescimento activo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água.

Nota: ao longo do tempo foram adoptadas duas culturas de referência:

- Luzerna: coberto mais semelhante ao das culturas mais comuns
- Relva: mais fácil de estabelecer, maior disponibilidade de dados

Secção de Engenharia Rural

28

Resistência aerodinâmica da cultura de referência

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_M - d}{z_{oM}}\right) \ln\left(\frac{z_H - d}{z_{oH}}\right)}{k^2 u}$$

$$d = \frac{2}{3} h_c \cong 0.08 \text{ m}$$

$$z_{oM} = 0.123 h_c \cong 0.015 \text{ m}$$

$$z_{oH} = 0.1 z_{oM} = 0.0015 \text{ m}$$

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{2 - 0.08}{0.015}\right) \ln\left(\frac{2 - 0.08}{0.0015}\right)}{0.41^2 u} = \frac{208}{u}$$

Resistência de superfície da cultura de referência

$$r_s = \frac{r_{st}}{0.5 \text{ LAI}}$$

$$\text{LAI} = 24 h_c = 24 \times 0.12 = 2.88$$

$$r_s = \frac{100}{0.5 \times 2.88} \cong 70 \text{ s/m}$$

Seccção de Engenharia Rural

29

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Equação de Penman-Monteith

$$\lambda = 2.45 \text{ MJ/kg} \quad 1 \text{ dia} = 86400 \text{ s}$$

$$1/\lambda = 0.408 \text{ kg/MJ}$$

$$\rho_a = 3.486 \frac{P}{1.01 (T + 273)}$$

$$c_p = \gamma \frac{0.622}{P} \lambda$$

$$\frac{\rho_a c_p}{\lambda r_a} = 3.486 \frac{P}{1.01 (T + 273)} \gamma \frac{0.622}{P} \lambda \times 86400 / (\lambda \times 208 / u_2)$$

$$= \frac{900}{(T + 273)} \gamma u_2$$

$$\frac{r_s}{r_a} = \frac{70}{208 / u_2} = 0.34 u_2$$

$$ET_o = \frac{\Delta 0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} (e_s - e_a) u_2}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Equação FAO/ Penman-Monteith

Seccção de Engenharia Rural

30

Variáveis auxiliares

$$e_s(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \quad \Delta = \frac{2504 \exp\left[\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right]}{(T + 237.3)^2} \quad \gamma = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293}\right)^{5.26}$$

$$e_s = \frac{e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min})}{2}$$

$$e_a = \frac{1}{2} e_s(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + \frac{1}{2} e_s(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}$$

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{e_s(T_{\min}) + e_s(T_{\max})}$$

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z_m - 5.42)}$$

Secção de Engenharia Rural

31

Fluxo líquido de radiação de curto comprimento de onda (R_{ns})

$$R_n = R_s \downarrow - \alpha R_s \uparrow - R_{lu} \uparrow + R_{ld} \downarrow$$

$$R_a = 37.6 d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s)$$

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a$$

$$\blacktriangleright \omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$

$$\blacktriangleright N = \frac{24}{\pi} \omega_s = 7.64 \omega_s$$

$$\blacktriangleright d_r = 1 + 0.033 \cos(0.0172 J)$$

$$\blacktriangleright a_s = 0.25 \text{ e } b_s = 0.50.$$

$$\blacktriangleright \delta = 0.409 \sin(0.0172 J - 1.39)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

Secção de Engenharia Rural

32

Fluxo líquido de radiação de longo comprimento de onda (R_{nl})

$$R_n = R_s \downarrow - \alpha R_s \uparrow - R_{lu} \uparrow + R_{ld} \downarrow$$

$$R_{nl} = f \varepsilon' \sigma \frac{T_{Kx}^4 + T_{Kn}^4}{2}$$

- σ constante de Stefan-Boltzmann = 4.90×10^{-9} [MJ m⁻² K⁻⁴ d⁻¹]
- $f = a_c \frac{R_s}{R_{so}} + b_c$

a_c	≈ 1.35 para condições climáticas normais
b_c	≈ -0.35 para condições climáticas normais
$a_c + b_c$	≈ 1.0
- $R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a$
- $\varepsilon' = 0.34 - 0.14 \sqrt{e_d}$

Secção de Engenharia Rural

33

Fluxo de calor para o solo (G)

Valores diários

$$G = 0.1(T_i - T_{i-1})$$

mas tb se pode considerar
sem grande erro que $G = 0$

Valores mensais

$$G = 0.07(T_{month\ i+1} - T_{month\ i-1})$$

$$G = 0.14(T_{month\ i} - T_{month\ i-1})$$

Secção de Engenharia Rural

34

Equação de Hargreaves - Samani

$$ET_o = 0.0135 K_{Rs} (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{méd} + 17.8) \frac{R_a}{\lambda}$$

ET_o – evapotranspiração de referência (mm/dia)

T – temperaturas mensais (°C)

R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)

λ – calor latente de vaporização (MJ/kg)

K_{Rs} – coeficiente de ajustamento da radiação

- para locais no "interior", com domínio de massas terrestres (i.e., as massas de ar não são influenciadas por uma massa de água de grandes dimensões), $K_{Rs} = 0.16$;

- para zonas "costeiras", situadas na ou perto da costa, $K_{Rs} = 0.19$;

- em termos médios, utiliza-se $K_{Rs} = 0.17$

Outras equações simplificadas

Erros de 10-15%

- **Equação de Priestley-Taylor** - com base na radiação líquida
- **Fórmula de Turc** – originalmente criada para estimar o escoamento

Secção de Engenharia Rural

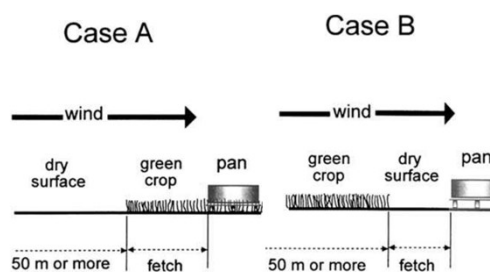
35

Tina evaporimétrica

$$ET_o = K_{tina} E_{tina}$$

K_{tina} é função de:

- Tipo de tina
- Velocidade do vento
- Humidade relativa
- Cobertura do solo na zona circundante



Tabelas em Allen *et al* (1998)

Secção de Engenharia Rural

36

INTERCEPÇÃO

= fracção de água de uma chuvada que é retida pela vegetação (ou outra superfície, como um telhado) e que se evapora

Pode representar uma fracção importante **da precipitação total anual** em floresta:

- florestas de resinosas: 15 – 40%
- florestas de folhosas: 10 – 25%

A quantidade de água interceptada depende de:

- características da chuvada (intensidade, tamanho das gotas)
- da espécie, idade e densidade do coberto vegetal
- da velocidade do vento

Secção de Engenharia Rural

37

Medição da intercepção

Equação do balanço de massa

$$\Delta A_z = P - V_{\text{Int}} - V_{\text{tronco}} - V_{\text{copa}}$$

Considerando uma chuvada inteira, $\Delta A_z = 0$ e consequentemente

$$V_{\text{Int}} = P - V_{\text{tronco}} - V_{\text{copa}}$$

(b)



(a)



(c)



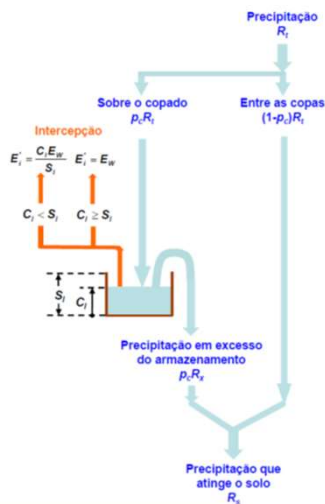
Medição da intercepção em pinhal, através da medição da: (a) precipitação sobre o pinhal, (b) precipitação que atinge o solo e (c) precipitação que escorre dos troncos (Fonte: David, 2018)

Secção de Engenharia Rural

38

A interceptação total é constituída por duas fracções:

- a que é retida pela folhagem
- a que é evaporada durante a chuva



Taxa conjunta de transpiração e intercepção, para copado parcialmente molhado:

$$E_{t,i} = \frac{C}{S} E_w + \left(1 - \frac{C}{S}\right) E_{td}$$

E_w = taxa de intercepção obtida com a equação de Penman-Monteith, com o copado completamente molhado.
 E_{td} = taxa de transpiração obtida com a equação de Penman-Monteith, com o copado completamente seco.

$S_i = 2h_i LAI$

h_i = altura efectiva máxima de água de um lado da folha.

Para culturas agrícolas e florestas:
 $0,05 \leq h_i \leq 0,20$ mm

Com valores típicos:
 $0,10 \leq h_i \leq 0,15$ mm

(Fonte: Rutter, 1975; Norman e Campbell, 1983).

Secçã Figura 13 Modelo de Rutter simplificado

Intercepção vs transpiração

Intercepção ($r_s = 0$)

$$\lambda E_i = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma}$$

Transpiração ($r_s \neq 0$)

$$\lambda E_t = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

$$\frac{\lambda E_i}{\lambda E_t} \cong 1 + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{r_s}{r_a}$$

Culturas agrícolas: $r_s/r_a \approx 1$ $E_i/E_t \approx 1$

Florestas: $r_s/r_a \approx 10$ $E_i/E_t \approx 3$ a 7

→ Em igualdade de condições meteorológicas, a interceptação é muito superior à correspondente taxa de transpiração nas florestas

Uma vez que só ocorre interceptação durante as chuvas, o volume anual de água interceptado depende das características da precipitação (nº e intensidade) → maior intermitência conduz a um maior volume interceptado, pois o reservatório do copado é esvaziado entre chuvas

Evapotranspiração real

No caso das plantas (e também do solo) para além dos factores climáticos que controlam a evaporação surge um outro factor: **o fornecimento de água para manter o processo**

Caso a renovação/disponibilidade de água seja insuficiente $ET_{real} < ET_{máxima}$

Árvores/florestas possuem sistemas radiculares mais desenvolvidos em profundidade, conseguindo obter água a maiores profundidades e, conseqüentemente, manter a ET máxima durante mais tempo

Resinosas *versus* folhosas

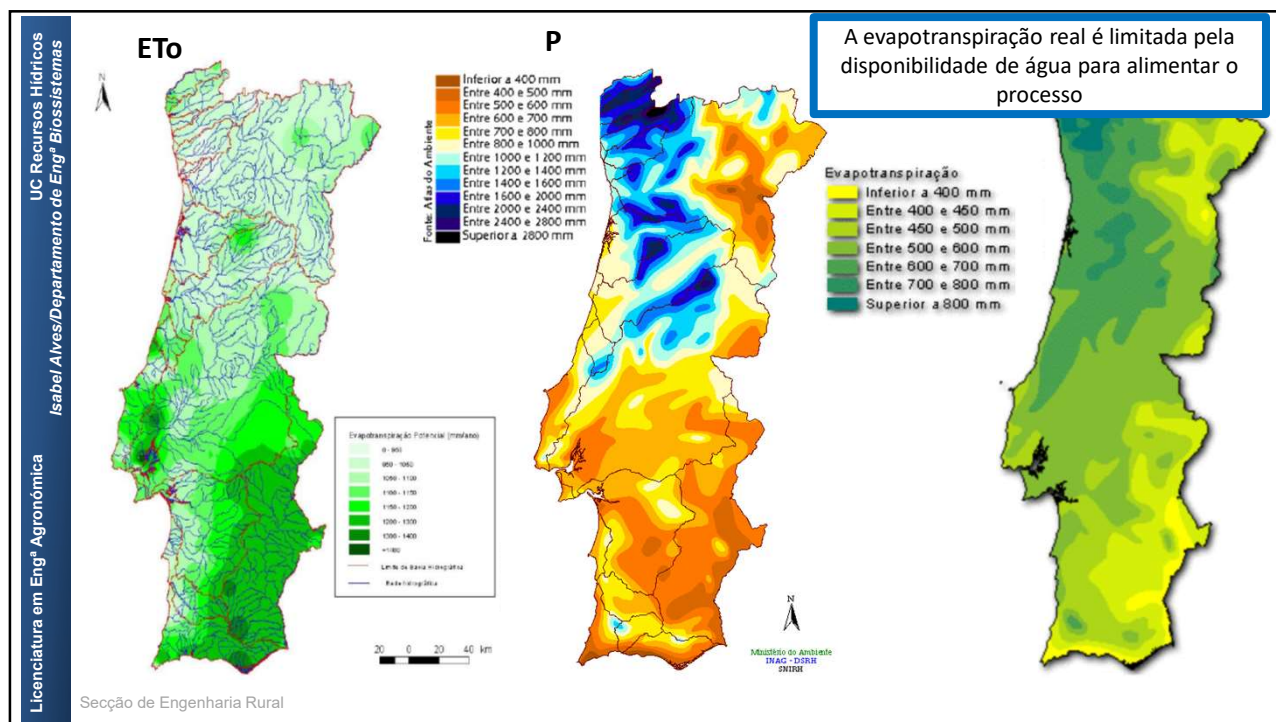
- Albedo menor
- Intercepção maior
- Persistência das folhas



resinosas têm maior ET

Secção de Engenharia Rural

41



42