



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E MEIO AMBIENTE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

## DISCIPLINA: FEN 71393 HIDRÁULICA APLICADA E HIDROLOGIA

Notas de aula da Profa. Luciene Pimentel da Silva

### Aplicando o Método Combinado de Penman no Cálculo da Evaporação

$$E = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\frac{\Delta}{\gamma} (R_n - G) + 6,43(1 + 0,53u_2)(e_s - e_d)}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \right] \text{ em mm/dia}$$

- $\lambda$  - calor latente para vaporização em  $\text{MJkg}^{-1}$

$$\lambda = 2,501 - 0,002361T_s$$

$T_s$  – temperatura média em  $^{\circ}\text{C}$  (água)

- $\gamma$  - constante psicrométrica em  $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$

$$\gamma = \frac{c_p \cdot p}{0,622\lambda}$$

$c_p$  – é o calor específico do ar igual à  $0,001013 \text{ kJ kg}^{-1}\text{}^{\circ}\text{C}^{-1}$

$p$  – pressão atmosférica em  $\text{kPa}$

$$p = 101,3 - 0,01055 \cdot \text{alt}$$

$\text{alt}$  – é a altitude em  $\text{m}$

ou

igual à aproximadamente  $0,66 \text{ mb}^{\circ}\text{C}^{-1}$

$\lambda$  - conforme definido anteriormente

- $u_2$  – velocidade do vento em m/s à uma altura de referência de 2 m
- $(e_s - e_d)$  – é o déficit de pressão de vapor em kPa

$e_s$  - pressão de vapor saturada

$$e_s = \exp \left[ \frac{16,78T - 116,9}{T + 237,3} \right]$$

T é a temperatura média em °C

$e_d$  – é a pressão de vapor atual

$$e_d = e_s \cdot \frac{UR}{100}$$

UR – é a umidade relativa em termos percentuais

$e_s$  – conforme definido anteriormente

- $\Delta$  - é o gradiente da curva de pressão de vapor saturado em função da temperatura em kPa °C<sup>-1</sup>

$$\Delta = \frac{\Delta e_s}{\Delta T}$$

$$\Delta = 0,200[0,00738T + 0,8072]^7 - 0,000116$$

T é a temperatura média em °C

- $R_n$  – é a radiação líquida em MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>

$$R_n = (1 - \alpha)R_i - R_e$$

$\alpha$  - é o albedo ou reflectância de ondas curtas (usar Tabela A)

$R_i$  – é a radiação incidente na superfície em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>

$$R_i = R_s + R_L$$

$R_s$  – é a radiação de ondas curtas proveniente do sol

$R_L$  – é a radiação de ondas longas proveniente da  
própria atmosfera

$R_e$  – é a radiação de ondas longas emitida pela Terra como corpo negro

Rearranjando a equação de  $R_n$  e agrupando os termos de radiação de ondas curtas e ondas longas:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + R_b$$

$R_s$  – conforme definido anteriormente

$R_b$  – é o componente de radiação líquida de ondas longas

$$R_b = (1 - \alpha)R_L - R_e$$

$\alpha$ ,  $R_L$  e  $R_e$  – conforme definido anteriormente

É possível, através de relações empíricas, estimar os componentes da radiação, a partir da insolação. Nesse caso,  $R_n$ , em  $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ :

$$R_n = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) S_0 (1 - \alpha) - \left( 0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_d}) \sigma (T + 273,2)^4$$

$a_s$  e  $b_s$  – são coeficientes de ajuste, quando não é possível o ajuste, valores médios podem ser aplicados:  $a_s = 0,25$  e  $b_s = 0,50$ .

$n$  – é a insolação diária observada

$N$  – é a insolação máxima, obtida a partir da latitude do local da Tabela C

$S_0$  – é a radiação solar recebida no limite mais externo da atmosfera. Pode ser obtido da Tabela D

$\alpha$  – é o albedo, que para espelho d'água pode ser adotado em média igual a 0,05

$\sigma$  – é a constante de Stefan-Boltzman, igual a  $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} \text{ K}^{-4}$

$T$  – é a temperatura média em  $^{\circ}\text{C}$

Alternativamente, se a radiação de ondas curtas,  $R_s$ , é observada,  $R_b$  é dado por:

$$R_b = \left( a \frac{R_s}{R_{so}} + b \right) R_{bo}$$

$a$  e  $b$  – são constantes que dependem do clima da área de interesse:

úmido	$a=1,0$	$b=0,0$
árido	$a=1,2$	$b=-0,2$
semi-úmido	$a=1,1$	$b=-0,1$

$R_{so}$  – é a radiação solar quando o céu está incoberto por nuvens. Pode ser obtido da Tabela B.

$R_{bo}$  – é dado por:

$$R_{bo} = \varepsilon \sigma (T + 273,2)^4$$

$\sigma$  e  $T$  – conforme definido anteriormente

$\varepsilon$  – é a emissividade líquida. Pela equação de Idso-Jackson:

$$\varepsilon = -0,02 + 0,261 \exp[-7,77 \times 10^{-4} T^2]$$

$T$  – é a temperatura média em °C

- $G$  - é o fluxo de calor no solo em  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$

$$G = c_s d_s \frac{T_2 - T_1}{\Delta t}$$

$c_s$  – coeficiente relacionado à capacidade de aquecimento dos solos. Pode ser considerado igual a  $2,1 \text{ MJ m}^{-3} \text{°C}$

$d_s$  – profundidade efetiva do solo. Pode ser considerado igual a  $0,18 \text{ m}$

$T_1$  e  $T_2$  – temperaturas médias em °C para o início e fim do intervalo de tempo, respectivamente

$\Delta t$  – tempo em dias transcorrido entre o início e o fim do intervalo

**Principais Fontes de Consulta:**

Handbook of Hydrology, 1992, Ed. David Maidment, McGrawHill.

Engenharia Hidrológica 2, 1989, ABRH, Editora da UFRJ.