

Capítulo 6- Método de Priestley-Taylor para evapotranspiração de referência ETo

6.1 Introdução

O Método de *Priestley-Taylor* é uma simplificação das equações de Penman e de Penman-Monteith. Apresenta a vantagem de se exigir menos dados.

Este método é também citado pela FAO como muito utilizado nos Estados Unidos.

6.2 Cálculo da evapotranspiração de referência ETo.

O método de *Priestley-Taylor* é uma aproximação da equação de Penman-Monteith e possui um coeficiente empírico adimensional =1,26.

Conforme *Sumner e Jacobs, 2005 in Journal of Hydrology*, o valor da evapotranspiração de referência pelo Método de Priestley-Taylor é o seguinte:

$$ETo = 1,26 \times \left[\frac{R_n - G}{\Delta + \gamma} \right] \times (R_n - G)$$

Sendo:

ETo= evapotranspiração de referência (mm/dia)

= constante psicrométrica (kPa/°C)

= derivada da função de saturação de vapor de água

Rn= radiação útil recebida pela cultura de referência (mm/dia)

G= fluxo de calor recebido pelo solo (mm/dia)

6.3 Fluxo de calor recebido pelo solo G

Conforme Shuttleworth, 1993, o fluxo de calor recebido pelo solo pode ser estimado por:

Na prática se usam as temperaturas médias mensais dos meses.

$$G = 0,14 (T_i - T_{i-1}) \quad (\text{para período de um mês})$$

Sendo:

G= fluxo de calor recebido durante o período considerado (MJ/m² x dia)

T_i = temperatura do ar no mês (°C)

T_{i-1} = temperatura do ar no mês anterior (°C)

O valor de G tem sinal. Quando a temperatura do mês é maior que a anterior é positivo, caso contrário será negativo.

Dica: geralmente o valor de G é muito baixo e adotamos G =0, conforme sugere Shuttleworth, 1993.

Exemplo 6.1

Calcular o fluxo de calor recebido pelo solo no mês de abril sendo:

Março 14,1 °C

Abril 16,1 °C

$$G = 0,14 (T_{i+1} - T_i) / 2,45$$
$$G = 0,14 (16,1 - 14,1) = 0,28 \text{ MJ/m}^2 \times \text{dia}$$

Nota: G poderá ser positivo ou negativo.

6.4 Pressão atmosférica P

A pressão atmosférica depende da altitude z.

$$P = 101,3 \times \left[\frac{293 - 0,0065 \times z}{293} \right]^{5,26}$$

Sendo:

P= pressão atmosférica (kPa)

z= altura acima do nível do mar (m)

Exemplo 6.2

Calcular a pressão atmosférica de um local com altitude z=770m.

$$P = 101,3 \times \left[\frac{293 - 0,0065 \times z}{293} \right]^{5,26}$$
$$P = 101,3 \times \left[\frac{293 - 0,0065 \times 770}{293} \right]^{5,26}$$
$$P = 92,5 \text{ kPa}$$

6.5 Constante psicrométrica

A constante psicrométrica é dada pela equação:

$$= 0,665 \times 10^{-3} \times P$$

Sendo:

= constante psicrométrica (kPa/° C)
 P= pressão atmosférica (kPa)

Exemplo 6.3

Calcular a constante psicrométrica para pressão atmosférica P= 92,5 kPa

$$= 0,665 \times 10^{-3} \times P$$

$$= 0,665 \times 10^{-3} \times 92,5 = 0,062 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$$

Radiação extraterrestre Ra

A radiação solar extraterrestre Ra no topo da atmosfera em (MJ/m² x dia) pode ser estimada por:
Ra= (24x60/PI) x dr x Gscx (ws x sen () x sen ()+ cos() x cos() sen (ws)).

Sendo:

Ra= radiação solar no topo da atmosfera ou radiação extraterrestre (MJ/m² x dia)

Gsc= constante solar= 0,0820 MJ/m² x min

ws= ângulo solar (rad)

= latitude (rad)

=declinação solar (rad)

dr= distância relativa da Terra ao Sol.

6.6 Distância relativa da Terra ao Sol dr

Mas a dr é a distância relativa da terra ao sol que é fornecida pela equação em radianos:

$$dr= 1 + 0,033 \times \cos [(2 \times \text{PI} / 365) \times J]$$

Sendo:

dr= distância da terra ao sol (rad)

J= dia Juliano que varia de 1 a 365dias.

$$N= (24/ \text{PI}) \times ws$$

Mas:

$$ws= \arccos [-\tan() \times \tan()]$$

Sendo:

ws= ângulo da hora do por do sol em (rad)

= latitude do local considerado. Positivo no hemisfério norte e negativo no hemisfério Sul (Cuidado!). Para Guarulhos =- 23° e 30min = -23,5° (hemisfério sul é negativo). Também deve estar em (rad).

= declinação solar (rad)

N= número de horas de luz solar em um dia (h)

6.7 Declinação solar

A declinação solar pode ser calculada por:

$$= 0,409 \times \sin [(2 \times \text{PI} / 365) \times J - 1,39]$$

6.8 Dia Juliano

Vai de 1 a 365 dias. Geralmente é o meio do mês contado deste o dia primeiro. Usaremos como base sempre o dia 15 de cada mês.

Assim para janeiro o dia Juliano é 15; para fevereiro é 46; para março é 74 e para abril 105 e assim por diante conforme Tabela (6.1).

Tabela 6.1-Dia Juliano

Mês	Dia Juliano
Coluna1	(1 a 365)
Janeiro	15
fevereiro	46
março	74
abril	105
maio	135
junho	166
julho	196

agosto	227
setembro	258
outubro	288
novembro	319
dezembro	349

Exemplo 6.4

Calcular a declinação solar para o mês de março em local.

$$\begin{aligned} \text{O dia Juliano para o mês de março conforme Tabela (6.1) é } J &= 74 \text{ dias.} \\ &= 0,4093 \times \text{sen} [(2 \times \text{PI} / 365) \times J - 1,405] \\ &= 0,4093 \times \text{sen} [(2 \times 3,1416 / 365) \times 74 - 1,405] = -0,040 \end{aligned}$$

Exemplo 6.5

Calcular o ângulo do por do sol ω_s em local com latitude $\phi = -23,5^\circ$ (sinal negativo porque está no hemisfério sul) e declinação solar $\delta = -0,040$ em radianos.

$$23 \text{ graus} + 30 \text{ min} / 60 = 23 + 0,5 = 23,5^\circ$$

Primeiramente transformemos $\phi = 23,5^\circ$ em radianos:

$$\begin{aligned} \text{Radiano} &= -23,5^\circ \times \text{PI} / 180 = -23,5 \times 3,1416 / 180 = -0,410 \\ \omega_s &= \arccos [-\tan(\phi) \times \tan(\delta)] \\ \omega_s &= \arccos [-\tan(-0,410) \times \tan(-0,040)] = 1,59 \text{ rad} \end{aligned}$$

Exemplo 6.6

Calcular a distância relativa da terra ao sol para o mês de março, sendo o dia Juliano $J=74$

$$\begin{aligned} dr &= 1 + 0,033 \times \cos [(2 \times \text{PI} / 365) \times J] \\ dr &= 1 + 0,033 \times \cos [(2 \times 3,1416 / 365) \times 74] \\ dr &= 1,010 \text{ rad} \end{aligned}$$

Exemplo 6.7

Calcular o número máximo de horas de sol por dia N em horas para o mês de março sendo $\omega_s = 1,59$ rad

$$\begin{aligned} N &= (24 / \text{PI}) \times \omega_s \\ N &= (24 / 3,1416) \times 1,59 = 12,1 \text{ h} \end{aligned}$$

Exemplo 6.8

Calcular a relação n/N sendo $N = 12,1$ h e $n = 5$ h
 Nebulosidade = $n/N = 5 / 12,1 = 0,41$ ou seja 41%

Exemplo 6.9

Calcular a radiação solar extraterrestre R_a para o mês de março para local com latitude sul de $\phi = -23,5^\circ = -0,410$, $\omega_s = 1,59$ rad $\delta = -0,040$ rad e $dr = 1,010$ rad

$$\begin{aligned} R_a &= (12 \times 60 / \text{PI}) \times G_{sc} \times dr \times (\omega_s \times \text{sen}(\phi) \times \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \text{sen}(\omega_s)) \\ R_a &= (12 \times 60 / \text{PI}) \times 0,0820 \times 1,010 \times (1,59 \times \text{sen}(-0,410) \times \text{sen}(-0,040) + \cos(-0,410) \times \cos(-0,040) \times \text{sen}(1,59)) \\ R_a &= 36,03 \text{ MJ/m}^2 \times \text{dia} \end{aligned}$$

6.9 Mudança de unidades

A radiação solar pode ser expressa em mm/dia e $\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$ através da seguinte equação:
 Para transformar $\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$ para mm/dia.

$$R_n (\text{mm/dia}) = 1000 \times R_n (\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}) / (w \times \lambda) = R_n (\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}) /$$

Sendo:

$$\begin{aligned} w &= \text{massa específica da água (1000 kg/m}^3) \\ \lambda &= \text{calor latente de vaporização em MJ/kg. Geralmente } \lambda = 2,45. \\ &= 2,501 - 0,002361 \times T \end{aligned}$$

T = temperatura em graus centígrados.

$$w = \text{massa específica da água (kg/m}^3) = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Para transformar mm/dia para $\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$.

$$R_n (\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}) = R_n (\text{mm/dia}) \times$$

Exemplo 6.10

Mudar as unidades de 15mm/dia para MJ/m² x dia do mês de março que tem temperatura de 23,2°.

Primeiramente calculemos o calor latente de vaporização .

$$= 2,501 - 0,00236 \times T$$

Sendo:

= calor latente de evaporação (MJ/kg)

T= temperatura média mensal ° C.

$$= 2,501 - 0,00236 \times 23,2 = 2,45 \text{ MJ/kg}$$

So (mm/dia) = 1000 x So x (MJ/m² x dia) / (1000 x) = So x (MJ/m² x dia) /

So (MJ/m² x dia) = So (mm/dia) x = 15 x 2,45 = 36,75 MJ/m² x dia

Exemplo 6.11

Calcular a energia total incidente sobre a superfície terrestre Rs, sendo dado n/N=0,42 e as= 0,25 e bs= 0,50 e Ra=36,75 MJ/m² x dia

$$Rs = (as + bs \times n / N) \times Ra$$

$$Rs = (0,25 + 0,50 \times 0,42) \times 36,75 = 16,9 \text{ MJ/m}^2 \text{ x dia}$$

Exemplo 6.12

Calcular a radiação solar extraterrestre Rns, sendo a energia total incidente sobre a superfície terrestre Rs= 16,9 MJ/m² x dia e o albedo =0,23.

$$Rns = (1 -) \times Rs$$

$$Rns = (1 - 0,23) \times 16,9 = 12,7 \text{ MJ/m}^2 \text{ x dia}$$

6.10 Tensão de saturação de vapor es.

Depende da temperatura do ar.

$$es = 0,61 \times \exp [17,27 \times T / (237,3 + T)]$$

Sendo:

es= tensão de saturação de vapor (kPa)

T= temperatura média do mês (°C)

exp= 2,7183.. (base do logaritmo neperiano)

Exemplo 6.13

Calcular a tensão de saturação de vapor es para o mês de março sendo a temperatura de 23,2°C.

$$es = 0,6108 \times \exp [17,27 \times T / (237,3 + T)]$$

$$es = 0,6108 \times \exp [17,27 \times 23,2 / (237,3 + 23,2)]$$

$$es = 2,837 \text{ kPa}$$

6.11 Derivada da função de saturação de vapor

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

Sendo:

=derivada da função de saturação de vapor de água (kPa/°C)

es=tensão de saturação de vapor (kPa)

T= temperatura média do mês (°C)

Exemplo 6.14

Calcular a derivada da função de saturação de vapor de água para o mês de março com temperatura média mensal de 23,2°C e tensão de saturação de vapor es=2,837kPa-

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

$$= 4098 \times 2,837 / (237,3 + 23,2)^2$$

$$= 0,171 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$$

6.12 Pressão de vapor da água à temperatura ambiente

$$ea = (UR / 100) \times es$$

Sendo:

ea= pressão de vapor de água a temperatura ambiente (kPa)

UR= umidade relativa do ar média mensal fornecida (%)
es= tensão de saturação de vapor (kPa)

Exemplo 6.15

Calcular a pressão de vapor de água à temperatura ambiente para o mês de março sendo $T = 23,2^\circ \text{C}$ e $es = 2,837 \text{ kPa}$ e a umidade relativa do ar $UR = 75\%$

$$ea = (UR / 100) \times es$$
$$ea = (75 / 100) \times 2,837 = 2,120 \text{ kPa}$$

6.13 Déficit de vapor de pressão D

$$D = es - ea$$

Sendo;
D= déficit de vapor de pressão (kPa)
es= tensão de saturação de vapor (kPa)
ea= pressão de vapor da água à temperatura ambiente (kPa)

Exemplo 6.16

Calcular o déficit de vapor de pressão D para o mês de março sendo $es = 2,837 \text{ kPa}$ e $ea = 2,120 \text{ kPa}$.

$$D = es - ea$$
$$D = 2,837 - 2,120 = 0,717 \text{ kPa}$$

6.14 Resistência da vegetação r_s

É suposta uma grama com 0,12m de altura com resistência $r_s = 70 \text{ s/m}$
 $r_s = 70 \text{ s/m}$

6.15 Cálculo da Radiação R_n

A radiação R_n é a diferença entre a radiação que entra R_{ns} e a radiação que sai R_{nl} .
 $R_n = R_{ns} - R_{nl}$

6.16 Radiação solar em dias de céu claro R_{so}

É fornecida pela equação:
 $R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z) \times R_a$

Sendo;
 R_{so} = radiação solar em dias de céu claro ($\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$)
z= altura do local em relação ao nível do mar (m)

Exemplo 6.17

Calcular o valor de R_{so} para município com altura $z = 770 \text{ m}$ e R_a já calculado para o mês de março de $36,03 \text{ MJ/m}^2 \times \text{dia}$.

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z) \times R_a$$
$$R_{so} = (0,75 + 0,00002 \times 770) \times 36,0 = 27,58 \text{ MJ/m}^2 \times \text{dia}$$

6.17 Radiação útil de curto comprimento R_{ns}

A radiação útil de curto comprimento de onda R_s pode ser calculada por:

$$R_{ns} = (1 - \rho) \times R_s$$
$$R_s = (a_s + b_s \times n / N) \times R_a = (0,25 + 0,50 \times n / N) \times R_a$$

Sendo:
 ρ = albedo. Para solo gramado $\rho = 0,23$
 $a_s = 0,25$ e $b_s = 0,50$ são coeficientes que para climas médios
n= número de horas de sol por dia (h)
N= número máximo de horas de sol por dia (h)
n/N= nebulosidade ou fração de luz. Pode também ser fornecido em porcentagem. É uma medida qualitativa não muito precisa. Para Guarulhos a média é $n/N = 0,42$, ou seja, 42%.
 R_a = radiação solar extraterrestre ($\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$)
 R_s = radiação solar de entrada. Energia total incidente sobre a superfície terrestre ($\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$)
 R_{ns} = radiação de curto comprimento ($\text{MJ/m}^2 \times \text{dia}$)

6.18 Radiação de ondas longas Rnl

$$Rnl = \sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] \times (0,34 - 0,14 \times e_a^{0,5}) \times [(1,35 \times R_s/R_{so} - 0,35)]$$

Sendo:

Rnl= radiação solar de ondas longas (MJ/m² x dia).

ea= pressão atual de vapor (kPa)

Rs= radiação solar (MJ/m²xdia)

Rso= radiação solar em dias de céu claro (MJ/m²xdia)

Rs/Rso= radiação de onda curta limitada a 1,0.

σ =constante de Stefan-Boltzmann=4,903 x 10⁻⁹ MJ/(m² K⁴)

Tmax= tmax(°C) + 273,16. Em graus Kelvin: K= °C + 273,16

Tmini= tmin (°C)+ 273,16

Exemplo 6.18

Calcular a radiação de onda longa “Ln” para o mês de março sendo:

Tmin=15,3 °C

Tmax= 31,7°C

ea= 2,40kPa

Rs= 16,63 MJ/m²xdia

Rso= 27,58 MJ/m²xdia

Rs/Rso= 0,60 <1 OK.

$$Rnl = \sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] \times (0,34 - 0,14 \times e_a^{0,5}) \times [(1,35 \times R_s/R_{so} - 0,35)]$$

$$Rnl = 4,903 \times 10^{-9} \times \left[\frac{(31,7+273,16)^4 + (15,3+273,16)^4}{2} \right] \times (0,34 - 0,14 \times 2,4^{0,5}) \times [(1,35 \times 0,60 - 0,35)] = 2,18 \text{ MJ/m}^2 \times \text{dia}$$

$$Rnl = 2,18 \text{ MJ/m}^2 \times \text{dia}$$

6.19 Aplicação para o município de Guarulhos usando o Método de Priestley-Taylor.

Exercício 6.11

Sendo a umidade relativa do ar de 75% para o mês de março em Guarulhos e sendo Sn= 12,7 MJ/m² x dia e a temperatura de 23,2° C obtemos pelo Método de Priestley-Taylor.

$$e_a = 0,177 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$$

$$e_a = 0,067542 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$$

$$R_n = 4,302 \text{ mm/dia}$$

$$G = 0,052 \text{ mm/dia}$$

$$E_{To} = 1,26 \times \left[\frac{e_a}{e_s} \right] \times (R_n - G)$$

$$E_{To} = 1,26 \times [0,177 / (0,067542 + 0,177)] \times (4,303 - 0,052) = 3,84 \text{ mm/dia}$$

Em 31 dias do mês de março teremos:

$$31 \times 3,84 \text{ mm/dia} = 119 \text{ mm/mês}$$

Os cálculos de janeiro a dezembro estão nas Tabela (6.2) a (6.6).

Tabela 6.2- Método de Priestley-Taylor para evapotranspiração ETo

Dias no mês		Precipitação (mm)	Temperatura do ar (°C)	Fração de luz n/N
31	Janeiro	254,1	23,7	0,31
28	fev	251,7	22,8	0,39
31	mar	200,9	23,2	0,42
30	abr	58,3	21,3	0,47
31	maio	70,3	18,6	0,47
30	junho	39,0	17,5	0,49
31	julho	30,8	16,7	0,49
31	agosto	24,9	18,8	0,53
30	set	75,1	19,0	0,37
31	out	137,4	20,8	0,35

30	nov	130,5	21,5	0,37
31	dez	214,7	22,9	0,33
365		1487,8	20,6	0,42

Tabela 6.32- Método de Priestley-Taylor para evapotranspiração ETo

Lambda (MJ/kg)	Albedo grama	Dia Juliano (1 a 365)	dr	delta	Latitude Guarulhos	Latitude rad	WS rad
2,44	0,23	15	1,032	-0,373	-23,5	-0,410	1,74
2,45	0,23	46	1,023	-0,236	-23,5	-0,410	1,68
2,45	0,23	76	1,009	-0,040	-23,5	-0,410	1,59
2,45	0,23	107	0,991	0,173	-23,5	-0,410	1,49
2,46	0,23	137	0,977	0,334	-23,5	-0,410	1,42
2,46	0,23	168	0,968	0,408	-23,5	-0,410	1,38
2,46	0,23	198	0,968	0,372	-23,5	-0,410	1,40
2,46	0,23	229	0,977	0,233	-23,5	-0,410	1,47
2,46	0,23	259	0,992	0,036	-23,5	-0,410	1,56
2,45	0,23	290	1,009	-0,176	-23,5	-0,410	1,65
2,45	0,23	320	1,024	-0,336	-23,5	-0,410	1,72
2,45	0,23	351	1,032	-0,408	-23,5	-0,410	1,76

Tabela 6.4- Método de Priestley-Taylor para evapotranspiração ETo

So	Sn	St	Sn	es	delta
mm/dia	mm/dia	mm/dia	MJ/dia		(kPa/ °C)
17	5	7	13	2,937	0,177
16	6	7	14	2,774	0,168
15	5	6,75	12,71	2,837	0,171
12	5	6	11	2,539	0,156
10	4	5	9	2,143	0,134
9	3	4	8	2,002	0,126
10	4	5	9	1,906	0,121
11	5	6	11	2,164	0,135
14	5	6	11	2,204	0,137
16	5	7	13	2,459	0,151
17	6	7	14	2,558	0,157
18	6	7	14	2,796	0,169

Tabela 6.5- Método de Priestley-Taylor para evapotranspiração ETo

Gama		ed=(RH/100)Xes		Stefan-Bolzmann	Ln
(kPa/°C)	f	ed	Epsolon	sigma	MJ/m ² xdia
0,06752	0,38	2,211	0,132	0,0000000049030	-1,914
0,06752	0,45	2,068	0,139	0,0000000049030	-2,336
0,06752	0,48	2,120	0,136	0,0000000049030	-2,480
0,06752	0,52	1,858	0,149	0,0000000049030	-2,886
0,06752	0,53	1,600	0,163	0,0000000049030	-3,046
0,06752	0,54	1,502	0,168	0,0000000049030	-3,198
0,06752	0,54	1,388	0,175	0,0000000049030	-3,304

0,06752	0,58	1,479	0,170	0,0000000049030	-3,515
0,06752	0,43	1,587	0,164	0,0000000049030	-2,517
0,06752	0,42	1,804	0,152	0,0000000049030	-2,331
0,06752	0,43	1,867	0,149	0,0000000049030	-2,366
0,06752	0,40	2,071	0,139	0,0000000049030	-2,080

Tabela 6.6- Método de Priestley-Taylor para evapotranspiração ETo

Rn=Ln+Sn	Rn	G	Etp	Etp
MJ/m ² xdia	mm/dia	mm/dia	(mm/dia)	(mm/mes)
11,714	4,791	0,117	4,26	132
11,687	4,776	-0,132	4,41	124
10,524	4,302	0,052	3,84	119
8,555	3,491	-0,256	3,29	99
6,541	2,662	-0,383	2,55	79
5,603	2,278	-0,151	2,00	60
5,972	2,426	-0,109	2,05	64
7,838	3,190	0,283	2,44	76
9,030	3,677	0,041	3,07	92
10,737	4,379	0,248	3,60	112
11,922	4,865	0,089	4,20	126
12,013	4,910	0,205	4,24	131
				1.213

Conclusão:

O método de Priestley-Taylor (também recomendado pela FAO) apresentou ótimo evapotranspiração anual para Guarulhos de 1213mm enquanto que o método padrão de Penman-Monteith, FAO 1998 apresentou 1201mm.

6.20 Bibliografia e livros consultados

-SUMNER E JACOBS. *Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration and pan evaporation methods to estimative pasture evapotranspiration*. Journal of Hydrology, 398, 2005,, 81 a 104.