

ISSN 0104-1347

Estimativas de evapotranspiração regional em Presidente Prudente, SP, usando o modelo conceitual de relação complementar de Morton

Estimates of regional evapotranspiration in Presidente Prudente, SP, Brazil, using Morton's complementary relationships conceptual model

Clóvis Angeli Sansigolo¹ e Raimundo de Oliveira Roque²

Resumo - O modelo conceitual de relação complementar de Morton foi usado para estimar as taxas médias mensais de evapotranspiração potencial e regional em Presidente Prudente, SP. O desempenho do modelo foi verificado por comparação com as estimativas pelo método de Penman, no período de 1976 a 1997. Taxas de evapotranspiração regional variando de 4,3mm/dia no verão a 0,5mm/dia no inverno, correspondendo a 40% das potenciais, foram obtidas. As taxas de evapotranspiração do ambiente úmido, definidas por Morton, foram próximas das estimadas pelo método de Penman. O modelo de Morton fornece estimativas mais realistas e consistentes das taxas de evapotranspiração regional e potencial, obtidas a partir de seus efeitos nas observações climatológicas de rotina, usadas para calcular evapotranspiração potencial.

Palavras-chave: evapotranspiração regional, relação complementar

Abstract - Morton's complementary relationships conceptual model was used to estimate the monthly averages of regional and potential evapotranspiration rates at Presidente Prudente, São Paulo, Brazil. The model performance was verified in comparison to Penman's estimates in the period 1976-1997. Regional evapotranspiration rates, ranging from 4.3mm/day in summer to 0.5mm/day in winter, corresponding to 40% of potentials, were obtained. The wet environment evapotranspiration rates defined by Morton were close to the ones estimated by Penman's method. Morton's model provided more realistic and consistent estimates of potential and regional evapotranspiration rates, obtained from their effects on the routine climatological observations, used to calculate potential evapotranspiration.

Key words: regional evapotranspiration, complementary relationships

Introdução

Estimativas confiáveis de evapotranspiração regional são essenciais no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos para fins hidrológicos, agrícolas e ambientais. O desenvolvimento de métodos baseados em observações climatológicas de rotina ainda é um desafio à ciência e aplicação meteorológicas (KIN & ENTEKHABI, 1997).

Os métodos convencionais para estimar evapotranspiração são baseados na suposição de que a evapotranspiração potencial é independente da regional, podendo portanto, ser usada para representar a demanda evaporativa de uma área. Tal suposição não considera o fato que um decréscimo na evapotranspiração regional, causado pela redução na disponibilidade de água no solo, provoca um aumento na temperatura e decréscimo na umidade do ar sobre a região e este, por sua vez, leva a um aumento no

¹ Pesquisador, Laboratório Associado de Meteorologia e Oceanografia, CPTEC/INPE, São José dos Campos, SP.

² Mestre em Meteorologia, bolsista da CAPES.

potencial de evaporação da atmosfera (DAVENPORT & HUDSON, 1967).

BOUCHET (1963) formulou a hipótese que as variações no potencial de evaporação regional são complementares devido às variações na disponibilidade de água no solo, que provocam alterações no déficit de saturação do ar, na temperatura do ar e no balanço de energia radiante. Este conceito foi subsequentemente desenvolvido e aprimorado por MORTON (1971, 1975, 1978, 1983), BOUCHET (1974), SÉGUIN (1975), FORTIN & SEGUIN (1975) e KOVACS (1987).

O conceito de relação complementar entre evapotranspiração potencial e regional é baseado na interação entre a superfície evaporante e o ar circulando no ambiente. A relação contorna a complexidade do sistema solo-planta-atmosfera de modo que a evapotranspiração regional possa ser estimada a partir de seus efeitos sobre a temperatura e umidade do ar rotineiramente observadas, que são usadas nas estimativas de evapotranspiração potencial (MORTON, 1983).

Uma racionalização e revisão sobre o conceito de relação complementar, esquematizado na Figura 1, foi realizada por MORTON (1983), que também apresenta resultados relacionados à verificação deste método em bacias hidrográficas na América do Norte, África e Oceania.

LEMEUR & ZHANG (1990) avaliaram comparativamente, usando análise de sensibilidade, tres modelos de estimativa de evapotranspiração na bacia do rio Xinjiang, com 4684km², numa região semi-árida da China. Eles concluíram que os três métodos: Advecção-Aridez (BRUTSAERT & STRICKER, 1979), Relação Complementar (MORTON, 1983) e

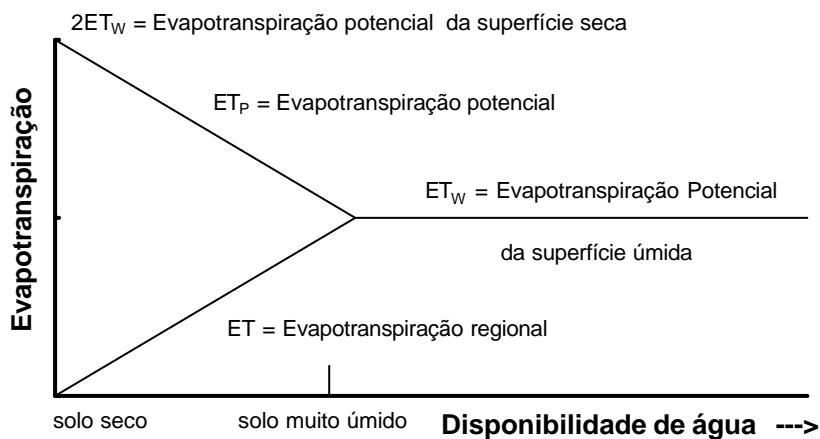


Figura 1. Representação esquemática da relação complementar entre evapotranspiração potencial e regional, sob suprimento constante de energia radiante (Morton, 1983).

Penman-Monteith (MONTEITH, 1981) tiveram um bom desempenho em comparação aos balanços hídricos anuais e podem ser aplicados em regiões semi-áridas. A principal vantagem do modelo de MORTON (1983) é que ele não necessita de calibração local como os demais.

No Brasil, MARCELINO (1997) investigou a validade do modelo de MORTON (1983) para estimativas médias mensais de 14 anos de evapotranspiração potencial e regional nas diferentes regiões do Estado de São Paulo e concluiu que ele apresentou boa concordância com as estimativas feitas pelo método de PENMAN (1948). Verificou também que no oeste do Estado, onde predomina um clima mais seco, o método de PENMAN (1948) apresentou melhores concordâncias com as estimativas de evapotranspiração potencial do ambiente úmido de Morton.

O objetivo deste trabalho foi a implementação, avaliação do desempenho e verificação comparativa com o método de PENMAN (1948), do modelo de Relação Complementar de MORTON (1983) para estimativas das taxas médias mensais climatológicas (1976-1997) de evapotranspiração regional em Presidente Prudente, uma das áreas mais secas do Estado de São Paulo, onde predominam pastagens naturais.

Material e métodos

Os dados climatológicos utilizados foram as médias mensais, no período de 1976 a 97, de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e insolação da estação da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em Presidente Prudente (latitude: -22°07', longitude: -51°23' e altitude 435m). Esta região situada no extremo Oeste do Estado de São Paulo, tem como cobertura vegetal predominante pastagens e apresenta défices hídricos da ordem de 100mm entre os meses de junho e agosto.

As estimativas de evapotranspiração regional foram feitas pelo modelo de MORTON (1983), baseado no conceito de relação complementar de BOUCHET (1963) que pode ser expresso por :

$$\delta ET + \delta ET_p = 0 \quad (1)$$

onde δET_p é a variação da evapotranspiração potencial e δET

a variação na regional causada pela variação na disponibilidade de água no solo. Esta equação integrada entre as condições de contorno dos ambientes seco ($ET=0$ e $ET_p = ET_p'$) e úmido ($ET = ET_p = ET_p''$) leva a:

$$ET + ET_p = ET_p' = 2 ET_p'' \quad (2)$$

A equação 2 mostra que a evapotranspiração potencial numa área completamente úmida (ET_p'') deveria ser a metade da de uma área completamente seca (ET_p'). MORTON (1978, 1983) desenvolveu este conceito definindo a evapotranspiração regional do ambiente úmido ET_w :

$$ET + ET_p = 2 ET_w \quad (3)$$

A equação 3 possibilita estimativas de evapotranspiração regional ou de equilíbrio ET a partir de observações climatológicas de rotina, usadas para computar a potencial ET_p e a regional do ambiente úmido ET_w .

As taxas de evapotranspiração potencial ET_p são obtidas a partir da equação de KOHLER & PARMELE (1967), desenvolvida a partir da de PENMAN (1948), com a substituição de γp por λ , visando incluir os efeitos das variações de temperatura na superfície no balanço de radiação de ondas longas:

$$ET_p = D (Rn - G) + (1 - D) f_w (v - v_D) \quad (4)$$

onde Rn é o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo, desprezível nas estimativas médias diárias, f_w o coeficiente de transferência de vapor, v e v_D as pressões de saturação do vapor às temperaturas do ar e do ponto de orvalho, respectivamente, $D = (1 - \lambda / \Delta)^{-1}$, em que Δ é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor d'água com a temperatura do ar, λ o coeficiente de transferência de calor, igual a $\gamma p + 4\epsilon\sigma(T + 273)^3 / f_w$, γ a constante psicrométrica, p a pressão atmosférica, σ a constante de Stefan-Boltzman, ϵ a emissividade da superfície e T a temperatura do ar em graus Celsius.

PRIESTLEY & TAYLOR (1972) propuseram uma equação para estimar a evaporação de uma área com superfície saturada e sem advecção, que se aplica à evaporação de uma superfície líquida grande suficiente para que seja desprezível o efeito das bordas de transição. Neste caso, a evapotranspiração ET_w' é dada por:

$$ET_w' = 1,26 (1 + \gamma p / \Delta)^{-1} Rn \quad (5)$$

MORTON (1983) propôs alterar a equação 5, usada no método Advecção-Aridez de BRUTSAERT & STRICKER (1979), para incluir os efeitos das variações de temperatura na superfície nos balanços de ondas longas e nas taxas de variação das

pressões de saturação do vapor d'água com a temperatura Δ :

$$ET_w = 14 + 1,2 \Delta_p / (\Delta_p + \gamma p) Rn_{Tp} \quad (6)$$

onde Δ_p é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água com a temperatura de equilíbrio, Rn_{Tp} o saldo de radiação à temperatura de equilíbrio e 14 e 1,2 são parâmetros empíricos obtidos por meio de calibração em diversas regiões áridas do mundo, onde $ET_p = 2 ET_w$.

As temperaturas de equilíbrio T_p , às quais a equação do balanço de energia e a de transferência de vapor para uma superfície úmida dão o mesmo resultado, são calculadas iterativamente por:

$$\delta T_p = [Rn / f_w + v_D - v_p' + \lambda (T - T_p')] / (\Delta_p' - \lambda) \quad (7)$$

onde $T_p = T_p' + \delta T_p$ e v_p' e Δ_p' são, respectivamente, a pressão de vapor e a tangente à curva da pressão de vapor à temperatura T_p .

As taxas de evapotranspiração potencial ET_p e os saldos de radiação às temperaturas de equilíbrio Rn_{Tp} são dados por:

$$ET_p = Rn_{Tp} - \lambda f_w (T_p - T) \quad (8)$$

$$Rn_{Tp} = ET_p + \gamma p f_w (T_p - T) \quad (9)$$

Finalmente, as estimativas das médias mensais de evapotranspiração regional ET , são dadas em função das equações 8 e 6 por:

$$ET = 2ET_w - ET_p \quad (10)$$

A complexidade do modelo conceitual de relação complementar de MORTON (1983) é devida principalmente às estimativas das irradiâncias globais e saldos de radiação, feitas a partir das observações de insolação e de temperatura e umidade do ar, além de estimativas de albedo.

No modelo de MORTON (1983), as irradiâncias globais na presença de nebulosidade G são calculadas a partir das irradiâncias solares no topo da atmosfera G_E , irradiâncias globais para céu claro G_0 e razões de insolação $S = \pi n / 24 \omega$, por:

$$G = S G_0 [0,08 + 0,30 S] (1 - S) G_E \quad (11)$$

onde G_E e G_0 são obtidos por:

$$G_E = (1354 / \eta^2) (\omega / 180) \cos z \quad (12)$$

onde G_E é a irradiância solar no topo da atmosfera, η a excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol, ω o ângulo horário, z o ângulo zenital médio diário, Z o ângulo zenital ao meio dia, θ a declinação do Sol e ϕ a latitude do local e

$$G_0 = G_E \tau [1 + (1 - \tau / \tau_a) (1 + a_0 \tau)] \quad (13)$$

onde os albedos para céu claro a_0 , as transmitâncias para céu claro τ e suas frações absorvidas τ_a são obtidos pelas parametrizações compiladas por MORTON (1983).

Os saldos de radiação Rn_T são dados pela diferença entre as irradiâncias globais absorvidas e as perdas de ondas longas :

$$Rn_T = (1 - a) G - B \quad (14)$$

onde os albedos médios com nebulosidade a e as perdas de onda longa B são obtidos por :

$$a = a_0 [S + (1 - S) (1 - Z/330)] \quad (15)$$

$$B = \epsilon \sigma (T + 273)^4 [1 - (0,71 + 0,007 v_D p / ps (1 + \rho))] \quad (16)$$

onde ρ são os incrementos na radiação atmosférica devido às nuvens (MORTON, 1983).

Resultados e discussão

As séries temporais (1976-1997) das médias mensais de evapotranspiração potencial e regional em Presidente Prudente, calculadas usando o conceito de relação complementar pelo modelo de MORTON (1983), são mostradas na Figura 2. No período considerado, as médias de evapotranspiração potencial

variaram de 77 a 290mm/mês e as regionais de 4 a 147mm/mês. Observa-se que, em períodos muito chuvosos, como o de outubro de 1982 a março de 1983, quando choveu 1265mm (89% acima da normal), a diferença entre as taxas potencial e regional foi de 343mm e, em períodos muito secos, como o de outubro 1985 a março de 1986, quando choveu 600mm (58% abaixo da normal), esta diferença atingiu 757mm, indicando que o modelo responde bem aos défices hídricos no solo.

As médias mensais (1976-1997) das irradiâncias solares globais no topo da atmosfera (G_E) e na superfície (G), albedos (a), perdas de onda longa (B), razões de insolação (S), irradiâncias líquidas (Rn_T), coeficientes de transferência de vapor d'água (f_w) e calor sensível (λ), além das taxas médias diárias de evapotranspiração potencial (ET_p) e regional (ET_r) se encontram na tabela 1. Estas taxas potenciais e regionais variaram, respectivamente, de 7,7 e 4,1mm/dia em dezembro a 4,0 e 0,6mm/dia em junho e as taxas regionais corresponderam a 61% das potenciais em dezembro e 15% em junho.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos totais médios mensais de precipitação, evapotranspiração potencial, calculada pelos métodos de PENMAN (1948) (ET_{PEN}) e de MORTON (1983) (ET_p), e evapotranspiração regional (ET). As taxas

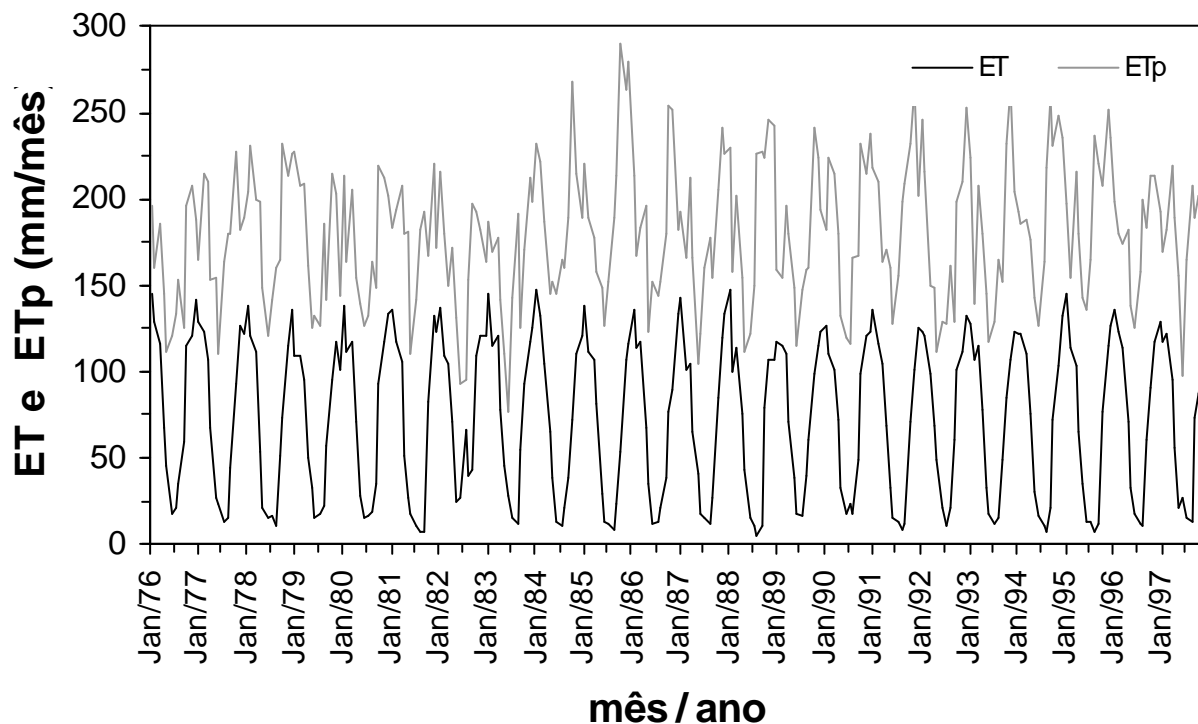


Figura 2 Séries temporais dos totais mensais de evapotranspiração potencial (ET_p) e regional (ET) estimados pelo método de Morton em Presidente Prudente, SP.

Tabela 1. Médias mensais (1976-1997) das irradiâncias solares globais no topo da atmosfera (G_e) e na superfície (G), albedos (a), perdas de onda longa (B), razões de insolação (S), irradiâncias líquidas (Rn_T), coeficientes de transferência de vapor d'água (f_w) e de calor sensível (λ) e taxas médias diárias de evapotranspiração potencial (ET_p) e regional (ET), pelo modelo de Morton (1983), para Presidente Prudente, SP.

Mês	G_e (W/m^2)	G (W/m^2)	a -	B (W/m^2)	S -	Rn_T (W/m^2)	f_w (Wm^2mb^{-1})	λ ($mb^{\circ}C^{-1}$)	ET_p (mm/d)	ET (mm/d)
Jan	483	217	0,17	37	0,51	143	28,7	0,82	6,5	4,3
Fev	460	217	0,17	40	0,53	139	28,7	0,82	6,6	4,1
Mar	412	210	0,19	46	0,60	125	28,7	0,82	6,2	3,5
Abr	349	191	0,20	55	0,67	97	28,7	0,82	5,6	2,2
Mai	293	152	0,21	58	0,63	62	28,7	0,81	4,4	1,1
Jun	265	141	0,22	63	0,64	48	27,3	0,82	4,0	0,6
Jul	275	158	0,22	68	0,71	55	26,6	0,82	4,7	0,5
Ago	319	173	0,21	67	0,63	70	27,4	0,82	5,8	0,5
Set	380	176	0,19	55	0,50	87	28,7	0,81	5,9	1,3
Out	435	221	0,18	55	0,58	126	28,7	0,82	7,1	2,8
Nov	471	238	0,17	50	0,58	147	28,7	0,82	7,8	3,8
Dez	487	217	0,17	39	0,50	141	28,7	0,82	7,7	4,1

regionais médias anuais corresponderam a 40% das potenciais, 51% no período chuvoso (setembro-março) e 20% no seco (abril-agosto).

Na Figura 3 é mostrada a relação entre os ~~totais mensais de evapotranspiração potencial~~ (ET_p) e regional (ET), obtidos pelo modelo de MORTON (1983). Observa-se uma grande dispersão nestes dados em função da grande variabilidade mensal, sazonal e interanual dos défices hídricos no solo, que influem nas taxas de evapotranspiração regional. Em média, existe uma tendência de aumento da evapotranspiração regional com a potencial ($ET = 0,6 \cdot ET_p - 40$).

Tabela 2. Totais médios mensais (1976-1997) em mm de precipitação (P), evapotranspiração pelo método de PENMAN (1948) (ET_{PEN}), saldo de radiação (Rn_T), evapotranspiração potencial (ET_p) e regional (ET) obtidos pelo modelo de MORTON (1983), para Presidente Prudente, SP.

Mês	P	ET_{PEN}	Rn_T	ET_p	ET
Jan	193	149	163	203	134
Fev	161	136	144	185	116
Mar	122	133	142	193	108
Abr	81	103	107	169	67
Mai	87	75	71	137	34
Jun	58	62	53	121	18
Jul	37	70	63	144	17
Ago	38	91	80	181	17
Set	88	107	96	178	40
Out	114	143	144	221	87
Nov	139	151	162	223	114
Dez	165	150	161	208	126
Ano	1284	1369	1384	2162	875
	100%	107%	108%	168%	68%

As taxas de evapotranspiração regional podem ser tomadas como as reais convencionalmente definidas, obtidas por meio de balanços hídricos.

As relações entre as taxas mensais de evapotranspiração potencial (ET_p) e de ambiente úmido (ET_w), calculadas pelos métodos de MORTON (1983) e de PENMAN (1948) (ET_{PEN}) são apresentadas na Figura 4. As taxas de evapotranspiração do ambiente úmido se aproximaram das obtidas pelo método de PENMAN (1948). As curvas de ET_w e ET_p são aproximadamente paralelas à ET_{PEN} , a constante de regressão é que varia bastante quando se comparam estas duas taxas, mostrando que o método de PENMAN (1948) subestimou as taxas potenciais, como definidas por MORTON (1983), em 58%.

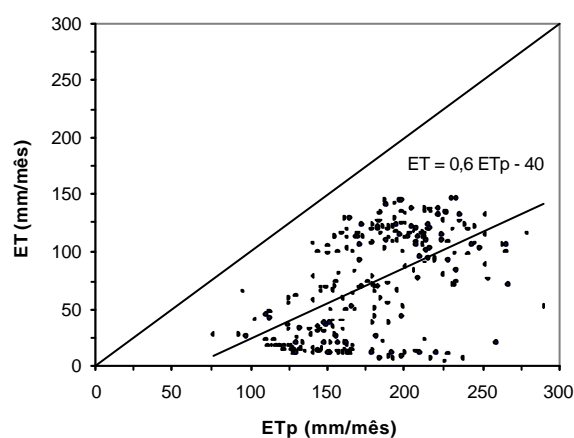


Figura 3. Relações entre os totais mensais de evapotranspiração regional (ET) e potencial (ET_p), obtidos pelo modelo de MORTON (1983) em Presidente Prudente, SP.

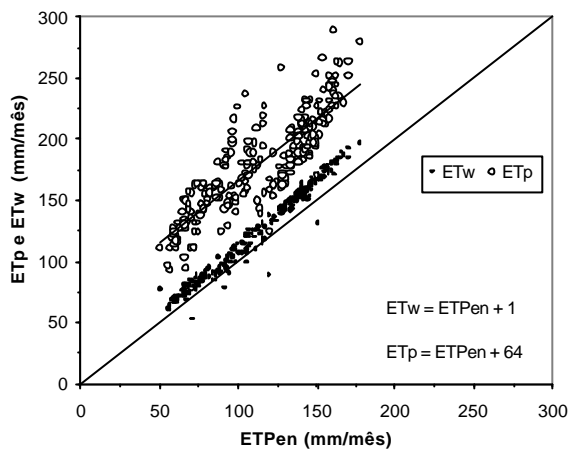


Figura 4. Relações entre as taxas mensais de evapotranspiração potencial (ET_p) e do ambiente úmido (ET_w) obtidas pelos métodos de MORTON (1983) e de PENMAN (1948) (ET_{PEN}) em Presidente Prudente, SP.

Embora sendo relações similares, a evapotranspiração potencial de Penman e a evapotranspiração do ambiente úmido de Morton são duas quantidades distintas (MORTON, 1983). As duas estimativas podem convergir quando não há limitações ao suprimento de água no solo. A evapotranspiração do ambiente úmido de Morton depende somente das condições atmosféricas e é a evapotranspiração que ocorreria quando não houvesse limitação ao suprimento de água às superfícies solo-planta. Conceitualmente, é uma representação mais correta do limite superior da evapotranspiração regional em relação à de PENMAN (1948), que depende do suprimento de água do solo (MORTON, 1983).

Conclusões

Em Presidente Prudente, SP, as taxas médias mensais de evapotranspiração regional, calculadas pelo modelo de MORTON (1983), variam de 4,3mm/dia no verão a 0,5mm/dia no inverno e foram em média 40% inferiores às potenciais como definidas por MORTON (1983).

O modelo de relação complementar de MORTON (1983) responde bem às grandes variabilidades mensais, sazonais e interanuais dos défices hídricos na região. As taxas de evapotranspiração regional podem ser tomadas como as reais obtidas por meio de balanços hídricos.

As taxas de evapotranspiração do ambiente úmido definidas por MORTON (1983), se aproximam das estimativas de evapotranspiração potencial pelo

método de PENMAN (1948), logo elas podem ser usadas para representar as potenciais convencionalmente definidas.

O modelo de MORTON (1983) fornece estimativas mais realistas e consistentes, principalmente em regiões secas, das taxas de evapotranspiração regional, obtidas a partir das observações climatológicas de rotina, usadas nos cálculos convencionais de evapotranspiração potencial.

Referências bibliográficas

- BOUCHET, R.J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. In : **International Association of Scientific Hydrology Symposium**, n. 62, Berkeley, 1963, p. 134-142.
- BOUCHET, R.J. Modification des facteurs climatiques et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par l'irrigation. **Journal of Hydraulics**, New York, n. 13, p. 1-7, 1974.
- BRUTSAERT, W., STRICKER, H. An advection-aridity approach to estimate actual evapotranspiration. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, n. 2, p. 443-450, 1979.
- DAVENPORT, D.C., HUDSON, J.P. Changes in evaporation rates along a 17 Km transect in the Sudam Gezira. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 4, n. 5, p. 339-352, 1967.
- FORTIN, J.P., SEGUIN, B. Estimation de l'ETR regional à partir de l'ETP locale: utilisation de la relation de Bouchet à différents échelles de temps. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 26, n. 5, p. 537-554, 1975.
- KIN, C.P., ENTEKHABI, D. Examination of two methods for estimating regional evaporation using a coupled mixed layer in a land surface model. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 9, p. 2109-2116, 1997.
- KOHLER, M.A., PARMELE, L.H. Generalized estimates of free-water evaporation, **Water Resources Research**, Washington, v. 3, n. 4, p. 996-1005, 1967.
- KOVÁCS, G. Estimation of average areal evapotranspiration proposal to modify Morton's model based on the complementary character of actual and potential evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 95, p. 227-240, 1990.
- LEMEUR, R., ZHANG, H. Evaluation of three evapotranspiration models in terms of their applicability for an arid region. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 114, p. 395-411, 1990.
- MARCELINO, B.C. **Estimativas de evapotranspiração regional pelo modelo de Morton e aplicação no cálculo de balanço hídrico, para o Estado de São Paulo**. Botucatu : FCA/UNESP, 1997. 129 p. Tese

(Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 1997.

- MONTEITH, J.L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Reading, v. 107, p. 1-27, 1981.
- MORTON, F.I. Catchment evaporation and potencial evaporation - further development of a climatologic relationships. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 12 , p. 81-99, 1971.
- MORTON, F.I. Estimating evaporation and transpiration from climatological observations. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 14, p. 488-497, 1975.
- MORTON, F.I. Estimating evapotranspiration from potential evaporation: Practicality of an iconoclastic approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 38, p. 1-32, 1978.
- MORTON, F.I. Operational estimates of areal evaporation and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 66, p. 1-76, 1983.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Royal Meteorological Society Proceedings**, London, v. 193, p. 120-145, 1948. (Ser. A)
- PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, p. 81-92, 1972.
- SEGUIN, B. Influence de l'évapotranspiration régionale sur la mesure locale d'évapotranspiration potentielle. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 15, p. 355-370, 1975.