

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E DIRETA PARA A REGIÃO DE SÃO CARLOS-SP

Francisco Fernando Noronha Marcuzzo¹; Eudes José Arantes²; Edson Wendland¹

1 Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, fmarcuzzo@gmail.com

2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, PR

1 RESUMO

Um dos fenômenos de maior incerteza no gerenciamento de recursos hídricos e, manejo da irrigação é o da evapotranspiração. A evapotranspiração é utilizada na determinação do balanço hídrico com a finalidade de se identificar os períodos de excesso ou escassez de água e, principalmente, na quantificação das deficiências hídricas para uma cultura em uma determinada localidade. O objetivo deste trabalho foi apresentar um estudo da correlação de cinco diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração, a partir de dados de temperatura, radiação e evaporação e dados de lisímetro. Os dados utilizados foram coletados no ano de 2002, na Estação Hidrometeorológica do CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-SP, localizada à latitude de 22°11'S, longitude de 47°58'W e altitude de 733 m. Nos meses em que ocorrem concomitantemente números elevados ou baixos nos dados climatológicos que são utilizados no cálculo de evapotranspiração, como radiação e evaporação, há uma tendência de alta correlação entre os métodos de cálculo que se utilizam destes dados. Na comparação com dados de evapotranspiração real (lisímetro), o método empírico que mais se aproximou foi o método baseado na evaporação (Tanque Classe A), e os que obtiveram menores correlações foram os baseados na temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle).

UNITERMOS: tanque classe A, Thornthwaite, Jensen-Haise, Blaney-Criddle, evaporação

MARCUZZO, F. F. N.; ARANTES, E. J.; WENDLAND, E. EVALUATION OF POTENTIAL AND DIRECT EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE METHODS APPLIED IN THE REGION OF SÃO CARLOS-SP

2 ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the most uncertain phenomena concerning management of water resources and irrigation. Evapotranspiration is used to identify periods of water excess or scarcity and mainly to quantify plant water stress in specific locations. The objective of this work was to study the correlation among five different methods for evapotranspiration estimates, using temperature, radiation, evaporation and lysimeter data. Data were collected in 2002 at the Hydrometeorology Station CRHEA (Center of Water Resources and Applied Ecology), located at latitude 22°11'S, longitude 47°58'W and 733 m above sea level. A high correlation among evapotranspiration values estimated by different methods was observed in months where either high or low values of climatologic data, such as evaporation and radiation were obtained. The evaporation method (pan evaporation) showed the highest

correlation when evapotranspiration values obtained using a lysimeter were used, whereas the methods based on temperature (Thornthwaite and Blaney-Criddle) showed the lowest correlation.

KEY WORDS: pan, Thornthwaite, Jensen & Haise, Blaney-Criddle, evaporation

3 INTRODUÇÃO

Sabe-se que para a agricultura irrigada, o conhecimento da evapotranspiração de uma certa localidade ou região e a determinação das necessidades hídricas das culturas são imprescindíveis. Estes valores são determinados pela evapotranspiração, sendo que inúmeros estudos foram desenvolvidos objetivando quantificar e qualificar os parâmetros envolvidos nessa estimativa.

Segundo Medeiros (2002), a evapotranspiração da cultura (ET_c) é a variável mais importante num projeto de irrigação, pois indica a quantidade de água a ser repostada à cultura de modo a garantir um retorno satisfatório ao produtor. O mesmo autor também cita que, sendo a ET_c função da evapotranspiração de referência (ET_o), a determinação desta passa a ser importante nos projetos, no planejamento e no manejo da irrigação.

Para uma avaliação dos recursos hídricos disponíveis e no próprio gerenciamento das águas, a realização de um balanço hídrico é imprescindível. Nessa operação, são considerados os vários processos do ciclo hidrológico. Um dos fenômenos de maior incerteza em sua determinação é a evapotranspiração. Frequentemente, em estudos de balanço hídrico (Scozzafava & Tallini, 2001), são utilizados modelos teóricos para estimativa da evapotranspiração. Infelizmente, esses modelos teóricos foram desenvolvidos para o Hemisfério Norte, pressupondo condições de disponibilidade hídrica constante. Para regiões caracterizadas por períodos seco e chuvoso distintos e claramente definidos, esses métodos podem conduzir a erros grosseiros (Cunha, 2003).

De acordo com Pereira *et al.* (1997), o balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento de perda da água do solo e resulta da aplicação do princípio de conservação da massa em um volume de solo vegetado. A variação do armazenamento representa o balanço entre as entradas (precipitação) e saídas (evaporação e transpiração) de água do volume de controle, em um intervalo de tempo. Se mais água for adicionada à zona não saturada do solo quando ela estiver na capacidade de campo, a água passa para uma zona mais baixa (zona de saturação ou zona de escoamento subterrâneo). A água deixa a zona da água subterrânea pela ação da capilaridade dentro da zona de raízes, ou pela descarga em drenagens. Os resultados de evapotranspiração, precipitação e o respectivo balanço hídrico podem ser utilizados no zoneamento agro-climático, na determinação da demanda hídrica potencial das culturas irrigadas, no planejamento de pesquisas e para identificar o regime hídrico de uma região (Aguilar *et al.*, 1986).

Thornthwaite (1948) foi o pioneiro na definição da evapotranspiração potencial. Ele a definiu como sendo a perda de água para a atmosfera através de uma superfície natural coberta com vegetação nativa, sem restrição de água no solo. Quando uma das condições citadas não for atendida, tem-se a evapotranspiração real.

Penman (1956), posteriormente, definiu a evapotranspiração potencial como a quantidade de água transferida para a atmosfera, na unidade de tempo, por uma cultura verde, de pequeno porte, em crescimento ativo e sem restrição hídrica.

Para utilizar equações semi-empíricas, Righetto (1998) apresenta as definições de evapotranspiração: a) evapotranspiração potencial ou de referência: corresponde à perda de água de uma superfície coberta com grama batatais em fase de crescimento ativo, bem suprida de umidade, no centro de uma área irrigada com dimensões que permitam desprezar o transporte horizontal de vapor d'água; b) evapotranspiração real: é a evapotranspiração de uma superfície sob condições naturais de vegetação e de umidade de água no solo; c) evapotranspiração máxima: corresponde à perda de água de uma superfície vegetada qualquer em condições ideais de umidade do solo para o desenvolvimento das plantas.

James (1988) ressalta que, se a água armazenada no solo não for fator limitante e se os estômatos estiverem totalmente abertos, as condições atmosféricas são os fatores que controlam a evapotranspiração. Os fatores atmosféricos mais importantes no processo são: a radiação solar, a umidade relativa, a temperatura, o vento e a precipitação.

O objetivo deste trabalho foi apresentar um estudo da correlação de cinco diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração, a partir de dados de temperatura, radiação e evaporação e dados de lisímetro. Neste estudo foram utilizados dados obtidos em estação hidrometeorológica e empregados modelos teóricos, que variam de métodos simples que correlacionam dados climáticos, como radiação e temperatura, até um modelo que se fundamenta no processo físico da evaporação. A evapotranspiração real foi determinada com base em dados obtidos em lisímetro e também foram correlacionados com os métodos de estimativa. Uma análise crítica dos resultados foi realizada para o ano de 2002, visando obter o método que mais se aproxima dos dados do lisímetro (evapotranspiração direta).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados climatológicos foram coletados no ano de 2002, no município de Itirapina, no Estado de São Paulo, na estação Hidrometeorológica do CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo, localizada na latitude 22°11'S e longitude 47°58' W e a uma altura de 733 metros acima do nível do mar. A vegetação predominante na região é o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, encontra-se, o reflorestamento com *Pinus sp* e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e laranja. O clima da região é controlado pelas massas de ar equatorial e, tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril).

A precipitação e os dados meteorológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração (temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) foram coletados de dez em dez minutos (de modo a se obter uma maior quantidade de dados para análise estatística) com o uso de *Data Logger*, correspondendo ao ano Juliano de 2002. Posteriormente, os dados foram transformados em diários, mensais e anual para análise estatística dos mesmos e para os diferentes cálculos da evapotranspiração.

Os métodos de estimativa de evapotranspiração utilizados são descritos a seguir.

4.1 Evapotranspiração baseada na evaporação - tanque classe A

Para calcular a evapotranspiração pelos dados de evaporação do tanque classe A deve-se multiplicar a evaporação medida (por exemplo, mm mês⁻¹) pelo coeficiente do tanque.

Segundo Allen *et al* (1998), existem dois tipos de situações para o cálculo do coeficiente do tanque classe A: a) o tanque está alocado sobre solo seco e rodeado por alguma

grama ou cultura; b) o tanque está alocado sobre grama e distante de um solo seco. No caso em estudo, verifica-se que o tanque classe A está rodeado por mais de 1000 m² de grama. A equação (1) para obter o coeficiente de um tanque classe A que está sobre grama é:

$$K_p = 0,108 - 0,0286 u_2 + 0,0422 \ln(\text{FET}) + 0,1434 \ln(\text{RH}_{\text{mean}}) - 0,000631 [\ln(\text{FET})]^2 \ln(\text{RH}_{\text{mean}}) \quad (1)$$

sendo: K_p - coeficiente do tanque classe A; u_2 - média diária da velocidade do vento a 2 metros de altura, dentro do limite de 1 a 8 (m/s); RH_{mean} - média diária da umidade relativa, desde que entre 30 e 84 (%); FET - distância que o tanque classe A está de um lugar sem grama, que pode variar de 1 a 1000 metros.

4.2 Evapotranspiração baseada na radiação - Jensen & Haise

A equação de Jensen & Haise (Tucci *et al.*, 2004), é um exemplo de método baseado na radiação e tem fornecido resultados razoáveis em diferentes condições climáticas. A equação é a seguinte:

$$ETP = (0,025T + 0,08) \frac{G}{59} \quad (2)$$

sendo: ETP - evapotranspiração potencial (mm/dia); T - temperatura do ar (°C); G - radiação incidente de onda curta (cal/cm².d).

4.3 Evapotranspiração baseada na temperatura - Thornthwaite e Blaney-Criddle

Entre as mais antigas expressões para estimativa da evapotranspiração potencial, com base na temperatura do ar, destacam-se as de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) e Blaney-Criddle (Tucci *et al.*, 2004).

4.3.1 Evapotranspiração por Thornthwaite

O método de Thornthwaite correlaciona informações de latitude e mês do ano com a variável temperatura e possibilita a estimativa da evapotranspiração (3) com a seguinte equação:

$$ETP = Fc.16.\left(10\frac{T}{I}\right)^a \quad (3)$$

sendo: ETP - evapotranspiração potencial mensal (30 dias e 12 h de luz) (mm/mês); T - temperatura média do ar (°C); Fc - fator de correção em função da latitude e o mês (Quadro 1);

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514} \quad (4)$$

$$a = 67,5.10^{-8} I^3 - 7,71.10^{-6} I^2 + 0,01791I + 0,492 \quad (5)$$

sendo: t_i - temperatura média do mês (°C).

Quadro 1. Fator de correção para a evapotranspiração potencial de Thornthwaite para a latitude 22°S e mês do ano (Tucci *et al.*, 2004).

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,98	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18

Berlato & Molion (1981) citam que em regiões onde o clima difere daquele onde a equação foi desenvolvida, os resultados obtidos não são satisfatórios. Pressupõe-se que isso ocorra porque o método não contempla explicitamente a umidade do ar. Assim, deve-se ter muita cautela ao utilizar este método, particularmente em climas de verões úmidos e invernos secos. Apesar de tudo, a equação de Thornthwaite ganhou popularidade mundial, mais pelo fato de necessitar somente de dados de temperatura do ar, informação disponível em grande número de estações meteorológicas, do que pela sua precisão.

4.3.2 Evapotranspiração por Blaney-Criddle

Este método, descrito por Kijne (1978), foi desenvolvido originalmente para estimativas de evapotranspiração em regiões semi-áridas, baseado na suposição de que a disponibilidade de água para a planta em crescimento não é um fator limitante. A equação é expressa por:

$$ETP = (0,457T + 8,13)p \tag{6}$$

sendo: ETP - evapotranspiração potencial (mm/mês); T - temperatura média mensal do ar (°C); p - porcentagem diária de horas de luz, tabulada no Quadro 2.

Quadro 2. Proporção média diária (p) de horas de luz na latitude 22°S (Tucci *et al.*, 2004).

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30

4.4 Evapotranspiração por Penman

em 1952, Penman propôs uma equação para obter diretamente a transpiração potencial em gramado. O método é de natureza puramente física, embora tenha aspectos empíricos, por utilizar a temperatura do ar em lugar da temperatura da superfície evaporante, como é empregada na clássica equação de Dalton (Camargo & Camargo, 2000).

A equação de Penman sofreu várias modificações. Righetto (1998) apresenta a formulação do método, para estimar a evaporação diária (E) em mm/d para solos vegetados, como:

$$E = \frac{\frac{R}{L} \Delta + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \tag{7}$$

sendo: R - a radiação solar líquida (cal/cm².d); L - o calor latente de vaporização, considerado constante de 59 cal/mm; γ - constante psicrométrica (0,67 mb/K); Δ - derivada da pressão parcial de saturação de vapor da água (e_s) em relação à temperatura (em mb/K); E_a - evaporação aerodinâmica em mm/d, calculado pela equação:

$$E_a = 0,27(a_1 + b_1 u)(e_s - e) \quad (8)$$

sendo: $a_1 = 1$ e $b_1 = 0,00625$ (considerando superfície vegetada); u - velocidade média do vento a 2 metros de altura, em km h^{-1} . Calculando-se a pressão de saturação (e_s) e a pressão parcial de vapor (e) por:

$$e_s = 6,11.10^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \text{ e } e = UR.e_s \quad (9)$$

sendo: t - temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$; UR - umidade relativa do ar e e_s e e são obtidos em mb.

A derivada de e_s em relação à temperatura (Δ) é calculada utilizando-se a temperatura média (T) em K:

$$\Delta = 4098 \frac{e_s}{(T - 35,7)^2} \quad (10)$$

A radiação solar líquida (R) é obtida por:

$$R = E_{ta} \left(a + b \frac{n}{N} \right) (1 - \alpha) - \sigma T^4 \left(0,56 - 0,078 \sqrt{e} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (11)$$

sendo: E_{ta} - irradiância solar no topo da atmosfera em cal/d ; α - albedo da superfície (igual a 0,05); a e b - constantes locais (para o Estado de São Paulo $a = 0,24$ e $b = 0,58$); n - insolação observada em horas; N - insolação máxima em horas (tabelado); σ - constante de Stefan-Boltzmann ($1,17.10^{-7} \text{ cal/d.K}$).

4.5 Evapotranspiração real utilizando um Lisímetro

A evapotranspiração real pode ser determinada com um lisímetro (Cunha, 2003), utilizando-a para avaliação dos modelos teóricos de estimativa da evapotranspiração potencial. No cálculo do balanço hídrico, devem ser consideradas algumas características específicas do lisímetro usado: a superfície do lisímetro é horizontal e delimitada por uma mureta de 10 cm de altura, tornando desprezível o escoamento superficial ($R = 0$); o lisímetro é um sistema fechado lateral e inferiormente, não permitindo perdas ou ganhos por escoamento subterrâneo. Portanto, a equação do balanço hídrico para o lisímetro pode ser simplificada para:

$$E_{tr} = P - I - U \quad (12)$$

sendo: P - precipitação; I - infiltração medida no tanque coletor; E_{tr} - evapotranspiração real (todos os dados em mm). Nessa relação, é considerada, também, a variação da umidade volumétrica (U) no solo, decorrente da evapotranspiração, principalmente no período seco do ano. A variação mensal de umidade no lisímetro foi determinada integrando-se as diferenças dos perfis de umidade do solo, observados no início ($U_{inicial}$) e no final (U_{final}) do mês.

5 RESULTADOS

5.1 Análise estatística dos dados climatológicos

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas as análises estatísticas dos dados de umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar, temperatura do ar, precipitação, evaporação e coeficiente do tanque classe A, que foram utilizados para os cálculos empíricos de determinação da evapotranspiração.

Nota-se que a verificação dos dados utilizados para os cálculos de evapotranspiração é de suma importância para a credibilidade dos resultados. De acordo com os dados apresentados da análise estatística de umidade relativa, verifica-se que o valor máximo foi de 92% e ocorreu no mês de novembro e os valores mínimos foram nos meses de outubro e janeiro, ambos com valores de 30% de umidade relativa. Observa-se, também, a tendência de menor umidade relativa (período seco do ano), que vai de abril a setembro, tendo uma maior umidade relativa de outubro a março.

Tabela 1. Análise estatística dos dados de umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar.

Umidade relativa - %												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	73,6	73,6	73,6	73,6	73,6	67,0	73,6	73,6	73,6	84,0	92,0	84,0
Mínima	30,0	61,2	55,2	52,6	50,0	50,6	38,4	39,2	42,6	30,0	46,2	74,0
Média	63,0	70,3	66,4	61,0	63,6	60,1	56,8	57,9	62,1	56,7	73,4	83,1
I.V. ¹	43,6	12,4	18,4	21,0	23,6	16,4	35,2	34,4	31,0	54,0	45,8	10,0
D.P. ²	13,6	4,0	5,1	4,7	6,1	3,6	9,5	8,8	9,9	11,7	11,0	2,2
Velocidade do Vento – m/s												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	8,0	8,0	8,0	7,2	8,0	6,7	9,7	7,8	8,0	8,9	13,7	8,0
Mínima	1,0	0,8	0,9	2,5	0,3	1,2	1,0	1,1	1,0	3,0	1,3	1,1
Média	3,8	3,3	2,9	3,9	3,4	3,2	3,8	3,9	4,5	5,2	5,3	4,5
I.V. ¹	7,0	7,2	7,2	4,7	7,7	5,5	8,8	6,7	7,0	5,9	12,4	6,9
D.P. ²	2,0	2,1	1,5	1,2	1,8	1,2	1,7	1,9	1,9	1,9	2,5	2,1
Radiação Solar – W/m ²												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	620,1	602,7	503,0	444,7	421,6	297,9	531,9	380,2	517,1	483,3	576,0	548,6
Mínima	123,1	139,3	183,7	317,5	98,0	243,0	73,3	97,4	113,7	149,8	180,1	216,9
Média	404,7	400,7	404,1	384,1	263,8	269,0	248,9	293,5	328,8	388,7	398,7	415,2
I.V. ¹	497,0	463,4	319,3	127,2	323,6	54,9	458,5	282,7	403,4	333,5	395,8	331,7
D.P. ²	123,3	143,3	71,1	31,6	71,9	14,7	84,2	76,7	116,9	70,6	109,8	100,1
Temperatura do ar - °C												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	26,2	24,7	26,6	25,7	23,3	23,0	24,2	24,2	26,1	28,6	28,1	27,4
Mínima	19,3	18,9	22,1	22,2	16,0	17,1	11,5	17,8	11,7	20,3	17,9	22,3
Média	23,5	22,5	24,4	23,8	20,4	19,9	17,7	21,6	20,4	25,9	24,4	25,2
I.V. ¹	6,9	5,8	4,5	3,5	7,4	5,9	12,7	6,5	14,4	8,3	10,2	5,1
D.P. ²	1,9	1,5	1,4	1,0	2,3	1,6	3,1	1,6	3,6	2,1	2,6	1,7

¹Intervalo de Variação ²Desvio Padrão

Apesar dos valores médios mensais da umidade relativa não variarem muito durante o ano (Tabela 1), verifica-se que o intervalo de variação (I. V.) apresenta-se relativamente elevado durante todo o ano, assim como, também, os valores de desvios padrão (D. P.), o que demonstra uma distribuição de frequências mais fechada, ou seja, os valores diários obtidos se

encontram distantes da média do mês, o que pode ser constatado com os valores de mínimo, máximo e a média dos meses do ano. Pelos dados de velocidade média mensal do vento apresentados, verifica-se a tendência de maior velocidade média do vento nos meses mais úmidos do final do ano, tendo uma maior velocidade do vento em novembro (13,7 m/s) e a menor em maio (0,3 m/s).

Na Tabela 1, verifica-se que a velocidade do vento apresentou um intervalo de variação elevado durante todos os meses do ano, o que mostra sua grande dispersão verificada pelos valores de máximo, mínimo e a média. O desvio padrão baixo demonstra uma distribuição normal de frequências mais aberta, ou seja, os valores diários obtidos encontram-se próximos da média do mês em questão.

Os dados apresentados de radiação solar indicam que o valor máximo de 620,1 W/m² ocorreu no mês de janeiro e o valor mínimo de 73,3 W/m² no mês de julho. Fica evidente também a tendência de menor incidência de radiação solar nos meses secos do ano (outono e inverno), que vai de abril a setembro, tendo uma maior incidência de radiação solar de outubro a março (primavera e verão). Na Tabela 1, verifica-se que a incidência de radiação solar apresentou um intervalo de variação muito elevado durante todo o ano, sendo menores estes números nos meses secos do ano, como também pode ser verificado pelos valores de máximo, mínimo e a média. Tais valores interferem diretamente nos resultados de evapotranspiração pelo método de estimativa por radiação. Verifica-se que o desvio padrão é também muito elevado o que demonstra uma distribuição normal de frequências muito fechada, ou seja, os valores diários obtidos se encontram distantes da média do mês, o que pode ser averiguado com os valores de mínimo, máximo e a média dos meses do ano.

Observa-se a tendência de menor temperatura nos meses secos do ano (outono e inverno no Estado de São Paulo), que vai de abril a setembro, tendo uma maior temperatura de outubro a março (primavera e verão no Estado de São Paulo). Na Tabela 1, verifica-se que a temperatura apresentou um intervalo de variação irregular e relativamente elevado durante todo o ano, o que interfere nos métodos de estimativa por temperatura. Os dados de temperatura mostram um desvio padrão também irregular e relativamente elevado, o que demonstra uma distribuição de frequências mais aberta em alguns meses e mais fechada em outros, o que pode ser examinado com os valores de mínimo, máximo e a média dos meses.

A Tabela 2 indica a tendência de menor precipitação nos meses que vão de abril a setembro, ou seja, os meses secos do ano, tendo uma maior precipitação de outubro a março (meses chuvosos).

Verifica-se que a precipitação (Tabela 2) apresentou um intervalo de variação relativamente elevado durante os meses de outubro a abril, e um desvio padrão também elevado nos mesmos meses, o que demonstra uma distribuição de frequências (variação de dados) mais aberta para os meses chuvosos e mais fechada para os meses secos.

Na Tabela 2, verifica-se que a evaporação apresentou um intervalo de variação relativamente elevado durante todo o ano, e um desvio padrão razoável o que demonstra uma distribuição de frequências nem muito aberta e nem muito fechada, ou seja, os valores diários obtidos se encontram aceitavelmente perto da média do mês.

A Tabela 2 indica a tendência de menor evaporação do tanque classe A nos meses frios e secos do ano, que vão de abril a setembro, tendo uma maior evaporação de outubro a março (exceto fevereiro). Observa-se a tendência de decréscimo do coeficiente do tanque classe A no decorrer dos meses do ano. Verifica-se que o coeficiente do tanque classe A apresentou um intervalo de variação elevado durante todo o ano, e um desvio padrão relativamente baixo, o que demonstra uma distribuição de frequências menos aberta, ou seja, os valores diários obtidos encontram-se próximos da média do mês.

Tabela 2. Dados de precipitação, evaporação e coeficiente do tanque classe A.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Precipitação – mm/mês												
Mensal	431,2	291,6	104,0	8,6	58,3	0,0	3,3	97,5	41,5	65,4	184,8	130,7
Precipitação – mm/dia												
Máxima	96,6	67,7	44,9	8,3	23,8	0,0	1,8	25,0	14,0	35,7	79,0	63,5
Mínima	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	13,9	10,4	3,4	0,3	1,9	0,0	0,1	3,1	1,4	2,1	6,2	4,2
I.V. ¹	96,6	67,7	44,9	8,3	23,8	0,0	1,8	25,0	14,0	35,7	79,0	63,5
D.P. ²	22,4	15,3	8,7	1,5	5,5	0,0	0,4	7,5	3,6	6,9	15,7	11,7
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Evaporação pelo tanque classe A – mm/mês												
Mensal	145,6	101,7	166,3	123,8	102,0	113,8	107,0	153,8	134,9	214,6	167,7	167,5
Evaporação pelo tanque classe A – mm/dia												
Máxima	7,9	8,3	9,2	8,3	7,0	6,0	6,5	7,9	8,2	9,2	8,7	7,7
Mínima	0,6	0,6	0,9	0,9	0,8	1,5	0,1	1,0	0,0	3,0	1,7	1,8
Média	4,7	3,6	5,4	4,0	3,3	3,8	3,5	5,0	4,5	6,9	5,6	5,4
I.V. ¹	7,3	7,7	8,3	7,4	6,2	4,6	6,4	6,9	8,2	6,2	7,0	5,9
D.P. ²	1,9	1,8	1,8	1,6	1,5	1,2	1,7	1,7	2,1	1,5	2,0	1,6
Coeficiente do tanque classe A – Kp												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	0,78	0,78	0,78	0,72	0,79	0,75	0,78	0,75	0,78	0,68	0,78	0,79
Mínima	0,55	0,56	0,57	0,57	0,52	0,60	0,47	0,52	0,52	0,53	0,43	0,60
Média	0,67	0,70	0,71	0,67	0,69	0,69	0,66	0,66	0,65	0,62	0,65	0,70
I.V. ¹	0,23	0,22	0,21	0,15	0,27	0,15	0,31	0,24	0,25	0,16	0,35	0,19
D.P. ²	0,06	0,06	0,04	0,04	0,06	0,03	0,06	0,07	0,06	0,04	0,08	0,06

¹Intervalo de Variação ²Desvio Padrão

5.2 Análise estatística dos dados de evapotranspiração

Na Tabela 3, verifica-se que a evapotranspiração obtida pelo tanque classe A apresentou um intervalo de variação relativamente elevado durante o ano, e um desvio padrão baixo o que demonstra uma distribuição de frequências menos aberta, ou seja, os valores diários obtidos encontram-se próximos da média do mês. Pela Tabela 3, verifica-se que a evapotranspiração obtida por Jensen & Haise apresentou um intervalo de variação elevado, porém variável durante o ano, e um desvio padrão baixo o que confirma uma distribuição de frequências mais fechada, ou seja, os valores diários obtidos, para cada mês, encontram-se próximos da média do mês em questão. Métodos desenvolvidos com base na variável meteorológica radiação solar são mais confiáveis, principalmente nas situações em que a advecção possa ser desprezada (Tucci *et al*, 2004).

Observa-se na Tabela 3, que a evapotranspiração obtida por Thornthwaite apresentou um intervalo de variação elevado em alguns meses e baixo em outros, durante o ano, e um desvio padrão muito baixo, o que demonstra uma distribuição de frequências bem fechada, ou seja, os valores diários obtidos encontram-se muito próximos da média do mês em questão. O método de Thornthwaite funciona adequadamente em regiões de clima úmido, independentemente da latitude e da altitude. Em condições de aridez, o modelo subestima, com frequência, a evapotranspiração potencial. Em situação de super-umidade topo-climática, ao contrário, pode superestimar a ETp (Camargo & Camargo, 2000). Chang (1968) cita que a equação original de Thornthwaite é baseada em dados de precipitação e escoamento de

inúmeras bacias hidrográficas localizadas nas regiões centrais e leste dos Estados Unidos, onde predomina um clima temperado com invernos úmidos e verões secos.

Tabela 3. Análise estatística da evapotranspiração baseada na radiação (Jensen & Haise), na evaporação (tanque classe A), e na temperatura (Thorntwaite e Blaney-Criddle).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Evapotranspiração baseada na evaporação pelo tanque classe A - mm/mês												
Mensal	104,8	74,3	126,7	86,2	75,8	84,3	75,1	108,0	93,2	144,1	116,8	125,6
Evapotranspiração baseada na evaporação pelo tanque classe A - mm/dia												
Máxima	5,9	5,1	5,9	5,4	5,6	4,4	4,6	5,0	5,0	6,0	6,0	6,2
Mínima	0,5	0,5	0,6	0,0	0,6	1,1	0,1	0,8	0,0	2,0	1,3	1,1
Média	3,4	2,7	4,1	2,8	2,4	2,8	2,4	3,5	3,1	4,6	3,9	4,1
I.V. ¹	5,4	4,6	5,3	5,4	5,0	3,3	4,6	4,1	4,9	4,1	4,8	5,0
D.P. ²	1,4	1,1	1,3	1,2	1,1	0,8	1,2	1,1	1,4	0,9	1,4	1,2
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Evapotranspiração baseada na radiação por Jensen & Haise - mm/mês												
Mensal	143,1	127,2	154,5	131,8	82,1	79,1	68,9	96,7	99,5	144,9	147,7	156,3
Evapotranspiração baseada na radiação por Jensen & Haise - mm/dia												
Máxima	7,2	7,5	12,3	5,3	3,7	3,1	5,3	4,0	4,9	5,7	11,7	6,9
Mínima	1,3	1,4	2,0	3,7	0,9	2,2	0,7	1,0	1,0	0,5	1,9	2,4
Média	4,6	4,5	5,0	4,4	2,6	2,6	2,2	3,1	3,3	4,7	4,9	5,0
I.V. ¹	6,0	6,1	10,4	1,6	2,9	0,9	4,6	3,0	3,9	5,2	9,9	4,4
D.P. ²	1,5	1,7	1,7	0,4	0,8	0,2	0,9	0,9	1,3	1,2	1,9	1,4
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Evapotranspiração baseada em temperatura por Thorntwaite - mm/mês												
Mensal	151,4	130,6	141,6	121,0	114,7	106,6	114,3	122,4	121,9	144,7	149,4	158,2
Evapotranspiração baseada em temperatura por Thorntwaite - mm/dia												
Máxima	5,3	8,8	9,2	4,2	4,0	3,9	4,5	4,3	4,8	5,2	9,2	5,4
Mínima	4,3	4,0	4,1	3,8	3,2	3,2	2,8	3,5	2,8	0,0	3,9	4,7
Média	4,9	4,7	4,6	4,0	3,7	3,6	3,7	3,9	4,1	4,7	5,0	5,1
I.V. ¹	1,0	4,7	5,1	0,4	0,9	0,7	1,6	0,8	1,9	5,2	5,3	0,7
D.P. ²	0,3	0,8	0,9	0,1	0,3	0,2	0,4	0,2	0,5	0,9	0,9	0,2
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Evapotranspiração baseada em temperatura por Blaney-Criddle - mm/mês												
Mensal	175,5	154,1	172,9	148,3	135,2	129,3	125,6	145,2	141,5	169,9	172,8	182,9
Evapotranspiração baseada em temperatura por Blaney-Criddle - mm/dia												
Máxima	6,0	10,3	11,2	5,2	4,7	4,7	4,8	5,0	5,4	5,9	10,6	6,2
Mínima	5,1	4,9	5,1	4,7	3,9	4,0	3,3	4,2	3,6	2,3	4,7	5,5
Média	5,7	5,5	5,6	4,9	4,4	4,3	4,1	4,7	4,7	5,5	5,8	5,9
I.V. ¹	1,0	5,4	6,1	0,4	0,8	0,7	1,4	0,8	1,8	3,7	5,8	0,7
D.P. ²	0,3	1,0	1,1	0,1	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,6	1,0	0,2

¹Intervalo de Variação ²Desvio Padrão

A Tabela 3 indica que a evapotranspiração obtida por Blaney-Criddle apresentou um intervalo de variação alto em alguns meses e pequeno em outros, durante o ano, e um desvio padrão baixo o que demonstra uma distribuição de frequências mais fechada, ou seja, os valores diários obtidos, em cada mês, encontram-se próximos da média do mês em questão.

Doorenbos e Pruitt (1990) não recomendam a equação de Blaney-Criddle para regiões equatoriais em que a temperatura se mantém estável, oscilando somente as demais variáveis meteorológicas. Descartam seu uso em ilhas pequenas, onde a temperatura do ar é função da temperatura do mar circundante. Também em locais altos e climas de latitude média, os resultados são duvidosos.

O empirismo contido nos métodos baseados na temperatura do ar (Thorntwaite e Blaney-Criddle) recomenda seu uso, exclusivamente, quando esta variável for a única informação meteorológica disponível.

Na Figura 1, observa-se a tendência de menor evapotranspiração pelos métodos estudados nos meses secos do ano (outono e inverno), que vão de abril a setembro, tendo uma maior evapotranspiração de outubro a março, ou seja, nos meses mais úmidos do ano (primavera e verão).

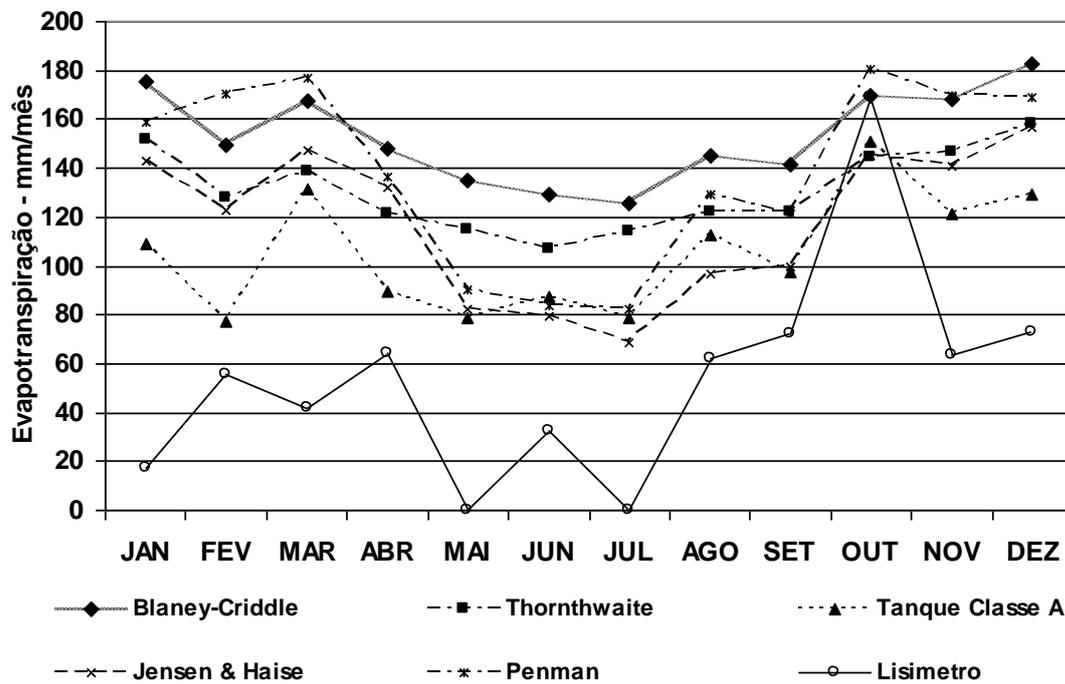


Figura 1. Evapotranspiração pelos métodos: Blaney-criddle, Thornthwaite, Tanque Classe A, Jensen & Haise, Penman e Lisímetro.

Os dados de evapotranspiração real observados na Figura 1, obtidos com lisímetro, ficaram aquém dos valores dos métodos estudados de evapotranspiração potencial, como era esperado. Isso se deve à evapotranspiração do lisímetro ser função da precipitação menos infiltração e variação da umidade no solo, e os valores obtidos de evapotranspiração potencial serem calculados empiricamente a partir de dados climatológicos, como evaporação, temperatura e radiação solar. A Figura 2 mostra a variação dos coeficientes de correlação e determinação mensal (entre os dias de cada mês) dos diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração.

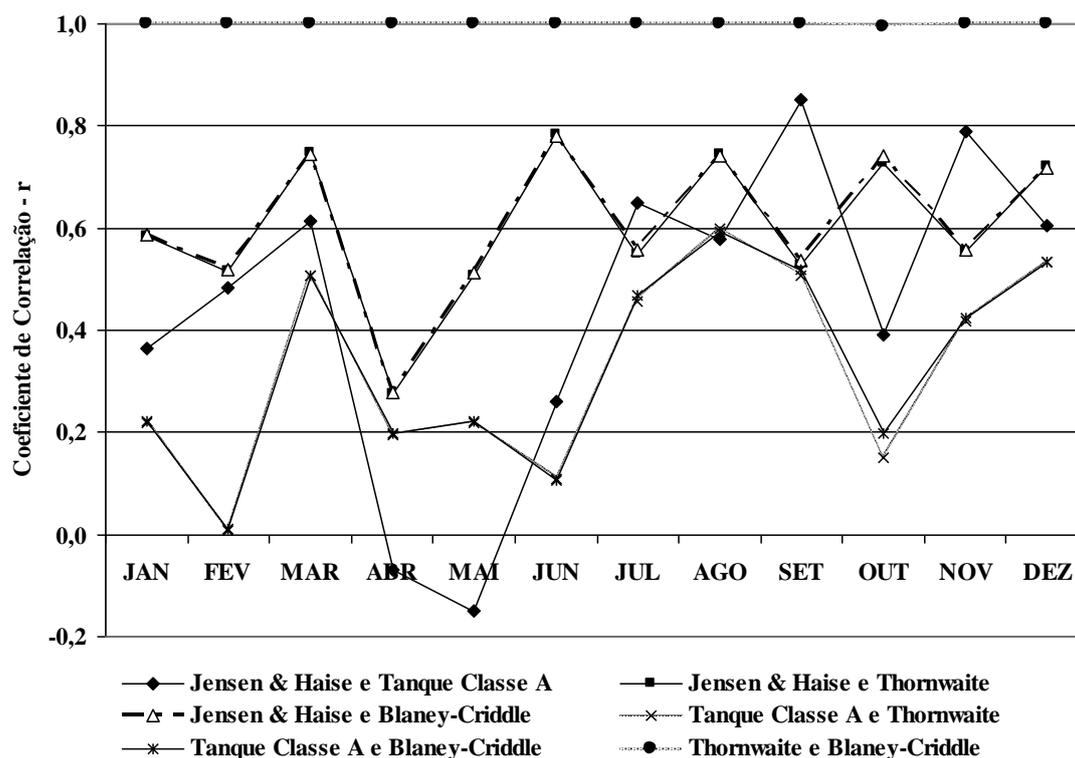


Figura 2. Variação dos coeficientes de correlação mensal (entre os dias dos meses do ano) da evapotranspiração entre os métodos de radiação por Jensen & Haise, evaporação pelo tanque classe A e temperatura por Thornthwaite e Blaney-Criddle.

Tabela 4. Análise do coeficiente de correlação e coeficiente de determinação da evapotranspiração entre os dias dos meses do ano.

	J.&H. ¹ /T.C. A ²		J.&H./Thorn. ³		J.&H./B-C ⁴		T.C. A/ Thorn.		T.C. A/B-C		Thorn./ B-C	
	C.C. ⁵	C.D. ⁶	C.C.	C.D.	C.C.	C.D.	C.C.	C.D.	C.C.	C.D.	C.C.	C.D.
JAN	0,36	0,13	0,58	0,34	0,59	0,35	0,21	0,05	0,22	0,05	1,00	1,00
FEV	0,42	0,18	0,45	0,21	0,44	0,19	-0,08	0,01	-0,08	0,01	1,00	1,00
MAR	0,43	0,18	0,88	0,78	0,87	0,77	0,19	0,04	0,17	0,03	1,00	1,00
ABR	-0,07	0,00	0,27	0,07	0,28	0,08	0,19	0,04	0,20	0,04	1,00	1,00
MAI	-0,15	0,02	0,51	0,26	0,51	0,26	0,22	0,05	0,22	0,05	1,00	1,00
JUN	0,26	0,07	0,78	0,61	0,78	0,61	0,11	0,01	0,11	0,01	1,00	1,00
JUL	0,65	0,42	0,55	0,30	0,56	0,31	0,46	0,21	0,47	0,22	1,00	1,00
AGO	0,57	0,32	0,74	0,55	0,74	0,55	0,60	0,35	0,59	0,35	1,00	1,00
SET	0,85	0,73	0,53	0,28	0,54	0,29	0,51	0,26	0,52	0,27	1,00	1,00
OUT	0,38	0,14	0,73	0,53	0,74	0,55	0,14	0,02	0,19	0,04	0,99	0,99
NOV	0,59	0,35	0,78	0,61	0,77	0,60	0,17	0,03	0,15	0,02	1,00	1,00
DEZ	0,61	0,37	0,72	0,52	0,72	0,52	0,54	0,29	0,54	0,29	1,00	1,00
Média	0,41	0,24	0,63	0,42	0,63	0,42	0,27	0,11	0,27	0,11	1,00	1,00
Máxima	0,85	0,73	0,88	0,78	0,87	0,77	0,60	0,35	0,59	0,35	1,00	1,00
Mínima	-0,15	0,00	0,27	0,07	0,28	0,08	-0,08	0,01	-0,08	0,01	0,99	0,99
I.V. ⁷	1,00	0,72	0,61	0,71	0,60	0,69	0,67	0,35	0,67	0,34	0,01	0,01

¹Jensen & Haise. ²Tanque Classe A. ³Thornthwaite. ⁴Blaney-Criddle. ⁵Coeficiente de Correlação. ⁶Coeficiente de Determinação. ⁷Intervalo de Variação

As duas correlações negativas são observadas no mês de fevereiro (Tabela 4) entre o método por evaporação (tanque classe A) e de temperatura (Thornthwaite) e por evaporação (tanque classe A) e temperatura (Blaney-Criddle), levando a constatar que o método de cálculo de evapotranspiração por evaporação tende a ter correlação negativa de radiação e temperatura quando a evaporação no mês é baixa, como pode ser verificado na Tabela 2.

Observa-se, também, que nos meses em que se obtém simultaneamente elevadas diferenças entre os dados climatológicos obtidos (Tabelas 1 e 2), como por exemplo, radiação e evaporação, há uma tendência de alta correlação entre os métodos de cálculo de evapotranspiração. Quando um parâmetro climatológico usado em um método é elevado e outro usado em outro método é baixo obtém-se uma correlação fraca (próxima de zero) ou até mesmo negativa, como no caso da evaporação e radiação nos meses de abril e maio.

Na Tabela 4, verifica-se que os métodos baseados em dados de temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle) obtiveram coeficientes de correlação e determinação, entre os dias dos meses do ano, maior que 0,99, ou seja, são perfeitamente correlacionados. Estes dois métodos baseados em temperatura possuem a mesma tendência de variação nos meses do ano quando correlacionados com os métodos de radiação e evaporação (Figura 2).

Stanhill (1962), analisando dados climáticos de Israel, verificou que o método de Thornthwaite subestima consideravelmente a ETo, dada a condição de aridez local, associada ao fato da equação não considerar o efeito de advecção. Medeiros (2002) verificou um coeficiente de correlação entre os métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite de 0,60, para as condições do semi-árido brasileiro, o que foi considerado muito baixo pelo autor. Já para o método por evaporação do tanque classe A e o método de Penman-Monteith, Medeiros (2002) obteve um coeficiente de correlação de 0,65.

Na Tabela 5, verifica-se que a correlação anual dos métodos de evapotranspiração ficaram acima de 0,72, ou seja, estão bem correlacionados em sentido positivo. Os métodos de radiação (Jensen & Haise) e temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle) estão fortemente correlacionados, apresentado coeficientes de correlação acima de 0,90.

Tabela 5. Coeficiente de correlação (entre os meses do ano) da evapotranspiração entre os métodos de radiação por Jensen & Haise, evaporação pelo tanque classe A, e métodos físicos por Penman e temperatura por Thornthwaite e Blaney-Criddle.

	Coeficiente de correlação de evapotranspiração			
	Jensen & Haise	Tanque Classe A	Thornthwaite	Penman
Tanque Classe A	0,72			
Thornthwaite	0,90	0,75		
Penman	0,94	0,72	0,86	
Blaney-Criddle	0,96	0,78	0,98	0,89

Cunha (2003) realizou um estudo da infiltração no ano, na mesma área onde foram determinadas as evapotranspirações potencial apresentadas acima. Na Figura 3, estão apresentados os valores encontrados por Cunha (2003) para a evapotranspiração real durante o ano.

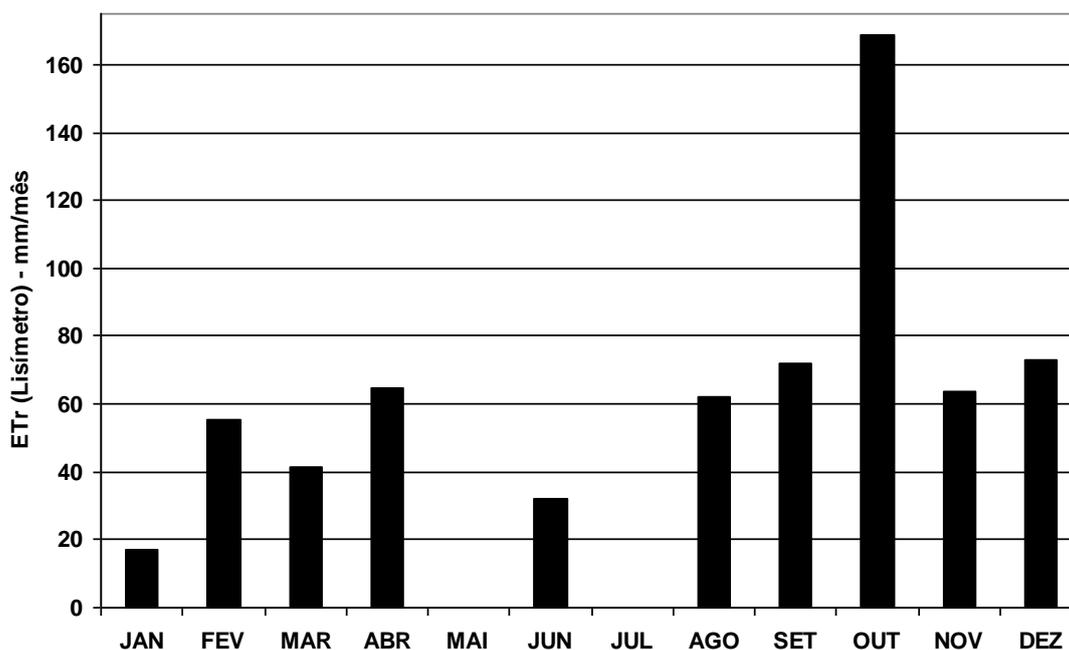


Figura 3. Evapotranspiração determinado por Lisímetro.

A Tabela 6 apresenta os valores de correlação dos dados de evapotranspiração real obtido por Cunha (2003) com os cinco métodos de estimativa de evapotranspiração.

Tabela 6. Coeficiente de correlação (entre os meses do ano) entre evapotranspiração real e os métodos de radiação por Jensen & Haise, evaporação pelo tanque classe A, método físico de Penman e de temperatura por Thornthwaite e Blaney-Criddle.

	Coeficiente de Correlação de Evapotranspiração				
	Jensen & Haise	Tanque Classe A	Thornthwaite	Penman	Blaney-Criddle
Lisímetro	0,52	0,70	0,48	0,60	0,46

Dentre os cinco métodos de estimativa da evapotranspiração avaliados neste estudo, o que mais se aproximou da evapotranspiração real de terminada no lisímetro foi o método que utiliza os dados do Tanque Classe A, com coeficiente de correlação de 0,70. O segundo método que mais se aproximou foi o método de Penman, com coeficiente de 0,60. Para os outros três métodos, o coeficiente de correlação ficou próximo de 0,50.

6 CONCLUSÕES

Nos meses em que se obtém simultaneamente uma grande amplitude dos dados climatológicos intra-anuais que são utilizados no cálculo de evapotranspiração, como radiação e evaporação, há uma tendência de alta correlação entre os métodos de cálculo que se utilizam destes dados. Os valores das variações intra-anuais de evapotranspiração de referência dos métodos por temperatura, Thornthwaite e Blaney-Criddle, apresentam alta correlação entre os dados diários durante os meses do ano, para os dados climatológicos utilizados no presente

estudo. Os dois métodos baseados em temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle) possuem a mesma tendência de variação nos meses do ano, quando correlacionados com os métodos baseados em radiação (Jensen & Haise) e evaporação (tanque classe A). Na comparação dos dados de evapotranspiração determinados no lisímetro, o que mais se aproximou foi o método de evaporação (Tanque Classe A), e os que obtiveram menores correlações foram os de estimativa por temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle).

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (processo 03/09463-1) e ao CNPq (processo 141159/2006-5) pelo auxílio financeiro que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, D. J. *et al.* **Determinação da evapotranspiração potencial e balanço hídrico climático da região da Grande Dourados, MS.** Dourados: EMBRAPA,UEPAE, 1986. 150 p.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. 297p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BERLATO, M. A., MOLION, L. B. Evaporação e evapotranspiração. **Boletim Técnico IPAGRO**, Porto Alegre, n.7, p.3-95, 1981.
- CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p.125-137, 2000.
- CHANG, J. H. **Climate and agriculture: an ecological survey.** Chicago: Aldine, 1968. 304 p.
- CUNHA, A. T. **Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do aquífero Guarani, para a região de São Carlos-SP.** 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Las necesidades de agua de los cultivos.** Roma: FAO. 1990. 194 p. (FAO Riego y Drenaje, 24).
- JAMES, L. G. Irrigation requirements and scheduling. In: JAMES, L. G. **Principles of farm irrigation system design.** New York: John Wiley, 1988. cap. 1, p. 1-50.
- KIJNE, J. W. Determinación de la evapotranspiración. In: International Livestock Research Institute. **Principios y aplicaciones del drenaje.** Wageningen, 1978. v.3, cap. 19, p. 59-108.
- MEDEIROS, A. T. **Estimativa de evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.**

2002. 103 p. Tese (Doutorado em irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. Nether. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 4, p.9-29, 1956.

PEREIRA, A. R.; VILA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos, EESC; EDUSP, 1998. 819p.

SCOZZAFAVA, M.; TALLINI, M. Net infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. **Hydrogeology Journal**, Berlim, v. 9, p. 461-475, 2001.

STANHILL, G. The use of piche evaporimeter in the calculation of evaporation. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 88, p. 80-82, 1962.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M. (Org.). *et al.* **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3ª ed., Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, 2004. 944 p.