

## ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA FINS AGRÍCOLAS NA REGIÃO DE SÃO CARLOS – SP

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ESTIMATING METHODS OF EVAPOTRANSPIRATION FOR AGRICULTURAL PURPOSES IN SÃO CARLOS – SP REGION

## ANÁLISIS COMPARATIVOS DE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA FINES AGRÍCOLAS EN LA REGIÓN DE SÃO CARLOS - SP

Daniele Freitas Primo<sup>1</sup>

Diego Peruchi Trevisan<sup>2</sup>

Rogério Teixeira Duarte<sup>3</sup>

**Resumo:** Os estudos que determinam os erros médios das diversas equações empíricas para diferentes condições climáticas são importantes para o planejamento agrícola, pois a evapotranspiração é uma variável crucial para a modelagem hidrológica. O objetivo deste estudo foi avaliar as características climáticas em São Carlos-SP, utilizando métodos de estimativa da evapotranspiração. Todos os métodos acompanharam a evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith. O que mais se aproximou foi o de García Lopez, sendo que os demais métodos subestimaram Penman-Monteith, destacando-se o de Priestley e Taylor. O modelo mais indicado para a região de São Carlos (SP) é o de Camargo.

**Palavras-chave:** Planejamento. Modelos descritivos. Clima. Agricultura.

**Abstract:** Studies that determine the mean errors of the various empirical equations for different climatic conditions are important for agricultural planning since evapotranspiration is a crucial variable for hydrological modeling. The objective of this study was to evaluate the climatic characteristics in São Carlos-SP, using methods of evapotranspiration estimation. All methods followed the evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith method. The closest approach was that of García Lopez and the other methods underestimated Penman-Monteith, highlighting that of Priestley and Taylor. The Camargo method is the most suitable model for the region of São Carlos (SP).

**Keywords:** Planning. Descriptive models. Climate. Agriculture.

**Resumen:** Los estudios que determinan los tiempos medios de las diversas áreas empíricas para diferentes condiciones climáticas son importantes para el planeamiento agrícola, la evapotranspiración es un factor crucial para un modelaje hidrológico. El objetivo del estudio está disponible como características climáticas en São Carlos-SP, utilizando métodos de estimativa de la evapotranspiración. Todos los métodos para evaluar una evapotranspiración estimada por método de Penman-Monteith. O que mais se acercan a García Lopez, sendo que os demais métodos subestimaram Penman-Monteith, destacando de Priestley y Taylor. El modelo más indicado para la región de São Carlos (SP) es Camargo.

**Palabras-clave:** Planificación. Modelos descriptivos. El tiempo. La agricultura.

**Envio 28/11/2017**

**Revisão 08/12/2017**

**Aceite 28/08/2018**

13

<sup>1</sup> Bacharelado em Engenharia Agronômica. Universidade de Araraquara. biancafogaca@outlook.com

<sup>2</sup> Doutorando em Ciências Ambientais. Universidade Federal de São Carlos. diego.peruchi@gmail.com

<sup>3</sup> Doutorado em Agronomia. Universidade Estadual Paulista. rogerioiteixeira\_1@hotmail.com

## Introdução

A crescente demanda por água tanto na agricultura como para outros fins, e consequentemente sua potencial escassez, exigem um uso racional desse recurso, devido à possível exaustão das reservas de água de boa qualidade, inviabilizando os diversos usos essenciais da sociedade, como o abastecimento humano e a produção de alimentos (CARMO et al., 2005).

Atualmente, a demanda hídrica para a agricultura é um dos principais fatores críticos do uso da água. De acordo com Christofidis (2001), calcula-se que 70% do consumo de água das atividades humanas seja destinado para a prática de irrigação e produção no setor agrícola e agropecuário. Inevitavelmente, o uso intensivo da água para a agricultura afeta negativamente as reservas hídricas. Desta forma, o conhecimento da oferta hídrica e o manejo adequado da irrigação permite um maior aproveitamento dos recursos hídricos e o retorno econômico dos investimentos (ARAÚJO et al., 2007).

O consumo de água pelas culturas é expresso na forma de evapotranspiração. Segundo Borges e Mendiondo (2005), a evapotranspiração é definida como a perda de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade do solo, sendo uma variável de extrema importância para a modelagem hidrológica e para a racionalização do uso da água na agricultura.

A determinação da evapotranspiração depende de métodos adequados para fins operacionais. Dentre tais métodos, estão o lisímetro, a razão de Bowen, a correlação turbulenta, a determinação da umidade do solo, entre outros. Entretanto apesar da variedade, estes métodos além de pouco práticos, envolvem custos elevados para sua implementação e manutenção, o que torna tal aplicação muitas vezes de difícil acesso.

Objetivando a simplificação de tais cálculos, definiu-se o conceito de evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998), que necessita apenas de dados meteorológicos para sua quantificação, podendo ser ajustada posteriormente às condições específicas de vegetação e umidade do solo (MANTOVANI, 1993). Para a quantificação dessa grandeza, utilizam-se modelos empíricos ou determinísticos com embasamento físico (SOARES et al., 2003).

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization – FAO*) recomenda o uso do método de Penman - Monteith para a estimativa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Contudo, esse modelo apresenta um

nível de exigência de dados de entrada que dificultam sua aplicação, uma vez que tais elementos meteorológicos nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões.

Carmo et al., (2005) mencionaram que dados e informações são insuficientes ou não acessíveis para se promover uma adequada avaliação dos recursos hídricos, tornando os problemas mais graves nessa área. Nesses casos, a alternativa seria o uso de equações simplificadas ou empíricas, que, consequentemente, perdem muito da realidade física, que é compensada ou substituída por relações estatísticas oriundas de experimentos de campo. Essas equações empíricas são razoavelmente boas para o local onde foram calibradas. No entanto, para fornecerem estimativas precisas fora das condições em que foram definidas, precisam ser avaliadas e ajustadas regionalmente (MANTOVANI, 1993).

Por outro lado, o que se observa em âmbito nacional é o uso inadequado de equações empíricas, muitas vezes, pela falta de dados para avaliação e calibração local dessas equações, antes de sua utilização.

Vepraskas et al., (2006) mencionam que os erros de estimativa da evapotranspiração são uma das maiores fontes de erros para os modelos hidrológicos. Nesse sentido, fazem-se necessários estudos que determinem os erros médios de tais equações empíricas para diferentes condições climáticas, tendo em vista que a evapotranspiração é uma variável crucial para a modelagem hidrológica.

Diante estas considerações, este trabalho tem como objetivo avaliar as características climáticas do município de São Carlos-SP, utilizando diferentes métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração, com o intuito de compará-los diante as características climáticas presentes na região.

## Material e Métodos

Os dados meteorológicos foram coletados durante o período de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2015 por meio da Plataforma de Coleta de Dados (PCD), disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), programada para registro de informações em intervalo de 30 minutos.

Estes dados corresponderam as seguintes grandezas: Intensidade do vento (MS-1); Temperatura do ar (°C); Umidade relativa do ar (%); Radiação solar global (Wm-2); Saldo de radiação (Wm-2); Fluxo de calor no solo (Wm-2) e Precipitação (mm).

Inicialmente, as estimativas da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>0</sub>) obtidas pelo método FAO56 Penman-Monteith foram comparadas com as variáveis meteorológicas relacionadas ao fenômeno da ET<sub>0</sub> (radiação solar global, temperatura e umidade do ar e intensidade do vento), com o intuito de analisar a correlação de cada uma delas junto ao fenômeno investigado. Esta comparação foi realizada com o método FAO56 Penman-Monteith pelo fato deste ser um método físico, enquanto os métodos avaliados são empíricos. Para tanto, foram utilizados os coeficientes de correlação e o coeficiente de regressão linear.

Os métodos avaliados foram classificados em relação aos seus respectivos desempenhos a partir do desvio médio absoluto (DMA) (Equação 1); Desvio médio relativo (DMR) (Equação 2); Índice de concordância/Willmott (d) (Equação 3) e Coeficiente de confiança (c)/correlação (r) (Equação 4):

$$DMA = \sqrt{\sum \frac{(P_i - O_i)^2}{N}} \times 100 \quad (1)$$

$$DMR = \sqrt{\sum \frac{(P_i - O_i)^2}{N}} \times 100 \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (P_i - O_i + O_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$c = r \times d \quad (4)$$

16

Onde:

P: Evapotranspiração estimada;

O: evapotranspiração estimada pelo método de FAO-56 Penman-Monteith [mm.dia<sup>-1</sup>];

N: número de estimativas;

R: coeficientes de correlação;

d: índice de concordância de Willmot.

O coeficiente c, proposto por Camargo; Sentelhas (1997) é interpretado conforme evidenciado na Tabela 1:

**Tabela 1.** Valores do coeficiente de confiança e sua classificação.

Valores do coeficiente(c)	Classificação
---------------------------	---------------

➤ 0,85

Ótimo

0,76 a 0,85

Muito bom

0,66 a 0,75

Bom

0,61 e 0,65

Mediano

< 0,60

Ruim

O coeficiente de correlação pode variar de -1 a +1 como sugerido por Silva et al., (2011) (Tabela 2). O índice de concordância, proposto por Willmott et al., (1985), pode variar entre 0 e 1 para nenhuma concordância e para uma concordância perfeita, respectivamente.

**Tabela 2.** Valores do coeficiente de correlação e sua classificação.

Valores do coeficiente (r)	Classificação da correlação
1	Perfeita positiva
0,70 a 0,99	Muito forte positiva
0,30 a 0,69	Moderada positiva
0,01 a 0,29	Fraca positiva
0	Nenhuma
- 0,01 a - 0,29	Fraca negativa
- 0,30 a - 0,69	Moderada negativa
-0,70 a - 0,99	Muito forte negativa
- 1	Perfeita negativa

17

### Estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP ou ETo)

Os valores de ETP podem ser estimados a partir de elementos medidos nas estações agrometeorológicas. Neste trabalho, foram tratados apenas os métodos de maiores potenciais práticos e empíricos, dependendo das informações meteorológicas disponíveis no local, tais métodos foram:

#### Método de Thornthwaite

Este método foi proposto por THORNTHWAITE (1948) para estimativa de *evapotranspiração potencial* (ETP) *mensal* de um gramado (posto meteorológico) como um elemento climatológico, visando a classificação climática. Nesse contexto, ETP é tida como

igual à "chuva ideal" para que uma região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano.

O conjunto de equações desenvolvido por Thornthwaite foi baseado em balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração realizadas em lisímetros, e utiliza apenas a temperatura do ar como variável independente. A evapotranspiração potencial média mensal *padrão* (ETP<sub>p</sub>, mm.mês) para um mês de 30 dias, e cada dia tem 12 horas de fotoperíodo, foi bem representada pelo conjunto de equações:

$$ETP_p = 16(10 \frac{Ti}{I})\alpha \quad Ti > 0^\circ C$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^5 I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (05)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot Ti)^{1,514} \quad Ti > 0^\circ C$$

em que  $Ti$  é a temperatura média mensal ( $^\circ C$ ), e  $I$  é o índice de calor da região e que deve ser calculado com valores normais (média climatológica). O subscrito  $i$  representa o mês do ano (i.e.,  $i = 1$ , jan;  $i = 2$ , fev, etc). Segundo CAMARGO (1966), meses em que a temperatura média mensal for inferior a  $0^\circ C$  não devem ser incluídos no cálculo de  $I$ . Esse parece ser um dos muitos erros cometidos na utilização desse método em regiões de clima temperado.

18

A fórmula de Thornthwaite estima ETP<sub>p</sub> para uma condição padrão de 12 horas de brilho solar e mês com 30 dias. Para estimar a evapotranspiração potencial mensal (ETP mm.mês) para um mês de  $ND$  dias, e fotoperíodo médio mensal  $N$ , há necessidade de se ajustar ETP<sub>p</sub> multiplicando-a por fatores de correções, isto é:

$$ETP = ETP_p \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad (6)$$

### Simplificação de Camargo

Para simplificar a utilização do método de Thornthwaite; Camargo (1971) elaborou-se uma tabela que forneceu a evapotranspiração potencial diária (ETT, mm d-1) em função das temperaturas médias anuais (Ta) e mensais (Tm), evitando-se os cálculos de  $I$  e  $a$ . Nessa tabela, foram obtidos o ETT = ETP/30; portanto, além da correção anterior (Cor) houve necessidade de se multiplicar o valor de ETT por 30 para se chegar ao valor de ETP mensal (Equação 9).

Como discutido na metodologia original de Thornthwaite, se a intenção for estimar ETP em base diária, ou de um período de ND dias, então, o fator 30 é simplesmente substituído por ND.

### **Método de Camargo**

O método proposto por Camargo (1971) é uma simplificação do método de Thorntwaite (1948), com uso apenas da temperatura média do ar e com a vantagem de não exigir dados normais de sua temperatura. A equação de cálculo é:

$$ETo = 0,01 \times Qo \times Tmed \times ND \quad (8)$$

Em que  $Qo$  é a irradiância solar extraterrestre expressa em mm de evaporação equivalente,  $Tmed$  a temperatura média do período considerado ( $^{\circ}$ C), e  $ND$  o número de dias do período considerado.

19

### **Método do Tanque Classe A**

O método do Tanque Classe A para estimativa da evapotranspiração de referência foi desenvolvido para se ter uma forma prática de estimativa de ETo, aplicada no manejo da irrigação. O tanque é de pequena dimensão, com as paredes laterais expostas diretamente à radiação solar, e a água no tanque não oferece impedimento ao processo evaporativo, estando sempre disponível, mesmo durante os períodos secos.

Portanto, o valor da evaporação obtido no tanque é superestimado em relação à perda efetiva de uma cultura, mesmo estando ela em condições ótimas de suprimento de água no solo. Logo, o valor diário do tanque (ECA, mm/dia) precisa ser corrigido por um fator de ajuste, denominado coeficiente de tanque (Kp), para se ter a ETo correspondente, ou seja :

$$ETo (TCA) = Kp \times Ev \quad (9)$$

Em que:  $K_p$  é o coeficiente de conversão da evapotranspiração do tanque “Classe A” em evapotranspiração de referência, que varia em função da velocidade do vento, da área de exposição vegetal relativa ao tanque e da umidade relativa do ar,  $E_v$  é a lâmina da evaporação do tanque “Classe A” (mm.d-1).

Esse método é um dos recomendados pela FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994), sendo  $K_p$  fornecido através de tabelas específicas. O valor de  $K_p$ , sempre será menor que 1 em função da velocidade do vento e da umidade relativa do ar (adveção de calor sensível), e do tamanho da bordadura, vegetada ou não, circunvizinha ao tanque. Para facilitar a interpolação dos valores de  $K_p$  e a determinação da ETP em sistemas informatizados, Snyder (1992) obteve a seguinte equação de regressão linear múltipla (Equação 12).

$$K_p = 0,108 - 0,0286 U^2 + 0,0422 \ln(B) + 0,1434 \ln(UR_{med})$$

$$(0,000631[\ln(B)]^2 \ln(UR_{med}))$$

(10) 20

Em que:  $B$  é a bordadura (em metros);  $U$  a velocidade do vento (km d-1); e  $UR$  a umidade relativa média diária, em %. É comum a adoção de um valor fixo de  $K_p$  quando dados de  $UR$  e  $U$  não são disponíveis. Nesse caso, resultados experimentais mostram que  $K_p = 0,72$  é o valor que proporciona menores erros para condições de clima úmido, como observado em Piracicaba - SP por Sentelhas et al., (1999).

### Método de Hargreaves e Samani

Este método foi desenvolvido por Hargreaves; Samani (1985) para as condições semi-áridas da Califórnia (*Davis*) a partir de evapotranspiração obtida em lisímetro de pesagem cultivado com grama (Equação 13).

$$ET_{ref} = 0,0023 \cdot R_t \times \sqrt{T_{max} - T_{min}} \times (T + 17,8) \quad (11)$$

Em que:  $ET_{ref}$  (HS) é a evapotranspiração de referência (mm d-1) estimada pelo método de Hargreaves; Samani (1985);  $R_t$  é a radiação solar extraterrestre (mm d-1).  $T_{max}$  a temperatura máxima do ar ( $^{\circ}C$ );  $T_{min}$  a temperatura mínima do ar ( $^{\circ}C$ ); no período considerado. Esse método é semelhante ao proposto por Camargo (1971).

### Método de Priestley-Taylor

Se no local houver medida do saldo de radiação ( $R_n$ ), pode-se utilizar a fórmula de Priestley; Taylor (1972) para estimar a ETP (mm d-1), ou seja,  $ETP = 1,26 W (R_n - G) / 2,45$  em que:  $R_n$  é a radiação líquida total diária (MJ m-2 d-1);  $G$  é o fluxo total diário de calor no solo (MJ m-2 d-1); a constante 2,45 (MJ L-1) converte a estimativa para  $mm$ ;  $W$  é um fator de ponderação dependente da temperatura e do coeficiente psicrométrico, sendo calculado pelas seguintes equações (PEREIRA et al., 1997):

$$EtoPT = \frac{a \times g (R_n - g)}{1} \quad (12)$$

Em que:  $a$  é o parâmetro de Priestley; Taylor,  $W$  é o fator de ponderação, obtido pela equação 28,  $R_n$  é saldo de radiação, obtido pela equação 17,  $g$  é a densidade do fluxo de calor no solo, e  $l$  é o calor latente (2,45 MJ.kg-1).

21

No caso de  $G$  não ser medido (situação mais comum), adota-se uma fração de  $R_n$  como representativa desse fluxo, ou seja,  $G = f R_n$ , sendo  $0 \leq f \leq 0,1$  para gramado (condição de ETP). É comum adotar-se  $f = 0$ , mas Wright e Jensen (1972) propuseram que  $G$  seja calculado em função da temperatura do ar pela equação:  $g = 0,38 (T_d - T_{-3d})$  em que:  $T_d$  é a temperatura média do ar do dia em questão, e  $T_{-3d}$  é a temperatura média do ar dos 3 dias anteriores.

No caso de estimativas mensais, admitindo-se variação da temperatura até a profundidade de 1 m para efeito de armazenamento de calor no solo, a equação será:

$$G = 0,14 (T_m - (T_{-m})) \quad (13)$$

Em que:  $T_m$  é a temperatura média do ar do mês, e  $T_{-m}$  é a temperatura média do ar do mês anterior.

### Método de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991)

Este é um método micrometeorológico, descrito por Monteith (1965), que foi adaptado por Allen et al., (1989) para estimativa da evapotranspiração de referência na escala diária. Atualmente, este é o método padrão da FAO (Allen et al., 1998), sendo ETP (mm d-1) dada pela seguinte fórmula :

$$EToPMF = \frac{0,408 \frac{(Rn - G) + \gamma^{900} u_2 (es - ea)}{T + 273}}{+Y(1 + 0,34U2)} \quad (14)$$

Em que: Rn é a radiação líquida total diária (MJ m-2 d-1); G é o fluxo de calor no solo (MJ m-2 d-1, as mesmas considerações sobre G feitas no método anterior são também válidas aqui);  $\gamma = 0,063$  kPa oC-1 é a constante psicrométrica; T é a temperatura média do ar (oC); U2 é a velocidade do vento a 2m (m s-1), sendo cerca de 75% do valor da velocidade medida a 10m de altura em posto meteorológico; e s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e a é a pressão parcial de vapor (kPa); e es é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, em kPa oC-1, sendo dado por (Equação 17).

$$es = \frac{es(T_{max}) + es(T_{min})}{2} \quad (15)$$

22

### Equação de Garcia-Lopez

Esta fórmula é baseada na influência do déficit de saturação e da temperatura na evapotranspiração. Foi desenvolvida utilizando dados de estações meteorológicas tropicais, localizadas entre as latitudes de 15°N e 15°S (LOBATO; LOBATO, 1979). A equação delimitada por Garcia-Lopez correlaciona-se a (Equação 18):

$$ETp = 1,21 \cdot 10x (1 - 0,01 \cdot UR) + 0,21 \cdot T - 2,30 \quad (16)$$

Onde,

ETp = evapotranspiração potencial (mm/dia);

T = temperatura média mensal do ar (°C);

UR = umidade relativa média mensal (%).

$$X = (7,45 \cdot T) / (234,7 + T)$$

### Equação de Jensen-Haise

A equação de Jensen-Haise (1963) segundo Medeiros (2008), foi uma equação desenvolvida para regiões áridas e semiáridas, o que explica sua boa adaptabilidade para o período seco, onde obteve desempenho ótimo, ao contrário do período úmido quando obteve

apenas desempenho mediano. A equação delimitada por Jensen-Haise correlaciona-se a (Equação 18):

$$ETp = (0,078 + 0,0252 \cdot T) RS \quad (17)$$

Onde,

ETp = evapotranspiração potencial (mm/dia);

T = temperatura média mensal do ar (°C);

RS = radiação solar global (mm/dia).

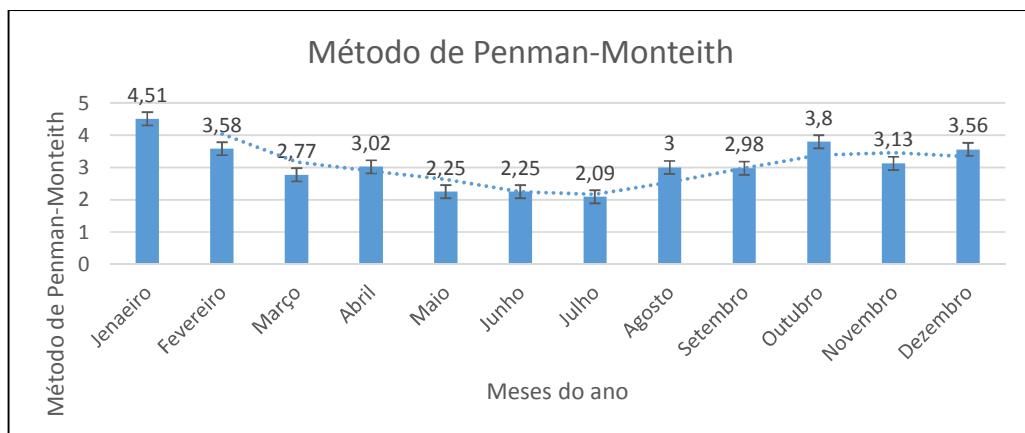
## Resultados

Os resultados obtidos de temperatura, umidade, precipitação, vento e radiação solar, pelo método Penman-Monteith sofreram variações no decorrer do ano, que estão ligadas principalmente as estações do ano, nos meses de maio, junho, julho e agosto. Para a precipitação média e vento foram obtidas as menores médias do ano por causa da diminuição do regime de chuvas no estado de São Paulo.

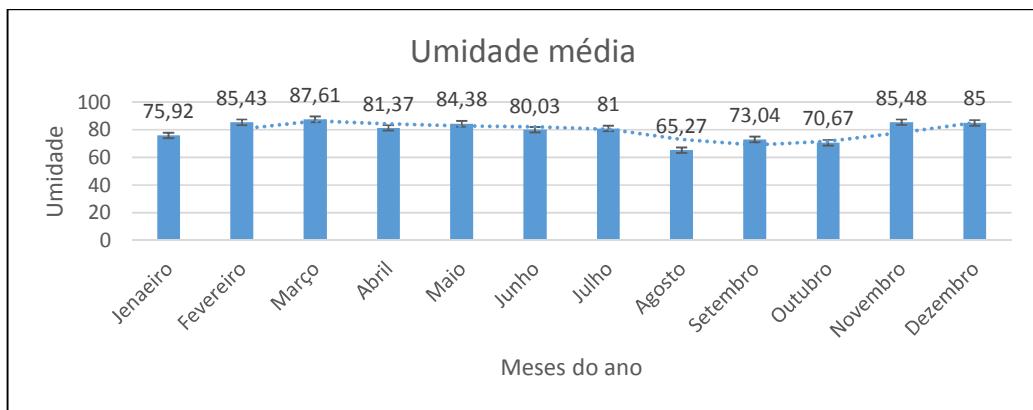
No ano de 2015, o estado de São Paulo declarou estado de crise hídrica de rios e mananciais com níveis de água abaixo da média. Além disso. O método padrão físico de Penman-Monteith mostra a média de evapotranspiração no determinado período de tempo. Nos meses de maio, junho e julho a média foi menor devido à pouca precipitação, radiação solar e temperatura abaixo da média (Figuras 1 a 6).

23

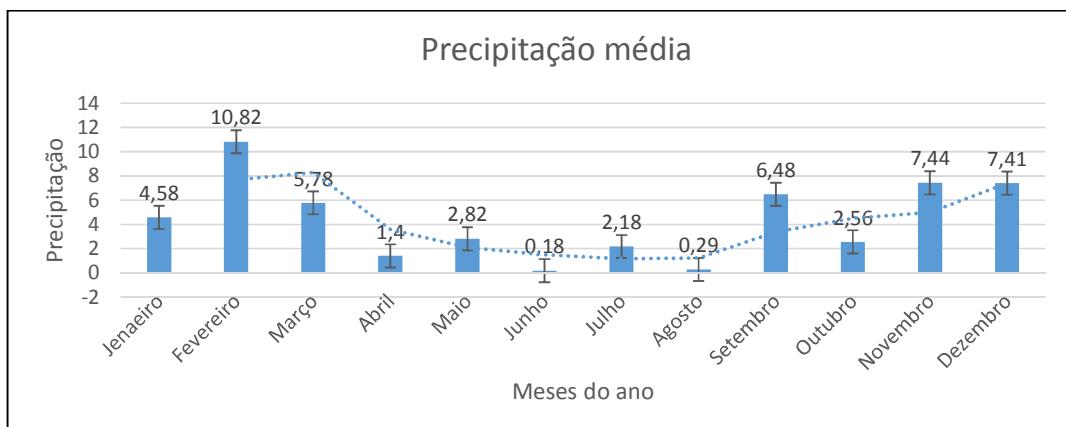
Med. = média; Max. = máxima; Mín. = mínima; Prec. = precipitação média (mm)



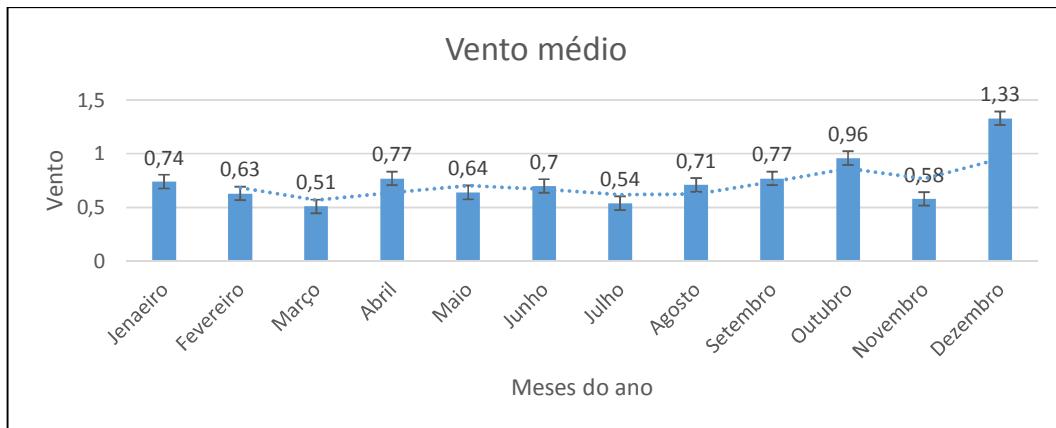
**Figura 1.** Dados de evapotranspiração relacionados ao método de Penman-Monteith entre janeiro e dezembro de 2015.



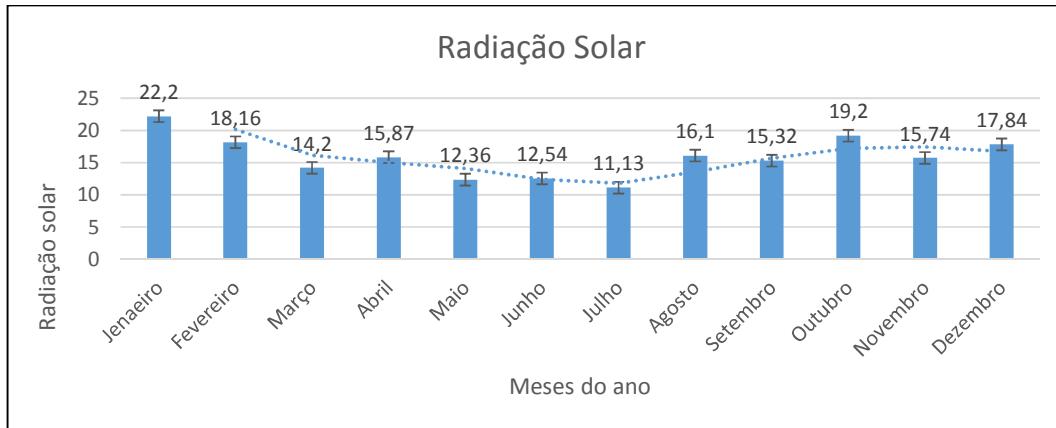
**Figura 2.** Dados da umidade relativa média entre janeiro e dezembro de 2015.



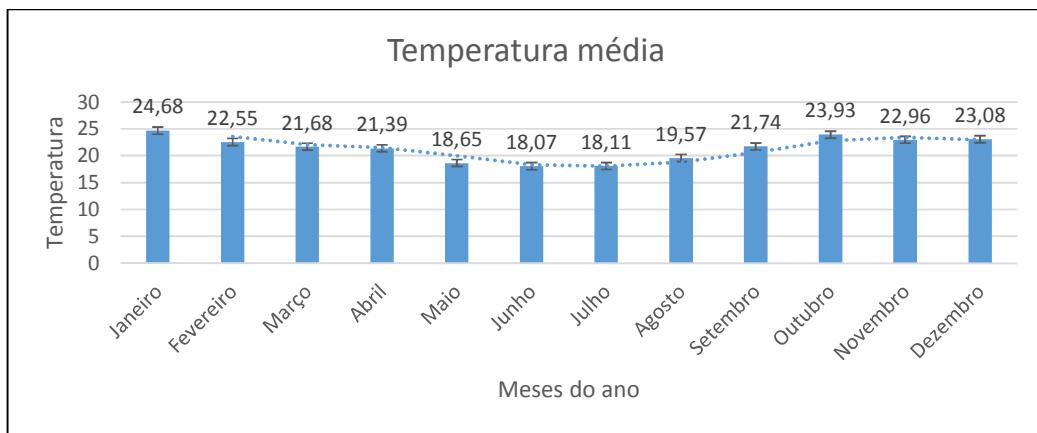
**Figura 3.** Dados da precipitação pluviométrica (mm) entre janeiro e dezembro de 2015



**Figura 4.** Dados da velocidade do vento entre janeiro e dezembro de 2015.

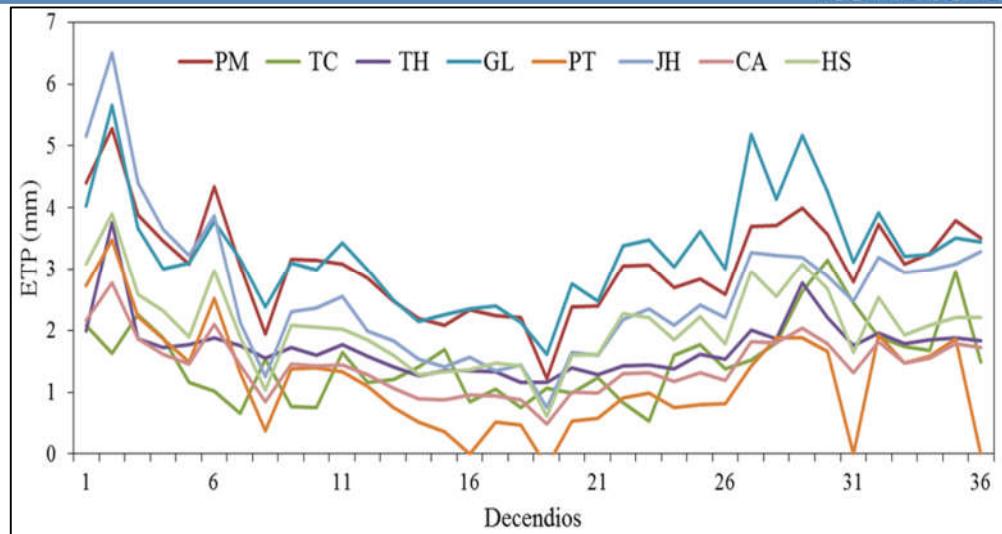


**Figura 5.** Dados da radiação solar entre janeiro e dezembro de 2015.



**Figura 6.** Dados da temperatura média entre janeiro e dezembro de 2015.

Todos os métodos acompanharam a evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO, 1998) (Figura 7). O que mais se aproximou foi o de García Lopez, sendo que os demais métodos subestimaram Penman-Monteith, destacando-se o de Priestley e Taylor.



**Figura 7.** Evapotranspiração estimada pelos métodos Penman Monteith (PM), Tanque Classe A (TC), Thornthwaite (TH), García – Lopez (GL), Priestley e Taylor (PT), Jesen-Haise (JH), Camargo (CA) e Hegreaves e Samani (HS) em escala decendial.

26

A evapotranspiração acumulada no ano de 2015 foi de aproximadamente 116mm, e a média de  $3,07\text{mm}^{-1}$  por dia, de acordo com a estimativa de Penman-Monteith. A estimativa de acordo com García Lopez a média foi de  $3,27\text{ mm dia}^{-1}$  e um acumulado de 117 mm, confirmando que foi o método que mais se aproximou (Tabela 3). Resultado semelhante foi encontrado por Gardiman Junior et al.. (2012), em que estes autores verificaram que o modelo de García Lopez apresentou melhor índice de desempenho, e que Priestley e Taylor foi inferior aos demais.

**Tabela 3.** Evapotranspiração de referência média e desvio padrão estimados pelos métodos utilizados.

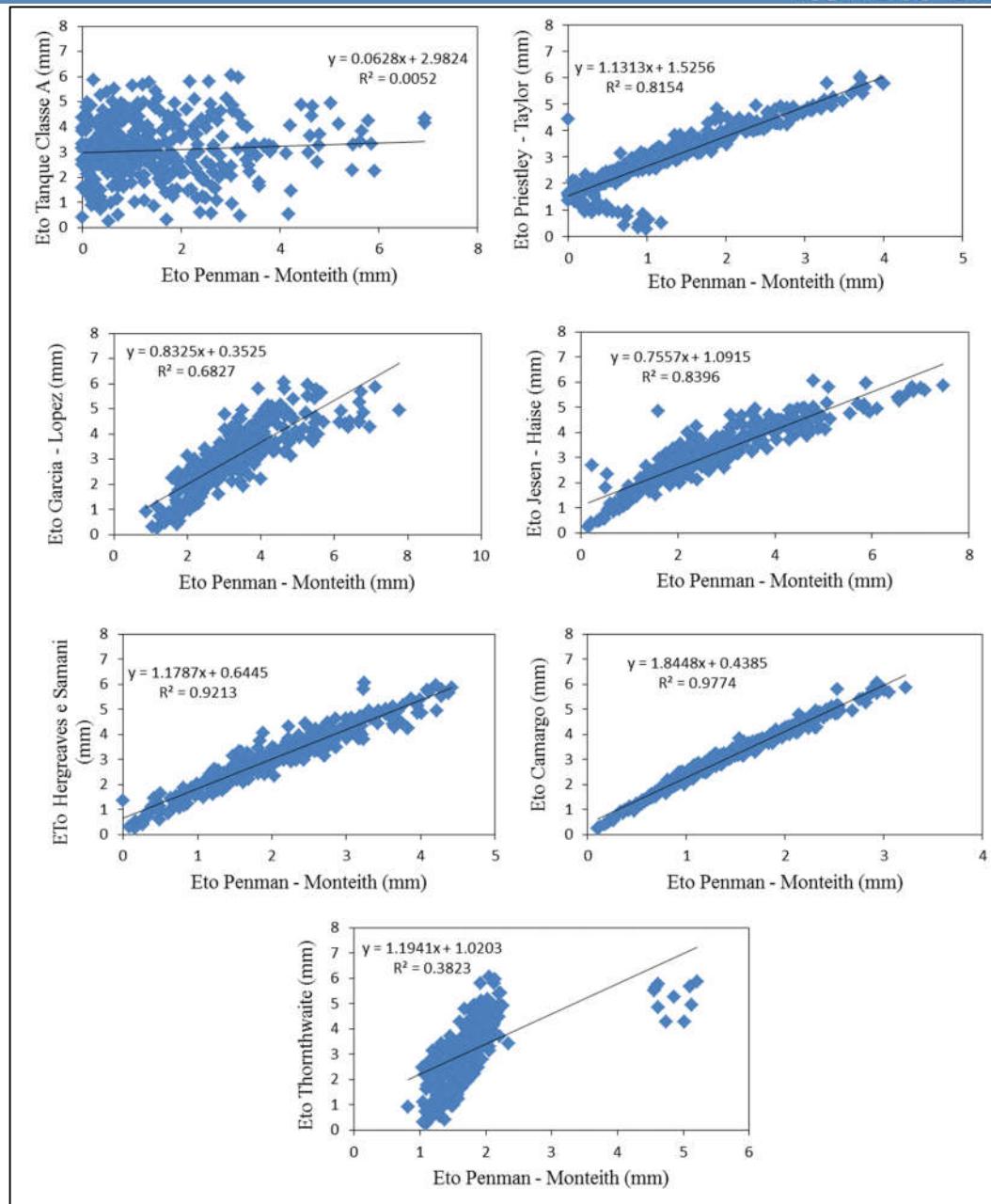
	Eto acumulada (mm)	Eto média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Penma-Monteith	110.60	3.07	$\pm 0.80$
Tanque Classe A	54.20	1.51	$\pm 0.63$
Thornthwaite	61.96	1.72	$\pm 0.47$
Gárcia e Lopez	117.70	3.27	$\pm 0.88$
Priestley e Taylor	46.54	1.29	$\pm 0.77$

Jesen-Haise	94.30	2.62	$\pm 1.52$
Camargo	51.38	1.43	$\pm 0.46$
Hegreaves e Samani	74.23	2.06	$\pm 0.65$

De acordo com Silva et al., (2011), os métodos de Thornthwaite e Camargo, na maioria das medidas, subestimaram tais valores, o mesmo observado por Araujo et al., (2007). O mesmo ocorreu para este estudo, onde a maioria dos métodos subestimaram Peman – Monteith. O maior desvio padrão ( $\pm 1.52$ ) em relação a média foi obtido no modelo de Jesen-Haise, e o menor ( $\pm 0.46$ ) no modelo de Camargo.

A maioria dos métodos de estimativa de produtividade foram satisfatórios levando em consideração os valores de Evapotranspiração de referência estimados por Penman Moteith, em que, somente o Tanque Classe A e Thornthwaite obtiveram valores de  $R^2$  inferiores. Vescove; Turco (2005), também não obtiveram boa correlação do método de Thornthwaite com o de Penman-Monteith para a região de São Carlos (SP), evidenciando o baixo ajuste para tais métodos.

O método que obteve maior  $R^2$  foi o de Camargo, com 0,97, fato este que pode ser justificado pelo uso de valores de radiação no topo da atmosfera (Figura 8).



**Figura 8.** Desempenho dos modelos de estimativa de evapotranspiração de referência em relação ao modelo de Penman-Monteith.

Para Pereira et al., (2002), normalmente métodos empíricos como os de Camargo, estimam bem a ETP na escala mensal pois métodos que utilizam saldo de radiação apresentam boas estimativas. Era esperado que o método de Thornthwaite também obtivesse uma precisão

elevada, visto que, este leva em consideração vários parâmetros climáticos. Diante disto, novos trabalhos devem ser realizados com um período de dados maior.

O método de García Lopez é um dos mais simples, pois os dados de entrada são somente temperatura e umidade relativa do ar, e este obteve uma precisão satisfatória, com um  $R^2$  de aproximadamente 0,70. Resultados semelhantes foram encontrados por Fernandez; Gondim (1980) e Gardiman Junior et al., (2012).

## Conclusões

O modelo mais indicado para a região de São Carlos (SP) é o de Camargo, porém outros modelos mais simples também podem ser utilizados, uma vez que, apresentam boa precisão como é o caso de García Lopez. Os métodos de Tanque Classe A e Thornthwaite não são indicados para a região de São Carlos, SP, pois não apresentaram resultados satisfatórios e semelhantes aos demais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) processo 2700324 e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo 2015/19918-3, pelo apoio financeiro a pesquisa.

## Referências

- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimate of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, n.81, p.650-662, 1989.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998, 301p.
- ARAÚJO, W. F; COSTA, S. A. A; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da Evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) para Boa Vista, PR. *Revista Caatinga*, v.20, n.4, p.84-88, 2007.
- BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre Equações Empíricas para Estimativa da Evapotranspiração de Referência na Bacia Rio Jacupiranga/SP. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa - PB. *Anais*. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre - RS: ABRH, 2005.

CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Boletim Técnico n. 116, 1971, IAC. 24p.

CAMARGO, A. P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo.** Instituto Agronómico]. Campinas. BR. 1966. 54 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARMO, R. L.; OJIMA, A. L. R. O; OJIMA, R.; NASCIMENTO, T. T. Água virtual: o Brasil como grande exportador de recursos hídricos. In: **Anais**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11, 2005, João Pessoa. João Pessoa, 2005. CD-ROM.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **Revista Item**, v.49, p.8-13, 2001.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem n.33, 1994. 306p.

30

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; CECILIO, R. A. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referencia (Eto) para Linhares, Es. **Nucleus**, v.9, n.2, p.103-112, 2012.

GONDIM, A.; FERNANDEZ, B. Probabilidade de chuvas para o município de Areia-PB. **Agropecuária Técnica**. v.1, p.55-63,1980.

HARGREAVES, G. H., SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Transaction of ASAE**, v.1, p.96-99,1985.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. **Estimating evapotranspiration from solar radiation.** Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE, New York, v. 4, n. 1, p. 15-41, 1963.

LOBATO, O.J. da S.; LOBATO, E.J.V. Considerações sobre a evapotranspiração potencial medida e calculada no município de Goiânia e circunvizinhos. **Anais**. Escola de Agronomia e Veterinária, Goiânia, v.9, n.1, p.50-73, 1979.

MANTOVANI, E. C. **Dessarollo y evaluacion de modelos para el manejo del riego: estimacion de la evapotranspiracion y efectos de la uniformidade de aplicacion del Riego sobre la producion de los cultivos.** 190f.1993. Tesis (doctorale) Universidad Cordoba, Cordoba, España,1993.

MEDEIROS, P. V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de nove equações empíricas- teóricas com base na equação de Penman-Monteith.** 2008. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo.

MONTEITH, J. L. Evaporation and Environment." In: The state and movement of water in living organism. 19th Symp. **Soc. Exptl. Biol.** p.205-234,1965.

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

PEREIRA, A. R; ANGELOCCI, L. R; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas. Guaíba: **Agropecuária**, 2002, 478p.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. **On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters.** Monthly Weather Review, v. 100,p.81-82,1972.

SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWART, S. BHBRAZIL - Balanços Hídricos Climatológicos de 500 Localidades Brasileiras. Piracicaba: Departamento de Ciências Exatas, **ESALQ/USP**. CD-ROM. 1999.

31

SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, E. F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. **BioScience Journal**, v.27, n.1, p.95-101, 2011.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, p.977-980, 1992.

SOARES, A. K.; OHNUMA JR, A. A.; BORGES, A. C.; PAGNOSSI, A. A.; ANGELOTTI NETTO, A.; CORRÊA FILHO, C. R. R.; BRITO, C. M. S.; VELA, F. J.; LIMA, G.; BENINI, R. M.; MENDIONDO, E. M. Análise do balanço hídrico serial na bacia da represa do Broa, SP. In: **Anais. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 15, 2003, Curitiba: ABRH, 2003.

THORNTHWAITE, C. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94, 1948.

VEPRASKAS, M. J.; HUFFMAN, R. L.; KREISER, G. S. **Hydrologic models for altered landscapes.** **Geoderma**, v. 131, n. 3, p. 287-298, 2006.

VESCOVE, H. V; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara – SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.25, n.3, p.713-721, 2005.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v.5, p.589-606, 1985.

WRIGHT, J. L.; JENSEN, M. E. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. **Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE**, New York, v.96, n.1, p.193- 201, 1972.