

ISSN 0104-1347

## Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

### Evaluation and performance of three reference methods to estimate evapotranspiration

Ronalton Evandro Machado<sup>2</sup> e Arthur Mattos<sup>3</sup>

**Resumo** - O trabalho avaliou o desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) com os dados obtidos em lisímetro de lençol freático constante. Os dados foram coletados diariamente e processados em médias decendiais e comparados com três métodos de estimativa da E<sub>to</sub> que foram: Penman, Tanque Classe A e Tanque de 20m<sup>2</sup>. O desempenho dos métodos foi analisado a partir do coeficiente de correlação "r" e do índice de concordância de Willmott "d". Os resultados mostraram que a melhor estimativa foi obtida com o método de Penman, devido ao seu melhor ajuste aos dados lisimétricos, apresentando uma concordância muito boa, com o índice "d" igual a 0,91.

**Palavras-chave** : evapotranspiração de referência, índice de concordância "d", lisímetro, métodos de estimativa.

**Abstract** - The performance of three-reference methods for estimating evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) was evaluate through correlation with data obtained in constant water table lysimeter. The data were daily collected and processed in a ten days average. The performance evaluation of the methods were based on the correlation coefficient "r" and Willmott' agreement coefficient "d". The results showed that the best estimate was obtained with the Penman method, which its shows the best adjustment to lysimeter data, with the index "d" equal for 0.91.

**Key words**: agreement index "d", estimate methods, lysimeter, potential evapotranspiration.

#### Introdução

A Evapotranspiração é uma das principais variáveis do ciclo hidrológico. A taxa de evapotranspiração refere-se ao total da perda de água para a atmosfera, da superfície do solo e das plantas pela combinação simultânea da evaporação com a transpiração (SEDIYAMA, 1998).

Visando padronizar a definição de evapotranspiração dada por diversos autores entre eles THORNTHWAITE (1948) e PENMAN (1948), surgiu a necessidade de se definir a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência (ET<sub>o</sub>). Esta,

segundo SMITH (1991), é a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura de 12cm, resistência aerodinâmica da superfície de 70s.m<sup>-1</sup> e albedo de 0,23. Segundo SEDIYAMA (1996), essa evapotranspiração de referência assemelha-se, bem de perto, a evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

BURMAN et al. (1983), revisaram vários métodos de determinação da evapotranspiração, adotados em diversas partes do mundo. Estes autores classificaram os métodos em dois grandes grupos : o

<sup>1</sup>Parte da dissertação de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à EESC/USP.

<sup>2</sup>Eng° Agric., MSc., Doutorando, DER/ESALQ/USP, caixa postal 09, Piracicaba/SP. CEP: 13418-900. E-mail : [remachad@carpa.ciaagri.usp.br](mailto:remachad@carpa.ciaagri.usp.br)

<sup>3</sup>Livre Docente em Recursos Hídricos pela EESC-USP. Bolsista DCR-CNPQ na UFRN. E-mail : [armattos@ct.ufrn.br](mailto:armattos@ct.ufrn.br)

primeiro grupo inclui os métodos onde a evapotranspiração potencial pode ser determinada a partir de medidas diretas como os lisímetros, balanço hídrico e controle de umidade no solo. No segundo grupo estão os métodos determinados através de dados climáticos, também chamados de métodos indiretos, nos quais a evaporação ou a evapotranspiração de referência são avaliadas por fórmulas empíricas e racionais e posteriormente, são correlacionadas com a evapotranspiração da cultura por meio de coeficientes de proporcionalidade, tais como coeficiente do tanque classe "A" ( $K_p$ ) e coeficiente de cultura ( $K_c$ ). Segundo ALLEN et al. (1989), existe uma relação entre a  $E_{To}$  medida em lisímetros e a estimada pelos diferentes métodos existentes, especialmente, àquelas provenientes dos métodos combinados, como o de Penman e o Tanque Classe "A".

Muitos trabalhos como os de STANHILL (1961), CAMARGO (1962), HASHEMI & HABIBIAN (1979) e mais recentemente de SORIANO & PEREIRA (1993) e SANTOS et al. (1994), em diferentes partes do mundo, vem avaliando o desempenho dos diferentes métodos de estimativa da  $E_{To}$  (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). As conclusões variam muito segundo cada autor, o que dificulta ao usuário decidir sobre a conveniência de qual método adotar (PEREIRA et al., 1996).

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Penman, Tanque Classe "A" e Tanque 20 m<sup>2</sup>) por meio de correlação com dados obtidos em um lisímetro com lençol freático constante.

## Material e métodos

A área onde foi conduzido o experimento localiza-se na Estação Hidrometeorológica do CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-SP (latitude: 22°11'S, longitude: 47°58'W e altitude: 733m). A área experimental foi de 10.000m<sup>2</sup>, coberta com grama batatais (*Paspalum notatum* L.), onde estavam instalados os equipamentos para coleta de dados hidrometeorológicos. O clima da região de acordo com a classificação de Wilhem Köppen é Cwa, clima temperado, devido à altitude, com inverno seco, apresentando pouca deficiência de água segundo balanço hídrico normal climático mensal.

Os dados meteorológicos utilizados no experimento para a estimativa da evapotranspiração de referência foram os seguintes : evaporação do tanque

Classe "A", temperatura máxima do ar ( $T_{max}$ ), temperatura mínima do ar ( $T_{min}$ ), temperatura do bulbo seco ( $T_s$ ), temperatura do bulbo úmido ( $T_u$ ), velocidade média do vento a 2 m de altura ( $V_2$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ), radiação Solar global na superfície ( $Q_0$ ), insolação ou horas de brilho solar ( $n$ ) e a insolação máxima ( $N$ ) obtida por tabela.

A evapotranspiração foi estimada pela equação proposta por PENMAN (1948):

$$E_{ToPn} = [(\Delta/g).H + Re_a].[(\Delta/g) + 1]^{-1} \quad (1)$$

onde:  $E_{ToPn}$  é a evapotranspiração de referência para a grama em mm/dia;  $\Delta$  a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água à temperatura média do ar em mmHg/°C;  $\gamma$  a constante psicométrica, em mmHg/°C;  $\Delta/\gamma$  é tabelado em função da temperatura;  $H$  a radiação global líquida estimada, em mm/dia;  $Re_a$  o poder evaporante do ar atmosférico, função da velocidade do vento medido a 2m de altura em m.s<sup>-1</sup> ( $U_2$ ) e do déficit de saturação de umidade do ar, em mm.dia<sup>-1</sup> (es tensão de saturação e ea a tensão atual, sendo  $Re_a = 0,35.(1+0,54.U_2).(es-ea)$ )

O cálculo de  $E_{ToPn}$  é feito pela substituição dos valores de  $H$ ,  $Re_a$ ,  $\Delta$  e  $\gamma$  na equação de Penman.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados coletados no tanque Classe "A", utilizou-se a seguinte expressão (DOORENBOS e PRUITT, 1975):

$$E_{ToA} = K_p . ECA \quad (2)$$

onde:  $E_{ToA}$  é a evapotranspiração de referência para a grama do Tanque Classe "A", em mm.dia<sup>-1</sup>;  $K_p$  o coeficiente para conversão da evaporação do Tanque Classe "A" em evapotranspiração de referência, em função da velocidade do vento, da área de exposição vegetal relativa ao tanque e da umidade relativa do ar;  $ECA$  a evaporação do tanque Classe "A", em mm.dia<sup>-1</sup>.

Construiu-se um tanque cilíndrico, com base plana, feito em chapa metálica de 4-5mm, com diâmetro de 5m (área superficial de 20m<sup>2</sup>) e profundidade de 2m. O tanque foi instalado ao nível do solo, deixando-se uma borda de 7,5cm. O nível da água foi mantido aproximadamente no mesmo nível do solo. As leituras foram feitas em poço tranquilizador que se comunicava com a água do tanque por meio de um tubo de ¾ de diâmetro, cuja extremidade localizou-se no fundo do tanque para minimizar a agitação da água pelos ventos (GANGOPADHYAYA et al., 1971).

O lisímetro de lençol freático constante foi desenvolvido no CRHEA. Esse tipo de lisímetro tem

sido bastante utilizado devido à sua boa precisão e a facilidade em variar a profundidade do nível d'água em seu interior. Consistiu de um tanque metálico, com dimensões de 1,5 por 2,4m e 1,5m de profundidade, tendo uma área de exposição de 3,6m<sup>2</sup> cultivado com grama, fabricado com chapa de ferro, reforçado internamente por cantoneiras. O lisímetro foi impermeabilizado para evitar vazamento.

O nível do lençol freático foi mantido constante, aproximadamente a 0,80m da superfície do solo. Adotou-se esta profundidade, com a finalidade de diminuir o efeito causado pela não irrigação da área que circunda o lisímetro. Diariamente, em torno das 7 horas, eram feitas as leituras do total evapotranspirado.

A análise dos dados foi desenvolvida pela comparação dos três métodos de estimativa de ETo (Penman, Tanque Classe "A" e tanque de 20m<sup>2</sup>) com o método de medida direta utilizando o lisímetro. Os dados foram obtidos em base diária, período de fevereiro a junho de 1994, e posteriormente processados em termos quinquidiais (5 dias) e decenciais (10 dias), visto que o lisímetro utilizado não possuía sensibilidade suficiente para trabalhar com dados diários. Essa comparação foi feita por meio dos coeficientes de correlação (r) das análises de regressão linear para estabelecer o nível de significância pelo teste "t", traçando-se uma reta teórica que representa a correlação perfeita entre os valores, conhecida com reta 1:1 (um para um) ou de 45°. Quanto menor a dispersão dos pontos ao redor da reta 1:1, melhor é a previsibilidade do modelo. Entretanto, r não deve ser utilizado individualmente em uma análise de desempenho, devido ao fato de que r, muitas vezes, não está relacionado com o tamanho da diferença entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida diferentes do padrão (WILLMOTT & WICKS, 1980). Para se quantificar a homogeneidade da dispersão em relação à reta 1:1 empregou-se o teste de concordância de WILLMOTT (1981) :

$$D = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (3)$$

onde P<sub>i</sub> é o valor estimado; O<sub>i</sub> o valor observado e O a média dos valores observados. A faixa de valores do índice "D" varia entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita.

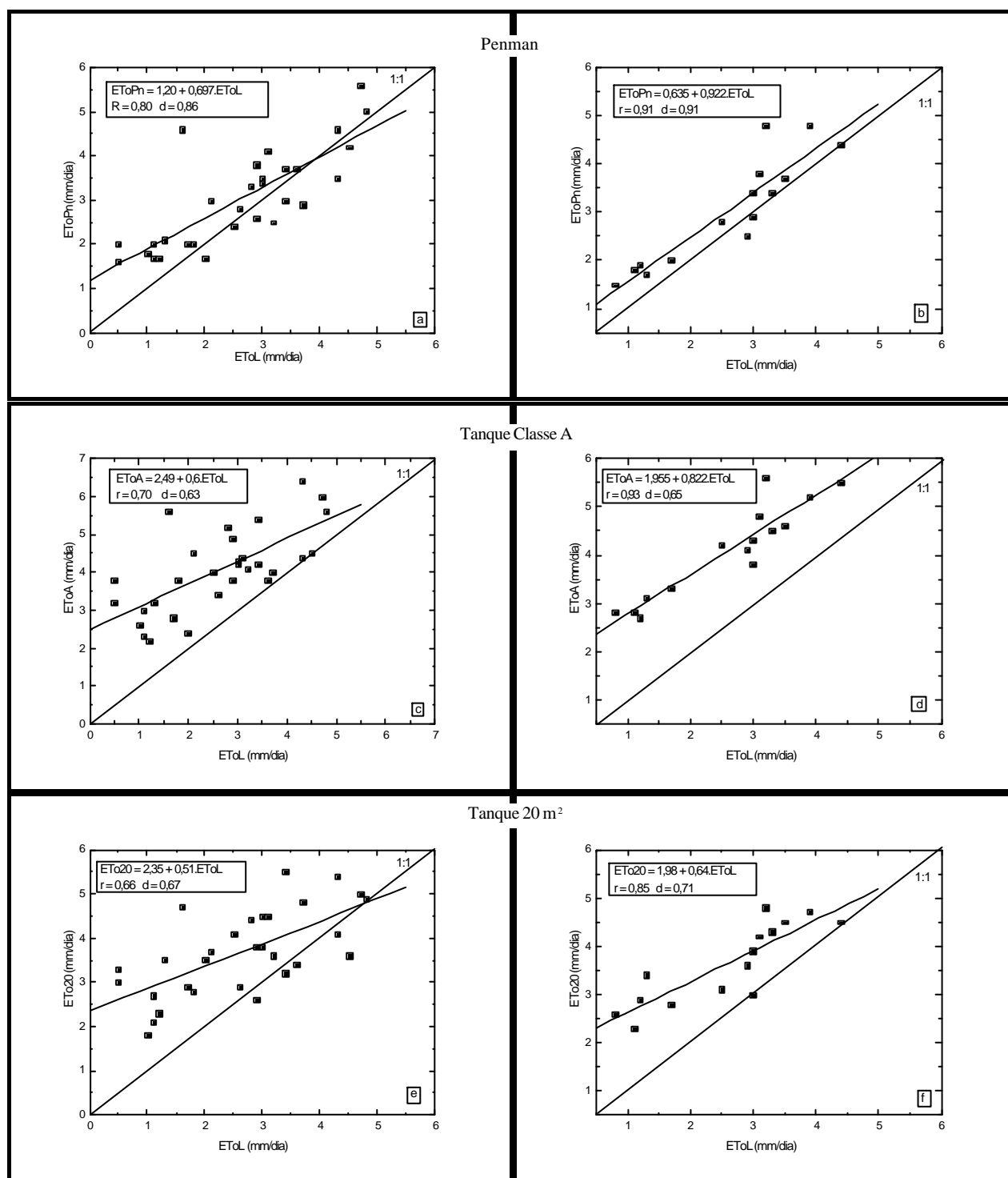
## Resultados e discussão

A Figura 1 mostra as análises de regressão entre os dados de ETo estimados e medidos, respectiva-

mente, a nível quinquidial e decencial, incluindo os coeficientes da regressão, de correlação (r) e de concordância (d).

Em nível quinquidial, o valor para o coeficiente de correlação foi estatisticamente significativo ao nível de 1% para os três métodos de estimativa. Observa-se que nessa escala, somente o método de Penman teve um bom desempenho, tanto a precisão como a exatidão das estimativas foi boa, ao redor de 0,80, confirmando uma melhor concordância entre os valores medidos e estimados onde a linha representativa da equação de regressão para esta variável, foi a que mais se aproximou da respectiva reta 1:1, apesar do método de Penman ter superestimado a evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro em torno de 15%. Estes dados concordam com JENSEN et al. (1990) que, comparando os dados de ETo medidos em lisímetros de precisão, instalados em onze diferentes locais (oito nos Estados Unidos, um na Austrália, um no Zaire e um na Dinamarca) com os dados determinados utilizando vinte métodos de estimativa, constataram uma superestimativa para o método de Penman na faixa de 15 a 20%, para as regiões consideradas úmidas. Os métodos do tanque classe "A" e tanque de 20m<sup>2</sup>, tiveram uma grande dispersão em relação à reta 1:1, não apresentando um desempenho satisfatório.

Utilizando-se de uma periodicidade decencial, com base de cálculos para valores médios, obteve-se uma melhora tanto na precisão quanto na exatidão. Para o método de Penman, ambos apresentaram o valor de 0,91, tendo um desempenho muito bom. A linha representativa da equação de regressão para esta variável teve um bom ajuste à reta 1:1 (Figura 1b). O tanque classe "A" também teve uma melhora significativa no seu desempenho. A sua precisão representada pelo índice "r" foi de 0,93, superior ao mesmo índice para o método de Penman (0,91), o que normalmente ocorre com o aumento do intervalo das estimativas (SANTOS, et al., 1994). Isso em parte pode ser explicado analisando a Figura (1d). Apesar do maior afastamento em relação à reta 1:1 comparado com o método de Penman, os resíduos, que são a diferença entre os valores observados e os valores ajustados por meio da regressão linear, foram menores para o método do tanque classe "A". SEDIYAMA et al. (1973), estudando vários modelos de estimativa de ETo nas condições de Viçosa/MG, e comparando os valores estimados com os medidos em evapotranspirômetro, concluíram que para as informações decenciais e mensais, os melhores métodos foram, pela ordem, o tanque classe "A" (r=0,95), Penman (r=0,94) e Thornthwaite (r=0,92), entre outros estudados, sem levar em consideração na sua análise outros índices. Isso justifica a recomendação de não se utilizar o índice "r" individualmente em uma análise de



**Figura 1.** Representação gráfica da análise de regressão da ETo estimada pelos métodos de Penman, Tanque Classe “A” e Tanque 20 m<sup>2</sup>, e a ETo medida no lisímetro, a nível quinquidial (a, c, e) e decennial (b, d, f).

performance para não se cometer possíveis erros de avaliação. O método do tanque de 20 m<sup>2</sup>, teve uma melhora, com o índice “d” superando ao do tanque classe “A”. Esse método não é muito utilizado devido a dificuldades de instalação e manutenção. As principais vantagens conferidas a esse tipo de tanque são suas características de radiação e aerodinâmica próximas as das superfícies de água.

Os resultados obtidos não atenderam a premissa básica de DOORENBOS & PRUITT (1975), de que, diferentes métodos de estimativa de ETo devem ter resultados semelhantes. Essa diferença pode ser explicada pelo uso de coeficientes do tanque (Kp), não representativos para as condições locais. PEREIRA et al. (1995), apontam que a estimativa do Kp, seguindo as recomendações de DOORENBOS &

PRUITT (1975), podem levar a estimativas incorretas de ETo, e sugerem outro modelo de estimativa de Kp.

## Conclusão

A melhor estimativa dentre os três métodos de determinação da evapotranspiração (Penman, **Tanque Classe A e Tanque de 20m**) é obtida com o método de Penman, devido ao seu melhor ajuste aos dados lisimétricos, apresentando um desempenho muito bom pelo índice "d".

## Referências bibliográficas

- ALLEN, R.G., NSEN, M.E., WRIGHT, J.L. et al. Operational estimates of reference evaporation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.
- BURMAN, R.D., NIXON, P.R., WRIGHT, J.L. et al. O. Water Requiriments. IN : JENSEN, M. E. ed. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph : ASAE, 1983. cap. 6, p. 189-232.
- CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 63-213, 1962.
- CAMARGO, A.P., SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- DOORENBOS, J., FRUITT, W.D. **Guidelines for predicting crop water requeriments**. Rome : FAO, 1975. 179 p.(Irrigation and Drainage Paper, 24).
- GANGOPADHYAYA, M., HARBECK, G.E., NORDENSON, T.J. et al. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Geneva : World Meteorological Organization, 1971. 121 p.
- HASHEMI, F., HABIBIAN, M.T. Limitations of temperature - based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural development projects. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 20, p. 237-247. 1979.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., ALLEN, R.G. **Evapotranspirations and irrigation water requirements**. New York : ASCE, 1990. p. 1-332.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from water, bare soil and grass. **Proc. Roy. Soc. A.**, London, v. 193, p. 120-143, 1948.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A., PEREIRA, A.S et al. Model for the class a Pan coeficient. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 76, p. 75-88, 1995.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N. A., SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba : DFM/ESALQ/USP. Apostila, 1996. 70 p.
- SANTOS, O.A., BERGAMASCHI, H., CUNHA, G.R. Avaliação de métodos para a estimativa da evapotranspiração máxima da alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 37-42, 1994.
- SEDIYAMA, G.C., NBERNARDO, S., RESENDE, M. et al. Estudos de métodos para a estimativa de evapotranspiração potencial em Viçosa. **Experientiae**, Viçosa, v. 16, n. 4, p. 61-79, 1973.
- SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1. p. i-xii, 1996.
- SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidades de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF : ABES, 1998, 181 p. (Curso de especialização por tutoria à distância).
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome : FAO. 1991. 45 p.
- SORIANO, B.M.A., PEREIRA, A.R. Estimativa da evapotranspiração de referência para a sub-região Nhecolândia, pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, V. 1, n. 1, p. 123-129, 1993.
- STANHILL, G. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. **Israel Journal Agricultural Resseract**, Tel-Aviv, v. 11, p. 159-171, 1961.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.
- WILLMOTT, C.J., WICKS, D.E. An empirical method for the spacial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, v. 1, p. 59-73, 1980