

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE  
REFERÊNCIA NA REGIÃO DO ALTO PANTANAL DE MATO  
GROSSO DO SUL, EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO**

**EVERTON ROSSI RIGONI**

**DOURADOS**  
**MATO GROSSO DO SUL**

**2012**

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE  
REFERÊNCIA NA REGIÃO DO ALTO PANTANAL DE MATO  
GROSSO DO SUL, EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO**

**EVERTON ROSSI RIGONI**  
Engenheiro Agrônomo

**ORIENTADOR: PROF. Dr. GUILHERME AUGUSTO BISCARO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

**DOURADOS**  
**MATO GROSSO DO SUL**  
**2012**

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE  
REFERÊNCIA NA REGIÃO DO ALTO PANTANAL DE MATO  
GROSSO DO SUL, EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO**

por

Everton Rossi Rigoni

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título  
de MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Guilherme Augusto Biscaro  
Orientador – FCA – UFGD

---

Prof. Dr. Eder Pereira Gomes  
Membro Adjunto – FCA – UFGD

---

Prof. Dr. Paula Pinheiro Padovese Peixoto  
Membro Adjunto – FCA – UFGD

---

Prof. Dr. Laercio Alves de Carvalho  
Membro Adjunto – UEMS

---

Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff  
Membro Adjunto – FCA – UFGD

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais Edson Cláudio Rigoni e Marilúcia Rossi  
Rigoni e a minha irmã Mariellen Rossi Rigoni.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, sabedoria, força e coragem em todos os momentos difíceis;

Aos meus pais e familiares, pelo incentivo, credibilidade, motivação, cumplicidade, paciência e amor;

Ao professor Guilherme Augusto Biscaro, pela orientação na condução do trabalho, pela sua disponibilidade, interesse, incentivo e principalmente amizade;

Aos professores e colegas do curso de Mestrado em Agronomia pelo incentivo, companheirismo e ensinamentos;

Aos meus amigos Gabriel Queiroz de Oliveira, Marcos Vinnícius Braga Machado de Queiroz pela ajuda na execução dos trabalhos e principalmente pelo companheirismo e fiel amizade;

A minha namorada Camila Nunes Duarte pelo carinho, incentivo e principalmente pela força em todos os momentos;

À Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de aprendizagem;

Ao CNPq pelo suporte financeiro;

Por fim, a todos que, de alguma forma, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO.</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>5</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>33</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>33</b>

## DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA REGIÃO DO ALTO PANTANAL DE MATO GROSSO DO SUL, EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO

**RESUMO.** O objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração de referência avaliando-se a precisão dos métodos empíricos Benevides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hamon (HA), Hargreaves-Samani (HS), Klarrufa (KF), Jesen-Haise (JH), Makkink (MK), Priestley-Taylor (PT), Radiação solar (RS) e Turc (TR), comparando com o método de Penman-Monteith FAO-56, em diferentes estações do ano na região do Alto Pantanal de Mato Grosso do Sul. O presente trabalho foi realizado com auxílio dos dados meteorológicos obtidos entre o período de 01 de janeiro de 2008 a 31 dezembro de 2011 na rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situado no município de Aquidauana-MS. Foram avaliados valores diários da estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), em mm dia<sup>-1</sup>, para os períodos Verão (21 de Dezembro a 20 de Março), Outono (21 de Março a 20 de Junho), Inverno (21 de Junho a 22 de setembro) e Primavera (23 de setembro a 20 de Dezembro), utilizando-se métodos empíricos e o de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO no qual serviu de modelo de comparação. Foram determinados e considerados na avaliação dos métodos a média da ET<sub>o</sub> (mm dia<sup>-1</sup>), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), correlação ( $r$ ) e de erro de estimativa padrão (EEP). Para a avaliação da exatidão dos métodos avaliados, foram determinados o índice de concordância ( $d$ ) e o índice de desempenho ( $c$ ). Todos os métodos de estimativa de ET<sub>o</sub>, que não utilizam radiação solar, apresentaram “ $c$ ” abaixo de 0,65, portanto, seu uso não é recomendado para a região do Alto Pantanal na estação de verão. Entre os métodos que utilizam a radiação solar somente os métodos de PT e RS apresentaram índice satisfatório para seu uso na estação de verão, sendo classificados como “Ótimo” e “Muito bom” respectivamente. Para a estação Inverno, entre os métodos que não utilizam radiação solar destaca-se o HS, por atingir índice de desempenho satisfatório (0,69) para o seu uso sendo, classificado como “Bom”. Os métodos que utilizam radiação solar JH, PT e RS são classificados como “Bom, Muito bom e Bom”, respectivamente. O método de estimativa que melhor representou na estação de outono é o PT seguido de RS e JH, no qual são classificados como “Ótimo” e “Bom” respectivamente. Entre os métodos que não utilizam radiação solar, o método de HS é o único que obteve o índice “ $c$ ” (0,760) suficiente para ser aplicado às condições da estação de outono no Alto Pantanal, sendo classificado como “Bom”. Para a estação primavera, os métodos de JH, MK, PT e RS, podem ser utilizados na região do Alto Pantanal para estimar a ET<sub>o</sub>, sendo classificados como “Bom, Bom, Ótimo e Muito bom” respectivamente.

**Palavras-chave:** Penman-Monteith; métodos empíricos, radiação solar, temperatura.

## **DETERMINATION OF EVAPOTRANSPIRATION REFERENCE IN THE REGION OF ALTO PANTANAL OF MATO GROSSO DO SUL STATE, BRAZIL IN DIFFERENT SEASONS**

**ABSTRACT.** The aim of this study was to determine the reference evapotranspiration by assessing the accuracy of empirical methods Benevides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hamon (HA), Hargreaves-Samani (HS), Klarrufa (KF), Jesen-Haise (JH), Makkink (MK), Priestley-Taylor (PT), Solar radiation (SR) e Turc (TR), comparing with the Penman-Monteith FAO-56 in different seasons in the Alto Pantanal of Mato Grosso do Sul State. The present study was made using meteorological data obtained between the period January 01, 2008 at December 31, 2011 in station at the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), located in the city of Aquidauana-MS, Brazil. Were evaluated daily values of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in mm day<sup>-1</sup> for the summer period (December 21 to March 20), autumn (March 21 to June 20), winter (June 21 to September 22) and spring (September 23 to December 20), using empirical methods and Penman-Monteith, parameterized by FAO in which he served as a model for comparison. Were determined and considered in the evaluation of methods the average ET<sub>o</sub> (mm day<sup>-1</sup>), the coefficient of determination ( $r^2$ ), correlation (r) and standard error of estimate (EEP). To evaluate the accuracy of the methods evaluated were determined the level of agreement (d), and the performance index (c). All methods of ET<sub>o</sub> estimation, which does not use radiation, presented “c” below 0.65, so its use is not recommended for the Alto Pantanal in summer season. Among the methods that use solar radiation only the methods of PT and SR indices were satisfactory for use in the summer season, being classified as “excellent” and “Very Good” respectively. For the winter season, between methods that do not use sunlight HS stands out for achieving satisfactory performance index (0.69) for its use being classified as “Good”. The methods that use global solar radiation JH, PT and SR are classified as “Good, Very Good and Good” respectively. The estimation method that best represented in the autumn season is the PT followed by RS and JH, which are classified as “excellent” and “Good” respectively. Among the methods that do not use solar radiation, the HS method is the one who got the index “c” (0.760) sufficient to apply the conditions of the autumn season in Alto Pantanal, being classified as “Good”. For the season spring, methods JH, MK, PT and SR can be used in the Alto Pantanal to estimate ET<sub>o</sub>, being classified as “Good, Good, Great and Good” respectively.

**Keywords:** Penman-Monteith, empirical methods, solar radiation, temperature.



## 1. INTRODUÇÃO

O Alto Pantanal faz parte da bacia hidrográfica do Rio Paraguai, cobrindo cerca de 600.000 km<sup>2</sup>, com 362.376 km<sup>2</sup> no Brasil, englobando 4,3% do território nacional, que detém considerável importância no contexto estratégico de recursos de gestão de água para o país, sendo um das maiores áreas alagadas do mundo, com 147.574 km<sup>2</sup>, constituindo uma ligação entre os Cerrados no Brasil (GONÇALVES et al., 2011).

Para o correto manejo de irrigação, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é importante, pois sua quantificação auxilia pesquisadores e profissionais na execução de projetos agrícolas e ambientais que maximizam a sustentabilidade nesta região.

A evapotranspiração é uma fração do ramo superficial ascendente do ciclo hidrológico, forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor, sendo a resposta aos processos evaporativos do solo (nu ou vegetado) juntamente com o respiratório dos vegetais, tendo papel importantíssimo no ciclo hidrológico em termos globais (SILVA e SOUZA, 2011). Dentre os vários tipos de evapotranspiração, destaca-se a ET<sub>o</sub> por permitir e facilitar a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>). A evapotranspiração de referência é uma variável relevante para o planejamento de irrigação, além de fácil obtenção por ser afetada apenas pelos fatores climáticos (SOUSA et al., 2010).

Evapotranspiração foi o termo usado por Thornthwaite, em 1940, para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração em uma superfície vegetada (PEREIRA et al., 1997).

Na agricultura, informações quantitativas da evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem (HENRIQUE e DANTAS, 2007). Assim, as informações sobre a ET<sub>o</sub>, que levam a estimativas da ET<sub>c</sub>, tornam-se ferramentas importantes no manejo da irrigação (ARAÚJO et al., 2007).

O Boletim nº 56 de Allen et al. (1998) da Food and Agricultural Organization (FAO) define a ET<sub>o</sub> como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 70 s.m<sup>-1</sup>. A cultura hipotética está relacionada a uma

superfície gramada, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

Existem diversos métodos na literatura para se estimar a evapotranspiração de referência utilizando-se parâmetros climatológicos. Dentre eles, podem-se citar Penman-Monteith, Benevides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Klarrufa, Jesen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Radiação Solar, Turc e muitos outros. Esses métodos foram desenvolvidos nas mais diversas condições climáticas e de manejo de culturas.

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith (PM) como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

Diversos pesquisadores em todo o mundo propuseram modelos indiretos para a estimativa da ETo, com as mais diferentes concepções e número de variáveis envolvidas. Antes de se eleger o modelo a ser utilizado para a estimativa da ETo, é necessário saber quais os elementos climáticos disponíveis; a partir daí, verifica-se quais podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para certo local de interesse fica na dependência dessas variáveis (ARAÚJO et al., 2007).

Em análise quantitativa, a evapotranspiração tem sua determinação baseada em métodos diretos (lisímetros) e métodos indiretos. Os métodos mais empregados na estimativa da ETo são os indiretos e se baseiam em dados meteorológicos, muitas vezes não disponíveis próximo ao local de estudo. Os métodos diretos de estimativa, como os lisímetros de pesagem, que proporcionam resultados mais confiáveis, são utilizados apenas para finalidades científicas, tendo em vista a necessidade de implantação de uma estrutura física onerosa (CARVALHO et al., 2006).

Devido à dificuldade de se medir de forma direta a evapotranspiração, vários estudos já foram realizados para se estimar empiricamente esta variável meteorológica (MENDONÇA et al., 2003; ARAÚJO et al., 2007; HENRIQUE e DANTAS, 2007; SYPERRCK et al., 2008; LEMOS FILHO et al., 2010; MENDONÇA e DANTAS, 2010). As conclusões variam muito segundo cada autor, principalmente, pelas áreas de estudos serem climatologicamente diferentes. Desta forma, Pereira et al. (2009) recomendam que antes de aplicar um método para determinado local, é necessário verificar o desempenho deste e, quando necessário, fazer calibrações a fim de minimizar erros de estimativa. Sendo a equação Penman-Monteith FAO-56 a

referência padrão para esses ajustes. Essa aplicação deve ser feita para locais próximos que tenham medidas climáticas suficientes (SMITH, 1991).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi determinar a ETo, avaliando-se a precisão dos métodos empíricos que se baseia na ausência da radiação solar: Benevides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Klarrufa e os métodos que utilizam a radiação solar: Jesen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc, comparando com o método de Penman-Monteith FAO-56, em diferentes estações do ano na região do Alto Pantanal de Mato Grosso do Sul.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi realizado utilizando-se dados meteorológicos obtidos entre o período de 01 de janeiro de 2008 a 31 dezembro de 2011 na rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situado no município de Aquidauana-MS, as coordenadas geográficas são 20° 20' S, 55° 48' W e altitude de 155 m acima do nível mar, sendo que o seu território possui características dos biomas Cerrado e Pantanal. O clima da região é classificado, segundo KÖPPEN, como do tipo Aw, definido como clima tropical quente sub-úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno e precipitação pluviométrica anual média de 1200 mm. O período chuvoso se estende de outubro a março; entre abril e setembro, tem-se o período seco, com os menores índices de precipitação ocorrendo em julho a agosto.

Os elementos climáticos coletados, em períodos diários, foram a temperatura máxima e mínima do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa máxima e mínima, velocidade do vento a 2 m de altura e radiação solar global (TABELA 1).

TABELA 1. Valores médios mensais da temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura mínima do ar (Tmin), temperatura do ponto de orvalho máxima (T<sub>d</sub>max) e mínima (T<sub>d</sub>min), umidade relativa do ar máxima (URmax) e mínima (URmin), velocidade do vento a 2m de altura (U<sub>2</sub>) e radiação solar global (Rs) de janeiro de 2008 a dezembro de 2011, na região do Alto Pantanal, Aquidauana, MS.

Mês	Tmax	Tmin	T <sub>d</sub> max	T <sub>d</sub> min	URmax	URmin	U <sub>2</sub>	Rs
	°C				%		m s <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
JAN	32,33	22,69	24,75	20,01	93,35	55,84	1,47	21,94
FEV	33,32	23,09	24,79	20,05	92,78	52,92	1,41	23,65
MAR	33,61	22,25	24,42	19,09	92,92	48,95	1,22	23,33
ABR	32,74	19,37	22,06	15,57	91,31	43,13	1,25	20,09
MAI	28,91	16,31	19,75	13,50	93,11	48,68	1,26	16,67
JUN	28,21	15,11	18,98	12,39	91,97	46,53	1,24	14,18
JUL	29,91	15,15	18,26	10,58	88,27	38,61	1,36	17,18
AGO	31,76	16,01	17,98	10,27	83,89	33,97	1,50	17,28
SET	32,10	18,57	18,83	11,91	79,81	37,26	1,93	19,37
OUT	33,06	20,72	22,22	16,37	88,48	44,48	1,65	20,38
NOV	33,56	21,59	23,85	17,66	90,98	47,52	1,58	23,23
DEZ	33,99	22,96	24,20	18,74	90,14	49,62	1,55	25,66
Média	31,96	19,48	21,67	15,51	89,75	45,63	1,45	20,25

Foram avaliados valores diários da estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), em mm dia<sup>-1</sup>, para os períodos Verão (21 de Dezembro a 20 de Março), Outono (21 de Março a 20 de Junho), Inverno (21 de Junho a 22 de setembro) e Primavera (23 de setembro a 20 de Dezembro), utilizando-se métodos empíricos e o de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO, que serviu de modelo de comparação.

### Métodos empíricos utilizados

#### Método de Benevides-Lopez (BL)

O método que foi desenvolvido por Benevides e Lopez Diaz (1970), baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar, como mostra a equação 1.

$$ET_{o(BL)} = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 T}{237,5 + T}\right)} (1 - 0,01 UR) + 0,21 T - 2,30 \quad (1)$$

Em que,

ET<sub>o(BL)</sub> = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

T = temperatura média do ar, °C;

UR = umidade relativa do ar, %.

### **Método de Camargo (CM)**

Desenvolvido apresentando resultados satisfatórios em comparação aos valores medidos em evapotranspirômetros instalados no interior do Estado de São Paulo (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), cuja estimativa se dá utilizando a equação 2:

$$ET_{o(CM)} = F Ra T \quad (2)$$

Em que,

$ET_{o(CM)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

F = fator de ajuste que varia com “T” anual (0,0105);

Ra = radiação solar extraterrestre, mm dia<sup>-1</sup>;

T = temperatura média do ar, °C.

### **Método de Hamom (HA)**

A equação 3 representa o método de Hamom para o cálculo da estimativa da  $ET_o$  (PEREIRA et al., 1997).

$$ET_{o(HA)} = 0,55 \left( \frac{N}{12} \right)^2 \left( \frac{4,95 \exp^{0,062T}}{100} \right) 25,4 \quad (3)$$

Em que,

$ET_{o(HA)}$  = é a evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

N = insolação teórico do ano (4380 h);

T = temperatura média do ar, °C.

### Método de Hargreaves-Samani (HS)

Desenvolvido na Califórnia em condições semi-áridas, a partir de dados obtidos com lisímetros em vegetação gramada e descrito conforme a equação 4 (PEREIRA et al., 1997).

$$ET_{o(HS)} = 0,0135kt Ra (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8) \quad (4)$$

Em que,

$ET_{o(HS)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

kt = coeficiente empírico, empregado em regiões continentais (0,162);

Ra = radiação extraterrestre, mm dia<sup>-1</sup>;

T = temperatura média do ar, °C;

Tmax = temperatura máxima do ar, °C;

Tmin = temperatura mínima do ar, °C.

### Método Klarrufa (KF)

Elaborado por Klarrufa (1985) a partir da relação entre  $ET_o$  e a porcentagem de insolação máxima diária, conforme a equação 5:

$$ET_{o(KF)} = 0,34 p T^{1,3} \quad (5)$$

Em que,

$ET_{o(KF)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

p = porcentagem de insolação máxima diária (N) em relação ao horário de insolação teórico do ano (4380 h);

T = temperatura média do ar, °C.

### Método de Jensen-Haise (JH)

Para regiões áridas e semi-áridas, Jensen e Haise (1963) apresentaram a seguinte equação para o cálculo da evapotranspiração de referência (Equação 6):

$$ET_{o(JH)} = R_s(0,025T + 0,08) \quad (6)$$

Em que,

$ET_{o(JH)}$  = evapotranspiração de referencia, mm dia<sup>-1</sup>;

T = temperatura média do ar, °C;

$R_s$  = radiação solar global expressa em equivalente de evaporação de água, mm dia<sup>-1</sup>.

### Método de Makkink (MK)

A equação para estimativa da evapotranspiração de referência, a partir da medição da radiação solar, foi proposta também por Makkink (1957) e é representado pela equação 7:

$$ET_{o(MK)} = R_s \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) + 0,12 \quad (7)$$

Em que,

$ET_{o(MK)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

$R_s$  = radiação solar global, mm dia<sup>-1</sup>;

$\Delta$  = declinação da curva de saturação da pressão de vapor de água, kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma$  = constante psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>.

### Método de Priestley-Taylor (PT)

Utilizado na estimativa da  $ET_o$ , constitui-se numa aproximação do método de Penman. Nesta equação, permanece apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico, conhecido como parâmetro de Priestley e Taylor, o qual incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo

aerodinâmico. Priestley e Taylor (1972) mostraram que este coeficiente apresenta média de 1,26 em condições mínimas de advecção regional, sendo a ETo obtida pela equação 8:

$$ETo_{(PT)} = \alpha \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (Rn - G) \quad (8)$$

Em que,

$ETo_{(PT)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

$\alpha$  = parâmetro de Priestley-Taylor (1,26);

Rn = saldo de radiação expresso em equivalente de evaporação de água, mm dia<sup>-1</sup>;

G = fluxo de calor do solo, mm dia<sup>-1</sup>.

### **Método da Radiação Solar (RS)**

Utiliza um fator de correção (fr) que depende da velocidade do vento e da umidade relativa do ar, cuja estimativa se dá utilizando a equação 9 (PEREIRA et al., 1997).

$$ETo_{(RS)} = fr \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) Rs \quad (9)$$

Em que,

$ETo_{(RS)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

Rs = radiação solar global, mm dia<sup>-1</sup>;

$\Delta$  = declinação da curva de saturação da pressão de vapor de água, kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma$  = constante psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>.

fr = fator de correção calculado através da equação 10 (FREVERT et al., 1983).

$$Fr = 1,066 - (1,28 \cdot 10^{-3} UR) + (4,5 \cdot 10^{-2} U_2) - (2 \cdot 10^{-4} UR U_2) + [3,15 \cdot 10^{-5} (UR)^2] - [1,103 \cdot 10^{-3} (U_2)^2] \quad (10)$$



### Método de Turc (TR)

O método de Turc (1961) foi desenvolvido para o Oeste europeu, onde a umidade relativa do ar é maior que 50%, e tem sido aplicado em diferentes regiões, cuja estimativa se dá utilizando a equação 11:

$$ET_{O(TR)} = a_t 0,013 \left( \frac{T}{T + 15} \right) (R_s 41,867982 + 50) \quad (11)$$

Em que,

$a_t$  = coeficiente de ajuste que tem como base a umidade relativa do ar (UR), quando a média diária de UR é maior ou igual a 50%, sendo descrita nas condições da equação 12 e 13:

$$a_t = 1 + \left( \frac{50 - UR}{70} \right), \text{ se } UR < 50 \quad (12)$$

$$a_t = 1, \text{ se } UR > 50 \quad (13)$$

$ET_{O(TR)}$  = evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;

$R_s$  = radiação solar global, mm dia<sup>-1</sup>;

$T$  = temperatura média do ar, °C;

### Método de comparação

#### Método de Penman-Montheith FAO-56 (PM)

Recomendado pela FAO e considera a resistência estomática de 70 s.m<sup>-1</sup>, a altura da grama fixada em 0,12 m e albedo de 23%, cuja estimativa se dá utilizando a equação 14 (ALLEN et al., 1998):

$$ET_{O(PM)} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{900 U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (14)$$

Em que,

$ET_{O(PM)}$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$R_n$  = saldo de radiação,  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ;

$G$  = fluxo de calor no solo,  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ;

$\Delta$  = declinação da curva de saturação do vapor da água,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$U_2$  = velocidade média do vento a 2 m acima da superfície do solo,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$T$  = temperatura média do ar,  $^\circ\text{C}$ ;

$e_s$  = pressão de saturação de vapor,  $\text{kPa}$ ;

$e_a$  = pressão atual de vapor,  $\text{kPa}$ ;

$\gamma$  = constante psicrométrica,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Os valores estimados da  $ET_o$  diária para cada um dos 10 métodos foram comparados com os valores de  $ET_o$  obtidos pelo método Penman-Monteith (FAO-56). Os indicadores estatísticos utilizados para a avaliação da precisão dos modelos foram a análise de regressão linear para determinação dos coeficientes da equação ( $Y = a + bx$ ) e do coeficiente de determinação e correlação ( $r^2$  e  $r$  respectivamente) (Equação 15 e 16). Para a exatidão dos métodos de  $k_p$  foi realizada a análise para a determinação do índice de concordância de Willmott (1981) ( $d$ ) (Equação 17) e índice de desempenho ( $c$ ) (Equação 18), que corresponde o produto do “ $r$ ” pelo “ $d$ ” e interpretados conforme Camargo & Sentelhas (1997). O EEP (erro de estimativa padrão) foi calculado de acordo com a equação 19.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - O)^2} \quad (15)$$

$$r = \sqrt{r^2} \quad (16)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (17)$$

$$c = r d \quad (18)$$

Em que,

Pi = corresponde aos valores estimados pelos métodos;

Oi = valores observados pelo método de Penman-Monteith;

O = média dos valores observados pelo método de Penman-Monteith.

$$EEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (19)$$

Em que,

EEP = Estimativa do erro padrão, em mm dia<sup>-1</sup>;

Oi = valores estimados pelo método padrão, Penman-Monteith, em mm dia<sup>-1</sup>;

Pi = corresponde aos valores estimados pelos métodos, em mm dia<sup>-1</sup>;

n = número de observações.

O índice de desempenho “c” (Tabela 2) foi interpretado e distribuído nas seguintes classes conforme Camargo e Sentelhas (1997).

TABELA 2. Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo pelo índice “c” de Camargo & Sentelhas (1997).

<b>Valor de “c”</b>	<b>Desempenho</b>
> 0,85	Ótimo
0,76 < c < 0,85	Muito Bom
0,66 < c < 0,75	Bom
0,61 < c < 0,65	Mediano
0,51 < c < 0,60	Sofrível
0,41 < c < 0,50	Mau
< 0,40	Péssimo

A indicação dos métodos de estimativa da ETo para a região do Alto Pantanal, foram segundo os critérios propostos por Camargo e Sentelhas (1997), sendo considerados os melhores métodos, estes com índice de desempenho “c” superiores a 0,65 (Tabela 2). Os cálculos estatísticos foram realizados com o auxílio do software Microsoft Office Excel®.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Evapotranspiração de referência no verão

Na Figura 1 encontra-se os valores diários da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculados pelos métodos de Penman-Monteith, Benevides-Lopes, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Klarrufa, Jensen-Haise, Makink, Priestley-Taylor, Radiação solar e Turc, no período de verão. Verifica-se que todos os métodos baseados em radiação solar estão acima do método de Penman-Monteith.

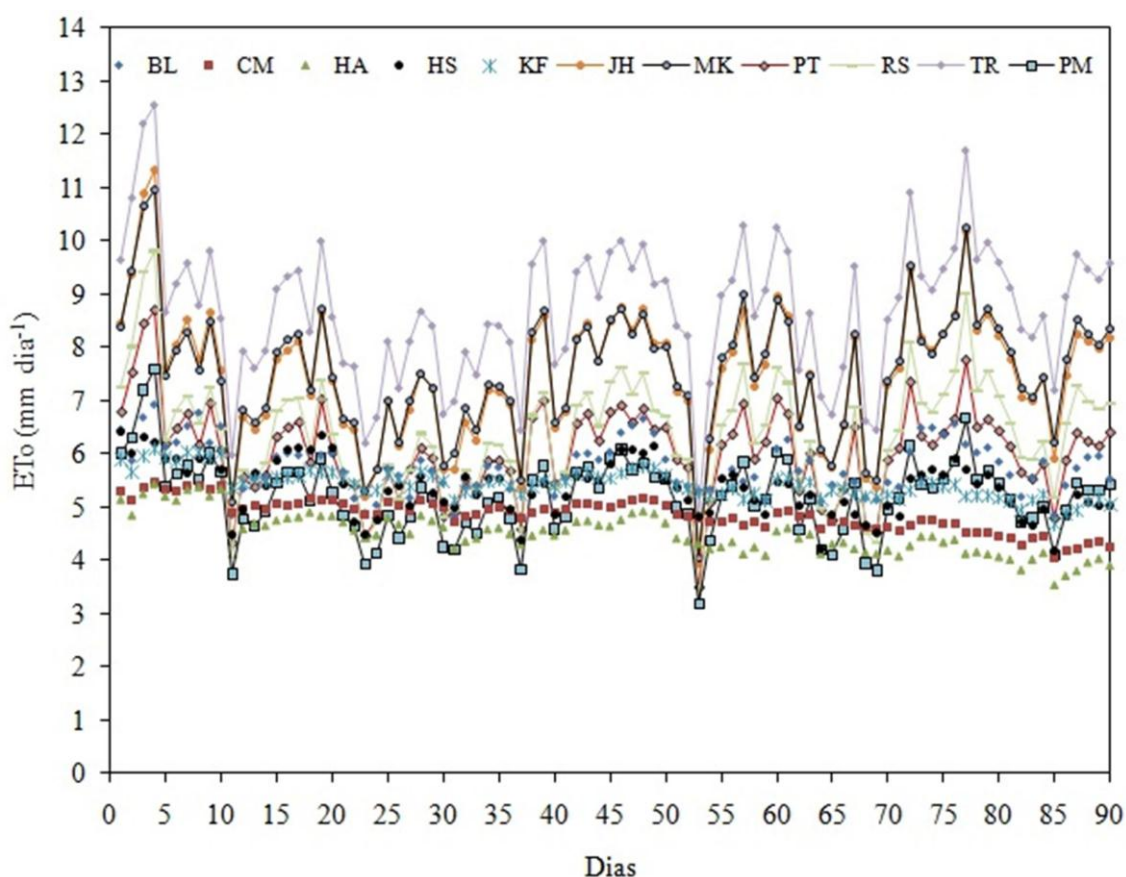


FIGURA 1. Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculados pelos métodos de Penman-Monteith (PM), Benevides-Lopes (BL), Camargo (CM), Hamon (HA), Hargreaves-Samani (HS), Klarrufa (KF), Jensen-Haise (JH), Makink (MK), Priestley-Taylor (PT), Radiação solar (RS) e Turc (TR), no verão do Alto Pantanal, MS.

Na Figura 2, encontra-se as correlações entre a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) estimado pelo método de Penman-Monteith e os métodos de Benevides-Lopes, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Klarrufa, Jensen-Haise, Makink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc, no período de verão.

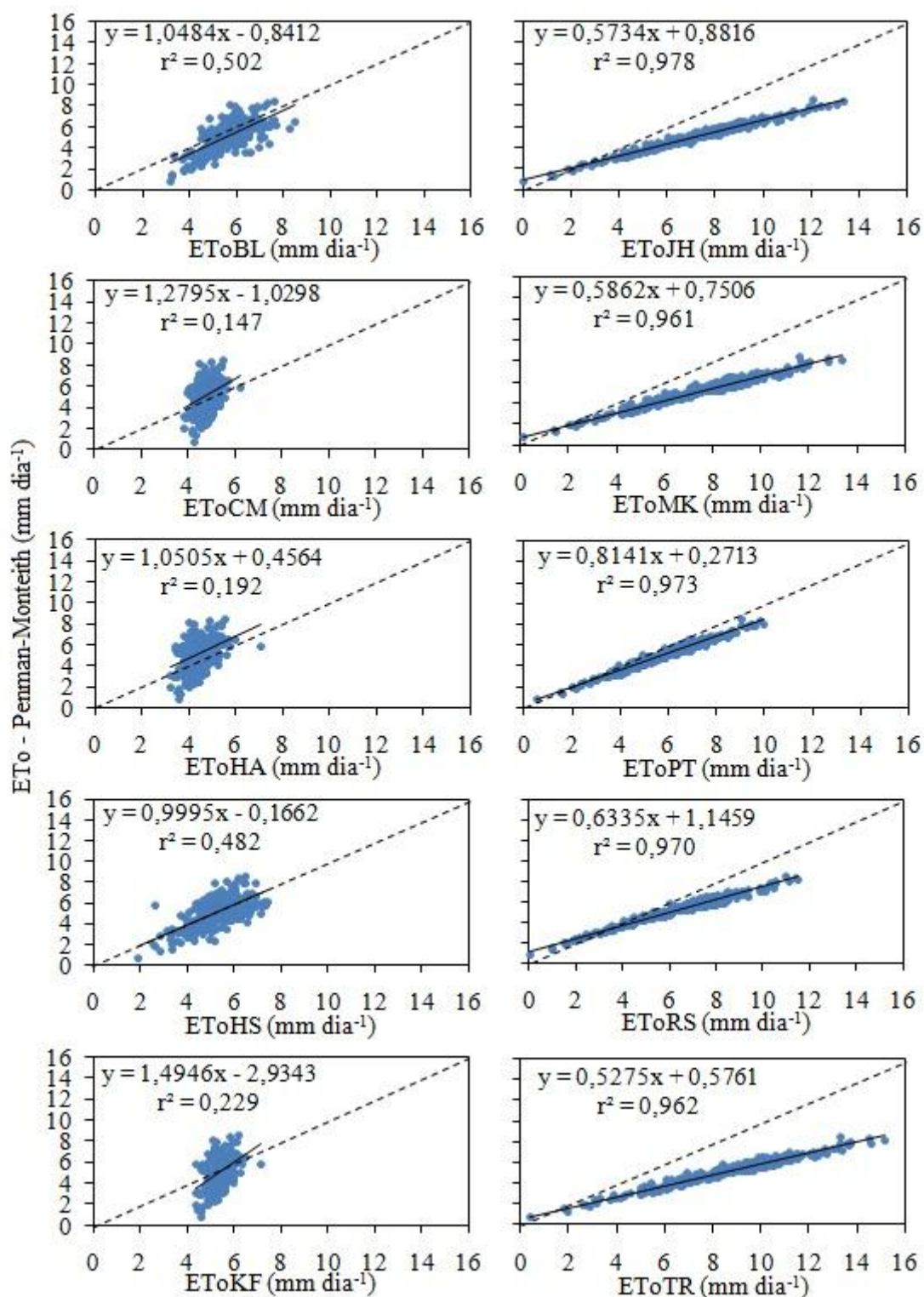


FIGURA 2. Correlação entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelos métodos de Penman-Monteith e os métodos empíricos, no verão da região do Alto Pantanal, MS. BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc). A linha tracejada indica a reta 1:1.

Verifica-se que os métodos não baseados em radiação solar apresentaram baixo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) com coeficientes angulares (b) próximo de 1, com exceção do método Klarrufa que através da equação de regressão, apresenta tendência em subestimar a ETo em 49,5%. Como o período de verão no Alto Pantanal é caracterizado por grandes variações de nebulosidade e chuvas, esses fatores climáticos contribuem para a irregularidade da temperatura do ar e umidade relativa do ar, que podem em determinado período do dia oscilar bruscamente.

Para os métodos que tem como base de entrada a temperatura do ar, os melhores  $r^2$  neste período foram encontrados pelos métodos de Benevides-Lopes e Hargreaves-Samani que obtiveram  $r^2$  de 0,502 e 0,482 aproximadamente (Figura 2). Talvez esses métodos apresentam maior precisão em relação aos demais métodos, por apresentarem na sua equação outros parâmetros climáticos como por exemplo, umidade relativa, temperatura máxima e mínima e média do ar, que para efeito, minimizaram o efeito da dispersão da ETo no verão quando comparados com as ETo do método de Penman-Monteith, que apresenta um complexo conjunto de elementos climáticos.

Os métodos que apresentam o elemento radiação solar como base no método de estimativa de ETo obtiveram  $r^2$  bastante altos (Figura 2), o que indica alta precisão do modelo de regressão. Os seus altos valores de  $r^2$  estão diretamente ligados ao uso do parâmetro de radiação solar no método, que é o componente que mais está associado ao fenômeno de evaporação da água. No entanto verifica-se que o coeficiente angular encontra valores afastados de 1. Os métodos Jensen-Haise, Makink, Priestley-Taylor, Radiação solar e Turc obtiveram “b” na ordem de 0,573; 0,586; 0,814; 0,634 e 0,528 respectivamente (Figura 2). De maneira geral, com exceção do método de PT os demais métodos estão superestimando a ETo de Penman-Monteith em 40%.

O método de Priestley-Taylor apresentou ótimo comportamento por apresentar no seu método o uso da radiação líquida, que é a diferença entre o fluxo de energia de ondas curtas provenientes do sol com a radiação de ondas longas emitidas pela superfície terrestre.

No município de Pesqueira em Pernambuco, Silva e Souza (2011) verificaram que os métodos de Priestley-Taylor e Jensen-Haise, no verão, ajustaram-se com  $r^2$  de 0,94 e 0,90 respectivamente, apesar de superestimarem os valores em relação ao método de Penman-Monteith.

No entanto, a adoção do  $r^2$  como critério de definição da qualidade de métodos não é adequada, uma vez que esse método não estabelece o tipo e a magnitude

das diferenças entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida diferentes do padrão (BARROS et al., 2009). O índice de concordância (d) observado na reta pontilhada das Figuras 2, 5, 8 e 11, expressa uma medida de exatidão do modelo, o coeficiente de correlação (r), que expressa uma medida da precisão do modelo, e o índice “c”, que expressa um desempenho conjunto do modelo, também considerado um indicador de confiança, foram os critérios de indicação dos métodos empíricos a ser utilizado na região.

Na Tabela 3 estão relacionados às médias da ETo, a estimativa do erro padrão (EEP), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e desempenho (c) e classificação dos métodos segundo Camargo e Sentelhas (1997). As menores EEP foram encontrados pelos métodos, Hargreaves-Samani (0,917 mm dia<sup>-1</sup>) e Priestley-Taylor (0,918 mm dia<sup>-1</sup>). Assim, verifica-se que os métodos que utilizam a radiação solar, com exceção do Priestley-Taylor e Radiação Solar obtiveram altos EEP (Tabela 3).

TABELA 3. Média e estimativa do erro padrão (EEP), coeficiente de correlação (r), índice de concordância(d) e desempenho (c) dos métodos de ETo na região do Alto Pantanal, MS, na estação de verão.

Métodos*	Média	EEP	r	d	c
PM	5,168	-	-	-	-
Sem radiação solar					
BL	5,732	1,050	0,708	0,732	0,518
CM	4,844	1,206	0,383	0,331	0,127
HA	4,486	1,317	0,438	0,398	0,174
HS	5,337	0,917	0,694	0,782	0,543
KF	5,421	1,146	0,478	0,422	0,202
Com radiação solar					
JH	7,476	2,495	0,989	0,632	0,625
MK	7,537	2,537	0,980	0,615	0,603
PT	6,015	0,918	0,986	0,899	0,887
RS	6,349	1,398	0,985	0,831	0,819
TR	8,706	3,718	0,981	0,453	0,444

\*PM (Penman-Monteith), BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc).

Todos os métodos de estimativa de ETo, que não utilizam radiação solar, apresentaram “c” abaixo de 0,65, portanto, seu uso não é recomendado para a região do Alto Pantanal na estação de verão. Entre os métodos que utilizam a radiação solar somente os métodos de Priestley-Taylor e Radiação Solar apresentaram índices

satisfatório para seu uso na estação de verão, sendo classificado como “Ótimo” e “Muito bom” respectivamente. O que contribuiu para esse resultado foi que esses métodos obtiveram “d” próximo a linha de exatidão como pode ser observado na Figura 2.

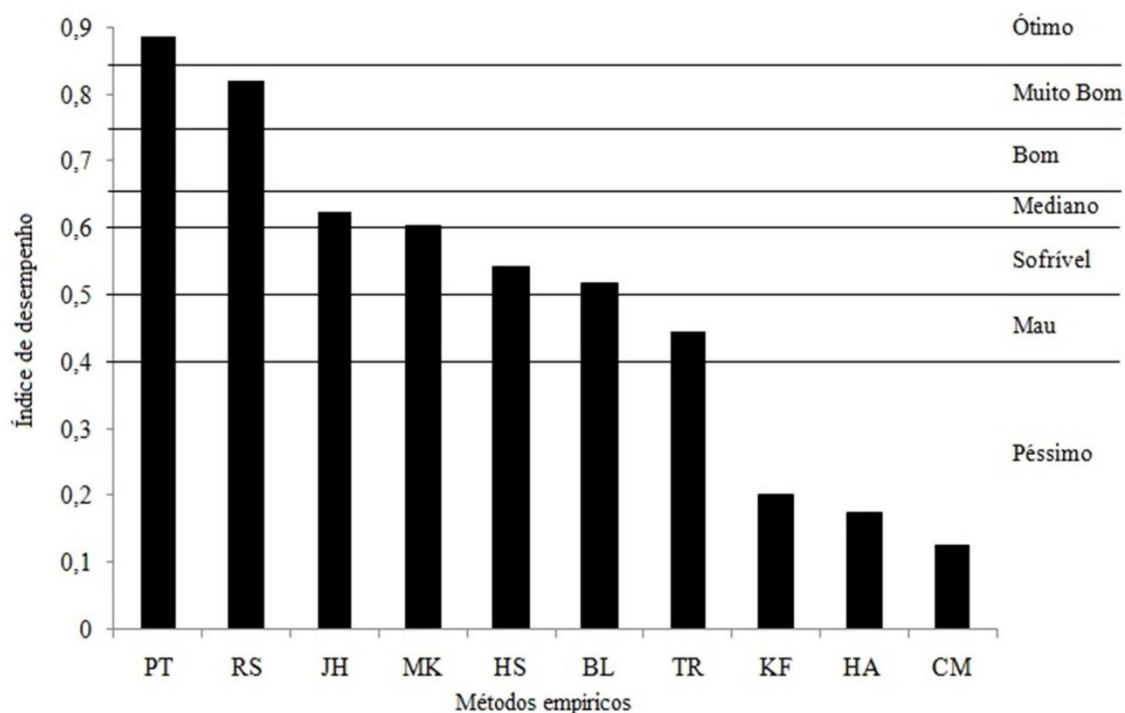


FIGURA 3. Classificação dos métodos empíricos no verão do Alto Pantanal, MS.

Conceição e Mandelli (2005) avaliaram a adequabilidade de métodos que empregam a temperatura do ar ou radiação solar como variáveis de entrada comparando-os aos valores diários estimados pelo método padrão-FAO para a região de Bento Gonçalves-RS e observaram que os melhores resultados obtidos foram com os métodos que empregam a radiação global incidente como variável.

O mesmo foi observado por Pereira et al. (2009), na região da Serra da Mantiqueira, no qual destacaram que os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que empregam radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar.

Ainda o método de Jensen-Haise, Makink obtiveram classificação de “Mediano” e “Sufrível” (Figura 3) com índice “c” de 0,625 e 0,603 respectivamente. Observa-se que a maior média e EEP, foram estimados pelo método de TR, que apresentou alto “r” (0,981), no entanto, baixos índice de concordância resultado em baixo “c” (0,444), na qual foi classificado como “Mau”.



### Evapotranspiração de referência no outono

Na Figura 4 encontram-se os valores diários da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculados pelos métodos de Penman-Monteith, Benevides-Lopes, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Klarrufa, Jensen-Haise, Makink, Priestley-Taylor, Radiação solar e Turc, no período de outono.

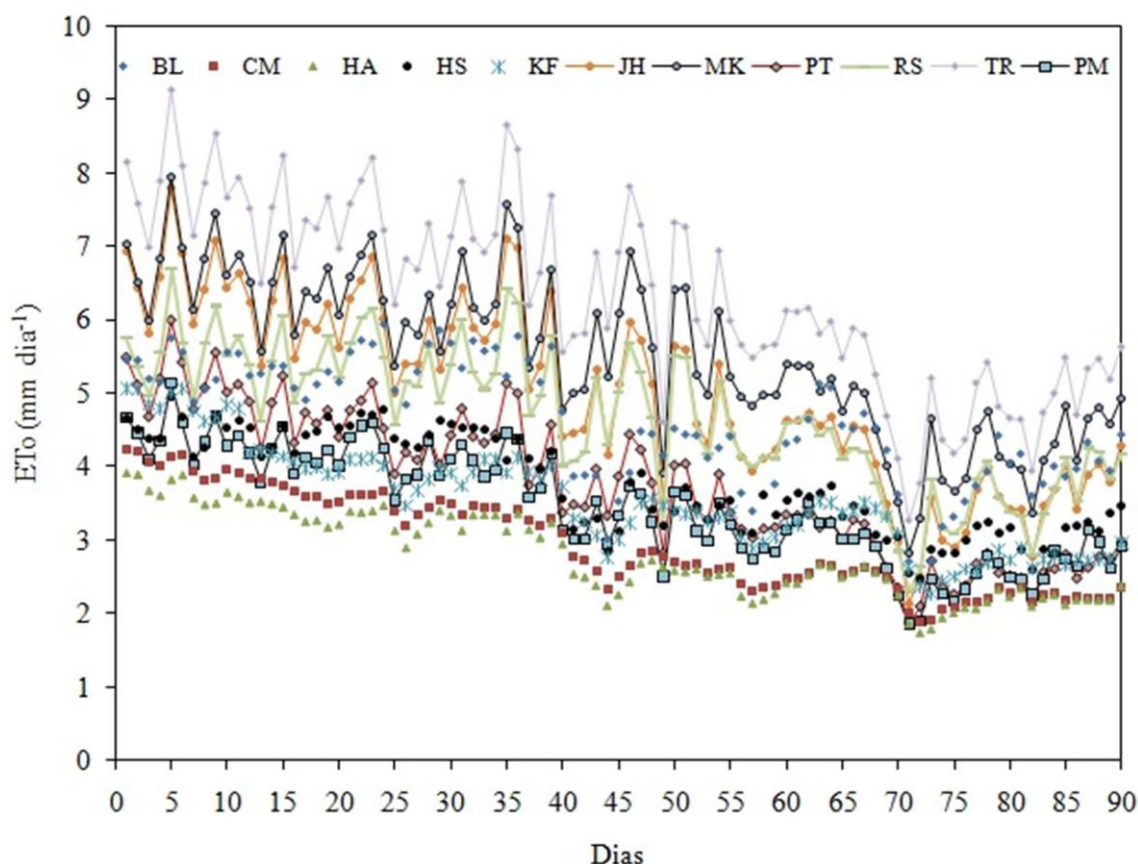


FIGURA 4. Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculados pelos métodos de Penman-Monteith, Benevides-Lopes (BL), Camargo (CM), Hamon (HA), Hargreaves-Samani (HS), Klarrufa (KF), Jensen-Haise (JH), Makink (MK), Priestley-Taylor (PT), Radiação solar (RS) e Turc (TR), no outono do Alto Pantanal, MS.

Verifica-se na Figura 5 que os métodos Camargo, Hamon e Hargreaves-Samani apresentaram coeficiente “b” de 1,046; 1096 e 1,015 respectivamente, indicando previamente ótima performance na resposta em estimativas de ET<sub>o</sub> comparado com o método de Penman-Monteith. Contudo, o método de Hargreaves-Samani comparado aos modelos que não utilizam radiação solar incidente foi o que apresentou maior precisão do modelo de regressão com  $r^2$  de 0,733.

Os métodos de Benevides-Lopez, Camargo, Hamon e Klarrufa obtiveram  $r^2$  de 0,577; 0,574; 0,569 e 0,456 respectivamente, sendo que o método de Benevides-

Lopez e Klarrufa apresentaram tendência em superestimar a ETo no outono do Alto Pantanal de Mato Grosso do Sul.

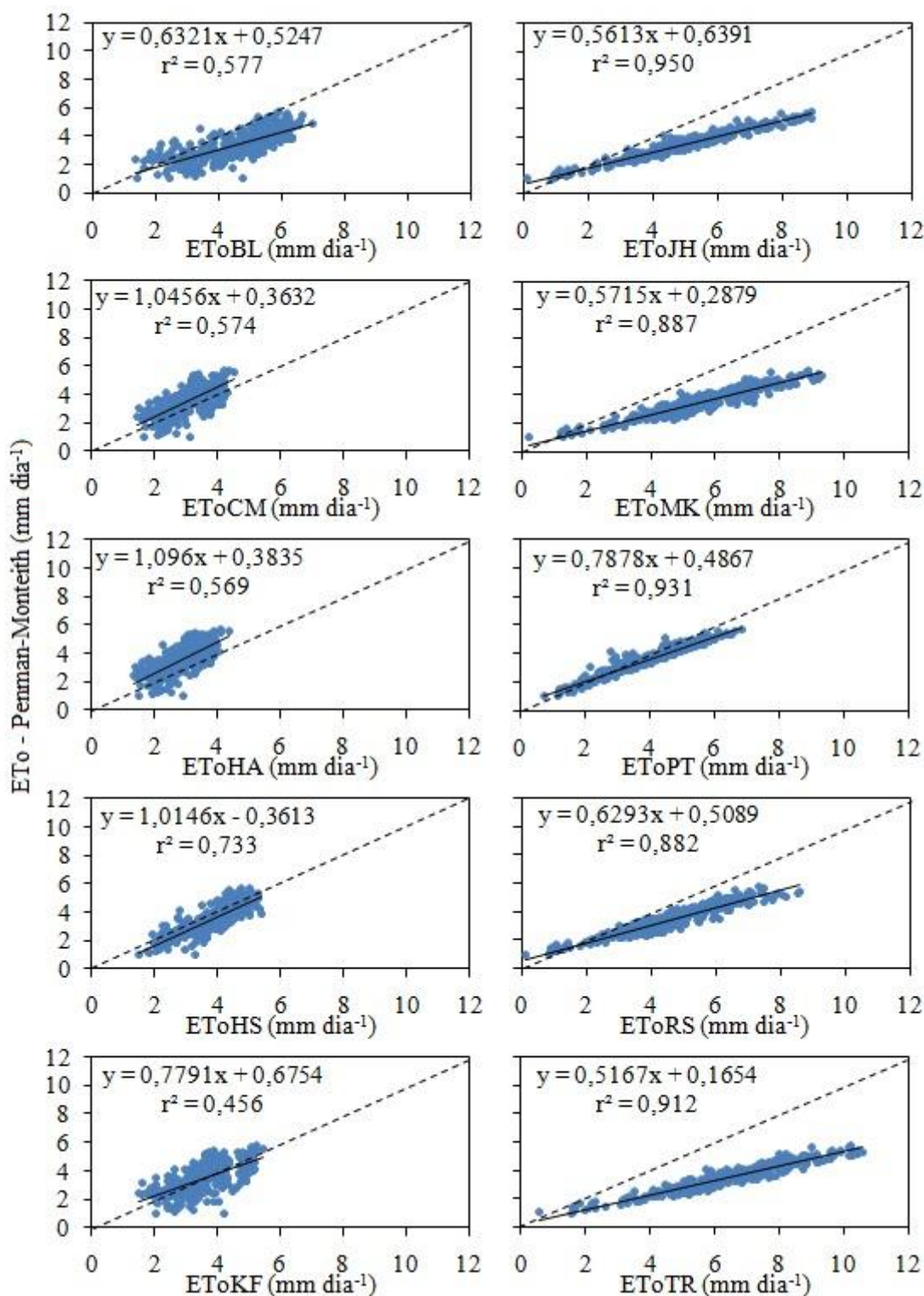


FIGURA 5. Correlação entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelos métodos de Penman-Monteith e os métodos empíricos, no outono da região do Alto Pantanal, MS. BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink),

PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc). A linha tracejada indica a reta 1:1.

Analisando o coeficiente “b”, dos métodos que utilizam a radiação solar, verifica-se que todos apresentaram tendência em superestimar a ETo estimado pelo método de Penman-Monteith. Porém todos ajustaram expressivamente ao modelo de regressão com pouca dispersão, apresentando altos valores de  $r^2$  (Figura 5). Logo o método de Priestley-Taylor apresentou o melhor ajuste entre os dados em pares apresentando ótimos ajustes, que pode ser verificado na Figura 5, que mostra coeficiente “b” e  $r^2$  igual a 0,788 e 0,931 respectivamente.

Na Tabela 4, observa-se que entre os métodos que não utilizam radiação solar, o método de Hargreaves-Samani foi o único que alcançou índice “c” (0,760) suficiente para se aplicado às condições da estação de outono no Alto Pantanal, sendo o mesmo classificado como “Muito Bom” (Figura 6). Nesta estação o método de Hargreaves-Samani apresentou média de ETo de 3,738, ou seja, uma variação com cerca de 0,307 mm dia<sup>-1</sup> e, EEP na ordem de 0,602 mm dia<sup>-1</sup>, sendo que sua correlação r e índice “d” foram bastante uniformes, contribuindo para seu bom desempenho neste período.

Os métodos de Camargo, Hamon, Klarrufa e Makkink, obtiveram classificação conforme Camargo e Sentelhas (1997) de “Sofrível” e Benevides-Lopez e Turc como “Mau” (Figura 6).

TABELA 4. Média e estimativa do erro padrão (EEP) em mm dia<sup>-1</sup>, coeficiente de correlação (r), índice de concordância(d) e desempenho (c) dos métodos de ETo na região do Alto Pantanal, MS, na estação de outono.

Métodos	Média	EEP	r	d	c
PM	3,431	-	-	-	-
Sem radiação solar					
BL	4,598	1,409	0,759	0,648	0,492
CM	2,934	0,821	0,758	0,765	0,580
HA	2,780	0,927	0,755	0,708	0,534
HS	3,738	0,602	0,856	0,889	0,760
KF	3,537	0,769	0,676	0,798	0,539
Com radiação solar					
JH	4,973	1,737	0,974	0,692	0,674
MK	5,499	2,215	0,942	0,559	0,526
PT	3,737	0,481	0,965	0,953	0,920
RS	4,643	1,378	0,939	0,747	0,702
TR	6,319	3,042	0,955	0,433	0,413

\*PM (Penman-Monteith), BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc).

O melhor método na estação de outono foi o Priestley-Taylor seguido de Radiação Solar e Jensen-Haise, no qual foram classificados como “Ótimo” e “Bom” respectivamente. O método de Priestley-Taylor apresentou excelentes resultados estatísticos com a menor EEP (0,481 mm dia<sup>-1</sup>), e maior “r”, “d” e “c”, com valores de 0,965; 0,953 e 0,920 respectivamente.

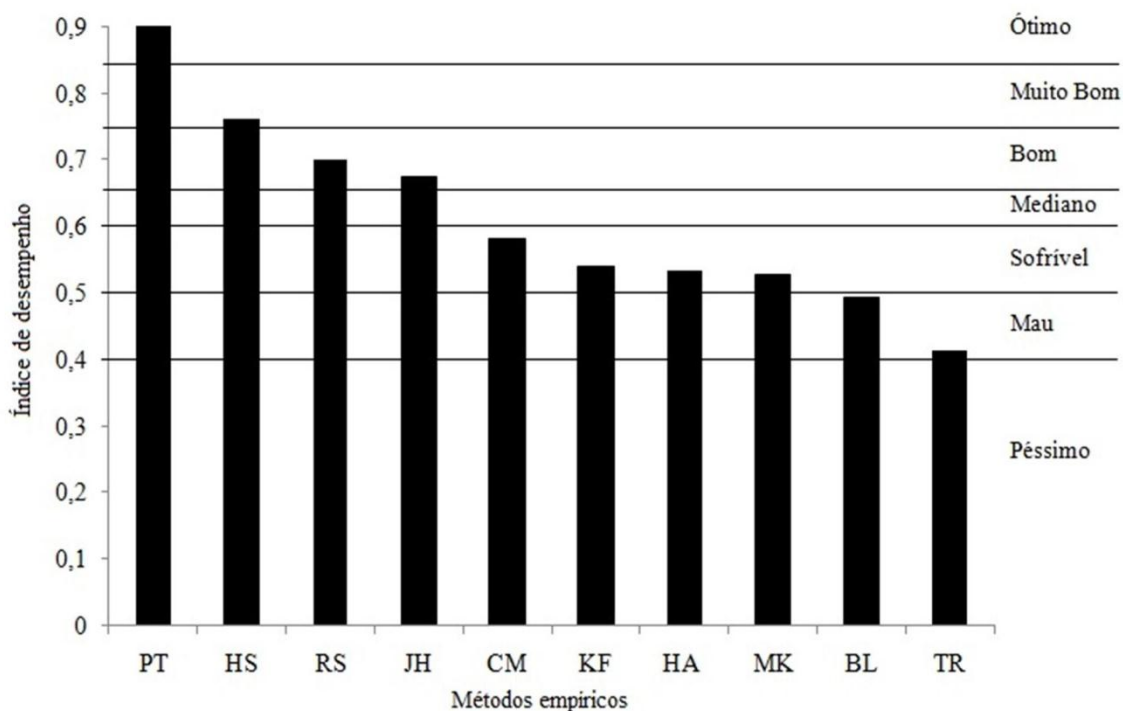


FIGURA 6. Classificação dos métodos empíricos no outono do Alto Pantanal, MS.

Apesar do método Makink e Turc utilizarem a radiação solar em sua equação de estimativa de ETo os mesmo apresentaram baixa performance, com índice “d” muito baixos, contribuindo para seu desempenho não satisfatório sendo que esse fato pode ser observado na Figura 5, onde a reta do modelo de regressão esta bastante abaixo da reta de exatidão.

### Evapotranspiração de referência no inverno

O comportamento da ETo na estação de inverno encontra-se na Figura 7, evidenciando que o método de Turc esta apresentando altos valores de ETo em relação ao Penman-Monteith e, o método de Camargo e Hamon estão abaixo.

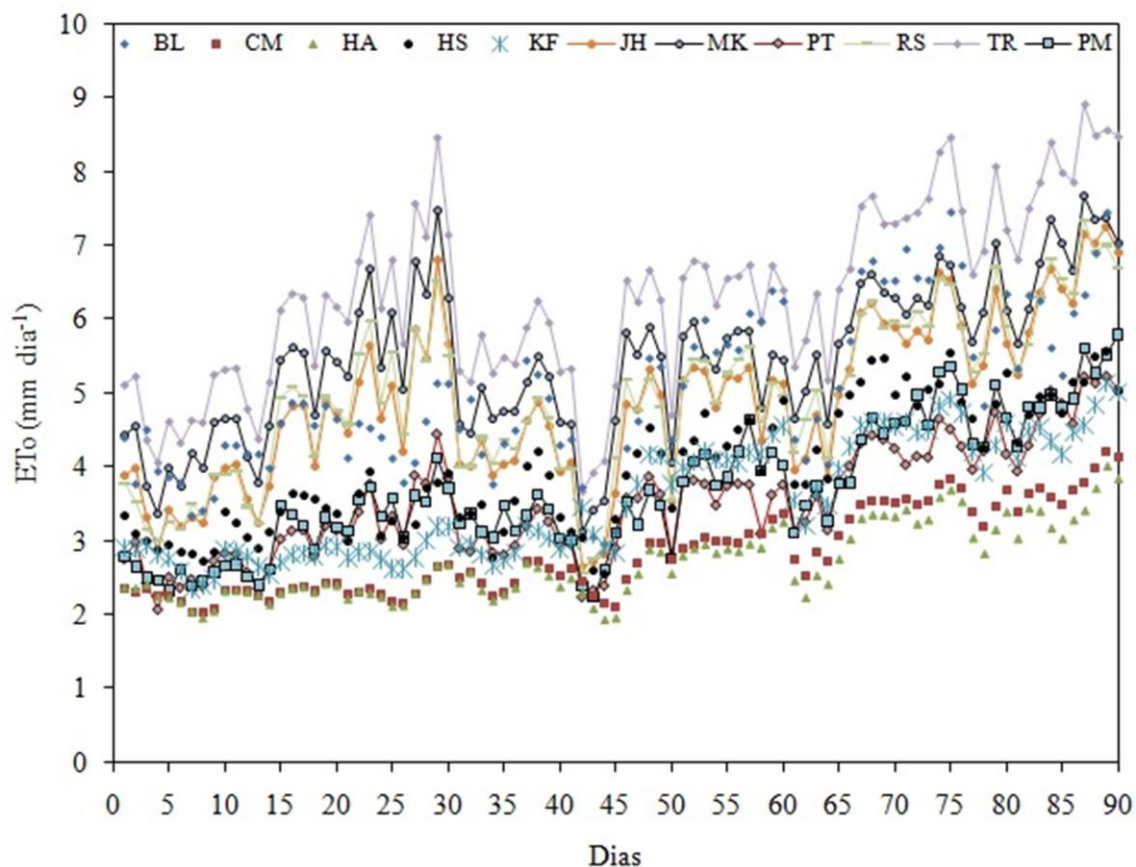


FIGURA 7. Evapotranspiração de referência ( $ETo$ ) calculados pelos métodos de Penman-Monteith, Benevides-Lopes (BL), Camargo (CM), Hamon (HA), Hargreaves-Samani (HS), Klarrufa (KF), Jensen-Haise (JH), Makink (MK), Priestley-Taylor (PT), Radiação solar (RS) e Turc (TR), no inverno do Alto Pantanal, MS.

Na estação de inverno os métodos que não utilizam radiação solar incidente; Benevides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani e Klarrufa obtiveram  $r^2$  de 0,649; 0,610; 0,582; 0,629 e 0,523 respectivamente (Figura 8). Na estação de inverno entre esses métodos houve uma maior precisão dos modelos, contudo, o método que apresentou maior tendência em superestimar a  $ETo$  foi o Benevides-Lopez.

Verifica-se que os métodos Hargreaves-Samani e Klarrufa apresentaram “b” próximo de 1 ou seja, a distribuição da  $ETo$  em relação ao método de Penman-Monteith, estão superestimado em aproximadamente 15% a  $ETo$ . Apesar desta superestimativa, destaca-se o método de Hargreaves-Samani por utilizar somente dados de temperatura do ar como parâmetro de entrada de método. Talvez, essa melhora geral da precisão dos métodos que não utilizam radiação solar, esteja ligada a menor incidência de radiação solar devido, principalmente, ao menor tempo de luz e com maior regularidade (distribuição homogênea) da temperatura do ar e umidade relativa do ar.

Entre os métodos que utilizam radiação solar como base de entrada da equação, observa-se uma diminuição do  $r^2$  quando comparado com estação de verão, no entanto indicando boa precisão da equação de regressão, com  $r^2$  de 0,800; 0,717; 0,764; 0,828 e 0,807 para os métodos de Jensen-Haise, Makink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc respectivamente, com destaque ao método de Priestley-Taylor que apresenta “b” próximo de 1, indicando preliminarmente, ótima estimativa de ETo quando comparado com o método de Penman-Monteith (Figura 8). O saldo de radiação utilizado pelo método de Priestley-Taylor promoveu essa menor variação em relação ao “b”, sendo fato que o método de Penman-Monteith também utiliza o saldo de radiação solar e essa semelhança contribuiu para essa maior aproximação.

Os demais métodos através do modelo de regressão previsto pelo  $r^2$  condicionaram tendência em superestimar a ETo de referência como pode ser observado na Figura 8, onde todos esses métodos apresentaram semelhança principalmente pelo fato de todos usarem a radiação solar.

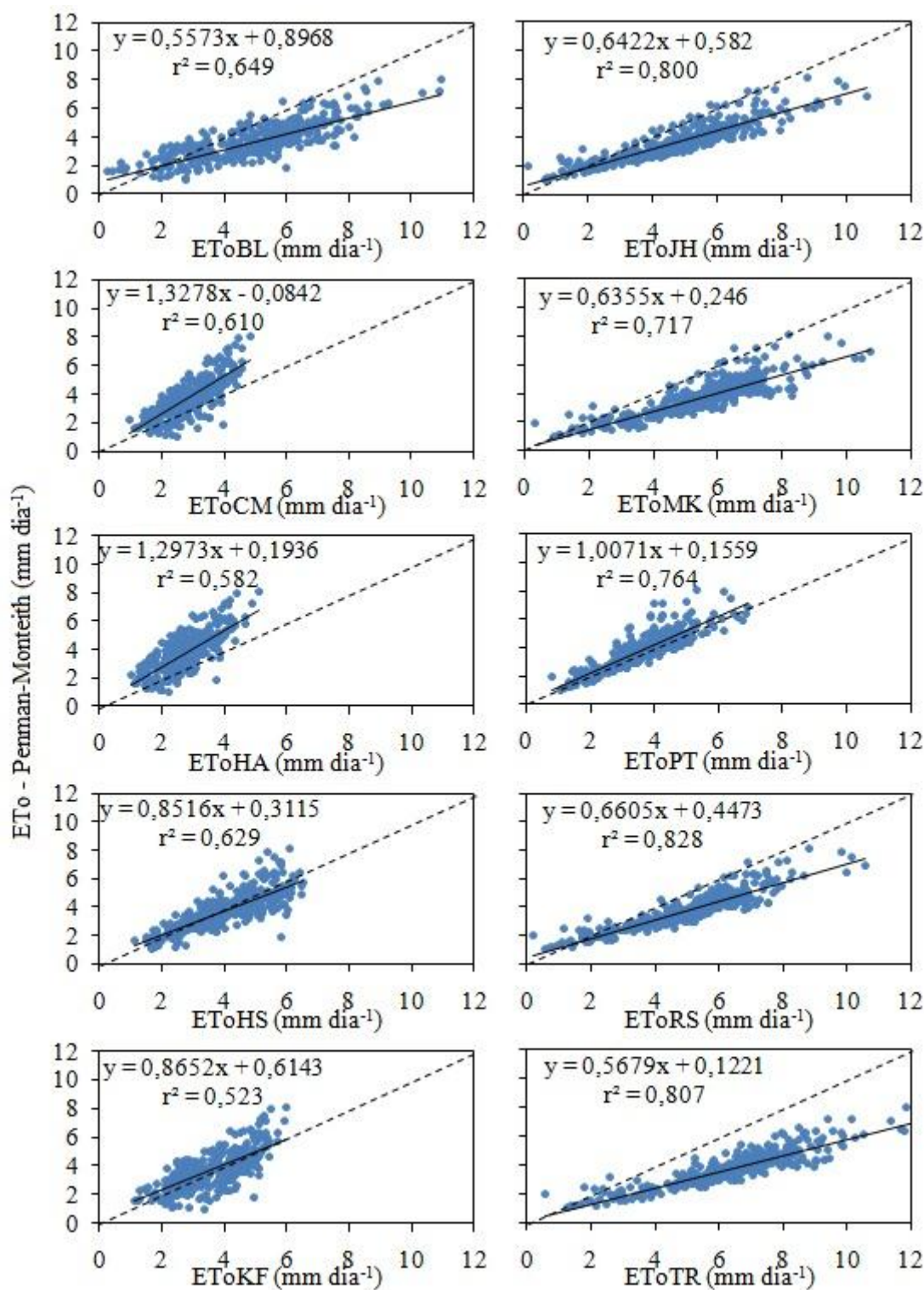


FIGURA 8. Correlação entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelos métodos de Penman-Monteith e os métodos empíricos, no inverno da região do Alto Pantanal, MS. BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc). A linha tracejada indica a reta 1:1.



Em Campina Grande, Estado da Paraíba, Henrique (2006) estudando o método de Hargreaves-Samani comparando ao de Penman-Monteith no inverno encontrou coeficiente “b” de 1,054 e  $r^2$  de 0,878, destacando que entre os métodos de não utilizam radiação solar foi o melhor. Em estudo com comparação de métodos de estimativa de ETo no município de Juazeiro-BA, Oliveira et al. (2010) observaram que o método Hargreaves-Samani, apresentou o melhor desempenho, com “c” = 0,67 e, Guedes Filho et al. (2011) estudando a correlação de métodos de ETo no município de Areia verificaram que o método Hargreaves-Samani mostrou coeficiente de determinação de 95% quando correlacionado com o método padrão.

Entre os métodos que não utilizam radiação solar destaca-se o Hargreaves-Samani, por atingir índice de desempenho satisfatório (0,69) para o seu uso, sendo classificado como “Bom” (Figura 9). Vale ressaltar que o mesmo utiliza somente dados de temperatura do ar sendo facilmente utilizado por qualquer produtor irrigante que não dispõe de dados de radiação solar. O método de Hargreaves-Samani apresentou média de ETo de 4,010 mm dia<sup>-1</sup> (Tabela 5), muito próximo ao método de Penman-Monteith com bom “r” (0,793), sendo que o principal fator para elevação do índice “c” foi o índice “d” (0,870) acima de vários métodos que utilizam radiação solar e pode ser observado na Figura 8 que a reta da equação esta bastante próximo a reta de exatidão (linha pontilhada).

TABELA 5. Média e estimativa do erro padrão (EEP), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e desempenho (c) dos métodos de ETo na região do Alto Pantanal, MS, na estação de inverno.

Métodos	Média	EEP	r	d	c
PM	3,727	-	-	-	-
Sem radiação solar					
BL	5,078	1,729	0,805	0,703	0,566
CM	2,870	1,177	0,781	0,669	0,522
HA	2,723	1,301	0,763	0,617	0,471
HS	4,010	0,821	0,793	0,870	0,690
KF	3,598	0,872	0,723	0,829	0,599
Com radiação solar					
JH	4,896	1,433	0,894	0,787	0,704
MK	5,477	1,965	0,847	0,640	0,542
PT	3,546	0,625	0,874	0,922	0,806
RS	4,965	1,460	0,910	0,781	0,711
TR	6,347	2,809	0,898	0,523	0,469

\*PM (Penman-Monteith), BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc).

Os métodos que utilizam radiação solar Jensen-Haise, Priestley-Taylor e Radiação Solar obtiveram classificação de “Bom, Muito bom e Bom” respectivamente (Figura 9). Nota-se que entre esses modelos o método de Priestley-Taylor obteve ETo média muito próxima de método de Penman-Monteith com diferença na ordem de  $-0,181 \text{ mm dia}^{-1}$  com menor EEP ( $0,625 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e índice de “d”  $0,922$  (Tabela 5). Segundo Tazzo et al. (2012), a estimativa da ETo através de modelos que utilizam variáveis de insolação, temperatura do ar, são menos precisos do que as que possuem aporte de energia, no entanto as variáveis de energia possuem maior dificuldade para sua obtenção por serem mais caros e não estarem presentes em todos os postos meteorológicos.

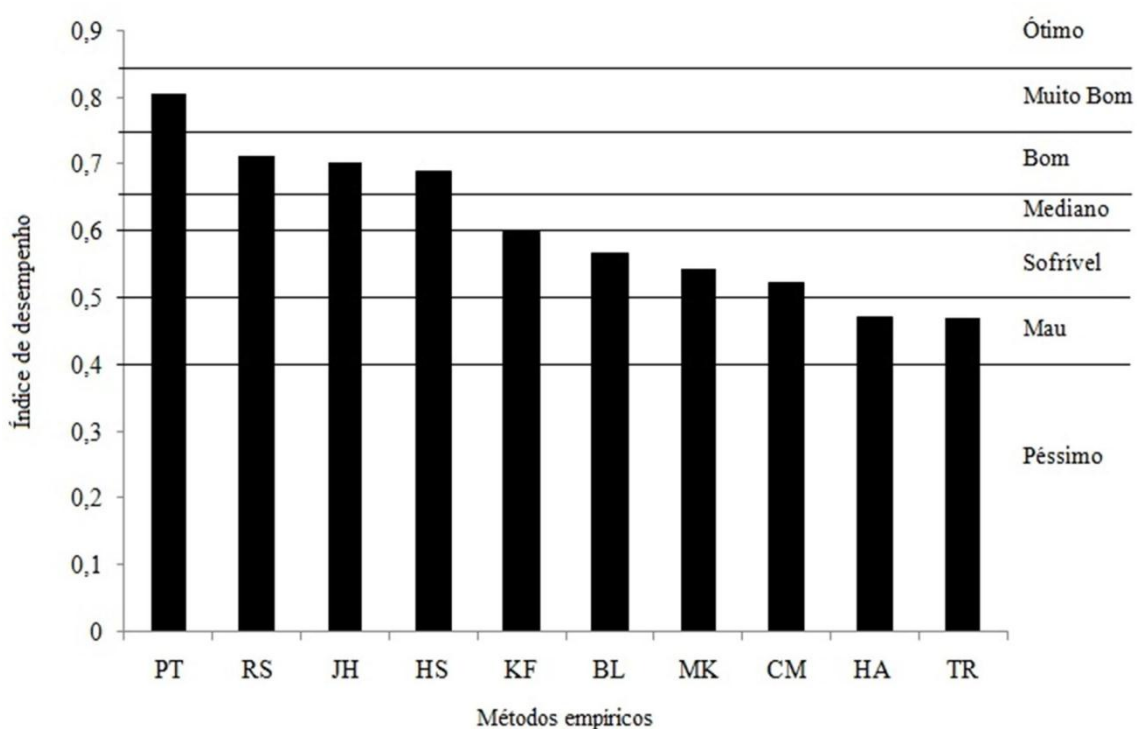


FIGURA 9. Classificação dos métodos empíricos no inverno do Alto Pantanal, MS.

### Evapotranspiração de referência na primavera

Assim como nas demais estações do ano, na primavera evidenciou o mesmo comportamento dos métodos empíricos (Figura 10).

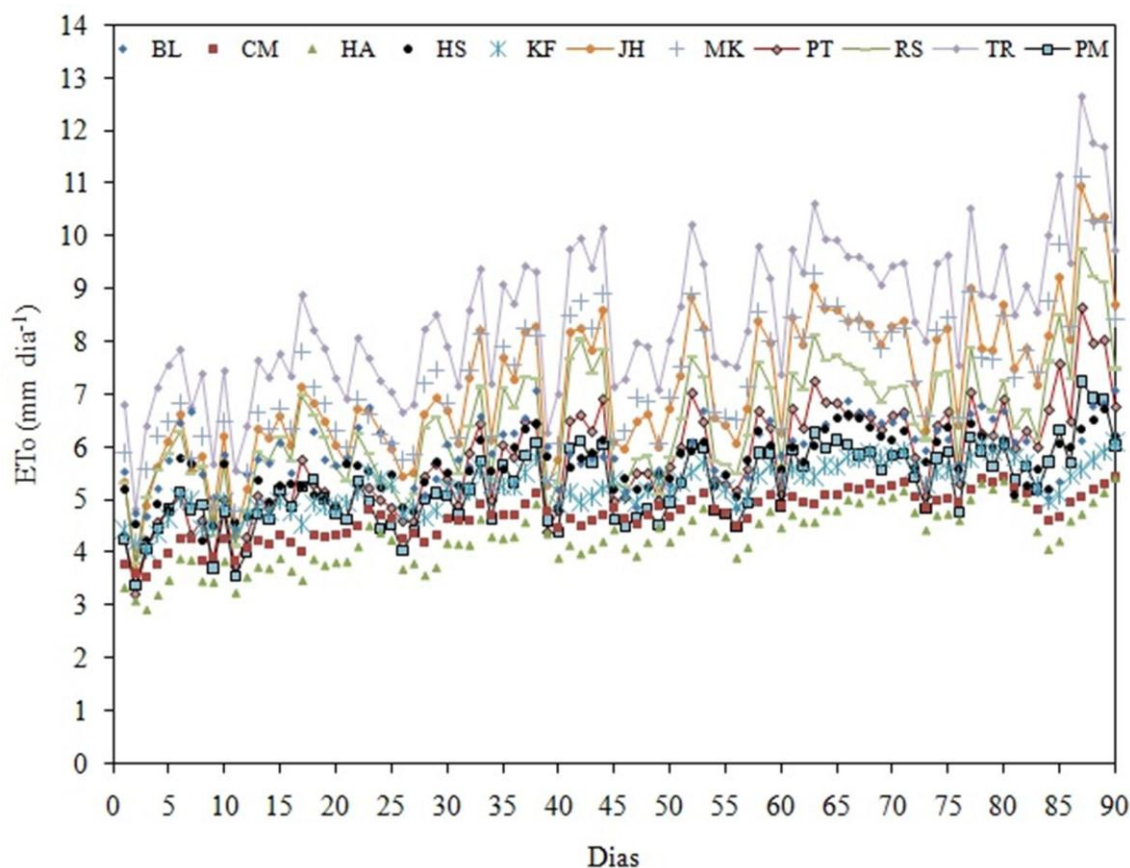


FIGURA 10. Evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ) calculados pelos métodos de Penman-Monteith, Benevides-Lopes (BL), Camargo (CM), Hamon (HA), Hargreaves-Samani (HS), Klarrufa (KF), Jensen-Haise (JH), Makink (MK), Priestley-Taylor (PT), Radiação solar (RS) e Turc (TR), na primavera do Alto Pantanal, MS.

Os métodos baseados basicamente em temperatura do ar na estação de primavera mostraram coeficiente “b” próximo de 1, com exceção do método Camargo, que de acordo com o modelo de regressão, apresenta tendência em subestimar a  $E_{To}$  em 38% quando comparado com o método de Penman-Monteith. O método de Benevides-Lopez obteve “b” de 0,807, ou seja, subestimando a  $E_{To}$  em 19,3%, com precisão da estimativa de 52,7% mostrado pelo  $r^2$  (Figura 11).

O método Hamon foi o que encontrou o melhor coeficiente angular (1,024), porém, péssima precisão do modelo de regressão ( $r^2 = 0,313$ ) comparado com a estimativa de  $E_{To}$  proposta pelo método de Penman-Monteith. O maior  $r^2$  foi encontrado com método de Hargreaves-Samani, explicado em 61% através do modelo de regressão, isso referente a distribuição dos dados correlacionados com os valores de  $E_{To}$  do PM. Vale salientar que o método de Camargo e de Hargreaves-Samani apresentam em comum o uso da radiação no topo da atmosfera, porém os coeficientes técnicos do método de Hargreaves-Samani e o uso de um conjunto de relação entre a

temperatura do ar, como temperatura média mínima e máxima, faz com que esse método seja mais eficiente que o método de Camargo, que utiliza apenas a temperatura média e coeficiente de ajuste.

Como apresentado anteriormente, os métodos que utilizam radiação solar novamente obtiveram os maiores valores de  $r^2$  (Figura 11). Os métodos Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Radiação Solar e Turc apresentam tendência em superestimar a ETo, pois verifica-se que todos os coeficientes “b” são menores que 1.

Verifica-se na Figura 11 que o método Priestley-Taylor superestima a ETo em aproximadamente 20%, sendo que o modelo de regressão apresenta precisão próximo a 90%. Entre as estações do ano verificou-se que o menor  $r^2$  do método de Priestley-Taylor, foi encontrado na estação de inverno.

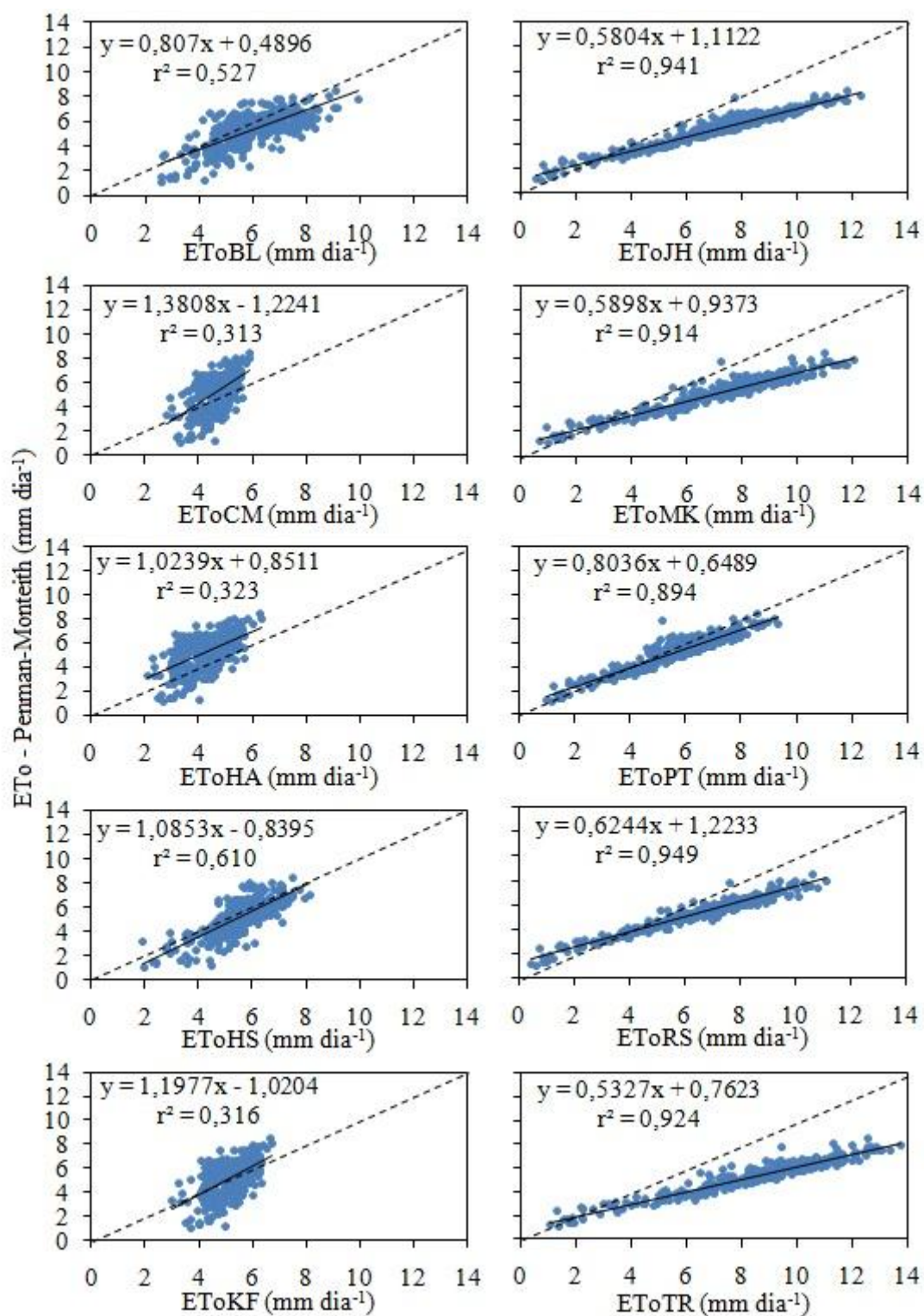


FIGURA 11. Correlação entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelos métodos de Penman-Monteith e os métodos empíricos, na primavera da região do Alto Pantanal, MS. BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc).

Os métodos Benevides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Klarrufa, e Turc não atingiram índice de desempenho suficiente para ser utilizado no Alto Pantanal na estação de primavera, sendo que os mesmos foram classificados como “Sofrível, Péssimo, Péssimo, Mediano, Péssimo, e Sofrível” respectivamente em relação aos métodos (Figura 12).

Os métodos de Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor e Radiação Solar, podem ser utilizados na região do Alto Pantanal para estimar a ETo, sendo classificado como “Bom, Bom, Ótimo e Muito bom” respectivamente.

TABELA 6. Média e estimativa do erro padrão (EEP), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e desempenho (c) dos métodos de ETo na região do Alto Pantanal, MS, na estação de primavera.

Métodos	Média	EEP	r	d	c
PM	5,261	-	-	-	-
Sem radiação solar					
BL	5,913	1,190	0,726	0,784	0,569
CM	4,697	1,311	0,559	0,509	0,284
HA	4,307	1,498	0,568	0,525	0,298
HS	5,621	0,951	0,781	0,830	0,648
KF	5,245	1,167	0,562	0,604	0,340
Com radiação solar					
JH	7,149	2,158	0,970	0,733	0,711
MK	7,331	2,310	0,956	0,696	0,665
PT	5,740	0,737	0,946	0,942	0,890
RS	6,467	1,494	0,974	0,843	0,821
TR	8,446	3,424	0,961	0,538	0,517

\*PM (Penman-Monteith), BL (Benevides-Lopez), CM (Camargo), HA (Hamon), HS (Hargreaves-Samani), KF (Klarrufa), JH (Jensen-Haise), MK (Makink), PT (Priestley-Taylor), RS (Radiação solar) e TR (Turc).

A maior diferença de média de ETo foi de 3,185 mm dia<sup>-1</sup>, obtida pelo método de Turc, que apresentou EEP de 3,424 mm dia<sup>-1</sup>. Verifica-se que em todas as estações do ano este método foi o que mostrou maior média de ETo. O método Priestley-Taylor na primavera apresentou melhores índices estatísticos como observa-se na Tabela 6.

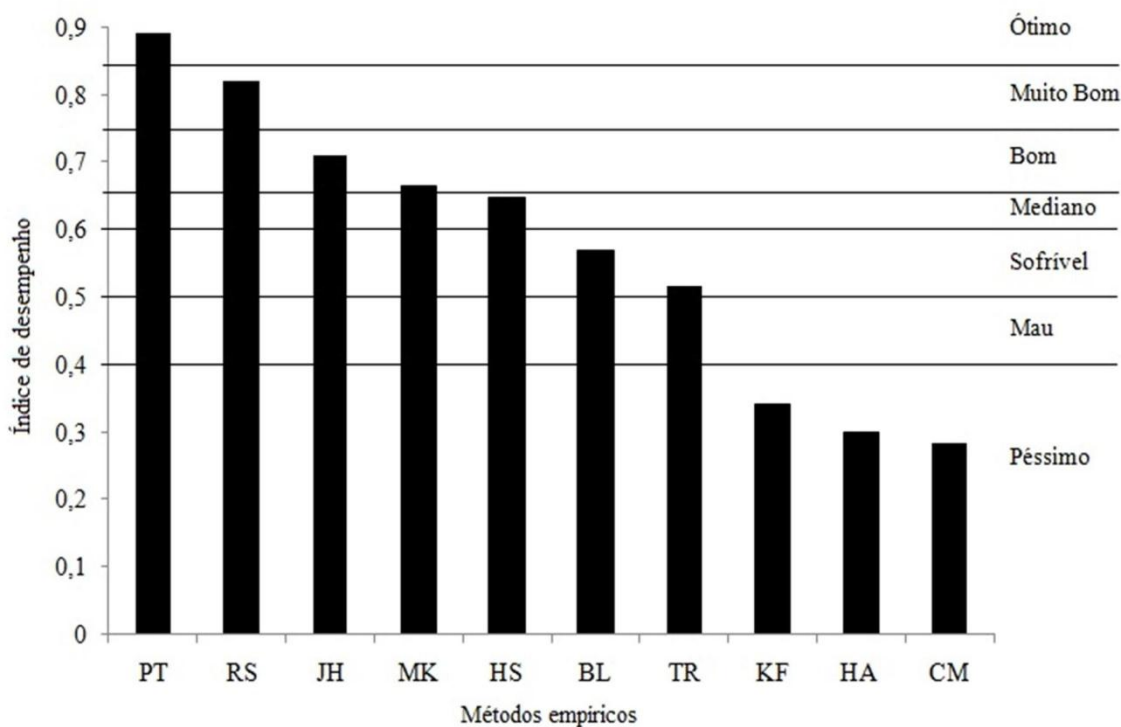


FIGURA 12. Classificação dos métodos empíricos na primavera do Alto Pantanal, MS.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, entende-se que os métodos Priestley-Taylor e Radiação Solar atendem satisfatoriamente à estimativa da evapotranspiração de referência na região Alto Pantanal para todas as estações do ano.

Dentre os métodos que utilizam a temperatura como base, apenas o Hargreaves-Samani é recomendado para as estações de inverno e outono.

O método Jensen-Haise não é recomendado para o verão e o método Makkink pode ser utilizado apenas na estação da primavera.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Cropevapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para Boa Vista, RR. **Caatinga Mossoró**, v.20, n.4, p.84-88, 2007.

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

BENEVIDES, J. G.; LOPEZ DIAZ, J. Formula para el calculo de La evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

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.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica – RJ utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, n.1, p. 97-105, 2006.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.2, p. 303-307, 2005.

FREVERT, D. R.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage**. 109: 265-270. 1983.

GONÇALVES, H. C.; MERCANTE, M. A.; SANTOS, E. T. Hydrological cycle, **Brazilian Journal of Biology**, v.71, n.1, p. 241-253, 2011.

GUEDES FILHO, D. H.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; COSTA FILHO, J. F.; FRANCISCO, P.R.M.; CAMPOS, V.B. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Areia, Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.5, n. 1, p.37-47, 2011.

HENRIQUE, F. A. N. **Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande-PB**. 2006. Dissertação em Meteorologia. 102p. UFCG. Campina Grande.

HENRIQUE, F. de A. N.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 594-599, 2007.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation Drainage Division**, ASCE, New York, v. 89, n. 1, p. 15-41, 1963.

KLARRUFA, N. S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. **Beiträge zur Hydrologie**, Kirchzarten, Sonderheft, v. 5, n. 1, p. 39-47, 1985.

LEMO FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a



evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010.

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Amsterdam, v.5, n.1, p.290-305, 1957.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da Evapotranspiração de Referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 196–202, 2010.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; BISPO, R. C.; SANTOS, I. M. S.; ALMEIDA, A. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.104–109, 2010.

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

PEREIRA, D. R.; YANAGE, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 1, p. 81-92, 1972.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**: Rome: FAO, 1991, 54 p.

SOUSA, I. F. de; SILVA, V. P. R. da; SABINO, F. G.; NETTO, A. de O.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 6, p. 633-644. 2010.

SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R. Estimativa de evapotranspiração de referência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 8, n. 4, p. 003-022, 2011.

SYPERRCK, V. L. G.; KLOSOWKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, v. 30, p. 603-609, 2008.

TAZZO, I. F.; HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; PIVETTA, C. R.; STRECK, L.; RIGHI, E. Z. Evapotranspiração do pimentão em estufa plástica estimada com dados

meteorológicos externos, na primavera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.3, p.275-280, 2012.

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Annals of Agronomy**, v.12, p.13-49, 1961.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.