

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

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA
COM AUSÊNCIA DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS**

JOANE ALVES DAMASCENO

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2018**

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM AUSÊNCIA DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

JOANE ALVES DAMASCENO

Orientador: PROF. Dr. GUILHERME AUGUSTO BISCARO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências para conclusão do curso de Engenharia Agrícola.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2018

D155e Damasceno, Joane Alves

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM AUSÊNCIA DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS [recurso eletrônico] / Joane Alves Damasceno. -- 2018.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Guilherme Augusto Biscaro.

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. elementos meteorológicos. 2. Hargreaves-Samani. 3. manejo de irrigação. 4. radiação extraterrestre. I. Biscaro, Guilherme Augusto. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

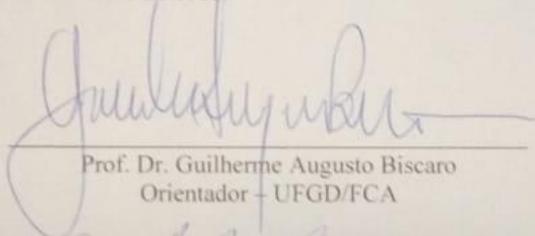
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM
AUSÊNCIA DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

Por

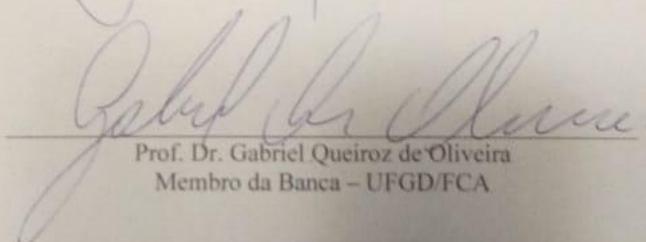
Joane Alves Damasceno

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

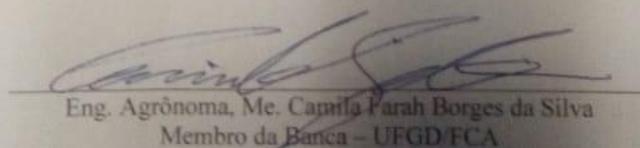
Aprovado em: 05 de dezembro de 2018.



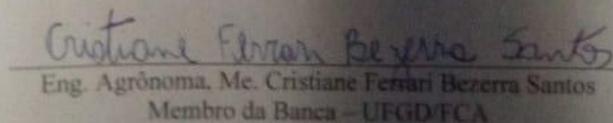
Prof. Dr. Guilherme Augusto Biscaro
Orientador - UFGD/FCA



Prof. Dr. Gabriel Queiroz de Oliveira
Membro da Banca - UFGD/FCA



Eng. Agrônoma, Me. Camila Parah Borges da Silva
Membro da Banca - UFGD/FCA



Eng. Agrônoma, Me. Cristiane Ferrari Bezerra Santos
Membro da Banca - UFGD/FCA

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO-----	01
2. MATERIAL E MÉTODOS-----	03
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	10
4. CONCLUSÕES-----	19
5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA-----	20

LISTA DE TABELA

TABELA 1.	Características das estações meteorológicas automáticas do Inmet.	3
TABELA 2.	Valores médios de elementos meteorológicos do municípios observados.	6
TABELA 3.	Interpretação do desempenho dos métodos para a estimativa da ETo	8
TABELA 4.	Média (mm dia^{-1}), estimativa do erro padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) estimado pelos métodos e com ausência de elementos meteorológicos, em Aquidauana, MS.	13
TABELA 5.	Média (mm dia^{-1}), estimativa do erro padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) estimado pelos métodos e com ausência de elementos meteorológicos, em Bela Vista, MS.	15
TABELA 6.	Média (mm dia^{-1}), estimativa do erro padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) estimado pelos métodos e com ausência de elementos meteorológicos, em Jardim, MS.	18

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Distribuição mensal da ETo estimado pelo método e Penman-Monteith com os dados completos e com ausência de elementos meteorológicos, em Aquidauana, MS.	10
FIGURA 2	Relações entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com os dados completos e ETo estimada na ausência de dados em Aquidauana, MS.	12
FIGURA 3.	Distribuição mensal da ETo estimado pelo método e Penman-Monteith com os dados completos e com ausência de elementos meteorológicos, em Bela Vista, MS.	13
FIGURA 4	Relações entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com os dados completos e ETo estimada na ausência de dados em Bela Vista, MS.	14
FIGURA 5	Distribuição mensal da ETo estimado pelo método e Penman-Monteith com os dados completos e com ausência de elementos meteorológicos, em Jardim, MS.	16
FIGURA 6	Relações entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com os dados completos e ETo estimada na ausência de dados em Jardim, MS.	17

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM AUSÊNCIA DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

Joane Alves Damasceno¹ e Guilherme Augusto Biscaro²

RESUMO

Há vários métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), aqueles que utilizam vários elementos meteorológicos e os que utilizam poucos elementos, como por exemplo os baseados apenas na temperatura do ar. O objetivo foi verificar o desempenho do método de Hargreaves-Samani e do método Penman-Monteith de estimativa da ET_o diárias na ausência local de dados de umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar. Foram utilizadas variáveis climáticas obtidas por meio da rede de Estações do Instituto Nacional de Meteorologia no período de 01 de janeiro de 2017 a 31 de dezembro de 2017. Os dados obtidos pelas estações foram temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa máxima e mínima do ar, velocidade média do vento e radiação solar global. Os municípios de estudos foram Aquidauana, Bela Vista e Jardim todos do Estado de Mato Grosso do Sul. Os métodos empíricos avaliados foram os métodos Hargreaves-Samani, Penman-Monteith com ausência local de radiação solar global, umidade relativa e velocidade do vento. As análises para a exatidão dos métodos foram as seguintes estatísticas, o coeficiente de correlação, índice de concordância e índice de desempenho. A recomendação do uso aconteceu quando os métodos apresentaram índices “c” superior a 0,65. Conclui-se que os métodos de Hargreaves-Samani, de Penman-Monteith com ausência local de radiação solar global, umidade relativa e velocidade do vento podem ser utilizados nos municípios de Aquidauana, Bela Vista e Jardim.

Palavras-chave: elementos meteorológicos, Hargreaves-Samani, manejo de irrigação, radiação extraterrestre.

ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION WITH ABSENCE OF METEOROLOGICAL ELEMENTS

ABSTRACT

There are several methods of estimating reference evapotranspiration (ET_o), those using various meteorological elements and those using few elements, such as those based on air temperature. The objective was to verify the performance of the Hargreaves-Samani method and the Penman-Monteith method of estimation of ET_o daily in the absence of local data relative humidity, wind speed and solar radiation. Climatic variables obtained through the Stations network of the National Institute of Meteorology were used from January 1, 2017 to December 31, 2017. The data obtained by the stations were maximum and minimum air temperature, maximum and minimum relative humidity air, average wind speed and global solar radiation. The cities of studies were Aquidauana, Bela Vista and Jardim all of the Mato Grosso do Sul State, Brazil. The empirical methods evaluated were the Hargreaves-Samani, Penman-Monteith methods with local absence of global solar radiation, relative humidity and wind speed. The analysis for the accuracy of the following statistics, the correlation coefficient, the concordance index and the performance index. The recommendation for use occurred when the methods presented "c" indices greater than 0.65. It is

¹ Graduanda em Engenharia Agrícola, FCA/UFGD.

² Orientador, Professor Associado, FCA/UFGD.

concluded that the Hargreaves-Samani, Penman-Monteith methods with local absence of global solar radiation, relative humidity and wind speed can be used in the cities of Aquidauana, Bela Vista and Jardim.

Keywords: meteorological elements, Hargreaves-Samani, irrigation management, extraterrestrial radiatio

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, uma das principais preocupações é com a crescente demanda hídrica em todos os setores da sociedade. Portanto, a água na produção de alimentos deve ser utilizada da forma mais racional possível. Nesse contexto, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) tem o objetivo de otimizar o uso da água na agricultura (LIMA JUNIOR et al., 2016).

A ET_o é dito como a evaporação da água e a transpiração das plantas presente em uma extensa superfície que possui vegetação rasteira, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 0,08 e 0,15 m, sem restrição hídrica. Para a definição, vale ressaltar que, a vegetação rasteira “grama” é definida especificamente como a cultura de referência, e essa cultura é considerada livre de estresse hídrico e de doenças (MENDONÇA et al., 2003).

Existem vários métodos empíricos para se estimar a ET_o, os quais utilizam um conjunto complexo de dados meteorológicos coletados com sensores eletrônicos, nos quais, nem todo produtor rural adquirir, devido principalmente pelo seu valor de custo e muitas vezes a complicada instalação e, possui também aqueles, que necessitam apenas de sensores temperatura do ar, como o termômetro analógico de temperatura máximo e mínimo. Métodos que utilizam somente a temperatura do ar para a estimativa da ET_o também podem ser empregados pelos produtores para o manejo da irrigação, pois a temperatura do ar é, dentre as variáveis meteorológicas, a de maior efeito direto e significativo sobre muitos processos fisiológicos que ocorrem na natureza, influenciando e contribuindo substancialmente para a demanda evapotranspiratória local, sendo seu conhecimento fundamental em estudos de planejamento agrícola (OLIVEIRA et al., 2010).

No entanto, entre estes, vários métodos propostos para a estimativa da ET_o é necessário verificar o poder de precisão dessa estimativa, pois geralmente, muitos métodos só podem ser aplicados em regiões onde foram originalmente desenvolvidos. A fim de verificar o grau de precisão dos métodos, os mesmo são submetidos a rigorosa avaliação de desempenho, comparando com o método de Penman-Monteith, que apresentar o melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima, sendo por isso recomendado pela FAO como padrão para a estimativa da ET_o e calibração de modelos empíricos (ALLEN et al., 1998). A principal desvantagem dessa equação é o grande número de variáveis meteorológicas necessárias para a sua aplicação, ao se considerar que muitas estações meteorológicas não têm todos os sensores necessários, os quais, mesmo quando presentes, muitas vezes, fornecem dados com baixa qualidade (DROOGERS; ALLEN, 2002). Esse fato é importante, especialmente para países em desenvolvimento, onde

conjuntos confiáveis de dados de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento nem sempre são comuns (TRAJKOVIC; KOLAKOVIC, 2009).

Segundo Allen et al. (1998) a aplicação da equação de Hargreaves e Samani (1985) é uma alternativa viável para a estimativa ETo quando há falta de parâmetros climáticos requeridos pelo modelo padrão. O modelo de Hargreaves e Samani necessita apenas dos valores de temperaturas mínima, máxima, média do ar e da radiação extraterrestre que é função da latitude e do tempo (dia). Esse método vem sendo utilizado amplamente devido a sua simplicidade e a potencialidade para calibração de seus parâmetros (BAUTISTA et al., 2009).

As mudanças do clima são passíveis de ocorrer no espaço e no tempo, muitas vezes através do transporte atmosférico de massas e devido à incidência direta da radiação solar na superfície do solo, causando mudanças nos elementos meteorológicos, no qual, o poder evapotranspirativo está intrinsecamente ligado. Isso leva a crer que a ETo também varia no espaço e no tempo. Como existem vários métodos empíricos de estimativa da ETo aplicado a cada região, no qual foi originado, é seguro, que para outras regiões a sua estimativa pode prever imprecisões, logo há necessidade de verificar-se através de exploração estatística, quais métodos empíricos de estimativa de ETo baseado na temperatura do ar, ou com ausência de dados meteorológicos apresentam possibilidade de uso para cada município.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi verificar o desempenho do método de Hargreaves-Samani e do método Penman-Monteith de estimativa da ETo diárias na ausência local de dados de umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado com auxílio dos dados meteorológicos obtidos entre o período de 01 de janeiro de 2017 a 31 de dezembro de 2017 na rede de estações da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), situado nos municípios descrito na Tabela 1. Os elementos meteorológicos coletados, em períodos diários, foram à temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar global (Tabela 2). Em geral, nas estações automáticas da rede do Inmet, as variáveis temperatura e umidade do ar são monitoradas a 2,0 m de altura, e a velocidade do vento, a 10 m de altura, na qual, foi corrigida para 2 m de altura conforme Zotarelli et al. (2015).

TABELA 1. Características das estações meteorológicas automáticas do Inmet.

Município	Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
Aquidauana	A-719	20,4754°	55,7840°	151
Bela Vista	A-757	22,1015°	56,5408°	206
Jardim	A-758	21,4785°	56,1377°	252

2.1 Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o)

2.1.1 Método padrão FAO Penman-Monteith (FAO-PM)

Recomendado pela FAO e considera a resistência estomática de 70 s m⁻¹, a altura da grama fixada em 0,12 m e albedo da vegetação de 23%, cuja estimativa se dá utilizando a Equação 1 (ALLEN et al., 1998).

$$ET_{o(PM)} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900 U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (01)$$

Em que, ET_{o(PM)} - evapotranspiração de referência pelo método PM (mm dia⁻¹); R_n - saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G - fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); Δ - declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa °C⁻¹); U₂ - velocidade média do vento a 2 m acima da superfície do solo (m s⁻¹); T - temperatura média do ar (°C); e_s - pressão de saturação de vapor (kPa); e_a - pressão atual de vapor (kPa) e γ - constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

2.2 Métodos com ausência de elementos meteorológicos

Estimativa dos dados ausentes, o boletim N°56 da FAO (FAO56) apresenta a metodologia que se deve utilizar na ausência de dados de velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar global. Quando apenas os registros de temperatura estão disponíveis, pode-se utilizar o método de Hargreaves-Samani, propostos por ALLEN et al. (1998).

2.2.4 Método de Hargreaves e Samani (1985)

O método de Hargreaves-Samani (Equação 2) pode ser uma alternativa para situações em que não se têm dados medidos de radiação solar à superfície, umidade relativa e velocidade do vento. A fração da radiação extraterrestre que efetivamente atravessa as nuvens e chega à superfície da terra é a fonte principal de energia para evapotranspiração, e estudos posteriores por parte de Hargreaves e Samani (1985) demonstraram que o seu valor pode ser estimado a partir da diferença entre as temperaturas máximas, e mínimas diárias (SHAHIDIAN et al., 2013).

$$ET_{O(HS)} = 0,0023Ra (T_x - T_n)^{0,5} (T + 17,8)0,408 \quad (02)$$

Em que, $ET_{O(HS)}$ - evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves-Samani (mm dia^{-1}); Ra - radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T_x - temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$) e T_n - temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

A radiação extraterrestre (Equação 3) no período estudado foi calculada com base na latitude local e na época do ano, através das equações citadas por Allen et al. (1998).

$$Ra = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{sc} d_r [W_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(W_s)] \quad (03)$$

Em que, G_{sc} - constante solar ($0,082 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); d_r - quadrado da distância entre o Sol e a Terra, (radiano); W_s - ângulo horário ao pôr do sol, (radiano); δ - declinação solar, (radiano); φ - latitude local, (radiano).

Sendo que d_r é calculado conforme a Equação 4.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (04)$$

Em que: J é o dias Juliano de cada ano;

A seguir estão apresentadas as equações para os cálculos de W_s e δ (Equação 5 e 6).

$$W_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (05)$$

$$\delta = 0,409 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (06)$$

2.2.1 Método de Penman-Monteith com ausência de velocidade do vento

Quando os dados de vento na região não estão disponíveis, um valor de 2 m s^{-1} pode ser usado como uma estimativa provisória. Este valor é uma média de mais de 2.000 estações meteorológicas estudadas ao redor do mundo. No presente estudo, foi adotado o valor de 2 m s^{-1} para todas as estações utilizadas (ALLEN et al., 1998).

2.2.2 Método de Penman-Monteith com ausência de umidade relativa

Na ausência de dados de umidade relativa ou quando os dados são de qualidade duvidosa, o déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$) pode ser estimado com base em dados de temperatura. Uma estimativa da pressão parcial de vapor (e_a) pode ser obtida, assumindo-se que a temperatura do ponto de orvalho (T_{po}) é próxima da temperatura mínima diária (T_n) (ALENCAR et al., 2015). Esta afirmação pressupõe implicitamente que, ao amanhecer, quando a temperatura está próxima da T_n , o ar está praticamente saturado, isto é, a umidade relativa do ar é quase 100%. Se a T_n é usada para representar T_{po} então, e_a pode ser calculado como na Equação 7.

$$e_{(T_{min})} = e_a = 0,6108 \cdot \exp\left[\frac{17,27 T_n}{(T_n + 237,3)}\right] \quad (07)$$

2.2.2 Método de Penman-Monteith com ausência de radiação solar

Bristow e Campbell (1984) propôs uma Equação (8) para calcular R_s , onde a variável principal é a temperatura de entrada, numa função exponencial da faixa de temperatura (Δt).

Onde,

$$R_s = 0,7 \left[1 - \exp(-0,005(\Delta t)^{2,4})\right] R_a \quad (08)$$

Em que, R_s = radiação solar global estimado pelo modelo Bristow-Campbell ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Para o cálculo de Δt utiliza-se a Equação 9 a seguir:

$$\Delta t = T_{xi} - \left(\frac{T_{ni} + T_{n(i+1)}}{2}\right) \quad (09)$$

Em que, T_{xi} = temperatura máxima para cada dia, onde i representa o dia específico ($^{\circ}\text{C}$); T_{ni} = temperatura mínima e, neste caso, o i também indica o dia específico ($^{\circ}\text{C}$); $T_{n(i+1)}$ = temperatura mínima e o $(i + 1)$ é um indicativo do dia seguinte ao que se estava usando para os cálculos anteriores.

TABELA 2. Valores médios de elementos meteorológicos do municípios observados.

Mês	¹ T _x	T _n	T	UR _x	UR _n	UR	U ₂	R _s
	°C			%			M s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Aquidauana								
Janeiro	33,48	22,93	28,20	94,55	50,00	72,27	0,83	22,54
Fevereiro	32,90	22,24	27,57	94,46	49,75	72,11	0,69	21,92
Março	34,21	22,85	28,53	95,06	49,10	72,08	0,51	21,69
Abril	33,56	20,33	26,95	95,27	40,70	67,98	0,32	14,57
Maiο	31,27	17,26	24,26	94,68	38,16	66,42	0,27	12,19
Junho	27,01	15,83	21,42	93,60	50,00	71,80	0,48	11,37
Julho	30,51	13,55	22,03	92,48	32,00	62,24	0,49	19,34
Agosto	28,69	15,15	21,92	87,06	38,74	62,90	0,71	16,22
Setembro	30,89	18,22	24,56	89,90	43,10	66,50	0,94	17,90
Outubro	34,78	20,64	27,71	91,16	37,71	64,44	0,90	20,93
Novembro	33,10	21,07	27,08	94,03	47,37	70,70	0,74	21,34
Dezembro	33,12	23,03	28,07	93,52	52,03	72,77	0,66	21,37
Bela Vista								
Janeiro	31,99	22,46	27,23	91,19	47,74	69,47	1,39	20,78
Fevereiro	33,03	21,42	27,22	91,81	47,94	69,88	1,25	21,69
Março	33,11	19,91	26,51	92,09	47,66	69,88	1,15	19,63
Abril	33,19	18,40	25,80	92,38	47,38	69,88	1,06	17,58
Maiο	33,28	18,57	25,93	92,40	48,10	70,25	1,23	17,31
Junho	31,70	14,90	23,30	95,00	33,00	64,00	1,21	16,45
Julho	27,21	12,54	19,88	88,68	36,94	62,81	1,62	15,18
Agosto	26,23	11,69	18,96	87,87	39,77	63,82	1,55	19,33
Setembro	29,50	15,77	22,63	89,73	41,77	65,75	1,53	19,03
Outubro	33,83	19,50	26,67	92,00	46,16	69,08	1,88	20,78
Novembro	32,02	19,32	25,67	92,10	47,73	69,92	1,43	22,41
Dezembro	32,08	22,15	27,12	91,29	47,74	69,52	1,27	21,71
Jardim								
Janeiro	32,08	23,83	27,96	94,39	52,21	73,30	1,37	18,70
Fevereiro	32,05	23,30	27,67	89,65	48,58	69,12	1,31	19,02
Março	32,65	23,88	28,26	89,58	51,00	70,29	1,47	18,21
Abril	32,84	20,46	26,65	93,40	37,30	65,35	1,04	19,40
Maiο	29,55	16,13	22,84	96,58	38,61	67,60	0,95	18,48
Junho	24,92	14,58	19,75	96,43	53,13	74,78	1,13	11,51
Julho	28,56	12,86	20,71	92,81	34,23	63,52	1,12	18,47
Agosto	27,08	13,37	20,22	90,03	39,42	64,73	1,07	14,98
Setembro	29,92	16,91	23,41	93,03	42,47	67,75	1,14	17,36
Outubro	33,13	20,13	26,63	90,29	40,03	65,16	1,35	20,85
Novembro	31,97	20,48	26,23	95,63	46,50	71,07	1,12	22,46
Dezembro	31,87	23,16	27,51	94,90	54,29	74,60	1,20	20,69

¹T_x = temperatura máxima do ar, T_n = temperatura mínima do ar, T = temperatura média do ar, UR_x = umidade relativa máxima do ar, UR_n = umidade relativa mínima do ar, UR = umidade relativa média do ar, U₂ = velocidade do vento a 2 m de altura e R_s = radiação solar global.

2.3 Avaliações dos métodos

A comparação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo diária para os três municípios foram comparados com os valores de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith, aplicando-se as seguintes estatística e indicadores: a estimativa do erro padrão (EEP) (Equação 10), foi aplicado à análise de regressão linear para determinação dos coeficientes linear e angular da reta de regressão, ($Y = a + bx$) e do coeficiente de determinação e correlação (r^2 e r respectivamente) (Equação 11 e 12). Para a exatidão dos métodos foi realizada a análise para a determinação do índice de concordância de Willmott (1981) (d) (Equação 13) e índice de desempenho (c) (equação 14), que corresponde o produto do “ r ” pelo “ d ” e interpretados conforme Camargo e Sentelhas (1997).

$$EEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (10)$$

$$r^2 = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - O)^2} \right] \quad (11)$$

$$r = \sqrt{r^2} \quad (12)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (13)$$

$$c = r d \quad (14)$$

Em que, P_i = corresponde aos valores estimados pelos métodos alviados; O_i = valores observados pelo método de Penman-Monteith; O = média dos valores observados pelo método de Penman-Monteith e n = número de observações.

O índice de desempenho “ c ” foi interpretado e distribuído nas seguintes classes (Tabela 3).

TABELA 3. Interpretação do desempenho dos métodos para a estimativa da ETo.

Valor do índice de desempenho "c"	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sofrível
0,41-0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

(CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

A indicação dos métodos de estimativa da ETo para os três municípios, foi segundo os critérios propostos por Camargo e Sentelhas (1997), sendo considerados satisfatório para o uso, os métodos com índice de desempenho “c” superiores a 0,65.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os municípios observados foi verificado os maiores valores de ETo nos meses de outubro a março e os menores valores de abril a setembro, isso se deve principalmente ao clima da região, onde a temperatura média do ar e a radiação solar apresentam maiores valores entre outubro a março e conseqüentemente correlação com a ETo.

No geral o método de HS apresentou valores de ETo sempre superiores aos demais métodos, no entanto, em todos os municípios, pôde se destacar que o método de PM_{UR} apresentou grande concordância com o método de PM, sendo seu valor EEP sempre menor que os demais, e obtendo valores próximo de zero, evidenciando baixa variabilidade dos valores de ETo ao longo do tempo.

Para o método de PM a média anual da ETo foi maior no município de Bela Vista (4,161 mm dia⁻¹), seguido de Jardim (3,908 mm dia⁻¹) e Aquidauana (3,791 mm dia⁻¹). A ETo ao longo do ano de 2017, para essa ordem dos municípios foi o total de 1519, 1426 e 1384 mm respectivamente. Em média, os valores de ETo com o método de PM em Aquidauana, entre os meses de abril a setembro, foram 18,21% e 10,86% menores que os municípios de Bela Vista e Jardim respectivamente.

3.1 Aquidauana

Verifica-se na Figura 1, o comportamento da ETo diária ao longo do ano de 2017. Nota-se que o método de HS e PM_{U2} obtiveram médias mensais sempre superior aos demais métodos avaliados. Existem relatos e várias pesquisas que evidenciam que o método de HS, superestima a ETo quando comparado com o método de PM. Originalmente, o método de HS foi desenvolvido para clima semiárido, e como se baseia apenas em dados de temperatura do ar, este método superestime a ETo em climas úmidos (SENTELHAS et al., 2010), como observado nas localidades estudadas. Já os valores superiores de ETo do PM_{U2}, pode ser explicado, que devido a ausência de dados de velocidade do vento, Allen et al. (1998) recomendam o valor médio de 2,00 m s⁻¹, contudo foi observado que a média da velocidade do vento em Aquidauana foi de 1,19 m s⁻¹, logo isso causou uma superestimativa da ETo.

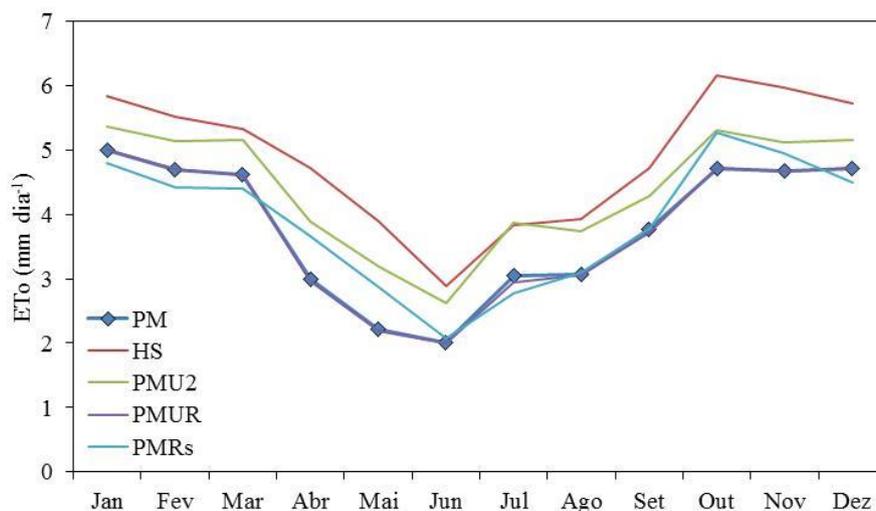


FIGURA 1. Distribuição mensal da ETo estimado pelo método e Penman-Monteith com os dados completos e com ausência de elementos meteorológicos, em Aquidauana, MS.

O emprego do método PM_{UR} foi o que apresentou menores diferenças entre o valor estimado pelo método de PM. A utilização da temperatura mínima do ar como opção para o cálculo da pressão atual de vapor foi consistente, não proporcionando potencial danos para a estimativa da ETo e assim os valores foram significativamente coincidente. Os valores da ETo com o método de PMRs, mostraram diferentes comportamentos ao longo do ano, sendo que em dezembro e de janeiro a março obteve ETo média abaixo o de PM (Figura 1).

A umidade relativa do ar assim como a radiação solar e temperatura possui grande peso sobre a evapotranspiração, mas assume um valor de correlação negativa, indicando uma relação inversa entre ETo e UR, pelo fato de que quando a ETo aumenta a UR diminui ou ao contrário, quando a ETo tende a diminuir a UR tende a aumentar (ISMAEL FILHO et al., 2015). Normalmente, à medida que a temperatura do ar decresce, ocorrem aumento na UR e queda na evapotranspiração (MEDEIROS, 2003). Em climas úmidos de regiões tropicais e apesar da elevada quantidade de energia disponível, a alta umidade relativa reduz a evapotranspiração, pois o ar está sempre próximo da saturação e assim a umidade relativa local e a temperatura do ar determinam o déficit de pressão de vapor, que é um indicador da capacidade evaporativa do ar (LEMOS FILHO et al, 2010).

Diante da precisão do modelo de 72,68%, o método de HS tende a superestimar os valores de ETo em relação ao método de PM em apenas 3,85% (Figura 2A).

Na figura 4B, observa-se a que a distribuição dos dados em relação de 1:1 obteve menor variabilidade em relação à dispersão, contribuindo para maior precisão do modelo (94,74%) e,

assim como o método de HS, o método de PM_{U2} , mostrou uma leve tendência em superestimar a ETo em 1,16%.

O método de PM_{UR} obteve modelo linear com precisão quase perfeita, sendo que o valor do coeficiente de determinação (r^2) foi na ordem de 0,997, cujo o coeficiente angular do modelo muito próximo de 1, o que confere perfeita precisão (Figura 2C).

Observa-se na Figura 2D, que a distribuição dos dados de ETo em função da R_s estimada por Bristow e Campbell (1984), apresentou maior r^2 , isso porque provavelmente a estimativa da R_s possui baixa precisão, assim como foi verificado por Oliveira et al., (2014). Analisando o coeficiente angular do modelo, verifica-se uma superestimativa da ETo em apenas 2,04% com precisão de 77,29%.

A média anual da EToPM foi $3,79 \text{ mm dia}^{-1}$, sendo que o método HS, PM_{U2} , PM_{UR} e PM_{R_s} obtiveram diferença de 1,08; 0,61; 0,01 e 0,09 mm dia^{-1} respectivamente, mas que de certa forma, são valores que representam pequenas diferenças percentuais, no entanto não descreve erros de estimativas que deve ser explicado pela EEP, no qual o método de HS obteve maior valor e o método de PM_{UR} o menor valor, vale ressaltar que a EEP quanto mais próximo de zero, mais preciso é o método (Tabela 4).

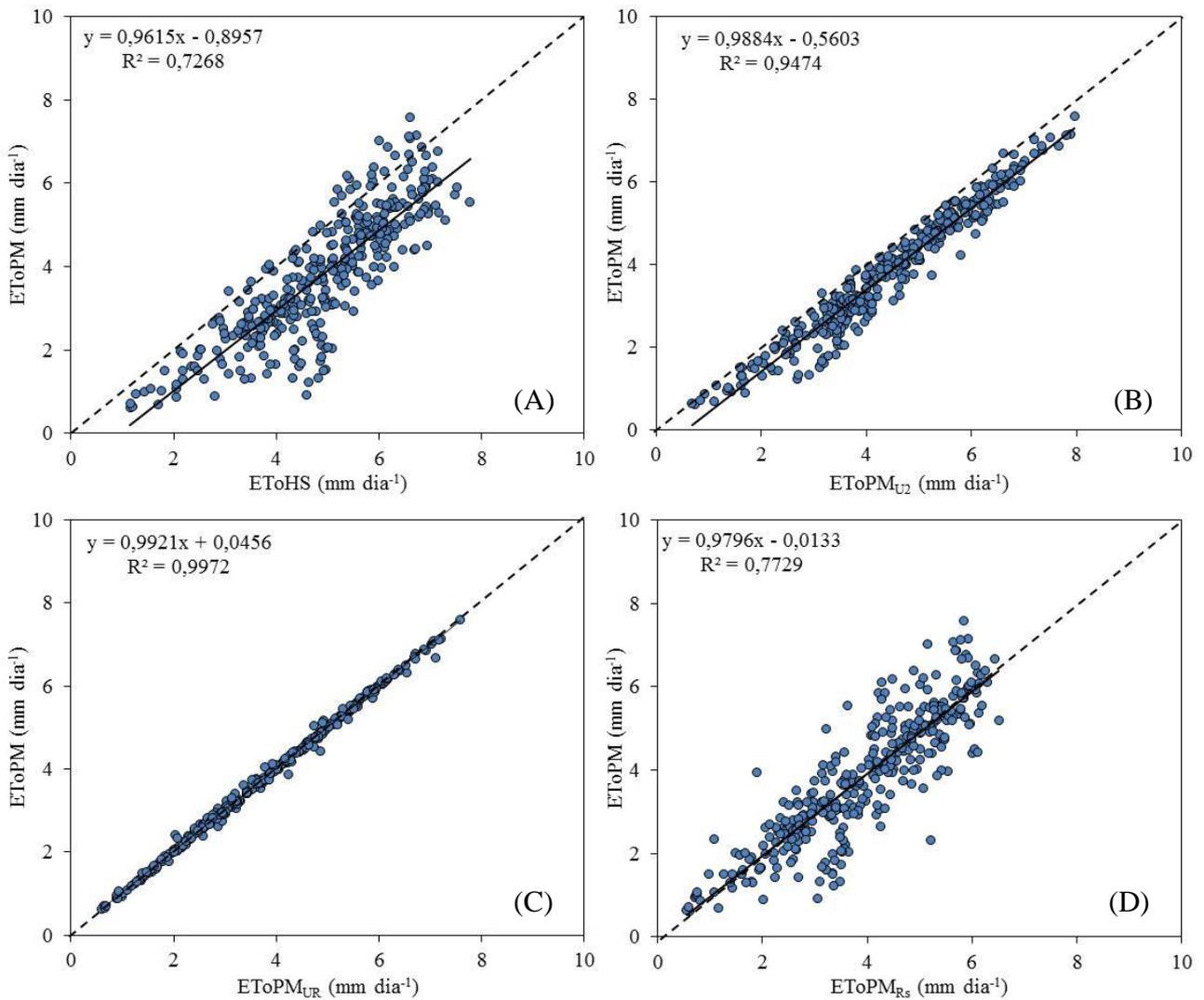


FIGURA 2. Relações entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com os dados completos e ETo estimada na ausência de dados em Aquidauana, MS.

Todos os métodos atingiram alto coeficiente de correlação (r). Em Aquidauana dois métodos atingiram índice de desempenho (c) acima de 0,85 e foram classificados como “Ótimo”, o método de PM_{U2} e o método PM_{UR} (Tabela 4). O método de HS foi classificado como “Bom” e método de PM_{RS} como “Muito bom” com “ c ” de 0,68 e 0,82 respectivamente. Vale destacar que o método de HS é baseado apenas nos valores da temperatura do ar. O método de HS vem sendo utilizado amplamente devido a sua simplicidade e a potencialidade para calibração de seus parâmetros, (BAUTISTA et al., 2009) podendo fornecer dados confiáveis da ETo para o intervalo de cinco dias ou períodos mais longos (OLIVEIRA et al., 2011).

TABELA 4. Média (mm dia^{-1}), estimativa do erro padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) estimado pelos métodos e com ausência de elementos meteorológicos, em Aquidauana, MS.

Método	ETo	EEP	r	d	c	Classificação
¹ PM	3,788	-	-	-	-	-
HS	4,871	1,345	0,853	0,794	0,677	Bom
PM _{U2}	4,400	0,704	0,973	0,947	0,922	Ótimo
PM _{UR}	3,773	0,083	0,999	0,999	0,998	Ótimo
PM _{RS}	3,881	0,730	0,879	0,932	0,819	Muito bom

¹PM = Penman-Monteith; HS = Hargreaves-Samani; PM_{U2} = Penman-Monteith com ausência de velocidade do vento; PM_{UR} = Penman-Monteith com ausência de umidade relativa; PM_{RS} = Penman-Monteith com ausência de radiação solar.

3.2 Bela Vista

Em grande parte da ETo ao longo do ano, o método de HS e de PM_{U2} apresentaram valores superiores ao do método de PM com aproximadamente 13,76% e 5,66%. Em julho foi verificado que a ETo foi a menor, com valor 2,95; 3,24; 3,17; 2,99 e 2,94 mm dia^{-1} respectivamente para os métodos de PM, HS, PM_{U2}, PM_{UR} e PM_{RS} (Figura 5). Para o método de PM a ETo foi máxima nos meses de outubro, novembro e dezembro com valor de 4,99 mm dia^{-1} .

Em Bela Vista, o método de PM_{UR} foi o que obteve menores diferenças de valores de ETo para da mês quando comparado com o PM completo, embora, o método de PMRs ter obtido o menor valor anual, com diferença percentual de 0,28%.

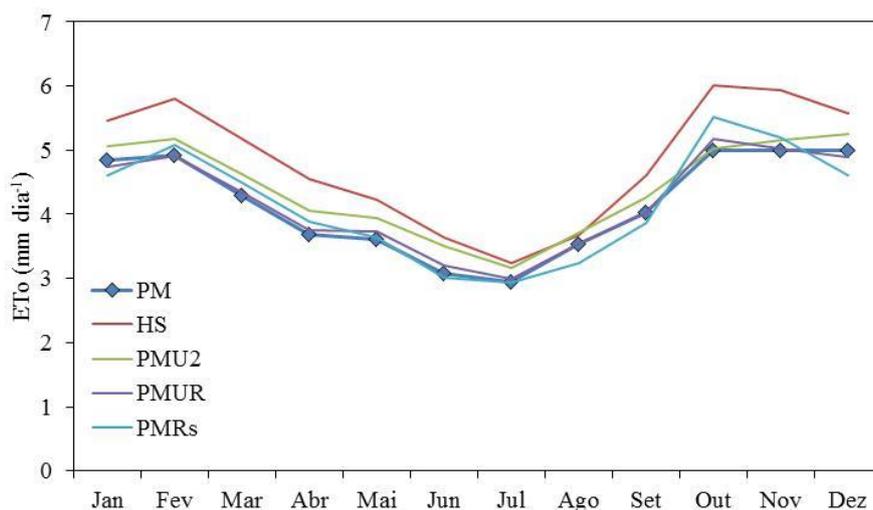


FIGURA 3. Distribuição mensal da ETo estimado pelo método e Penman-Monteith com os dados completos e com ausência de elementos meteorológicos, em Bela Vista, MS.

Na Figura 6A, analisando o modelo de regressão, verifica-se que o método de HS tende a

superestimar a ETo, quando comparado com o método de PM em 19,21%, r^2 de 0,749, no entanto, sua EEP foi a maior observado (Tabela 5). Em Bela Vista, o método de HS foi classificado como “Muito bom” com índice de desempenho de 0,76, isso devido seu alto coeficiente de correlação em índice de concordância. Já na o método de PM_{U2} mostrou ter alta precisão, sendo que seu modelo de regressão obteve coeficiente angular foi muito próximo de 1 (um), ou seja, a magnitude com o qual essa relação foi apresentada, evidencia correlação de quase perfeição (Figura 6B). Observa-se que seu EEP foi bastante baixo e quando se verifica a exatidão do método (Tabela 5), foi notado que os indicativos estatísticos como o “r” e “d” foram muito altos também, o que contribui para um desempenho classificado como “Ótimo”.

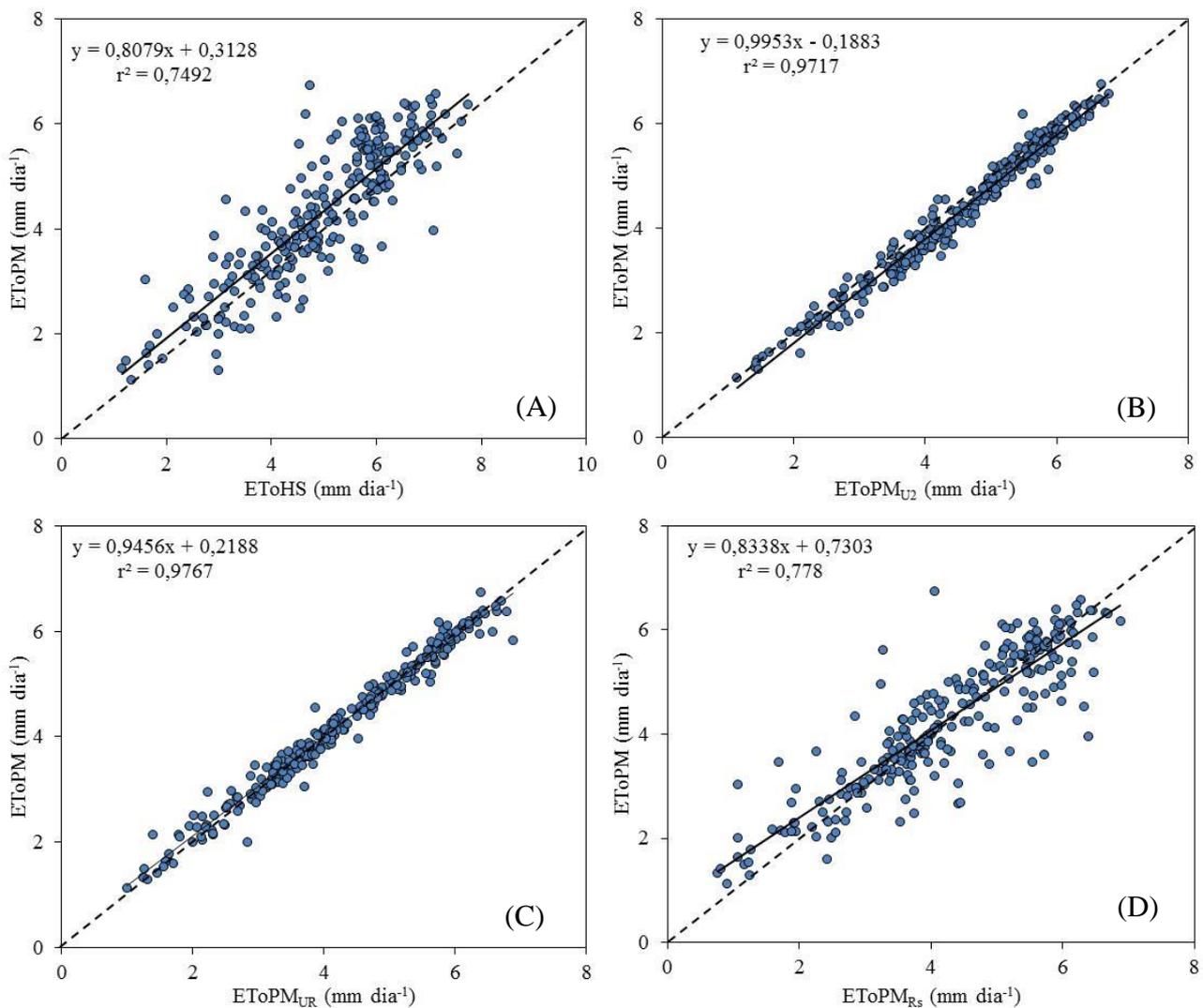


FIGURA 4. Relações entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com os dados completos e ETo estimada na ausência de dados em Bela Vista, MS.

Utilizando o método de PM_{UR} , ou seja, quando não há possibilidade de aquisição de dados de umidade relativa, observa-se na Figura 6C, que a relação entre o método padrão, apresentou modelo de regressão com alta precisão ($r^2 = 0,977$). A média da ET_o com o método PM_{UR} foi de $4,305 \text{ mm dia}^{-1}$, logo, apenas $0,015 \text{ mm dia}^{-1}$ de diferença, por isso sua EEP foi de $0,212 \text{ mm dia}^{-1}$, a menor entre os métodos testados em Bela Vista. O coeficiente de correlação foi muito alto, assim como o índice de concordância, no qual verifica-se a que reta do modelo estimado esteja bastante próximo da reta teórica da Figura 6C (reta tracejada). Diante dessas condições de precisão e exatidão o desempenho do método PM_{UR} foi classificado como “Ótimo”.

TABELA 5. Média (mm dia^{-1}), estimativa do erro padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) estimado pelos métodos e com ausência de elementos meteorológicos, em Bela Vista, MS.

Método	ET_o	EEP	r	d	c	Classificação
PM	4,290	-	-	-	-	-
HS	4,920	0,945	0,865	0,875	0,757	Muito bom
PM_{U_2}	4,499	0,303	0,986	0,986	0,972	Ótimo
PM_{UR}	4,305	0,212	0,988	0,994	0,982	Ótimo
PM_{R_s}	4,269	0,653	0,882	0,936	0,826	Muito Bom

¹PM = Penman-Monteith; HS = Hargreaves-Samani; PM_{U_2} = Penman-Monteith com ausência de velocidade do vento; PM_{UR} = Penman-Monteith com ausência de umidade relativa; PM_{R_s} = Penman-Monteith com ausência de radiação solar.

Na Figura 6D, nota-se comportamento semelhante ao da Figura 6A, a precisão do modelo estimado da relação entre o método padrão e o PM_{R_s} foi de 77,8%, com tendência em superestimar a ET_o em 16,62%. A EEP do PM_{R_s} obteve valor acima dos métodos PM_{U_2} e PM_{UR} , mas abaixo do método HS. Essa observação se dá devido o PM_{R_s} ser calculado em função da estimativa do R_s pelo método de Bristow-Campbell, que aparentemente apresenta pouca precisão para o município de Bela Vista. O método de PM_{R_s} foi classificado como “Muito bom”, puxado principalmente pelo alto valor de índice de concordância.

3.3 Jardim

Assim como os demais municípios, os valores da ET_o diária estimado pelo método de HS e do PM_{U_2} sempre estiveram acima do método de PM (Figura 7). Os menores valores da ET_o foi no mês de junho, isso claro devido aos menores valores de temperatura do ar, e a menor radiação solar incidente típico do período próximo ao solstício de inverno proveniente da latitude sul próximo de 20° . Também assim como no município de Aquidauana e Bela Vista o método de PM_{UR}

apresentou valores muito próximo ao método de PM completo. No período mais quente do ano, verifica-se que a ETo de PM apresentou valores constantes, sendo que de abril a junho os valores diminuem e a partir daí os valores tendem a subir até o mês de outubro.

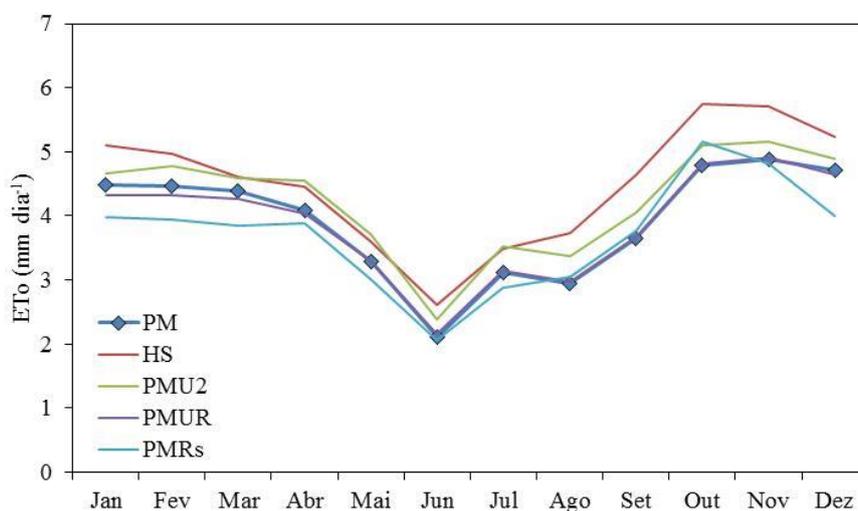


FIGURA 5. Distribuição mensal da ETo estimado pelo método e Penman-Monteith com os dados completos e com ausência de elementos meteorológicos, em Jardim, MS.

Na Figura 8A, verifica-se que a relação entre o método de PM e de HS, proporcionou uma função possui erro de 28,55% com tendência em superestimar a ETo em 9,49%. Esse resultado foi satisfatório, uma vez que o método de HS necessita apenas de dados de temperatura do ar como elementos de entrada na equação e da radiação extraterrestre que é calculado conforme Equação 3. Também foi observada diferença média anual entre o método de PM em $0,582 \text{ mm dia}^{-1}$ com EEP de $0,941 \text{ mm dia}^{-1}$, no entanto, diante dos resultados de seu “r” e “d” o mesmo foi classificado como “Bom” com índice de desempenho de 0,735 (Tabela 6).

O método PM_{U2} e PM_{UR} apresentaram pequenos erros de estimativas, ou seja, na ordem de 3,36% e 2,08% respectivamente (Figura 8B e 8C), que diante do modelo linear o método de PM_{U2} superestimou em 4,3% e o método de PM_{UR} subestimou em apenas 1,46%, evidenciando que, mesmo na ausência da informação local sobre a velocidade do vento e umidade relativa pode ser contornado adotando a metodologia proposta por Allen et al. (1998). A EEP foi de apenas 0,415 e $0,199 \text{ mm dia}^{-1}$ para o método de PM_{U2} e PM_{UR} , sendo que a ETo diária média anual obteve diferença percentual com o método PM completo na ordem de 7,70% e 0,67%, na mesma ordem anterior. Ambos os métodos apresentaram altos índices de desempenho e classificados como “Ótimo” (Tabela 6).

A precisão do modelo linear entre a relação do método de PM e PM_{R_s} foi de 76,03% com tendência a superestimativa nesse caso, superior ao método de HS (Figura 8D), deixando clara a importância da R_s obtida através de sensores instaladas no local, que mesmo com uma equação física de PM tão completa sobre o poder evapotranspirativo, não é capaz de estimar a ETo se o valor de R_s estimado não apresentar confiabilidade.

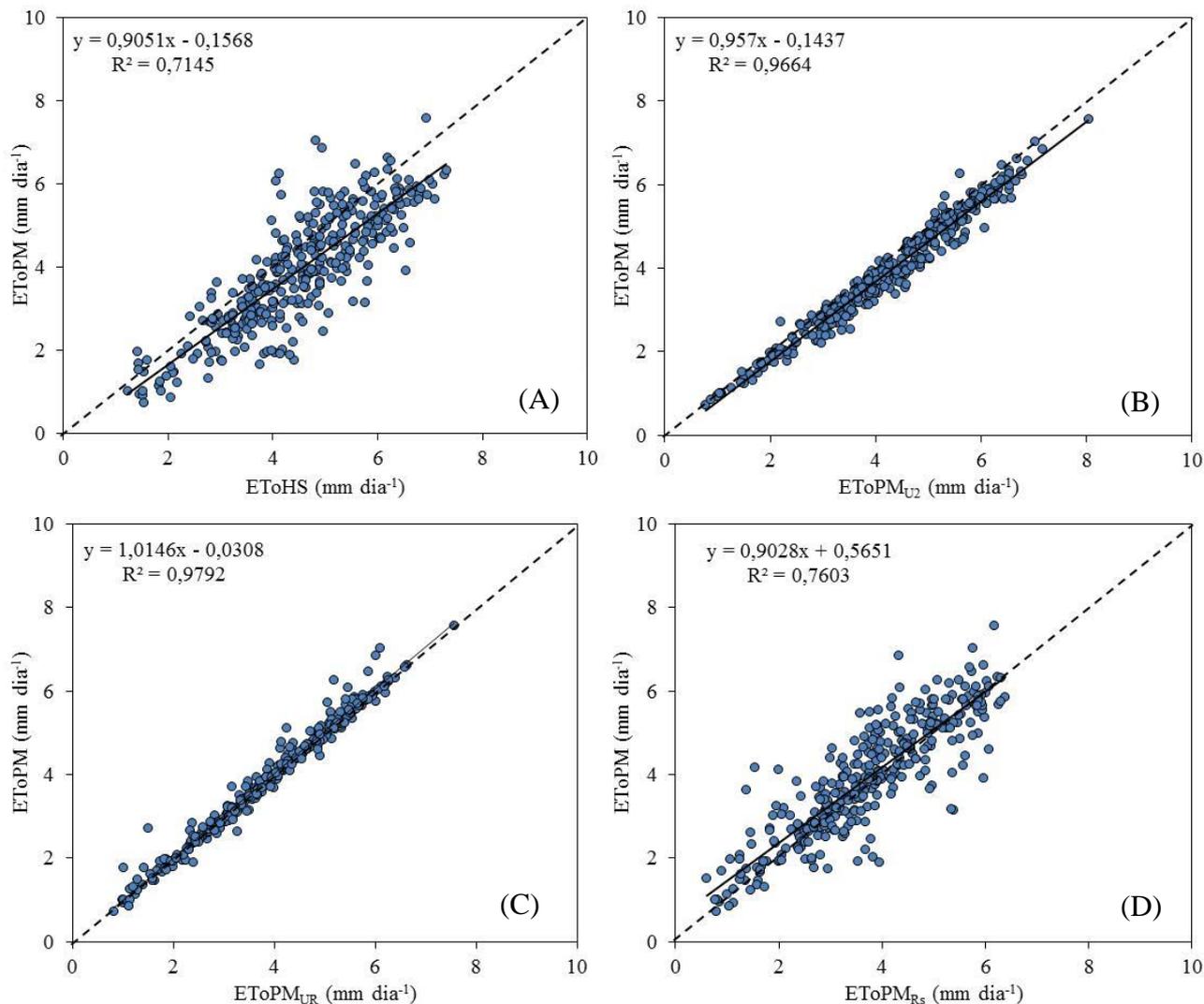


FIGURA 6. Relações entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com os dados completos e ETo estimada na ausência de dados em Jardim, MS.

TABELA 6. Média (mm dia^{-1}), estimativa do erro padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) estimado pelos métodos e com ausência de elementos meteorológicos, em Jardim, MS.

Método	ETo	EEP	r	d	c	Classificação
PM	3,898	-	-	-	-	-
HS	4,480	0,941	0,845	0,869	0,735	Bom
PM _{U2}	4,223	0,415	0,983	0,978	0,961	Ótimo
PM _{UR}	3,872	0,199	0,990	0,994	0,984	Ótimo
PM _{Rs}	3,692	0,711	0,872	0,925	0,807	Muito bom

¹PM = Penman-Monteith; HS = Hargreaves-Samani; PM_{U2} = Penman-Monteith com ausência de velocidade do vento; PM_{UR} = Penman-Monteith com ausência de umidade relativa; PM_{Rs} = Penman-Monteith com ausência de radiação solar.

O método PM_{Rs} foi o que obteve a menor média anual da Eto diária, sendo a EEP de 0,711 mm dia^{-1} , sendo que o mesmo foi classificado como “Muito bom” apresentando alto “r” e “d”, e diante da análise proposta por Camargo e Sentelhas (1997) obteve índice de desempenho de 0,807 (Tabela 6).

4. CONCLUSÕES

Os métodos de Hargreaves-Samani e de Penmam-Monteith com ausência local de radiação solar global, umidade relativa e velocidade do vento podem ser utilizados nos municípios de Aquidauana, Bela Vista e Jardim.

Nos municípios de Aquidauana, Bela Vista e Jardim, os métodos de Penmam-Monteith com ausência local umidade relativa e velocidade do vento são os mais precisos exatos na estimativa da ETo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. et al. Pan evaporation method. In: _____ **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, p. 78-85, 1998. (Irrigation and Drainage, 56).

ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G.C.; MANTOVANI, E.C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para minas gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p.39-50, 2015.

BAUTISTA, F.; BAUTISTA, D.; DELGADO, C.C. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. **Atmosfera**, v. 22, n. 4, p. 331-348, 2009.

BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, n. 2, p. 159-166, 1984.

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**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

DROOGERS, P.; ALLEN, R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 16, p. 33-45, 2002.

HARGREAVES, G. L.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. Basin. **Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE**, v. 111, n. 1, p. 113-124, 1985.

ISMAEL FILHO, A.; BORGES, P.F.; ARAUJO, L.S.; PEREIRA, A.R.; LIMA, E.M.; SILVA, L.S.; SANTOS JUNIOR, C.V. Influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração. **Gaia Scientia**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 2015.

LEMOS FILHO, L.C.A.; CARVALHO, L.G.; EVAGELISTA, A.W.P.; ALVES JUNIOR, 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.

LIMA JUNIOR, J.C.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, J.B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 447-454, 2016.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) 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**, v. 4, n. 2, p. 104-109, 2010.

OLIVEIRA, G.Q.; BISCARO, G.A.; LOPES, A.S.; JUNG, L.H. SCHWERZ, F. Comparison between global solar radiation models in Aquidauana, “Alto Pantanal” region, Brazil. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 3, p. 222-228, 2014.

OLIVIERA, G.Q.; LOPES, A.S.; JUNG, L.H.; NAGEL, P.L.; BERTOLI, D.M. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência baseadas na temperatura do ar, em Aquidauana-MS. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 3, p. 224-234, 2011.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canadá. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SHAHIDIAN, S.; SERRALHEIRO, R.P.; SERRANO, J.; TEIXEIRA, J.L. Parametric calibration of the Hargreaves-Samani equation for use at new locations hydrological processes. **Hydrological Process**, v. 27, p. 605-616, 2013.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of eference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resource Management**, v. 23, n. 14, p. 3057-3067, 2009.

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

ZOTARELLI, L.; DUKES, M. D.; ROMERO, C. C.; MIGLIACCIO, K. W.; MORGAN, K. T. **Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO-56 Method)**. Gainesville: University of Florida, 2015. 10p. (University of Florida. Document, AE459).