UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

COMPARAÇÃO DE DOIS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA DIFERENTES LOCALIDADES DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

FERNANDO VINICIUS DA ROCHA FERNANDES

THIAGO LUIZ GARCIA NANTES

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2019

COMPARAÇÃO DE DOIS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA DIFERENTES LOCALIDADES DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

FERNANDO VINICIUS DA ROCHA FERNANDES

THIAGO LUIZ GARCIA NANTES

Orientador: PROF. Dr. Lêonidas Pena de Alencar

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

F363c Fernandes, Fernando Vinícius Da Rocha
COMPARAÇÃO DE DOIS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA DIFERENTES LOCALIDADES DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL [recurso eletrônico] / Fernando Vinícius Da Rocha Fernandes, Thiago Luiz Garcia Nantes. -- 2019.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Lêonidas Pena de Alencar.
TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2019.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio

1. dados ausentes. 2. evapotranspiração de referência. 3. Penman-Monteith. I. Nantes, Thiago Luiz Garcia . II. Alencar, Lêonidas Pena De. III. 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.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2019

COMPARAÇÃO DE DOIS DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA DIFERENTES LOCALIDADES DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL

Por

Fernando Vinicius da Rocha Fernandes

Thiago Luiz Garcia Nantes

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

Aprovado em: 10 de junho de 2019.

Prof. Dr. Lêonidas Pena de Alencar
Orientador – UFGD/FCA

Prof. Dr. Guilherme Augusto Biscaro
Membro da Banca – UFGD/FCA

Prof. Dr. Arthur Carniato Sanches
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS

Eu, Fernando Vinicius da Rocha Fernandes, primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador, professor Dr. Leônidas Pena de Alencar, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Eu, Thiago Luiz Garcia Nantes, agradeço primeiramente a Deus por ser a base das minhas conquistas.

A minha família, por acreditarem em minhas escolhas, apoiando-me e esforçando-se junto a mim, para que eu suprisse todas elas.

Ao meu orientador, professor Dr. Leônidas Pena de Alencar, pela dedicação em suas orientações prestadas na elaboração deste trabalho.

E a todos colegas que direta ou indiretamente fizeram parte dessa jornada, deixo aqui meu agradecimento.

SUMÁRIO

RESUMO 4

ABSTRACT 5

1. INTRODUÇÃO 6

2. REVISÃO DE LITERATURA 8

2.1. Evapotranspiração 8

2.2.Influência dos elementos climáticos na Evapotranspiração 9

3. MATERIAL E MÉTODOS 12

3.1. Avaliação estatística dos modelos 15

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 17

5. CONCLUSÃO 20

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 21

FERNANDES, Fernando Vinicius da Rocha; NANTES, Thiago Luiz Garcia. **Comparação de dois diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração para diferentes localidades do estado de Mato Grosso do Sul**. 2019.21p, Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

A evapotranspiração é a perda de água da superfície do solo e das plantas pela combinação da evaporação com a transpiração com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade para a atmosfera. O objetivo do presente estudo foi avaliar a eficiência dos métodos de determinação da evapotranspiração de referência (HargreavesSamani e Penman-Monteith) em uma condição com apenas de temperatura máxima e mínima do ar, comparando-os com o método padrão de Penman-Monteith (FAO 56), utilizando diferentes índices estatísticos para as localidades de Cassilândia, Chapadão do Sul, Coxim e São Gabriel do Oeste localizadas no estado de Mato Grosso do Sul. Foi utilizado um conjunto de dados diários de dois anos (2015 e 2016) das temperaturas máximas e mínimas, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar. A comparação foi realizada utilizando o coeficiente de determinação, o índice de concordância de Willmott e os erros associados a cada metodologia, onde conclui-se que o cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith na ausência de dados, mostrou-se como uma alternativa para o cálculo da ETo, pois apresentou os menores valores de Viés Médio e Erro Absoluto Médio.

Palavras-chave: dados ausentes; evapotranspiração de referência; Penman-Monteith

ABSTRACT

Evapotranspiration is the loss of water from the surface of the soil and plants by combining evaporation with transpiration with any type of vegetation and under any moisture condition to the atmosphere. The objective of this study was to evaluate the efficiency of the methods of determination of the reference evapotranspiration (HargreavesSamani and Penman-Monteith with only the maximum and minimum temperature of the air), which is of great importance in the hydrological processes and irrigation management. (FAO 56), using different statistical indices for the locations of Cassilândia, Chapadão do Sul, Coxim and São Gabriel do Oeste located in the state of Mato Grosso do Sul. A set of daily data of 2 years (2015 and 2016) of maximum and minimum temperatures, wind speed, solar radiation and relative humidity. The comparison was performed using the coefficient of determination, the Willmott concordance index and the errors associated with each methodology, where it was concluded that the calculation of the ETo by the Penman-Monteith method in the absence of data, was shown as an alternative for the ETo calculation, since it presented the lowest values of VM and EAM.

Keywords: absent data; reference evapotranspiration; Penman-Monteith

1. INTRODUÇÃO

O estado do Mato Grosso do Sul é um dos grandes produtores agrícolas de grãos e importante fornecedor de alimentos para vários países, além de possuir um dos maiores rebanhos bovinos do Brasil (PRESTES, 2019).

De acordo com a pesquisa de produção do IBGE, o estado de Mato Grosso do Sul é citado como destaque na produção de milho e soja no país. Em 2017, alcançou a produção na cultura do milho de 9.821.727 toneladas, e na cultura da soja 9.101.890 toneladas (IBGE, 2018).

Tendo em vista a grande importância no cenário econômico regional e brasileiro, oriunda do seu grande potencial agrícola, estimativas precisas da evapotranspiração (ET) são essenciais para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e consequentemente avaliar o efeito do uso da terra e as mudanças na gestão dos recursos hídricos (ORTEGA-FARIAS et al., 2009).

A evapotranspiração é o fenômeno que ocorre a partir da combinação de dois processos: (1) evaporação, onde ocorre a passagem da água do estado líquido para o gasoso, em que este vapor d'água absorve a energia do meio denominada calor latente de evaporação e, (2) transpiração, que é a evaporação da água utilizada nos diversos processos metabólicos dos vegetais (SILVA et al., 2010).

A evapotranspiração está relacionada ao efeito da combinação dos elementos climáticos na atmosfera sobre as plantas, sendo estimada a partir dos elementos do clima como: radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento. Por isso uma determinação precisa da evapotranspiração da cultura é de fundamental importância para um bom manejo da irrigação (ALENCAR et al., 2011).

Como principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, a evapotranspiração exerce uma grande influência sobre os processos hidrológicos, sendo que este componente está estreitamente relacionado com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial (LIANG ET al., 2009).

Dado ao elevado número de métodos para estimativas da evapotranspiração, a FAO (Food and Agriculture Organization, sigla em inglês) com objetivo de obter um método padrão para determinação da evapotranspiração em diferentes regiões com diferentes condições climáticas, propôs a equação de Penman-Monteith como método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de referência (ETo) é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície de 70 $s.m^{-1}$ e um albedo de 0,23, considerando como superfície de referência uma cultura hipotética com altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo, porque se aproxima da evapotranspiração do padrão grama nos locais avaliados (ALLEN et al., 1998; CAI et al., 2007; GAVILAN et al., 2007; XING et al., 2008).

O uso do método de padrão requer várias informações climáticas, que podem estar ausentes devido a falhas na coleta dos operados ou dos sensores. Desse modo, Allen et al. (1998) sugerem alguns procedimentos para estimativa da ETo, na ausência de alguns dados climáticos como: umidade relativa, velocidade do vento e radiação. Estes autores também aconselham o uso da equação de Hargreaves-Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1985) como alternativa para estimar a evapotranspiração, quando se tem apenas os dados de temperatura máxima e mínima do ar, sendo que estes dados podem ser obtidos em estações meteorológicas mais simples e de menor custo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração

Define-se evapotranspiração, segundo Thornthwaite & Wilm (1944), como a perda de água da superfície do solo e das plantas pela combinação da evaporação com a transpiração com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade para a atmosfera, sendo que os principais elementos climáticos que afetam a evapotranspiração são: radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento.

Raziei & Pereira (2013) consideram que a evapotranspiração (ET) é o principal componente no balanço de água em ecossistemas agrícolas, além de ser um fator-chave nos estudos de avaliação ambiental, no manejo de bacias hidrográficas e na estimativa da necessidade hídrica das culturas.

Dingman (2002) estabelece que o termo evapotranspiração abrange todos os processos no qual a água liquida e/ou sólida transforma-se em vapor de água na superfície terrestre, incluindo a evaporação da água no dossel das plantas, corpos d'água, solos e a transpiração das plantas. Trata-se, portanto, da maior parte do ciclo hidrológico na fase terrestre que é quando está em contato com a superfícial, influenciada pela micrometeorologia, pelo teor de água no solo e aspectos fisionômicos/fisiológicos da vegetação (ALLEN et al., 1998).

De acordo com Allen et al (1998), os principais elementos climáticos que afetam a evapotranspiração são: radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento. Alguns fatores como tipo da cultura, a densidade, a variedade e a fase de crescimento também afetam a evapotranspiração, já que diferenças na resistência estomática, altura da cultura, rugosidade do dossel, refletividade e cobertura do solo pela vegetação resultam em diferentes valores de ET sob as mesmas condições climáticas e de solo.

É necessário obter estimativas precisas de evapotranspiração (ET), pois são essenciais para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar o efeito do uso da terra e as mudanças na do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica em locais onde os recursos hídricos são limitados e a irrigação é a atividade de maior consumo de água, a sua quantificação podem servir como dados de referência para o planejamento do uso dos recursos hídricos, uma vez que o consumo de água

pelas plantas está diretamente relacionada a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultura (Kc) (ORTEGA-FARIAS et al. 2009).

Com a introdução do conceito de evapotranspiração de referência (ETo) e a compreensão da possibilidade de sua estimativa a partir de dados climáticos, surgiram as fórmulas empíricas, baseadas em dados disponíveis nos postos meteorológicos. Porém, na literatura pode-se observar mais de 15 métodos de estimativa para a evapotranspiração, sendo que muitos destes métodos requerem grande quantidade de informações. É o caso do método de Penman-Monteith, considerado o método padrão de cálculo da ETo a partir de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998)

Maggiotto (1996) e Sentelhas (1998) são autores que encontraram boa correlação entre os dados obtidos em lisímetros e estimados pela equação de Penman- Monteith, comprovando a sua eficiência no cálculo da ETo.

Para o uso do método de Penman-Monteith é necessária uma maior quantidade de variáveis climáticas em relação aos outros métodos de estimativa. O uso de métodos mais simples aparecem como uma alternativa, visto que os mesmos exigem uma menor quantidade de informações e variáveis meteorológicas, como o método de Hargreaves-Samani que usa apenas dados de temperaturas mínimas e máximas.

O método de Hargreaves-Samani é um método empírico mais simples, que tem como objetivo obter a evapotranspiração baseado em dados como temperatura mínima e máxima do ar. Tal método tem sido utilizado por sua simplicidade e potencial para calibrar seus parâmetros e melhorar as estimativas.

2.2. Influência dos elementos climáticos na Evapotranspiração

Segundo Mohan & Arumugam (1996), a evapotranspiração é uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico, consistindo na ligação entre energia, clima e disponibilidade hídrica. É um fenômeno hidrológico multidimensional, uma vez que é afetada por variáveis climáticas como: precipitação, velocidade do vento, razão de insolação, umidade relativa, temperatura máxima, média e mínima.

Nas pesquisas geralmente são utilizadas as análises de regressão e correlação para ajudar na identificação da importância relativa de cada variável meteorológica na evapotranspiração de referência (ETo) (Yin et al., 2009).

Saxton (1975) afirma que para a compreensão das características de uma equação matemática ou de um modelo matemático é fundamental o entendimento de cada variável para, então, saber qual o seu papel relativo no modelo. Cada uma delas pode ser estudada individualmente com respeito à sua magnitude, variabilidade e precisão de medida. Porém, entender a importância relativa de cada variável requer a realização da análise de sensibilidade.

Uma maneira simples, mas prática de apresentar a análise de sensibilidade é traçar as mudanças relativas de uma variável dependente contra as alterações relativas de uma variável independente como uma curva, conhecido como método da curva de sensibilidade.

De acordo com Chang (1968) a radiação solar (Rs) é considerada o elemento climático de maior importância na estimativa da taxa de evapotranspiração; entretanto, em regiões onde ocorrem fortes advecções, seja local ou regional, observadas comumente quando uma área úmida é circundada por área seca, a importância relativa do saldo de radiação decresce e a advecção, ou transferência de calor sensível das áreas secas circunvizinhas, passa a contribuir significativamente no processo de evapotranspiração aumentando, neste processo, a importância da velocidade do vento e da umidade do ar.

Na equação de Penman-1963, a resposta do modelo foi mais sensível à variação da temperatura do ar do que a outras variáveis (Piper, 1989). Este autor verificou que os erros na medição da insolação, velocidade do vento e temperatura de bulbo úmido, tinham o mesmo efeito em relação a ET calculada. Já o modelo de Penman-Wright foi mais sensível a erros para as temperaturas máximas e mínimas do ar, seguido das variáveis menos sensível, radiação solar e velocidade do vento (Ley et al., 1994).

A equação de Penman-Monteith (FAO) foi mais sensível à umidade relativa do ar e menos sensível à velocidade do vento na bacia do rio Yangtze, na China (Gong et al., 2006). O modelo de Penman-Monteith (FAO) foi mais sensível ao déficit de pressão de vapor em todas as regiões dos Estados Unidos (Irmak et al., 2006). Uma vez que a sensibilidade da ETo para a mesma variável meteorológica da equação é diferente sob condições climáticas variadas, ou no mesmo local dentro de um ano (Irmak et al., 2006).

Mello (1998) destacou que, dentre os componentes da equação de PM-FAO, a radiação apresenta o maior coeficiente de sensibilidade relativa e o fluxo de calor no solo, o menor. Erros de 1,5%, comuns aos sensores de medição da velocidade do vento, transferiram erro médio de apenas 0,42% à ETo, enquanto erros de 0,4 ºC, comuns em sensores de medição de temperatura do ar, podem transferir erros de até 0,96% à ETo.

Liang et al.(2009), analisando a variação temporal da evapotranspiração de referência na bacia do Rio Taoer (China) durante os anos de 1961 a 2005, obtiveram os coeficientes de

sensibilidade para a região. Foi verificado que a ETo foi mais sensível à umidade relativa do ar, insolação, velocidade do vento e temperatura média do ar.

Xu et al., (2006b), estudando a distribuição espacial e a tendência temporal para evapotranspiração de referência e da evaporação de tanques na região do rio Yangtze na China, realizaram a análise de sensibilidade do modelo de Penman-Monteith (FAO) para as variáveis meteorológicas. Estes autores verificaram que o modelo foi mais sensível a variação da umidade relativa seguida pelo saldo de radiação, temperatura média do ar e velocidade do vento.

Irmak et al., (2006) analisaram a sensibilidade diária para 3 anos de dados, em diversas regiões dos Estados Unidos para o modelo de Penman-Monteith (FAO). Os resultados mostraram que o modelo apresentou uma baixa sensibilidade para a temperatura mínima do ar em todas as localidades e estações estudadas. O modelo foi mais sensível para o déficit de pressão do vapor, seguido da velocidade do vento, apresentando este comportamento para todas as localidades.

Yin et al., (2009), estudando os efeitos das condições climáticas, durante o período de 1961-2008, na evapotranspiração de referência, investigaram a sensibilidade das variáveis meteorológicas da equação de Penman-Monteith (FAO), para toda China. Observando o modelo foi mais sensível para a variável umidade relativa, seguida da insolação; e a menor sensibilidade foi verificada para a temperatura mínima do ar.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram utilizados dados de quatro estações meteorológicas automáticas, localizadas nas cidades de: Cassilândia, Coxim, São Gabriel do Oeste e Chapadão do Sul.

Os dados da série histórica foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para o cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith, foram utilizados dados diários da de temperaturas máxima, mínima do ar, umidade relativa máxima e mínima do ar, radiação solar e velocidade do vento. Para o cálculo da ETo, foram utilizados dados diários referentes a um período de dois anos (2015 e 2016). O tratamento de dados de clima e verificação de possíveis erros grosseiros foi realizado no Excel.

O método Penman-Monteith utiliza para a obtenção da evapotranspiração de referência diária, os dados de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação, podendo ser calculada pela equação 1 (ALLEN et al., 1998):

$$ETo = \left(\frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34u_2)}\right) \quad (1)$$

Em que,

ETo - evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

Rn - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m^{-2} d^{-1});

G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m^{-2} d^{-1});

T - temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

u2 - velocidade de vento a 2 m de altura (m s^{-1});

es - pressão de vapor de saturação (kPa);

ea - pressão parcial de vapor (kPa);

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa $°C^{-1}$); e

γ - coeficiente psicrométrico (kPa $°C^{-1}$).

Segundo Alencar et al, (2015), o método de Hargreaves-Samani é bastante utilizado por ser um dos métodos mais simples para a estimativa da evapotranspiração pois, requer apenas os dados de temperaturas máximas e mínimas do ar. Este método é uma alternativa para a estimativa da evapotranspiração, quando somente os dados de temperatura do ar são

disponíveis nas estações meteorológicas conforme proposto por Allen et al. (1998) e é dada pela equação 2:

$$ET = 0{,}0023(Tmáx - Tmín)^{0,5}\,(Tméd + 17{,}8)Ra \qquad (2)$$

Em que,

ET - Evapotranspiração , $mm.d^{-1}$;
Tmáx - temperatura máxima do dia, ºC;
Tmín - temperatura mínima do dia, ºC;
Ra - radiação extraterrestre, dependente do local e época do ano $mm\ d^{-1}$.
A Tméd - temperatura média do dia é dada pela média entre Tmáx e Tmín.

O boletim N°56 da FAO (FAO56) apresenta a metodologia que se deve utilizar na ausência de dados de velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa. Quando apenas os registros de temperatura estão disponíveis, dois procedimentos são propostos por ALLEN et al. (1998). O primeiro deles é o método de Penman-Monteith (FAO 56) com dados estimados de velocidade do vento, umidade relativa e radiação. O segundo procedimento é o método de Hargreaves-Samani.

A estimativa dos dados ausentes de velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa, para a equação de Penman Monteith, foi realizada utilizando a metodologia proposta pelo boletim N°56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

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 ($T_{mín}$). Esta afirmação pressupõe implicitamente que, ao amanhecer, quando a temperatura está próxima da $T_{mín}$, o ar está praticamente saturado, isto é, a umidade relativa do ar é quase 100%.

Se a Tmín é usada para representar T_{po} então:

$$e_a = e\,(T_{min}) = 0{,}611\,exp\left[\frac{17{,}27\,xT_{min}}{T_{min}+237{,}3}\right] \qquad (3)$$

A relação $T_{po} \approx T_{mín}$ vale para locais onde a cultura da superfície da estação climatológica é adequadamente irrigada. Contudo, particularmente em regiões áridas, o ar pode

não estar saturado, quando a temperatura está em seu mínimo; assim, a $T_{mín}$ pode ser maior do que a T_{po}. Nessa condição, uma calibração adicional pode ser necessária para estimar as temperaturas do ponto de orvalho (ALLEN et al., 1998).

Como nos locais estudados os climas são semelhantes a locais de clima úmido, a relação $T_{po} \approx T_{mín}$ pôde ser considerada.

Como a variação da velocidade média do vento em períodos mensais é relativamente baixa, os valores mensais da velocidade do vento podem ser estimados para o cálculo da ETo. As estimativas da média da velocidade do vento podem ser obtidas a partir de informações disponíveis para o clima local ou regional, mas devem-se levar em conta as alterações sazonais (ALLEN et al., 1998).

Porém, na ausência dos dados de velocidade vento na região não estão disponíveis, o boletim 56 aconselha o uso do valor de 2 m s^{-1} como uma estimativa provisória. Este valor é uma média de mais de 2.000 estações meteorológicas estudadas ao redor do mundo. Neste estudo considerou apenas o valor de 2 m s^{-1}(ALLEN et al., 1998)..

A diferença entre as temperaturas máxima e mínima está relacionada com o grau de cobertura de nuvens em um determinado local. Desta maneira, para o cálculo da radiação solar foi utilizada a proposta por HARGREAVES & SAMANI (1985), que estima a radiação solar global pela diferença das temperaturas máximas e mínimas diárias do ar. A forma ajustada e validada para várias estações em diferentes condições climáticas é:

$$R_s = k_r\sqrt{(T_{max} - T_{min})}R_a \qquad (4)$$

Em que,

Rs- é a radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}), e

kr, - o coeficiente de ajuste, valor varia de ($^oC^{-0,5}$).

Tmáx - temperatura máxima do dia, ºC;

Tmín - temperatura mínima do dia, ºC;

Ra - radiação extraterrestre, dependente do local e época do ano (MJ m^{-2} d^{-1})

O coeficiente de ajuste (k_r) varia de 0,16 a 0,19, sendo que o valor de 0,16 é utilizado para as regiões de interior e 0,19 para as regiões costeiras. No estudo, foi utilizado o valor de 0,16.

Para o cálculo da ETo pelos três diferentes métodos foi utilizado o programa REF-ET versão 4.1, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em recursos hídricos da Faculdade de Agricultura da Universidade de IDAHO (ALLEN 2000).

3.1. Avaliação estatística dos modelos

A avaliação das metodologias foi realizada comparando os valores de ETo obtidos pelo método padrão (Penman-Monteith) utilizando os dados completos, com os obtidos pela metodologia de Hargreaves Samani e o método Penman-Monteith na ausência dos dados de velocidade do vento, radiação e umidade relativa (ETo*). Para o cálculo dos índices estatísticos e processamento dos dados foi utilizado o Excel.

O desempenho dos métodos para cada localidade foi avaliado utilizando o erro absoluto médio (EAM), o viés médio (VM), o índice de concordância de Wilmott (d) e coeficiente de determinação (r^2).

O viés médio dos modelos de Hargreaves-Samani e o de Penman-Monteith com dados ausentes foram calculados pela equação 5.

$$VM = N^{-1} \sum_{i-1}^{N} (P_i - O_i) \quad (5)$$

Em que,

N - é o número de observações;

Pi - são valores estimados da ETo* (mm d^{-1}) com dados ausentes, e a ETo obtido pelo método de Hargreaves-Samani

Oi - são valores de ETo (mm d^{-1}) obtidos pelo método padrão com os dados completos.

Quando o VM é utilizado, normalmente ele é destinado para indicar o "viés" médio do modelo, ou seja, se o modelo subestima ou superestima os valores observados na média global. Os erros de cada metodologia foram calculados também pelo erro absoluto médio (EAM), dado pela equação 6.

$$EAM = N^{-1} \sum_{i=1}^{N} |P_i - O_i| \quad (6)$$

O EAM mede a magnitude média dos erros em um conjunto de predições sem considerar as direções deles (valores absolutos). Ele mede a precisão das variáveis preditas. Em outras palavras, o EAM é a média dos erros absolutos dos valores das diferenças entre os valores preditos e os valores observados correspondentes de uma amostra.

A aproximação dos valores de ETo, estimados com os dados completos, em comparação aos com os outros modelos, foi avaliada pelo índice de concordância (WILLMOTT, 1982).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}\right] \quad (7)$$

Em que,

$\bar{O}$ é a média dos valores de ETo obtida com os dados completos ($mm.d^{-1}$), sendo que este índice varia entre 0 e 1.

O índice de concordância de Willmott é uma medida de quão bem o modelo estima a proximidade dos dados à média observada, sendo que valores próximos a 1 mostram concordância perfeita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Barros, et al., (2009) a simples adoção do coeficiente de determinação (r^2) como o único critério de definição da qualidade de métodos não é adequado, uma vez que este método não estabelece o tipo e a magnitude das diferenças entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa. Assim, a análise do índice de concordância de Wilmott (d), o erro absoluto médio (EAM) e o viés médio (VM) auxiliam na interpretação dos resultados.

Na tabela 1 encontram-se os valores das análises estatísticas realizadas para o conjunto de dados de ETo, estipulada utilizando-se do método de Hargreaves-Samani e de Penman-Monteith utilizando apenas dados de temperatura máxima e mínima.

TABELA 1. Coeficiente de determinação (r^2) e índices estatísticos calculados para as comparações entre o método padrão e a ETo estimada com dados ausentes (ETo*) e o método de Hargreaves-Samani (HS) para cada localidade estudada.

Cidades	**r^2**		**VM (mm d^{-1})**		**EAM (mm d^{-1})**		**Wilmott**	
	HS	ETo*	HS	ETo*	HS	ETo*	HS	ETo*
Casssilândia	0,77	0,75	1,07	0,5	1,10	0,66	0,91	0,91
Chapadão do Sul	0,56	0,58	0,07	-0,44	0,66	0,73	0,98	0,97
São Gabriel do Oeste	0,12	0,13	1,01	0,49	1,41	1,09	0,82	0,75
Coxim	0,53	0,53	1,30	0,69	1,37	0,86	0,83	0,82
Média	0,49	0,50	0,86	0,31	1,13	0,83	0,88	0,86

VM- viés médio; EAM- erro absoluto médio

O coeficiente de determinação (r^2) variou de 0,12 a 0,77 para os métodos utilizados, indicando um coeficiente ruim para localidade de São Gabriel do Oeste, e razoável para outras localidades, apresentando assim uma fraca correlação entre os dados do método padrão e os outros métodos, uma vez que o método ideal deve apresentar valores de $r^2=1$ (ALENCAR, et al., 2015).

Os baixos valores de r^2 indicam a necessidade de ajustes regionais para os métodos a serem utilizados e um aumento no período de observação acarreta um progressivo aumento dos coeficientes de determinação (r^2), uma vez que o coeficiente de determinação é sensível a valores espúrios, ou seja, afastados da média (MENDONÇA, et al. 2003). Dentre os valores de coeficiente de determinação obtidos, a cidade de Cassilândia apresentou os valores mais alto para o método de HS (0,77) e ETo* (0,75)

Os dados obtidos de r^2 são coerentes com os valores obtido por Alencar, et al. (2015) onde compararam a ETo do método padrão de Penman-Monteith com a ETo calculada pelo método de Penman-Monteith na ausência de dados de velocidade do vento, radiação e umidade

relativa e o método de Hargreaves-Samani, para 20 localidades de Minas Gerais, e observaram valores de r^2 variando de 0,10 a 0,64, quando comparado com o método de Hargreaves_Samani. Quando comparado com os valores de com a ETo* os valores de r^2 variaram de 0,17 a 0,67.

Pela análise do viés médio (VM) verificou-se que na média, ambos os métodos superestimaram a ETo em, 0,86 e 0,31 mm d^{-1} para os métodos de HS e ETo*, respectivamente. Sendo que os maiores valores foram observados para o método de Hargreaves-Samani, na localidade de Cassilândia (1,07 mm d^{-1}) e Coxim (1,30 mm d^{-1}).

Na comparação com os métodos de ETo* e Hargreaves-Samani, apenas a cidade de Chapadão do Sul (-0,44 mm d^{-1}) houve subestimativa da ETo, sendo que esta localidade apresentou os menores valores de VM. A cidade de Coxim apresentou os maiores valores de VM, para ambos os métodos: 1,30 e 0,69 mm d^{-1}, Hargreaves-Samani e ETo*, respectivamente.

Alencar, et al., (2015) observaram valores de viés médio variando de -0,55 a 0,63 mm d^{-1}, em 20 localidades de Minas Gerais. Estes autores verificaram que para o método de HS os valores de viés médio variaram de -0,12 a 1,23 mm d^{-1}, sendo que o método de HS superestimou os dados de ETo em 19 das 20 localidades. Ainda neste estudo, as superestimativas do método de HS foram superiores ao encontrado pelo método ETo*, assemelhando-se ao presente estudo.

O EAM apresentou uma variação de 0,66 a 1,41 mm d^{-1} para o método HS com uma média de 1,13 mm d^{-1}, já o método ETo* apresentou uma variação de 0,66 a 1,09 mm d^{-1}, com uma média de 0,83 mm d^{-1}.

Alencar, et al., (2015) em seu estudo para 20 localidades de Minas Gerais, observaram valores de EAM variando de 0,47 a 1,04 mm d^{-1} para o método ETo*, com média de 0,64 mm d^{-1}. Já para o método de Hargreaves-Samani, estes autores observaram um EAM variando de 0,63 a 1,26 mm d^{-1}, com média de 0,96 mm d^{-1}. Mostrando o mesmo comportamento do método HS em apresentar maiores erros absolutos em relação ao método padrão

Originalmente, o método de Hargreaves-Samani foi desenvolvido para clima semiárido e como se baseia apenas em dados de temperatura, espera-se que este método superestime a ETo em climas úmidos como observado nas cidades estudadas (SENTELHAS et al., 2010; ADEBOYE et al., 2009; SUBBURAYAN et al., 2011).

Todas as localidades apresentam bons valores para o índice de concordância de Willmott, tanto para o método de Hargreaves-Samani (0,82 a 0,98), quanto para o método de ETo* (0,75 a 0,97). A localidade de São Gabriel do Oeste apresentou menores valores para o método HS (0,82) e ETo* (0,75), porém são valores aceitáveis. Mostrando assim, uma boa concordância entre o método padrão de Penman-Monteith com o HS e ETo*. Alencar, et al.,

(2015) em seu estudo obtiveram índice de Wilmott variando de 0,62 a 0,86 para o método de HS, e valores variando de 0,65 a 0,91 para a ETo*.

O método de Hargreaves-Samani apresenta resultados razoáveis, considerando-se que utiliza apenas dados de temperaturas máximas e mínimas, e uma solução seria ajusta uma equação linear com o método padrão (Penman-Monteith), como realizado por Trajkovic (2007).

Os pequenos erros observados de VM e EAM do método de Penman-Monteith com apenas dados de temperatura máxima e mínima (ETo*), coloca o método como uma solução bastante viável para estimativa da ETo na ausência de algum dado climático como: velocidade do vento, radiação ou umidade relativa.

Deve-se salientar também que o método de Penman-Monteith poderá apresentar melhores resultados, na ausência de um dado apenas. Nos cálculos da ETo na ausência de dados foram excluídas três variáveis (velocidade do vento, radiação, umidade relativa do ar) para o cálculo da ETo.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que a quando há disponibilidade somente de dados de temperaturas máximas e mínimas do ar, o método de Hargreaves-Samani, apresentou resultados inferiores quando comparado com o método de Penman-Monteith calculado na ausência de dados.

O método de Hargreaves-Samani apresentou os maiores valores de Viés Médio, o que dificulta a sua utilização dado o elevado erro associado, exceto para a localidade de Chapadão do Sul.

O cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith na ausência de dados, mostra-se como uma alternativa para o cálculo da ETo, uma vez que apresentou os menores valores de Viés Médio e Erro Absoluto Médio.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBOYE, O.B.; OSUNBITAN, J.A.; ADEKALU, K.O.; OKUNADE, D.A. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration using complete and limited data, application to Nigeria. **Agricultural Engeneering International**, v. 11, n. 1291, p. 1-25, 2009.

ALENCAR, L. P.; DELGADO, R.C; ALMEIDA, T.S; WANDERLEY,H.S. **Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba-MG**.Revista Brasileira de Ciências Agrárias v.6, n.2, p.337-343, abr.-jun., 2011a.

ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G. S; MANTOVANI, E. C. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos**. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, Jaboticabal, vol.35, n.1, p.39-50, jan./fev. 2015.

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

ALLEN, R. G. REF-ET: Reference evapotranspiration calculator - Version 4.1. Kimberly: Idaho University, 2000. 82p.

CAI, J.; LIU, Y.; LEI, T.; PEREIRA, L. S., **Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages**. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v. 145, p. 22-35, 2007.

CHANG, Chin-Liang. **Fuzzy topological spaces. Journal of mathematical Analysis and Applications**, v. 24, n. 1, p. 182-190, 1968.

DINGMAN, S. L. Physical Hydrology. 2. ed. Long Grove: Waveland Press, 2002.

GONG, L., XU, C. Y., CHEN, D., HALLDIN, S., & CHEN, Y. D. **Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin**. Journal of Hydrology, 329(3-4), 620-629, 2006.

GAVILAN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R. G. **Measuring versus estimating net radiaton on soil heat flux: impact on Penman-Monteith reference ET estimates in semiarid regions**. Agricultural Water Management, Amsterdam, n. 89 n. 3, p. 275-286, 2007.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. **Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture,** v. 01, n. 02, p. 96-99, 1985.

IBGE. Cidades – Mato Grosso do Sul. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ms/pesquisa/18/16459?tipo=grafico&indicador=16533>. Acesso em: 20 de mai. 2019.

IRMAK, S.; PAYERO, J. O.; MARTIN, D. L.; IRMAK, A.; HOWELL, T. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.132, n.6, p.564-578, 2006.

JEN-HU, Chang et al. **Climate and agriculture. An ecological survey. Climate and agriculture. An ecological survey.**, 1968

JU, Xiao-Tang et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 9, p. 3041-3046, 2009.

LEY, T. W.; HILL, R. W.; JENSEN, D. T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. **Transactions of the ASAE**, v. 37, n. 6, p. 1853-1861, 1994.

LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. **Temporal variation of referenceevapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer Riverbasin of Northeast China**. Agricultural and ForestMeteorology. v.150. n.2. p.298-306. 2009.

MAGGIOTTO, S. R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba, 1996. 71p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) na região norte fluminense-RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MELLO, Jorge Luiz Pimenta. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Pennan-Monteith-FAO**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. **Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: Factor analysis approach. Water Resources Management,** v. 10, n. 1, p. 1-20, 1996.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENCA, R. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling, New York, Irrigation Science, v. 28 n. 1, p. 1–3, 2009.

PIPER, B. S. Sensitivity of Penman estimates of evaporation to errors in input data. **Agricultural water management**, v. 15, n. 3, p. 279-300, 1989.

PRESTES, J. **Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar (Semagro)**. Portal do Governo de Mato Grosso do Sul. 2017. Disponível em: <*http://www.ms.gov.br/rebanho-bovino-de-ms-cresce-e-ja-supera-218-milhoes-de-cabecas/*>. Acesso em: 29 de abr. 2019.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L.S. **Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. Agricultural Water Management,** v.121, p.1-18, 2013. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.12.019.

SAXTON, Keith E. **Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation. Agricultural Meteorology**, v. 15, n. 3, p. 343-353, 1975.

SENTELHAS, P. C. et al. Análise de dados climáticos e do balanço hídrico climatológico de Piracicaba (1917-1997). **Piracicaba: USP, ESALQ, DFM**, 1998.

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 South Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p; 635-644, 2010.

SILVA, J.G.F. DA; RAMOS, H.E.A.; IGREJA, G.C.; FREITAS, R.A.; DAROCHA, G.A. **Estimativa da evapotranspiração de referênciapara o município de Marilândia – ES**. In: CongressoLatinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, 9.;Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 39., 2010,Vitória - ES. Anais. Vitória: SBEA, 2010. CD Rom.

SUBBURAYAN, S.; MURUGAPPAN, A.; MOHAN, S. **Modified Hargreaves Equation for Estimation of ETo in a Hot and Humid Location in Tamilnadu** State, India. *International Journal of Enfineering Science and Technology*, Tehran, v.3, n.1, 2011.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G**. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration**, 1943- 1944. Transactions of the American Geophysical Union, Washington, DC, v. 25, n. 5, p. 686-693, 1944.

TRAJKOVIC, S. **Hargreaves versus Penman–Monteith under humid conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** New York, v. 133, n. 1, p. 38–42., 2007.

TUCCI, Carlos EM. Hidrologia: ciência e aplicação.; 2. reimpr. **Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH**, 2001.

XING, Z.; CHOW, L.; MENG, F.R.; REES, H.W.; STEVENS, L.; MONTEITH, J., Validating evapotranspiration equations using Bowen atio in New Brunswick. Maritime Canada. **Sensors, Lausanne,** n. 8, p. 412-428, 2008.

XU, C.Y.; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, D.; SINGH, V.P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration in Changjiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v. 30. n.1-2. p. 81-93. 2006b.

YIN, Y.; WU, S.; CHEN, G.; DAI, E. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in china since the 1960s. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 101, n.1-2. p. 19-28. 2009.