

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*  
EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA - PPGEAS

**Comparação de métodos empírico-teóricos de  
estimativa de evapotranspiração de referência ao  
modelo de Penman-Monteith**

**Sérgio Soares da Silva**

**GOIÂNIA  
2017**



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**  Dissertação  Tese

**2. Identificação da Tese ou Dissertação:**

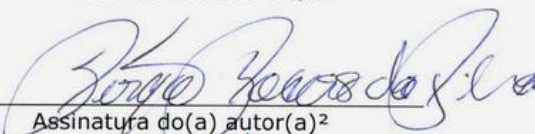
Nome completo do autor: Sérgio Soares da Silva


Título do trabalho: Comparação de métodos empírico-teóricos de estimativa de evapotranspiração de referência ao modelo de Penman-Monteith

**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM  NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:  
  
Prof. Alexandre Kepler Soares  
Escola de Engenharia Civil - UFG  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 23 / 10 / 2017

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo. Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente
- Submissão de artigo em revista científica
- Publicação como capítulo de livro
- Publicação da dissertação/tese em livro

<sup>2</sup>A assinatura deve ser escaneada.

Sérgio Soares da Silva

**Comparação de métodos empírico-teóricos de  
estimativa de evapotranspiração de referência ao  
modelo de Penman-Monteith**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Dr. Alexandre Kepler Soares.

**GOIÂNIA**

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Sérgio Soares da

Comparação de métodos empírico-teóricos de estimativa de evapotranspiração de referência ao modelo de Penman-Monteith [manuscrito] / Sérgio Soares da Silva. - 2017.

74 f.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2017.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, abreviaturas, símbolos, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Calibração. 2. Blaney-Criddle. 3. Hargreaves-Samani. 4. Penman Monteith. 5. Thornthwaite. I. Soares, Dr. Alexandre Kepler, orient. II. Título.




CDU 628.1

**ATA DE DEFESA 008/2017**

Mestrando (a): **SÉRGIO SOARES DA SILVA**

Título da Dissertação: *Comparação de métodos empírico-teóricos de estimativa de evapotranspiração de referência ao modelo de Penman-Monteith*

**2. Comissão Examinadora: (PROFESSORES DOUTORES)**

NOME	FUNÇÃO	ASSINATURA	AValiação
Alexandre Kepler Soares	Presidente/Orientador		Aprovado
Saulo Bruno Silveira e Souza (EECA)	Exam. Externo		Aprovado
José Vicente Granato de Araújo (EECA)	Suplent Exam. Externo		
Klebber Teodomiro M. Formiga (PPGEAS)	Examinador Interno		Aprovado
Joel Roberto Guimarães Vasco (PPGEAS)	Suplent Exam. Interno		

**3. Resultado:**

A Banca Examinadora, em 29/09/2017, 9 horas, na EECA - UFG, após o exame da Defesa da Dissertação e arguição do candidato, decidiu:

- Pela aprovação do(a) candidato(a) por unanimidade;
- Pela aprovação do(a) candidato(a) por maioria;
- Pela reprovação do(a) candidato(a) por unanimidade;
- Pela reprovação do(a) candidato(a) por maioria.

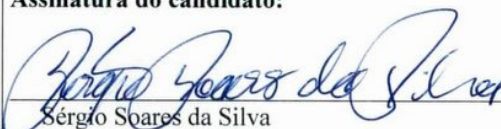
**Preencher após reformulação:**

- O(A) aluno(a) apresentou as modificações sugeridas no prazo de 30 dias e a dissertação foi aprovada;
- O(A) aluno(a) não apresentou as modificações sugeridas pela banca.

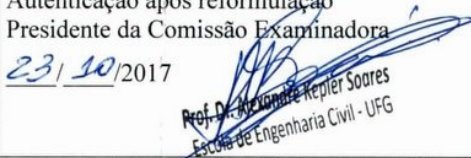
Autenticação  
Presidente da Comissão Examinadora  
29 de setembro de 2017



**Assinatura do candidato:**

  
Sérgio Soares da Silva

Autenticação após reformulação  
Presidente da Comissão Examinadora  
23/10/2017

  
Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares  
Escola de Engenharia Civil - UFG

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus pela vida, saúde física e espiritual.*

*A minha esposa Fernanda Anjos pela força e compreensão, amor e carinho.*

*Ao meu filho Pedro Anjos por me trazer alegria e ânimo para seguir em frente.*

*Aos meus pais Ezequias Rodrigues e Conceição Soares, e aos meus irmãos pelo amor e apoio.*

*Ao Professor e orientador Alexandre Kepler pela orientação e incentivo para que este trabalho fosse executado.*

*Aos colegas de trabalho por apoiar, incentivar e administrar minhas ausências com profissionalismo e competência.*

*Aos colegas do PPGEAS da UFG pelo companheirismo, solidariedade e apoio.*

*Ao Professor Klebber Formiga pelas contribuições e sugestões.*

*A todos os Professores do PPGEAS que por suas dedicações e profissionalismo tornaram esse trabalho viável.*

## RESUMO

A evapotranspiração de referência é parâmetro fundamental no cômputo do balanço hídrico de bacias hidrográficas ou região, bem como na determinação da evapotranspiração real de uma cultura ou vegetação. Este parâmetro climatológico, serve de base também para a determinação do volume e momento de irrigar uma cultura. O objetivo dessa pesquisa foi, em escala diária e mensal, avaliar o desempenho e realizar a calibração dos métodos Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle e Thornthwaite original e modificado. A verificação do desempenho desses modelos, tanto em suas formas originais quanto calibradas, foi por meio da comparação ao método de Penman-Monteith FAO 56. Para avaliar o desempenho dos métodos foram utilizados o coeficiente de correlação ( $r$ ), o índice de concordância ( $d$ ), o índice de confiança ( $c$ ), o erro absoluto médio (EAM), o erro quadrático médio (EQM), a raiz do erro quadrado médio (REQM), o erro máximo (EM) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para esta pesquisa foi utilizada uma série de dados de dez anos, de janeiro de 2007 a dezembro de 2016, sendo que os cinco primeiros anos foram utilizados para avaliar e calibrar os métodos e os últimos cinco anos utilizados para validar os métodos ajustados. Os dados meteorológicos utilizados são provenientes de uma estação convencional, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no sudoeste do estado de Goiás, mais precisamente na cidade de Jataí-GO. A validação da calibração foi realizada apenas pelos modelos de Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle, pois estes tiveram os melhores ajustes em relação ao método padrão Penman-Monteith FAO-56.

**Palavras-chave:** Calibração; Blaney-Criddle; Hargreaves-Samani; Penman-Monteith; Thornthwaite.

## **ABSTRACT**

The reference evapotranspiration is a fundamental parameter in the calculation of the water balance of watersheds or region as well as in determining the actual evapotranspiration of a crop or vegetation. This climatic parameter also serves as a basis for the determination of the volume and moment of irrigation of a crop. The objective of this research was on daily and monthly basis to evaluate the performance and perform the calibration methods of Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle and Thornthwaite original and modified. The verification of performance of the models, both in their original and calibrated forms, was by comparison to the Penman-Monteith FAO 56 method. To evaluate the performance of the methods were used the correlation coefficient ( $r$ ), the index of agreement ( $d$ ), the confidence index ( $c$ ), the mean absolute error (MAE), the mean square error (MSE), the mean square root error (RMSE), the maximum error (ME) and the coefficient of determination ( $R^2$ ). For this research, a series of data of ten years has been used from January 2007 to December 2016, and the first five years were used to evaluate and calibrate the methods and the last five years used to validate the adjusted methods. The meteorological data used come from a conventional station belonging to the National Institute of Meteorology (INMET), located in the southwest of the state of Goiás, more precisely in the city of Jataí-GO. The validation of calibration was performed only by the Hargreaves-Samani and Blaney-Criddle models, because they had the best adjustments over the standard Penman-Monteith FAO-56 method.

**Keywords:** Calibration; Blaney-Criddle; Hargreaves-Samani; Penman-Monteith; Thornthwaite.



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Duração máxima da insolação diária (Fotoperíodo-N), em horas, no 15º dia de cada mês, em latitudes compreendidas pelo território brasileiro. ....	27
Tabela 2 - Fator P do método de Blaney-Criddle, em função da latitude e da época do ano. ....	32
Tabela 3 - Critérios para interpretação do desempenho. ....	40
Tabela 4 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Thornthwaite (TW), Thornthwaite modificado (TWM), Hargreaves-Samani original (HS), e Blaney-Criddle FAO-24 original, ambos em escala diária. ....	42
Tabela 5 - Análise do desempenho e classificação de Thornthwaite calibrado (TWC), Thornthwaite modificado calibrado (TWMC), Hargreaves-Samani calibrado (HSC) e Blaney-Criddle FAO-24 Calibrado (BCC), ambos em escala diária. ....	45
Tabela 6 - Desempenho e classificação dos métodos de Thornthwaite original (TW), Thornthwaite modificado (TWM), Hargreaves-Samani original (HS) e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC), em escala mensal. ....	50
Tabela 7 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Thornthwaite calibrado (TWC), Thornthwaite modificado (TWMC), Hargreaves-Samani calibrado (HSC) e Blaney-Criddle FAO-24 calibrado (BCC), ambos em escala mensal. ....	53
Tabela 8 - Termos ajustados nos modelos de Blaney-Criddle FAO-24, Hargreaves-Samani, Thornthwaite modificado e Thornthwaite, para o município de Jataí-GO. ....	58
Tabela 9 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSC), e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC) e calibrado (BCC), em escala diária, para o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016. ....	59
Tabela 10 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSC), e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC) e calibrado (BCC), em escala mensal, para o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016. ....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da estação climatológica convencional no município de Jataí-GO.....	37
Figura 2 – (a) e (b), ETo em escala diária pelo método de Thornthwaite original; (c) e (d), Thornthwaite modificado; (e) e (f), Hargreaves-Samani original; e (g) e (h), Blaney-Criddle FAO-24 original; correlacionados ao método de Penman-Monteith FAO.....	43
Figura 3 – (a) e (b), ETo pelo método de Thornthwaite calibrado; (c) e (d), Thornthwaite modificado calibrado; (e) e (f), Hargreaves-Samani calibrado; (g) e (h), Blaney-Criddle FAO-24 calibrado, ambos em escala diária. ....	46
Figura 4 – (a) médias diárias da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas originais, alimentados com dados diários. (b) médias diárias da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas calibradas, alimentados com dados diários. ....	48
Figura 5 - (a) e (b), ETo por Thornthwaite; (c) e (d), Thornthwaite modificado; (e) e (f), ETo por Hargreaves-Samani original; (g) e (h), Blaney-Criddle FAO-24 original. Dados em escala mensal.....	51
Figura 6 - (a) e (b), ETo pelo método de Thornthwaite calibrado; (c) e (d), ETo pelo método de Thornthwaite modificado; (e) e (f), ETo pelo método de Hargreaves-Samani calibrado; (g) e (h), ETo pelo método de Blaney-Criddle FAO-24 calibrado, ambos alimentados com dados mensais.....	54
Figura 7 – (a), média diária da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas originais, alimentados com dados mensais. (b), média diária da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas calibradas, alimentados com dados mensais. ....	57
Figura 8 – Validação dos métodos com dados diários. (a) e (b), ETo Hargreaves-Samani original; (c) e (d), ETo Hargreaves-Samani calibrado; (e) e (f), ETo Blaney-Criddle FAO-24 original; (g) e (h), Blaney-Criddle FAO-24 calibrado. ....	60
Figura 9 – Validação dos métodos alimentados com médias mensais. (a) e (b), ETo Hargreaves-Samani original; (c) e (d), ETo Hargreaves-Samani calibrado; (e) e (f), ETo Blaney-Criddle FAO-24 original; (g) e (h), ETo Blaney-Criddle FAO-24 calibrado.....	63

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASCE	- Sociedade Americana de Engenheiros Civis
BC	- método de Blaney-Criddle FAO-24 original
BCC	- método de Blaney-Criddle FAO-24 calibrado
BDMEP	- banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa
Cor	- correção em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês
E	- evaporação
ET <sub>o</sub>	- evapotranspiração de referência
ET <sub>p</sub>	- evapotranspiração potencial
ET	- evapotranspiração
FAO	- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FAO-PM	- método de Penman-Monteith reconhecido pela FAO como padrão
FAO 56	- Artigo de irrigação e drenagem da FAO nº 56
HS	- método de Hargreaves-Samani original
HSC	- método de Hargreaves-Samani calibrado
IAF	- índice de área foliar
Inmet	- Instituto Nacional de Meteorologia
K <sub>c</sub>	- coeficiente da cultura
K <sub>p</sub>	- coeficiente do tanque classe A
PM	- método de Penman-Monteith
T <sub>ef</sub>	- temperatura efetiva utilizada no método de Thornthwaite modificado
TW	- método de Thornthwaite original
TWC	- método de Thornthwaite original calibrado
TWM	- método de Thornthwaite modificado
TWMC	- método de Thornthwaite modificado com temperatura efetiva calibrada

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	- amplitude térmica média diária
a	- expoente da equação de Thornthwaite que corresponde ao índice térmico regional
a	- na equação de Blaney-Criddle FAO-24, coeficiente de ajuste regional
$A_{HS}$	- coeficiente empírico da equação de Hargreaves-Samani
$a_t$	- fator da umidade relativa
b	- na equação de Blaney-Criddle FAO-24, coeficiente de ajuste regional
$B_{HS}$	- expoente empírico da equação de Hargreaves-Samani
C	- índice de confiança de Camargo
$C_{HS}$	- coeficiente empírico da equação de Hargreaves-Samani
d	- índice de exatidão adimensional de Willmott
$d_r$	- inverso da distância relativa entre a Terra e o sol
$e_a$	- pressão real de vapor
EAM	- erro absoluto médio
EM	- erro máximo
$e^0 (T_{máx})$	- pressão de saturação de vapor à temperatura máxima
$e^0 (T_{mín})$	- pressão de saturação de vapor à temperatura mínima
EQM	- erro quadrático médio
$e_s$	- pressão de vapor de saturação
G	- densidade do fluxo de calor no solo
$G_{sc}$	- constante solar
I	- índice térmico de acordo com o regime climático local
J	- é o dia do ano entre 1 (1º de janeiro) a 365 (31 de dezembro) ou 366, para ano bissexto (dia Juliano)
K	- termo de ajuste de Camargo que varia com a temperatura média anual do local
kPa	- kilopascal
n	- número de observações
n	- horas de brilho solar
N	- fotoperíodo médio do mês
ND	- número de dias do mês em análise

O	- média dos valores observados
O <sub>i</sub>	- valor de evapotranspiração observado, que no caso em tela foi o calculado pelo método de Penman-Monteith FAO
p	- na equação de Blaney-Criddle FAO-24, percentagem de horas de brilho solar diária em relação ao total anual, para um dado mês e latitude do local
P <sub>i</sub>	- valor de evapotranspiração estimada
P <sub>t</sub>	- densidade de vapor d'água saturada
r	- coeficiente de correlação de Pearson
R <sub>a</sub>	- radiação solar extraterrestre
REQM	- raiz do erro quadrado médio
R <sub>n</sub>	- radiação solar líquida, ou saldo de radiação na superfície da cultura
R <sub>nl</sub>	- saldo de radiação de onda longa
R <sub>ns</sub>	- saldo de onda curta
R <sub>s</sub>	- radiação solar global
R <sub>so</sub>	- radiação solar a céu claro
T <sub>a</sub>	- temperatura média do ar
T <sub>max</sub>	- temperatura máxima do ar
T <sub>méd</sub>	- temperatura média
T <sub>min</sub>	- temperatura mínima do ar
T <sub>n</sub>	- temperatura média mensal
U	- velocidade do vento a 10 metros
UR	- umidade relativa média
UR <sub>min</sub>	- umidade relativa mínima
U <sub>z</sub>	- velocidade do vento na altura z
U <sub>2</sub>	- velocidade do vento a dois metros de altura
W	- fator de ponderação que representa a fração da radiação solar global
ω <sub>s</sub>	- ângulo horário solar em radianos
α	- albedo da cultura de referência para o método de Penman-Monteith
α	- parâmetro de Priestley & Taylor
δ	- declinação solar em radianos
Δ	- declividade da curva de pressão de saturação e vapor da temperatura do ar
γ	- constante psicométrica
φ	- latitude em radianos
λ	- calor latente de evaporação da água

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	17
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ETP).....	18
3.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO).....	19
3.3. DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	21
3.4. MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....	22
3.5. MÉTODO DE HARGREAVES-SAMANI .....	25
3.6. MÉTODO DE THORNTHWAITE .....	26
3.7. MÉTODO DE CAMARGO .....	28
3.8. MÉTODO DE MAKKINK.....	29
3.9. MÉTODO DE PRIESTLEY & TAYLOR.....	29
3.10. MÉTODO DE TURC.....	30
3.11. MÉTODO DE HAMON .....	31
3.12. MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE FAO-24.....	31
3.13. CRITÉRIO PARA ESCOLHA DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA $ET_0$ .....	32
3.14. ALGUMAS COMPARAÇÕES ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA $ET_0$	33
3.15. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN .....	35
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	37
4.1. SÉRIE DE DADOS.....	37
4.4. CALIBRAÇÃO DOS MÉTODOS DE THORNTHWAITE, THORNTHWAITE MODIFICADO, HARGREAVES-SAMANI E BLANEY-CRIDDLE FAO-24.....	39
4.5. ESTATÍSTICA DE COMPARAÇÃO.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5.1. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS ORIGINAIS E CALIBRADOS, ALIMENTADOS COM DADOS EM ESCALA DIÁRIA .....	58
5.2. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS ORIGINAIS E CALIBRADOS, ALIMENTADOS COM DADOS EM ESCALA MENSAL .....	62
6. CONCLUSÃO.....	65
7. REFERÊNCIAS .....	67

## 1. INTRODUÇÃO

A irrigação é o principal setor usuário de água no Brasil e tem crescido a taxas médias anuais entre 4,4% a 7,3% desde a década de 1960, ultrapassando a marca de 3 (três) milhões de hectares na década de 1990, podendo ter superado os 6,1 milhões de hectares irrigados em 2014. Os pivôs centrais lideraram a expansão da irrigação mecanizada nos últimos anos (ANA, 2016). O cenário do estado de Goiás não é diferente; essa técnica vem crescendo desde a década de 1980, sendo que em 1984 o estado contava com apenas 10 equipamentos, e em 2015 já possuía instalados 3.489 pivôs, o que representa uma área irrigada de aproximadamente 242.127 hectares.

Com foco no planejamento do uso da água na agricultura, a evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (ET<sub>o</sub>) corrigida pelo coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>), serve de base para a determinação da evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>), a qual consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, previsão de safra, zoneamento agropecuário e ecológico (BACK, 2008; ORTEGA-FARIAS *et al.* 2009; FERNANDES *et al.* 2012; CONCEIÇÃO, 2013; ARAÚJO *et al.* 2014).

Ademais, a evapotranspiração tem grande influência na perda de água em bacias hidrográficas, domina o equilíbrio hídrico e exerce influência sobre os processos hidrológicos, como a dinâmica da umidade do solo, recarga de água subterrânea e escoamento superficial, portanto o entendimento das variações da evapotranspiração é de grande relevância nos estudos hidrológicos regionais. A estimativa da evapotranspiração e a quantificação de sua tendência se mostra como valiosos dados de referência para estudos regionais de modelagem hidrológica, planejamento de irrigação e gerenciamento de recursos hídricos (Liang *et al.*, 2009).

Dentre os métodos destinados à determinação da evapotranspiração de referência têm-se os diretos representados pelos lisímetros, e os indiretos constituídos por equações matemáticas. Devido às dificuldades da medição direta da evapotranspiração, bem como sua importância na gestão dos recursos hídricos, a escolha de um método que a estime com precisão e com base em variáveis climatológicas disponíveis no local de estudo é imprescindível, pois tanto as variáveis climatológicas quanto a precisão dos modelos são fatores limitantes para seus usos (JÚNIOR, *et al.* 2012).

Grande quantidade de equações foram desenvolvidas para o cômputo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em várias condições climáticas, das quais, a equação de Penman-Monteith FAO-56 (PM-FAO) é aceita como método de referência (TALAFE, 2014); sendo que este modelo envolve a interação entre os processos físicos da perda de água, parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos da planta (PALARETTI *et al.*, 2013).

O fator limitante do modelo PM-FAO é a exigência de grande quantidade de dados meteorológicos como, temperatura, umidade do ar, saldo de radiação e velocidade do vento, os quais nem sempre estão disponíveis, devido alguns postos meteorológicos medir apenas a temperatura do ar e precipitação, o que impõe o uso de modelos mais simples que requerem menos dados de entrada (BORGES JÚNIOR *et al.*, 2012; CUNHA *et al.*, 2013; MOELETSI *et al.*, 2013; TALAFE, 2014). Além disso, em alguns locais embora existam dados suficientes para o uso do método de Penman-Monteith, a série histórica de temperatura do ar é maior que as demais, neste caso, a determinação da ET<sub>o</sub> por um método que utiliza apenas a temperatura, possibilita a realização, inclusive, de balanços hídricos de longo período Back (2008).

Destaca-se, no entanto, que os métodos que utilizam apenas dados de temperatura do ar, embora sejam mais simples e de fácil aplicação são também menos precisos, necessitando ser avaliados e calibrados para as condições climáticas locais (BACK, 2008). O modelo de Hargreaves-Samani por demandar apenas dados de temperatura do ar e radiação solar é de fácil aplicação, no entanto, necessita ser calibrado localmente para obter maior exatidão nos resultados (JÚNIOR, 2017). Ademais, tanto o método de Hargreaves-Samani quanto Blaney-Criddle e Thornthwaite, são recomendados para ser utilizados quando existem apenas dados de temperatura do ar disponíveis (MAEDA *et al.*, 2011).

Os diferentes climas e condições atmosféricas existentes em cada região, causam variações nas evapotranspirações calculadas pelos diferentes métodos existentes, justificando a realização de estudos regionais e sazonais para identificar o método que mais se adequa às condições locais (HALLAL *et al.*, 2017). Portanto, a análise estatística do desempenho de métodos mais simples em relação ao padrão Penman-Monteith FAO, visando sua avaliação, consiste em estudo relevante para a aplicação mais precisa ao manejo de irrigação, simulação hidrológica e análise climática (PEREIRA, *et al.*, 2009).



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar o desempenho dos métodos de Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Hargreaves & Samani e Blaney & Criddle FAO-24 modificado, em suas formas originais e calibradas, em relação ao método Penman-Monteith FAO-56, utilizando dados de uma estação climatológica convencional localizada na cidade de Jataí - GO.

Para atingir o objetivo geral, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- avaliar o desempenho do método de Thornthwaite em sua forma original e calibrada pelo índice térmico mensal local (i) e índice térmico regional (a), ambas como variável de decisão.
- avaliar o desempenho do método de Thornthwaite modificado em sua forma original e calibrada por meio do coeficiente de ajuste K como variável de decisão, utilizando dados de temperatura efetiva.
- avaliar o desempenho do método de Hargreaves-Samani em sua forma original e calibrada pelo expoente e coeficientes empíricos como variáveis de decisão.
- avaliar o desempenho do método de Blaney-Criddle FAO-24 em sua forma original e calibrada pelas constantes do coeficiente (b) como variáveis de decisão.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura está dividida em: conceitos e histórico da evapotranspiração, principais metodologias e alguns métodos para sua determinação, principais critérios para a escolha dos métodos, alguns estudos de comparação de métodos e o conceito da classificação climática de Köppen.

A evapotranspiração consiste na ocorrência simultânea da evaporação direta da água e transpiração das plantas (Righi *et al.*, 2002). A evaporação é o processo pelo qual a água em estado líquido é convertida em vapor, podendo ser removida de superfícies como lagos, rios, solos, vegetação molhada e pavimento. A radiação solar e a temperatura do ar fornecem a energia necessária para alterar as moléculas da água do seu estado líquido para vapor e a força motriz para a evaporação é a diferença entre a pressão de vapor da água na superfície evaporante e do ar circunvizinho. No decorrer do processo de evaporação, à medida em o ar circunvizinho vai se tornando saturado, caso não ocorra sua substituição por ar mais seco o processo pode ser interrompido, a remoção desse ar úmido para a atmosfera depende da velocidade do vento. Portanto, a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento são parâmetros climatológicos a serem considerados no processo de evaporação (ALLEN *et al.*, 1998).

A transpiração consiste na vaporização da água contida nos tecidos das plantas, a qual ocorre por meio dos estômatos, quase toda a água consumida pelas plantas se perde por meio da transpiração. Os principais fatores climáticos intervenientes na transpiração são, radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento. O tipo da cultura, a densidade, a variedade e o estágio de desenvolvimento, também são fatores que interferem na transpiração (ALLEN *et al.*, 1998).

#### 3.1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ETP)

Howard Penman (1947) publicou o artigo "*Natural Evaporation from Open Water, Bare Soils and Grass*" e Thornthwaite (1948) publicou "*An Approach Towards a Rational Classification of Climate*". Essas pesquisas trouxeram contribuições relevantes para a evapotranspiração, agricultura, climatologia e hidrologia (SEDIYAMA, 1996).

Conforme Crippen (1965) o termo evapotranspiração potencial foi definida por Thornthwaite (1944). A qual se caracteriza como a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, ou seja, área coberta por vegetação em crescimento

ativo com altura uniforme e índice de área foliar (IAF) elevado, teor de água no solo mantido próximo ou na capacidade de campo. Em 1956, conforme Filho *et al.* (2011), Penman estabeleceu que a grama deveria ser a vegetação adotada como padrão, pois além de suas características, a grama é utilizada também como cobertura do solo em estações meteorológicas. No Brasil a cultura utilizada como referência é grama Batatais (*Paspalum notatum* Flüggé). Sob tais condições, a evapotranspiração ocorre como função apenas do balanço vertical de energia, ou seja, em função das condições atmosféricas sobre a vegetação, sem interferências advectivas, podendo ser estimada por métodos modelados sob embasamentos matemáticos teórico-empíricos, desenvolvidos e testados para várias condições climáticas (CARVALHO *et al.*, 2011).

A evapotranspiração potencial é um elemento meteorológico como a precipitação pluvial, representando a chuva necessária para não faltar ou sobrar água no solo. Por meio do balanço contábil entre esses dois elementos pode-se caracterizar a umidade do clima e estimar a umidade disponível no solo através do balanço hídrico climático (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). A ETp se difere da evaporação do ar obtida pelo evaporímetro de Pichè, cujos dados não são expressos em milímetros pluviométricos, não representando as condições naturais de superfície exposta como a ETp, portanto, não podem ser utilizados no balanço hídrico climatológico. A evapotranspiração potencial ocorre quando há maior disponibilidade de energia solar, enquanto que a evaporação de Pichè tem seu pico na estação seca (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

### 3.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ETO)

A demanda evaporativa da atmosfera é expressa pela evapotranspiração da cultura de referência (ETo), a qual representa a evapotranspiração de uma superfície coberta por uma cultura padronizada. Neste contexto, considerando as condições de contorno propostas por Thornthwaite, Jensen *et al.* (1971) introduziram o termo evapotranspiração de referência (ETo), aplicada à cultura de alfafa (*Medicago sativa* L.) com altura entre 0,3 m a 0,5 m, em uma determinada condição climática com área tampão de aproximadamente 100 m (FILHO *et al.*, 2011). Uma das razões que levaram à escolha da alfafa como cobertura de referência, foi devido ao porte dessa vegetação representar de forma mais fidedigna as condições aerodinâmicas de outras culturas, quando comparada ao porte rasteiro da grama (FILHO *et al.*, 2011).

A definição da evapotranspiração de referência como sendo a que ocorre em uma área gramada, com altura de 0,08 m a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrições hídricas foi introduzida por Doorenbos e Pruitt (1977). Este conceito de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) passou a substituir a evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>) em 1990, após a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) realizar uma conferência na Itália com o objetivo de definir uma nova cultura de referência e um novo método de estimativa da evapotranspiração (PEREIRA *et al.* 1997). Além da FAO promover a substituição do termo ET<sub>p</sub> por ET<sub>o</sub>, o método Penman-Monteith foi recomendado como padrão para a estimativa da ET<sub>o</sub>, o qual após parametrizado, passou a denominar-se Penman-Monteith FAO (PM-FAO).

Atualmente a Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) é definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética com 0,12 m de altura, albedo de 0,23 e resistência ao transporte de vapor da superfície da folha para a atmosfera de  $70 \text{ s m}^{-1}$  (BERNARDO & MANTOVANI, 2006). O objetivo da ET<sub>o</sub> é avaliar a demanda evaporativa da atmosfera em um local e época do ano, independente da cultura, de seu desenvolvimento, práticas de gestão adotadas e fatores do solo, este último devido à abundância de água na superfície de referência; simplificando, portanto, os cálculos para a determinação da evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998).

Ao relacionar a evapotranspiração (ET) a uma cultura específica, obtém-se uma referência que pode ser correlacionada à ET de outras culturas, não necessitando definir um nível de ET para cada cultura. Portanto, os valores da ET<sub>o</sub> medidos ou calculados em diferentes locais ou estações do ano são comparáveis, pois se referem à ET da mesma superfície de referência (ALLEN *et al.*, 1998).

O conceito de modelo para a determinação da evapotranspiração combinando os termos diabáticos (saldo de energia na superfície) e adiabáticos (processos de transferência pelos componentes aerodinâmicos) da evaporação com o mínimo de empirismo, mostrou-se uma forma conveniente de se estimar a evapotranspiração, inclusive em escala diária. Além disso, reforça o conceito inicial de evapotranspiração potencial de 1948. No entanto, ajustes foram necessários para estimativas de evapotranspiração de culturas em situações climáticas diferentes (SEDIYAMA, 1996).

Ainda conforme Sedyama (1996) seria ideal que os métodos levassem em consideração todos os fatores diretamente relacionados à evapotranspiração, como a morfologia da planta, a taxa de crescimento, estágio de crescimento, condições de solo e as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferência de energia e massa.

### 3.3. DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Determinar a evapotranspiração em condições de campo não é uma tarefa fácil, pois depende de métodos não muito práticos do ponto de vista do manejo da irrigação e práticas operacionais. Tem-se como método direto os lisímetros, os quais são classificados em três categorias: i) de drenagem; ii) de pesagem; e de lençol freático de nível constante.

Os lisímetros de drenagem são confeccionados por meio de um tanque enterrado, o qual possui várias tubulações na parte inferior destinadas a direcionar a água drenada para um recipiente visando posterior medição de seu volume (ABOUKHALED *et al.*, 1986; HOWELL *et al.*, 1991).

Os lisímetros de pesagem consistem em um tanque impermeável enterrado, sob o qual é instalada uma célula de carga, destinada a medir o peso do lisímetro, a evapotranspiração é determinada pelo balanço de massa da água diferentemente dos lisímetros sem pesagem que determinam a evapotranspiração de forma indireta pelo balanço de volume (Howell *et al.*, 1991).

Os lisímetros de lençol freático de nível constante funcionam conectados a um reservatório cujo nível da água é controlado por uma boia. O nível do lençol freático é controlado pela altura em que o reservatório se encontra em relação ao vaso contendo solo. O consumo de água é medido pelo rebaixamento do nível do tanque que alimenta o reservatório (VELLAME *et al.*, 2012).

Quando instalados e operados corretamente, os lisímetros são equipamentos de medição da evapotranspiração considerados de grande precisão (BERNARDO & MANTOVANI, 2006). Todavia, conforme (SEDIYAMA, 1996) os lisímetros apresentam dificuldades relacionadas à manutenção das condições de desenvolvimento da vegetação, pois, normalmente ela tende a crescer mais em seu interior (efeito buquê) em relação à cultivada na área externa, provocando diferenças significativas na evapotranspiração medida no interior do lisímetro em relação à medida na área circunvizinha.

Além de não muito práticos, os métodos diretos demandam altos custos, tanto para instalação quanto manutenção, o que os tornam muitas vezes inviáveis, limitando-os a usos acadêmicos, principalmente para ajustes de métodos indiretos e pesquisas para a determinação da evapotranspiração potencial da cultura (MENDONÇA *et al.*, 2003).

O tanque Classe A é um exemplo de evaporímetro destinado à determinação da evaporação (E), sendo que para obter a evapotranspiração de referência é necessário multiplicar a evaporação do tanque pelo coeficiente ( $K_p$ ), o qual é tabelado em função do clima, posicionamento do tanque em campo e tamanho da bordadura. Segundo Rassini (2001), embora o tanque Classe A seja prático, ele envolve uma gama complexa de fatores ligados à sua posição ( $K_p$  = temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, tamanho de bordadura, tipo de cobertura vegetal, entre outros) e a própria planta ( $K_c$  = morfologia, estômatos, fisiologia, refletividade, turbulência do ar envolvendo a planta). Diante de suas limitações técnicas, o tanque Classe A é um método desencorajado (Mantovani *et al.*, 2006).

Quanto aos métodos indiretos, várias formas de equações de evapotranspiração têm sido desenvolvidas e testadas, desde modelos que utilizam como dado de entrada apenas a temperatura do ar, a exemplo do método de Hargreaves-Samani (1985) e Thornthwaite, até modelos que necessitam de dados mais completos, como o modelo de Penman-Monteith (HATFIELD *et al.*, 1996; MANTOVANI *et al.*, 2006).

### 3.4. MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Este é um método combinado que consiste em associar os termos diabáticos (saldo de energia na superfície) e adiabáticos (processos de transferência pelos componentes aerodinâmicos) da evaporação. Posteriormente foi incluída a função de resistência da superfície para transferência de vapor, dando origem à equação de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998).

Em 1990 a equação de Penman-Monteith foi definida pela FAO como método padrão para estimar a evapotranspiração de referência, principalmente em escala diária (ALLEN *et al.*, 1998) devido se mostrar eficiente em diversas condições climáticas (CAMARGO & CAMARGO, 2000), isto por incluir os parâmetros aerodinâmicos e termodinâmicos, bem como a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água e a resistência da superfície à transferência de vapor d'água (BERNARDO & MANTOVANI, 2006; MANTOVANI *et al.*, 2006). Este método é recomendado pela FAO como modelo padrão, inclusive, na avaliação de outros métodos de estimativa da evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998).

O método Penman-Monteith pode ser utilizado também em base horária gerando bons resultados, para tanto é necessário ajustar a equação e alguns dos procedimentos para o cálculo de dados meteorológicos com intervalo de tempo menor. O uso da equação de Penman-Monteith FAO em base horária é recomendado para regiões onde ocorrem grandes

variações na velocidade do vento, ponto de orvalho ou nebulosidade ao longo do dia (ALLEN *et al.* 1998).

Em estudo de comparação da equação FAO Penman-Monteith em base horária com dados de lisímetros em Albacete na Espanha, usando dados de radiação líquida medidos por piranômetros, Urrea *et al.* (2006) encontraram resultados muito bons para toda a gama de valores, visto que a equação não subestimou nem superestimou as medições lisimétricas. Todavia, os valores de radiação líquida (Rn) e o fluxo de calor no solo (G) medidos ou estimados podem influenciar significativamente a precisão das estimativas da ETo, especialmente quando os cálculos estão em base horária. Já em base diária os resultados são confiáveis, essas foram as conclusões de Gavilán *et al.* (2007) em estudo realizado em regiões semiáridas na Espanha, comparando resultados do método de Penman-Monteith FAO com dados estimados por lisímetros.

O método Penman-Monteith FAO possui como referência uma cultura hipotética, cujas características se assemelham à evapotranspiração da grama. Isto permite que tais características se mantenham como parâmetros constantes adotados no cálculo. Portanto, a ETo indica a demanda hídrica das culturas de um determinado local e período (CARVALHO, *et al.*, 2011).

Por representar o fenômeno biofísico da evapotranspiração, o modelo Penman-Monteith FAO demanda quase todos os elementos meteorológicos medidos em estações de superfície (CARVALHO *et al.*, 2011), exigindo vários parâmetros de entrada, no entanto, devido algumas séries de dados conter falhas em alguns parâmetros necessários ao modelo, Allen *et al.* (1998) descreveram uma metodologia para suprir a falta de radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Todavia, a temperatura do ar é o único parâmetro que não pode ser estimado, portanto, várias metodologias de determinação da evapotranspiração foram propostas utilizando apenas este dado de entrada.

A equação 1 representa o modelo padrão FAO Penman-Monteith conforme recomendado por Allen *et al.* (1998).

$$ETP = \frac{0,408 \Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Os parâmetros da equação 1 foram calculados pelas equações 2 a 17, as quais também são recomendadas por Allen *et al.* (1998).

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_{med}}{(T_{med}+237,3)^2}\right) \right]}{(T_{med}+237,3)} \quad (2)$$

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P \quad (3)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (5)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,k^4} + T_{mix,k^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (8)$$

$$\omega_s = \arcsin[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (9)$$

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (10)$$

$$G_{mes,i} = 0,14(T_{mes,i+1} - T_{mes,i-1}) \quad (11)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) R_a \quad (12)$$

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (13)$$

$$e^0(T_{max}) = 0,6108 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot T_{max}}{T_{max} + 237,3}\right] \quad (14)$$

$$e^0(T_{min}) = 0,6108 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3}\right] \quad (15)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (16)$$

$$e_a = \frac{\left[ e^0(T_{min}) \cdot \frac{UR_{max}}{100} \right] + \left[ e^0(T_{max}) \cdot \frac{UR_{min}}{100} \right]}{2} \quad (17)$$

em que: ETo é a evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> é o saldo de radiação na superfície da cultura em (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>); G a densidade de fluxo de calor no solo em (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>); T<sub>med</sub> é a temperatura média diária em (°C); U<sub>2</sub> é a velocidade média do vento medida a 2 metros de altura (ms<sup>-1</sup>); 0,408 corresponde a 1/λ, sendo λ é o calor latente de evaporação da água, igual a 2,45 MJ. Kg<sup>-1</sup> a 20°C; γ é o coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> é a pressão de vapor de saturação em (kPa); e<sub>a</sub> é a pressão real de vapor em (kPa); Δ a tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>s</sub> é a radiação solar global; os valores de a<sub>s</sub> e b<sub>s</sub> equivalem a 0,25 e 0,50, respectivamente; R<sub>ns</sub> é o saldo de onda curta (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);



$R_{nl}$  é o saldo de radiação de onda longa ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\alpha$  é o albedo da cultura de referência (0,23);  $R_{so}$  é a radiação solar a céu claro ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $R_a$  é a radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $G_{sc}$  é a constante solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$ );  $d_r$  é o inverso da distância relativa entre a Terra e o sol;  $\omega_s$  é o ângulo horário solar (rad);  $\delta$  é a declinação solar (rad);  $\varphi$  é a latitude (rad); e  $J$  é o dia do ano entre 1 (1º de janeiro) a 365 (31 de dezembro) ou 366, para ano bissexto.

### 3.5. MÉTODO DE HARGREAVES-SAMANI

A razão entre as temperaturas máxima e mínima do ar está diretamente relacionada ao grau de cobertura de nuvens. Condições de céu claro favorecem altas temperaturas durante o dia ( $T_{max}$ ), pois a atmosfera transparente permite a entrada da radiação solar; no entanto, durante a noite a temperatura atinge o valor mínimo ( $T_{min}$ ), pois menos radiação de ondas longas é absorvida pela atmosfera. Já para condições nubladas a  $T_{max}$  é menor devido uma parte significativa da radiação solar ser interceptada e não atingir a superfície terrestre. Igualmente a  $T_{min}$  será maior, pois as nuvens reduzem a perda das ondas longas líquida, atuando como um cobertor (ALLEN *et al.*, 1998). Portanto, a diferença entre as temperaturas máxima e mínima do ar pode indicar a fração de radiação extraterrestre que atinge a superfície terrestre (OLIVEIRA, 2016). Tal princípio foi utilizado por Hargreaves e Samani (1985) no desenvolvimento da equação de estimativa da ETo, utilizando apenas dados de temperatura do ar, conforme equação 18.

$$ETo = 0,0023 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} \cdot (T_{m\acute{e}d} + 17,8) \cdot R_a \cdot 0,408 \quad (18)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm.d}^{-1}$ );  $T_{m\acute{a}x}$  a temperatura máxima diária do ar;  $T_{m\acute{i}n}$  a temperatura mínima diária do ar;  $R_a$  a radiação solar no topo da atmosfera em ( $\text{MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ), devido à radiação ser expressa em  $\text{MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para converter a evapotranspiração equivalente em  $\text{mm.d}^{-1}$  usa-se o fator de conversão que é o inverso do calor latente de vaporização ( $1/\lambda = 0,408$ ).

Allen *et al.* (1998) recomenda este método por requer apenas dados de temperatura do ar e radiação solar extraterrestre, sendo que esta última tem seu valor tabelado de acordo com a latitude do local. Destaca-se, no entanto, que esta metodologia tende a superestimar a ETo em climas úmidos e subestimar em condições de alta velocidade do vento, necessitando de uma calibração regional para o ajuste de sua precisão, a qual pode ser conseguida por meio de regressão dos valores de ETo, obtidos pelo método de Penman-Monteith (FAO) e Hargreaves-Samani, obtendo-se coeficientes de ajustes regionais que aumentam a precisão

do modelo de Hargreaves (ALLEN *et al.*, 1998; BERNARDO & MANTOVANI, 2006; MANTOVANI *et al.*, 2006; OLIVEIRA, 2016).

### 3.6. MÉTODO DE THORNTHWAITTE

O modelo de Thornthwaite foi um dos primeiros a ser desenvolvido exclusivamente para estimar a evapotranspiração potencial (PEREIRA *et al.*, 2007), em sua formulação, utiliza-se apenas a temperatura do ar como dado de entrada conforme equação 19, o que o torna muito utilizado (CAMARGO & CAMARGO, 2000; NETO *et al.*, 2010). Embora a temperatura do ar entra como índice de energia disponível para a evapotranspiração, o método de Thornthwaite assume também que este dado climatológico se correlaciona com os efeitos da radiação líquida e outros controles de evapotranspiração, assim a energia disponível é partilhada entre o aquecimento da atmosfera e a evapotranspiração (CALVO, 1986).

$$ETp = 16 \left(10 \frac{Tn}{I}\right)^a \quad (19)$$

Em que:  $Tn$  é a temperatura média mensal em °C. Sendo  $n = 1$  para janeiro;  $n = 2$  fevereiro e assim por diante; e  $I$  é o índice térmico imposto pelo regime climático local, calculado pela equação 20:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 Tn)^{1,514}, Tn > 0 \text{ °C} \quad (20)$$

o expoente ( $a$ ), da equação (19), como função de  $I$ , é um índice térmico regional, e é calculado pela equação 21:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} + 0,49239 \quad (21)$$

Nos casos em que a temperatura média mensal ( $Tn$ ) é maior ou igual a 26,5°C, a  $ETp$  deve ser calculada pela equação 22, que substitui a tabela de Thornthwaite (1948).

$$ETo = -415,85 + 32,24 \cdot Tn - 0,43 \cdot Tn^2 \quad (22)$$

Os valores da  $ETp$  calculados pelas equações 19 e 22, representam o total mensal de evapotranspiração que ocorreria naquelas condições térmicas, mas para um mês padrão de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo (THORNTHWAITTE, 1948). Para se obter a  $ETo$  do mês correspondente, os valores de  $ETp$  devem ser corrigidos em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês, equações 23 e 24.

$$\text{Cor} = \left(\frac{\text{ND}}{30}\right) \cdot \left(\frac{\text{N}}{12}\right) \tag{23}$$

$$\text{ETo}_{(\text{cor})} = \text{ETo Cor} \tag{24}$$

Em que: ND é o número de dias do mês em questão, e N o fotoperíodo médio daquele mês. Neste trabalho foi considerado o fotoperíodo do dia 15 de cada mês conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Duração máxima da insolação diária (Fotoperíodo-N), em horas, no 15º dia de cada mês, em latitudes compreendidas pelo território brasileiro.

Lat. (S)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Equador	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
2º	12.1	12.1	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1
4º	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
6º	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.6	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
8º	12.4	12.2	12.0	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
10º	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	12.0	12.2	12.5	12.6
12º	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
14º	12.7	12.4	12.1	11.7	11.3	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8
16º	12.8	12.5	12.1	11.6	11.2	11.0	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
18º	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1
20º	13.1	12.6	12.1	11.5	11.0	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2
22º	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3
24º	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.6	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5
26º	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6
28º	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8
30º	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9
35º	14.1	13.3	12.3	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.9	14.3

Fonte: Pereira *et al.* (2007).

Destaca-se, no entanto, que em condições de umidades extremas, como em regiões áridas ou muito úmidas, este modelo não fornece dados satisfatórios de evapotranspiração potencial, subestimando-a em condições de aridez e superestimando em condições de elevada umidade (CAMARGO *et al.*, 1999).

Ainda segundo Camargo *et al.* (1999), o método de Thornthwaite subestima a ETo sob condições de aridez, por não considerar a energia latente recebida por advecção de áreas secas distantes. Já em condições de umidade elevada, o método superestima a ETo por não levar em consideração a baixa energia latente do ar úmido, com baixo déficit de saturação, o que reduz a estimativa de seu poder evaporante.

No entanto, por meio do emprego de uma temperatura média efetiva ajustada em função da amplitude térmica diária, equação 25, o método de Thornthwaite pode ser ajustado para medir a ETo em condições de climas secos e superúmidos (CAMARGO & CAMARGO, 2000;

PEREIRA *et al.*, 2004). A temperatura efetiva parte do princípio de que quanto mais seca a atmosfera, maior a temperatura máxima diária e menor a temperatura mínima, causando uma maior amplitude térmica (CAMARGO *et al.*, 1999).

Pereira e Pruitt (2004), ao analisar a equação de Thornthwaite modificada em escala diária em duas áreas, uma de clima semiárido e uma de clima úmido, verificaram que com o emprego da temperatura efetiva o desempenho do referido método em comparação ao lisímetro de pesagem foi similar aos resultados encontrados pelo modelo de Penman-Monteith FAO-56. A equação de Thornthwaite modificada utilizada tinha  $k=0,69$ .

$$T_{ef} = k. ( T_n - A ) \quad (25)$$

Em que:  $T_n$  é a temperatura média e (A) a amplitude térmica média diária, conforme equações 26 e 27:

$$T_n = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad (26)$$

$$A = ( T_{max} - T_{min} ) \quad (27)$$

Sendo que:  $T_{max}$  e  $T_{min}$  são a médias mensais das temperaturas máxima e mínima ( $^{\circ}C$ ).

Substituindo as equações 26 e 27 na 25, obtém-se a equação 28, simplificada:

$$T_{ef} = 0,5. k. ( 3. T_{max} - T_{min} ) \quad (28)$$

Em que:

$k = 0,72$  conforme Camargo *et al.* (1999).

### 3.7. MÉTODO DE CAMARGO

Apresentado por Camargo (1971) este método foi desenvolvido baseando-se em resultados de evapotranspiração de referência de mais de uma centena de localidades (BORGES; MENDIONDO, 2007). Este método, trata-se de uma simplificação do modelo de Thornthwaite e pode estimar a evapotranspiração na escala diária e mensal (CARVALHO *et al.*, 2011), é de fácil aplicação e utiliza apenas a temperatura como dado de entrada (FERNANDES *et al.*, 2010). Tal modelo fornece praticamente os mesmos resultados que os obtidos por Thornthwaite original (Camargo & Camargo, 2000), equação 29:

$$ET_o = K \cdot R_a \cdot T_a \cdot ND \quad (29)$$

Em que:

- $T_a$  é a temperatura média do ar;
- $R_a$  é a radiação solar extraterrestre;
- $k$  é o fator de ajuste de Camargo que varia com a temperatura média anual do local, sendo: 0,01 para temperatura média do ar ( $T_a$ ) menor que 23,5 °C; 0,0105 para  $T_a$  de 23,6 a 24,5 °C; 0,011 para  $T_a$  24,6 a 25,5 °C; 0,0115 para  $T_a$  de 25,6 a 26,5 °C; 0,012 para  $T_a$  de 26,6 a 27,5 °C e 0,013 para  $T_a$  superior a 27,5 °C.

### 3.8. MÉTODO DE MAKKINK

Este método foi desenvolvido na Holanda em 1957 e é baseado no modelo de Penman, tem como vantagem utilizar apenas dados de temperatura e radiação solar é recomendado para regiões de clima úmido, no entanto, não obtém bons resultados em climas áridos (FERNANDES *et al.*, 2010), equação 30:

$$ET_o = (0,61 \cdot R_s \cdot W) - 0,12 \quad (30)$$

Em que:

- $R_s$  é a radiação solar global ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );
- $W$  é o fator de ponderação que representa a fração da radiação solar global, utilizada na evapotranspiração, equação 31;

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (31)$$

Em que:  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor da temperatura do ar,  $\gamma$  a constante psicométrica.

### 3.9. MÉTODO DE PRIESTLEY & TAYLOR

Este é um método obtido pela simplificação da equação de Penman, mantendo apenas o saldo de radiação corrigido por coeficiente empírico, denominado de parâmetro de Priestley & Taylor. Tal parâmetro incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração decorrente do termo aerodinâmico, tem como vantagem ser proveniente do método de Penman, mas utilizar menos variáveis climatológicas como dados de entrada. No entanto,

este é um método que em climas áridos onde ocorre a advecção da temperatura com maior intensidade, tende a subestimar os valores da evapotranspiração (FERNANDES *et al.*, 2010), equação 32.

$$ET_o = \frac{\alpha \cdot W \cdot (R_n - G)}{\lambda} \quad (32)$$

Em que:

- $\alpha$  é o parâmetro de Priestley & Taylor;
- $W$  o fator de ponderação obtido pela equação 3;
- $R_n$  o saldo de radiação solar;
- $G$  o fluxo de calor no solo; e
- $\lambda$  o calor latente que equivale a 2,45 MJ.Kg<sup>-1</sup>.

### 3.10. MÉTODO DE TURC

Conhecido como método de Turc-Radiação, para computar a  $ET_o$  utiliza dados de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa (KASHYAP; PANDA, 2001), este método foi desenvolvido no oeste europeu e apresenta como vantagem a boa capacidade de estimativa para regiões costeiras e úmidas (FERNANDES *et al.*, 2010), equação 33:

$$ET_o = a_t + 0,013 \cdot \left( \frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \left( \frac{\frac{R_s}{0,0238846} + 50}{\lambda} \right) \quad (33)$$

Em que:  $a_t$  é o fator da umidade relativa, para umidade maior ou igual a 50%,  $a_t = 1,0$ , ou calculado pela equação 34;  $R_s$  é a radiação solar global (MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>); e  $\lambda$  é o calor latente de vaporização (MJ.mm<sup>-1</sup>).

$$a_t = 1 + \frac{50 - UR}{70} \quad (34)$$

- $UR$  é a umidade relativa média.

### 3.11. MÉTODO DE HAMON

Desenvolvido por Hamon na década de 1960, este método inclui o efeito da insolação, incorporando a duração do dia, baseado na latitude e utiliza dados de temperatura do ar para obter a pressão de saturação de vapor. Por utilizar apenas dados de temperatura é um método muito simples de se aplicar, no entanto tende a superestimar a evapotranspiração em regiões de climas úmidos (FERNANDES *et al.*, 2010), equação 35:

$$ET_o = 0,55 \left( \frac{N}{12} \right)^2 \cdot P_t \quad (35)$$

Em que: N é o fotoperíodo e P<sub>t</sub> a densidade de vapor d'água saturada dada pela equação 36.

$$P_t = \frac{4,95 \exp(0,062 T_{\text{méd}})}{100} \quad (36)$$

### 3.12. MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE FAO-24

Este método foi desenvolvido na região oeste dos Estados Unidos, mais precisamente na região semiárida dos estados de Novo México e Texas.

O método de Blaney-Criddle não é recomendado para regiões onde as temperaturas são estáveis, mas outros parâmetros climáticos instáveis; para pequenas ilhas e áreas costeiras onde a temperatura do ar é afetada pela temperatura do mar com pouca resposta às estações sazonais; em altitudes elevadas devido às temperaturas diárias médias serem razoavelmente baixas; em climas com grande variabilidade no sol, horas de brilho durante os meses de transição (climas de monção, climas de latitude média durante a primavera e outono). O método de radiação é preferível para estas condições, mesmo quando os dados de luz solar ou radiação precisam ser obtidos a partir de mapas regionais ou globais na ausência de dados medidos reais (DOORENBOS e PRUITT, 1984), equação 37.

$$ET_o = a + b \cdot p \cdot (0,46 \cdot T_{\text{méd}} + 8,13) \quad (37)$$

O (a) é calculado pela equação 38 e (b) pela equação 39:

$$a = 0,0043 UR_{\text{min}} - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (38)$$

$$b = a_0 + a_1 UR_{\text{min}} + a_2 \frac{n}{N} + a_3 U_2 + a_4 UR_{\text{min}} \left( \frac{n}{N} \right) + a_5 UR_{\text{min}} U_2 \quad (39)$$

Em que:  $UR_{min}$  é a umidade relativa mínima mensal,  $n/N$  é a razão da insolação média mensal,  $U_2$  é a velocidade média do vento a 2 metros do nível do solo,  $a_0 = 0,81917$ ,  $a_1 = -0,0040922$ ,  $a_2 = 1,0705$ ,  $a_3 = 0,065649$ ,  $a_4 = -0,0059684$  e  $a_5 = -0,0005967$ .

$p$  = percentagem de horas de brilho solar diária em relação ao total anual, para um dado mês e latitude do local, conforme Tabela 2;

Tabela 2 - Fator P do método de Blaney-Criddle, em função da latitude e da época do ano.

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Norte	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Sul	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
60°	0,15	0,20	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
58°	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,40	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15
56°	0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
54°	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17
52°	0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17
50°	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18
48°	0,20	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19
46°	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20
44°	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20
42°	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
40°	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35°	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22
30°	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
25°	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20°	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15°	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10°	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5°	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0°	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Fonte: adaptado de Doorenbos e Pruitt (1977).

### 3.13. CRITÉRIO PARA ESCOLHA DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA $ET_0$

Um dos fatores para a escolha do método de estimativa da evapotranspiração de referência é a disponibilidade de dados meteorológicos, pois métodos complexos que demandam



grandes números de variáveis só terão aplicabilidade quando os dados requeridos estiverem disponíveis.

Segundo Pereira *et al.* (2007) outro fator importante para a escolha de um método de estimativa da evapotranspiração é a escala de tempo requerida. Geralmente, os métodos empíricos, como o de Thornthwaite, são razoáveis para estimar a ETo em escala mensal, enquanto que os métodos que envolvem o saldo de radiação apresentam, também, boas estimativas na escala diária. No entanto, embora existam vários métodos para a estimativa da ETo, muitos são utilizados em condições climáticas bem diferentes para as quais foram desenvolvidos, portanto, conhecer as condições climáticas de concepção dos métodos empíricos é fundamental para a boa estimativa da evapotranspiração, pois geralmente os métodos não são de aplicação universal.

### **3.14. ALGUMAS COMPARAÇÕES ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA ETo**

Tabari (2009) realizou um estudo para a avaliação dos modelos de Makkink, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves visando identificar o modelo que estime a ETo com precisão e poucos dados de entrada, para tanto foram utilizadas doze estações sinópticas em quatro tipos de climas diferentes no Irã. Os resultados demonstraram que o modelo Turc é o mais adequado para estimar ETo em climas úmidos e áridos frios. O modelo Hargreaves é o mais preciso sob condições climáticas quentes úmidas e semiáridas. Em contraste, o modelo Makkink apresentou as piores estimativas para quase todos os climas estudados, exceto para o ambiente úmido frio. Em clima frio e úmido, o modelo de Hargreaves foi o modelo menos preciso na estimativa de ETo. Em geral, os resultados obtidos no estudo evidenciaram que os modelos de Makkink e Priestley-Taylor estimam valores de ETo com menos precisão que os modelos Turc e Hargreaves para todos os climas.

Vallory *et al.* (2016) avaliaram o desempenho dos modelos de Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Thornthwaite e Camargo em comparação ao método de Penman-Monteith em escalas de tempo diária e mensal, em três municípios do estado do Rio de Janeiro. Os resultados demonstraram que os métodos de Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani apresentaram desempenhos superiores aos demais.

Silva *et al.* (2015) avaliaram o desempenho do método de Hargreaves-Samani em comparação ao padrão Penman-Monteith nas condições climáticas do estado do Ceará. Utilizaram dentre outras ferramentas estatísticas para verificar o desempenho do método, o índice de confiança (*c*) de Camargo, sendo que o maior valor encontrado foi para o município

de Iguatu, no qual obteve valor de (c) igual a 0,74, classificando o modelo como “bom”. Segundo os autores para melhorar o desempenho do método é necessário realizar a calibração dos parâmetros da equação de Hargreaves.

Neto *et al.* (2011) avaliaram o desempenho dos métodos de Hargreaves-Samani e Blaney-Cridle em comparação ao método de Penman-Monteith FAO, para várias regiões produtoras de café brasileira. Segundo os autores em todos os locais estudados, o modelo de Hargreaves-Samani obteve o melhor desempenho em relação ao padrão Penman-Monteith, sendo, portanto, recomendando, sua utilização para o manejo da irrigação em condições limitadas de disponibilidade de dados climáticos.

Lima *et al.* (2013) avaliaram e calibram o método de Hargreaves-Samani utilizando como referência o método Penman-Monteith FAO, para o município de São João no estado do Pernambuco. Ao avaliar o desempenho do método de Hargreaves-Samani em sua forma original, os autores verificaram que o modelo superestimou a ETo em todos os meses do ano, inclusive com RMSE = 1,43 mm.d<sup>-1</sup>. Após sua calibração o valor de RMSE reduziu para 0,52 mm.d<sup>-1</sup>. Portanto, os autores sugerem que para utilizar o modelo de Hargreaves-Samani na região de estudo é necessário antes, calibrá-lo.

Efthimiou *et al.* (2013) avaliaram o desempenho de nove métodos empíricos, FAO-24 Penman (1977), Turc (1961), Penman (1963), Priestley-Taylor (1972), Linacre (1977), Kimberly Penman (1982), Hargreaves-Samani (1985), Copais (2006), para a estimativa diária de ETo em comparação ao método Penman-Monteith FAO, utilizando dados de duas estações meteorológicas em Krania e Kozane, localizadas na Macedônia Ocidental, Grécia. Segundo os autores o método Priestley-Taylor apresentou a melhor correlação com o método PM-FAO56, na estação de Krania, enquanto que na estação de Kozane o método de Turc obteve os melhores resultados. Ao comparar os valores acumulados mensais de ETo, concluíram que tanto na base diária quanto mensal, todos os métodos comparados são bons durante o inverno mas mostraram desempenho fraco para o verão.

Moeletsi *et al.* (2013) compararam os métodos de Hargreaves-Samani e Thornthwaite com dados oito estações meteorológicas no semiárido da África do Sul. Os resultados da equação de Hargreaves-Samani em sua forma original tenderam a subestimar a ETo para o período de julho a dezembro, enquanto que a equação de Thornthwaite subestimou a ETo para todos os meses do ano. Os autores apontam, ainda, que as equações calibradas apresentaram desvios menores em comparação às equações originais, sendo que a equação de Hargreaves-Samani calibrada teve melhor desempenho em relação a Thornthwaite calibrada.

Portanto, concluíram que em áreas com escassez de dados, o modelo de Hargreaves-Samani é capaz de produzir resultados aceitáveis.

Júnior *et al.* (2017) avaliaram o desempenho do método de Hargreaves-Samani, em sua forma original e calibrada em base anual, semestral, trimestral e mensal, em comparação ao método padrão Penman-Monteith FAO, com base em série histórica de 86 anos, para a região de Sete Lagoas, MG. A calibração do método se deu pela minimização do erro absoluto médio (EAM) de seus coeficientes e expoente. Segundo os autores, a calibração do método anulou sua tendência de superestimativa sistemática dos valores de ETo diária, em relação ao Penman-Monteith FAO. Ademais, a calibração em diferentes bases temporais acarretou a aproximação das distribuições de probabilidade de ETo calculada por Hargreaves-Samani, que não diferem significativamente entre si, à obtida pelo método Penman-Monteith FAO.

### 3.15. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN

Conforme Pereira *et al.* (2007), uma das mais conhecidas classificações climáticas foi desenvolvida por W. Köppen, na qual são definidos cinco tipos ou grupos de clima, identificados pelas letras maiúsculas A, B, C, D e E. O clima tipo B se refere a áreas secas, enquanto que os tipos A, C e D correspondem a climas úmidos, em que os climas úmidos são definidos com base na temperatura média mensal, sendo:

- A = megatérmico (tropical úmido) com temperatura média do mês mais frio maior que 18°C;
- C = mesotérmico (temperado quente) com temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C;
- D = microtérmico (temperado frio ou boreal) com temperatura do mês mais frio menor que -3°C e do mês mais quente maior que 10°C;
- E = polar, onde todos os meses têm temperatura média menor que 10°C.

A classificação de Köppen introduz também subtipos e variedades, expressos por letras minúsculas, visando considerar a amplitude térmica anual e a distribuição sazonal das chuvas. Tais letras são incorporadas àquelas do tipo ou grupo, para constituir a fórmula climática.

Em função da faixa de latitudes e do relevo com altitudes pouco pronunciadas, o território brasileiro apresenta macroclimas do tipo A, B e C. O tipo B é representado por BSh, clima semiárido quente do sertão nordestino, com maior parte do ano seco, onde h significa temperatura média anual acima de 18°C.

Os climas megatérmicos prevalecem em grande parte do território brasileiro, com os seguintes subtipos definidos pela distribuição de chuva no ano:

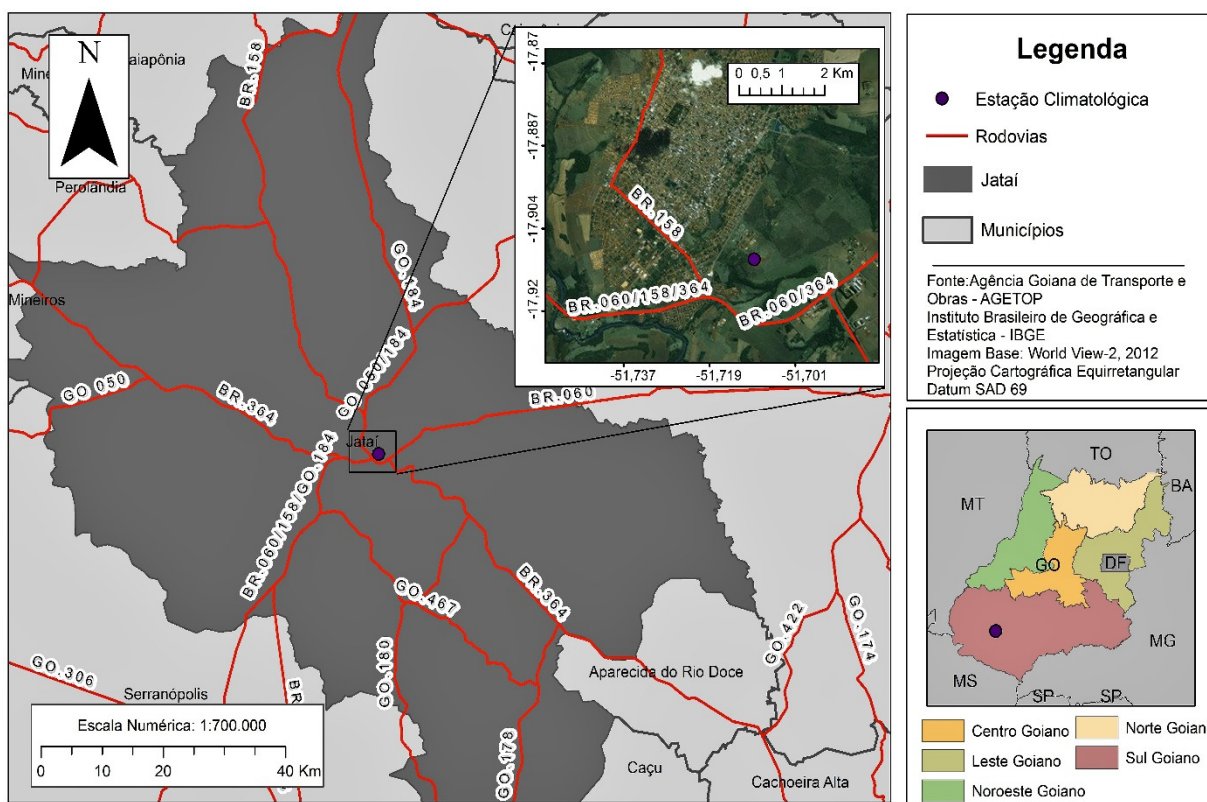
- Af = ocorrem chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e ausência de estação seca, como na Amazônia ocidental e parte do litoral sudeste;
- Am = tem uma pequena estação seca, sob influência de monções; ocorre em boa parte da Amazônia oriental;
- Aw = denominado clima de savanas, com inverno seco e chuvas máximas no verão, presente nas regiões norte, centro-oeste e parte do Sudeste;
- Aw' = idêntico ao Aw, mas com precipitação máxima no outono;
- As = precipitações de outono e inverno (estação seca no verão até outono); ocorre em parte do litoral nordestino.

A região onde se localiza a estação climatológica convencional de onde se extraiu os dados climáticos utilizados neste trabalho, tem seu clima classificado com Aw conforme Köppen. Pois o inverno é seco e as chuvas máximas ocorrem no verão.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

A região onde se localiza a estação climatológica da qual se extraiu os dados utilizados neste trabalho se caracteriza por duas estações bem definidas, o inverno que coincide com a estação seca, entre os meses de abril a setembro, e verão chuvoso que varia de outubro a março, cuja classificação conforme Köppen corresponde ao clima Aw (MARIANO, 2005). Em levantamento feito por meio de dados históricos, Vasques *et al.* (2016) apontam que a precipitação média anual no município de Jataí é de aproximadamente 1.478 mm, e a temperatura média anual varia entre 22 a 23° C (MARCUSO *et al.*, 2012).

Figura 1 - Localização da estação climatológica convencional no município de Jataí-GO.



Fonte: Agência Goiana de Transporte e Obras - AGETOP

### 4.1. SÉRIE DE DADOS

Foram utilizados dados meteorológicos diários referentes ao período de 01/01/2007 a 31/12/2016 do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), os quais pertencem à estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) localizada na cidade de Jataí-GO, latitude 8019627.90; longitude 424797.30 e altitude de 582 m.

Os dados meteorológicos utilizados foram: temperaturas máxima, mínima e média ( $T_{\text{máx}}$ ;  $T_{\text{mín}}$ ;  $T_{\text{méd}}$ , °C), horas de brilho solar ( $n$ ,  $\text{h d}^{-1}$ ), velocidade do vento a 10 m ( $U$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) e umidade relativa do ar (UR,%). A temperatura média foi obtida pela média entre a  $T_{\text{máx}}$  e  $T_{\text{mín}}$ . A velocidade do vento a 2 metros foi calculada conforme definido por Allen *et al.* (1998) equação 40:

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)} \quad (40)$$

Sendo:  $U_2$  a velocidade do vento a dois metros de altura, e  $U_z$  a velocidade do vento na altura  $z$ , que no caso em tela é de 10 m.

## 4.2. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados utilizados foram tabulados em planilha eletrônica do Excel, cuja série possuía 10 dias de falhas, a maior sequência de falhas era de três dias consecutivos. Tais falhas foram corrigidas por meio da média dos dados de seis dias, utilizando três dias anteriores e os três dias posteriores às falhas.

## 4.3. MÉTODOS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA $ETo$

O cálculo da evapotranspiração de referência utilizada como padrão foi realizado por meio do modelo de Penman-Monteith FAO-56 conforme recomendado por Allen *et al.* (1998) e apresentado na equação 1.

Os métodos avaliados e ajustados neste trabalho foram: Hargreaves-Samani, equação 18; Thornthwaite, equação 19; Thornthwaite modificado, equação 28; e Blaney-Cridle FAO-24, equação 37.

Os valores do fluxo de calor no solo ( $G$ ) para escala diária foram desconsiderados, pois conforme Allen *et al.* (1998) a magnitude do fluxo de calor do solo para períodos de um ou dez dias sob uma superfície gramada é relativamente pequena, podendo ser desconsiderada. Para escala mensal, tal parâmetro foi calculado pela equação 11, conforme recomendado por Allen *et al.* (1998). Para o cálculo de  $G$  referente ao mês de janeiro de 2007, utilizou-se a média da temperatura do mês de dezembro de 2006.

#### 4.4. CALIBRAÇÃO DOS MÉTODOS DE THORNTHWAITE, THORNTHWAITE MODIFICADO, HARGREAVES-SAMANI E BLANEY-CRIDDLE FAO-24

Os métodos de Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle FAO-24 foram calibrados com base no erro quadrado mínimo, equação 41, utilizando-se a ferramenta Solver do programa Excel.

$$EQM = \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \quad (41)$$

Em que: N é o número de pares de dados;  $P_i$  é o valor da ETo estimada pelo método avaliado em  $\text{mm.d}^{-1}$ ; e  $O_i$  é o valor da ETo estimada pelo método padrão Penman-Monteith FAO-56 em  $\text{mm.d}^{-1}$ .

O ajuste do método de Thornthwaite foi realizado por meio do coeficiente 0,2 e do expoente 1,514 do índice térmico mensal local (i); e da constante 0,49239 do índice térmico regional (a).

O ajuste do método de Thornthwaite modificado se deu por meio do coeficiente de ajuste k da temperatura efetiva.

O ajuste do método de Hargreaves-Samani se deu por meio da calibração dos coeficientes  $A_{HS}$  e  $C_{HS}$ , e do expoente  $B_{HS}$ .

O método de Blaney-Criddle FAO-24 foi ajustado por meio das constantes:  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  e  $a_5$  do coeficiente (b).

#### 4.5. ESTATÍSTICA DE COMPARAÇÃO

As comparações dos desempenhos dos modelos de Thornthwaite original (TW), Thornthwaite calibrado (TWC), Thornthwaite modificado (TWM), Thornthwaite modificado com temperatura efetiva calibrada (TWMC), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSC), e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC) e calibrado (BCC) em relação ao modelo de Penman-Monteith (FAO-PM), foram realizadas pelos seguintes indicadores estatísticos: i) índice de Willmott, que representa a concordância ou exatidão ( $d$ ), o qual é definido pela equação 42; ii) coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), equação 43; iii) índice ( $c$ ) que representa a confiança ou desempenho do método, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), equação 44; iv) erro absoluto médio (EAM), equação 45; erro quadrado médio (EQM), equação 46; raiz quadrada

do erro quadrado médio (REQM), equação 47; erro máximo (EM), equação 48 e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \tag{42}$$

Em que: ( $d$ ) é o índice de exatidão, adimensional. Os valores de ( $d$ ) podem variar de 0, para nenhuma concordância, a 1, para concordância perfeita; ( $P_i$ ) é o valor da ETo estimada; ( $O_i$ ) o valor da ETo observada, que no caso dessa pesquisa é o valor calculado pelo método padrão Penman-Monteith FAO; ( $O$ ) a média dos valores da ETo observada; ( $n$ ) o número de observações.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O) * (P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \tag{43}$$

Em que:  $r$  é coeficiente de correlação de Pearson, adimensional;  $P$  a média dos valores da ETo estimada.

$$C = r * d \tag{44}$$

Por meio do índice  $C$  da equação 44, pode-se definir o desempenho do modelo em relação ao padrão, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios para interpretação do desempenho.

Valor de C	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mal
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \tag{45}$$

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \tag{46}$$

$$REQM = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(P_i - O_i)^2}}{N} \tag{47}$$



$$EM = \max (|O_i - P_i|)_i^n \quad (48)$$

Com o objetivo de auxiliar a análise visual dos dados, foram elaborados e apresentados os gráficos relativos aos modelos originais, ajustados e validados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 4 são apresentados os índices estatísticos aplicados para verificar o desempenho dos métodos de Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle FAO-24, todos correlacionados ao método padrão Penman-Monteith FAO-56.

Tabela 4 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Thornthwaite (TW), Thornthwaite modificado (TWM), Hargreaves-Samani original (HS), e Blaney-Criddle FAO-24 original, ambos em escala diária.

Equação	$r$	$d$	$c$	Classificação	EAM mm.d <sup>-1</sup>	EQM mm.d <sup>-1</sup>	REQM mm.d <sup>-1</sup>	EM mm.d <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
TW	0,61	0,78	0,48	Mal	0,80	0,98	0,99	4,22	0,377
TWM	0,50	0,47	0,24	Péssimo	2,06	8,50	2,91	12,09	0,253
HS	0,78	0,67	0,53	Sofrível	1,31	2,08	1,44	3,93	0,607
BC	0,72	0,79	0,57	Sofrível	0,86	1,30	1,14	3,55	0,522

Coefficiente de correlação ( $r$ ), índice de concordância ( $d$ ), índice de confiança ( $c$ ), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrado médio (REQM), erro máximo (EM) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

Comparando os métodos em suas formas originais e em escala diária, ao padrão Penman-Monteith FAO, observa-se que todos tiveram um baixo desempenho, tabela 4.

O modelo de Thornthwaite atingiu um índice de confiança ( $c$ ) de apenas 0,48 sendo classificado, portanto, como “mal” conforme Camargo e Sentelhas (1997). Sanches *et al.* (2015) ao comparar Thornthwaite original ao método padrão Penman-Monteith FAO para a região norte do Brasil, também encontrou índice de confiança ( $c$ ) muito baixo, de apenas 0,23, o que o classifica como “péssimo” para aquela região.

O índice de confiança ( $c$ ) do método de Thornthwaite modificado, em escala diária, utilizando temperatura efetiva com  $k=0,72$ , foi de apenas 0,24, sendo classificado como “péssimo”. Moura *et al.*, (2013) ao comparar o método de Thornthwaite modificado ao método Penman-Monteith FAO para uma microbacia no município de Vitória de Santo Antão em Pernambuco, em escala diária, encontrou valor do índice de confiança de 0,41, o que classifica o método como “mau”, todavia este valor ficou bem acima do encontrado nesta pesquisa feita em Jataí-GO.

O método de Hargreaves-Samani também não apresentou desempenho satisfatório, pois devido ao baixo índice de confiança ( $c$ ) de apenas 0,53, recebeu classificação “sofrível”.

Ribeiro *et al.* (2015), ao comparar vários métodos em escala diária, para o município de Sobral-CE, também encontrou (*c*) de 0,53 para Hargreaves-Samani. Pereira *et al.* (2009) por meio de estudo de comparação entre o método de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith na serra da Mantiqueira em Minas Gerais, encontraram valor de (*c*) de 0,58, tanto para o período de chuva quanto de seca, muito próximo a 0,53 encontrado em Jataí-GO.

O método de Blaney-Cridle FAO-24 original obteve índice de confiança (*c*) de apenas 0,57 sendo classificado como “sofrível” em escala diária, tal valor ficou muito abaixo do 0,807 encontrado por Borges e Mendiondo (2007) em estudo de comparação de modelos feito na bacia do rio Jacupiranga no estado de São Paulo. Verificou-se, também, que tanto o coeficiente de concordância (*d*) quanto o  $R^2$  encontrados pelo estudo feito na bacia do rio Jacupiranga, ficaram bem acima do encontrado nessa pesquisa feita em Jataí-GO.

Conforme pode ser verificado nas figuras 2 (a) e 2 (b) o modelo de Thornthwaite original, embora tenha apresentado uma dispersão em relação ao padrão Penman-Monteith, foi o método que menos superestimou a ETo. O método de Thornthwaite modificado ( $k=0,72$ ) teve baixa correlação com o modelo padrão Penman-Monteith FAO, tendendo inclusive, a superestimar a ETo, figuras 2 (c) e 2 (d). O método de Hargreaves-Samani original superestimou a ETo ao longo de todo o período, figuras 2 (e) e 2 (f). O método de Blaney-Cridle FAO-24 original também tendeu a superestimar a ETo, figuras 2 (g) e 2 (h).

Figura 2 – (a) e (b), ETo em escala diária pelo método de Thornthwaite original; (c) e (d), Thornthwaite modificado; (e) e (f), Hargreaves-Samani original; e (g) e (h), Blaney-Cridle FAO-24 original; correlacionados ao método de Penman-Monteith FAO.

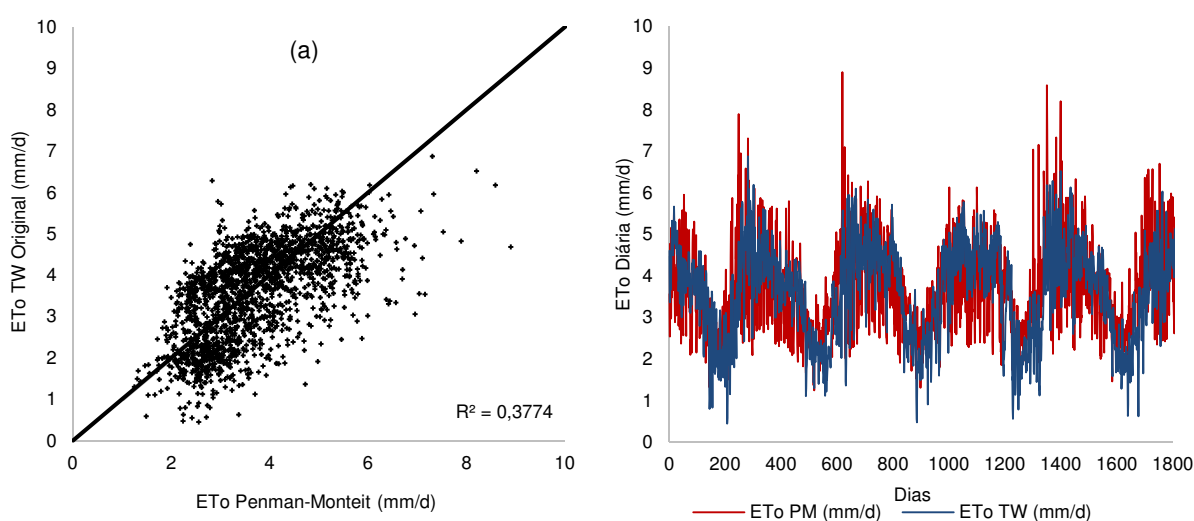


Figura 2, cont.

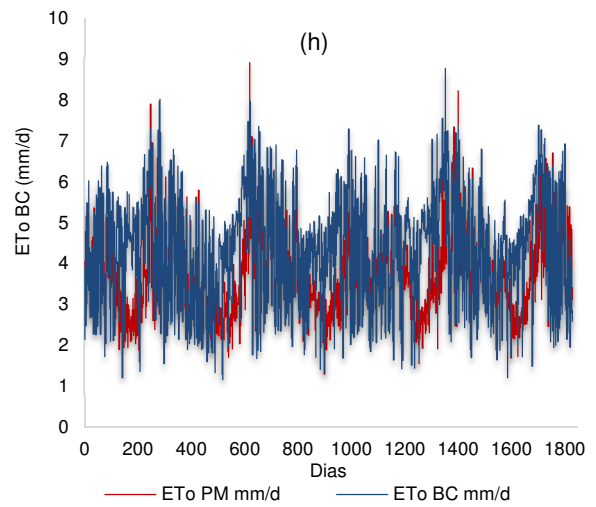
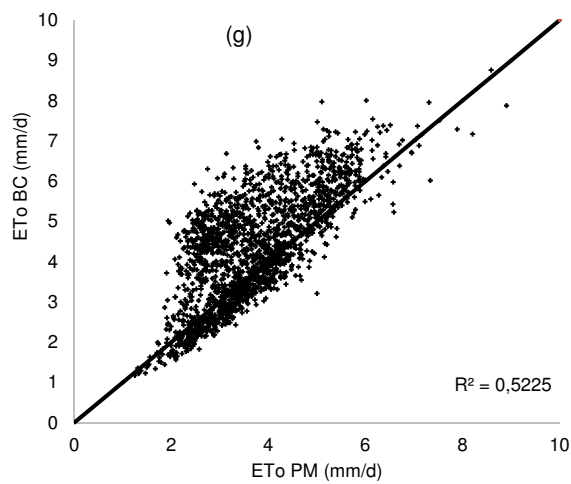
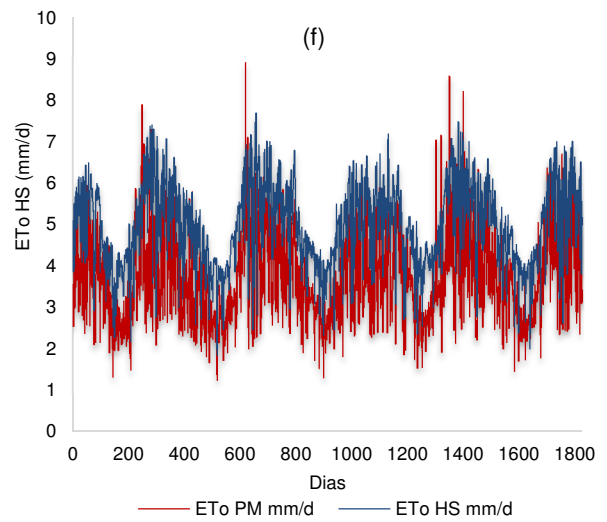
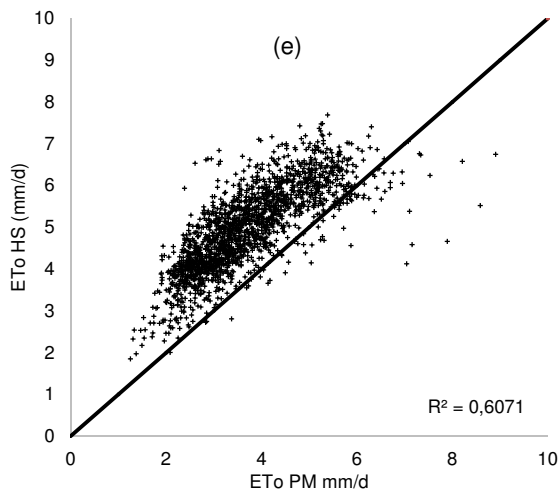
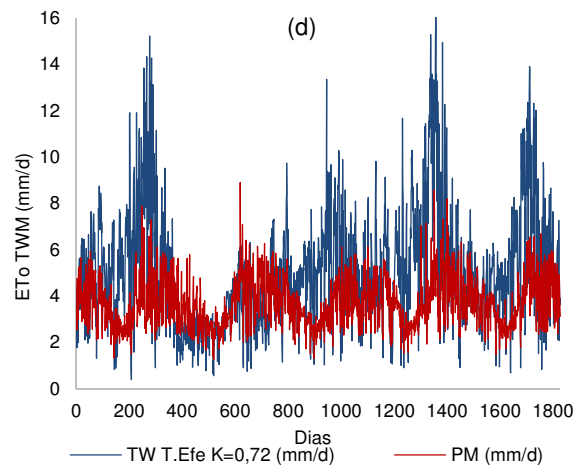
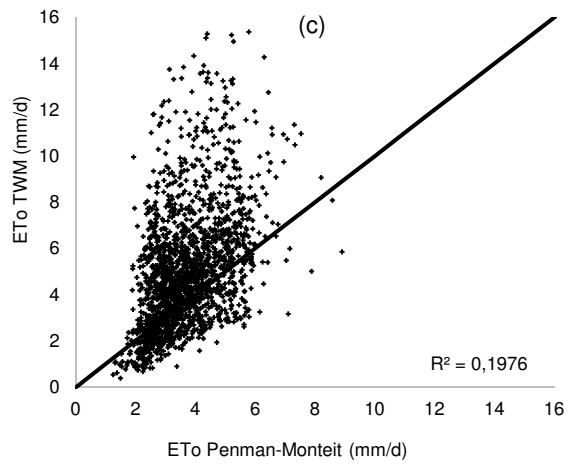


Tabela 5 - Análise do desempenho e classificação de Thornthwaite calibrado (TWC), Thornthwaite modificado calibrado (TWMC), Hargreaves-Samani calibrado (HSC) e Blaney-Criddle FAO-24 Calibrado (BCC), ambos em escala diária.

Equações	$r$	$d$	$c$	Clas- sificação	EAM mm.d <sup>-1</sup>	EQM mm.d <sup>-1</sup>	REQM mm.d <sup>-1</sup>	EM mm.d <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
TWC	0,59	0,73	0,43	Mal	0,69	0,78	0,88	4,70	0,349
TWMC	0,55	0,73	0,40	Péssimo	0,88	1,20	1,10	4,69	0,298
HSC	0,78	0,87	0,68	Bom	0,50	0,46	0,68	4,29	0,613
BCC	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,22	0,08	0,29	1,12	0,937

Coefficiente de correlação ( $r$ ), índice de concordância ( $d$ ), índice de confiança ( $c$ ), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrado médio (REQM), erro máximo (EM) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

A calibração do método de Thornthwaite foi por meio do índice térmico mensal local ( $i$ ) e do índice térmico regional ( $a$ ), todavia, a calibração provocou uma redução no desempenho do modelo, pois seu índice de confiança variou de 0,48, original, para 0,43, calibrado, o erro máximo aumentou e o R<sup>2</sup> reduziu. No entanto, os outros indicadores estatísticos relacionados aos erros tiveram uma pequena melhora.

A calibração do método de Thornthwaite modificado foi realizada por meio do ajuste do coeficiente  $k$  da temperatura efetiva de Camargo *et al.* (1999). A referida calibração promoveu uma pequena melhora nos indicadores estatísticos quando comparado aos resultados obtidos pelo método modificado alimentado com temperatura efetiva utilizando  $k=0,72$ , visto que o índice de confiança ( $c$ ), após calibrado, saltou de 0,24 para 0,40 e o erro máximo (EM) reduziu de 12,09 para 4,69 mm.d<sup>-1</sup>. Todavia, o método continuou com classificação “péssima”. Sanches *et al.* (2015) após calibrar o modelo de Thornthwaite modificado para a região norte do Brasil, utilizando regressão linear simples, também encontrou valor de ( $c$ ) muito baixo, de apenas 0,25 o que o classificou como “péssimo”.

A calibração do método de Hargreaves-Samani se deu por meio dos parâmetros empíricos:  $A_{HS}$ ,  $B_{HS}$ , e  $C_{HS}$ . Após calibrado, verificou-se uma melhora no índice de confiança ( $c$ ), passando de 0,53 “sofrível” para 0,68 “bom”, observou-se também, melhoras nos outros indicadores estatísticos aplicados para demonstrar o desempenho do método. No entanto, apenas o erro máximo (EM) sofreu uma piora, aumentando de 3,93 para 4,29 mm.d<sup>-1</sup>, tabelas 4 e 5. Silva (2011), após ajustar o método de Hargreaves-Samani para as condições climáticas de Uberlândia-MG, encontrou índice de confiança ( $c$ ) de 0,70, muito próximo ao encontrado neste trabalho, inclusive com a mesma classificação “bom”. Já Pilau *et al.* (2012) ao ajustar o método

de Hargreaves-Samani para a cidade de Frederico Westphalen-RS, encontrou valor de (c) igual a 0,63 “mediano”.

A calibração do método de Blaney-Cridle FAO-24 foi por meio das constantes  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  e  $a_5$ , do termo de ajuste (b) da equação. Após a calibração, o método de Blaney-Cridle obteve uma melhora significativa, o índice de confiança (c) saltou de 0,57 “sofrível” para 0,95 “ótimo”. Tal valor corrobora com o encontrado por Borges e Mendiondo (2007) em estudo de comparação de modelos feito na bacia do rio Jacupiranga no estado de São Paulo, visto que o autor, após calibrar o modelo por regressão linear, encontrou (c) de 0,95, os índices de concordância (d) também ficaram idênticos, 0,98 para os dois estudos.

Por meio dos gráficos da Figura 3 é possível visualizar os comportamentos dos métodos após calibrados, em relação ao padrão Penman-Monteith FAO-56.

Figura 3 – (a) e (b), ETo pelo método de Thornthwaite calibrado; (c) e (d), Thornthwaite modificado calibrado; (e) e (f), Hargreaves-Samani calibrado; (g) e (h), Blaney-Cridle FAO-24 calibrado, ambos em escala diária.

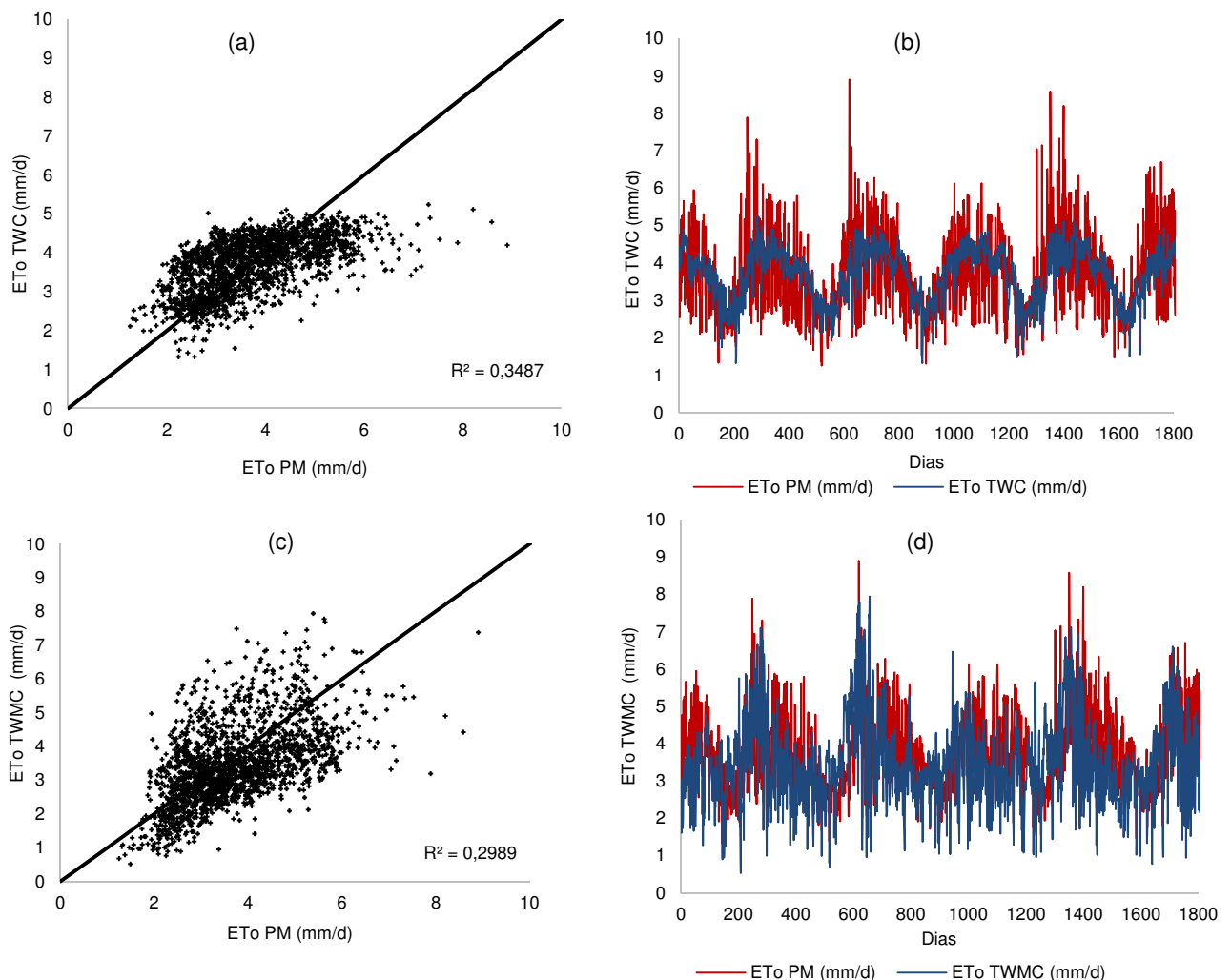
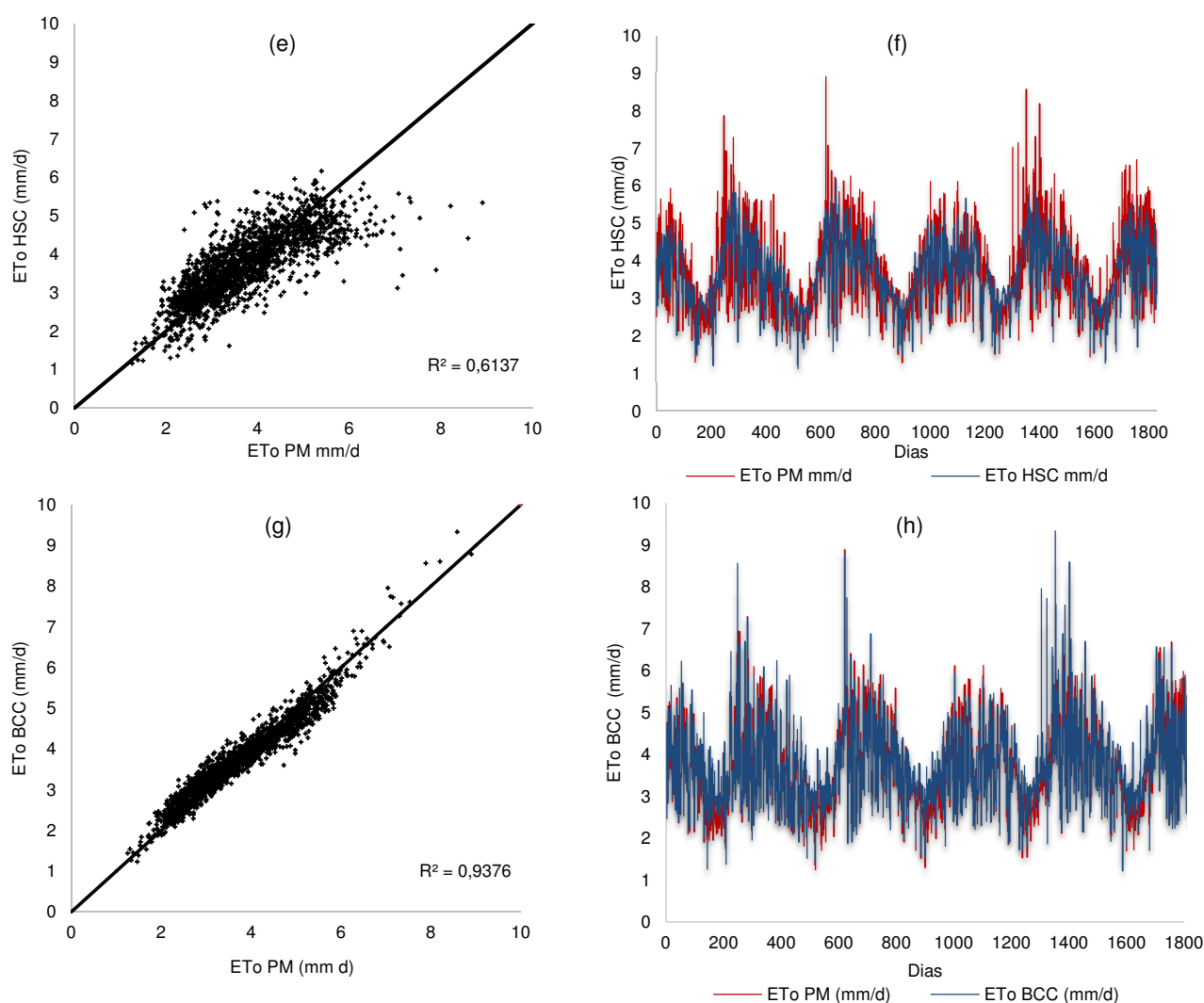


Figura 3, cont.



A calibração do método de Thornthwaite reduziu um pouco sua tendência em subestimar a ET<sub>0</sub> nos períodos de seca, todavia não foi suficiente para reduzir a subestimativa nos períodos de chuva, época de maior evapotranspiração na região de estudo.

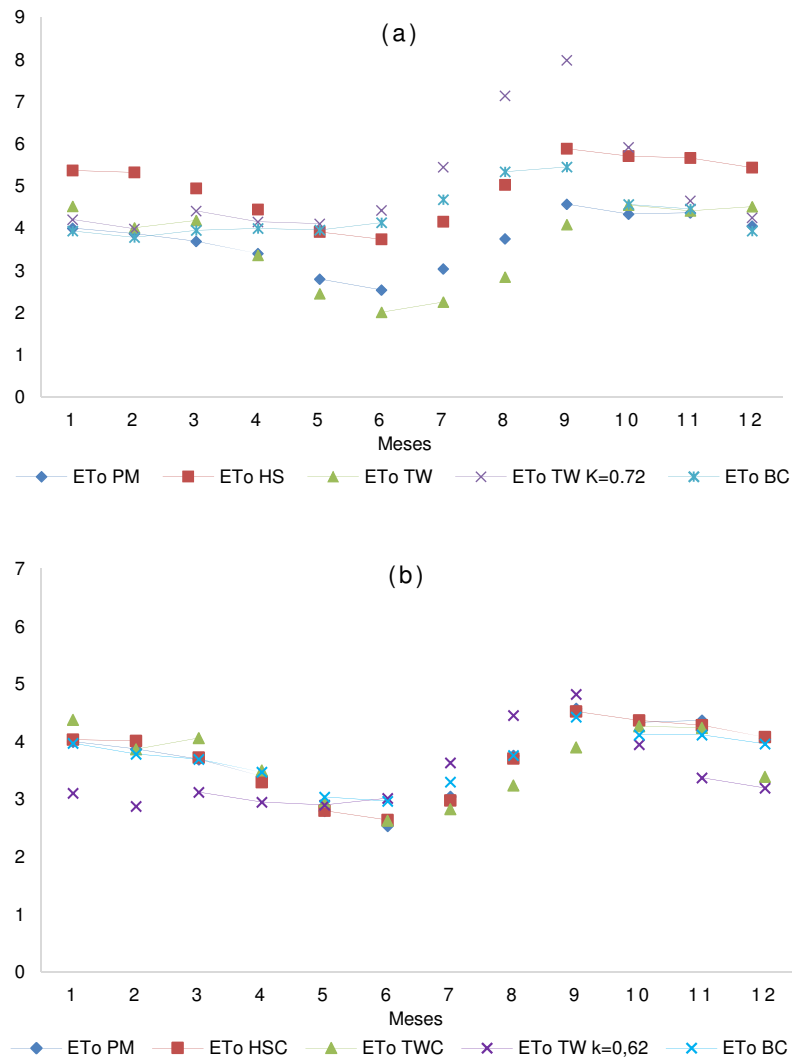
Ao calibrar o método de Thornthwaite modificado, figuras 3 (c) e 3 (d), verificou-se uma pequena melhora no ajuste em relação ao Penman-Monteith, no entanto, ainda assim observa-se uma grande dispersão dos dados, figura 3 (c).

A calibração do método de Hargreaves-Samani gerou uma redução significativa em sua tendência de superestimar a ET<sub>0</sub> em relação ao padrão Penman-Monteith FAO, o que pode ser confirmado ao comparar as figuras 2 (e) e 2 (f), método original, com as figuras 3 (e) e 3 (f), método calibrado.

O modelo de Blaney-Criddle FAO-24 obteve o melhor ajuste entre os quatro métodos calibrados, conforme pode ser verificado mediante a comparação das figuras 2 (g) e 2 (h), método original, com as figuras 3 (g) e 3 (h), método calibrado.

Para melhor visualização do comportamento dos modelos em relação ao padrão Penman-Monteith FAO, na Figura 4 são apresentados os gráficos referentes às médias diárias dos sessenta meses, da ETo calculada pelos cinco modelos, originais e calibrados, alimentados com dados diários.

Figura 4 – (a) médias diárias da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas originais, alimentados com dados diários. (b) médias diárias da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas calibradas, alimentados com dados diários.



Observa-se na figura 4 (a) que o método de Thornthwaite original, quando comparado ao modelo padrão Penman-Monteith FAO, superestima a ETo no período chuvoso e subestima no período de seca. No entanto, após calibrado ocorreu uma redução na subestimativa da



ET<sub>o</sub> pelo modelo, entre os meses de maio a agosto, subestimando novamente no mês de dezembro, figura 4 (b).

O método de Thornthwaite modificado, superestimou a ET<sub>o</sub> ao longo de todos os meses do ano, inclusive com o maior erro máximo observado em relação ao padrão Penman-Monteith FAO, visto que no mês de setembro a ET<sub>o</sub> calculada com Thornthwaite modificado teve um pico de 7,98 mm.d<sup>-1</sup>. Após calibrado, o referido método apresentou uma tendência em subestimar a ET<sub>o</sub> no período de chuva e superestimar no período seco.

O método de Hargreaves-Samani original também superestimou a ET<sub>o</sub> em todos os meses do ano. No entanto, após calibrado verificou-se um bom ajuste ao modelo padrão Penman-Monteith FAO-56. Segundo Sentelhas *et al.* (2010) devido ao método de Hargreaves-Samani ter sido desenvolvido para regiões semiáridas e se basear apenas em dados de temperatura do ar é de se esperar que superestime a ET<sub>o</sub> em climas úmidos, o que foi confirmado, inclusive, pelo referido autor em estudo realizado no sul de Ontário no Canadá. Alencar *et al.* (2011) em estudo de comparação entre os métodos de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO, realizado no norte de Minas Gerais também verificaram que nas cidades de Montes Claros-MG e Salinas-MG, o modelo de Hargreaves-Samani superestimou a ET<sub>o</sub> em relação ao método padrão em todos os meses do ano. A mesma tendência foi verificada por Lima *et al.* (2013) no município de São João-PE.

O método de Blaney-Criddle FAO-24 original superestimou a ET<sub>o</sub> a partir de fevereiro até o mês de outubro, quando teve seu gráfico praticamente coincidente com o modelo padrão de Penman-Monteith FAO-56. Após calibrado, o referido método apresentou um bom ajuste ao modelo padrão, todavia, continuou superestimando a ET<sub>o</sub> nos meses de maio, junho e julho.

Na tabela 6 são apresentados os índices estatísticos aplicados para verificar o desempenho dos métodos de Thornthwaite original, Thornthwaite modificado, Hargreaves-Samani original e Blaney-Criddle FAO-24 original, ambos em escala mensal e correlacionados ao método padrão Penman-Monteith FAO.

Tabela 6 - Desempenho e classificação dos métodos de Thornthwaite original (TW), Thornthwaite modificado (TWM), Hargreaves-Samani original (HS) e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC), em escala mensal.

Equações	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>C</i>	Clas- sificação	EAM mm.d <sup>-1</sup>	EQM mm.d <sup>-1</sup>	REQM mm.d <sup>-1</sup>	EM mm.d <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
TW	0,81	0,84	0,68	Bom	0,51	0,38	0,61	1,44	0,649
TWM	0,56	0,55	0,31	Péssimo	0,97	1,26	1,12	2,17	0,315
HS	0,96	0,56	0,54	Sofrível	1,26	1,64	1,28	1,85	0,915
BC	0,39	0,58	0,23	Péssimo	0,65	0,77	0,88	1,92	0,155

Coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância (*d*), índice de confiança (*c*), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrado médio (REQM), erro máximo (EM) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e erro médio percentual (EMP).

O método de Thornthwaite original alimentado com dados das variáveis climatológicas em escala mensal obteve índice de confiança (*c*) igual a 0,68, o que o classifica como “bom” em relação ao método padrão, este foi o melhor resultado para os modelos em suas formas originais. Ribeiro *et al.* (2015) em estudo de comparação do método de Thornthwaite ao modelo padrão Penman-Monteith FAO realizado em Sobral-CE, encontrou desempenho “ruim”, devido ao índice de confiança (*c*) ter chegado a apenas 0,49.

Ao comparar o índice de confiança (*c*) de Thornthwaite original calculado com dados em escala diária ao (*c*) de Thornthwaite original alimentado com dados de temperatura em escala mensal, tabelas 4 e 6 respectivamente, observou-se um aumento significativo no referido indicador estatístico, passando de 0,48 “mau” para 0,68 “bom”. Tal melhora pode ser devido ao método de Thornthwaite ter sido concebido para o cálculo da ETo em escala mensal, bem como as médias mensais dos dados de entrada ter promovido uma redução nos picos da ETo calculada pelo método de Penman-Monteith em escala diária, as quais podem ser verificadas, quando comparadas as figuras 2 (b) e 5 (b).

O método de Thornthwaite modificado, em escala mensal, apresentou índice de confiança (*c*) de apenas 0,31 sendo classificado como “péssimo”. Ressalta-se, no entanto, que o método em escala mensal apresentou uma pequena melhora em relação aos resultados obtidos em escala diária, cujo índice de confiança (*c*) era de 0,24; outro fato observado é a melhora nos índices de EAM, EQM, REQM, EM e EPE, sendo que o erro máximo (EM) reduziu de 12,09, em escala diária, para 2,17 mm.d<sup>-1</sup>, em escala mensal. A explicação para tal, pode ser devido às médias mensais dos dados de entrada eliminar os picos e discrepâncias ocorridas em dias isolados.

O modelo de Hargreaves-Samani original alimentado com dados climáticos em escala mensal apresentou índice de confiança ( $c$ ) de 0,54, o que o classifica como “sofrível”. Destaca-se que os resultados gerados pelo modelo alimentado com dados de temperatura em escala mensal indicaram uma melhora significativa no erro máximo (EM), reduzindo de 3,93 para 1,85 mm.d<sup>-1</sup>, observou-se também uma melhora no R<sup>2</sup>, aumentando de 0,607 para 0,915, no entanto, o referido método continuou superestimando a ETo em todos os meses do ano, figuras 5 (e) e 5 (f). O resultado de ( $c$ ) verificado neste trabalho ficou muito próximo ao encontrado por Ribeiro *et al.* (2015) em comparações de métodos realizadas em Sobral-CE, em que os autores encontraram valor de ( $c$ ) de 0,53. Back (2008) em estudo de comparações entre os métodos de Hargreaves-Samani e FAO Penman-Monteith na cidade de Urussanga-SC encontrou valor de ( $c$ ) igual a 0,38 o que o classificou como “péssimo”.

O método de Blaney-Criddle FAO-24 original alimentado com médias climatológicas mensais apresentou índice de confiança ( $c$ ) de apenas 0,23 o que o classifica como “péssimo”. Tal resultado está bem abaixo do encontrado por Back (2008) em estudo de comparação realizado no município de Urussanga-SC, sendo que o referido autor encontrou ( $c$ ) de 0,32.

Por meio da figura 5 é possível visualizar os comportamentos dos métodos em suas formas originais na escala mensal, em relação ao padrão Penman-Monteith FAO-56.

Figura 5 - (a) e (b), ETo por Thornthwaite; (c) e (d), Thornthwaite modificado; (e) e (f), ETo por Hargreaves-Samani original; (g) e (h), Blaney-Criddle FAO-24 original. Dados em escala mensal.

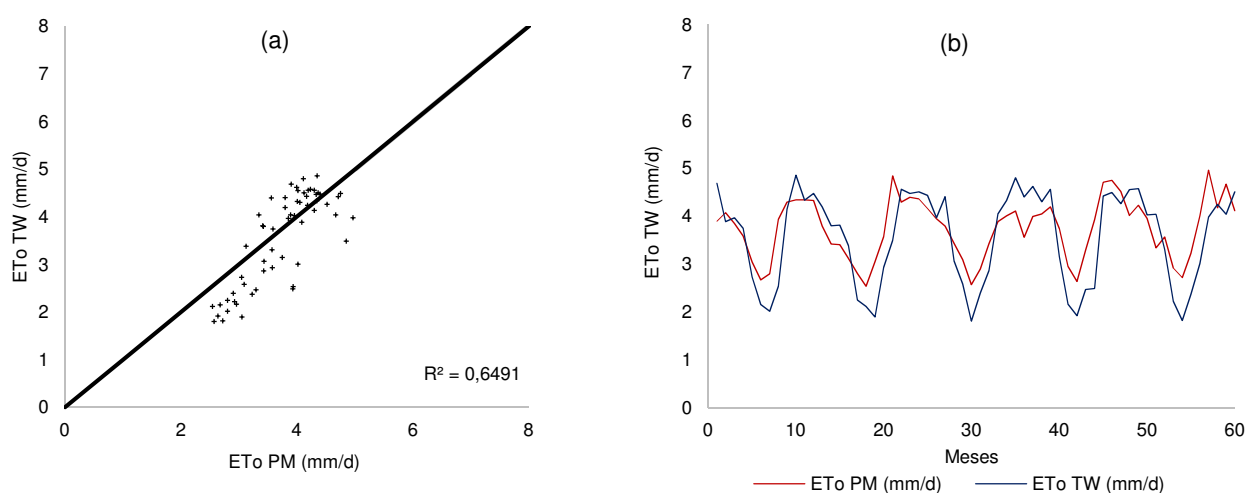
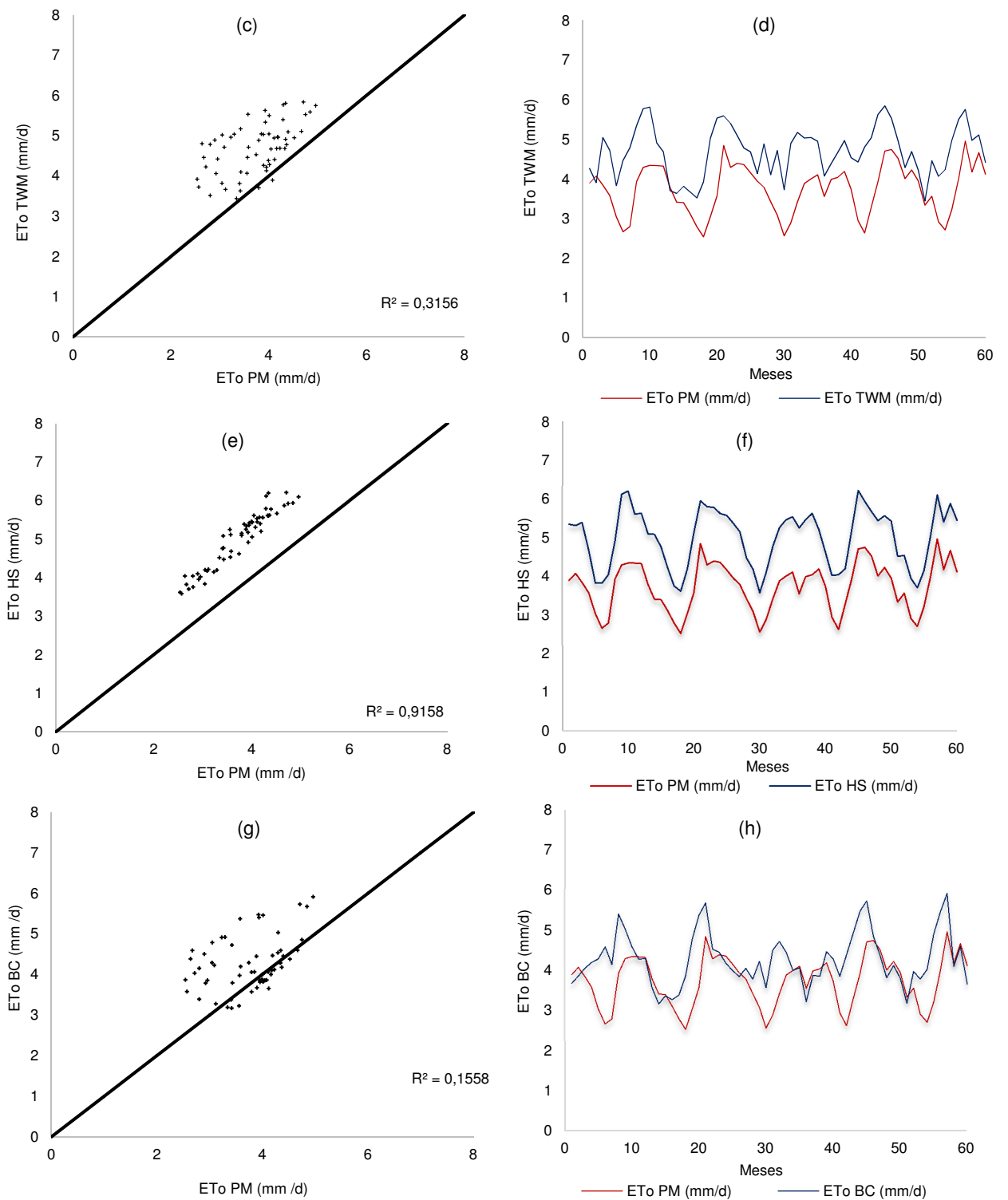


Figura 5, cont.



O método de Thornthwaite apresentou uma pequena tendência em subestimar a ET<sub>o</sub>, contudo, foi o método que em sua forma original apresentou o melhor desempenho em relação ao Penman-Monteith FAO-56, figuras 5 (a) e 5 (b).

Pelas figuras 5 (c) e (d) observa-se que o método de Thornthwaite modificado tendeu a superestimar a ETo em quase todos os meses do ano. O método de Hargreaves-Samani original, figuras 5 (e) e (f), também superestimou a ETo ao longo de todos os meses do ano. O método de Blaney-Criddle FAO-24 superestimou a ETo em grande parte dos meses do ano, figuras 5 (g) e (h).

Na tabela 7 são apresentados os índices estatísticos referentes aos desempenhos dos métodos de Thornthwaite calibrado, Thornthwaite modificado calibrado, Hargreaves-Samani calibrado e Blaney-Criddle FAO-24 calibrado, ambos em escala mensal e correlacionados ao método padrão Penman-Monteith FAO.

Tabela 7 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Thornthwaite calibrado (TWC), Thornthwaite modificado (TWMC), Hargreaves-Samani calibrado (HSC) e Blaney-Criddle FAO-24 calibrado (BCC), ambos em escala mensal.

Equações	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	Class.	EAM mm.d <sup>-1</sup>	EQM mm.d <sup>-1</sup>	REQM mm.d <sup>-1</sup>	EM mm.d <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
TWC	0,79	0,88	0,69	Bom	0,29	0,15	0,39	1,18	0,621
TWMC	0,48	0,70	0,34	Péssimo	0,57	0,44	0,66	1,33	0,230
HSC	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,15	0,03	0,18	0,44	0,916
BCC	0,98	0,99	0,97	Ótimo	0,10	0,02	0,13	0,33	0,959

Coefficiente de correlação (*r*), índice de concordância (*d*), índice de confiança (*c*), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrado médio (REQM), erro máximo (EM) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

O ajuste do método de Thornthwaite promoveu uma pequena melhora no índice de confiança, o qual variou de 0,68 e aumentou para 0,69. Os erros também tiveram uma pequena melhora, a maior redução foi observada no erro máximo que variou de 1,44 para 1,18; o erro médio percentual reduziu de 24% para 13%.

A calibração do coeficiente *k* da temperatura efetiva em escala mensal gerou uma pequena melhora nos indicadores estatísticos do método de Thornthwaite modificado, o índice de confiança (*c*) passou de 0,31 para 0,34. No entanto, a calibração não foi suficiente para superar o desempenho do método de Thornthwaite em sua forma original, sobretudo, quando se refere ao coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância (*d*) e índice de confiança (*c*), sendo que este último ficou em 0,68 quando calculada a ETo com o método de Thornthwaite original, bem superior ao 0,34 conseguido por Thornthwaite modificado com *k* calibrado.

Após calibrar o método de Hargreaves-Samani em escala mensal os indicadores estatísticos tiveram uma melhora significativa, o índice de confiança (*c*) chegou ao valor de 0,94 e o índice

de concordância ( $d$ ) a 0,98. Júnior *et al.*, (2016) após calibrar o método de Hargreaves-Samani em várias cidades do estado do Ceará, encontrou valores de ( $d$ ) igual a 0,96 para Jaguaruana e Morada Nova. Todavia, os erros máximos absolutos verificados no estudo para os referidos municípios foram de 1,048 e 1,154 respectivamente, enquanto que nesta pesquisa feita em Jataí-GO o erro máximo foi de 0,44 mm.d<sup>-1</sup>.

O modelo de Blaney-Criddle FAO-24 também demonstrou um excelente desempenho após sua calibração, com índice de confiança ( $c$ ) de 0,97 o que o classificou como “ótimo” conforme Camargo *et al.*, (1997). Mohawesh *et al.* (2010) também verificou uma melhora do método de Blaney-Criddle FAO-24 após sua calibração para 12 estações localizadas na Jordânia.

A Figura 6 mostra o comportamento dos gráficos dos modelos calibrados em escala mensal correlacionados ao padrão Penman-Monteith FAO-56.

Figura 6 - (a) e (b), ETo pelo método de Thornthwaite calibrado; (c) e (d), ETo pelo método de Thornthwaite modificado; (e) e (f), ETo pelo método de Hargreaves-Samani calibrado; (g) e (h), ETo pelo método de Blaney-Criddle FAO-24 calibrado, ambos alimentados com dados mensais.

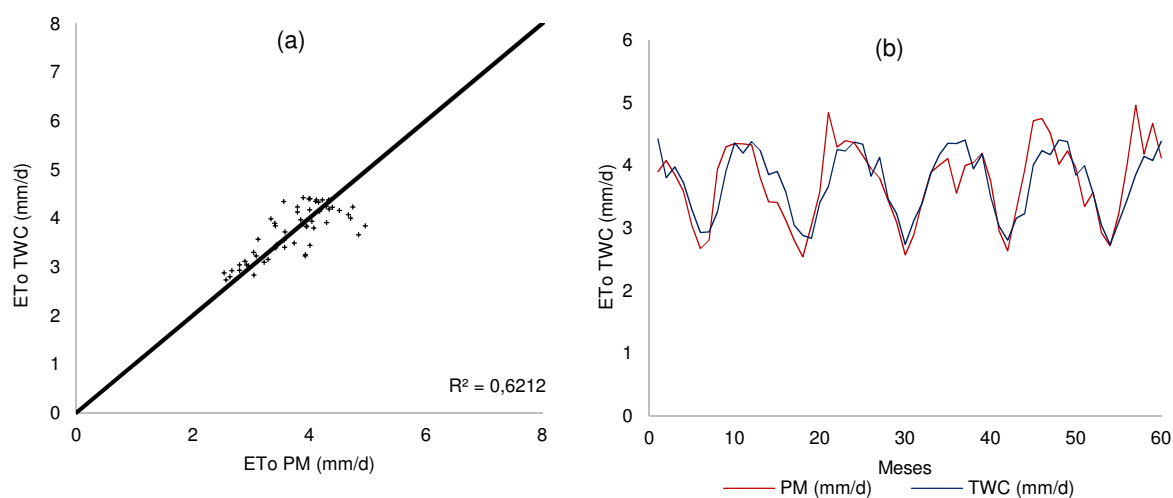
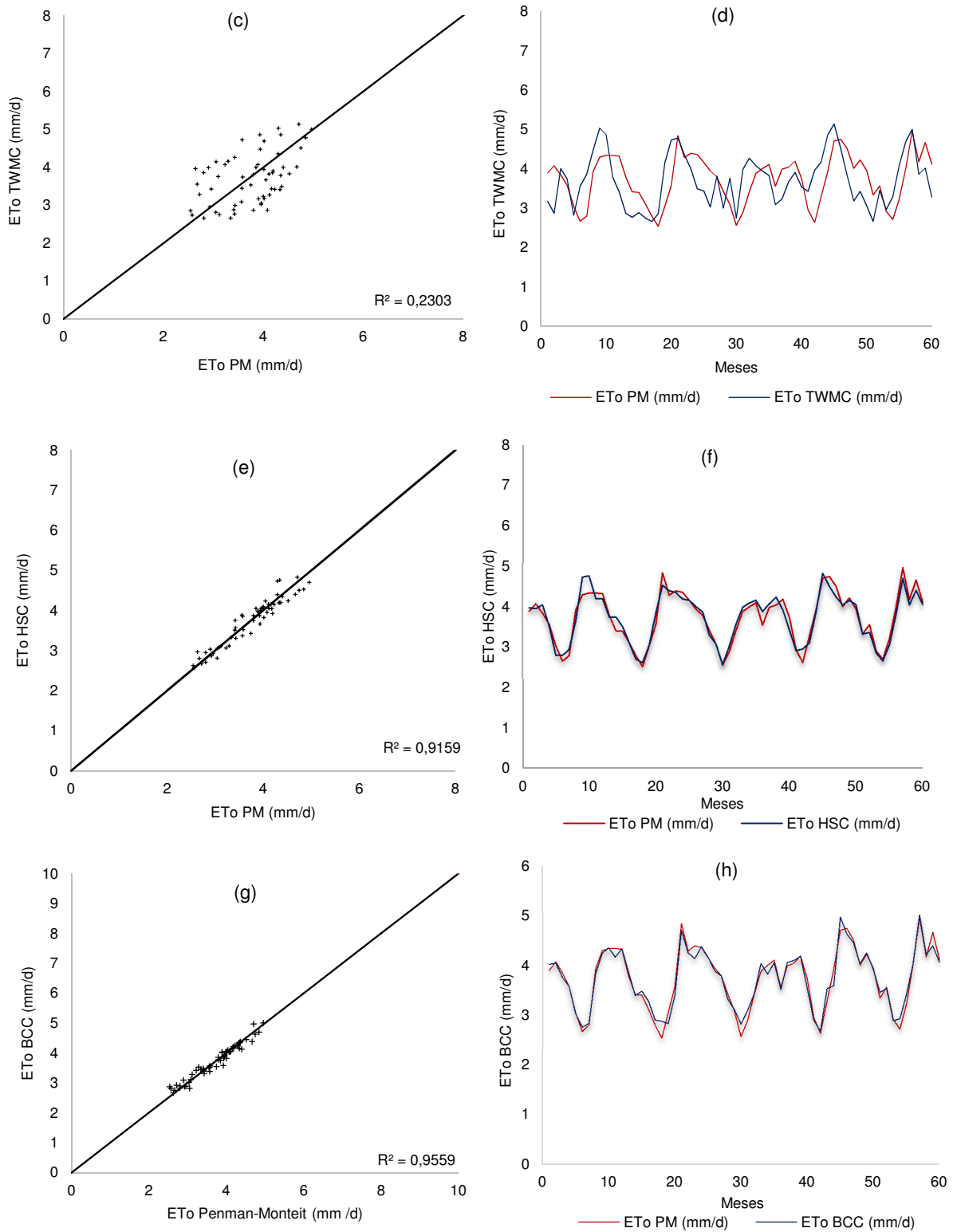


Figura 6, cont.



Ao comparar as figuras 5 (a) e 5 (b) com as figuras 6 (a) e 6 (b), observa-se que a calibração do método de Thornthwaite em escala mensal gerou uma redução em sua tendência em

subestimar a ETo. A melhora mais significativa foi verificada nos períodos de seca da região, época de menor evapotranspiração.

A calibração do método de Thornthwaite modificado gerou uma pequena redução na sua tendência em superestimar a ETo para o local estudado, tal comportamento pode ser observado comparando as figuras 6 (c) e 6 (d), método de Thornthwaite modificado calibrado, com as figuras 5 (c) e 5 (d), método de Thornthwaite modificado original, verifica-se que embora a calibração tenha reduzido a tendência de superestimativa do método, houve um pequeno aumento na dispersão do gráfico, o qual é evidenciado pela diminuição do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que variou de 0,408 para 0,322.

As calibrações dos métodos de Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle FAO-24 promoveram um ajuste significativo nos resultados em relação ao padrão Penman-Monteith FAO, o que pode ser observado nas figuras 6 (e), (f), (g) e (h).

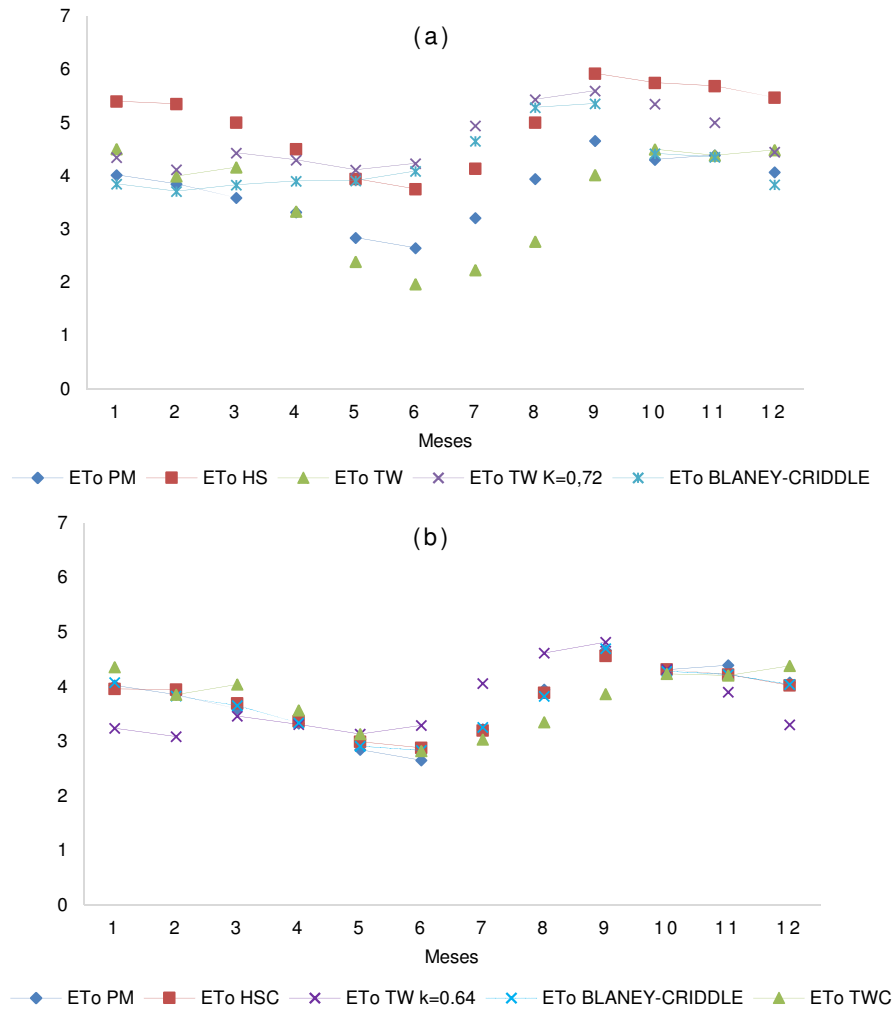
Para melhor visualização do comportamento dos modelos em relação ao padrão Penman-Monteith FAO-56, foram apresentados na figura 7 os gráficos referentes às médias diárias dos sessenta meses, da ETo calculada pelos cinco modelos, originais e calibrados, alimentados com dados mensais.

Por meio da figura 7 (a), observa-se que o método de Thornthwaite original calculado com dados climatológicos em escala mensal manteve o mesmo comportamento de quando calculado com dados em escala diária, superestimando a ETo nos períodos de chuva e subestimando nos períodos seco. No entanto, após calibrado, figura 7 (b), o método de Thornthwaite reduziu sua tendência em subestimar a ETo no período de seca, comportamento verificado entre os meses de abril a agosto.

O método de Hargreaves-Samani original em escala mensal, figura 7 (a), também manteve o mesmo comportamento de quando calculado com dados climatológicos na escala diária, figura 6 (a), ou seja, superestimou a ETo em todos os meses do ano em relação ao padrão Penman-Monteith FAO. Todavia, após calibrado o referido modelo se ajustou muito bem ao padrão Penman-Monteith FAO-56, tanto em escala diária, figura 4 (b), quanto mensal, figura 7 (b).



Figura 7 – (a), média diária da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas originais, alimentados com dados mensais. (b), média diária da ETo, para os 60 meses, pelos métodos em suas formas calibradas, alimentados com dados mensais.



O método de Blaney-Criddle FAO-24 original, alimentado com dados mensais, figura 7 (a), também manteve o mesmo comportamento de quando calculado com dados em escala diária, figura 4 (a), superestimando a ETo de fevereiro a outubro e subestimando-a em novembro, dezembro e janeiro. Após calibrado, o referido modelo também se ajustou muito bem ao padrão Penman-Monteith FAO-56, comportamento observado tanto na escala diária, figura 4 (b), quanto na escala mensal, figura 7 (b).

Já o método de Thornthwaite modificado apresentou uma redução significativa no erro máximo, passando de 12,09 mm.d<sup>-1</sup> na escala diária, para 2,17 mm.d<sup>-1</sup> na escala mensal, mas continuou superestimando a ETo ao longo de todos os meses do ano.

Destaca-se que com a calibração, os modelos de Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle FAO-24 tiveram um bom ajuste em relação ao padrão Penman-Monteith FAO-56, o que pode ser verificado pela figura 7 (b).

Segue na tabela 8 os termos ajustados das equações de Blaney-Criddle FAO-24, Hargreaves-Samani, k da temperatura efetiva do modelo de Thornthwaite modificado e as constantes do índice térmico (I) e do expoente (a) do método de Thornthwaite.

Tabela 8 - Termos ajustados nos modelos de Blaney-Criddle FAO-24, Hargreaves-Samani, Thornthwaite modificado e Thornthwaite, para o município de Jataí-GO.

Blaney-Criddle FAO-24 Calibrado			Hargreaves-Samani Calibrado		
Termo	Diária	Mensal	Termo	Diária	Mensal
a <sub>0</sub>	0,5807879	0,5781465	A <sub>HS</sub>	0,0026	0,0021
a <sub>1</sub>	-0,0004102	0,0005047	B <sub>HS</sub>	0,9000	0,56
a <sub>2</sub>	0,3894184	0,1592324	C <sub>HS</sub>	0,5400	5,00
a <sub>3</sub>	0,3552371	0,5748406	Thornthwaite Modificado Calibrado		
a <sub>4</sub>	0,0044364	0,0079682	Termo	Diário	Mensal
a <sub>5</sub>	-0,0043580	-0,0077568	k	0,62	0,64
Thornthwaite Calibrado					
Índice térmico (I)	Valores originais	Valores ajustados			
Constante	0,2	Diário	0,1933804	Mensal	0,1592184
Expoente	1,514		1,1045747		0,9363448
Expoente (a)	Valor original	Valores ajustados			
Constante	0,49239	Diário	0,4341877	Mensal	0,4357007

Fonte: própria (2017).

### 5.1. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS ORIGINAIS E CALIBRADOS, ALIMENTADOS COM DADOS EM ESCALA DIÁRIA

Visando verificar a efetividade das calibrações aplicadas aos métodos, o período de 01/01/2012 a 31/12/2016 não entrou em suas calibrações, portanto, esse período foi utilizado para a realização da validação, a qual se deu por meio do cálculo da ETo pelas equações em suas formas originais e calibradas, posteriormente foram realizadas suas comparações ao método padrão Penman-Monteith FAO.

Esta verificação foi realizada utilizando apenas os métodos de Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle FAO-24, o método de Thornthwaite e Thornthwaite modificado foram excluídos devido ao baixo desempenho desses métodos após a calibrados.

Na tabela 9 são apresentados os índices estatísticos aplicados para verificar o desempenho dos métodos de Hargreaves-Samani original e calibrado e Blaney-Criddle FAO-24 original e calibrado, ambos em escala diária.

Tabela 9 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSC), e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC) e calibrado (BCC), em escala diária, para o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016.

Equações	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	Clas-sificação	EAM mm.d <sup>-1</sup>	EQM mm.d <sup>-1</sup>	REQM mm.d <sup>-1</sup>	EM mm.d <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
HS	0,78	0,68	0,52	Sofrível	1,30	2,09	1,45	3,51	0,603
HSC	0,78	0,88	0,68	Bom	0,51	0,46	0,68	3,41	0,603
BC	0,74	0,82	0,60	Sofrível	0,75	0,99	1,00	3,12	0,546
BCC	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,24	0,09	0,30	1,11	0,925

Coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância (*d*), índice de confiança (*c*), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrado médio (REQM), erro máximo (EM) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

Ao comparar os dados gerados pelo cômputo da ETo através do método de Hargreaves-Samani original para o período de calibração, 01/01/2007 a 31/12/2011, com o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016, tabelas 4 e 9 respectivamente, verificou-se que os indicadores estatísticos permaneceram praticamente inalterados em relação ao método padrão Penman-Monteith, apenas o erro máximo (EM) teve uma pequena melhora, reduzindo de 3,93 para 3,51 mm.d<sup>-1</sup>. O mesmo comportamento foi verificado pela comparação do método calibrado, tabelas 5 e 9, inclusive com uma melhora no (EM), o qual passou de 4,29 para 3,41 mm.d<sup>-1</sup>.

Comparando os dados gerados pelo cálculo da ETo pelo método de Blaney-Criddle FAO-24 original, em escala diária, para o período de 01/01/2007 a 31/12/2011, com o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016, tabelas 4 e 9 respectivamente, verifica-se que houve uma pequena melhora nos indicadores estatísticos, contudo, o método continuou classificado como “sofrível”. Quando se faz a mesma comparação para o método calibrado, tabelas 5 e 9, observa-se que os indicadores se mantiveram, praticamente inalterados, mantendo-se a classificação “ótima” em relação ao padrão Penman-Monteith FAO.

Na Figura 8 são apresentados os comportamentos dos gráficos gerados pelos modelos em suas formas originais e calibradas em escala diária para o período de validação, ambos correlacionados ao padrão Penman-Monteith FAO-56.

Figura 8 – Validação dos métodos com dados diários. (a) e (b), ETo Hargreaves-Samani original; (c) e (d), ETo Hargreaves-Samani calibrado; (e) e (f), ETo Blaney-Criddle FAO-24 original; (g) e (h), Blaney-Criddle FAO-24 calibrado.

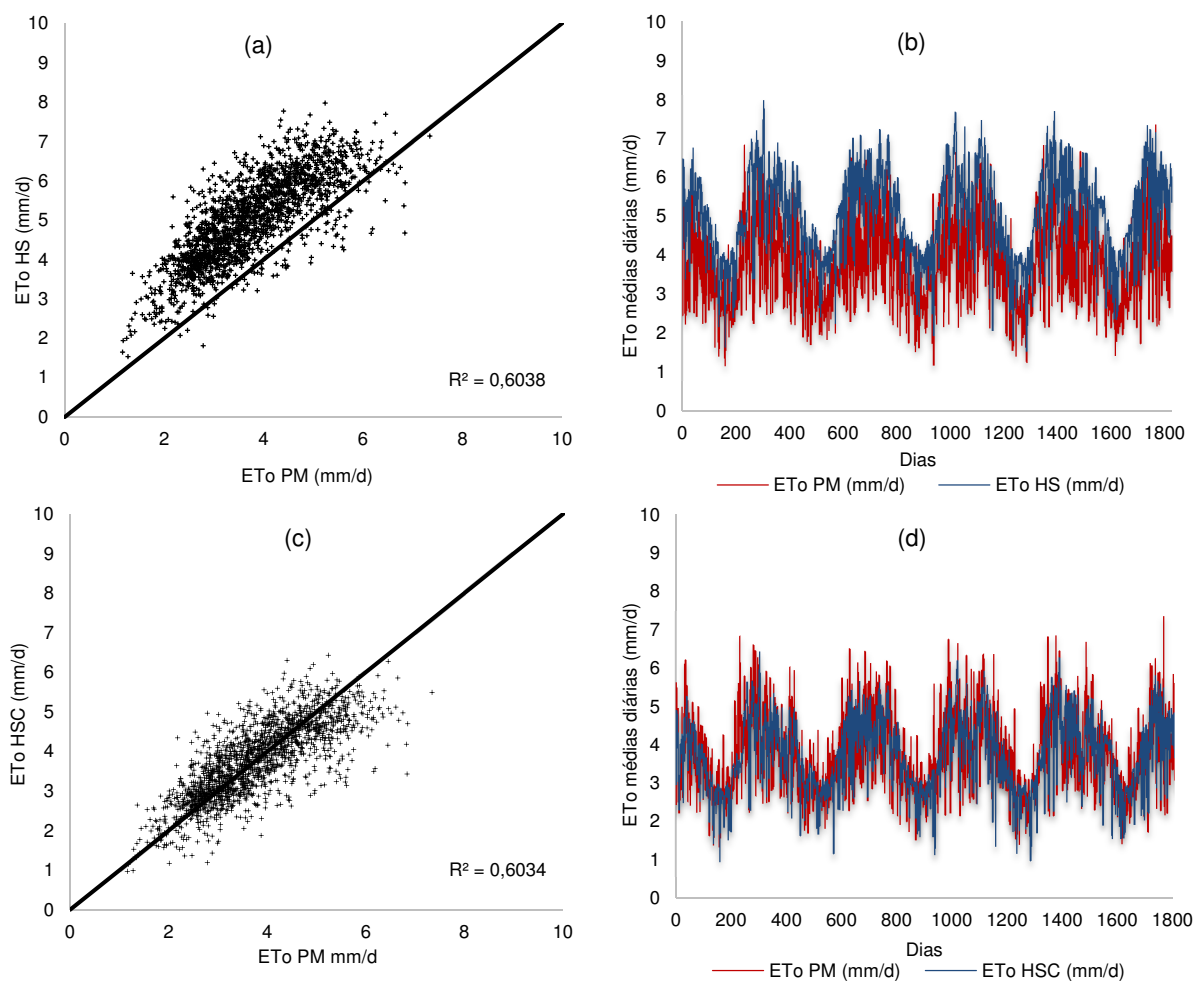
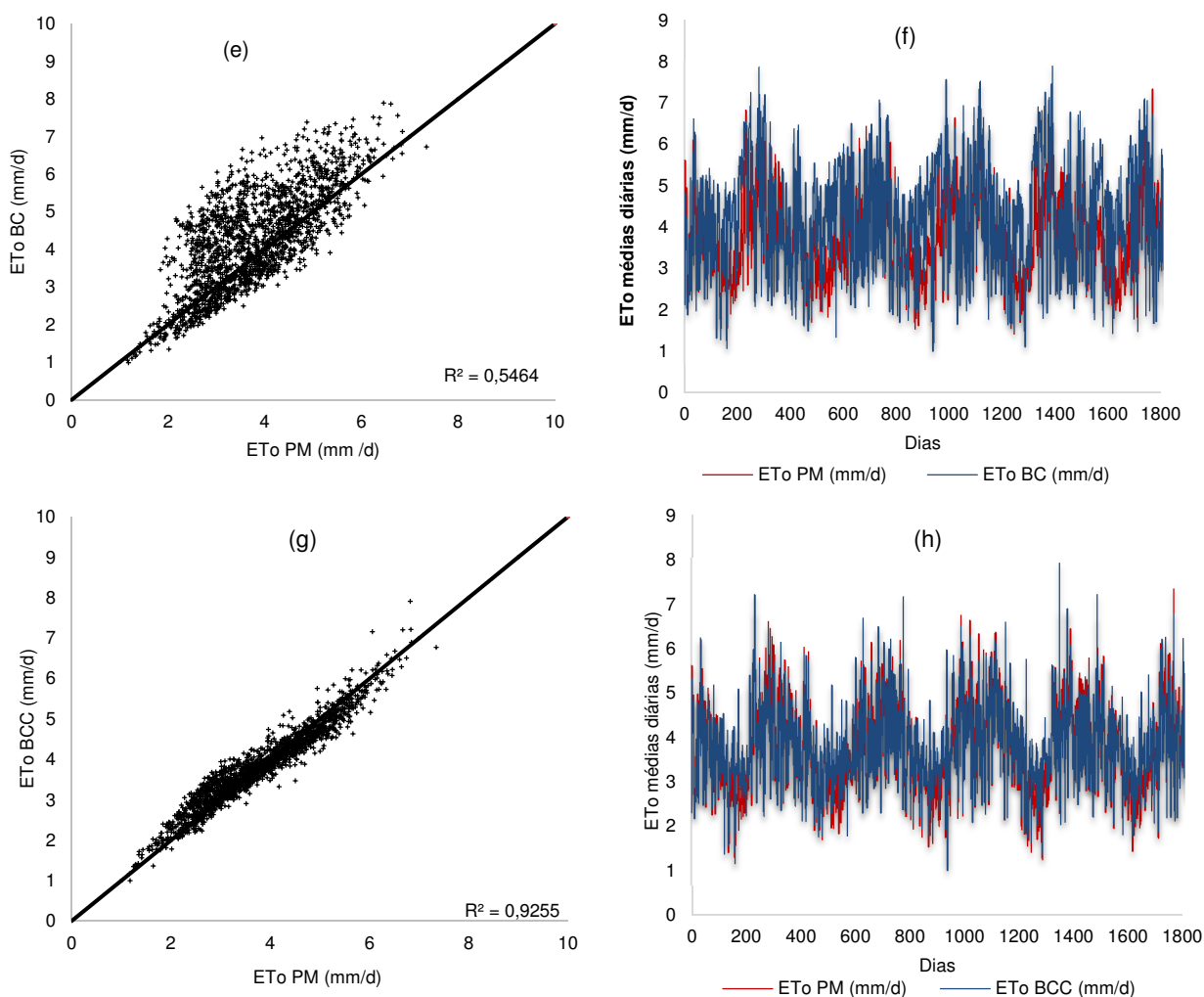


Figura 8, cont.



Observa-se por meio das figuras 8 (a) e 8 (b) que o método de Hargreaves-Samani tendeu a superestimar a ET<sub>0</sub> diária. No entanto, após calibrado tal tendência foi diminuída, promovendo uma melhor aproximação ao padrão Penman-Monteith FAO, figuras 8 (c) e 8 (d).

O modelo de Blaney-Criddle FAO-24 na sua forma original, também tendeu a superestimar a ET<sub>0</sub>, figuras 8 (e) e 8 (f); mas após calibrado o modelo gerou dados mais consistentes em relação ao padrão Penman-Monteith FAO, figuras 8 (g) e 8 (h).

## 5.2. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS ORIGINAIS E CALIBRADOS, ALIMENTADOS COM DADOS EM ESCALA MENSAL

Na tabela 10 são apresentados os índices estatísticos aplicados para verificar o desempenho dos métodos de Hargreaves-Samani original e calibrado e Blaney-Criddle FAO-24 original e calibrado, ambos em escala mensal.

Tabela 10 - Análise do desempenho e classificação dos métodos de Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSC), e Blaney-Criddle FAO-24 original (BC) e calibrado (BCC), em escala mensal, para o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016.

Equações	$r$	$d$	$c$	Classificação	EAM mm.d <sup>-1</sup>	EQM mm.d <sup>-1</sup>	REQM mm.d <sup>-1</sup>	EM mm.d <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
HS	0,93	0,56	0,53	Sufrível	1,24	1,66	1,29	2,08	0,874
HSC	0,93	0,96	0,90	Ótimo	0,19	0,06	0,25	0,81	0,873
BC	0,57	0,69	0,40	Péssimo	0,54	0,48	0,69	1,48	0,326
BCC	0,97	0,97	0,94	Ótimo	0,14	0,04	0,19	0,56	0,931

Coefficiente de correlação ( $r$ ), índice de concordância ( $d$ ), índice de confiança ( $c$ ), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrado médio (REQM), erro máximo (EM) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

Ao comparar os dados da ETo calculada pelo método de Hargreaves-Samani original para o período de calibração, 01/01/2007 a 31/12/2011, com o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016, ambos em escala mensal (tabelas 6 e 10), verificou-se que ocorreu uma pequena queda no índice de confiança ( $c$ ), de 0,54 para 0,53, já o erro absoluto médio (EAM) teve uma pequena redução na casa dos centésimos e o erro máximo (EM) teve uma pequena piora, aumentando de 1,85 para 2,08 mm.d<sup>-1</sup>. O mesmo comportamento foi verificado pela comparação do método calibrado para os dois períodos mencionados, ocorreu uma pequena piora no índice de confiança ( $c$ ), reduzindo de 0,94 para 0,90, observou-se também um pequeno aumento no EAM, EQM, REQM e EM, contudo, a maior variação ocorreu no (EM), o qual sofreu um aumento de 0,44 para 0,81 mm.d<sup>-1</sup>. Destaca-se, no entanto, que tais reduções não alteraram a classificação do método em sua forma calibrada, a qual permaneceu como “ótimo”.

Quando comparados os indicadores estatísticos gerados pelo método Blaney-Criddle FAO-24 original, para os períodos de calibração e validação (tabelas 6 e 10), verificou-se uma pequena melhora no modelo para o período de validação, todavia, o método ficou classificado como “mal”. Ao comparar os resultados do método Blaney-Criddle FAO-24 calibrado para o período de 01/01/2017 a 31/12/2011 com o período de validação, 01/01/2012 a 31/12/2016,

tabelas 7 e 10, ambos em escala mensal, verifica-se que o método se manteve classificado como “ótimo”, todavia, houve uma pequena redução no índice de confiança (c) passando de 0,97 para 0,94.

Na Figura 9 são apresentados os gráficos gerados pelo desempenho dos modelos em suas formas originais e calibrados em escala mensal para o período de validação, ambos correlacionados ao padrão Penman-Monteith FAO-56.

Figura 9 – Validação dos métodos alimentados com médias mensais. (a) e (b), ETo Hargreaves-Samani original; (c) e (d), ETo Hargreaves-Samani calibrado; (e) e (f), ETo Blaney-Criddele FAO-24 original; (g) e (h), ETo Blaney-Criddele FAO-24 calibrado.

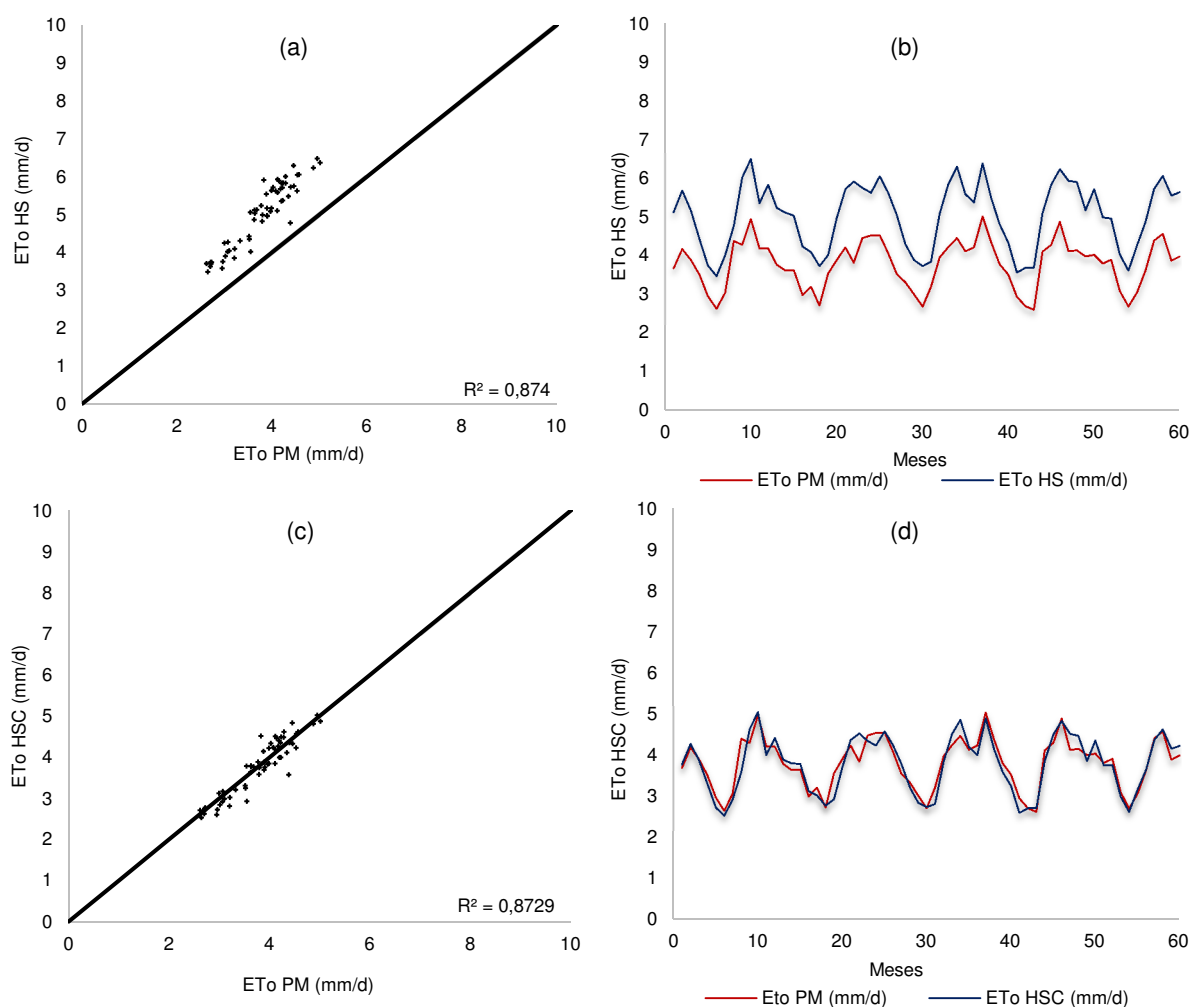
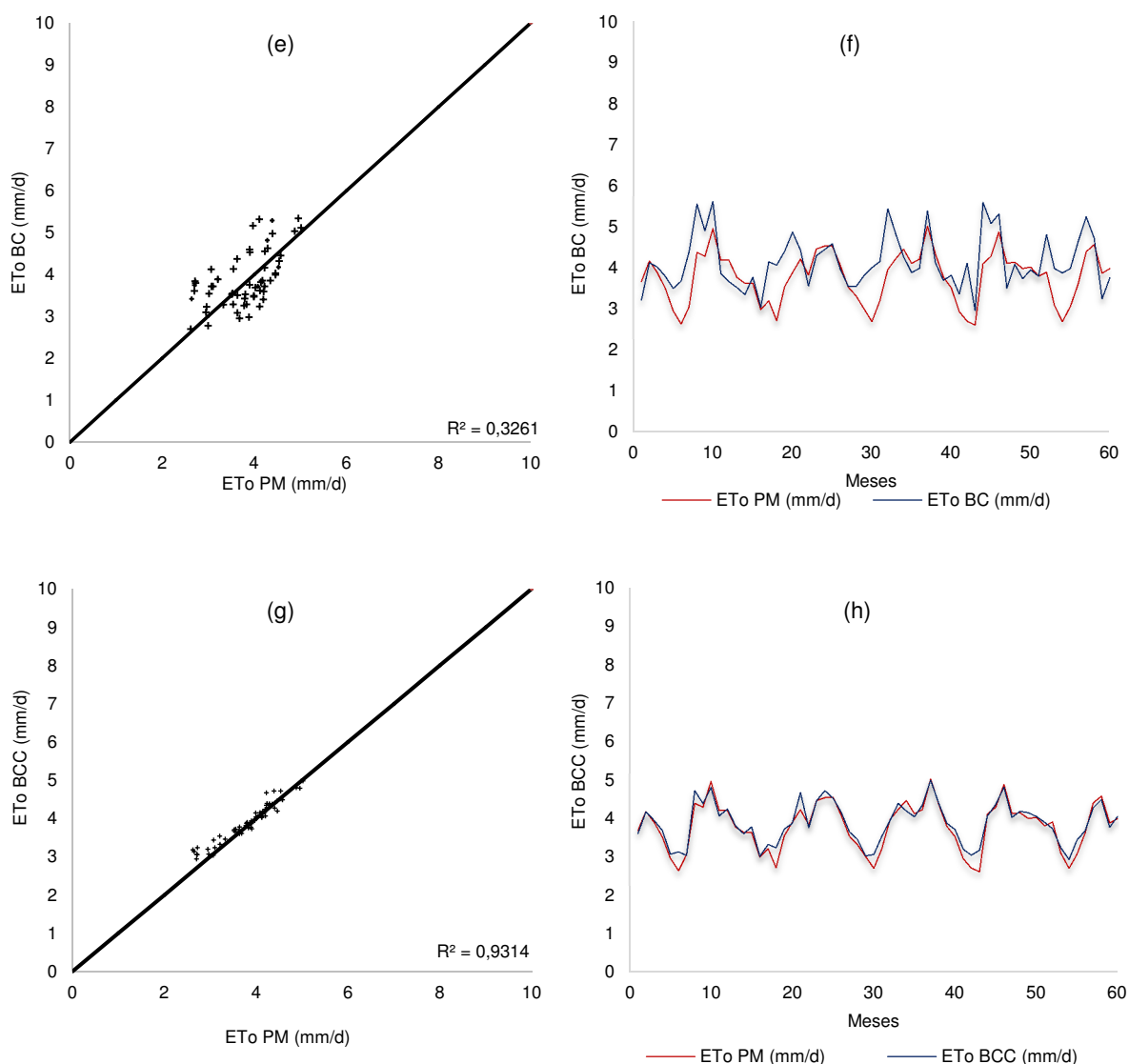


Figura 9, cont.



Por meio das figuras 9 (a) e 9 (b) verifica-se que o método de Hargreaves-Samani original alimentado com dados em escala mensal, tendeu a superestimar a ETo diária ao longo de todo o período. No entanto, quando a ETo foi calculada com o modelo calibrado observa-se que os resultados se aproximaram do padrão Penman-Monteith FAO. O mesmo foi observado com o método de Blaney-Criddle FAO-24, pois na sua forma original tendeu a superestimar a evapotranspiração, mas quando calibrado proporcionou um ajuste nos resultados.



## 6. CONCLUSÃO

Por meio do presente estudo foi possível verificar que o método de Thornthwaite em sua forma original, utilizado para calcular a ETo em estação localizada no município de Jataí-GO, superestima a evapotranspiração de referência nos meses de outubro a abril e a subestima nos meses de abril a outubro. A superestimativa coincide com o período de chuva da região e a subestimativa coincide com a época de seca. Tal comportamento foi verificado tanto para a escala diária como para a escala mensal.

Já o método de Thornthwaite modificado com  $k=0,72$  superestimou a ETo em todos os meses do ano, gerando um erro máximo maior que o verificado com o modelo na sua forma original. Tal comportamento foi observado para as duas escalas de tempo aplicadas nessa pesquisa.

O método de Hargreaves-Samani em sua forma original, tende a superestimar a ETo para todos os meses do ano, comportamento este, verificado tanto na escala diária quanto mensal.

O método de Blaney-Criddle FAO-24 em sua forma original também tendeu a superestimar a evapotranspiração de referência para as duas escalas de tempo.

A calibração do método de Thornthwaite em escala diária reduziu seu desempenho em relação ao padrão Penman-Monteith FAO-56. Já em escala mensal, ocorreu uma pequena melhora no desempenho.

A calibração do método de Thornthwaite modificado por meio do coeficiente  $k$  da temperatura efetiva não gerou resultados satisfatórios, inclusive os indicadores estatísticos ficaram piores que os gerados pelo referido método em sua forma original.

A calibração do método de Hargreaves-Samani reduziu drasticamente sua tendência em superestimar a ETo para a região em estudo, melhorou os indicadores estatísticos, com redução em seus erros. Tal ajuste teve melhor desempenho para a escala de tempo mensal, onde o método foi classificado como ótimo. Destaca-se que para o período de validação, o modelo de Hargreaves-Samani apresentou praticamente o mesmo comportamento verificado no período de sua calibração.

A calibração do modelo de Blaney-Criddle FAO-24 também proporcionou um bom ajuste nos resultados, pois nas duas escalas de tempo estudadas o modelo gerou resultados com índices de confiança acima de 0,90, classificando-o como “ótimo”.

Diante de tais resultados, pode-se concluir que os métodos de Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle FAO-24 ajustados, conforme neste trabalho, podem ser utilizados em substituição ao modelo padrão Penman-Monteith FAO-56 para a região estudada.

## 7. REFERÊNCIAS

ALENCAR, L.P. de; SEDIYAMA, G.C.; WANDERLEY, H.S.; ALMEIDA, T.S. DELGADO, R.C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**. v. 19, p.437-449, 2011. Disponível em: < <http://www.seer.ufv.br/seer/index.php/reveng/article/view/260/185>>. Acesso em: 12 mar 2017.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements - **FAO Irrigation and drainage paper**. n. 56, 1998, Disponível em: < [ftp://ftp.biosfera.dea.ufv.br/gabriel/lue\\_teste/doc/fao56.pdf](ftp://ftp.biosfera.dea.ufv.br/gabriel/lue_teste/doc/fao56.pdf) >. Acesso em: 17 maio 2016.

ANA – Agência Nacional das Águas. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil – 2014. 2016. Disponível em: < <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2017.

ARAÚJO, E. F.; JÚNIOR, A. S. A.; SILVA, E. M.; SANTOS, E. O. SOUZA, K. B.; Comparação de seis métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Picos-PI. In: 18º CONBEA – Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Campo Grande, 2014. Disponível em: < <file:///C:/Users/Sergio/Downloads/R0311-1.pdf>>. Acesso em: 10 jan 2017.

BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/267770778\\_DESEMPENHO\\_DE\\_METODOS\\_EM\\_PIRICOS\\_BASEADOS\\_NA\\_TEMPERATURA\\_DO\\_AR\\_PARA\\_A\\_ESTIMATIVA\\_DA\\_EVAPO\\_TRANSPIRACAO\\_DE\\_REFERENCIA\\_EM\\_URUSSANGA\\_SC](https://www.researchgate.net/publication/267770778_DESEMPENHO_DE_METODOS_EM_PIRICOS_BASEADOS_NA_TEMPERATURA_DO_AR_PARA_A_ESTIMATIVA_DA_EVAPO_TRANSPIRACAO_DE_REFERENCIA_EM_URUSSANGA_SC) >. Acesso em: 10 ago 2017.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; ANJOS, R.J.; SILVA, T.J.A.; LIMA, J.R.S.; ANDRADE, C.L.T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.4, p.380-390, 2012. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v16n4/v16n04a08.pdf> >. Acesso em: 05 maio 2017.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.11, n.3, p. 293-300, 2007. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662007000300008](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000300008)>:. Acesso em: 03 maio 2016.

CALVO, J.C. An evaluation of Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. **Hydrological Sciences Journal**. V. 31, n. 1, p. 51-60, 1986. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626668609491027>>. Acesso em: 12 maio 2016.

CAMARGO, Â. P.; MARIN, R. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos,

com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 251 – 257, 1999.

CAMARGO, Â. 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, p. 89–97, 1997. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/284194031\\_Avaliacao\\_do\\_desempenho\\_de\\_diferentes\\_metodos\\_de\\_estimativa\\_da\\_evapotranspiracao\\_potencial\\_no\\_Estado\\_de\\_Sao\\_Paulo\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/284194031_Avaliacao_do_desempenho_de_diferentes_metodos_de_estimativa_da_evapotranspiracao_potencial_no_Estado_de_Sao_Paulo_Brasil)>. Acesso em: 13 mar 2017.

CAMARGO, M.B.P. & CAMARGO, A. P. Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial. **Bragantia**. v.59 n.2 Campinas, p. 125-137 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052000000200002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052000000200002)>. Acesso em: 08 maio 2016.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n.3, p. 456 – 465, 2011. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/12760/9732>>. Acesso em 13 fev 2017.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Ajuste do modelo de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência no noroeste paulista. **Revista brasileira de agricultura irrigada**. v.7, nº.5, p. 306-316, 2013. Disponível em: <<http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/172>> Acesso em: 20 fev 2017.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul – MS. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v. 21, n. 2, p. 159 – 172, 2013. Disponível em: <<http://www.bibliotekevirtual.org/revistas/REVENG/v21n02/v21n02a06.pdf>>. Acesso em: 15 jun 2016.

CRIPPEN, J. R.; Natural Water Loss and Recoverable Water in Mountain Basins of Southern California. U.S. **Geological Survey Professional Paper 417-E**, p. 24, 1965. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/pp/0417e/report.pdf>>. Acesso em: 05 out 2017.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage**. Roma, v. 24, p. 136, 1977. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-f2430e.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2016.

EFTHIMIOU, N.; ALEXANDRIX, S.; KARAVITIS, C.; MAMASSIS, N. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation between various methods and the FAO56 Penman-Monteith procedure. **European Water**. v.42, p 19-34, 2013. Disponível em: <[http://www.ewra.net/ew/pdf/EW\\_2013\\_42\\_02.pdf](http://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2013_42_02.pdf)>. Acesso em: 05 jul 2017.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 246 – 255, 2012. Disponível em: <<http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1426>>. Acesso em: 03 jul 2017.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. **Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos**. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, p. 44. 2010. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/>>

/publicacao/879913/evapotranspiracao-uma-revisao-sobre-os-metodos-empiricos>. Acesso em: 08 ago 2017.

FILHO, M. A. C.; PEREIRA, F. A. C.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, G. X. S. **O processo de evapotranspiração**. 1. Ed. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnologia, 2011. 771 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55930/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap2.pdf>>. Acesso em: 02 mar 2017.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R. G. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on Penman-Monteith reference ET estimates in semiarid regions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 89, n. 3, p. 275 – 286, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377407000388>>. Acesso em: 12 ago 2017.

HALLAL, M. O.; SCHÖFFEL, E. R.; BRIXNER, CUNHA, A. R. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas, Rio Grande do Sul. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 60, n. 1, p. 1 – 10, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/2322>>. Acesso em: 10 ago 2017.

HATFIELD, J.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 5, p. 301 - 308, 1996. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9437%281996%29122%3A5%28301%29>>. Acesso em: 23 maio 2016.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E.; History of Lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. **Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements**. New York, p. 1-9, 1991. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/279560720\\_History\\_of\\_Lysimeter\\_Design\\_and\\_Use\\_for\\_Evapotranspiration\\_Measurements](https://www.researchgate.net/publication/279560720_History_of_Lysimeter_Design_and_Use_for_Evapotranspiration_Measurements)>. Acesso em: 10 out 2017.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 16 jul 2017.

JANERETTE, G. D.; LARSEN, L. A global perspective on changing sustainable urban water supplies. **Global and Planetary Change**, v. 50, p. 202 – 211, 2006. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S1570644314000446/1-s2.0-S1570644314000446-main.pdf?\\_tid=e567381a-85ec-11e7-9b0e-00000aab0f26&acdnat=1503263996\\_231b6aefae9e6c7797c3a32f50863b79](http://ac.els-cdn.com/S1570644314000446/1-s2.0-S1570644314000446-main.pdf?_tid=e567381a-85ec-11e7-9b0e-00000aab0f26&acdnat=1503263996_231b6aefae9e6c7797c3a32f50863b79)>. Acesso em: 15 maio 2017.

JÚNIOR, E. D. F.; LOPES, A. S.; OLIVEIRA, G. Q.; JUNG, L. H. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquidauna, MS. **Irriga, Botucatu**. v. 17, n. 4, p. 418 – 437, 2012. Disponível em <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/viewFile/282/312>>. Acesso em: mai 2017.

JÚNIOR, J. C. F. B.; OLIVEIRA, A. L. M.; ANDRADE, C. L. T.; PINHEIRO, M. A. B. Equação de Hargreaves-Samani calibrada em diferentes bases temporais para Sete Lagoas, MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 1, p. 38 – 49, 2017. <<http://www.seer.ufv.br/seer/index.php/reveng/article/view/742/467>>. Acesso em 08 fev 2017.

JÚNIOR, L. C. P. **O uso da água em Goiás, potencialidade, demanda para irrigação por pivôs centrais e perspectivas**. Goiânia. 94 p. 2017. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. Disponível em: < <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/7209> >. Acesso em: 16 ago 2017.

JUNIOR, J. C. L.; 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. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rca/v47n3/1806-6690-rca-47-03-0447.pdf> >. Acesso em: 10 ago 2017.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J.; Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transactions of the ASAE, Saint Joseph**, v. 14, n. 5, p. 954-959, 1971. Disponível em: < <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/199/1/182.pdf> >. Acesso em: 13 maio 2017.

LIANG, L.; Li, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.150, n.2, p.298-306. 2009. Disponível em: < [https://ac.els-cdn.com/S0168192309002792/1-s2.0-S0168192309002792-main.pdf?\\_tid=7e3a28c0-a97b-11e7-8996-00000aab0f6b&acdnat=1507173538\\_de81d05f868ed520482a3c3b0f454709](https://ac.els-cdn.com/S0168192309002792/1-s2.0-S0168192309002792-main.pdf?_tid=7e3a28c0-a97b-11e7-8996-00000aab0f6b&acdnat=1507173538_de81d05f868ed520482a3c3b0f454709) >. Acesso em 03 jun 2017.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; HAMMECKER, C. MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIRA, C. A. B. O. Calibration of Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub-Humid Region of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 5, p. 1 – 5, 2013. Disponível em: < [https://file.scirp.org/pdf/JWARP\\_2013123116555626.pdf](https://file.scirp.org/pdf/JWARP_2013123116555626.pdf) >. Acesso em: 08 ago 2017

LOBATO, O. J. S. M.; LOBATO, E. J. V. Considerações sobre a evapotranspiração potencial medida e calculada no município de Goiânia e circunvizinhos. **Anais da Escola de Agronomia e Veterinária**, Goiânia, v. 1, n. 2, p. 50 – 73, 1979. Disponível em: < <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/2364> >. Acesso em: 05 jun 2016.

MAEDA, E. E.; WIBERG, D. A.; PELLIKKA, P. K. E. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. **Applied Geography**. v. 31, p. 251 – 258, 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622810000639> >. Acesso em: 15 ago 2017.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. Ed. Viçosa-MG: UFV, 2006. 355p.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. Chuvas no cerrado da região centro-oeste do Brasil: análise histórica e tendência futura. **Ateliê geográfico**. v. 6, n.2, p. 112 – 130, 2012. Disponível em <<https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/15234/11451>>. Acesso em: 13 maio 2017.

MARIANO Z. F. **A importância da variável climática na produtividade da soja no sudoeste de Goiás**. Rio Claro. 168 p. 2005. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Estadual Paulista. Rio Claro/SP. Disponível em: < [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/104376/mariano\\_zf\\_dr\\_rcla.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/104376/mariano_zf_dr_rcla.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y) >. Acesso em: 13 maio 2017.

MATERÁN, F. J. V.; OLIVEIRA, R. A.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P.; R.; RUIZ, H. A.; TAGLIAFERRE, C.; Minilímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro para medida da evapotranspiração de referência. **Revista UDO Agrícola**. v.9, n.1, p. 243-258, 2009. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3294015>>. Acesso em 11 out 2017.

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. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n2/v7n2a15.pdf>>. Acesso em 18 jul 2017.

MOELETSI, M. E.; WALKER, S.; HAMANDAWANA, H. Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating decadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**. v. 66, p. 4 – 15, 2013. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S1474706513001034/1-s2.0-S1474706513001034-main.pdf?\\_tid=5269949e-34ee-11e7-a2b1-00000aacb360&acdnat=1494358564\\_b526122dc0e83e8e85b3867d501f974e](http://ac.els-cdn.com/S1474706513001034/1-s2.0-S1474706513001034-main.pdf?_tid=5269949e-34ee-11e7-a2b1-00000aacb360&acdnat=1494358564_b526122dc0e83e8e85b3867d501f974e)>. Acesso em: 09 mai 2017.

MOHAWESH, Osama. Spatio-temporal calibration of Blaney-Criddle equation in arid and semiarid environment. *Water Resources Management*. v. 24, p. 2187 – 2201, 2010. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/226752309\\_Spatio-temporal\\_Calibration\\_of\\_Blaney-Criddle\\_Equation\\_in\\_Arid\\_and\\_Semiarid\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/226752309_Spatio-temporal_Calibration_of_Blaney-Criddle_Equation_in_Arid_and_Semiarid_Environment)>. Acesso em: 20 ago 2017.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C.D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 28, n. 2, p. 181-191, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862013000200007](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862013000200007)>. Acesso em: 01 set 2017.

NETO, A. C. F.; MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R.; VIEIRA, G. H. S.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G. Comparação entre métodos simplificados de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para regiões produtoras de café brasileiras. **Coffe Science**. v. 6, n. 2, p. 159-171, 2011. Disponível em: <<http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/232/pdf>>. Acesso em: 20 jul 2017.

NETO, D. D.; LIVER, Q. J. V.; METSELAAR, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agrícola**, v. 67, n. 1, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sa/v67n1/v67n01a13.pdf>>. Acesso em: 08 jun 2016.

OLIVEIRA, A. L. M. **Calibração da equação de Hargreaves-Samani e de um novo método para estimativa da evapotranspiração de referência na região mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. 2016. 102p. Dissertação – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei. Disponível em: <[http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgca/DISSERTACAO-PPGCA-15\\_07\\_2016\\_ALINE.pdf](http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgca/DISSERTACAO-PPGCA-15_07_2016_ALINE.pdf)>. Acesso em: 08 mai 2017.

OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F.; ROMÃO, P. A.; CORTÊS, F. C. Estudo Comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.31, n.2, p. 121-126, 2001. Disponível em: < <http://www.revistas.ufg.br/pat/article/download/2473/2442?journal=pat> >. Acesso em: 21 jul 2016.

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. Disponível em: < <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1462&context=biosysengfacpub> >. Acesso em: 06 mar 2017.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise da sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro – SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2. p. 299-306, 2014. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v29n2/a12v29n2.pdf> >. Acesso em: 16 maio 2017.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. **Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Departamento de Ciências Exatas Piracicaba**. 2007. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/profile/Paulo\\_Sentelhas/publication/285651687\\_Agrometeorologia\\_Fundamentos\\_e\\_aplicacoes\\_praticas/links/5806560c08aeb85ac85f46ee/Agrometeorologia-Fundamentos-e-aplicacoes-praticas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Sentelhas/publication/285651687_Agrometeorologia_Fundamentos_e_aplicacoes_praticas/links/5806560c08aeb85ac85f46ee/Agrometeorologia-Fundamentos-e-aplicacoes-praticas.pdf) >. Acesso em: 09 maio 2017.

PEREIRA, A. R.; PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, Netherlands, v. 66, n. 2, p. 251-257, 2004. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377403003196>>. Acesso em: 10 mai 2017.

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

PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. S.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488 – 2493, 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n9/a376cr1581.pdf> >. Acesso em 15 fev 2017.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R. SOMAVILLA, L.; RIGHI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 283 – 290, 2012. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782012000200016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782012000200016)>: Acesso em: 05 ago 2017.

RASSINI, J. B.; Manejo de água de irrigação para Alfafa (*Medicago sativa* L.). **Revista brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 6. p.1681-1688, 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-35982001000700004&lng=pt\\_BR&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982001000700004&lng=pt_BR&nrm=iso)>. Acesso em: 10 ago 2017.

RIBEIRO, A. A.; SIMEÃO, M.; SOARES, L. M.; MOURA, R.S. Avaliação de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência em Sobral, CE. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 7, n. 4, p. 71-81, 2015. Disponível em: <



[https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/660/pdf\\_22](https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/660/pdf_22)>. Acesso em: 13 ago 2017.

RIGHI, E. Z.; ANGELOCCI, L. R.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B. Transpiração do tomateiro cultivado em estufa plástica e suas relações com a radiação solar e déficit de saturação do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 10, n. 1, p. 9 – 18, 2002. Disponível em: < <http://coral.ufsm.br/rba/p9101.html>>. Acesso em: 01 jul 2017.

SANCHES, F.M.; XIMENES, A.R.; CORADI, P.C.; ROQUE, C.G.; CUNHA, F.F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.13, n.2, p. 19-31, 2015. Disponível em: < <http://periodicos.unemat.br/index.php/rcaa/article/view/1179/1253> >. Acesso em: 11 jul 2017.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1 – 7, 1996. < [http://www.sbagro.org.br/revistas/resumo\\_das\\_revistas\\_rba.pdf](http://www.sbagro.org.br/revistas/resumo_das_revistas_rba.pdf)>. Acesso em 10 mar 2017.

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, Canada. **Agricultural Water Management**, v.97, p. 635-644, 2010. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377409003436> >. Acesso em: 20 jul 2017.

SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. S.; CARMO, F. F.; LÊDO, E. R. F.; FILHO, J. A. S. Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Hargreaves-Samani no estado do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**. 2015. v. 9, n. 2, p. 132-141, 2015. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/282054700\\_ESTIMATIVA\\_DA\\_EVAPOTRANSPIRACAO\\_DE\\_REFERENCIA\\_PELA\\_EQUACAO\\_DE\\_HARGREAVES-SAMANI\\_NO\\_ESTADO\\_DO\\_CEARA\\_BRASIL\\_REFERENCE\\_EVAPOTRANSPIRATION\\_ESTIMATED\\_BY\\_HARGREAVES-SAMANI\\_IN\\_THE\\_STATE\\_OF\\_CEARA\\_BRAZIL](https://www.researchgate.net/publication/282054700_ESTIMATIVA_DA_EVAPOTRANSPIRACAO_DE_REFERENCIA_PELA_EQUACAO_DE_HARGREAVES-SAMANI_NO_ESTADO_DO_CEARA_BRASIL_REFERENCE_EVAPOTRANSPIRATION_ESTIMATED_BY_HARGREAVES-SAMANI_IN_THE_STATE_OF_CEARA_BRAZIL) >. Acesso em: 15 jul 2017.

SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R. E. F. Desempenho de diferentes métodos da estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. **Bioscience Journal**. v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011. Disponível em: < <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/viewFile/7374/6846>>. Acesso em: 21 jul 2016.

TABARI, H. Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates. **Water Resour Manage**. 2009. v. 24, p 2311-2337. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/225733526\\_Evaluation\\_of\\_Reference\\_Crop\\_Evapotranspiration\\_Equations\\_in\\_Various\\_Climates?enrichId=rgreq-a50d30ba565cf2915a548691e15eb17c-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzlyNTczMzUyNjBUzoxMjMyNTEwODc1MjM1ODRAMTQwNjM5Njc4MTIzOA%3D%3D&el=1\\_x\\_2&\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/225733526_Evaluation_of_Reference_Crop_Evapotranspiration_Equations_in_Various_Climates?enrichId=rgreq-a50d30ba565cf2915a548691e15eb17c-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzlyNTczMzUyNjBUzoxMjMyNTEwODc1MjM1ODRAMTQwNjM5Njc4MTIzOA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf) >. Acesso em: 20 ago 2017.

TALAFE, P. H. Performance evaluation of modified versions of Hargreaves equation across a wide range of Iranian climates. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 126, n. 1-2, 2014. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-014-0333-5> >. Acesso em 06 fev 2017.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**. 1948. v. 38, n. 1. Disponível em: < <https://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf> >. Acesso em: 17 maio 2016.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**. v. 22, n. 63, p. 7 – 16, 2008. Disponível em < <http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a02.pdf> >. Acesso em: 03 fev 2017.

URREA, R. L.; OLALLA, F. M. de S.; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, v.86, p. 277 – 282, 2006. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377406001533> >. Acesso em: 15 ago 2017.

VALLORY, N. D.; DOHLER, R. E.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Rio de Janeiro. **Revista brasileira de agricultura irrigada**. v. 10, n. 2, p. 576-585, 2016. Disponível em: < <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/407> >. Acesso em: 10 ago 2017.

VASQUES, H. S.; BARROS, J. R. Os impactos da apropriação do cerrado sobre os indicadores de precipitação pluvial: o caso do município de Jataí – GO. In: 12<sup>o</sup> SBCG - Simpósio brasileiro de climatologia geográfica variabilidade e suscetibilidade climática implicações ecossistêmicas e sociais. Goiânia, 2016. Disponível em: < [http://www.abclima.ggf.br/sbcg2016/anais/arquivos/eixo\\_5/trabalho%20\(9\).pdf](http://www.abclima.ggf.br/sbcg2016/anais/arquivos/eixo_5/trabalho%20(9).pdf)>. Acesso em: 18 jul 2017.

VELLAME, L. M.; FILHO, M. A. C.; COELHO, E. F.; JÚNIOR, E. F. F.; Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em ambiente protegido. **Revista Caatinga**. v. 25, n. 1, p. 153-159, 2012. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/283602660\\_Constant\\_level\\_water\\_table\\_weight\\_ly\\_simeter\\_for\\_greenhouse](https://www.researchgate.net/publication/283602660_Constant_level_water_table_weight_ly_simeter_for_greenhouse) >. Acesso em: 05 out 2017.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. v. 5, p. 589 – 606, 1985. Disponível em: < [file:///C:/Users/Sergio/Downloads/Climatology\\_of\\_the\\_Terrestrial\\_Seasonal\\_Water\\_Cycl%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Sergio/Downloads/Climatology_of_the_Terrestrial_Seasonal_Water_Cycl%20(2).pdf) >. Acesso em: 06 maio 2017.