Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

# MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO PERÍODO SECO E CHUVOSO EM IMPERATRIZ, MA

## *Methods of estimation of reference evapotranspiration in the dry and rainy season in Imperatriz, MA*

## *Métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia en los periodos secos y lluviosos en Imperatriz, MA*

**Rafael Guimarães Silva Moraes**
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)
r.f_guimaraes@hotmail.com

**Elton Ferreira Lima**
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)
elton110@hotmail.com

**Pedro Luid de Sousa Oliveira**
Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Jataí (UFJ)
pluid93@hotmail.com

**Jossimara Ferreira Damascena**
Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina (UEL)
jossi_agro@hotmail.com

**Cristiane Matos da Silva**
Coordenadora do Laboratório de Irrigação, Hidráulica e Hidrologia-LIHH, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)
cristiane.silva@uemasul.edu.br

**Resumo:** Para um bom manejo de irrigação dos cultivos agrícolas a determinação da evapotranspiração é indispensável. Pensando nisso objetivou-se com este estudo comparar e avaliar o desempenho da estimativa de evapotranspiração de referência (Eto) pelos métodos de Hargreaves-

Samani, Makkink, Budyko, Turc, Jensen-Haise, Linacre, Kharrufa, Radiação FAO24 em relação ao método padrão de Penman-Monteith/FAO no período seco e chuvoso, em Imperatriz, MA na tentativa de encontrar um método mais simples e de fácil execução para estimativa da Eto. Os dados meteorológicos necessários para execução desse trabalho foram adquiridos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia, utilizando-se uma série histórica contínua de onze anos (2005-2015) dos elementos climáticos que foram utilizados nas equações que compõem os diferentes métodos. Para a avaliação do desempenho estatístico dos modelos, foram empregados os indicadores do coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação ($R^2$), índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c). O método da Radiação FAO24 apresentou o melhor desempenho na estimativa diária da evapotranspiração de referência no Município de Imperatriz, MA, nos dois períodos analisados.

**Palavras-chave:** Irrigação. Correlação. Penman-Monteith.

**Abstract:** For a good irrigation management of agricultural crops, the determination of evapotranspiration is essential. With that in mind, the aim of this study was to compare and evaluate the performance of the reference evapotranspiration (ETo) estimate by the methods of Hargreaves-Samani, Makkink, Budyko, Turc, Jensen-Haise, Linacre, Kharrufa, FAO24 Radiation in relation to the standard method of Penman- Monteith/FAO in the dry and rainy season, in Imperatriz, MA, in an attempt to find a simpler and easier method to estimate the Eto. The meteorological data needed to carry out this work were acquired from the National Institute of Meteorology database, using an eleven-year continuous historical series of the climatic elements that were used in the equations that make up the different methods. To assess the statistical performance of the models, the indicators of correlation coefficient (r), coefficient of determination ($R^2$), agreement index (d) and performance index (c) were used. The FAO24 Radiation method showed the best performance in the daily estimate of reference evapotranspiration in the Municipality of Imperatriz, MA, in the two periods analyzed.

**Keywords:** Irrigation. Correlation. Penman-Monteith.

**Resumen:** Para una buena gestión del riego de los cultivos agrícolas, la determinación de la evapotranspiración es fundamental. Con eso en mente, el objetivo de este estudio fue comparar y evaluar el desempeño de la estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo) por los métodos de Hargreaves-Samani, Makkink, Budyko, Turc, Jensen-Haise, Linacre, Kharrufa, FAO24 Radiación en relación con la método estándar de Penman-Monteith/FAO en la estación seca y lluviosa, en Imperatriz, MA, en un intento de encontrar un método más simple y fácil para estimar el Eto. Los datos meteorológicos necesarios para la ejecución de este trabajo se obtuvieron de la base de datos del Instituto Nacional de Meteorología, utilizando una serie histórica continua de once años de los elementos climáticos que se utilizaron en las ecuaciones que componen los diferentes métodos. Para evaluar el desempeño estadístico de los modelos se utilizaron los indicadores de coeficiente de correlación (r), coeficiente de determinación ($R^2$), índice de concordancia (d) e índice de desempeño (c). El método Radiación FAO24 presentó el mejor desempeño en la estimación diaria de la evapotranspiración de referencia en el Municipio de Imperatriz, MA, en los dos períodos analizados.

**Palabras clave:** Irrigación. Correlación. Penman-Monteith.

Submetido em: 21/07/2022
Aceito para publicação em: 30/06/2023
Publicado em: 15/07/2023

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas, o crescimento da produção agrícola tem sido impulsionado principalmente pelo aumento significativo nos rendimentos por unidade de área, juntamente com a intensificação das lavouras. Sabendo que nas próximas décadas, o crescimento populacional estimado é de 10 bilhões de pessoas (GAZZONI, 2017), cada hectare cultivado precisará produzir quantidades consideravelmente maiores que os níveis atuais, mostrando que a maneira convencional de produção não acompanhará a demanda sem que o cenário agrícola volte suas atenções para a sustentabilidade (FENG *et al*., 2017). Assim, o aumento vertical da produtividade passa pela maior eficiência no uso de recursos disponíveis para atender a demanda futura por alimentos (CASSMAN, 2003; LOBELL *et al*., 2009; VAN ITTERSUM, 2013). Nesse cenário, a pesquisa por manejos que visem aumentar a eficiência no uso de recursos na produção, tem papel fundamental na segurança alimentar.

A água é o fator mais limitante na produção agrícola, portanto, a busca por meios que possibilitem seu uso consuntivo na agricultura torna-se de fundamental importância. Neste contexto, o conhecimento da evapotranspiração das culturas de forma precisa, é de grande importância no gerenciamento dos rescursos hídricos, contribuindo para o uso mais eficiente da água (RIBEIRO *et al*., 2016).

Na literatura existem vários métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), no entanto o método de Penman-Monteith é considerado internacionalmente o mais apropriado para sua estimativa (ALLEN *et al*., 1998; SMITH, 1991). Entretanto, devido a grande exigência de variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento que nem sempre estão disponíveis para os produtores rurais, várias pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de encontrar métodos mais simples para o cálculo da ETo. Porém, para Imperatriz-Maranhão ainda não foram desenvolvidas pesquisas com esse objetivo e nem mesmo com o objetivo de se mensurar a ETo pelo método padrão da FAO (Penman-Monteith).

A escassez de dados de evapotranspiração é um dos desafios da gestão de água em todo o estado do Maranhão. Especialmente em Imperatriz a escassez de recursos é crítica para a produção de grandes culturas como a soja, milho e arroz que tem tido suas produções limitadas devido a deficiência hídrica que ocorre na região durante a maior parte do ano (maio a dezembro) (SANTANA *et al*., 2019). Além disso, por falta de informações do requerimento

hídrico das culturas, os produtores acabam aplicando água de maneira equivocada, temendo que a cultura sofra um estresse hídrico, o que pode comprometer a produção. Esse excesso de água aplicado traz consigo o desperdício de energia e de água, usados em um bombeamento desnecessário (BERNARDO *et al*., 2008), assim, tornando a prática da irrigação não sustentável.

Por tudo ora citado, tendo em vista a inexistência de informações a respeito da evapotranspiração de referência para a região, o presente trabalho tem como objetivo comparar e avaliar o desempenho da estimativa de evapotranspiração de referência pelos métodos de Hargreaves-Samani, Makkink, Budyko, Turc, Jensen-Haise, Linacre, Kharrufa, Radiação FAO24 em relação ao método padrão de Penman-Monteith/FAO no período seco e chuvoso, em Imperatriz, MA na tentativa de encontrar um método mais simples e de fácil execução para estimativa da ETo.

## 2. METODOLOGIA

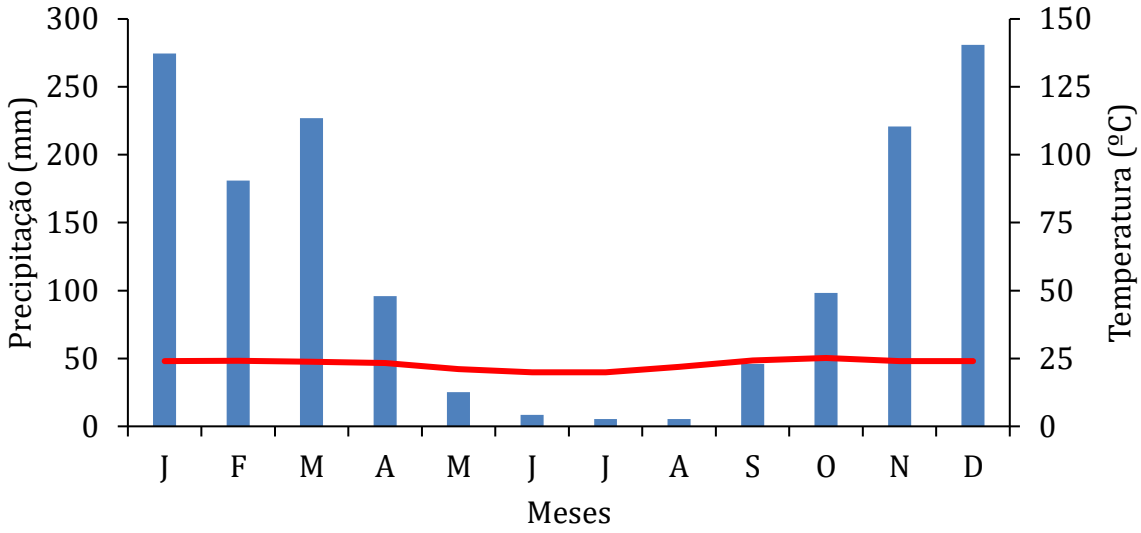
O estudo foi realizado na região Sudoeste do estado do Maranhão, no município de Imperatriz, ($5^0$ 3’ 32” de latitude S e $47^0$ 26’ 35” de longitude W, com altitude média de 123 metros) (Figura 1). A região possui um clima tropical quente e úmido, onde a temperatura média anual é de aproximadamente 22,95 $^0$C, com umidade relativa média do ar de 66,29%, e precipitação média anual de 1463,5 mm, com chuvas limitadas por um longo período de tempo (maio a setembro), e com grande variabilidade interanual (Figura 2) (Dados obtidos com base na série histórica de dados do período estudado).

**Figura 1 -** Localização geográfica do município de Imperatriz, MA.




**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2023).

**Figura 2 -** Precipitação e temperatura média mensal para Imperatriz - MA entre 2005 e 2015.




**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2021).

Os dados meteorológicos necessários para execução desse trabalho foram adquiridos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizando-se uma série histórica contínua de onze anos (janeiro de 2005 a dezembro de 2015) dos elementos climáticos que foram utilizados nas equações que compõem os diferentes métodos.

A determinação da ETo foi realizada através do software Microsoft Office Excel 2007® com as seguintes equações retiradas do trabalho de Cunha et al. (2013): equação de referência Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (1), Hargreaves-Samani (PEREIRA et al., 1997) (2), Makkink (MAKKINK, 1957) (3), Budyko (BUDYKO, 1974) (4), Turc (CARVALHO et al., 2015) (5), Jensen-Haise (JENSEN; HAYSE, 1963) (6), Linacre (LINACRE, 1977) (7), Kharrufa (KHARRUFA, 1985) (8) e Radiação FAO24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977) (9).

## 2.1 Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{[0{,}408.\Delta.(Rn - G) + \frac{(900.U_2)}{(T+273)}.(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma.(1 + 0{,}34.U_2)} \quad (1)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; Rn = Saldo de radiação em MJ.m$^{-2}$.dia$^{-1}$; G = Densidade do fluxo de calor no solo em MJ.m$^{-2}$.dia$^{-1}$; Δ = Declinação da curva de saturação do vapor de água em kPa °C$^{-1}$; $U_2$ = Velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo em m.s$^{-1}$; T = Temperatura média do ar em °C; es = Pressão de saturação do vapor em kPa; ea = Pressão atual do vapor em kPa; *y* = Fator psicrométrico em MJ.kg$^{-1}$.

## 2.2 Hargreaves-Samani

$$ET_o = 0{,}0023.(T_{med} + 17{,}8).(T_{max} - T_{min})^{0{,}5}.R_a \quad (2)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; Tmed = Temperatura média do ar em ˚C; Tmax = Temperatura máxima do ar em ºC; Tmin = Temperatura mínima do ar em ˚C; Ra = radiação solar extraterrestre em mm.dia$^{-1}$.

## 2.3 Makkink

$$ET_o = (R_S . W) + 0{,}12 \quad (3)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; Rs = Radiação solar global em MJ.m$^{-2}$.dia$^{-1}$, W = Fator de ponderação calculado pela equação:

$$W = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \quad (4)$$

Em que: Δ = Declinação da curva de saturação do vapor de água em kPa °C$^{-1}$, *y* = Fator psicrométrico em MJ.kg$^{-1}$.

## 2.4 Budyko

$$\mathrm{ET_o} = 0{,}2 . \mathrm{T} \quad (5)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; T = Temperatura média diária (°C).

## 2.5 Turc

$$\mathrm{ET_o} = \frac{0{,}013 . \mathrm{T}}{\mathrm{T} + 15}(23{,}9 . \mathrm{Rs} + 50) \quad (6)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; $R_S$ = Radiação solar global em MJ.m$^{-2}$.dia$^{-1}$, obtida na estação meteorológica; T = Temperatura média diária (°C).

## 2.6 Jensen-Hayse

$$ET_o = R_S\,(0{,}025.\,T_{med} + 0{,}078) \quad (7)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; Rs = Radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (mm); Tmed = Temperatura do ar média diária em °C.

## 2.7 Linacre

$$ET_o = 500.\frac{\left(\frac{T_{med} + 0{,}006.\,h}{100 - \varphi}\right) + 15.\,(T_{med} - T_{po})}{(80 - T_{med})} \quad (8)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; h = Altitude local (metros); ϕ = Altitude em módulo (graus); Tmed = Temperatura média do ar em ˚C; $T_{po}$ = Temperatura média do ponto de orvalho em °C.

## 2.8 Kharrufa

$$ETo = 0{,}34 \text{ x } p \text{ x } T_{med}{}^{1,3} \quad (9)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm dia$^{-1}$; $T_{med}$ = Temperatura média do ar em °C; p = Porcentagem de insolação máxima diária (tabelado).

## 2.9 Radiação FAO24

$$\mathrm{ETo} = -0{,}3.k\left(\frac{\Delta}{(\Delta+\gamma)}.Rs\right) \quad (10)$$

Em que: ETo = Evapotranspiração de referência em mm $dia^{-1}$; Rs = Radiação solar à superfície, em $mmd^{-1}$; Δ = Declinação da curva de saturação do vapor de água em kPa $°C^{-1}$, *y* = Fator psicrométrico em $MJ.kg^{-1}$, k = coeficiente local (adm).

O desempenho das metodologias de estimativa da ETo em relação ao método de Penman Monteith foi avaliado utilizando os seguintes parâmetros estatísticos: Erro padrão da estimativa (EPE), coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação ($R^2$), índice (d) de concordância de Willmott (1982), e índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1977), equações 10, 11, 12, 13 e 14 respectivamente.

$$\mathrm{EPE} = \left[\frac{\sum_{i-l}^{n} Yi - Xi^2}{n}\right]^{1/2} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{Oi}-\mathrm{O}).(\mathrm{Pi}-\mathrm{P})}{\sqrt{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{Oi}-\mathrm{O})^2}.\sqrt{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{Pi}-\mathrm{P})^2}} \quad (12)$$

Em que: Pi = Evapotranspiração estimada pelo método testado ($mm.dia^{-1}$); P = Média do valor estimado ($mm.dia^{-1}$); Oi = Evapotranspiração estimada pelo método padrão ($mm.dia^{-1}$); O = Média dos valores observados pelo método padrão ($mm.dia^{-1}$).

$$R^2 = r^2 \quad (13)$$

Em que: O coeficiente de determinação ($R^2$) é igual ao coeficiente de correlação (r) elevado ao quadrado.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Pi - Oi)^2}{\sum(|Pi - O| + |Oi - O|)^2}\right] \quad (14)$$

Em que: d = Coeficiente de concordância; Pi = Evapotranspiração estimada pelo método testado (mm.dia$^{-1}$); Oi = Evapotranspiração estimada pelo método padrão (mm.dia$^{-1}$); O = Média dos valores observados pelo método padrão (mm.dia$^{-1}$).

$$c = r.d \quad (15)$$

Em que: r = coeficiente de correlação e d = Coeficiente de concordância de Willmott obtido na equação 13.

Os valores do índice "c" variam de 0,0 para nenhuma concordância a 1,0 para concordância perfeita entre os dados, qualificando os resultados de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1 -** Classificação do índice de desempenho, proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

| C | Desempenho |
|---|---|
| > 0,90 | Ótimo |
| 0,81 a 0,90 | Muito Bom |
| 0,71 a 0,80 | Bom |
| 0,51 a 0,70 | Mediano |
| 0,41 a 0,50 | Sofrível |
| 0,31 a 0,40 | Mau |
| ≤ 0,30 | Péssimo |

**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2019).

# 3. DESENVOLVIMENTO

## 3.1 Estação seca

As metodologias usadas nesse estudo foram escolhidas pela facilidade de operação e baixa exigência de variáveis meteorológicas uma vez que algumas necessitam apenas de dados de temperatura do ar, outras apenas de dados de radiação solar e algumas pela combinação de temperatura e radiação, dados esses fáceis de ser obtido em qualquer local visto que a radiação solar pode ser obtida através dos dados de temperatura do ar.

No período seco (tabela 2), o melhor método entre os estudados foi o da Radiação FAO24 com desempenho bom (c = 0,77; d = 0,84; EPE = 0,58 mm.dia$^{-1}$). Resultado este pode ser explicado pelo fato deste método ser baseado na radiação solar, sendo que geralmente os métodos baseados na radiação são os que mais se assemelham com o método padrão de Penman-Monteith. Resultados semelhantes foram obtidos por Cunha *et al*. (2013) no município Chapadão do Sul, MS, onde verificaram que o método da radiação também apresentou bom desempenho com valores de c = 0,6754; d = 0,7380 e EPE = 1,5456 mm.dia$^{1}$.

**Tabela 2 -** Desempenho dos métodos de estimativa da ETo diário, entre os anos de 2005 a 2015 no período seco em Imperatriz, MA. Erro padrão da estimativa (EPE), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c) nas escalas diárias para o período seco (maio a novembro) para Imperatriz, Maranhão.

| Método | EPE | r | d | c | Desempenho |
|---|---|---|---|---|---|
| Hargreaves-Samani | 1,12 | 0,82 | 0,56 | 0,46 | Sofrível |
| Makkink | 0,84 | 0,78 | 0,60 | 0,47 | Sofrível |
| Budyko | 1,14 | 0,63 | 0,47 | 0,30 | Péssimo |
| Turc | 0,63 | 0,79 | 0,73 | 0,58 | Mediano |
| Jensen-Haise | 2,04 | 0,82 | 0,38 | 0,31 | Mau |
| Linacre | 0,69 | 0,82 | 0,80 | 0,66 | Mediano |
| Kharrufa | 2,51 | 0,63 | 0,29 | 0,18 | Péssimo |
| Radiação FAO24 | 0,58 | 0,91 | 0,84 | 0,77 | Bom |

**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2021).

O método de Turc (tabela 2) apresentou desempenho mediano (c = 0,58; d = 0,84; EPE = 0,63 mm.dia$^{-1}$). Este modelo ainda demanda medidas da velocidade do vento, que podem limitar a sua utilização. No município de Seropédica, RJ, Souza *et al.* (2011) estimaram a evapotranspiração de referência, no qual o método de Turc também apresentou desempenho mediano com valores de c = 0,6187 e d = 0,7077. Outro método que também apresentou índice de desempenho mediano foi o de Linacre (c=0,66; d=0,80; EPE = 0,69 mm.dia$^{-1}$), esse resultado se deve ao fato do modelo de Linacre requerer apenas dados de temperatura e altitude, como variáveis de entrada para a estimativa da ETo. Esses resultados corroboram com Alcântara *et al*. (2013) em Juazeiro, BA que obtiveram com esse método valores de c = 0,57 e d = 0,86.

O método de Hargreaves-Samani apresentou um desempenho sofrível (c = 0,46; d = 0,56; EPE = 1,12 mm.dia$^{-1}$). Este resultado pode ser explicado pelo fato de que, o método de Hargreaves-Samani se baseia apenas em dados de temperatura, e como essa variável apresenta uma ampla faixa de mudança diária, métodos que utilizam apenas este elemento pode apresentar resultados não satisfatórios. Pereira *et al*. (2009) ao estimar a evapotranspiração para a Serra da Mantiqueira, MG, obtiveram o mesmo resultado (c = 0,58, d = 0,78 e EPE = 1,14 mm.dia$^{-1}$).

Outro método que também apresentou índice sofrível foi método de Makkink (c = 0,47; d = 0,60; EPE = 0,84 mm.dia$^{-1}$). Provavelmente esse resultado foi pelo fato de que este método foi desenvolvido para regiões frias. Souza *et al*. (2011) estimando a evapotranspiração de referência, para Seropédica, RJ, onde o método também foi classificado como sofrível apresentando um c = 0,5707 e d = 0,8166. O método de Jensen-Haise apresentou um desempenho mau (c = 0,31; d = 0,38; EPE = 2,04 mm.dia$^{-1}$). Isso se explica porque a equação de Jensen-Haise segundo Medeiros (2008), foi desenvolvida para regiões áridas e semi-áridas. Esses resultados corroboram com Passos *et al*. (2017) que estimando a evapotranspiração de referência para o município de Chapadininha, MA, também encontraram desempenho mau por este método (c = 0,41 e d = 0,4167).

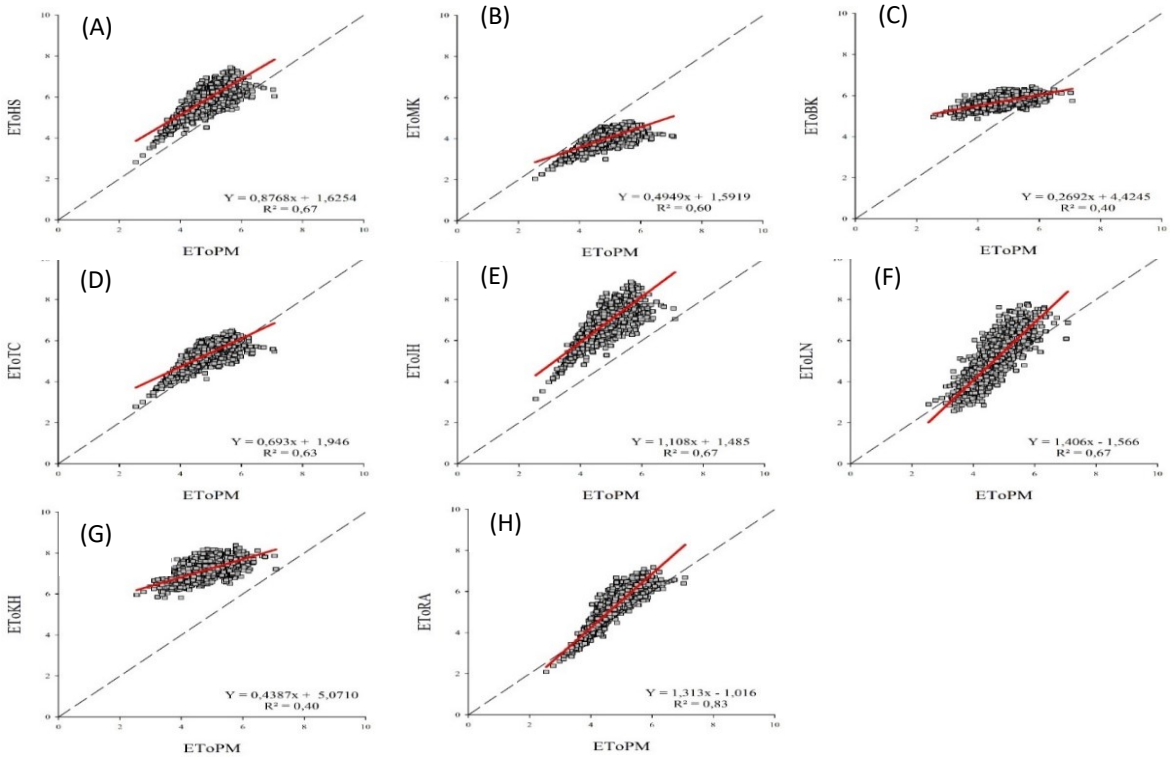
O método de Budyko apresentou um desempenho péssimo (c = 0,30; d = 0,47; EPE = 1,14 mm.dia$^{-1}$). Isso se justifica pelo fato de que este método relaciona a ETo somente com a temperatura, sendo o mesmo recomendado apenas na ausência de dados que exercem maior influência na ETo. Gurski *et al*. (2018) analisando métodos alternativos para estimativa da evapotranspiração de referência no município de Curitiba, PR verificaram que o método de Budyko no período anual também apresentou desempenho péssimo (c = 0,49 e d = 0,63).

Outro método que apresentou péssimo desempenho foi o de Kharrufa (c = 0,18; d = 0,29; EPE = 2,51 mm.dia$^{-1}$). Esse comportamento ocorreu pelo fato de que o método foi desenvolvido para regiões áridas, diferente das condições onde o presente estudo foi realizado. Além disso um outro fator que pode ter contribuído para o desempenho aqui encontrado, é o fato de que esse método assim como o de Hargreaves-Samani e Budyko, se baseia apenas em dados de temperatura. Rocha *et al.* (2015) em trabalho realizado Garanhuns, PE, constataram o mesmo desempenho com o uso deste método (c = 0,34 e d = 0,32).

Observou-se com base na linha de regressão (Figura 3) que no período seco apenas o método de Makkink (MK) (Figura 3B) subestimou os valores de ETo estimado pelo método-padrão, os métodos de Hargreaves-Samani (HS), Budyko (BK), Turc (TC), Jensen-Haise (JH), Linacre (LN), Kharrufa (KH), Radiação FAO (RA) (Figuras 3A, 3C, 3D, 3E, 3F, 3G, 3H, respectivamente) superestimaram a ETo.

Os métodos que apresentaram o melhor ajuste, de acordo com o coeficiente de determinação ($R^2$), foram os métodos da radiação (Figura 3H) ($R^2$ = 0,83) e os métodos de Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Linacre (Figura 3A, 3E, 3F, respectivamente) ($R^2$ = 0,67), isso mostra que esses métodos estimaram a ETo com valores próximos ao método padrão de Pennan-Monteith quando comparados com os demais métodos. Embora esses valores sejam altos, utilizar apenas o $R^2$ como indicador de desempenho de um método não é ideal, visto que os vários métodos testados requerem elementos meteorológicos diferentes, sendo assim necessário adotar mais de um parâmetro estatístico.

**Figura 3 -** Correlação entre os métodos de estimativas de ETo com o método de padrão de Penman-Monteith durante o período seco, em Imperatriz, Maranhão.




**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2021).

## 3.2 Estação chuvosa

No período chuvoso (tabela 3), o melhor método entre os estudados assim como no período seco foi o da Radiação FAO24 que passou de desempenho bom para desempenho ótimo (c = 0,92; d = 0,95; EPE = 0,30 mm.dia$^{-1}$). Resultado este pode ser explicado pelo fato de que métodos que fazem uso da radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar, visto que a radiação solar é a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração e que a mesma não é tão afetada como a temperatura com as mudanças climáticas. Resultados semelhantes foram obtidos por Pereira *et al*. (2009) que ao estimar a evapotranspiração por diferentes metodologias no município de Serra da Mantiqueira, MG, verificaram que o método da radiação no período chuvoso também obteve desempenho ótimo (c = 0,81, d = 0,85 e EPE = 0,88 mm.dia$^{-1}$).

**Tabela 3.** Desempenho dos métodos de estimativa da ETo diário, entre os anos de 2005 a 2015 no período chuvoso em Imperatriz, MA. Erro padrão da estimativa (EPE), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c) nas escalas diárias para o período chuvoso (dezembro a abril) para Imperatriz, Maranhão.

| Método | EPE | r | d | c | Desempenho |
|---|---|---|---|---|---|
| Hargreaves-Samani | 0,99 | 0,95 | 0,66 | 0,63 | Mediano |
| Makkink | 0,62 | 0,92 | 0,74 | 0,68 | Mediano |
| Budyko | 1,55 | 0,79 | 0,41 | 0,32 | Mal |
| Turc | 0,59 | 0,93 | 0,80 | 0,75 | Bom |
| Jensen-Haise | 1,78 | 0,95 | 0,47 | 0,44 | Sofrível |
| Linacre | 0,52 | 0,81 | 0,86 | 0,70 | Mediano |
| Karrufa | 3,07 | 0,78 | 0,26 | 0,20 | Péssimo |
| Radiação FAO24 | 0,30 | 0,97 | 0,95 | 0,92 | Ótimo |

**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2021).

O método de Turc melhorou seu desempenho, passando de mediano para bom (c = 0,75; d = 0,80; EPE = 0,59 mm.dia$^{-1}$). O método de Turc foi desenvolvido para locais, onde a umidade relativa do ar é maior que 50%. No período chuvoso há um aumento da umidade relativa, assim melhorando o desempenho do método neste período. Este resultado corrobora com os de Júnior *et al.* (2012) que utilizando métodos empíricos para a estimativa

da evapotranspiração de referência no município de Aquidauana, MS, também obtiveram desempenho bom com o método de Turc (c = 0,75, d = 0,785 e EPE = 1,235 mm.dia$^{-1}$).

No método de Hargreaves-Samani houve uma melhora no seu desempenho, passando de sofrível para mediano (c = 0,63; d = 0,66; EPE = 0,99 mm.dia$^{-1}$). Embora tenha mudado de desempenho, o mesmo ainda não é satisfatório, porque essa metodologia foi desenvolvida para regiões áridas, e por isso quando empregado em regiões de climas diferentes, há uma redução na precisão do método, sendo necessário uma calibração local para sua utilização. Ao contrário dos resultados aqui encontrados, Bezerra *et al*. (2014) ao avaliarem diferentes metodologias para a estimativa da evapotranspiração no município de Mossoró, RN, verificaram que o método de Hargreaves-Samani apresentou bom desempenho (c = 0,69, d = 0,80 e EPE = 1,00 mm.dia$^{-1}$).

Outro método que também apresentou melhora no seu desempenho foi o de Makkink que passou de sofrível para mediano (c = 0,68; d = 0,74; EPE = 0,62 mm.dia$^{-1}$). Provavelmente esse resultado foi pelo fato do método de Makkink ser desenvolvido para regiões frias, e no período chuvoso há uma redução da temperatura. Moura *et al.* (2013) ao estimarem a evapotranspiração de referência através de métodos empíricos para o estado de Pernambuco, também encontraram desempenho mediano para o método de Makkink (c = 0,65, d = 0,667 e EPE = 0,875 mm.dia$^{-1}$). O método de Linacre não alterou seu desempenho (c = 0,70; d = 0,86; EPE = 0,52). Resultados contrastantes foram encontrados no trabalho de Pereira et al. (2009) que ao estimarem a ETo para Serra da Mantiqueira, MG, perceberam que no período chuvoso seu desempenho melhorou (c = 0,45, d = 0,53 e EPE = 2,60 mm.dia$^{-1}$).

O método de Jensen-Haise passou de desempenho mau para sofrível (c = 0,44; d = 0,47; EPE = 1,78 mm.dia$^{-1}$). É provável que essa melhoria de desempenho seja em virtude de o mesmo ter sido desenvolvido para a aplicação em áreas irrigadas. Resultados contrastantes foram encontrados por Ribeiro *et al*. (2016) que ao estimar a ETo para o município de Piripiri, PI no período chuvoso, o método de Jensen-Haise obteve desempenho ótimo (c = 0,90, d = 0,98 e EPE = 0,91 mm.dia$^{-1}$).

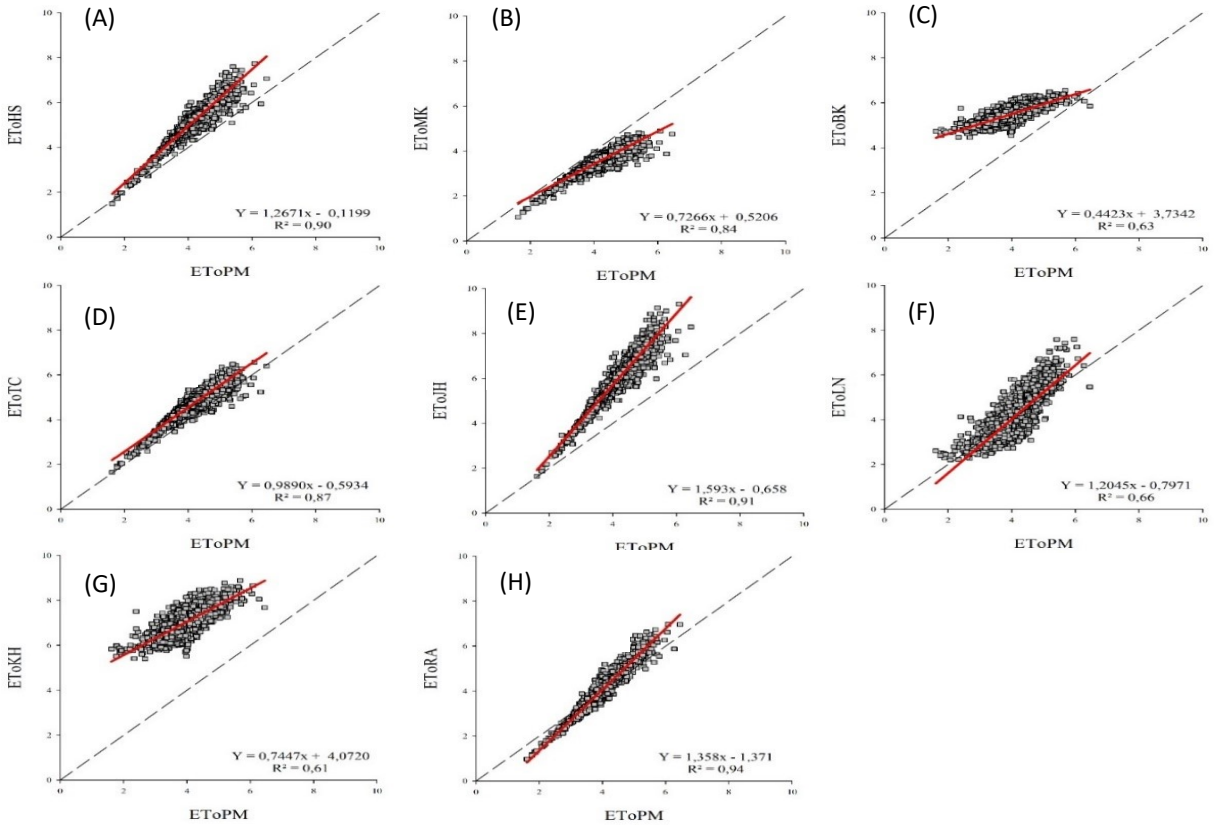
O método de Budyko apresentou um decréscimo no desempenho quando comparado ao período seco (c = 0,32; d = 0,41; EPE = 1,55 mm.dia$^{-1}$). Isso se deve ao fato de que o método de Budyko utiliza apenas a temperatura média do ar como parâmetro para estimativa da ETo e como no período chuvoso há uma maior variação da temperatura nessa região, isso pode

afetar seu desempenho. Resultado semelhante foi obtido por Gurski *et al.* (2018) que ao avaliarem métodos alternativos para estimar a ETo para diversas cidades do Paraná, verificaram o método de Budyko apresentou um desempenho sofrível (c = 0,43 e d = 0,76).

O método de Kharrufa manteve desempenho péssimo (c = 0,20; d = 0,26; EPE = 3,07 $mm.dia^{-1}$) o que ocasiona erros consideráveis na quantificação hídrica, podendo causar desperdícios severos de água ou prejuízo à produtividade da cultura irrigada. Resultados contrastantes foram obtidos por Pereira *et al.* (2009), para o município de Serra da Mantiqueira, MG, onde os autores encontraram um desempenho péssimo no período seco (c = 0,40, d = 0,69 e EPE = 1,09 $mm.dia^{-1}$) e mal no chuvoso (c = 0,44, d = 0,63 e EPE = 1,00 $mm.dia^{-1}$). A Figura 4 mostra com base na linha de regressão que no período chuvoso apenas o método de Makkink (MK) (Figura 4B) subestimou os valores de ETo estimados pelo método-padrão. Os métodos de Hargreaves-Samani (HS), Budyko (BK), Turc (TC), Jensen-Haise (JH), Linacre (LN), Kharrufa (KH), Radiação FAO (RA) (Figura 4A, 4C, 4D, 4E, 4F, 4G, 4H, respectivamente) superestimaram a ETo.

Observa-se também na Figura 4 que os métodos que apresentaram o melhor ajuste, de acordo com o coeficiente de determinação ($R^2$), foram os métodos da radiação (Figura 4H) ($R^2$ = 0,94), Jensen-Haise (Figura 4E) ($R^2$ = 0,91) e Hargreaves-Samani (Figura 4A) ($R^2$ = 0,90), isso mostra que esses métodos estimaram a ETo com valores próximos ao método padrão de Pennan-Monteith quando comparados com os demais métodos.

**Figura 4 -** Correlação entre os métodos de estimativas de ETo com o método de padrão de Penman-Monteith durante o período chuvoso, em Imperatriz, Maranhão.




**Fonte:** Elaborada pelos próprios autores (2021).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em substituição ao método de Penam-Monteith recomendamos o método da Radiação FAO24, por ser mais simples, necessitando apenas de dados de radiação para a estimativa da evapotranspiração, apresentando desempenho satisfatório para os dois períodos em Imperatriz, MA.

Os demais métodos, com exceção de Turc que pode ser usado para o período chuvoso, só poderão ser usados para estimativa da evapotranspiração em Imperatriz/MA mediante um ajuste nos seus coeficientes, sendo essa uma proposta para trabalhos futuros na região.

## REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, C. R.; SILVA, G. J. F.; CALDAS, R. A. Comparação entre diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para Juazeiro-BA. OKARA: **Geografia em debate**, v. 8, n. 1, p. 156-178, 2013.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S., RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma: **FAO**. 1998, 300 p.

ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MARTINS, C. A. S.; BARBOSA, V. S.; RODRIGUES, R. R. 2011. Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 2, p.84-95, 2011.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2008, 625p.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, E. F. F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, B.B. Estimativa para a evapotranspiração de referência diária em Mossoró, RN. **Revista Caatinga, Mossoró**, v. 27, n. 3, p. 211-220, 2014.

BUDYKO, M. I. Climate and life. **New York: Academic Press**, 1974, 508 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, D. F.; ROCHA, H. S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 1-11, 2015.

CASSMAN, K. G.; et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, n. 1, p. 315-358, 2013.

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.

DOORENBOS. J.; PRUITT, J. O. 1977 Crop water requirement. Rome: **FAO**, 1977. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

FENG, Y.; JIA, Y.; CUI, N.; ZHAO, L.; LI, C.; GONG, D. Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration estimation in Sichuan basin of southwest China. **Agricultural Water Management**, v. 181, n. 100, p.1-9, 2017.

GAZZONI, D. L. Como alimentar 10 bilhões de cidadãos na década de 2050? **Ciência e Cultura**, v. 69, n. 4, p. 33-38, 2017.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; SCHÄFER, R. F.; SCHÄFER, H. Métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência anual e nas diferentes estações do ano em Curitiba, PR Brasil. **Cultura Agronômica**, v. 25, n. 2, p. 155-166, 2016.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; BARROCA, M. V. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Ilha Solteira, v. 53, n. 9, p. 1003-1010, 2018.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R.; Estimating evapotranspiration from solar radiation**. Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE**, New York, v. 4, n. 1, p. 15-41, 1963.

JÚNIOR, E. D. F.; LOPES, A. S.; OLIVEIRA, G. Q.; JUNG, L. H. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquidauana, MS. **Irriga, Botucatu**, v. 17, n. 4, p. 418 - 434, 2012.

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

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual review of environment and resources**, v. 34, n. 1, p. 179-204, 2009.

MAKKINK, G. F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957.

MEDEIROS, P. V. 2008. Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de nove equações empíricas- teóricas com base na equação de Penman-Monteith. **Dissertação de mestrado** - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo.

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.

PASSOS, M. L. V.; RAPOSO, A. B.; MENDES, T. J. Evapotranspiração de referência por diferentes métodos para o município de Chapadinha-MA. **ACSA**, Patos-PB, v. 13, n. 2, p. 146-153, 2017.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183p.

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

RIBEIRO, A.A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, A. R. B. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso e seco em Piripiri (PI). **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 8, n. 3, p. 89-100, 2016.

ROCHA, I. P.; LIMA, N. S.; CHAGAS, R. M.; ALMEIDA, G. L. P. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Garanhuns, PE. **Revista Geama**, Recife, v. 1, n. 2, p. 112-127, 2015.

SANTANA, J.S.; NASCIMENTO, C.H.S.; DA SILVA, C.M.; DA SILVA, W.A.; DAMASCENA, J.F. Resposta de cultivares de alface sob diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 16, n. 29, p. 1-15, 2019.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in

Southern Ontario, Canadá. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

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

SOUZA, A. P.; CARVALHO, A. F.; SILVA, L. B. D.; ALMEIDA, F. T.; ROCHA, H. S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.

VAN ITTERSUM, M.K, et al., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. **Field Crops Research**, v. 143, n. 1, p. 4-17, 2013.

WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.