

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**FCAV - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Câmpus de Jaboticabal**

**ARTHUR CARRASQUEIRA**

**Avaliação de métodos simples para estimativa da evapotranspiração de  
referência para Monte Alto – SP**

Jaboticabal

2025



**Avaliação de métodos simples para estimativa da evapotranspiração de  
referência para Monte Alto – SP**

Arthur Carrasqueira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do solo)

Orientador: Prof. Dr José Eduardo Pitelli  
Turco

Jaboticabal

2025

C313a	<p>Carrasqueira, Arthur</p> <p>Avaliação de métodos simples para estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alto – SP / Arthur Carrasqueira. -- Jaboticabal, 2025</p> <p>29 p. : il., tabs.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientador: José Eduardo Pitelli Turco</p> <p>1. Evapotranspiração. 2. Manejo da irrigação. 3. Hargreaves. I. Título.</p>
-------	---

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Prospecção o impacto científico e com embasamento técnico para validar dados meteorológicos, e regionalizar métodos simplificados de estimativa da evapotranspiração de referência  $ET_o$ , essenciais na gestão hídrica. O principal potencial social e econômico almeja a otimização do uso da água na agricultura local e regional, fornecendo aos agricultores, especialmente os de pequeno e médio porte ferramentas para calcular com maior precisão as necessidades hídricas das culturas.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This work prospects a strong scientific and technical impact by validating meteorological data and regionalizing simple, yet effective methods for estimating Reference Evapotranspiration  $ET_o$ , critical for efficient water management. The primary social and economic potential is to enable the optimization of water use in local and regional agriculture, equipping farmers, particularly small and medium-sized ones, with tools to precisely calculate their crops' water needs.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Campus de Jaboticabal



### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** AVALIAÇÃO DE MÉTODOS SIMPLES PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA MONTE ALTO - SP

**AUTOR:** ARTHUR CARRASQUEIRA

**ORIENTADOR:** JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente



**JOSE EDUARDO PITELLI TURCO**  
Data: 19/11/2025 10:17:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO (Participação Virtual)**  
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente



**RUY DE AGUIAR ARAUJO JUNIOR**  
Data: 19/11/2025 09:46:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. RUY DE AGUIAR ARAUJO JÚNIOR (Participação Virtual)**  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) / Uberaba/MG

Documento assinado digitalmente



**AFONSO LOPES**  
Data: 19/11/2025 09:52:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. AFONSO LOPES (Participação Virtual)**  
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 19 de novembro de 2025.

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio e cooperação e para meu orientador pela sabedoria compartilhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família pela compreensão e a todos meus professores que fortaleceram e elucidaram meu conhecimento, meu orientador por ter traçado todo o conhecimento necessário para este trabalho.

“As Universidades serão o que são suas bibliotecas”

(Gelfand, 1968, p. 19).



## RESUMO

A evapotranspiração vem a ser compartilhada por várias áreas do sistema solo planta atmosfera como principal responsável pelo retorno da água no solo para atmosfera. Com este trabalho o objetivo foi avaliar três métodos simples, sendo um que emprega a radiação solar e a temperatura do ar e dois que utilizam dados da temperatura do ar, para estimar a evapotranspiração de referência para as condições climáticas do município de Monte Alto – SP. Os métodos foram comparados com o método de Penman-Monteith, recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) como método padrão para estimativa da ETo. Para esse fim, foram utilizados dados de uma estação meteorológica automática instalada no Sítio Santo Antônio, localizado no município Monte Alto - SP, situado a 21° 15' 40" de latitude sul, 48° 29' 47" de longitude oeste e altitude média de 735 m. Por intermédio da estação meteorológica automática, foram obtidos dados da radiação global, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A análise dos resultados foi realizada aplicando método que verifica os dados meteorológicos e utilizando metodologias de análise dos dados médios e calibração dos coeficientes das equações de dois métodos simples. As equações de Hargreaves são uma alternativa eficiente para estimar a ETo diária em clima subtropical, em que a disponibilidade de dados climáticos é limitada

**Palavras-chave:** Evapotranspiração de Referência; Hargreaves; Penman - Monteith; Irrigação.

## ABSTRACT

Evapotranspiration is shared by various areas of the soil-plant-atmosphere system as the main responsible for the return of water from the soil to the atmosphere. The objective of this work was to evaluate three simple methods, one using solar radiation and air temperature and two using air temperature data, to estimate reference evapotranspiration for the climatic conditions of the municipality of Monte Alto – SP. The methods were compared with the Penman-Monteith method, recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) as the standard method for ETo estimation. For this purpose, data from an automatic weather station installed at Sítio Santo Antônio, located in the municipality of Monte Alto - SP, situated at 21° 15' 40" South latitude, 48° 29' 47" West longitude, and an average altitude of 735 m, were used. Through the automatic weather station, data on global radiation, air temperature, relative air humidity, and wind speed were obtained. The analysis of the results was carried out by applying a method that verifies the meteorological data and using methodologies for analyzing mean data and calibrating the coefficients of the equations of two simple methods. The Hargreaves equations are an efficient alternative for estimating daily ETo in a subtropical climate where the availability of climatic data is limited

**Keywords:** Reference Evapotranspiration; Hargreaves; Penman-Monteith, Irrigation.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3	METODOLOGIA	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
29	REFERÊNCIAS	30

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura de cebola na cidade de Monte alto – SP, tem grande valor econômico, sendo realizada por pequenos produtores, que almejam uma ascendente produtividade devido ao uso de irrigação, para tal intuito devido a sua posição geográfica, existe a necessidade de um cálculo preciso para dimensionamento da lâmina de irrigação necessária para a melhor eficiência

A determinação da evapotranspiração é um viés compartilhado por várias ciências que estudam o sistema solo-planta-atmosfera. Assim a quantificação da evapotranspiração torna-se imprescindível para identificar a relação das variações temporais e a necessidade de irrigação, almejando melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar mudanças na gestão do balanço hídrico.

Desta forma a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) indica à demanda de água da atmosfera considerando uma superfície padronizada (sem restrição hídrica) e a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) refere-se a perda de água para a atmosfera que realmente ocorre (Teixeira *et al.*, 2025).

A aplicação de diversas técnicas que abrangem o uso de modelagem estatística, empregando dados meteorológicos oriundos de sensoriamento remoto, ou dados locais, se destacam por possibilitar além da obtenção de valores de ET<sub>o</sub>, alcançar estimativas para diversas regiões com uma vasta amplitude de escalas espaciais e temporais, surgindo como alternativa para avaliar a evapotranspiração em escala regional ou global (Siqueira, 2020).

O município de Monte Alto – SP, apresenta uma área agricultável interessante dispõe vários produtores de cebola. A utilização da irrigação é uma alternativa para aumento da produção desta cultura, necessitando de um manejo adequado com métodos simples de estimativa da evapotranspiração de referência, pois o método de Penman-Monteith (FAO 56), que é considerado como padrão requer grandes quantidades de dados meteorológicos, que nem sempre os produtores rurais dispõem.

Sendo assim objetiva-se avaliar três métodos simples, sendo o primeiro deles um que emprega a radiação solar e a temperatura do ar e dois que utilizam dados da temperatura do ar, para estimar a evapotranspiração de referência para as condições climáticas do município de Monte Alto – SP. Além de fazer a calibração local das equações, baseadas na temperatura do ar, por meio do ajuste do parâmetro empírico HE (expoente empírico de Hargreaves).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Allen *et al.* (2006), a evapotranspiração de referência é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23, com altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo.

Como o método de medição direta da ETo, demanda um número expressivo de variáveis climáticas precisas torna-se praticamente impossível para inúmeras situações (Almorox *et al.*, 2015). O emprego de métodos de estimativa através de modelos matemáticos ou empíricos torna-se uma prática amplamente utilizada, e haja visto que a calibração e a validação de métodos empíricos são partilhados pela verificação do método FAO-56 Penman-Monteith sendo elencado como referência, por apresentar resultados satisfatórios em diferentes condições climáticas (Barbosa *et al.*, 2022).

Martí *et al.* (2015), enfatiza que o emprego de métodos indiretos para a determinação da evapotranspiração visa facilitar o processo, principalmente pela facilidade de obtenção na aquisição das variáveis necessárias. Alguns modelos de estimativa da evapotranspiração de referência são precisos, no entanto, requerem quantidades expressivas de elementos meteorológicos, como o método PM-FAO.

Devido à dificuldade encontrada pelos produtores rurais na obtenção dos dados meteorológicos para estimar a ETo, o uso de métodos simples se torna necessário, desde que fundamentados e calibrados para locais específicos, visando a garantia e a confiabilidade dos resultados obtidos (Paolinelli; Dourado Neto; Mantovani, 2022).

Os métodos baseados na temperatura do ar têm sido frequentemente usados e amplamente recomendados devido à simplicidade dos cálculos e por exigirem poucos dados de entrada, assim sendo de fácil obtenção (Khoob, 2008). A importância do estudo desses métodos conserva-se em destaque, sendo amplamente difundido e aplicado em diversas pesquisas recentes (Coutinho *et al.* 2020). Entre os métodos que podem ser usados com apenas dados de temperatura, destacam-se Hargreaves e Blaney-Criddle (Trajkovi, 2007).

Tais métodos podem apresentar correções locais de caráter diário, semanal, mensal ou sazonal que também podem afetar a precisão da estimativa do método. O método de Hargreaves superestima a ETo e o método de BlaneyCriddle

subestima a ETo em locais de clima úmido, conforme observado por Mendonça *et al.* (2003).

Contudo, o processo de validação de métodos simplificados pode apresentar variações significativas ao depender das condições climáticas locais. Conforme Arruda (2022) para o município de Presidente Figueiredo, no Amazonas, cujo resultados dos métodos de Blaney-Criddle e Hargreaves apresentaram classificações de desempenho satisfatórias, sendo avaliados como 'ótimo' e 'bom', respectivamente, em comparação com o método padrão de Penman-Monteith.

A confiabilidade da estimativa da evapotranspiração de referência, pelos métodos simplificados pode ser definida pelo seu grau de aproximação com o valor estimado pelo método padrão PM-FAO

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no Sítio Santo Antônio, localizado no município Monte Alto - SP, situado a 21° 15' 40" de latitude sul e 48° 29' 47" de longitude oeste e altitude média de 735 m, com clima tropical de altitude. O clima é classificado, segundo Köppen, como subtropical com inverno seco (CWA), com precipitação média anual de aproximadamente 1441 mm, com distribuição concentrada no período de outubro a março e relativa seca no período de abril a setembro. Na área experimental predominam os solos do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, classificado de acordo com (EMBRAPA, 2006).

Para a obtenção dos dados meteorológicos foi instalada na área experimental uma estação meteorológica automática (EMA-MA), da marca Campbell Scientific, equipada com sensores para obtenção de dados de temperatura e umidade relativa do ar, psicrômetro de termopares do tipo T, desenvolvido por Turco e Fernandes (2003); velocidade do vento, modelo 03001 RM Young Co; e radiação solar global, modelo CM3 Kipp & Zonen. Os sensores de radiação solar e de temperatura, e o sensor de velocidade do vento foram colocados a 1,5 m e a 2 m, respectivamente, acima da superfície gramada (Figura 1).

Figura 1- Estação Meteorológica Automática da marca Campbell Scientific (EMA-MA).



Foram utilizados dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global, pelo período de 01/01/2019 a 31/12/2024.

Os dados meteorológicos da estação meteorológica automática (EMA-MA), da marca Campbell Scientific formam verificados por meio da metodologia de Turco (2024), utilizando dados da estação meteorológica automática da marca Campbell Scientific (EMA-R) como referência, instalada em área experimental do Departamento de Engenharia (DE) da FCAV/UNESP - Campus de Jaboticabal (Figura 2).

Figura 2. Estação Meteorológica Automática da marca Campbell Scientific (EMA-R).



A metodologia desenvolvida por Turco (2024), emprega as técnicas: estimativa da radiação solar global, dupla massa, comparabilidade operacional de medições meteorológicas, assimetria e curtose. Os dados coletados nas EMA-MA foram comparados aos dados coletados no mesmo período, obtidos na EMA-R.



Com intuito de verificação da radiação solar global da EMA-MA em relação a EMA-R foi utilizada a técnica de estimativa da radiação solar global descrita por Allen (1996).

Para verificação dos dados meteorológicos da EMA-MA em relação a EMA-R foi utilizada a técnica de dupla massa; desenvolvida pela United States Geological Survey (USGS) (Tucci, 2007).

As variáveis meteorológicas das EMA-MA, foram verificadas em relação a EMA-R, por meio da norma ASTM D4430 - Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements (ASTM, 2023), descrita resumidamente a seguir.

Diferença sistemática (d) - a média das diferenças na medição pelos dois sistemas:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi}) \quad (1)$$

Comparabilidade operacional (C) - a raiz quadrada média (rms) da diferença entre leituras simultâneas de dois sistemas medindo a mesma quantidade no mesmo ambiente:

$$C = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi})^2} \quad (2)$$

Em que:

$X_{ai}$  - i-ésima medição feita por um sistema,

$X_{bi}$  - i-ésima medição simultânea feita por outro sistema, e

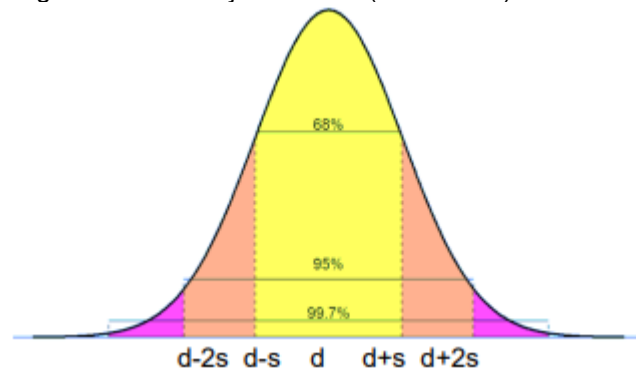
N - Número de amostras usadas.

Desvio padrão estimado da diferença (s) - a medida da dispersão de uma série de diferenças em torno de d.

$$s = \pm \sqrt{C^2 - d^2} \quad (3)$$

Neste trabalho foi adotado que a distribuição normal (Gaussiana) as medidas das diferenças caem dentro de  $\pm 2s$  (95 % de confiança), ou seja, 95 por cento das medidas das diferenças caem dentro  $\pm 2s$  de d (EA, 2022).

Figura 3- Distribuição Normal (Gaussiana)



O cálculo da assimetria e curtose foi realizado por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher (Fávero e Belfiore, 2017).

O coeficiente de assimetria de Fisher pode ser escrito como:

$$g_1 = \frac{n^2 \cdot M_3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot S^3} \quad (4)$$

Sendo que o terceiro momento é:

$$M_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n} \quad (5)$$

A interpretação, será:

$g_1 = 0$ , a distribuição é simétrica;

$g_1 > 0$ , a distribuição é assimétrica positiva (à direita) e

$g_1 < 0$ , a distribuição é assimétrica negativa (à esquerda);

O coeficiente de curtose de Fisher pode ser escrito como:

$$g_2 = \frac{n^2 \cdot (n+1) \cdot M_4}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \cdot S^4} - 3 \cdot \frac{(n-1)^2}{(n-1) \cdot (n-3)} \quad (6)$$

Em que o quarto momento é dado por:

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n} \quad (7)$$

A interpretação, será:

$g_2 = 0$ , a curva é normal padrão, isto é, mesocúrtica;

$g_2 > 0$ , grau de achatamento baixo, a curva é leptocúrtica e

$g_2 < 0$ , grau de achatamento alto, a curva é platicúrtica.

A ETo foi estimada em escala média diária, para os anos de 2019 a 2024, pelas equações de Hargreaves (1976), Hargreaves e Samani (1985), Hargreaves (1994) e Penman-Monteith FAO56 (ALLEN et al., 2006), considerando esse último como padrão para a comparação dos demais métodos. A seguir são apresentadas as equações utilizadas neste estudo

Equação de Hargreaves (1976):

Seja,

$$ET_{oH} = 0,0075 Q T \quad (8)$$

Em que:

$ET_{oH}$  - evapotranspiração de referência, em gramado,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$T$  - Temperatura média do ar,  $^{\circ}\text{F}$ ;

$Q$  - Radiação solar medida,  $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ .

Pode-se escrever a eq. (8) na seguinte forma:

$$ET_{oH} = 0,0075 \frac{Q}{59} T \quad (9)$$

Em que:

$1/59$  - Fator de conversão de  $\text{cal cm}^{-2}$  a  $\text{mm}$  de evaporação equivalente.

Equação de Hargreaves e Samani (1985):

$$ET_{oHS} = 0,0023 Q_o (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{HE} (T + 17,8) \quad (10)$$

Em que:

$ET_{oHS}$  - evapotranspiração de referência, grama,  $\text{mm d}^{-1}$ ;

$T_{\text{máx}}$  - temperatura máxima,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{mín}}$  - temperatura mínima,  $^{\circ}\text{C}$ ;

T - temperatura média diária, °C;

Q<sub>o</sub> - radiação solar extraterrestre (mm dia<sup>-1</sup>);

HE - expoente empírico (0,5).

Equação de Hargreaves (1994):

$$ET_{oHG} = 0,0023 RA (T^{\circ}C + 17,8) TD^{HE} \quad (11)$$

Em que,

ET<sub>oHG</sub> - evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia<sup>-1</sup>;

RA - radiação solar extraterrestre (mm dia<sup>-1</sup>);

T<sup>°C</sup> - (T<sub>max</sub> + T<sub>min</sub>) / 2 (temperatura máxima diária do ar mais a temperatura mínima diária do ar, em °C, dividido por dois);

TD - T<sub>max</sub> - T<sub>min</sub> (temperatura máxima diária do ar menos a temperatura mínima diária do ar, em °C);

HE - expoente empírico (0,5).

Os valores diários da radiação solar extraterrestre para equação Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves (1994) foram obtidos em função da latitude local, a partir dos dados interpolados de Napier Shaw, citado por Ramos *et al.* (1989).

Equação do Penman-Monteith (PM):

$$ET_{oPM} = \frac{0,409\Delta(Rn-G) + \gamma\left(\frac{900}{T+273}\right)V(es-e)}{\Delta + \gamma(1+0,34V)} \quad (12)$$

Em que:

ET<sub>oPM</sub> - evapotranspiração de referência, em gramado, mm d<sup>-1</sup>;

Rn - radiação líquida, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

G - Fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

T - Temperatura média do ar, °C;

V - Velocidade média do vento a 2 m de altura, m s<sup>-1</sup>;

(es - e) - déficit de pressão de vapor, kPa;

Δ - Curva de pressão de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma$  - Constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>;

900 - Fator de conversão.

Para a avaliação dos dados médios diários da ETo foi utilizada análise de regressão e considerando o modelo linear ( $y = ax + b$ ), na qual a variável dependente foi o método de Penman-Monteith FAO-56 e as estimativas da ETo pelos métodos estudados foram a variável independente.

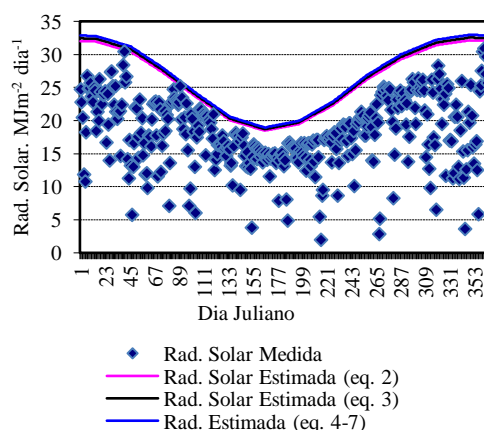
Foi realizada a calibração local das equações de Hargreaves (EToHSL e EToHGL) por meio do ajuste do expoente empírico HE das equações. Para calibração local das equações foi utilizada a metodologia utilizada por Trajkovic (2007), utilizando os dados meteorológicos dos anos ímpares (2019, 2021 e 2023). Para validação da equação foi utilizado os dados meteorológicos dos anos pares (2020, 2022 e 2024). Esta metodologia reduz o efeito bias que pode ocorrer de um ano para o outro.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia de Turco (2024) foi realizada a verificação dos dados meteorológicos da EMA-MA. Os resultados seguintes referem-se ao período estudado ano de 2019, pois os resultados dos outros anos (2020, 2021, 2022, 2023 e 2024) apresentaram semelhança.

Na Figura 4 de acordo com a observação da radiação solar global medida pela EMA-MA, pode-se identificar que ela é de qualidade, pois apresenta valores iguais ou inferiores ao apresentado pela radiação solar que foi estimada pela técnica de Allen (1996), corroborando com resultados obtidos por Turco e Barbosa (2008), Oliveira (2014) e Turco e Carleto (2017) em seus estudos.

Figura 4. Radiação solar medida na EMA-MA (2019) e estimada por três equações.



Já na Tabela 1 apresentam os resultados da verificação dos dados meteorológicos estudados de forma acumulativa, segundo a técnica de dupla massa. Os dados da EMA-MA foram comparados com os dados da EMA-R.

Tabela 1. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global, em relação a EM-R, por meio da técnica de dupla massa - coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e equação ( $y = a x$ ). Anos: 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024.

EMA	Ano	TEMPERATURA DO AR		UMIDADE RELATIVA DO AR		VELOCIDADE DO VENTO		RADIÇÃO SOLAR GLOBAL	
		Equação	$r^2$	Equação	$r^2$	Equação	$r^2$	Equação	$r^2$
EMA-MA	2019	$y = 0,93 x$	0,99	$y = 0,87 x$	0,99	$y = 0,83 x$	0,99	$y = 1,03 x$	1
	2020	$y = 0,93 x$	0,99	$y = 0,94 x$	0,99	$y = 1,04 x$	0,99	$y = 1 x$	0,99
	2021	$y = 0,92 x$	1	$y = 0,98 x$	0,99	$y = 1,06 x$	0,99	$y = 1,02x$	0,99
	2022	$y = 0,92 x$	1	$y = 0,98 x$	0,99	$y = 1,06 x$	0,99	$y = 1,01 x$	1
	2023	$y = 0,92 x$	0,99	$y = 1,01 x$	1	$y = 1,05 x$	0,99	$y = 1,02 x$	1
	2024	$y = 0,95 x$	1	$y = 1,04 x$	0,99	$y = 1,08 x$	0,99	$y = 1,02 x$	1

Verifica-se na Tabela 1 que para os anos de 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024 os sensores (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global) da EMA-MA operaram de modo satisfatório, uma vez que os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) foram iguais a 1 e os coeficientes angulares foram semelhantes.

Os resultados da avaliação dos dados da EMA-MA, para os anos de 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s), confiança (c), coeficiente de assimetria (g1) e curtose (g2) podem ser verificados nas Tabelas 2 e 3. Os dados apresentaram d e s aceitáveis, ou seja, valores próximos e 95 por cento das medidas das diferenças caíram dentro de  $\pm 2s$ . Os dados tiveram variações nos valores dos coeficientes (g1) e (g2). Portanto, para estações afastadas precisa ser estudada a aplicação desta metodologia, por vários anos, para determinar a tendência dos resultados

Soares *et al.* (2019), desenvolveram uma ferramenta numérica para a qualificação de dados coletados em estações automáticas de superfície. Devido aos bons resultados do método desenvolvido, os mesmos poderão integrar em outros métodos já existentes.

Tabela 2. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e Radiação solar global da EMA-MA, em relação a EM-R, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c). Anos: 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024.

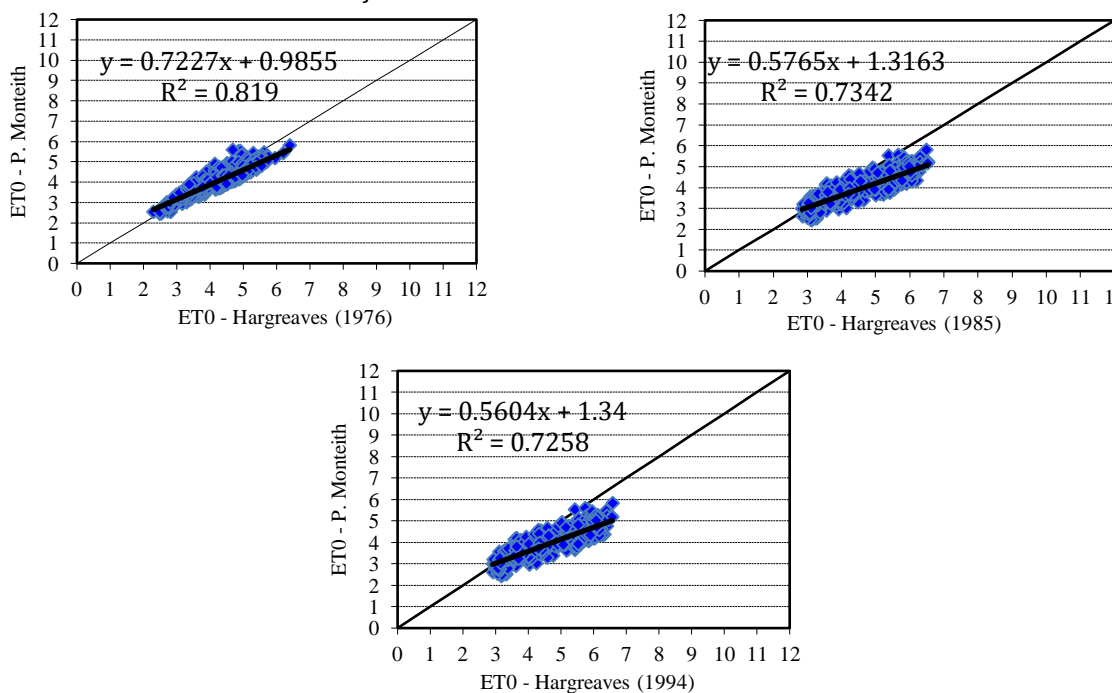
EMA	Ano	TEMPERATURA DO AR			UMIDADE RELATIVA DO AR			VELOCIDADE DO VENTO			RADIÇÃO SOLAR GLOBAL		
		d	s	c (%)	d	s	c (%)	d	s	c (%)	d	s	c (%)
EMA-MA	2019	-1,6	0,95	96,71	-9,57	5,65	98,9	-0,14	0,52	95,25	0,51	1,55	97,81
	2020	-1,48	1,12	95,78	-2,09	4,72	95,98	0,04	0,58	95,05	0,49	2,13	95,98
	2021	-1,77	0,92	95,53	-2,03	4,60	95,25	0,12	0,51	95,62	0,59	1,53	95,55
	2022	-1,76	0,91	95,32	-1,52	4,57	95,79	0,08	0,51	95,62	0,41	1,58	95,38
	2023	-1,69	0,92	95,62	0,66	4,30	94,79	0,11	0,41	95,43	0,33	1,86	95,07
	2024	-1,05	0,94	97,26	3,5	5,89	96,44	0,12	0,45	95,52	0,4	1,7	95,02

Tabela 3. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global da EMA-MA, em relação a EM-R, por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher. Anos: 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024.

EMA	Ano	TEMPERATURA DO AR		UMIDADE RELATIVA DO AR		VELOCIDADE DO VENTO		RADIÇÃO SOLAR GLOBAL	
		g1	g2	g1	g2	g1	g2	g1	g2
EMA-MA	2019	-0,61	-0,64	-3,84	34,1	0,29	2,88	0,06	8,3
	2020	-0,19	2,71	-0,07	6,01	0,14	0,87	-0,02	8,8
	2021	-0,44	0,07	-0,2	0,92	1,07	5,33	-0,22	1,53
	2022	-0,26	0,13	-0,4	0,52	1,25	3,6	0,23	2,17
	2023	-0,08	0,16	-0,41	0,52	0,45	1,53	0,02	8,27
	2024	0,17	-0,19	0,72	3,91	0,57	1,59	-0,11	2,78

Na Figura 5, pode-se observar a correlação dos valores diários da evapotranspiração de referência obtidos por meio dos métodos de Hargreaves, na média dos anos de 2019 a 2024, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56, para região do município de Monte Alto – SP.

Figura 5: Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com os métodos estudados, em relação ao Penman-Monteith FAO-56.



Essas comparações fornecem a base para avaliar os valores diários da ETo, obtidos pelos métodos de Hargreaves em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56. Se os valores diários da ETo obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56 forem semelhantes aos obtidos pelos métodos de Hargreaves, a linha de regressão deveria sobrepor-se à reta  $y = x$ , e os pares de pontos deveriam estar próximos à linha de regressão.

Quando a linha de regressão estiver afastada da reta  $y = x$ , e os pares de pontos estiverem próximos à linha de regressão, isso significa que os valores obtidos pelos métodos de Hargreaves apresentam uma diferença aceitável em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56, ou seja, a equação pode ser utilizada com precisão para fazer a correção dos valores obtidos pelos métodos Hargreaves em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56.



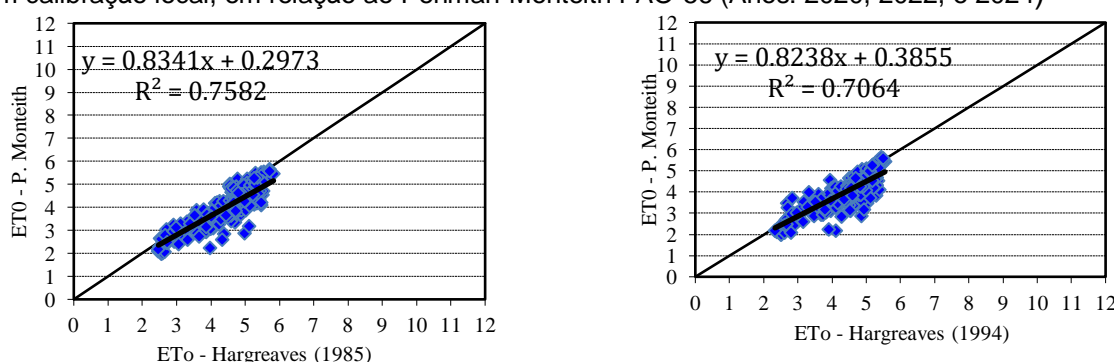
Observa-se na Figura 5, que a linha de regressão obtida pelos valores da ETo obtidos pelos métodos de Hargreaves, média dos anos de 2019 a 2024, em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56, superestimaram a ETo.

Referente também à Figura 5, percebe-se que os pares de pontos estão dispersos ao redor da linha de regressão, indicando uma adequada correlação, podendo-se observar isto também por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ .

Resultados semelhantes foram obtidos por Bachour *et al.* (2013), no Vale de Bekaa – Líbano, onde o método Hargreaves (1994) superestimou a ETo em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56.

Na Figura 6, pode-se observar a correlação dos valores diários da evapotranspiração de referência obtidos por meio das equações de Hargreaves com calibração local (EToHSL e EToHGL), durante os anos de 2020, 2022, e 2024 em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56, para região do município de Jaboticabal – SP.

Figura 6: Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com os métodos estudados com calibração local, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Anos: 2020, 2022, e 2024)



Observa-se na Figura 6, que a linha de regressão sobrepõe a reta  $y = x$ , e os pares de pontos estão próximos à linha de regressão, indicando uma adequada correlação, podendo-se observar isto também por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ .

Por meio da calibração local das equações de Hargreaves (EToHSL e EToHGL) foram obtidos os valores de HE (0,45 e 0,43).

## 5 CONCLUSÃO

A verificação dos dados da estação meteorológica automática (EMA-MA), foi aceitável.

Ambas equações de Hargreaves apresentaram um bom ajuste para estimativa da ETo, considerando a análise de regressão. As equações de Hargreaves com calibração local é uma alternativa para estimar a ETo diária em locais em que a disponibilidade de dados meteorológicos é limitada.

Desta forma para empregar a evapotranspiração da cultura (ETc), que se obtém determinando a ETo e multiplicando pelo coeficiente de cultura (Kc). A estimativa de ETo por meio de métodos simples com calibração local possibilitará o manejo adequado da irrigação. Nas Universidades e Institutos de Pesquisas a estimativa da ETo por meio de métodos simples com calibração local possibilitará o desenvolvimento de pesquisas com resultados consistentes para o manejo de irrigação.

Aplicações de lâminas d'água insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo, dessa forma, a eficiência do uso de irrigação. Portanto, recomenda-se estudos de campo para obtenção de informações da estimativa da ETo por meio de métodos simples com calibração local no manejo da irrigação.

Desta forma com os métodos estudados com a calibração regional para o microclima, se faz com eficiência, mesmo que com aparelhos que disponham boa acurácia, uma ferramenta eficiente para que os produtores possam calcular a ETo, e criar ajustes melhorados para a irrigação.

## REFERÊNCIAS

- ALMOROX, J., QUEJ, V. H., & MARTÍ, P. (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. **Journal of Hydrology**, 528, 514-522. [10.1016/j.jhydrol.2015.06.057](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057)
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., & SMITH, M. (1998/2024). Crop evapotranspiration—**Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56**. FAO, Rome.
- ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, p. 97-106, 1996. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:2(97))
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje, 56).
- ARRUDA, Dérick Alberto. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e obtenção do balanço hídrico climatológico para o município de Presidente Figueiredo, AM**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2022. Disponível em: [https://rii.ufam.edu.br/bitstream/prefix/6216/2/TCC\\_D%C3%A9rickArruda.pdf](https://rii.ufam.edu.br/bitstream/prefix/6216/2/TCC_D%C3%A9rickArruda.pdf). Acesso em: 20 jul. 2025.
- ASTM - SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D4430 – 00 (Reapproved 2023). **Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements**. <https://www.astm.org/d4430-00r15.html>
- BACHOUR, R.; WALKER, W.R.; TORRES RUA, A.F.; MCKEE, M. Assessment of reference evapotranspiration by the Hargreaves method in the Bekaa Valley, Lebanon. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, North Carolina, v. 139, n. 11, p. 933-938, 2013.
- BARBOSA, João Victor Góes; ARRUDA, Dérick Alberto; TEIXEIRA FILHO, Aristóteles de Jesus; FERREIRA, João Cleber Cavalcante. **Avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Maués, Amazonas**. *Irriga*, Botucatu, v. 27, n. 1, p. 79-91, 2022. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4540>. Acesso em: 05 ago. 2025
- COUTINHO, E. R., Madeira, J. G. F., SILVA, R. M., OLIVEIRA, E. M., DELGADO, A. R.S. Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) Diária Para Regiões dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 649–657, 13 nov. 2020.
- EA-EUROPEAN ACCREDITATION. EA-4/02 M: 2022. **Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration**. EA, p.1-78, 2022. Disponível em: < <https://european-accreditation.org/> >. Acesso em: 16 outubro. 2024.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FÁVERO, L. P., BELFIORI, P. **Manual de análise de dados**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

KHOOB, A. R. Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 3, p. 253-259, 2008.

HARGREAVES, G.H. **Climate and irrigation requirements for Brazil**. Logan, Utah State University, 1976. 44 p.

HARGREAVES, G.H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.120, n.6, p.1132-1139, 1994.

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

MARTÍ, PAU & GONZÁLEZ-ALTOZANO, PABLO & LÓPEZ-URREA, RAMÓN & MANCHA, LUIS A. SHIRI, JALAL, 2015. Modelagem de referência de evapotranspiração com metas calculadas. Avaliação e implicações ", **Gestão da Água Agrícola**, Elsevier, vol. 149 (C), páginas 81-90

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

OLIVEIRA, P. J. D. de. Integridade dos dados meteorológicos obtidos por duas estações meteorológicas automatizadas. 2014. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

PAOLINELLI, Alysson; DOURADO NETO, Durval; MANTOVANI, Everardo Chartuni (org.). **Agricultura irrigada no Brasil: inovação, empreendedorismo e sistemas de produção**. Piracicaba: ESALQ; Viçosa: ABID, 2022. 245 p. (Cátedra Luiz de Queiroz).

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILA NOVA, N. A.; REICHART, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. 404p.

SIQUEIRA, Mariana da Silva de. Estimativa da evapotranspiração para uma bacia hidrográfica no Semiárido brasileiro. 2020. 96 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – **Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande**, Campina Grande, 2020.

SOARES, T.G.; MENDES, C.C.; CLOSOSKI, G.; SOUZA, G.T.; PEREIRA, A.L.V.; CONTI, W.R.P.; MARTINS, F.R. Data-QS- Ferramenta numérica para qualificação de dados coletados em estações automáticas de superfície. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.5, n.7, p.9641- 9651, 2019.

TEIXEIRA, L. de M., SILVA, H. J. F. da, SILVA, A. P. L. da, SILVA, F. D. dos S., RODRIGUES, D. T., REIS, J. S. dos, & CABRAL JÚNIOR, J. B. (2025). Regionalização da evapotranspiração de referência e real para o estado de Alagoas, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira De Climatologia**, 37(21), 115–137. <https://doi.org/10.55761/abclima.v37i21.18985>

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

TURCO, J.E.P. Metodologia para verificar dados meteorológicos para estimativa da evapotranspiração de referência. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, p. n.1, 2455-2469, 2024

TUCCI, C. E. M. (2007). **Hidrologia: ciência e aplicação. 2. Ed.** Porto Alegre: ABRH, 2007.

TURCO, J.E.P.; BARBOSA, J.C. Avaliação de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith. **Irriga: Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu-SP, v.13, n.3, p.339-354. 2008.

TURCO, J.E.P.; CARLETO, N. Integridade de dados meteorológicos para uso em modelo hidrológico. **Revista brasileira de agricultura irrigada – RBAI**, Fortaleza-CE, v.11, n.8, p. 2084 - 2097, 2017.

TURCO, J. E. P.; FERNANDES, E. J. Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 23, n. 3, p. 46, 2003