

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ESTIMATIVA DA ET₀ POR MEIO DE MÉTODOS SIMPLES COM SENSORES
CALIBRADOS E VERIFICADOS**

Leonardo Nucci Cazari

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Coorientador: Eng. Eletric. Daniel Aparecido Morello da Costa

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação
em Engenharia Agrônômica.

JABOTICABAL – SP

2º SEMESTRE DE 2024

C386e	Cazari, Leonardo Estimativa da ETo por meio de método simples com sensores calibrados e verificados / Leonardo Cazari. -- Jaboticabal, 2024 30 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientadora: José Eduardo Pitelli Turco Coorientadora: Daniel Aparecido Morello da Costa 1. Evapotranspiração. 2. Estações automatizadas. 3. Calibração de sensores. I. Título.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL



DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia

CERTIFICADO

TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO: Estimativa da ETo por meio de métodos simples com sensores calibrados e verificados

ACADÊMICO: Leonardo Nucci Cazari

CURSO: ENGENHARIA AGRONÔMICA

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

COORIENTADOR: M.Sc. Daniel Aparecido Morello da Costa

PERÍODO: 02/2024 À 10/2024

Este trabalho é recomendado para compor a base de dados CAPELO. ☒ Sim ☐ Não

BANCA EXAMINADORA:

	(Nomes)
Presidente	Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco
Membro	Tec. Arthur Carrasqueira
Membro	Eng. Agron. Erika Cristina Gomes Sales

(Assinaturas)

Jaboticabal 01 / 10 / 2024

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 03 / 10 / 2024*

Chefe do Departamento
Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Depto. de Engenharia

* aprovado "ad referendum" do Conselho do Departamento

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luis Fernando Cazari e Elaine Nucci Cazari, à minha irmã Alissa e aos meus tios Paulo Sergio Cazari, Stella Cazari, Andreia Nucci e Marco dos Santos e aos meu avô Francisco Nucci e à minha avó Clementina Nucci por todo o apoio e incentivo durante toda a minha jornada na faculdade.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco, por toda amizade, sabedoria, paciência para me ensinar, pelo amor em estudar o assunto e ensinar de volta e pela oportunidade da qual serei eternamente grato.

Ao meu coorientador Eng. Eletric. Daniel Aparecido Morello da Costa pela amizade e companheirismo me ajudando muito na conclusão do trabalho e pela ajuda desenvolvimento da tese.

Aos meu amigos e irmãos da Republica Curva de Rio onde passei meus anos de graduação.

Agradecimento à UNESP FCAV pela estrutura e a todos os professores que me ajudaram a me tornar quem eu sou.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Estações meteorológicas automáticas	3
2.2. Verificação de dados meteorológicos	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Área experimental	8
3.2. Dados meteorológicos	8
3.3. Evapotranspiração de referência	10
3.4. Calibração de Sensores	12
3.5. Verificação dos sensores da EMA-DI	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1. Verificação dos sensores da EMA-DI	20
4.2. Avaliação da ETo da EMA-DI em relação a EMA-C.	23
5. CONCLUSÃO	25
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

RESUMO

Com este trabalho o objetivo foi utilizar uma estação meteorológica automática com sensores calibrados e outra com sensores verificados para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), por meio de métodos simples. Para estimativa da ET_o foram utilizadas três equações, uma que emprega a radiação solar e a temperatura do ar e duas que utilizam a medição da temperatura do ar. Os dados meteorológicos foram obtidos por duas estações meteorológicas automáticas: da marca Davis Instruments (EMA-DI) e da marca Campbell Scientific, calibrada (EMA-C). As duas estações meteorológicas automáticas (EMAs) foram instaladas na área experimental do LIAP (Laboratório de Instrumentação Automação e processamento) do Departamento de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, situada a 21°15'22" S, 48°18'58" O. Foi utilizada metodologia que possui as seguintes técnicas: estimativa da radiação solar global, dupla massa, comparabilidade operacional de medições meteorológicas, assimetria e curtose. Para verificar os dados da EMA-DI em relação a EMA-C foram estimadas a ET_o com os dados meteorológicos das duas EMAs. No período estudado os sensores calibrados não influenciaram na estimativa da ET_o pelas equações estudadas, mas influenciaram nas incertezas das estimativas da ET_o ($\pm\Delta ET_o$).

Palavras-chave: evapotranspiração, estações automatizadas, calibração de sensores.

ABSTRACT

With this work, the objective was to use an automatic meteorological station with calibrated sensors and another with verified sensors to estimate reference evapotranspiration (ET_o), using simple methods. To estimate ET_o, three equations were used, one that uses solar radiation and air temperature and two that use air temperature measurement. Meteorological data were obtained by two automatic meteorological stations: Davis Instruments (EMA-DI) and Campbell Scientific, calibrated (EMA-C). The two automatic meteorological station (EMAs) were installed in the experimental area of the LIAP (Instrumentation Automation and Processing Laboratory) of the Department of Engineering at, São Paulo State University (UNESP), School of Agricultural and Veterinary Sciences, Jaboticabal, located at 21°15'22" S, 48°18'58" W. A methodology was used that has the following techniques: estimation of global solar radiation, double mass, operational comparability of meteorological measurements, asymmetry and kurtosis. To verify the EMA-DI data in relation to EMA-C ET_o was estimated with meteorological data from the two EMAs. During the period studied, the calibrated sensors did not influence the ET_o estimate using studied equations, but they did influence the uncertainties in the ET_o estimates ($\pm\Delta ET_o$).

Key words: evapotranspiration, automated weather station, sensor calibration.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil as estações meteorológicas automáticas (EMAs) são utilizadas com frequência no setor agrícola para manejo da irrigação. A evapotranspiração da cultura (ET_c) é obtida determinando-se a evapotranspiração de referência (ET_o) e multiplicando pelo coeficiente de cultura (K_c) (Turco, *et al.* 2024).

Para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) é muito utilizada a equação de Penman-Monteith, mas devido a necessidade de variáveis tais como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar fica difícil para o pequeno e médio agricultor adquirir EMA, devido ao seu alto custo (Jamil, *et al.* 2013).

Uma alternativa para resolver este tipo de problema é utilizar equações simples para determinar a evapotranspiração de referência, que necessitam menor número de variáveis e consequentemente de menor (Jamil, *et al.* 2013).

Existem várias equações simples citadas na literatura para determinação da ET_o sendo que as equações de Hargreaves são muito utilizadas (Turco, *et al.* 2024).

As EMAs fornecem dados meteorológicos de modo prático e funcional. Porém, devido ao tempo de utilização e não realização da calibração dos sensores, podem fornecer dados de má qualidade. Portanto, é essencial analisar os dados para garantir a confiabilidade das informações climatológicas (Turco, *et al.* 2024).

A não verificação dos dados meteorológicos para estimativa da ET_o, podem conduzir ao manejo inadequado da 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 (Jamil, *et al.* 2013).

Com este trabalho o objetivo foi utilizar uma estação meteorológica automática com sensores calibrados e outra com sensores verificados para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), por meio de três métodos simples, um que emprega a radiação solar e a temperatura do ar e dois que utilizam a medição da temperatura do ar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estações Meteorológicas Automáticas

As estações meteorológicas automáticas (EMAs) fornecem dados meteorológicos para inúmeras aplicações. Os dados obtidos pelos sensores das EMAs são transmitidos a um Sistema de Aquisição de Dados, podendo ser disponibilizados e utilizados (Turco, *et al.* 2024).

Jamil *et al.* (2013) destacam a importância do conhecer tecnicamente os sensores meteorológicos para garantir a correta operação da estação meteorológica automática e, conseqüentemente, auxiliar na prevenção de enchentes. Como resultado, os autores verificaram que o bom funcionamento dos sensores auxilia na confiabilidade dos dados como forma de proteção à sociedade; já que os desastres naturais vêm aumentando.

As informações meteorológicas são importantes e estão relacionadas à economia e segurança nacional. Considerando a segurança das informações

meteorológicas, informações sobre o clima de forma imprecisa pode ser uma enorme ameaça à segurança nacional e à economia (Soares *et al.*, 2019).

Vários processos econômicos estão diretamente ligados as condições meteorológicas, entre eles estão a agricultura, a pecuária, a geração de bioenergia, entre outros. A energia solar, em específico, é limpa e utiliza uma fonte inesgotável de matéria prima, o Sol. Assim, o levantamento e planejamento do recurso solar em determinada localidade é de alto valor estratégico para fornecedores de energia e investidores (Lima *et al.*, 2016).

Para obtenção de dados meteorológicos as EMAs devem possuir sensores específicos para cada variável desejada. Entre as variáveis mais utilizadas estão temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e precipitação pluviométrica. Dessa forma é necessário instalar e operar estações para coleta de dados meteorológicos, incluindo sensores que atendam padrões técnicos mínimos para reduzir as incertezas associadas com a aquisição de dados de campo (Tolmasquim, *et al.*, 2007).

2.2. Verificação de dados meteorológicos

Soares *et al.* (2019) relatam que além da qualidade e a instalação correta dos equipamentos utilizados nas EMAs, é fundamental manter um controle de qualidade dos dados observados com o intuito de garantir a representatividade dos dados em relação às condições meteorológicas locais e possibilitar a análise de comparação com diferentes bases de dados para a mesma localidade.

Devido a importância e aplicabilidade dos dados medidos em EMAs é necessário que eles sejam verificados antes mesmo de serem disponibilizados para os usuários para garantir a confiabilidade das informações (WMO, 2008; Carleto, 2016).

O funcionamento correto dos sensores possibilita a confiabilidade das avaliações climáticas. Portanto, auxiliando na proteção da sociedade tendo em vista um monitoramento real das mudanças climáticas e desastres naturais cada vez mais frequentes no mundo (Jamil, *et al.* 2013). Falhas ao longo do histórico de dados climáticos podem levar a resultados errôneos ou tendenciosos, o que compromete a análise climática (Vieira *et al.*, 2018; Diaz *et al.*, 2018).

Turco e Barbosa (2008) avaliaram os dados meteorológicos de duas EMAs, uma do fabricante Davis Instruments e outra do fabricante Campbell Scientific, para detectar possíveis erros nas medidas dos sensores. Como resultado, os autores identificaram que os dados da radiação solar e da temperatura do ar foram satisfatórios. Porém, os dados da umidade relativa do ar das duas EMAs não foram aceitáveis. Com relação a velocidade do vento, ambas EMAs não apresentaram boa correlação.

Allen (1996) relata que a confiabilidade dos dados das EMAs deve ser testada quanto à necessidade calibração dos sensores e norteia a sua checagem, manutenção ou troca. Ao se detectar diferenças significativas pela análise de integridade de dados, comparando sensores de estação meteorológica próximas, significa que existe algum tipo de problema nos sensores.

Bachour *et al.* (2013) avaliaram a ETo pelo Método Hargreaves no Vale do Bekaa, no Líbano. Para esta avaliação, verificaram os dados meteorológicos antes de serem utilizados, adotando as técnicas descritas por Allen (1996). Utilizando as mesmas técnicas para verificar os dados de uma EMA da marca Davis Instruments Turco (2020) avaliou a eficiência de três equações de Hargreaves para estimativa da ETo, comparando-as com a equação de Penman-Monteith, nas condições climáticas do município de Jaboticabal, SP.

Estévez *et al.* (2011a) apresentam algumas diretrizes para aplicação de técnicas que verificam a integridade de dados meteorológicos encontradas na literatura, para garantia da qualidade de dados meteorológicos da Rede de Informação Agroclimático da Andaluzia (sul da Espanha). Concluíram que as diretrizes propostas são capazes de identificar os vários tipos de erros e são utilizadas 16 como uma ferramenta que permite tomar decisões, tais como a substituição do sensor e para remover os dados antes da sua aplicação, bem como Estévez *et al.* (2011b) desenvolveram um sistema de controle de qualidade para quantificar a Evapotranspiração de Referência (ETo) e auxiliar no processo de irrigação. Os autores concluíram que é necessário analisar cada estação meteorológica para detectar erros de medida, bem como estabelecer melhorias na análise de dados para validar a sua confiabilidade.

O CIMIS 2014 (Califórnia Irrigation Management Information System) desenvolveu várias técnicas para avaliação da qualidade dos dados medidos em EMAs.

Oliveira *et al.* (2010, 2015) comparando dados de duas EMAs concluíram que uma boa concordância das variáveis de temperatura e precipitação, o que indicou bom funcionamento dos sensores. Scarpate *et al.* (2006) também encontraram uniformidade de umidade relativa do ar entre estações meteorológicas convencional e automática.

Sharan (2014) desenvolveu um protótipo de estação meteorológica automática para medir dados meteorológicos de forma remota (wireless). Os resultados mostram que os dados medidos são aceitáveis, quando comparados com dados de EMAs existentes no mercado.

Método de controle de qualidade de dados meteorológicos de duas EMAs instaladas no noroeste da Groenlândia, foi desenvolvido por Nishimura *et al.* (2023). Analisaram a série temporal resultante de 2012–2020 de temperatura do ar, graus-dia positivos, altura da neve, albedo de superfície e histogramas de radiação de ondas longas (um proxy da frequência de formação de nuvens).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área Experimental

A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do LIAP (Laboratório de Instrumentação Automação e Processamento) do Departamento de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, situada a 21°15'22" de latitude sul, 48°18'58" de longitude oeste e altitude de 575 m.

3.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos em duas estações meteorológicas automáticas. Uma da marca da Davis Instruments (EMA – DI) e a outra da Campbell Scientific, calibrada (EMA-C), Figuras 1 e 2. As duas EMAs foram instaladas na área experimental do LIAP (Laboratório de Instrumentação Automação e processamento). Os dados meteorológicos foram obtidos nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto de 2024, período de seca, correspondente a 138 dias.



Figura 1. Estação meteorológica automática da Davis Instruments.



Figura 2. Estação meteorológica automática da Campbell Scientific, calibrada.

3.2.1 EMA-DI instalada na área experimental do LIAP.

A EMA-DI tem um Sistema de Aquisição de Dados Vantage Pro Plus Wireless e possui os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa do ar, modelo 7859; velocidade do vento, modelo 7911; radiação solar global, modelo 6450; precipitação pluviométrica, modelo 7852; todos da marca Davis Instruments.

3.2.2 EMA-C instalada na área experimental do LIAP.

A EMA-C é composta por sistema de aquisição de dados da marca Campbell Scientific (CR10X), sensor de precipitação pluviométrica Handar (modelo 444A), velocidade do vento, modelo 03001 RM Young Co, radiação solar global, modelo CM3 Kipp & Zonen e temperatura e umidade do ar Rotronic (modelo Hygroclip).

3.3 Evapotranspiração de referência

A E_{To} foi estimada em escala média diária, pelas equações de Hargreaves (1976), Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves (1994).

3.3.1 Equação de Hargreaves (1976)

$$\text{Seja, } E_{ToH} = 0,0075 Q T \quad (1)$$

A equação básica proposta por Hargreaves (1976), para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

E_{ToH} - evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

T - temperatura média do ar, °F;

Q - radiação solar medida, cal cm⁻² dia⁻¹.

Pode-se escrever a eq. (1) na seguinte forma:

$$E_{ToH} = 0,0075 \frac{Q}{59} T \quad (2)$$

Em que

Q - radiação solar global recebida, cal cm⁻² dia⁻¹;

1/59 - fator de conversão de cal cm⁻² a mm de evaporação equivalente.

3.3.2 Equação de Hargreaves e Samani (1985)

$$\text{Considerando, } E_{ToHS} = 0,0023Q_o (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{HE}(T + 17,8) \quad (3)$$

Em que,

EToHS - evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

T_{máx} - temperatura máxima, °C;

T_{mín} - temperatura mínima, °C;

T - temperatura média diária, °C;

Q_o - radiação solar extraterrestre (mm dia⁻¹);

HE - expoente empírico (0,43).

Os valores diários da radiação solar extraterrestre foram obtidos em função da latitude local, a partir dos dados interpolados de Napier Shaw, citado por Ramos et al. (1989), tendo como parâmetro máximo da atmosfera, o 15º dia de cada mês entre as latitudes 10°N e 40°S.

3.3.3 Equação de Hargreaves (1994)

$$\text{Considerando, } E_{ToHG} = 0,0023 \text{ RA } (T^{\circ}\text{C} + 17,8) \text{ TD}^{HE} \quad (4)$$

Em que,

E_{ToHG} - evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

RA - radiação solar extraterrestre (mm dia⁻¹);

T[°]C - (T_{max} + T_{min})/2 (temperatura máxima diária do ar mais a temperatura mínima diária do ar, em °C, dividido por dois);

TD - T_{max} - T_{min} (temperatura máxima diária do ar menos a temperatura mínima diária do ar, em °C);

HE - expoente empírico (0,424).

Os valores diários da radiação solar extraterrestre também foram obtidos em função da latitude local, a partir dos dados interpolados de Napier Shaw, citado por Ramos et al. (1989), tendo como parâmetro máximo da atmosfera, o 15º dia de cada mês entre as latitudes 10ºN e 40ºS.

3.4 Calibração dos sensores

O sensor de temperatura do ar foi calibrado no laboratório de Metrologia Ambiental do INPE, Cachoeira Paulista – SP. O sensor de radiação solar foi calibrado na UNIMETRO (www.unimetro.com.br), São Paulo – SP.

3.5 Verificação dos sensores da EMA-DI.

Foram verificados dos dados da EMA-DI por meio da metodologia de Turco (2024) que possui as seguintes técnicas: estimativa da radiação solar global, dupla massa, comparabilidade operacional de medições meteorológicas, assimetria e curtose. Os dados coletados na EMA-DI foram comparados aos dados coletados no mesmo período, obtidos na EMA-C.

Para verificação da radiação solar global das EMAs foi utilizada a técnica de estimativa da radiação solar global descrita por Allen (1996).

Para verificação dos dados meteorológicos das EMAs foi utilizada a técnica de dupla massa; desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS) (Tucci, 2007).

As variáveis meteorológicas da EMA-DI foram verificadas, em relação as da EMA-C, por meio da norma ASTM D4430 - Standard Practice for Determining

the Operational Comparability of Meteorological Measurements (ASTM D4430 – 00, 2023)

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

3.5.1 Descrição da técnica de estimativa da radiação solar global (ALLEN, 1996)

A operação do piranômetro e a precisão da calibração podem ser avaliadas pela delineação (plotagem) de hora em hora ou pela média diária das leituras do piranômetro comparando com as radiações de ondas curtas esperadas computadas sob condições de céu limpo (R_{so}). R_{so} pode ser descrita como:

$$R_{so} = K_T R_a \quad (5)$$

na qual,

R_a = radiação extraterrestre;

K_T = índice de “claridade”.

A R_a pode ser computada por períodos diários ou de hora em hora como uma função da latitude, dia do ano e hora do dia. Para dados de 24 horas, o K_T pode variar de 0,7 a 0,8; dependendo da claridade atmosférica (poeira em suspensão no ar, poluição, umidade, etc.), elevação e ângulo solar.

Uma simples previsão para o K_T , onde apenas a elevação do local é considerada, pode ser determinada pela equação:

$$K_T = 0,75 + (2E - 5)z \quad (6)$$

na qual,

z = elevação da estação (m).

A equação (6) foi desenvolvida para uma média do ângulo solar de 45° acima da linha do horizonte.

Estimativas aperfeiçoadas da R_{so} para períodos ou dias com baixos ângulos solares podem ser calculados utilizando-se a seguinte equação:

$$K_T = \exp \left(\frac{-0,0018P}{K_{tb} \sin \Phi} \right) \quad (7)$$

na qual, K_{tb} = coeficiente de claridade, $0,5 < K_{tb} \leq 1,0$, onde $K_{tb} = 1,0$ para condições de ar limpo e 0,5 para extremamente turbido ou pardo. Geralmente, K_{tb} é tomado como 1,0 para prever o limite mais alto de K_T para a maioria das áreas agrícolas. A variável P significa pressão atmosférica (kPa), e Φ = o ângulo solar acima do horizonte (rad).

Uma porção da absorção ou a dispersão da radiação de luz direta na atmosfera é causada pelo vapor de água (radiação de luz direta é definida como a densidade de fluxo de radiação de onda curta, vinda diretamente do feixe de luz solar, incidente em um plano paralelo da superfície da terra. Radiação difusa é definida como a densidade de fluxo de radiação de onda curta, vinda da dispersão da luz solar). A função K_T pode ser melhorada incluindo a água precipitável como variável. A função K_B prediz o índice de claridade para radiação de luz direta, sob condições de céu limpo com baixa turbidez.

$$K_B = 0,98 \exp [-0,00146P / K_{tb} \sin \Phi - 0,162 (W / \sin \Phi)^{0,25}] \quad (8)$$

na qual,

P = pressão atmosférica (kPa);

W = água precipitável na atmosfera, em cm.

W pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$W = 0,014e_dP + 0,21 \quad (9)$$

na qual,

e_d = pressão de vapor próxima à superfície (kPa).

Um índice de radiação difusa, K_D , pode ser estimado de K_B , usando as seguintes expressões:

$$K_D = 0,35 - 0,33K_B \text{ para } K_B \geq 0,15 \quad (10)$$

$$K_D = 0,18 + 0,82K_B \text{ para } K_B < 0,15$$

Quando as equações (8) e (10) são utilizadas, o índice de claridade é calculado como a soma de K_B e K_D .

$$K_T = K_B + K_D$$

(11)

Para períodos de hora em hora ou mais curtos, o $\sin \Phi$ nas equações (7) e (8) é calculado como:

$$\sin \Phi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

(12)

na qual,

φ = latitude da estação (rad);

δ = declinação solar (rad);

ω = ângulo de tempo solar (rad).

Para aplicação das equações (7) e (8) para dados fixados de 24 horas ou mensais, uma média de 24 horas ponderada do $\sin \Phi$ pode ser estimada por ponderação instantânea de $\sin \Phi$, de acordo com a R_a instantânea, durante o curso do dia. O resultado integrado e médio é

$$(\sin \Phi)_{24} = \{ \sin^2 \varphi \sin^2 \delta \omega s + 2 \sin \varphi \sin \delta \cos \varphi \cos \delta \sin \omega s + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta [\omega s/2 + \sin (2 \omega s)/4] \} / (\omega s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega s) \quad (13)$$

na qual,

ωs = ângulo do horário do pôr-do-sol.

Uma simplificação da equação (9) determinada por regressão é

$$(\sin \Phi)_{24} = \sin [0,85 + 0,3 \varphi \sin (2\pi / 365 J - 1,39) - 0,42 \varphi^2] \quad (14)$$

na qual,

J = dia do ano (1 a 365);

φ = latitude em graus radianos.

A equação (14) estima $(\sin \Phi)_{24}$ com um padrão de erro de estimativa de aproximadamente 4% para períodos da primavera, verão e outono, sobre uma faixa de -65 a 65° latitude e 6% para todos os meses sobre uma faixa de -60 a 60° latitude. Essa precisão é adequada para prever K_T para períodos de 24h00.

3.5.2 Descrição da técnica de dupla massa; desenvolvida pela United States Geological Survey (USGS) (Tucci, 2007).

Somas acumulativas de uma variável em duas localidades são plotados uma contra a outra (por exemplo, vento acumulativo no local 1 versus vento

acumulativo no local 2). Uma mudança na inclinação da curva acumulativa em um período de tempo pode indicar uma mudança no funcionamento e calibração em um dos instrumentos.

3.5.3 Descrição da técnica de comparabilidade operacional de medições meteorológicas (ASTM, 2023)

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

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi}) \quad (15)$$

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

$$C = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi})^2} \quad (16)$$

onde:

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

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

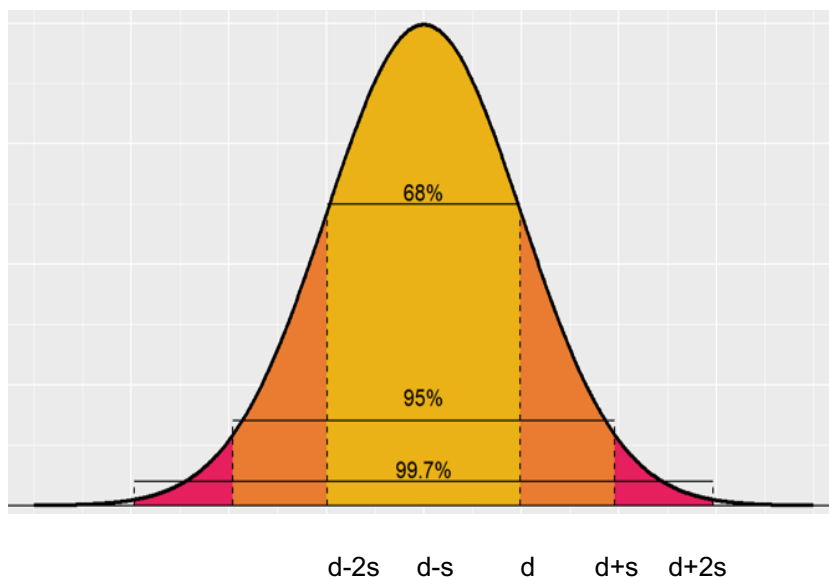
N = número de amostras usadas.

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

$$s = \pm\sqrt{C^2 - d^2} \quad (17)$$

Neste trabalho foi adotado que uma distribuição normal (Gaussiana) perfeita 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).

Verificação da Distribuição Normal (Gaussiana)



3.5.4 Descrição da técnica de assimetria e curtose de Fisher (Fávero e Belfiore, 2017)

O coeficiente de assimetria de Fisher pode ser escrito como:

$$g_1 = \frac{n^2 \cdot M_3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot S^3} \quad (18)$$

Sendo que o terceiro momento é:

$$M_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n} \quad (19)$$

A interpretação, será

$g_1 = 0$, a distribuição é simétrica;

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

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

O coeficiente de curtose de Fisher pode ser escrito como:

$$g_2 = \frac{n^2 \cdot (n+1) \cdot M_4}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \cdot S^4} - 3 \cdot \frac{(n-1)^2}{(n-1) \cdot (n-3)} \quad (20)$$

Em que o quarto momento é dado por:

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n} \quad (21)$$

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;

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

3.6 Avaliação da Estimativa da ETo da EMA-DI em relação EMA-C.

Para avaliação da ETo da EMA-DI em relação a EMA-C foi utilizada a técnica de determinação de erros desenvolvida por Turco *et al.* (1994) e técnica de

dupla massa; desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS) (Tucci, 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Verificação dos sensores da EMA-DI.

Por meio da meteorologia utilizada foi realizada a verificação dos dados meteorológicos da EMA-C e EMA-DI.

Os dados da radiação solar da EMA-C e EMA-DI seguem e subestimam a radiação solar estimadas por três equações, segundo a técnica descrita por Allen (1996). Portanto, os dados são aceitáveis e os sensores estão operando corretamente (Figuras 3a e 3b). Os resultados ratificam as análises realizadas por Oliveira et al. (2015), na qual os autores avaliaram a integridade dos dados meteorológicos da estação meteorológica automática (EMA) do SINDA/INPE utilizando as técnicas descritas por Allen (1996). Os resultados deste trabalho corroboram com os de Turco e Carleto (2017) que avaliaram a integridade de dados das EMAs da Davis e da Campbell por meio das técnicas descritas por Allen (1996).

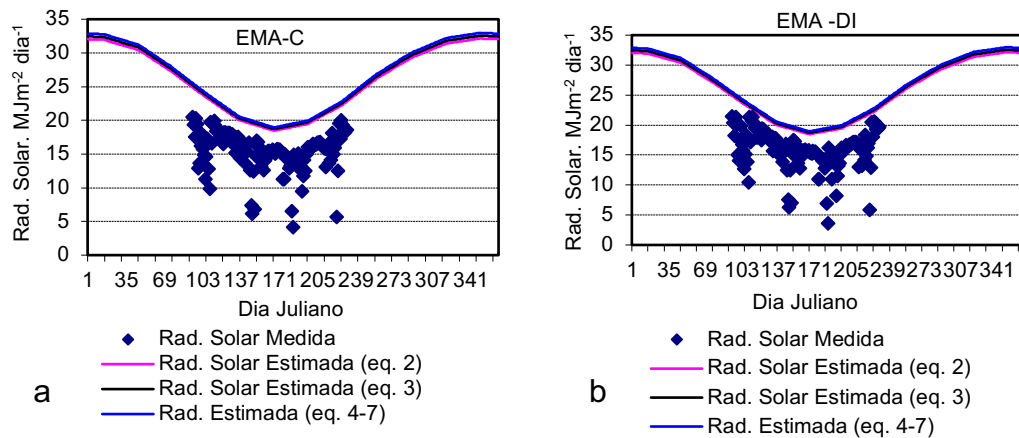


Figura 3. Radiação solar medida (EMA-C e EMA-DI) e estimada por três equações.

Observa-se que radiação solar registradas pela EMA-DI apresentam correlações satisfatórias quando comparadas com a EMA-C. Desta forma, com base na inclinação de 45° da reta, é possível verificar boa confiabilidade dos dados. Isso significa que os sensores estão operando de forma satisfatória (Figura 4a).

Os dados de temperatura do ar da EMA-DI apresentaram correlação satisfatória quando comparadas com os da EMA-C (Figura 4b). A diferença dos sensores está associada a calibração deles, indicando que os sensores estão operando de forma satisfatória.

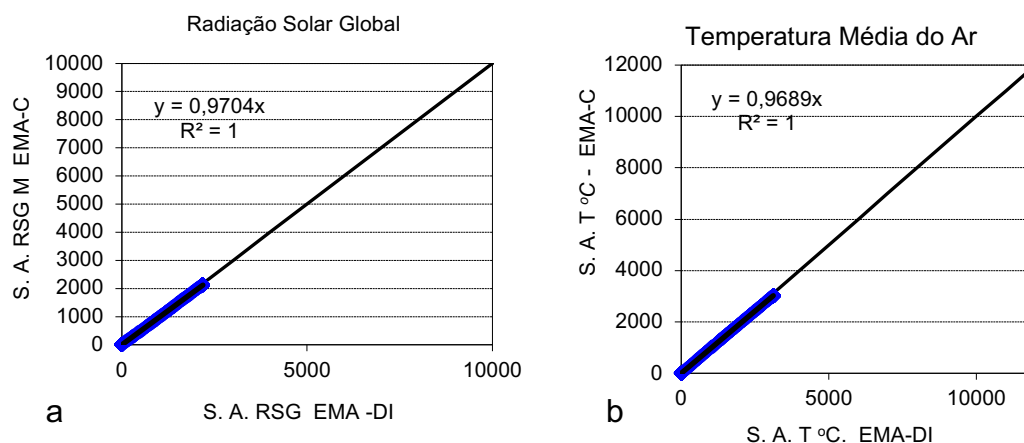


Figura 4. Soma acumulativa dos valores diários da radiação solar global e temperatura do ar, EMA-C e EMA-DI.

Os dados da temperatura do ar e radiação solar global da EMA-DI, em relação a EMA-C foram avaliados por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c). Os dados apresentaram d e s aceitáveis, ou seja, valores próximos e 95 por cento das medidas das diferenças estão dentro de $\pm 2s$. (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Verificação da temperatura do ar e radiação solar global da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c). Ano: 2024.

	EMA	TEMPERATURA DO AR			RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL		
		d	s	c	d	s	c
				(%)			(%)
EMA-DI	2024	-0,72	0,55	95,3	-0,45	0,56	97,10

Pode-se verificar na Tabela 2 os resultados da avaliação dos dados meteorológicos da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio do coeficiente de assimetria e curtose. Os dados de temperatura apresentaram coeficiente de assimetria (g_1) igual a zero, ou seja, distribuição simétrica. Já os dados de radiação solar global tiveram g_1 maior que zero, ou seja, distribuição assimétrica positiva (à direita). Os dados de temperatura apresentaram coeficiente de curtose (g_2) menor que zero, ou seja, grau de achatamento alto, curva platicúrtica. Os dados de radiação solar global apresentaram coeficiente de curtose (g_2) maior que zero, ou seja, grau de achatamento baixo, curva leptocúrtica.

Tabela 2. Verificação da temperatura do ar e Radiação solar global da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher. Ano: 2024.

EMA	Ano	TEMPERATURA DO AR		RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	
		g_1	g_2	g_1	g_2
EMA-DI	2024	0,00	-3,07	0,57	3,27

4.2 Avaliação da ETo da EMA-DI em relação EMA-C.

4.2.1. Avaliação da ETo por meio da técnica de dupla massa

A soma acumulativa da EToH, EToHS e EToHG da EMA-C, no período outono e inverno de 2024 foi 462,3 mm, 431,07 mm e 435,56 mm, respectivamente e da EMA-DI foi 484,9 mm, 425,83 e 431,03 mm, respectivamente (Figuras 5 e 6).

Os resultados obtidos mostraram a importância de estudos desta natureza, que possibilitam verificar a influência da integridade dos dados de estações automáticas na estimativa da ETo. O impacto do erro dos dados meteorológicos na estimativa da ETo também foi estudado por Estêves et al. (2009).

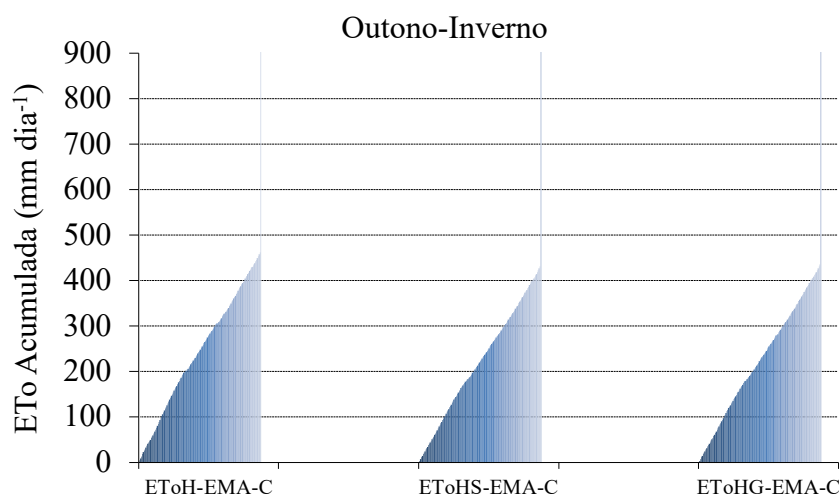


Figura 5. Soma acumulativa da EToH, EToHS e EToHG da EMA-C.

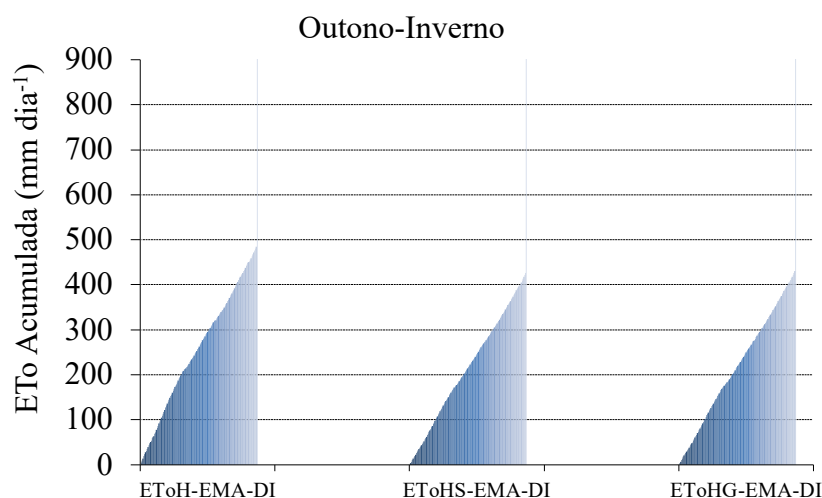


Figura 6. Soma acumulada da EToH, EToHS e EToHG da EMA-DI.

A verificação dos dados meteorológicos precisa ser feita antes dos dados serem utilizados em equações de estimativa da ETo.

Procedimentos de verificação de dados deveriam ser adotados a toda rede de estação meteorológica agrícola, para assegurar que dados com qualidade estão sendo medidos e transferidos para os usuários.

4.2.2. Avaliação da ETo considerando os erros da ETo.

Neste item, mostramos os resultados da aplicação da técnica de determinação de erros desenvolvida por TURCO et al. (1994), determinando-se os erros estatísticos com 95% de confiança da ETo (EMA-C) e ETo (EMA-DI) pelas equações de Hargreaves (EToH, EToHS e EToHG).

As acurácias dos instrumentos de medidas da temperatura do ar (T), e radiação solar global (Q) causaram na ETo (EMA-C) e ETo (EMA-DI) erros $\pm \Delta ETo$. A EMA-C apresentaram valores médios de EToH $\pm \Delta EToH$ de 3, 35 $\pm$ 0,22 (mm dia⁻¹

¹), EToHS $\pm \Delta EToHS$ de $2,85 \pm 0,04$ (mm dia⁻¹) e, EToHG $\pm \Delta EToHG$ de $2,9 \pm 0,04$ (mm dia⁻¹). A EMA-DI apresentaram valores médios de EToH $\pm \Delta EToH$ de $3,19 \pm 0,44$ (mm dia⁻¹), EToHS $\pm \Delta EToHS$ de $2,91 \pm 0,06$ (mm dia⁻¹) e, EToHG $\pm \Delta EToHG$ de $2,9 \pm 0,05$ (mm dia⁻¹).

5. CONCLUSÃO

A calibração dos sensores não influenciou na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) pelas equações de Hargreaves (EToH, EToHS e EToHG), mas influenciou nas incertezas das estimativas da ETo ($\pm \Delta ETo$). Se os cálculos da ETo forem processados com dados obtidos de sensores descalibrados, as estimativas da ETo terão incerteza maior.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, North Carolina, v.122, n.2, p.97-106, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements - ASTM D4430 – 00 (Reapproved 2023), 2018. <https://www.astm.org/d4430-00r15.html>

BACHOUR, R.; ASCE, S.M.; WALKER, W.R.; ASCE, F.; 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**, New York, v. 139, n.11, p. 933-938, 2013.

CALIFÓRNIA IRRIGATION MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM (CIMIS). **Publicações**. Disponível em: < <http://www.cimis.water.ca.gov/Resources.aspx> >. Acesso em: 25 mar. 2014.

CARLETO, N. **Integridade de dados meteorológicos para uso em modelo hidrológico**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal-SP, 2016.

DIAZ, C. C. F; PEREIRA, J. A. S.; NÓBREGA, R. S. Comparação de dados estimados por dois diferentes métodos para o preenchimento de falhas de precipitação pluvial na bacia do rio Pajeú, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 324-339, 2018.

ESTÉVES, J.; GAVILÁN, P.; GIRÁLDEZ, J.V. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. **Journal of Hydrology**, v. 402, p. 144-154, 2011a.

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P.; GARCÍA-MARÍN, A. P. Data validation procedures in agricultural meteorology – a prerequisite for their use. **Advanced in Science and Research**, v. 6, p. 141-146, 2011b.

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

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.

JAMIL, I.; JAMIL, R.; JINQUAN, Z.; MING, L.; ANSAR, A.; AHMED, R.; JAFAR, I.; HUSSIAN, R.; JAMIL, R. Application and composition observing system of automatic weather station (AWS) and power grid (PGMIS). **Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)**, v. 2, n. 4, p.31-44, 2013.

LIMA, J.C.O; BISPO, F.S; RIFFEL, D.B. Comparação entre dados de radiação solar medidas por estações meteorológicas automáticas no Estado de Sergipe com valores estimados a partir de imagens de satélite. In: SIMPÓSIO SERGIPANO DE ENERGIA SOLAR. 2016, Aracaju. **Anais....** Aracaju.

NISHIMURA, M.; AOKI, T.; NIWANO, M.; MATOBA, S.; TANIKAWA, T.; YAMASAKI, T.; YAMAGUCHI, S.; FUJITA, K. Quality-controlled meteorological datasets from SIGMA automatic weather stations in northwest Greenland, 2012–2020, **Earth Syst. Sci. Data**. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2023-116>, in review, 2023.

OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; CAVALCANTI JÚNIOR, E. G.; SOBRINHO, J. E.; VIEIRA, R. Y. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por

estação convencional e automática em Jaboticabal – SP. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010.

OLIVEIRA, P. J. D.; TURCO, J. E. P.; CARLETO, N. Integridade de dados meteorológicos obtidos por estação meteorológica automatizada. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015. São Pedro. **Anais ...** São Pedro, 2015.

SHARAN, R. V. Development of a remote automatic weather station with a PC – based datalogger. **International Journal of Hybrid Information Technology**, v. 7, n. 1, 2014, p. 233- 240.

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**, v.5, n.7, p. 9641-9651, 2019.

TOLMASQUIM, M; GUERREIRO, A; GORINI, R. Matriz Energética Brasileira: Uma Prospectiva. **Novos Estudos**, v.3, p. 46-69, 2007.

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

TURCO, J.E.P. Evapotranspiração de referência pelas equações de Hargreaves em clima tropical. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada - RBAI**. Fortaleza-CE, v.14, n.4, p. 4106 - 4117, 2020.

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.

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.468-477, 2003.

TURCO, J.E.P; PINOTTI JR, M; PAVANI, L.C; FERNANDES, E.J. Técnica para Determinação de Erros em Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência. **Engenharia Agrícola, Campinas**. v.14, p.29-37, 1994.

VIEIRA, S.; OSORIO, D. M. M.; QUEVEDO, D. M.; ADAM, K. N.; PEREIRA, M. A. F. Metodologia de imputação de dados hidrometeorológicos para análise de séries históricas – Bacia do Rio dos Sinos, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 189-204, 2018.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to meteorological instruments and methods of observation WMO-Nº. 8**. Geneva 2, Switzerland, p.161-173, 2008.