



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DA BIODIVERSIDADE
AGRONOMIA

ANA ALICE CARDOSO CARNEIRO

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO CARIRI, CE:
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS ALTERNATIVOS

CRATO-CE

2026

ANA ALICE CARDOSO CARNEIRO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO CARIRI, CE:
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS ALTERNATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, Agronomia,
Centro de Ciências Agrárias e da
Biodiversidade, Universidade Federal do
Cariri, como requisito parcial para obtenção do
grau de engenheiro agrônomo.

Orientador: Prof. Dra. Ana Célia Meireles
Oliveira

Coorientadora: Dra. Sirleide Maria de Menezes

CRATO-CE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

C289e Carneiro, Ana Alice Cardoso.

Evapotranspiração de referência para a região do Cariri, CE: calibração e validação de modelos alternativos / Ana Alice Cardoso Carneiro. – 2026.
26 f. (Inclui bibliografia, p. 19).

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Cariri,
Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Curso de Agronomia, Crato, 2026.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Célia Meireles Oliveira.

Coorientadora: Dra. Sirleide Maria de Menezes.

1. Demanda evapotranspiratória. 2. Índices estatísticos. 3. Penman-Monteith (FAO). 4. Agrometeorologia - Cariri (CE). 5. Ajuste linear. I. Oliveira, Ana Célia Meireles - orientadora. II. Menezes, Sirleide Maria de - coorientadora. III. Título.

CDD 631.7

ANA ALICE CARDOSO CARNEIRO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO CARIRI, CE:
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS ALTERNATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, Agronomia,
Centro de ciências e da biodiversidade,
Universidade Federal do Cariri, como requisito
parcial para obtenção do grau de engenheiro
agrônomo.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANA CELIA MEIRELES OLIVEIRA**
Data: 12/02/2026 21:46:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Ana Célia Meireles Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Documento assinado digitalmente
 **SIRLEIDE MARIA DE MENEZES**
Data: 13/02/2026 10:48:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Sirleide Maria de Menezes (Coorientadora)

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS WAGNER OLIVEIRA**
Data: 12/02/2026 22:11:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Wagner Oliveira
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Documento assinado digitalmente
 **JOSE BANDEIRA BRASIL**
Data: 13/02/2026 11:38:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. José Bandeira Brasil

CRATO-CE, 11 DE FEVEREIRO DE 2026

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus. Aquele que fez tudo e todos existirem. Sua graça e misericórdia me sustentaram em cada momento dessa caminhada, capacitando e fortalecendo nas dificuldades. A graça do Senhor me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais, Ana Paula e Magdiel, por todo o amor, apoio, ensinamentos e sacrifícios feitos ao longo da minha vida. Ao meu irmão que esteve ao meu lado sendo suporte e amigo.

Ao meu namorado, Everton Alencar Patricio, pelo companheirismo, paciência, incentivo e amor. A sua caminhada foi a demonstração do cuidado e amor de Deus por mim. Seu companheirismo me fortaleceu em cada momento para alcançar meus objetivos.

Dedico in memoriam a minha avó Ivone Carneiro, aquela que sonhou comigo desde a aprovação que esse dia de conclusão chegasse.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o autor da minha vida e da minha fé. Aquele que me deu muito mais do que poderia merecer. Agradeço por me conceder inteligência e capacidade ao longo da formação acadêmica. Cada conquista foi possível pela boa mão do Senhor que me acompanhou. O cuidado e provisão de Deus foram essências para que fosse possível chegar até aqui.

A minha família, pelo amor incondicional, apoio contínuo, incentivo e compreensão em todos os momentos. A minha família foi peça fundamental para que fosse possível realizar esse sonho.

Ao meu namorado, Everton Alencar Patricio, por tudo que fez por mim e por nós ao longo dessa caminhada. Sua companhia tornou os dias mais leves e os desafios possíveis de serem resolvidos. Sua presença foi indispensável ao longo de toda a graduação.

A prof. Dra. Ana Célia Meireles Oliveira, pela orientação, dedicação, disponibilidade e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seus ensinamentos e direcionamentos foram essenciais para a concretização deste estudo.

A Dra. Sirleide Maria de Menezes e ao Dr. Jose Bandeira Brasil, por todo o apoio, disponibilidade e ensinamentos compartilhados, que contribuíram de forma significativa para meu crescimento acadêmico e profissional. Os ensinamentos deixados por vocês me acompanharão ao longo de toda jornada acadêmica que vem pela frente.

Aos participantes da banca examinadora, a prof. Dra. Ana Célia Meireles Oliveira, ao prof. Dr. Carlos Wagner Oliveira, Dra. Sirleide Maria de Menezes e Dr. Jose Bandeira Brasil pelas sugestões, contribuições e considerações realizadas, que enriqueceram este trabalho e contribuíram para seu aprimoramento.

Aos integrantes e tutores do Grupo de Educação Tutorial em Agronomia (PET Agronomia), pelos anos de aprendizado, convivência e crescimento proporcionados durante minha participação. Ao Laboratório de Estatística, Modelagem e Geoprocessamento (LEMGE), bem como aos seus integrantes e tutores, pela oportunidade de fazer parte do grupo e pelas contribuições fundamentais ao longo da minha trajetória acadêmica. De forma especial, agradeço à Universidade Federal do Cariri (UFCA) por ter sido minha instituição formadora e por contribuir de maneira essencial para o primeiro passo da minha formação profissional e a FUNCAP pelo apoio financeiro.

Para que todos vejam, e saibam, e considerem,
e juntamente entendam que a mão do Senhor
fez isto.

Isaías 41:20

RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma variável meteorológica fundamental para planejamento hidrológico e agroclimático de uma região. Assim, esse trabalho teve por objetivo calibrar e validar modelos alternativos para o cálculo da evapotranspiração de referência na região do Cariri cearense. Para tanto, foi utilizado um período de 3 anos (2021 a 2023), sendo dois anos para calibração e um ano para validação dos coeficientes obtidos. O método da FAO (Penman-Monteith) foi usado como padrão de comparação para os métodos: Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor, Jensen-Haise e Blaney-Criddle. O desempenho dos métodos foi analisado por meio de indicadores estatísticos, sendo estes: coeficiente de determinação, erro médio, raiz quadrada do erro quadrado médio, coeficiente de correlação de Pearson, índice de exatidão de Willmont e o índice de exatidão descrito por Camargo e Sentelhas. A calibração dos modelos alternativos de estimativa da ET_o para a região do cariri cearense possibilitou medidas mais precisas. Os modelos ajustados de Jensen-Haise e Priestley-Taylor apresentaram estimativas mais precisas e exatas, podendo ser utilizados, quando necessário, em substituição ao modelo da FAO Penman Monteith. Os métodos de Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle foram menos precisos na estimativa de ET_o.

Palavras-chave: demanda evapotranspiratória, índices estatísticos, ajuste linear.

ABSTRACT

Reference evapotranspiration (ET_o) is a fundamental meteorological variable for hydrological and agroclimatic planning in a region. Therefore, this work aimed to calibrate and validate alternative models for calculating reference evapotranspiration in the Cariri region of Ceará. To this end, a period of 3 years was used (2021-2023), with two years for calibration and one year for validation of the obtained coefficients. The FAO method (Penman–Monteith) was used as a comparison standard for the methods of Hargreaves and Samani, Priestley-Taylor, Jensen-Haise and Blaney-Criddle. The performance of the methods was analyzed via statistical indicators, namely, the coefficient of determination, mean error, square root of the mean square error, Pearson's correlation coefficient, Willmont's accuracy index and the accuracy index described by Camargo and Sentelhas. The calibration of alternative ET_o estimation models for the Cariri region of Ceará allowed more precise measurements. The adjusted Jensen-Haise and Priestley-Taylor models presented more precise and accurate estimates and can be used, when necessary, to replace the FAO Penman–Monteith model. The Hargreaves-Samani and Blaney–Criddle methods were less accurate in estimating ET_o.

Keywords: evapotranspiration demand, statistical indices, linear adjustment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_o).....	17
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) e suas respectivas equações.....	15
Tabela 2 – Coeficientes originais e calibrados dos modelos alternativos de ET_o para a região do Cariri, CE.	16
Tabela 3 – Critério de interpretação do coeficiente de confiança.....	17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCAB	Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade
UFCA	Universidade Federal do Cariri
ET _o	Evapotranspiração de referência
FAO	Unidade volumétrica do sensor calibrada
FLONA	Floresta Nacional do Araripe
EM	Erro médio
RMSE	Raiz quadrática do erro médio
T _{med}	Temperatura média
T _{max}	Temperatura máxima
T _{min}	Temperatura mínima
R _g	Radiação solar global
UR	Umidade relativa do ar
V	Velocidade do vento
HS	Hargreaves-Samani
JH	Jensen-Haise
PT	Priestley-Taylor
BC	Blaney-Criddle

LISTA DE SÍMBOLOS

R^2	Coeficiente de determinação
d	Índice de concordância de Willmott
r	Coeficiente de correlação de Pearson
c	Índice de concordância de Camargo e Sentelhas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4. CONCLUSÕES.....	18
5. REFERÊNCIAS.....	19
ANEXO 1 – TRABALHO PUBLICADO EM REVISTA.....	20
ANEXO 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	21
ANEXO 3 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.....	26

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial desperta a necessidade de otimizar os sistemas de produção de alimentos bem como racionalizar os recursos naturais disponíveis. A irrigação desempenha um papel importante na redução de perdas e na maximização da produtividade das culturas, garantindo a seguridade da produção agrícola (Menezes *et al.*, 2024). Com isso, as práticas de gerenciamento hídrico nos cultivos irrigados exigem que as necessidades hídricas das culturas e o volume de água de irrigação sejam estimados com precisão, o que, por sua vez, exige um conhecimento preciso da evapotranspiração das culturas (Paredes *et al.*, 2020). A evapotranspiração de referência (ET_o) é um dos principais fatores que interferem na lâmina de água disponível para a irrigação de regiões áridas e semiáridas, pois estas apresentam grande variabilidade espaço temporal na precipitação, logo é de extrema importância uma correta determinação de ET_o para o melhor planejamento dos recursos hídricos.

A precisão na estimativa da ET_o é indispensável para o manejo de irrigação bem como para o monitoramento do ciclo hidrológico a nível de bacia hidrográfica. Contudo, a disponibilidade de dados climáticos, por vezes limitados, restringe a aplicação do modelo padrão da FAO (Penman-Monteith), sendo necessário a utilização de modelos alternativos de fácil aplicação. O método de Penman-Monteith (FAO) é considerado o mais apropriado internacionalmente por se tratar de um método que utiliza vários parâmetros meteorológicos e pelo seu alto nível de acurácia, porém este fator o limita devido à dificuldade de disponibilidade de todos os parâmetros utilizados na equação (Carvalho *et al.*, 2011). Diante do exposto, objetivou-se calibrar e validar modelos alternativos de estimativa da ET_o para a região do Cariri, CE.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Campus da Universidade Federal do Cariri, situado no município do Crato, CE. A região localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Salgado, no Cariri cearense, e possui a classificação por Köppen de clima tropical – Aw. A área de estudo apresenta características climáticas úmidas, com estações chuvosa e seca bem definidas, com temperaturas anuais variando entre 24°C e 27°C. O município do Crato apresenta uma particularidade climática por se localizar na base da Floresta Nacional do Araripe (FLONA) no extremo-sul do estado. Tais características são intervenientes para que as temperaturas sejam relativamente mais baixas no inverno apesar de apresentar elevadas temperaturas no período seco do ano.

Os dados usados na pesquisa foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática, do modelo HOBO RX3000, instaladas de acordo com as seguintes coordenadas geográficas: 7°14' S e 39°22' W, com altitude de 425 m acima do nível do mar. A série de dados utilizada correspondeu ao período de 2021 a 2023, cujos anos de 2021 e 2022 foram utilizados para a calibração dos parâmetros das modelos alternativos, e os dados referente ao ano de 2023 foram utilizados para validação dos modelos.

As variáveis meteorológicas utilizadas foram temperatura do ar (média, mínima e máxima, em °C); radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹); velocidade do vento (m s⁻¹); precipitação (mm) e umidade relativa do ar (média, mínima e máxima, em %). As equações utilizadas para o cálculo da ETo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e suas respectivas equações

Métodos	Equações de estimativa da ETo	Variáveis de Entrada
Penman-Monteith (PM), Allen et al. (1998)	$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma + \frac{900}{(T + 273)}U_2(ea - es)}{\Delta + \gamma + (1 + 0,34U_2)}$	Tmed, Rg, UR, V
Hargreaves-Samani (HS), Pereira et al. (1997)	$ETo = A R_a (Tmed + 0,17)(Tmax - Tmin)^c$	Tmax, Tmed, Tmin
Priestley-Taylor (PT), (1972)	$ETo = A \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{Rn - G}{\lambda} \right)$	Tmed, Rg
Jensen-Haise (JH), (1963)	$ETo = Rs (A \times Tmed + B)$	Tmed, Rg
Blaney-Criddle (BC), (1977)	$ETo = a + bp(0,457 \times Tmed + 8,13)$	Tmed

Fonte: Autora(2024).

ETo: evapotranspiração de referência (mm d⁻¹); Tmax, Tmin, Tmed representam temperatura máxima, mínima, média, respectivamente a (°C); Rg: radiação solar global (MJ m⁻² d⁻¹); Rn: saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); V: velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); UR: umidade relativa (%); Δ: tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C⁻¹); γ: constante psicrométrica (0,0662 kPa °C⁻¹); ea: pressão de vapor do ar (kPa °C⁻¹); es: pressão de saturação à temperatura da superfície (kPa °C⁻¹); Ra: radiação extraterrestre (mm d⁻¹); G: densidade de fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹), considerada zero para estimar de ETo diária.

A calibração dos coeficientes empíricos A, B e C dos métodos alternativos em relação ao método padrão foi realizada de acordo com metodologia descrita por Wraith e Or (1998), a partir do Microsoft Excel®, por meio do ajuste de equação não linear usando o aplicativo SOLVER. Quanto a validação da calibração, essa foi realizada por meio indicadores estatísticos como o coeficiente de determinação (R²); o erro médio (EM) e a raiz do quadrado do erro médio quadrático (RMSE), dados pelas equações 1 e 2; o coeficiente de correlação de Pearson (r), o índice de exatidão de Willmont (d) descrito pela equação 3, e o índice de desempenho ou concordância (c) descrito por Camargo e Sentelhas (1997), dado pela equação 4.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (2)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{y}| + |O_i - \bar{y}|)^2} \right] \quad (3)$$

$$C = r * d \quad (4)$$

Em que: n = número de observações, O_i = é o valor estimado pelo modelo padrão; P_i = é o valor estimado pelos modelos alternativos; $\bar{y}$ = média dos valores estimados pelo modelo padrão; r = coeficiente de correlação; d = índice de Willmont. O índice de concordância de Camargo e Sentelhas (c) pode ser interpretado de acordo com a Tabela 2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão descritos os coeficientes originais das equações utilizadas nesse estudo, bem como os coeficientes após o processo de calibração. Observa-se que todos os coeficientes apresentaram modificação em relação ao seu valor original. Tal mudança de valor equivale ao ajuste para melhor estimativa dos valores de ETo.

Tabela 2- Coeficientes originais e calibrados dos modelos alternativos de ETo para a região do Cariri, CE.

Métodos	Coeficientes			
	Originais		Ajustados	
	A	B	A	B
Hargreaves-Samani (HS)	0,0023	0,5012	0,001	0,678
Jensen-Haise (JH)	0,0250	0,0803	0,015	0,146
Priestley-Taylor (PT)	1,2661	-	1,182	-
Blaney-Criddle (BC)	0,4571	8,1314	0,479	9,337

Fonte: Autora(2024).

Após a calibração os modelos apresentaram boas estimativas de ETo. Os modelos alternativos de JH e PT foram os que apresentaram melhores resultados, com desempenho classificado como ótimo, apresentando r de 0,960 e 0,899, respectivamente (Tabela 3). Ambos os modelos obtiveram o índice de d de 0,98 e 0,97 com medidas de erro representando uma superestimava em relação ao modelo padrão de PM-FAO, variando entre 0,24 e 0,29 mm dia⁻¹

(RMSE) (Tabela 3). Se tratando do EM, o modelo de JH tendeu a superestimar em 0,12 mm dia⁻¹ o método de PM-FAO, já o modelo de PT apresentou tendência a subestimar, segundo Celestin *et al.* (2020) métodos baseados em radiação solar apresentam tendência de subestimar o modelo de PM. Os resultados aqui discutidos estão descritos na Tabela 3.

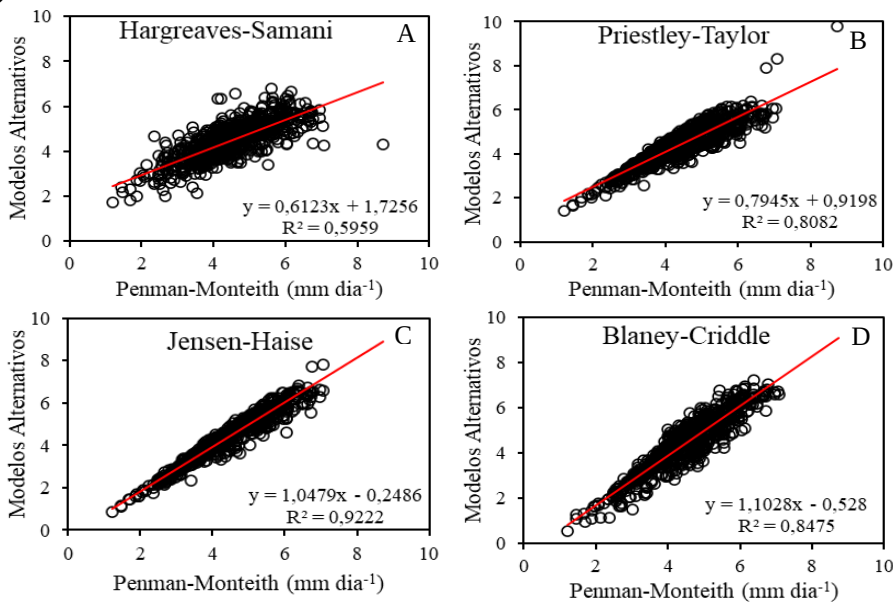
Tabela 3 - Critério de interpretação do coeficiente de confiança

Métodos	Índices				Erro (mm d ⁻¹)	
	r	d	c	Desempenho	RMSE	EM
Hargreaves-Samani (HS)	0,772	0,817	0,631	Mediano	0,876	-0,602
Jensen-Haise (JH)	0,960	0,986	0,947	Ótimo	0,242	0,115
Priestley-Taylor (PT)	0,899	0,979	0,880	Ótimo	0,299	-0,001
Blaney-Criddle (BC)	0,921	0,932	0,858	Muito bom	0,534	-0,294

Fonte: Autora(2024).

Em contraste, os métodos HS e BC foram os que mais se distanciaram do método padrão, tendo o desempenho classificado como mediano e muito bom, respectivamente, onde HS apresentou valores de *r* 0,772 e BC de 0,921 (Tabela 3). Esses modelos alcançaram o índice *d* de 0,817 e 0,932 e suas medidas de erro representaram subestimativa quando comparados ao método padrão de PM-FAO, com variações de 0,876 e 0,534 mm dia⁻¹ (RMSE) (Tabela 3). Estes métodos por utilizarem somente a temperatura do ar como variável independente apresentam menor capacidade de ajuste, sendo considerados menos eficientes (Sales *et al.*, 2018). As representações gráficas dos resultados demonstrados na Tabela 3 estão contidas na Figura 2.

Figura 1 - Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados pelo método padrão da FAO Penman Monteith em relação aos modelos ajustados de Hargreaves e Samani (A), Priestley e Taylor (B), Jensen-Haise (C) Blaney-Criddle (D).



Fonte: Autora(2024).

De acordo com a análise de regressão, assim como constatado anteriormente, os modelos de JH e PT apresentaram boa precisão na estimativa de ETo, com R^2 0,92 e 0,81 para ambos os métodos, respectivamente (Figura 2). Nota-se que, para os modelos de JH e PT, a distribuição dos pontos ao redor da linha de tendência apresentou baixa variação, quando comparado aos modelos de HS e BC, os quais por outro lado, apresentaram menor desempenho na estimativa de ETo, com valores de R^2 de 0,59 e 0,84 respectivamente, sendo possível ver maiores variações na distribuição dos seus pontos ao redor da linha de tendência.

4. CONCLUSÕES

O processo de calibração dos modelos alternativos de estimativa da ETo possibilitou medidas mais precisas para a região do cariri cearense. Os modelos ajustados de Jensen-Haise e Priestley e Taylor apresentaram estimativas mais precisas e exatas, podendo ser utilizados, quando necessário, em substituição ao modelo da FAO Penman Monteith. Os métodos de Hargreaves e Samani e Blaney-Criddle foram menos precisos na estimativa de ETo por usarem somente a temperatura como variável independente.

5. REFERÊNCIAS

- 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**, Serra Talhada, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, L. G. D.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 456-465, 2011.
- CELESTIN, S.; QI, F.; LI, R.; YU, T.; CHENG, W. Evaluation of 32 simple equations against the Penman–Monteith method to estimate the reference evapotranspiration in the Hexi corridor, Northwest China. **Water**, Basel, v. 12, n. 10, article 2772, p. 1-22, 2020.
- MENEZES, S. M.; SILVA, G. F.; SILVA, M. M.; MORAIS, J. E. F.; VASCONCELOS, M. C.; SOUZA, C. S.; ROLIM, M. M. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. **BioEnergy Research**, New York, v. 17, n. 3, p. 1413-1424, 2024.
- PAREDES, P.; PEREIRA, L. S.; ALMOROX, J.; DAROUICH, H. Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves-Samani equation using local climatic variables. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 240, article 106210, p. 1-23, 2020.
- SALES, R. A.; OLIVEIRA, E. C.; LIMA, M. J. A.; GELCER, E. M.; SANTOS, R. A.; LIMA, C. F. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 154-167, 2018.
- WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear Parameter Estimation Using Spreadsheet Software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 27, n. 1, p. 13-19, 1998.

ANEXO 1 – TRABALHO PUBLICADO EM REVISTA

<https://doi.org/10.15809/irriga.2024v29p149-154>

Irriga, Botucatu, v. 29, p. 149-154, janeiro-dezembro, 2024

149

Edição especial – VI Winotec

ISSN 1808-8546 (ONLINE) 1808-3765 (CD-ROM)

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO CARIRI, CE:
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS ALTERNATIVOS**

**ANA ALICE CARDOSO CARNEIRO¹; ANA CÉLIA MAIA MEIRELES²; CARLOS
WAGNER OLIVEIRA²; ANTÔNIA RAQUEL DE MORAIS ALCÂNTARA¹;
EVERTON ALENCAR PATRÍCIO¹ E JOSÉ BANDEIRA BRASIL³**

¹ Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil, ana.carneiro@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0008-0964-9873>, evertton.alencar@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0001-8625-9739>, raquel.moraes@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0007-1991-8785>

² Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil, carlos.oliveira@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-1013-297>, ana.meireles@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-8860-2043>

³ Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável (PRODER), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-02, Crato, Ceará, Brasil, josebbrasil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4335-7838>

1 RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma variável meteorológica fundamental para planejamento hidrológico e agroclimático de uma região. Assim, esse trabalho teve por objetivo calibrar e validar modelos alternativos para o cálculo da evapotranspiração de referência na região do Cariri cearense. Para tanto, foi utilizado um período de 3 anos (2021 a 2023), sendo dois anos para calibração e um ano para validação dos coeficientes obtidos. O método da FAO (Penman-Monteith) foi usado como padrão de comparação para os métodos: Hargreaves e Samani, Priestley e Taylor, Jensen-Haise e Blaney-Criddle. O desempenho dos métodos foi analisado por meio de indicadores estatísticos, sendo estes: coeficiente de determinação, erro médio, raiz quadrada do erro quadrado médio, coeficiente de correlação de Pearson, índice de exatidão de Willmont e o índice de exatidão descrito por Camargo e Sentelhas. A calibração dos modelos alternativos de estimativa da ET_o para a região do cariri cearense possibilitou medidas mais precisas. Os modelos ajustados de Jensen-Haise e Priestley e Taylor apresentaram estimativas mais precisas e exatas, podendo ser utilizados, quando necessário, em substituição ao modelo da FAO Penman Montheith. Os métodos de Hargreaves e Samani e Blaney-Criddle foram menos precisos na estimativa de ET_o.

Palavras-chave: demanda evapotranspiratória, índices estatísticos, ajuste linear.

**CARNEIRO, A. A. C.; MEIRELES, A. C. M.; OLIVEIRA, C.W.; ALCÂNTARA, A. R.
M.; PATRÍCIO, E. A.; BRASIL, J. B.
REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR THE CARIRI REGION, CE:
CALIBRATION AND VALIDATION OF ALTERNATIVE MODELS**

Recebido em 03/12/2024 e aprovado para publicação em 12/12/2024
DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2024v29p149-154>

ANEXO 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

1. Contexto geral

O cenário de constantes mudanças climáticas e intensificação de fenômenos naturais tem alterado o fornecimento e a demanda de água nas mais diversas regiões do mundo (Zareian, 2021; Liu *et al.*, 2025). Esses fenômenos são intensificados nas regiões semiáridas, como no caso do Nordeste brasileiro que é afetado naturalmente com longos períodos de seca, altas temperaturas, baixa disponibilidade de água e altas taxas de evapotranspiração, condições que limitam a produção agrícola da região (Corte *et al.*, 2020). Uma gestão hídrica eficiente é o ponto chave para minimizar os riscos associados a vulnerabilidade das atividades agrícolas aos fenômenos de mudanças climáticas. Segundo o estudo de Menezes *et al.*, (2024) é necessário adaptação dos sistemas de produção além de técnicas que busquem aumentar a eficiência na utilização da água no cenário atual.

A gestão dos recursos hídricos contempla uma série de fatores, sendo a evapotranspiração de referência (ET_o) a variável destaque para quantificar o consumo hídrico, seja do ambiente ou das culturas. A medida que os recursos naturais tornam-se escassos as estimativas de ET_o precisam ser cada vez mais precisas e aplicáveis nas mais diversas situações, desempenhando papel fundamental no planejamento e gerenciamento hídrico (Paredes *et al.*, 2020). Segundo Silva *et al.*, (2023) um manejo agrícola eficiente necessita de uma determinação real da necessidade de consumo hídrico da cultura durante seu ciclo produtivo, sendo necessário para essa determinação o conhecimento da evapotranspiração da cultura (ET_c). Existem diferentes métodos para cálculo da ET_o e da ET_c, podendo ser de forma direta com uso de equipamentos ou indireta através de modelos matemáticos.

O método padrão para o cálculo da ET_o é Penman-Monteith em decorrência da sua aplicação em diversos lugares e em diferentes escalas de tempo, entretanto esse método requer muitas variáveis climatológicas que na maioria das vezes não estão disponíveis para acesso livre, tornando a aplicação desse método limitada (Menezes *et al.*, 2024). Em respostas as dificuldades de uso da equação padrão surgiram métodos matemáticos alternativos que utilizam menos variáveis climatológicas nos cálculos, sendo mais fáceis de trabalhar. A ET_c pode ser calculada através do cálculo que leva em consideração o coeficiente de cultivo (K_c) e a ET_o do lugar de estudo, como também pode ser obtida de forma direta e precisa com o uso de lisímetros que disponibilizam valores mais reais e representativos do estado da planta (Pereira *et al.*, 2021 e Menezes *et al.*, 2024).

Diversas variáveis devem ser consideradas para a implantação de um sistema de irrigação em uma determinada área, sendo indispensável a realização de estudos prévios antes de sua

implementação em campo (Bernardo et al., 2019). Dentre essas variáveis, a evapotranspiração de referência (ET_o), a evapotranspiração da cultura (ET_c) e o coeficiente da cultura (K_c) destacam-se como os parâmetros mais relevantes e amplamente utilizados no dimensionamento e manejo de projetos de irrigação (Doorenbos; Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). A determinação desses parâmetros depende de variáveis meteorológicas, bem como das características da cultura e do solo, podendo ser realizada por métodos diretos, como a lisimetria, ou por métodos indiretos, baseados no uso de equações empíricas e métodos combinados (Aboukhaled et al., 1982; Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2007).

2. Determinação da evapotranspiração(ET_o)

O estudo de Gong et al. (2024) define a evapotranspiração como o processo pelo qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera na forma de vapor, resultante da evaporação do solo e da transpiração das plantas. A evapotranspiração também desempenha papel fundamental no ciclo hidrológico e no balanço de energia da superfície terrestre (Fisher et al., 2017). Os valores de evapotranspiração são influenciados pela fertilidade do solo, pelo estado fitossanitário da cultura e pelas condições meteorológicas, tais como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (Allen et al., 1998). A precipitação e a irrigação também exercem influência sobre a ET, uma vez que, logo após esses eventos, ocorre incremento da evaporação, resultando no aumento da taxa de evapotranspiração (Jensen et al., 1990; Gong et al., 2024).

Inicialmente, o termo que atualmente se refere à evapotranspiração de referência (ET_o) surgiu como evapotranspiração potencial e foi definido por Thornthwaite (1948) como a perda de água de uma superfície totalmente coberta por vegetação em fase de crescimento ativo, sob condições ideais de funcionamento e sem restrição hídrica. Posteriormente, Penman (1956) a definiu como a quantidade de água perdida para a atmosfera, por unidade de tempo, a partir de uma superfície coberta e em plenas condições de funcionamento. Quando se trata do consumo hídrico das culturas, torna-se necessário trabalhar com a ET_o, pois, a partir de sua estimativa, é possível estabelecer o coeficiente de cultura (K_c) da cultura de interesse e, pela multiplicação desses parâmetros, obter a evapotranspiração da cultura (ET_c), possibilitando um manejo de irrigação mais eficiente e adequado (Allen et al., 2005). Ressalta-se que cada região apresenta características climáticas específicas, o que torna necessária a utilização de dados meteorológicos representativos das condições locais.

Existem diferentes modelos matemáticos usados para o cálculo da ET_o, sendo o método de Penman-Monteith o recomendado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO. Apesar de ser o método recomendado por sua capacidade de aplicação em

diversas regiões o grande número de variáveis de entrada, sendo estas, temperatura mínima e máxima do ar, radiação solar, umidade do ar e velocidade do vento limitam seu uso em regiões com dados climáticos limitados (Paredes, et al., 2020; Pereira et al., 2020; Gong et al., 2024). Como alternativa para a determinação da ET o sugiram modelos alternativos que necessitam de menos variáveis climáticas e com cálculos mais simples. Os modelos matemáticos mais simples divididos em três classes principais segundo as suas variáveis de entrada: classe baseada na temperatura do ar, classe baseada na radiação solar e por último a classe baseada na transferência de massa (Menezes et al., 2024).

O estudo de França et al. (2021) relata que existem mais de 50 modelos empíricos para o cálculo da ETo em decorrência da especificidade requerida por cada região, mas apesar da diversidade de métodos ainda se enfrenta problemas de precisão nas estimativas devido à falta de calibração das equações para cada região. Segundo Allen et al. (1998) quando não há possibilidade de uso do método padrão de Penman-Monteith é recomendado o uso do método de Hargreaves-Samani (1985) pois essa equação pede como variáveis de entradas temperatura mínima, média e máxima e a radiação solar no topo da atmosfera que pode ser obtida através de tabelas que levam em consideração a latitude local ao longo dos meses do ano.

Para regiões áridas e semiáridas os modelos empíricos de Jensen-Haise (1963) e de Blaney-Criddle (1977) funcionam de forma mais adequada uma vez que os mesmos foram desenvolvidos para estimativas nessas condições. O método de Jensen-Haise (1963) utiliza apenas a temperatura do ar e radiação solar como variáveis de entrada para o cálculo da ETo, tornando essa equação de fácil utilização (Pereira; Villa Nova; Sedyama, 1997). Por outro lado a equação de Blaney-Criddle (1977) usa menos variáveis de entrada quando comparada com o método padrão da FAO, mas em alguns contextos é necessário um fator de correção que leva em consideração umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar, para seja possível o seu uso (Smith et al., 1996). A equação de Priestley-Taylor (1972) usa a radiação solar como variável de entrada principal mas que necessita de calibração para o uso em regiões áridas e semiáridas, o que a depender da disponibilidade de dados limita a sua aplicação.

3. Referências

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. Lysimeters. Rome: FAO, 1982. (**FAO Irrigation and Drainage Paper, 39**).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (**FAO Irrigation and Drainage Paper, 56**).
- ALLEN, R. G.; WALTER, I. A.; ELLIOT, R. L.; HOWELL, T. A.; ITENFISU, D.; JENSEN, M. E.; SNYDER, R. L. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Reston, VA: **American Society of Civil Engineers**, 2005.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. Manual de irrigação. 9. ed. Viçosa, MG: **Editora UFV**, 2019.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1977. (**FAO Irrigation and Drainage Paper, 24**).
- FISHER, J.B., MELTON, F., MIDDLETON, E., HAIN, C., ANDERSON, M., ALLEN, R., WOOD, E.F. The future of ET: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resour. Res.** V. 53, n. 4, p. 2618–2626, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- FRANÇA, M. V.; MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M.; SABOYA, L. M. F.; ROLIM NETO, F. C.; ARAÚJO, W. R. Analysis of evapotranspiration estimation by different models for Amparo de São Francisco – Sergipe. **Research, Society and Development**, v.10, n.13, p.e514101321505, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i13.21505.
- GONG, Z., GAO, F., CHANG, X., HU, T., & LI, Y. A review of interactions between irrigation and evapotranspiration. **Ecological Indicators**, v.169, p. 112870, 2024.
- JENSEN. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. **Manuals and reports on engineering practice**, v. 70, p. 25-41, 1990.
- LIU, Z., JIANG, D., YAN, D., HAO, M., & ZHANG, X. Assessing evapotranspiration and single crop coefficients of common crops by eddy covariance measurement at multi-sites. **European Journal of Agronomy**, v. 170, p. 127762, 2025.
- MENEZES, S. M., DA SILVA, G. F., DA SILVA, M. M., DE MORAIS, J. E. F., DE VASCONCELOS, M. C., DE SOUZA, C. S., ... & ROLIM, M. M. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 3, p.1413-1424, 2024.
- PAREDES, P., PEREIRA, L. S., ALMOROX, J., & DAROUICH, H. Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves-Samani equation using local climatic variables. **Agricultural Water Management**, v. 240, p. 106210, 2020.
- PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 9-29, 1956.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Agropecuária**, 2007.

PEREIRA, L.S., PAREDES, P., HUNSAKER, D.J., LÓPEZ-URREA, R., MOHAMMADI SHAD, Z., 2021. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. **Agricultural Water Management**, v. 243, n.10, p.106466, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>

PEREIRA, L.S., PAREDES, P., JOVANOVIĆ, N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, v.241, n.6, p. 106357, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>

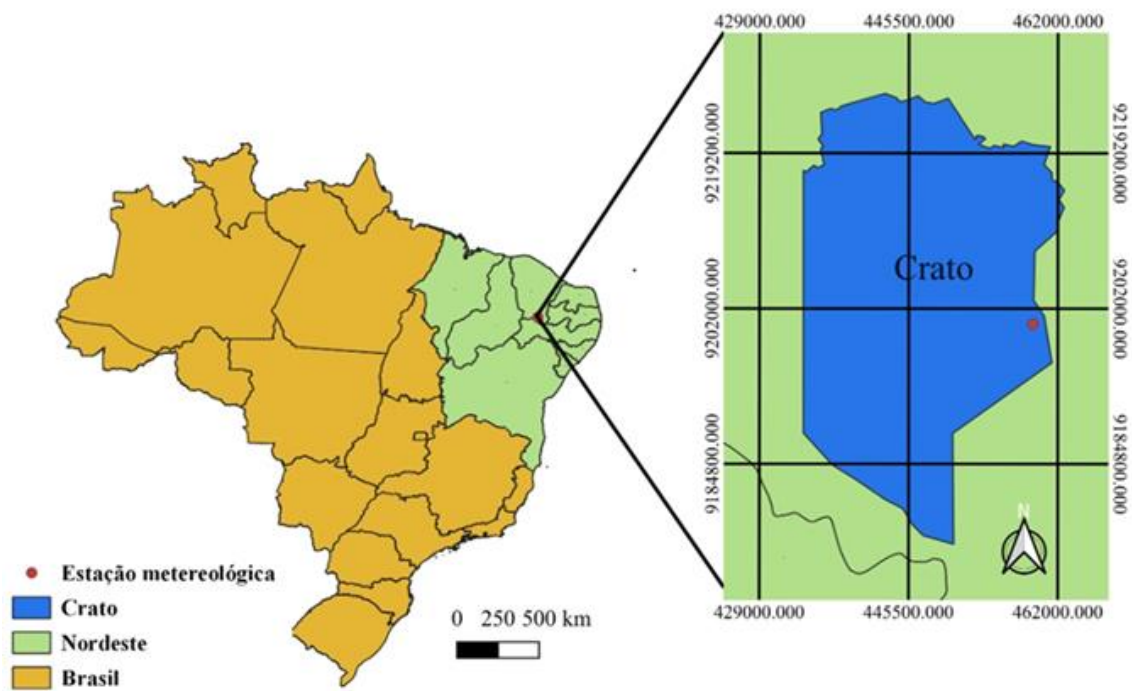
SILVA, T.G.F., MEDEIROS, R.S., ARRAES, F.D.D., RAMOS, C.M.C., ARAÚJO JÚNIOR, G.N., JARDIM, A.M.R.F., ALVES, C.P., CAMPOS, F.S., SILVA, M.V., MORAIS, J.E.F., SOUZA, C.A.A., SIQUEIRA, S.M., SANTOS, D.C., CARVALHO, A.A., SOUZA, L.S.B., Cactus–sorghum intercropping combined with management interventions of planting density, row orientation and nitrogen fertilisation can optimise water use in dry regions. **Science of The Total Environment**, v.895, n.6, p. 165102, 2023.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165102>

SMITH, M.; ALLEN, R.; PEREIRA, P. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION SCHEDULING, San Antonio. **American Society of Agricultural Engineers**, p. 116-123, 1996.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

ZAREIAN, M. J. Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin, Iran). **Journal of hydro-environment research**, v.35, p.13-30, 2021.

ANEXO 3 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA



Fonte: Autora (2024).

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.



Documento assinado digitalmente
ANA CELIA MEIRELES OLIVEIRA
Data: 13/02/2026 15:37:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Data e local da assinatura eletrônica