



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Lisimetria de drenagem e ajuste de modelos matemáticos na determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo do pepino

Sirleide Maria de Menezes¹, Antonio Gebson Pinheiro¹, Dayane Farias Lima¹, Laylton de Albuquerque Santos², Cinara Bernardo da Silva³, Daniella Pereira dos Santos¹, Márcio Aurélio Lins dos Santos⁴, Thieres George Freire da Silva⁵

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, PE, Brasil. CEP: 52.171-900. E-mails: sirleidemeneses@hotmail.com (Autor Correspondente); gebson10@hotmail.com; dayanefarias17@yahoo.com; daniellapsantoss@hotmail.com.

² Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG, Brasil. CEP: 36.570-900. E-mail: layltonalbuquerque@gmail.com.

³ Departamento de Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, Alagoas. Av. Manoel Severino Barbosa, Bom Sucesso, Arapiraca, AL, Brasil. CEP: 57.309-005. E-mail: cinara_cbs@hotmail.com.

⁴ Professor Associado IV, Campus Arapiraca, Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, Alagoas. Av. Manoel Severino Barbosa, Bom Sucesso, Arapiraca, AL, Brasil. CEP: 57.309-005. E-mail: mal.santo@hotmail.com.

⁵ Professor Associado II, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, Pernambuco. Fazenda Saco, s/n, Serra Talhada, PE, Brasil. CEP: 56.900-000. E-mail: thieres_freire@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 28/09/2023 e aceito em 09/03/2024

RESUMO

Gerir adequadamente água na agricultura irrigada é o principal meio para garantir a sustentabilidade e a qualidade dos produtos nos sistemas de cultivos irrigados. Conhecer a real demanda hídrica das culturas é fundamental para o manejo eficiente da irrigação e para o avanço da agricultura intensiva e sustentável. Desse modo, objetivou-se determinar a ET_c por lisimetria de drenagem, calibrar e validar modelos matemáticos de estimativa da ET_o, e determinar o K_c do pepino para as condições do Agreste alagoano. O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, AL, durante o período de março a maio de 2015. Realizou-se a calibração e a validação dos modelos matemáticos de estimativa da ET_o de Hargreaves e Samani, Priestley e Taylor, Makkink e Jensen-Haise, utilizando o modelo Penman-Monteith como referência. A ET_c foi obtida diariamente por meio do balanço hídrico de lisímetros de drenagem, e o K_c foi estimado pela relação entre a ET_c e a ET_o obtida pelos diferentes modelos matemáticos. O ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da ET_o, proporcionou ótimo desempenho e boa precisão para todos os modelos avaliados. O modelo ajustado de Jensen-Haise apresentou o melhor desempenho e maior exatidão, podendo ser recomendado para a região. A ET_c acumulada durante o ciclo de cultivo do pepino foi de 239,5 mm, com média de 4,7 mm dia⁻¹. O K_c, obtido pelo método de estimativa da ET_o de Penman-Monteith foi de 0,90; 1,08; 1,17 e 1,05 respectivamente, para as fases I, II, III e IV.

Palavras-chave: Consumo hídrico, manejo de irrigação, *Cucumis sativus* L.

Drainage lysimeter and adjustment of mathematical models in determining evapotranspiration and cucumber cultivation coefficient

ABSTRACT

Properly managing water in irrigated agriculture is the main means of ensuring the sustainability and quality of products in irrigated cropping systems. Knowing the real water demand of crops is essential for efficient irrigation management and the advancement of intensive and sustainable agriculture. Thus, the objective was to determine the ET_c by drainage lysimeter, calibrate and validate mathematical models for estimating the ET_o, and determine the K_c of the cucumber for the conditions of the Alagoas Agreste. The experiment was conducted at the Federal University of Alagoas, Arapiraca, AL, during the period from March to May 2015. Calibration and validation of the mathematical models for estimating ET_o by Hargreaves and Samani, Priestley and Taylor, Makkink and Jensen-Haise, using the Penman-Monteith model as a reference. ET_c was obtained daily through the water balance of drainage lysimeters, and K_c was estimated by the relationship between ET_c and ET_o obtained by different mathematical models. The adjustment of the coefficients of the ET_o estimation equations provided excellent performance and good precision for all models evaluated. The adjusted Jensen-Haise model presented the best performance and highest accuracy and can be recommended for the region. The ET_c accumulated during the cucumber cultivation cycle was 239.5 mm, with an average of 4.7 mm dia⁻¹. The K_c, obtained by the Penman-Monteith ET_o estimation method, was 0.90; 1.08; 1.17 and 1.05 respectively, for phases I, II, III and IV.

* E-mail para correspondência:

sirleidenenes@hotmail.com (Menezes, S.M.).

Introdução

A intensificação dos eventos associados as mudanças climáticas, como a ocorrência de longos períodos de estiagem e secas intensas, levam à insuficiência hídrica nos cultivos agrícolas, limitando o desenvolvimento e a gestão de uma agricultura intensiva e sustentável em diversas regiões do mundo. As alterações no clima são uma ameaça iminente à segurança alimentar global, devido aos seus impactos negativos no ambiente, na produção agrícola e na pecuária (Zareian, 2021; Lira et al., 2022). Nesse contexto, minimizar a vulnerabilidade da agricultura às mudanças climáticas e, consequentemente, diminuir os riscos associados à segurança alimentar requer uma gestão hídrica integrada e sustentável (Pereira et al., 2021; Raza et al., 2021), o que sugere a adaptação dos sistemas de cultivos e das práticas de manejo empregadas, para aumentar a eficiência do uso da água e dos insumos agrícolas (Zhang et al., 2023; Menezes et al., 2024).

A otimização do uso da água na agricultura irrigada assume alta relevância na expansão da produção agrícola. Desse modo, o uso da irrigação destaca-se como estratégia fundamental para aumentar a produtividade das culturas e dar estabilidade socioeconômica aos sistemas de cultivos (Alves et al., 2022). Contudo, há a necessidade do uso racional dos recursos hídricos, visando aumentar a quantidade e a qualidade dos produtos, bem como garantir a sustentabilidade das áreas irrigadas (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 das culturas (ETc), também conhecida como demanda de água pelas culturas, é um fator vital nos sistemas hidrológicos, na agricultura, na produção vegetal, na ciência climática, nas avaliações ambientais e nas suas interações (Mohammed e Irmak, 2022). Conhecer a demanda de água pelas plantas (i. e. sua evapotranspiração - ET) é fundamental para contribuir com a gestão hídrica dos sistemas de produção agrícola (Silva et al., 2023), bem como para o entendimento sobre o uso da água pelas plantas, na programação da irrigação, na produção das culturas e na conservação da água (Çakir et al., 2017; Awal et al., 2020; Pereira et al., 2020).

A ETc pode ser estimada por meio do cálculo da evapotranspiração de referência (ETo), multiplicada pelo coeficiente de cultivo (Kc) apropriado para cada cultura. Contudo, a ETc também pode ser obtida pela técnica de lisimetria, que é um método direto e que permite a contabilização dos termos do balanço hídrico de forma precisa, possibilitando uma estimativa confiável da real necessidade das plantas (Allen et al., 1991; Alves et al., 2018; Pereira et al., 2021). De acordo com Celestin et al. (2020), o método lisimétrico é uma das técnicas micrometeorológicas utilizadas para medir valores de evapotranspiração *in situ* e é frequentemente considerado o único método para a obtenção de estimativas precisas. A ETo (mm dia^{-1}) é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência (grama), que é assumida como uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, uma resistência superficial de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23 muito parecido com uma extensa superfície de grama verde de altura uniforme, crescendo ativamente, com necessidade hídrica adequadamente suprida e sombreando completamente o solo (Allen et al., 1998).

A ETo é determinada preferencialmente pelo modelo combinado de Penman-Monteith (PM), parametrizado pela Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, por sua capacidade ser utilizado em diversas regiões e em diferentes escalas de tempo (Pereira et al., 2020). O método de Penman-Monteith requer um grande número de variáveis climatológicas que nem sempre estão disponíveis, o que torna a sua aplicação limitada (Gurski et al., 2018). Alternativamente, modelos que requerem poucas variáveis climatológicas, possuem um procedimento de cálculo simples e que forneçam estimativas confiáveis e consistentes, são uma opção viável para estimar ETo (Paredes et al., 2020).

Segundo Hadria et al. (2021), A disponibilidade espaço-temporal e a representatividade dos dados climatológicos requeridos é um fator determinante e fundamental na escolha do modelo a ser usado. Os autores relatam ainda que há uma infinidade de métodos empíricos mais simples e mais adaptados para uso prático, que foram desenvolvidos para estimar a ETo a partir de um número mínimo de variáveis climáticas. Em geral, esses modelos são agrupados

em três classes de estimativas: (i) baseadas na temperatura do ar, (ii) baseadas na radiação e (iii) baseadas na transferência de massa. No entanto, a calibração local de tais modelos em relação ao modelo padrão de Penman-Monteith é necessária para garantir a precisão e a exatidão das medições. Embora nem todos os modelos sejam aplicáveis de forma síncrona em todas as diferentes regiões, a calibração local é de fato aplicada para reparametrizar e ajustar o modelo às condições climáticas locais (Gafurov et al., 2018; Celestin et al., 2020).

Em relação ao coeficiente de cultivo (K_c), sabe-se que este é um parâmetro diretamente relacionado com as fases fenológicas e fisiológicas das culturas e suas respectivas demandas hídricas, correlacionando-as com a ETo , que, por sua vez, estão estritamente relacionadas às condições edafoclimáticas locais de cultivo (Alves et al., 2018). De acordo com Pereira et al. (2020a), o K_c representa as diferenças integradas entre a cultura considerada e a cultura de referência, em três características primárias: altura do corte (afetando rugosidade e resistência aerodinâmica); resistência da superfície do solo à cultura (relacionada à área foliar, fração do solo coberto por vegetação, idade e condição da folha, grau de controle estomático e umidade da superfície do solo); e albedo da superfície do solo-cultura (influenciado pela fração de solo coberto por vegetação e umidade superficial do solo). O K_c padronizado pela FAO é, geralmente, considerado transferível entre regiões e climas sob a suposição de que a ETo é responsável por quase todas as variações causadas pelo tempo e pelo clima, sendo que o K_c representa uma fração relativa da ETo que é governada pela quantidade, tipo e condição da vegetação quando cultivada em condições normais sem nenhum tipo de limitação (Pereira et al., 2020b). Contudo, a variação do clima, as diferentes condições de cultivo e principalmente as características intrínsecas de cada cultura, tornam necessário a determinação do K_c em condições locais, afim de representar a real necessidade hídrica das plantas.

O pepino (*Cucumis sativus* L.) é uma hortaliça-fruto muito apreciada em diversos países, podendo ser consumido imaturo, em forma de saladas ou em conservas ácidas (pickles). Apresenta alto valor nutricional para a alimentação humana, e destaca-se também como matéria prima na indústria farmacêutica e na produção de cosméticos (Filho et al., 2012; Mugwanya et al., 2023). De acordo com a FAOSTAT (2022), nos últimos 10 anos, a área cultivada com pepino não apresentou expansão significativa, sendo de aproximadamente 2 milhões de hectare, contudo, a produção mundial

de pepino passou de 67 milhões de toneladas para 93 milhões de toneladas, (i.e., incremento de 38,8%). A China é o maior produtor mundial, produzindo cerca de 56 milhões de toneladas ano⁻¹ (Liu et al., 2021), já o Brasil produz cerca de 200 mil toneladas ano⁻¹, sendo a região Nordeste responsável por aproximadamente 13% desse total (Carvalho et al., 2013; Pilon et al., 2018).

Assim como a maioria das hortaliças, o pepino é sensível a variação do teor de umidade no solo. Apesar da planta adaptar-se bem às estações quentes, é altamente dependente da disponibilidade de água no solo (Hossain et al., 2018; Liu et al., 2021). Para atingir altos rendimentos produtivos, bem como alta qualidade na produção de pepino, é necessário garantir o suprimento hídrico adequado das plantas. Dessa forma, conhecer o consumo de água pelas plantas nas diferentes fases fenológicas é fundamental para uma gestão hídrica eficiente e sustentável das áreas irrigadas e ainda garantir ganhos em qualidade e quantidade. Para isso, a calibração de modelos matemáticos simplificados para a estimativa da ETo nas condições climáticas locais, bem como a determinação da ET_c de forma direta por lisimetria de drenagem, contribuem efetivamente para o manejo de irrigação e para a racionalização dos recursos hídricos.

Nesse contexto, buscando a otimização do uso dos recursos hídricos em detrimento ao manejo de irrigação eficiente e ao desenvolvimento sustentável das práticas agrícolas, objetivou-se determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c) por meio de lisímetros de drenagem, calibrar e validar modelos matemáticos alternativos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), e determinar do coeficiente de cultivo (K_c) do pepino para as condições edafoclimáticas do Agreste de Alagoas.

Material e métodos

Descrição da área experimental

Realizou-se um experimento de campo na área experimental do Grupo Irriga (grupo de pesquisa em manejo de irrigação), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), na cidade de Arapiraca, AL (coordenadas geográficas: 9°45'58" S, 35°38'58" O e altitude de 325 m), durante o período de março a maio de 2015. O município fica localizado na metade oriental do estado, cujo clima é classificado como 'As' tropical com estação seca de verão, segundo critérios de classificação de Köppen (Alvares et al., 2013).

A região apresenta estação chuvosa durante o outono/inverno, iniciando no mês de maio e se estendendo até agosto, sendo os meses de

maio a julho os mais chuvosos e os meses de setembro a dezembro os mais secos, com precipitação média anual de 1000 a 1500 mm (Barros et al., 2019). Os dados diários de temperatura e umidade relativa do ar, referente ao período de condução do experimento, estão apresentados na Figura 1. O

valor médio registrado durante o período para temperatura máxima e mínima foi de 31,5 e 20,9 °C, respectivamente. A média para a umidade relativa do ar máxima e mínima foi de 91,6 e 39,3% respectivamente.

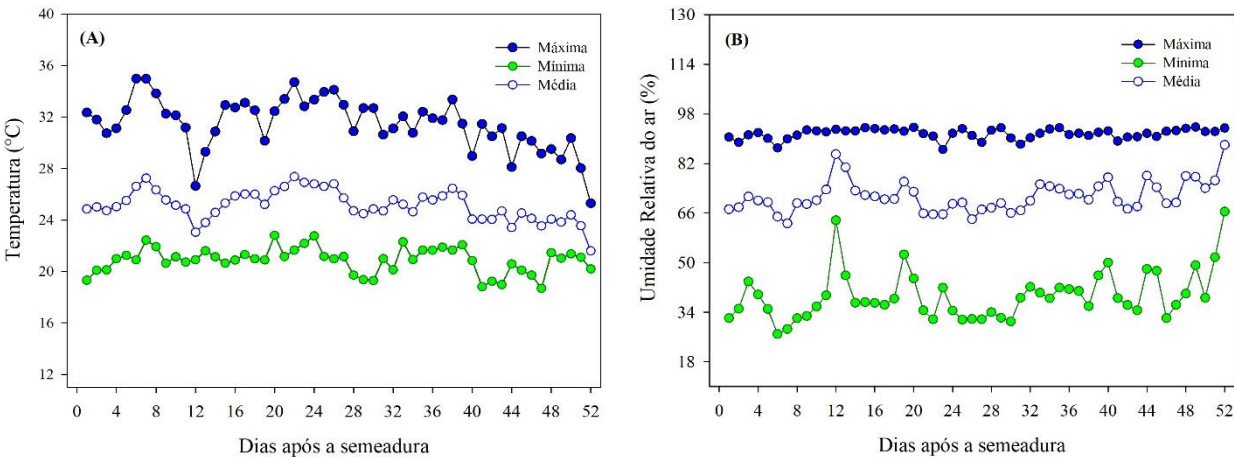


Figura 1. Temperatura máxima, mínima e média (A) e umidade relativa do ar máxima mínima e média (B), registrada durante o ciclo fenológico do pepino em condições de campo. Arapiraca, AL.

O solo utilizado no experimento é classificado como Latossolo Amarelo Vermelho Distrófico de textura média a argilosa (Embrapa,

2018). A caracterização físico-química do solo da área experimental encontra-se na **Tabela 1**.

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental

Camada	Características Químicas do solo						
	pH	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	H ⁺ +Al ⁺³
m	H ₂ O	-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol _c kg ⁻¹ -----		
0 – 0,20	5,3	7,0	10,0	0,7	0,5	0,09	3,5
							0,57
Camada	Características Físicas do solo						
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Ds	θ _{CC}	θ _{PMP}
m	----- % -----				kg dm ⁻³	----- % -----	
0 - 0.20	24,3	29,0	30,2	16,6	1,48	7,8	4,1

M.O: Matéria Orgânica; Ds: Densidade do Solo; θ: Umidade volumétrica.

Implantação da cultura, manejo agrônômico e instalação dos lisímetros de drenagem
A cultivar de pepino utilizada foi a Aodai, implantada em uma área de 8,4 m², que possuía três linhas de cultivos espaçadas a 0,8 m e 0,5 m entre plantas. A semeadura direta foi realizada deixando-se três sementes de pepino por cova, para garantir a germinação, posteriormente (10 dias após a semeadura - DAS), realizou-se o desbaste deixando apenas uma planta por cova. O manejo nutricional adotado foi de base orgânica, realizado no plantio. Utilizou-se esterco bovino curtido, na dose de 5 kg m², de acordo com recomendações preconizadas por Filgueira (2010). Foi utilizado um sistema de

tutoramento para conduzir o crescimento das plantas de forma vertical. Foram realizadas capinas manuais para eliminar as plantas daninhas, bem como o monitoramento fitossanitário para controlar pragas e doenças, nesse caso não houve nenhum tipo de infestação.
Na linha central de planta da área, antes de realizar a semeadura, foram instalados três lisímetros de drenagem. Os lisímetros foram constituídos por recipientes cilíndricos de polietileno de alta densidade (PEAD) com 0,6 m de altura e 0,36 m de diâmetro, com capacidade volumétrica de 60 L. Cada lisímetro possuía um sistema de drenagem na base inferior de cada

recipiente, constituído por tubos de PVC, e vasos coletores/armazenadores (3 L), destinados para a coleta e armazenamento do volume drenado.

Para alocar os lisímetros no perfil do solo foram feitas escavações, cujo solo removido foi utilizado para o preenchimento dos próprios lisímetros, que atendiam individualmente uma planta e eram igualmente intercalados por outra planta, respeitando o espaçamento da cultura. O lisímetros possuíam uma borda de 0,05 m, para evitar escoamento superficial de água entre os ambientes. Para evitar a sedimentação de partículas de solo e uma possível obstrução do sistema de drenagem, cada lisímetro recebeu, antes da acomodação do solo, uma camada de brita de 0,05 m seguida por uma camada, de mesma espessura, de areia grossa recoberta por uma manta geotêxtil.

Sistema e manejo de irrigação

Utilizou-se um sistema de irrigação por gotejamento atendido por gravidade com pressão de 1 mca, constituído por fitas gotejadoras (DN 16 mm) com emissores do tipo *in-line* espaçados a 0,5 m e com vazão nominal de 1,0 L h⁻¹. A distribuição de água para as plantas foi realizada por cinco reservatórios com capacidade volumétrica individual de 20 L. Cada lisímetro era atendido individualmente por um reservatório. Esses reservatórios estavam sobre uma estrutura de madeira suspensa a 1 m de altura e eram reabastecidos diariamente com a lâmina de irrigação, mantendo-se uma carga hidráulica mínima de 18 L por reservatório.

A ET_c foi obtida de forma direta com base na média do balanço hídrico dos três lisímetros de drenagem instalados no experimento, considerando os volumes drenados que eram coletados diariamente, de acordo com a equação 1.

$$ET_c = \frac{(P+I-D)}{A} \quad (1)$$

em que: ET_c = evapotranspiração da cultura, mm; P = precipitação pluviométrica, L; I = lâmina de água aplica por irrigação, L; D = água drenada do lisímetros, L; e A = área do lisímetro, m².

Para contabilizar as entradas e saídas de água no solo, foi realizado um balanço hídrico diário da cultura, de acordo com o método sugerido por Thornthwaite e Mather (1955). Para isso, considerou-se: a precipitação (P), que foi coletada por um pluviômetro instalado na área do experimento; a irrigação (I), que corresponde a reposição da ET_c diária; o excedente hídrico (EXC), obtido quando a precipitação foi maior que a ET_c; e o déficit hídrico (DEF), obtido quando a precipitação foi inferior a ET_c (R < ET_c).

Calibração e validação de modelos alternativos para estimativa da ETo

Para a determinação da ETo foram utilizados dados climatológicos diários provenientes de uma estação meteorológica automática (EMA) da Universidade Federal de Alagoas, instalada na própria unidade de pesquisa localizada a 70 m da área experimental. Foi utilizado um conjunto de dados meteorológicos do período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015. No qual, os dados referentes ao ano de 2014 foram utilizados para realizar a calibração dos coeficientes das equações de estimativa da ETo, enquanto os dados referentes ao ano de 2015 foram utilizados para a validação dos modelos. Um resumo das variáveis meteorológicas utilizadas está descrito na **Tabela 2**.

Tabela 2. Dados de temperatura do ar máxima (T_{max}), mínima (T_{min}), e média (T_{med}); umidade relativa do ar máxima (UR_{max}), mínima (UR_{min}), e média (UR_{med}); velocidade do vento (V), radiação Solar (R_s) e precipitação (P), referentes aos anos de 2014 e 2015

2014	T _{max}	T _{min}	T _{med}	UR _{max}	UR _{min}	UR _{med}	V	R _s	P
	°C			%			m s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm
Maior	35,32	23,03	27,53	94,50	88,80	92,25	2,87	27,52	49,53
Menor	21,00	17,25	19,83	85,70	26,93	64,33	0,53	6,23	0,00
Média	29,54	20,62	24,06	92,11	50,14	77,08	1,71	18,99	2,50
Total	--	--	--	--	--	--	--	--	912,8
2015	T _{max}	T _{min}	T _{med}	UR _{max}	UR _{min}	UR _{med}	V	R _s	P
	°C			%			m s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm
Maior	38,33	23,79	29,64	100,00	82,70	91,85	4,13	28,38	49,28
Menor	24,08	17,27	20,76	74,97	18,34	25,81	0,67	8,32	0,00
Média	30,65	20,87	24,70	91,64	44,87	74,02	1,92	19,97	1,75
Total	--	--	--	--	--	--	--	--	638,5

Os modelos de estimativa de ETo usados para a realização dos ajustes dos coeficientes foram o de Hargreaves-Samani (HS), Priestley-Taylor (PT), Jensen-Haise (JH) e Makkink (MK), apresentados na **Tabela 3**. Estes modelos variam quanto ao número de parâmetros meteorológicos exigidos para a realização do cálculo e todos eles foram comparados ao método de Penman-Monteith

(PM), considerado como método padrão da FAO. A estimativa da ETo por cada modelo foi realizada diariamente, conforme disponibilidade de dados e período analisado (calibração e validação), com posterior somatório mensal de cada método, visando avaliar o comportamento da ETo ao longo do ano.

Tabela 3. 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 e Samani (HS), Pereira et al. (1997)	$ETo = A R_a (Tmed + B)(Tmax - Tmin)^c$	Tmax, Tmed, Tmin
Priestley e 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
Makkink (Mk), (1957)	$ETo = \Delta \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_a - B$	Rg

ETo: evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Tmax, Tmin, Tmed representam temperatura máxima, mínima, média, respectivamente a (°C); Rg: radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹); Rn: saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻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 dia⁻¹); G: densidade de fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹), considerada zero para estimar de ETo diária.

Para a calibração dos coeficientes empíricos A, B e C dos métodos avaliados, procedeu-se inicialmente a comparação entre os valores de ETo calculados pelo método de Penman-Monteith (PM) com os dados provenientes da estimativa pelos demais métodos. O ajuste dos coeficientes dos métodos alternativos foi realizado a partir do Microsoft Excel®, utilizando a metodologia descrita por Wraith e Or (1998), por meio do ajuste de equação não linear usando o aplicativo SOLVER. Essa técnica utiliza como parâmetro de otimização a minimização da soma do desvio ao quadrado (Equação 2), ou seja, a diferença entre os valores obtidos por PM e pelos demais métodos, em uma calibração perfeita, será próxima a zero.

$$\sum_{i=1}^n (PM_i - MA_i)^2 = 0 \quad (2)$$

em que: n = o número de observações, e MA= é o método alternativo que está sendo ajustado.

Análises

A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio da análise gráfica da relação 1:1 e por indicadores estatísticos como o coeficiente de determinação (R²) que avalia o ajuste do modelo (quanto mais próximo de um melhor o ajuste), o erro médio (EM) e a raiz do quadrado do erro médio (RMSE) que indicam a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da reta 1:1 (quanto mais próximo de zero melhor o ajuste entre os dados), dados pelas equações 3 e 4. O desempenho dos métodos alternativos com os coeficientes ajustados foi avaliado empregando-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), o índice de exatidão de Willmont (d) descrito pela equação 5, e o índice de desempenho ou concordância (c) descrito por Camargo e Sentelhas (1997), dado pela equação 6.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (4)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{y}| + |O_i - \bar{y}|)^2} \right] \quad (5)$$

$$C = r * d \quad (6)$$

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 4.

Tabela 4. Critério de interpretação do coeficiente de confiança

Valor de “c”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano

Tabela 5. Valores dos Coeficientes originais e ajustados das equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

Métodos	Coeficientes					
	Originais			Ajustados		
	A	B	C	A	B	C
Hargreaves e Samani (HS)	0,0023	17,80	0,50	0,0018	15,16	0,65
Jensen-Haise (JH)	0,0252	0,0780	-	0,0233	0,01	-
Makkink (MK)	0,61	0,12	-	0,80	0,27	-
Priestley e Taylor (PT)	1,260	-	-	0,261	-	-

Todos os modelos de estimativa da ET_o com os coeficientes ajustados apresentaram ótimo desempenho e alta precisão com os índices c e d acima de 0,85 e com coeficiente de correlação (r) acima de 0,90, o que configura uma ótima correlação entre os valores de ET_o obtidos pelo método padrão de Penman-Monteith (PM) e os métodos com os coeficientes ajustados (Tabela 6). Todos os modelos aqui avaliados usam a radiação solar como parâmetro meteorológico no cálculo da

0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Determinação do coeficiente de cultivo (K_c)

Com os dados de ET_c, obtidos por meio dos lisímetros de drenagem, e os valores de ET_o, estimados pelo método padrão e pelos modelos alternativos ajustados, determinou-se o coeficiente de cultura (K_c) para cada fase fenológica da cultura do pepino. O K_c foi calculado pela razão entre a ET_c e a ET_o (Equação 7).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (7)$$

em que: K_c = coeficiente da cultura, adimensional; ET_c = evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹; ET_o = evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹.

Resultados e discussão

Desempenho dos modelos de estimativa da ET_o

Os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) avaliados e seus respectivos coeficientes originais e ajustados para a região de Arapiraca, AL, estão descritos na Tabela 5. Verifica-se que todos os modelos tiveram ajustes nos seus respectivos coeficientes.

ET_o, e de acordo com Hadria et al. (2021), a radiação solar e a temperatura do ar são parâmetros importantes e um dos que mais afetam a evapotranspiração de referência. Didari e Ahmadi (2019) afirmam que, em áreas áridas e semiáridas é mais adequado usar modelos baseados em radiação, pois a evapotranspiração pode estar altamente associada à radiação e ao seu efeito no movimento e advecção do ar.

Tabela 6. Análise estatística dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) ajustados em relação ao método de Penman-Monteith

Métodos	Índices				Erro (mm dia ⁻¹)	
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	Desempenho	RMSE	EM
Hargreaves e Samani (HS)	0,92	0,95	0,88	Ótimo	0,57	0,11
Priestley e Taylor (PT)	0,95	0,95	0,90	Ótimo	0,56	0,20
Makkink (MK)	0,94	0,96	0,91	Ótimo	0,51	0,16
Jensen-Haise (JH)	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,42	0,11

Entre os modelos ajustados, o de Jensen-Haise (JH) e o de Makkink (MK) se destacaram, apresentando os melhores índices estatísticos, de 0,98 e 0,96 para o índice *d*, e 0,94 e 0,91 para o índice *c*, respectivamente; também maior correlação (*r*) com o modelo padrão PM (JH = 0,96 e MK = 0,94), e os menores valores para erro médio (ME) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), de 0,11 e 0,16 mm dia⁻¹ para JH e 0,42 e 0,51 mm dia⁻¹ para MK, respectivamente. Segundo Sharafi e Ghaleni (2021), a calibração dos modelos empíricos resulta em melhor precisão na estimativa da ET_o, quando comparadas às equações originais.

Os bons resultados obtidos com o modelo de JH calibrado podem estar associados ao fato desse modelo matemático ter sido desenvolvido e calibrado para regiões de clima árido e semiárido (Jensen e Haise, 1963). Corroborando com esses resultados, Sharafi e Ghaleni (2021) analisando a calibração de diferentes métodos empíricos para a estimativa da ET_o em clima semi seco no Irã, observaram que a equação de Jensen-Haise calibrada apresentou o menor RMSE (0,34 mm dia⁻¹) e índice *d* de 0,85, evidenciando a conformidade do modelo após a calibração. Os autores afirmaram ainda que, dentre os modelos baseados em radiação solar, o de JH calibrado é o mais adequado para estimar a ET_o.

O modelo de Makkink foi, inicialmente, desenvolvido para a estimativa da ET_o em regiões frias, contudo, no presente estudo constata-se que o modelo calibrado apresentou bons resultados, possibilitando seu uso em regiões tropicais. Zhang et al. (2018) e também observaram que o modelo de Makkink calibrado foi mais preciso na estimativa da ET_o quando comparado a equação original. Farias et al. (2020), verificaram que o desempenho do modelo de MK após a calibração passou a ser “muito bom”, com valores de *r* e *d* de 0,91 e 0,95 respectivamente, e erro de 0,33 mm dia⁻¹. Os autores afirmam ainda que, o modelo de MK pode apresentar maior precisão nas estimativas da ET_o pelo fato de utilizar dados irradiância solar e parâmetros psicrométricos, conferindo maior robustez ao método. Em relação ao método de Priestley e Taylor, que é uma versão simplificada

do modelo padrão Penman-Monteith, a calibração dos coeficientes promoveu resultados satisfatórios. Corroborando com essas constatações, Sales et al. (2018), Farias et al. (2020) e Sharafi e Ghaleni (2021) obtiveram resultados semelhantes. Segundo Didari e Ahmadi (2019), o coeficiente empírico do modelo de PT deve ser calibrado considerando os diferentes regimes de vento e umidade para cada região. Os autores obtiveram RMSE de 0,12 mm dia⁻¹ e índice *d* de 0,90 após a calibração do modelo, para região semiárida no Irã. Em seu estudo, Farias et al. (2020), após a calibração do modelo de PT, obtiveram índice *d* de 0,94 e *r* de 0,89 sendo o desempenho do modelo classificado como “muito bom” e erro de 0,35 mm dia⁻¹ para a região do Pará durante a estação seca.

O modelo de Hargreaves e Samani, apesar de apresentar ótimo desempenho, com R² de 0,92 e índice *d* de 0,95, apresentou também o maior valor para RMSE de 0,57 mm dia⁻¹. Segundo Sales et al. (2018), o modelo empírico de Hargreaves e Samani, por utilizar somente valores de temperatura do ar como variável independente, pode mostrar-se menos eficiente em alguns casos. De acordo com Farias et al. (2020), a ET_o elevada é uma indicação de alta demanda atmosférica, que ocorre quando a umidade relativa do ar é baixa e o déficit de pressão de vapor é alto e, portanto, controla a ET_o apesar da energia solar. Segundo os autores, pelo fato do método HS não considerar o poder evaporativo do ar pode haver instabilidade na estimativa da ET_o, levando o método a sub ou superestimar o modelo padrão da FAO (PM). Sharafi e Ghaleni (2021), obtiveram valor de RMSE de 0,36 mm dia⁻¹, após a calibração do modelo de HS para regiões semi secas do Irã. Nota-se que o ajuste dos coeficientes pode tornar o método de H-S ainda mais específico para as condições locais, tornando-o mais preciso quanto as suas estimativas de ET_o.

Todos os modelos ajustados apresentaram padrões de dispersão semelhante com coeficiente de determinação (R²) variando entre 0,85 a 0,92. Contudo, os modelos de HS e PT foram mais expressivos quanto a superestimar valores baixos de ET_o e subestimar valores altos (Figura 2A e

2B), o que pode explicar os valores mais elevados de RMSE (0,57 e 0,56 mm dia⁻¹) para ambos os métodos. Celestin et al. (2020) apontam que, métodos baseados em radiação tendem a

subestimar valores mais altos de ETo diária. Em seu estudo Sharafi e Ghalehi (2021), obtiveram valores de R² de 0,57 e 0,63 para os modelos de HS e PT respectivamente, após a calibração.

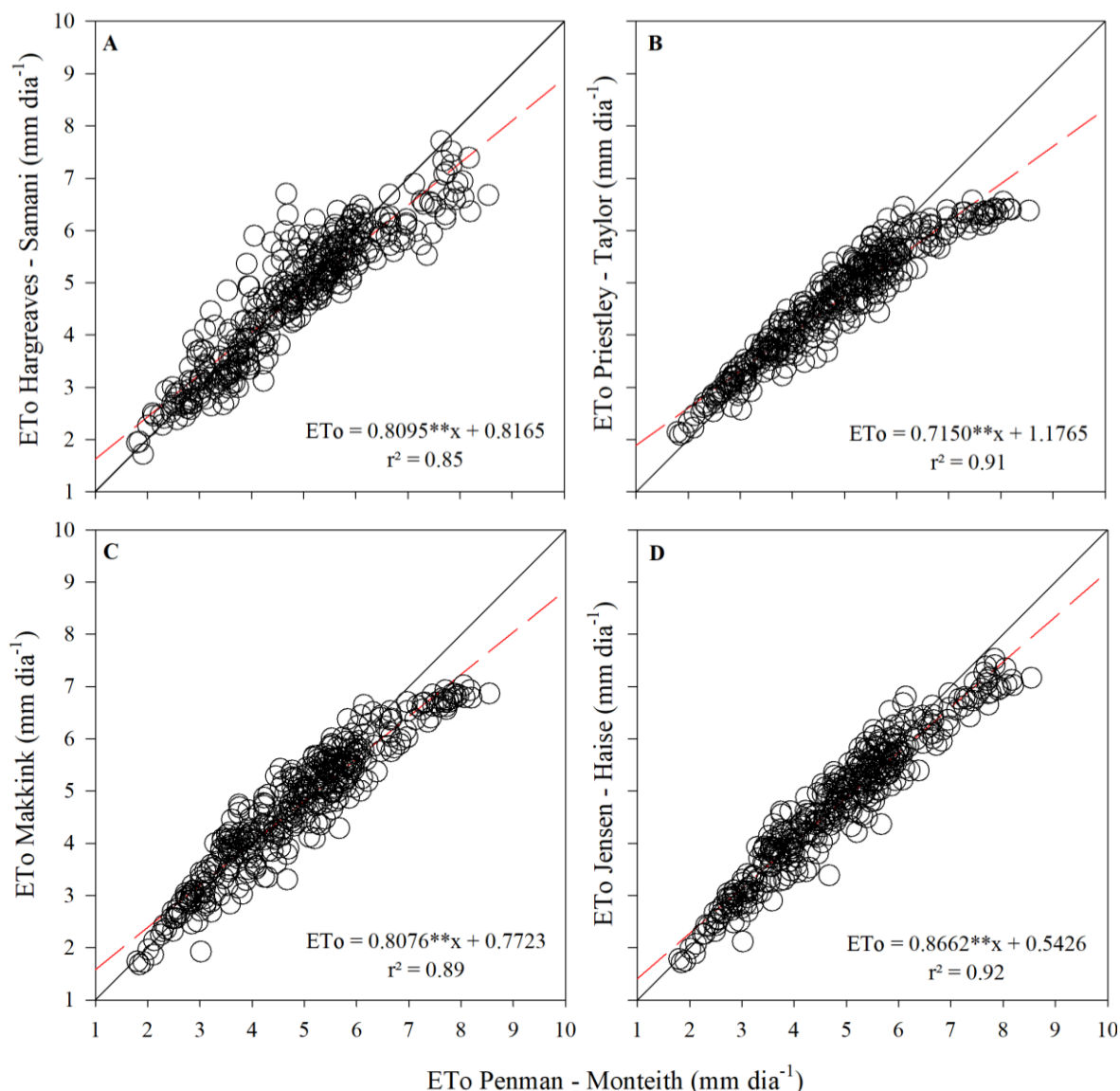


Figura 2. Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelo método padrão da FAO Penman Monteith em relação aos métodos ajustados de Hargreaves e Samani (A), Priestley e Taylor (B), Makkink (C) e Jensen-Haise (D) para o ano de 2015 (linha cheia indica reta 1:1).

O modelo de HS apresentou o R² de menor valor (0,85), reforçando concordância inferior em relação ao método padrão de PM, quando comparado aos demais métodos calibrados. De acordo com Santana et al. (2018), desempenhos insatisfatórios dos modelos alternativos de estimativa da ETo podem ser atribuídos à simplicidade de suas equações que conferem menor precisão ao método, pois a maioria apresenta um número reduzido de parâmetros de entrada. Em seu estudo, Zanetti et al. (2018) observaram que a calibração do modelo de HS para a região Sudeste do Brasil proporcionou bons

resultados na estimativa da ETo, com R² variando de 0,71 a 0,85 para diferentes localidades, em relação ao modelo padrão (PM).

O modelo de MK (Figura 2C) foi mais expressivo em subestimar os valores mais altos de ETo em relação ao modelo padrão PM. E o modelo de JH apresentou a menor dispersão dos dados em torno da reta 1:1 (Figura 2D), o que ressalta a sua melhor performance na estimativa da ETo. Em seu estudo, Sharafi e Ghalehi (2021) obtiveram R² de 0,69 e 0,71 para as equações calibradas de MK e JH, em regiões de clima semi seco no Irã. De modo geral, constata-se que os modelos calibrados

Menezes, S. M.; Pinheiro, A. G.; Lima, D. F.; Santos, L. A.; Silva, C. B.; Santos, D. P.; Santos, M. A. L.; Silva, T.G. F

proporcionaram boas estimativas da ETo, quando comparados ao modelo padrão da FAO (PM), com destaque para o modelo de JH que apresentou os melhores resultados. Para Ndiaye et al. (2020), a calibração melhora as estimativas da evapotranspiração de referência em relação aos modelos originais.

Na Figura 3 é possível observar o comportamento da ETo estimada pelo modelo padrão (PM) e pelos modelos calibrados ao longo do período avaliado. Constata-se que as afirmações apresentadas anteriormente são pertinentes, cujo método calibrado de JH é o que mais se aproxima do método de PM.

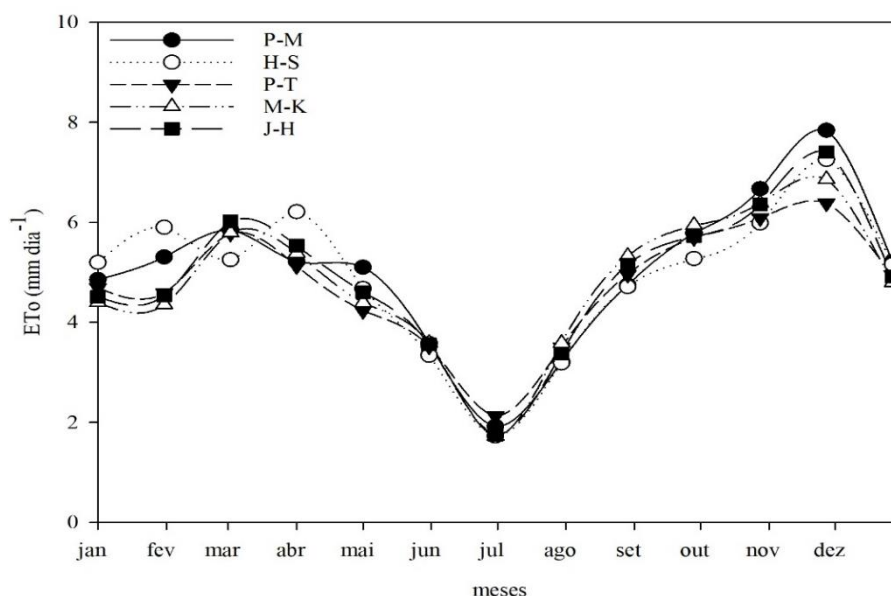


Figura 3. Evapotranspiração de referência (ETo) estimada pelo método de Penman Monteith (PM) e pelos métodos ajustados de Hargreaves e Samani (HS), Priestley e Taylor (PT), Makkink (MK) e Jensen-Haise (JH), para o ano de 2015.

Os modelos ajustados tenderam a superestimar ou subestimar a ETo obtida pelo método de PM, nos meses de menor ocorrência de chuva para a região (novembro a março), já nos meses onde ocorrem maior índice de precipitação (maio a agosto), os modelos calibrados apresentaram estimativas de ETo muito próxima ao observado pelo modelo de PM. Resultado semelhante foi obtido por Sharafi e Ghaleni (2021), onde os modelos ajustados de HS e MK apresentaram os melhores resultados no período chuvoso, contudo, no período de seca os modelos tenderam a subestimar o modelo padrão (PM-FAO). Corroborando com estes resultados, Farzanpour et al. (2019), também obtiveram melhor desempenho do modelo calibrado de JH em estações úmidas nas condições climáticas do Irã.

Períodos em que a amplitude térmica, a velocidade do vento e a incidência de radiação solar são maiores, podem contribuir para reduzir a precisão na estimativa da ETo por métodos alternativos, devido, principalmente, ao número reduzido de variáveis climatológicas que alguns modelos consideram. De acordo com Temesgen et al. (2005), maior velocidade do vento combinada com menor umidade do ar resulta em valores

subestimados, quando utiliza-se modelos baseados em temperatura comparados ao modelo padrão da FAO (PM), especialmente em climas mais secos.

Balanço hídrico e ETc do pepino

De acordo com o balanço hídrico diário (Figura 4), a precipitação acumulada foi de 68,6 mm, com maior concentração de chuvas (62,8 mm) na segunda metade do ciclo do pepino, representando 92,3% do total acumulado, resultando em um excedente hídrico de 46,4 mm. O período de maior déficit hídrico ocorreu até o 25ª DAS, somando 113,1 mm. Tal condição reforça a necessidade do uso da irrigação para garantir o suprimento hídrico adequado durante todo o ciclo cultura. A lâmina de irrigação aplicada durante o ciclo do pepino foi de 217,8 mm.

A ETo (PM) acumulada para o período foi de 231,3 mm, com média diária de 4,5 mm. Em relação a ETc da cultura do pepino, observa-se variações no consumo de água pela cultura ao longo do ciclo. Houve um aumento gradativo na demanda de água pela cultura em função do crescimento e desenvolvimento fisiológico das plantas. O pico máximo do consumo de água pelas plantas de pepino foi de 7,3 mm dia⁻¹ aos 26 DAS,

correspondente ao período de pleno desenvolvimento vegetativo das plantas e formação dos frutos. As maiores variações observadas para a ET_c têm influência da ocorrência de chuvas, que contribui para a redução das temperaturas e para o aumento da umidade relativa do ar, reduzindo o consumo hídrico das plantas.

A ET_c acumulada durante o ciclo do pepino foi de 239,5 mm, com média de 4,7 mm dia⁻¹. Resultados semelhantes foram obtidos por Omotade e Babalola (2019), Sun et al. (2019) e Parkash et al. (2021), cuja ET_c acumulada foi de

253,3; 253,5 e 277,8 mm, respectivamente, para um período de cultivo semelhante ao deste estudo. Em seu estudo Huang et al. (2020), obtiveram ET_c acumulada de 245,3 mm, em condições de ambiente protegido. As pequenas variações constatadas entre os valores de ET_c desse estudo e a literatura, podem estar associadas as condições ambientais em que os experimentos foram realizados, e ainda a cultivar de pepino utilizada, visto que tais fatores contribuem diretamente para a variação do consumo hídrico das plantas.

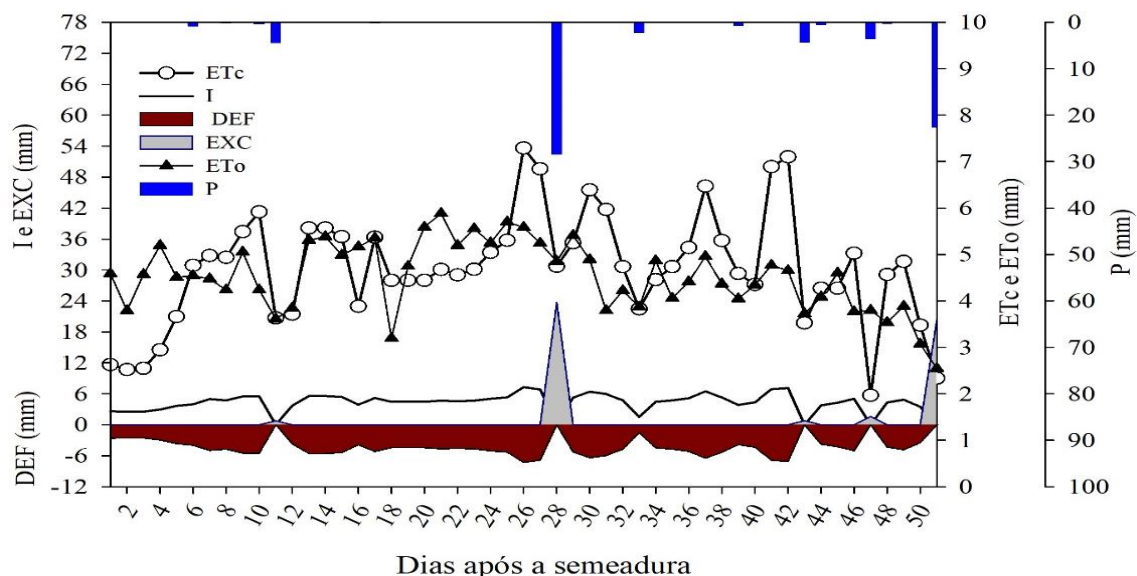


Figura 4. Balanço hídrico diário durante o ciclo da cultura do pepino, em que: DEF – déficit hídrico, EXC – excedente hídrico, P – precipitação, ETo – evapotranspiração de referência (PM), I – irrigação equivalente a reposição da ET_c , ET_c – evapotranspiração da cultura.

Os valores de coeficiente da cultura (K_c) para cada estágio fenológico do pepino, obtidos pela metodologia de estimativa da ETo padrão da FAO (PM) e pelos métodos alternativos ajustados (HS, PT, MK e JH) estão descritos na **Tabela 7**. Constata-se que os valores médios de K_c variaram em função do consumo hídrico diário da cultura e

também em cada fase fenológica. De acordo com Tamimi et al. (2022), a cobertura do solo, a altura da planta e a área foliar mudam ao longo da estação de crescimento, o que implica diretamente em diferenças na evapotranspiração e no K_c , que variam ao longo do ciclo da cultura.

Tabela 7. Coeficientes de cultivo (K_c) do pepino em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, obtidos por meio dos métodos de Penman-Monteith (PM), Hargreaves-Samani (HS), Priestley-Taylor (PT), Makkink (MK) e Jensen-Haise (JH)

Estádio das plantas	Períodos		Kc				
	Fases	Dias	PM	HS	PT	MK	JH
Semeadura à germinação	I	10	0,90	0,76	0,94	0,95	0,92
Desenvolvimento vegetativo	II	14	1,08	1,09	1,19	1,15	1,12
Formação dos frutos	III	20	1,17	1,17	1,32	1,26	1,24
Maturação	IV	7	1,05	1,07	1,08	1,06	1,06

Na fase inicial da cultura, correspondente ao período da semeadura até o estabelecimento da plântula, o K_c obtido pelos modelos ajustados de

JH e PT foram os que mais se aproximaram ao valor obtido pelo modelo de PM, contudo, houve uma superestimativa de 2,2 e 4,4%, por ambos os

modelos ajustados, respectivamente. Já os modelos de HS e MK tenderam a subestimar (15,6%) e superestimar (5,6%), respectivamente, o Kc obtido por PM.

Nessa fase inicial o processo de transpiração pela planta é baixo devido à pequena área vegetal que ainda está em formação. De acordo com Silva et al. (2018), a planta transpira menos no início do seu desenvolvimento, assim o Kc inicial é dominado pelos fatores ambientais, predominando a evaporação da água no solo, o que resulta em valores maiores de ETo e menores ETc, fazendo com que o Kc seja menor do que em outras fases.

Os estádios fenológicos correspondentes ao desenvolvimento vegetativo (fase II) e a formação dos frutos (fase III) são caracterizados pelo aumento do consumo hídrico das plantas, o que resulta na elevação dos valores de Kc. Segundo Silva et al. (2018), essas fases são caracterizadas pelo processo de fotossíntese intensa, necessária para o crescimento dos tecidos e o armazenamento de carboidratos nos tecidos de reserva.

Na fase II, todos os modelos de estimativa da ETo ajustados superestimaram o Kc obtido pelo método de PM (HS 0,9%; PT 10,2%; MK 6,5% e JH 3,7%). Já na fase III, apenas os modelos ajustados de PT, MK e JH superestimaram o Kc obtido pelo modelo de PM em 12,8 7,7 e 5,9%, respectivamente. As cucurbitáceas, em geral, são mais exigentes quanto a disponibilidade de água no período que corresponde ao início da frutificação até o início da maturação dos frutos (Amaro et al., 2021), tal afirmação justifica os maiores valores de Kc nas fases II e III.

A fase IV do ciclo fenológico do pepino, correspondente ao período de maturação dos frutos, tende a apresentar uma redução no consumo hídrico das plantas, reduzindo também os valores de Kc. Nessa fase há uma redução na atividade fotossintética para intensificar o acúmulo de carboidratos nos frutos, porém, a planta apresenta hábito de crescimento indeterminado e surgimento gradativo dos frutos, fazendo com que a planta continue consumindo um volume de água considerável. Silva et al (2018) afirmam que, na fase de maturação o Kc decresce, pois, a planta já atingiu seu pleno desenvolvimento vegetativo e começa a apresentar decréscimos na área foliar, resultando em redução no consumo de água.

Ainda na fase IV, os valores de Kc obtidos pelos modelos ajustados de estimativa da ETo HS, PT, MK e JH superestimaram em 1,9, 2,9, 1,0 e 1,0%, respectivamente, o Kc obtido pelo método de PM. Nota-se que, nessa fase os valores de Kc obtidos pelos modelos ajustados foram bem

próximos aos do modelo padrão de PM. Valores contrastantes de Kc para a cultura do pepino são encontrados na literatura: Oliveira (2009), para a região de Minas Gerais, obteve valores médios de 0,71, 1,50, 2,38 e 1,53; FAO (2011) determina valores médios de 0,45, 0,70, 0,90 e 0,75; Hua et al. (2022), sob cultivo protegido em uma região de clima subtropical úmido na China, obtiveram valores médios de 0,80, 1,10, 1,10 e 0,20; para as fases I, II, III e IV, respectivamente.

De maneira geral, constata-se que os valores de Kc obtidos pelos modelos de estimativa da ETo ajustados de HS e JH foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos com o modelo de PM. Silva et al. (2018) constatou uma proporção inversamente proporcional dos resultados entre ETo e Kc, onde valores superestimados de ETo resultaram em valores subestimados de Kc, e valores subestimados de ETo resultaram em valores superestimados de Kc.

Diante dos resultados, evidencia-se a relação intrínseca entre valores de ETc, ETo e Kc com as características climáticas que incidem na região, bem como com as condições de cultivo e a cultivar utilizada. Portanto, a determinação dessas variáveis é imprescindível para a gestão eficiente dos recursos hídricos e para o manejo de irrigação da cultura.

Conclusões

O ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da ETo de Hargreaves e Samani (HS), Priestley e Taylor (PT), Makkink (MK) e Jensen-Haise (JH), proporcionou ótimo desempenho e boa precisão de todos os modelos em relação ao modelo padrão de Penman-Monteith (PM). O modelo ajustado de Jensen-Haise (JH) apresentou o melhor desempenho e maior exatidão, podendo ser recomendado para a estimativa da ETo na região. O consumo hídrico total durante o ciclo de cultivo da cultura do pepino foi de 239,5 mm, com média de 4,7 mm dia⁻¹. O coeficiente de cultivo (Kc) do pepino, obtido pelo método de estimativa da ETo de Penman Monteith (PM) foi de 0,90, 1,08, 1,17 e 1,05, respectivamente, para as fases I, II, III e IV.

Estudos futuros que busquem acompanhar vários ciclos de cultivos consecutivos nas diferentes estações do ano considerando diferentes espécies vegetais podem contribuir para a seguridade agrícola da região, fundamentada no uso racional da água e no aumento da eficiência da irrigação para os cultivos irrigados. Dessa forma, é imprescindível o acompanhamento periódico das necessidades hídricas das culturas irrigadas, bem como dos parâmetros climatológicos que são determinantes para o manejo eficiente da irrigação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro. Também ao Grupo Irriga (Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo de Água para Irrigação) pelo comprometimento com a pesquisa.

Referências

- Allen, R., Howell, T., Pruitt, W., Walter, I., Jensen, M., 1991. Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. Disponível em: <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0073358>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300. Disponível em: https://www.scsccourt.org/complexcivil/105cv049053/volume3/172618e_5xagwax8.pdf
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alves, E.D.S., Lima, D.F., Barreto, J.A.S., Santos, D.P., Santos, M.A.L., 2018. Determinação do coeficiente de cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. IRRIGA, 22(1), 194–203. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p194-203>
- Alves, H.K.M.N., Jardim, A.M.R.F., Araújo Júnior, G.N., Souza, C.A.A., Leite, R.M.C., Silva, G.I.N., Souza, L.S.B., Silva, T.G.F., 2022. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física, 15(1), 373–392. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p373-392>
- Amaro, G.B., Hanashiro, M.M., Pinheiro, J.B., Madeira, N.R.R.M.E.B.F., 2021. Recomendações técnicas para o cultivo de abóboras e morangas. Embrapa Hortaliças, 1–41. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/225763/1/CT-175-30ago2021.pdf>
- Awal, R., Habibi, H., Fares, A., Deb, S., 2020. Estimating reference crop evapotranspiration under limited climate data in West Texas. Journal of Hydrology: Regional Studies, 28, 100677. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100677>
- Barros, A.C., Silva, F.F., ARAUJO, P.H.V., Medeiros, P.R.F., Lelis Neto, J.A., 2019. Estimativa diária da evapotranspiração de referência por Hargreaves-Samani e ajuste de parâmetros para alagoas. IRRIGA, 24(3), 527–537. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p527-537>
- Çakir, R., Kanburoglu-Çebi, U., Altintas, S., Ozdemir, A., 2017. Irrigation scheduling and water use efficiency of cucumber grown as a spring-summer cycle crop in solar greenhouse. Agricultural Water Management, 180, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.023>
- Camargo, A.P., Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 5(1), 89–97.
- Carvalho, A.D.F., Amaro, G.B., Lopes, J.F., Vilela, N.J., Filho, M.M., Andrade, R., 2013. A cultura do pepino. Circular técnica 103. Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.
- Celestin, S., Qi, F., Li, R., Yu, T., Cheng, W., 2020. Evaluation of 32 Simple Equations against the Penman–Monteith Method to Estimate the Reference Evapotranspiration in the Hexi Corridor, Northwest China. Water, 12(10), 2772. <https://doi.org/10.3390/w12102772>
- Didari, S., Ahmadi, S.H., 2019. Calibration and evaluation of the FAO56-Penman-Monteith, FAO24-radiation, and Priestly-Taylor reference evapotranspiration models using the spatially measured solar radiation across a large arid and semi-arid area in southern Iran. Theoretical and Applied Climatology, 136(1–2), 441–455. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2497-2>
- Embrapa - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária., 2018. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 281p.
- FAO., 2011. Martin S, Water Resource, Development and Management Service Rome, Italy p.56.
- FAOSTAT., 2022. Produtos agrícolas e pecuários. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>. Acessado em 07 de abril de 2024.
- Farias, V.D.S., Costa, D.L.P., Pinto, J.V.N., Souza, P.J.O.P., Souza, E.B., Ortega-Farias, S., 2020. Calibration of reference evapotranspiration models in Pará. Acta Scientiarum. Agronomy, 42, e42475.

- <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.42475>
- Farzanpour, H., Shiri, J., Sadraddini, A.A., Trajkovic, S., 2019. Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. *Hydrology Research*, 50(1), 282–300. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.174>
- Filgueira, F.A.R., 2010. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3ª ed. Viçosa: UFV, 421p.
- Filho, M.M., Moura, A.P., Guimarães, J.A., Reyes, C. P., Carvalho, A.D.F., Amaro, G.B., Lopes, J.F., Liz, R.S., 2012. Recomendações técnicas para o controle de pragas do pepino. Circular técnica 109. Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.
- Gafurov, Z., Eltazarov, S., Akramov, B., Yuldashev, T., Djumaboev, K., Anarbekov, O., 2018. Modifying Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Dryland Regions of Amudarya River Basin. *Agricultural Sciences*, 09(10), 1354–1368. <https://doi.org/10.4236/as.2018.910094>
- Gurski, B.C., Jerszurki, D., Souza, J.L.M., 2018. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(9), 1003–1010. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900003>
- Hadria, R., Benabdelouhab, T., Lionboui, H., Salhi, A., 2021. Comparative assessment of different reference evapotranspiration models towards a fit calibration for arid and semi-arid areas. *Journal of Arid Environments*, 184(7), 104318. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104318>
- Hossain, A., Mamun, S.A., Wang, L., Liu, H., 2018. Improved greenhouse cucumber production under deficit water and fertilization in Northern China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 58–64. <https://doi.org/10.25165/IJABE.V11I4.3566>
- Hua, B., Cao, Z., Zhang, K., Xu, X., Zhang, Y., Dai, H., Zhang, Z., Jiang, J., Miao, M., 2022. Simulation of greenhouse cucumber growth, water and nitrogen dynamics in areas with high groundwater (HG) levels using the HG EU-Rotate_N model. *Vegetable Research*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.48130/VR-2022-0016>
- Huang, S., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., Acquah, S. J., Yu, J., Li, L., Ma, J., Opoku D.R., 2020. Modeling evapotranspiration for cucumber plants based on the Shuttleworth-Wallace model in a Venlo-type greenhouse. *Agricultural Water Management*, 228(10), 105861. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105861>
- Jensen, M.E., Haise, H.R., 1963. Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89(4), 15–41. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287>
- Lira, E.C., Felix, E.S., Oliveira Filho, T.J., Alves, R.C., Lima, R.P., Souza, J.T.A., Oliveira, J.A., Araújo, F.G., Cavalcanti, M.T., Araújo, J.S., 2022. Intercropping forage cactus genotypes with wood species in a semi-arid environment. *Agronomy Journal*, 114(6), 3173–3182. <https://doi.org/10.1002/agj2.21174>
- Liu, H., Yin, C., Gao, Z., Hou, L., 2021. Evaluation of cucumber yield, economic benefit and water productivity under different soil matric potentials in solar greenhouses in North China. *Agricultural Water Management*, 243(8), 106442. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106442>
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng.* 11, 277–288.
- Menezes, S.M., Silva, G.F., Silva, M.M., Morais, J.E.F., Vasconcelos, M.C., Souza, C.S., Simões Neto, D.E., Rolim, M.M., 2024. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. *BioEnergy Research*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10729-4>
- Mohammed, A.T., Irmak, S., 2022. Maize response to coupled irrigation and nitrogen fertilization under center pivot, subsurface drip and surface (furrow) irrigation: Soil-water dynamics and crop evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 267(6), 107634. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107634>
- Mugwanya, M., Kimera, F., Dawood, M., Sewilam, H., 2023. Elucidating the Effects of Combined Treatments of Salicylic Acid and l-Proline on Greenhouse-Grown Cucumber Under Saline Drip Irrigation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(3), 1488–1504. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10634-0>
- Ndiaye, P.M., Bodian, A., Diop, L., Deme, A., Dezetter, A., Djaman, K., 2020. Evaluation and Calibration of Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration in the Senegal River Basin. *Hydrology*, 7(2), 24. <https://doi.org/10.3390/hydrology7020024>
- Oliveira, E.C., 2009. Manejo de irrigação da cultura do pepino japonês (*Cucumis sativus* L.) em ambiente protegido. 108 p. Dissertação

- (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Omotade, I.F., Babalola, I.A., 2019. Assessment of Yield and Fruit Quality of Cucumber (*Cucumis sativus*) under Deficit Irrigation in the Agro - Ecological Tropical Zone. *International Journal of Engineering Science and Application*, 3(3), 137–141.
- Paredes, P., Pereira, L.S., Almorox, J., Darouich, H., 2020. 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*, 240(9), 106210. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106210>
- Parkash, V., Singh, S., Deb, S.K., Ritchie, G.L., Wallace, R.W., 2021. Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth, and fruit yield of cucumber cultivars. *Plant Stress*, 1(10), 100004. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100004>
- 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*, 243(10), 106466. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>
- Pereira, L.S., Paredes, P., Jovanovic, N. (2020). 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*, 241(6), 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>
- Pereira, L.S., Paredes, P., Melton, F., Johnson, L., Wang, T., López-Urrea, R., Cancela, J.J., Allen, R.G., 2020. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. *Agricultural Water Management*, 241(3), 106197. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>
- Pereira, R. A., Villa Nova, N. A., Sedyama, G. C., 1997. *Evapotranspiração*. Piracicaba: FEALQ, p.183.
- Pilon, L., Melo, R.A.C., Carvalho, A.D.F., 2018. Recomendações técnicas para a colheita e pós-colheita de pepino. Comunicado técnico 119. Embrapa Hortaliças, Brasília.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and vaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100 (2), 81–92.
- Raza, M.A., Gul, H., Wang, J., Yasin, H.S., Qin, R., Bin Khalid, M.H., Naeem, M., Feng, L.Y., Iqbal, N., Gitari, H., Ahmad, S., Battaglia, M., Ansar, M., Yang, F., Yang, W., 2021. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 308(3), 127282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127282>
- Sales, R.A., Oliveira, E.C., Lima, M.J.A., Gelcer, E.M., Santos, R.A., Lima, C.F., 2018. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. *IRRIGA*, 23(1), 154–167. <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v23n1p154>
- Santana, J.S., Lima, E.F., Silva, W.A., Fernandes, M.C., Ribeiro, M.I.D., 2018. Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Balsas-MA. *Enciclopédia Biosfera*, 15(27), 1–14. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A43
- Sharafi, S., Ghaleni, M.M., 2021. Calibration of empirical equations for estimating reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3–4), 925–939. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03654-5>
- Silva, J.C., Silva, C.B., Santos, D.P., Santos, M.A.L., Oliveira, W.J., Reis, L.S., 2018. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da cenoura irrigada no agreste alagoano. *Revista Ceres*, 65(4), 297–305. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201865040001>
- 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., 2023. 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*, 895(6), 165102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165102>
- Sun, Y., Zhang, J., Wang, H., Wang, L., Li, H., 2019. Identifying optimal water and nitrogen inputs for high efficiency and low environment impacts of a greenhouse summer cucumber with a model method. *Agricultural Water Management*, 212(8), 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.028>
- Tamimi, M. Al, Green, S., Hammami, Z., Ammar, K., Ketbi, M. Al, Al-Shrouf, A. M., Dawoud, M., Kennedy, L., Clothier, B., 2022.

- Evapotranspiration and crop coefficients using lysimeter measurements for food crops in the hyper-arid United Arab Emirates. *Agricultural Water Management*, 272(4), 107826. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107826>
- Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B., Frame, K., 2005. Comparison of Some Reference Evapotranspiration Equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 73–84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(73))
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The water balance. Publications in climatology. In: Drexel Institute of Technology.
- Wraith, J.M., Or, D., 1998. Nonlinear Parameter Estimation Using Spreadsheet Software. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*, 27(1), 13–19. <https://doi.org/10.2134/jnrlse.1998.0013>
- Zanetti, S.S., Dohler, R.E., Carmo, E.B., Cecílio, R.A., 2018. Calibração da equação de Hargreaves-Samani para estimar a evapotranspiração de referência no Estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 12(3), 2692-2701. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n300869>
- Zareian, M.J., 2021. 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*, 35(10), 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.004>
- Zhan, G.Q., Cui, N., Feng, Y., Gong, D., Hu, X., 2018. Improvement of Makkink model for reference evapotranspiration estimation using temperature data in Northwest China. *Journal of Hydrology*, 566(3), 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.021>
- Zhang, W., Li, Y., Xu, Y., Zheng, Y., Liu, B., Li, Q., 2023. Alternate drip irrigation with moderate nitrogen fertilization improved photosynthetic performance and fruit quality of cucumber in solar greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 308(7), 111579. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111579>