

JÚLIO CÉSAR MEINHARDT

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E SUA INFLUÊNCIA
NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NORMAL, SEQUENCIAL E DE
CULTIVO**

**Botucatu
2023**

JÚLIO CÉSAR MEINHARDT

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E SUA INFLUÊNCIA
NO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NORMAL, SEQUENCIAL E DE
CULTIVO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Hélio Grassi Filho

**Botucatu
2023**

M514e Meinhardt, Júlio César
Estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência no
balanço hídrico climatológico normal, sequencial e de cultivo / Júlio
César Meinhardt. -- Botucatu, 2023
74 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Hélio Grassi Filho

1. Necessidade hídrica. 2. Métodos empíricos. 3. Manejo de
irrigação. 4. Evapotranspiração. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade
Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos
pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E SUA INFLUÊNCIA NO BALANÇO HÍDRICO CIMATOLÓGICO NORMAL, SEQUENCIAL E DE CULTIVO

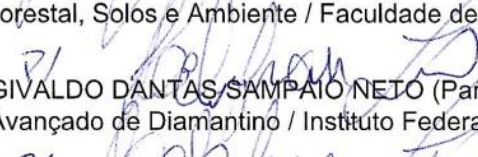
AUTOR: JÚLIO CÉSAR MEINHARDT

ORIENTADOR: HÉLIO GRASSI FILHO

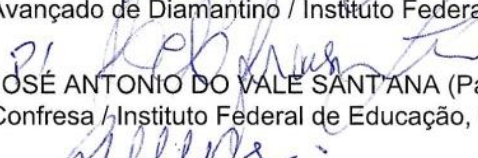
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. HÉLIO GRASSI FILHO (Participação Presencial)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu - UNESP



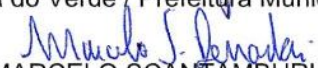
Prof. Dr. GIVALDO DANTAS SAMPAIO NETO (Participação Virtual)
Campus Avançado de Diamantino / Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso



Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO DO VALE SANTANA (Participação Virtual)
Campus Confresa / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso



Pesquisadora Dr.^a LETÍCIA APARECIDA DE MORAES (Participação Presencial)
Secretaria do Verde / Prefeitura Municipal de Botucatu



Prof. Dr. MARCELO SCANTAMBURLO DENADAI (Participação Presencial)
Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 27 de setembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tanta bondade e misericórdia em minha vida. Pelo sacrifício que teve que fazer para me dar uma oportunidade de vida eterna com Ele.

A minha família, principalmente minha mãe Helena Rosali Meinhardt, meu irmão Ayrton Bruno Meinhardt e minha esposa Najila Nolie Catarine Dantas Cerqueira Meinhardt, pelo apoio e amor incondicional.

Ao Prof. Dr. Hélio Grassi Filho, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de pessoa e profissional.

Agradeço ao meu amigo Douglas Ricardo Crespam por toda ajuda que me concedeu ao longo do doutorado, inclusive no experimento, pelas conversas francas e conselhos dados.

A todo o corpo docente, técnico e demais servidores da FCA, que dedicam suas vidas para que outras sejam mudadas.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

Agradeço também a todos os meus amigos, pelo apoio em meus trabalhos, pelas aventuras e paciência comigo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001.

RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultura (K_c) são essenciais na irrigação, sendo o produto deles definido como evapotranspiração da cultura (ET_c) a qual determina a necessidade hídrica das plantas. O método de Penman Monteith, recomendado pela FAO, é robusto, mas requer muitos parâmetros, tornando-o oneroso para os agricultores. No entanto, existem outros métodos indiretos mais simples para calcular a ET_o. Com isso, o presente trabalho visa estimar a evapotranspiração por diferentes métodos indiretos comparando-os entre si e avaliar os resultados e implicações de utilizá-los para o balanço hídrico climatológico normal, sequencial e de cultivo simulando o plantio do milho em segunda safra na cidade de Ilha Solteira/SP. Com base nos dados do período de 01 de janeiro de 2012 até 31 de dezembro de 2022 (10 anos de dados), foram estimadas as ET_o por 5 métodos em escalas decenal e mensal, para avaliar o desempenho dos mesmos. Os métodos indiretos utilizados para determinação da ET_o foram os seguintes: método de Penman-Monteith no qual os demais serão comparados; Camargo (1971); Hargreaves-Samani (1985); Jensen-Haise (1963) e Makkink (1957). Os métodos empíricos utilizados para estimar a ET_o e o balanço hídrico normal para a cidade de Ilha Solteira/SP apresentaram boas correlações, destacando-se na ausência da possibilidade de se utilizar Penman-Monteith, a possibilidade de se empregar os métodos de Hargreaves-Samani e Camargo. Os métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise apresentaram resultados superestimados quando comparados ao método de Penman-Monteith. E as estimativas pelo método de Makkink resultaram em valores subestimados. A produtividade atingível demonstrou que o ano de 2021 foi o mais afetado pela deficiência hídrica, enquanto o ano de 2022 apresentou maior excedente hídrico, impulsionando a estimativa da produtividade atingível.

Palavras-chave: necessidade hídrica; métodos empíricos; manejo de irrigação; evapotranspiração.

ABSTRACT

Reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficient (K_c) are essential in irrigation, with their product being defined as crop evapotranspiration (ET_c), which determines the plants' water needs. The Penman Monteith method, recommended by the FAO, is robust but requires many parameters, making it onerous for farmers. However, there are other, simpler, indirect methods for calculating ET_o. Therefore, the present work aims to estimate evapotranspiration by different indirect methods, comparing them with each other and evaluating the results and implications of using them for the normal, sequential and climatological water balance of cultivation, simulating the planting of corn in the second harvest in the city from Ilha Solteira/SP. Based on data from the period from January 1, 2012 to December 31, 2022 (10 years of data), ET_o will be estimated using 5 methods on ten-year and monthly scales, to evaluate their performance. The indirect methods used to determine ET_o will be the following: Penman-Monteith, this being the standard method against which the others will be compared; Camargo (1971); Hargreaves-Samani (1985); Jensen-Haise (1963) and Makkink (1957). The empirical methods used to estimate ET_o and the normal water balance for the city of Ilha Solteira/SP showed good correlations, highlighting in the absence of the possibility of using Penman-Monteith, the possibility of using the Hargreaves-Samani methods and Camargo. The Hargreaves-Samani and Jensen-Haise methods presented overestimated results when compared to the Penman-Monteith method. And estimates using the Makkink method resulted in underestimated values. The achievable productivity demonstrated that the year 2021 was the most affected by water deficiency, while the year 2022 presented a greater water surplus, boosting the estimate of achievable productivity.

Keywords: water requirement; empirical methods; irrigation management; evapotranspiration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Evapotranspiração.....	15
2.1	Evapotranspiração de referência.....	16
2.1.2	Métodos indiretos para estimar a evapotranspiração de referência.....	17
2.3	Balanço Hídrico Climatológico.....	22
2.3.1	Balanço Hídrico Sequencial.....	23
2.3.1	Balanço Hídrico de cultivo.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Caracterização da área experimental.....	25
3.2	Estimativas da evapotranspiração.....	25
3.3	Comparação Entre Os Métodos.....	25
3.4	Balanço Hídrico Climatológico Normal.....	26
3.5	Balanço Hídrico Climatológico Sequencial.....	27
3.6	Balanço Hídrico Climatológico De Cultivo.....	27
3.7	Estimativa Da Produção Do Milho.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos extremos poderão ocorrer em maior frequência devido as mudanças climáticas e seus padrões de chuva e disponibilidade hídrica (IPCC, 2019), ocasionando alterações na produtividade das culturas, fazendo com que os sistemas agrícolas de muitas regiões possam ter a sua sustentabilidade comprometida, e resultando em populações mais vulneráveis devido a dependência que estes têm da produção de alimentos local (Abd-Elmabod *et al.*, 2020; Ali *et al.*, 2021; Martins; Tomasella; Dias, 2019).

Para se verificar a necessidade hídrica em uma região é importante conhecer a demanda evapotranspirométrica, mesmo sendo uma variável básica é de suma importância sua aferição, pois auxiliará na compreensão da dinâmica da água e na determinação do uso eficiente da mesma (Vicente *et al.*, 2018). Uma das formas de se calcular a evapotranspiração (ET) são os métodos indiretos, os quais dependem de um banco de dados com algumas variáveis que irão compor os cálculos, contudo deve-se atentar para a necessidade de se ter esses dados disponíveis, caso contrário, isso pode dificultar a estimativa da ET (Allen *et al.*, 1998).

Essas estimativas das perdas de água por ET são muito importantes, pois são estas perdas que irão ser aplicadas via irrigação quando a quando a precipitação não estiver atendendo esta demanda. Isso tudo devido as pesquisas sobre ET que nos traz esses dados de consumo hídrico pelas plantas, servindo como base para o dimensionamento dos projetos e manejo da irrigação (Tagliaferre *et al.*, 2010).

Dentro do planejamento dos recursos hídricos, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é utilizada não somente para projetos e manejo de irrigação, como também para projetos ambientais através de modelos climatológicos e estudos de balanço hídrico, podendo ser utilizado como uma estratégia de gerenciamento para os recursos (Ongaratto; Bortolin, 2020).

Na criação de estratégias eficientes de manejo dos recursos hídricos, faz se o aperfeiçoamento dos cultivos por meio de modelos que estudem as mudanças climáticas para minimizar seus impactos sobre as culturas agrícolas através de simulações (Lamichhane *et al.*, 2019; Manivasagam; Rozenstein, 2020; Tooley *et al.*, 2021).

Por isso os modelos devem ser aplicados a fim de gerar informações mais assertivas, pois as culturas podem sofrer com fatores internos e externos que

influenciarão a sua capacidade produtiva, ocasionando lacunas nos rendimentos produtivos da cultura – “Yield Gap” (Martins *et al.*, 2018).

Para a sazonalidade produtiva da agricultura, o clima tem demonstrado ser um dos fatores ambientais principais, podendo ocasionar aproximadamente um terço dessa sazonalidade (Leng *et al.*, 2016). Sabendo disso, para que haja incremento produtivo e escolha das melhores estratégias para viabilizar economicamente as práticas agrícolas, é de suma importância a obtenção de dados fundamentais sobre o clima e suas implicações (Lamichhane *et al.*, 2019; Palosuo *et al.*, 2021).

Com isso, o presente trabalho visa estimar a evapotranspiração por diferentes métodos indiretos comparando-os entre si e avaliar os resultados e implicações de utilizá-los para o balanço hídrico climatológico normal, sequencial e de cultivo simulando o plantio do milho em segunda safra na cidade de Ilha Solteira/SP.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) representa a combinação da evaporação da superfície do solo, ou superfície da água e a transpiração das plantas. O primeiro é controlado por parâmetros físicos da atmosfera e pelas propriedades hidráulicas do solo e o segundo por fenômenos fisiológicos. Ao mesmo tempo em que contribui para o balanço energético de superfície, a ET quantifica a necessidade hídrica para uma gestão eficiente da água (Afzaal *et al.*, 2020; Bogawski; Bednorz, 2014).

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do ciclo hidrológico e do balanço hídrico, a qual associada a precipitação representam o clima de uma região e são utilizadas como ferramenta de apoio à decisão para a gestão da água na agricultura. A estimativa do consumo de água em áreas agrícolas é importante para o planejamento, gestão e regulação dos recursos hídricos agrícolas. Além disso, permite o estabelecimento de um balanço hídrico sustentável, mitiga os impactos da escassez de água, bem como evita o uso excessivo e o desperdício de recursos hídricos (Wanniarachchi; Sarukkalige, 2022).

A estimativa da evapotranspiração é amplamente utilizada em diversos campos, como agronomia, hidrologia, climatologia, meteorologia, ecologia e ciências ambientais (Liu, Yao; Wang, 2019; Peng *et al.*, 2019; Tasumi, 2019; McMahon *et al.*, 2013), sendo geralmente estimada em termos das necessidades reais de água das culturas, por meio de observações nas plantas e no solo, incluindo a umidade do solo (Oliveira; Oliveira, 2018).

Muitos elementos influenciam a taxa de evapotranspiração, incluindo condições climáticas, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e pressão de vapor. Além disso, características intrínsecas à planta, como a área foliar, o estágio de desenvolvimento e a estrutura das folhas, também desempenham um papel crucial (Medeiros, 2002).

Entre os fatores climáticos, a radiação solar destaca-se como o mais significativo para calcular a evapotranspiração, visto que é a principal fonte de energia que facilita a transição da água da fase líquida para a gasosa. Portanto, a evapotranspiração depende da quantidade de energia solar recebida pela área cultivada. Além disso,

plantas isoladas ou pequenas áreas de cultivo localizadas próximas a solos expostos geralmente apresentam taxas de evapotranspiração mais altas (Bernardo *et al.*, 2006).

2.1 Evapotranspiração de referência

O conceito de evapotranspiração de referência foi primeiramente desenvolvido para analisar a demanda evaporativa do ar, desconsiderando as características específicas das culturas, sua fenologia e práticas de manejo. Trata-se de um conceito empregado em pesquisas climáticas e serve como um indicador das necessidades hídricas das plantações em uma localidade e período específicos (Alencar *et al.*, 2011). Compreender as demandas hídricas das culturas é crucial para o estudo do gerenciamento da água em práticas de irrigação. Além disso, a medição da evapotranspiração é vital para determinar as flutuações temporais nas necessidades de irrigação (Ortega-Farias; Irmak; Cuenga, 2009).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é aplicada em balanços hídricos na agricultura e na modelagem de fenômenos climáticos e hidrológicos, com o objetivo de estimar as demandas de irrigação, prever rendimentos agrícolas, avaliar a disponibilidade de recursos hídricos e definir características climáticas (Back, 2008).

De acordo com Allen *et al.* (1994), a evapotranspiração de referência (ET_o) é definida como a evapotranspiração de uma determinada cultura, com 12 cm de altura, 70 s m⁻¹ de resistência aerodinâmica da superfície e 0,23 de albedo. Sentelhas (2001), define as características da cultura de referência sendo: superfície vegetada com grama, com altura de 8 a 15 cm, com crescimento ativo, sem restrição hídrica, cobrindo toda a superfície do solo.

O equilíbrio de água na superfície terrestre é afetado fortemente pela evapotranspiração de referência (ET_o), tornando a estimativa dessa variável climática muito importante nos estudos que visam compreender o a dinâmica do ciclo da água em cada região (Cabral Júnior; Bezerra, 2018; Araújo; Medeiros; França, 2020).

Buscando compreender melhor as mudanças e as modificações globais da evapotranspiração (ET), precisamos de mais estudos e evidências sobre a ET no nosso país, para compreender a sua dinâmica registrando em cada região esses dados para aprimorar pesquisas (Araújo, Medeiros; França, 2020).

Os dois insumos que são mais consumidos no processo de produção agrícola de alimentos são a energia e a água, principalmente na agricultura irrigada (Ahmad;

Khan, 2016). Para a reposição da água visando suprir a demanda das culturas e a demanda atmosférica, a ETo mostra-se como possibilidade de calcular e quantificar o volume necessário para atender a demanda hídrica de ambos, sendo uma ferramenta de auxílio para os estudos gerenciais do correto uso da água.

2.1.2 Métodos indiretos para estimar a evapotranspiração de referência

Bernardo *et al.* (1996) descrevem que a evapotranspiração de referência (ETo) pode ser calculada por métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos incluem o uso de lisímetros, experimentos em campo, monitoramento da umidade do solo e o método de medição do fluxo de entrada e saída de água em extensas áreas. Entre os métodos diretos, o mais exato para determinar a ETo é através dos lisímetros, que são dispositivos altamente precisos para o acompanhamento da ETo. Esses equipamentos consistem em um volume específico de solo, contido em recipientes (tanques) que possuem propriedades físicas e químicas similares às das áreas circundantes.

Além dos métodos diretos de medição, existem os métodos indiretos de cálculo da ETo, que são mais comuns e simples de verificar. O uso desses métodos requer dados climáticos, que geralmente são acessíveis com facilidade, e a disponibilidade desses dados é um fator crucial na seleção de um método para estimar a ETo (Caporusso; Rolim, 2015).

Os métodos indiretos podem ser classificados em dois grupos distintos: evaporímetros e equações de estimativa. Dentro do primeiro grupo, o tanque classe A (TCA) se destaca, apesar de algumas desvantagens, como a vulnerabilidade ao acesso de animais e o fato de que a evaporação também ocorre durante a noite (Sentelhas, 2001). Contudo, devido à sua facilidade de manejo e baixo custo, o TCA continua sendo uma opção bastante popular para uso em campo.

Embora haja várias maneiras de estimar a ETo, seja por métodos diretos utilizando estruturas físicas ou métodos indiretos por meio de equações baseadas em dados meteorológicos, o método indireto utilizando equações, conforme destacado por Bernardo *et al.* (2006), é amplamente preferido para essa finalidade. Embora obter os dados meteorológicos necessários para aplicar as equações possa ser complexo, os resultados obtidos geralmente demonstram um desempenho satisfatório em termos de evapotranspiração de referência (Ndulue; Ranjan, 2021).

Os métodos para estimar a evapotranspiração de referência podem ser categorizados em diferentes tipos, como métodos de radiação, evaporação, temperatura, umidade, correlações múltiplas e combinações, conforme descrito por Pereira; Villa Nova; Sedyama (1997). Dependendo dos princípios subjacentes à sua formulação, esses métodos podem ser agrupados em categorias como empíricos, aerodinâmicos, baseados no balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões.

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a FAO recomendam o método de Penman-Monteith como padrão para estimar a evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos, e também o indicam para a avaliação de outros métodos (Smith, 1991; Allen *et al.*, 1998). Essa abordagem simplificou os processos de calibração e estimativa utilizando equações empíricas, o que pode potencialmente permitir a aplicação de estudos locais em outras regiões do mundo. No entanto, sua exigência de dados de entrada é considerada alta, o que dificulta sua aplicação (Paiva; Pinheiro, 2016).

Quando não há possibilidade de se utilizar o método de Penman-Monteith, Allen *et al.* (1998) relata a possibilidade de se utilizar o método de Hargreaves e Samani, (1985), no qual faz uso de dados das temperaturas máximas, mínimas e médias e da radiação solar no topo da atmosfera, que pode ser obtida através de uma tabela em função da latitude do local em decorrência dos meses do ano.

Outros métodos indiretos de estimativa da ETo, podem ser utilizados e dentre estes que são empregados em países tropicais que estão em desenvolvimento, temos os métodos de Camargo (1971), Jensen-Haise (1963) e Makkink (1957).

2.1.2.1 Penman-Monteith FAO 56

A equação de Penman-Monteith FAO 56 é amplamente reconhecida como a equação padrão para estimar a ETo, pois demonstra uma forte correlação com os dados do lisímetro e produz valores consistentes de ETo em uma variedade de locais e climas (Slam; Alam, 2021; Allen *et al.*, 1998). Portanto, é amplamente aceita como referência para avaliar outros modelos empíricos de estimativa da ETo (Chu *et al.*, 2017; Estevez *et al.*, 2009; Jhajharia *et al.*, 2012).

O método de Penman-Monteith é predominantemente baseado em princípios físicos, embora incorpore alguns elementos empíricos, como o uso da temperatura do

ar em vez da temperatura da superfície evaporante, como feito na equação clássica de Dalton (Camargo; Camargo, 2000). A FAO recomenda que os métodos empíricos de estimativa da ETo sejam adaptados e validados para diferentes regiões, com a equação de Penman-Monteith sendo considerada a referência padrão para tais ajustes, devido à sua excelente correlação com a evapotranspiração medida em lisímetros (Allen *et al.*, 1998).

A equação da ETo pelo método de Penman-Monteith - FAO 56 sintetiza a transferência de massa e o balanço de energia na superfície, permitindo estimar a evapotranspiração potencial baseado em dados meteorológicos e características fisiológicas da cultura em questão. Esta equação considera tanto a resistência superficial, que aborda a resistência do vapor d'água em atravessar os estômatos das folhas e a superfície do solo, quanto a resistência aerodinâmica, que descreve a resistência na difusão vertical do vapor d'água da folha para o ar circundante. está descrita a seguir (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o(PM) = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{C_n}{(T + 273)} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (1)$$

Onde ETo (PM) é evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith, e expressa em mm dia⁻¹, Rn é radiação líquida total, expressa em MJ m⁻² dia⁻¹, G é densidade do fluxo de calor no solo, expressa em MJ m⁻² dia⁻¹, T é temperatura média diária do ar, expressa em °C, u₂ é velocidade do vento média diária a 2 m de altura, expressa em m s⁻¹, e_s é a pressão de saturação de vapor, expressa em kPa, e_a é pressão parcial de vapor, expressa em kPa, e_s-e_a é déficit de saturação de vapor, expressa em kPa, Δ é declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T_{méd}, expressa em kPa °C⁻¹, γ é coeficiente psicrométrico, expressa em kPa °C⁻¹.

2.1.2.2 Método Camargo

O modelo proposto por Camargo é uma versão simplificada do método de Thornthwaite, utilizando exclusivamente dados de temperatura média e radiação solar. Foi concebido por meio de uma equação analítica para estimar a evapotranspiração, sendo eficaz em diversas condições climáticas (Camargo, 1971). Dessa forma, o método passou por aprimoramentos durante a década de 60, momento em que substituiu o método de Thornthwaite. Sua inovação principal foi a

troca do índice "I" pelo índice "T", representando a temperatura média anual da região (Mazieiro *et al.*, 2021). A evapotranspiração de referência (ET_o) calculada pelo método de Camargo pela equação 2:

$$E_{to} (CA) = F \times R_{ax} \times T \times X \quad (2)$$

Onde ET_o (CA) é evapotranspiração de referência expressa em mm dia⁻¹, estimada pelo método de Camargo, R_{ax} é radiação solar extraterrestre (mm dia⁻¹ de evapotranspiração equivalente), X é número de dias do período (10 ou 30 dias), T (°C) é a temperatura média do período, F é fator de ajuste que varia com a temperatura do ar média anual do local (F= 0,01 para T < 23 °C; F= 0,0105, para T = 24 °C; F= 0,011, para T = 25 °C; F= 0,0115, para T = 26 °C; e F= 0,012, para T > 26°C).

2.1.2.3 Método de Hargreaves e Samani

A equação de Hargreaves-Samani (HS) (Hargreaves; Samani, 1982, Hargreaves; Samani, 1985), utilizando dados diários de temperatura do ar, foi proposta como uma alternativa ao FAO56-PM para o cálculo da evapotranspiração. A equação HS tem sido amplamente adotada na estimativa de evapotranspiração devido à sua precisão, consistência e simplicidade. Esta fórmula possui uma interpretação física, e a diferença de temperatura (T_{Max} - T_{Min}) entre a temperatura máxima e mínima busca representar a transparência atmosférica (Kim *et al.*, 2023).

A temperatura do ar, um dos dados meteorológicos mais comuns, é utilizada na equação HS, facilitando sua implementação com séries temporais de temperatura de longo prazo (Mendicino; Senatore, 2013). Entretanto, a equação HS depende de coeficientes de modelo, os quais podem estar associados às condições climáticas locais e características topográficas. Assim, a recalibração da equação HS se faz necessária para minimizar erros sistemáticos (Kim *et al.*, 2023). Essa equação pode ser empregada para estimar os valores de ET quando os dados sobre radiação solar líquida não estão disponíveis ou são questionáveis em termos de precisão (Allen *et al.*, 1998; Hargreaves; Samani, 1985; Hargreaves; Allen, 2003). Os valores estimados de evapotranspiração pelo método original de Hargreaves podem ser calculados por meio da Equação 3.

$$E_{To} (HS) = 0,0023 \times R_a \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times (T + 17,8) \quad (3)$$

Onde $E_{To} (HS)$ é evapotranspiração de referência expressa em mm dia^{-1} , estimada pelo método Hargreaves e Samani, T_{max} é temperatura máxima do ar em $^{\circ}\text{C}$, T_{min} é temperatura mínima do ar em $^{\circ}\text{C}$, T é temperatura média do ar em $^{\circ}\text{C}$, R_a é radiação solar no topo da atmosfera expressa em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

2.1.2.4 Método de Jensen-Haise

O método foi concebido por Jensen e Haise (1963) para aplicação em regiões áridas e semiáridas. Ele se baseia na estimativa da evapotranspiração de referência utilizando apenas informações de temperatura do ar e radiação solar (Pereira; Villa Nova; Sedyama, 1997). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Jensen-Haise foram derivados da Equação 4.

$$E_{To} (JH) = R_s \times (0,0252 + 0,078) \quad (4)$$

Onde $E_{To} (JH)$ é a evapotranspiração de referência expressa em mm dia^{-1} , estimada pelo método de Jensen e Haise, R_s é a radiação solar incidente em mm dia^{-1} , T é a temperatura média do ar em $^{\circ}\text{C}$.

2.1.2.5. Método de Makkink

O método de Makkink (1957) é também um método empírico que estabelece uma relação entre a E_{To} e a radiação solar à superfície, expressa em termos de evaporação equivalente. Este método leva em conta a temperatura do bulbo úmido (T_u), mas na ausência deste dado, pode-se substituí-lo pela temperatura média diária do ar (T_{med}). É importante observar que, para uma atmosfera não saturada, T_{med} é maior que T_u , o que aumenta o fator de ponderação utilizado na equação, resultando em uma ligeira superestimação da E_{To} quando T_{med} é usado em vez de T_u (PEREIRA *et al.*, 1997). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Makkink podem ser calculados pelas Equações 5 e 6.

$$E_{To}(MK) = 0,61 \times W \times R_s \times -0,12 \quad (5)$$

$$W=(0,392+3,10^{-5} \times Z)+0,0172 \times T-0,0001 \times T^2 \quad (6)$$

Onde ETo (MK) é a evapotranspiração de referência expressa em mm dia⁻¹ estimada pelo método de Makkink, W é p fator de ponderação (adimensional), que é calculado em função da temperatura média do ar (T , em °C) e da altitude local (Z , em m), Rs é a radiação solar no nível da superfície em mm dia⁻¹.

2.3 Balanço Hídrico Climatológico

O balanço hídrico climatológico (BHC) é um ótimo indicador da disponibilidade hídrica em uma região, podendo ser entendido como a subtração entre a precipitação e a evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998). Para a obtenção do balanço hídrico de uma determinada região é fundamental o conhecimento da água perdida por evapotranspiração, e para isso, o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) é utilizado (Gurski; Jerszurki; Souza, 2018).

A execução do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) envolve a análise quantitativa dos componentes em estudo, buscando uma compreensão mais aprofundada de seu comportamento. Este método é fundamentado no princípio da conservação de massa e examina os insumos de entrada e saída do sistema (Tucci; Beltrame, 2009). As diversas fontes de entrada de água no sistema incluem precipitação, orvalho, precipitação oculta, escoamento superficial, escoamento subsuperficial e escoamento de base.

Segundo D'Angiolella *et al.* (2005), o balanço hídrico para culturas surgiu da necessidade de quantificar a precipitação e a evapotranspiração em um determinado ecossistema, com o intuito de entender a disponibilidade de água para as plantas ao longo do ano.

Dentro da gestão de recursos hídricos, o BHC é visto como um instrumento muito relevante para as análises de disponibilidade hídrica, principalmente nas regiões com escassez de água ou semiáridas; evidenciando possíveis áreas com risco de seca, determinando até o tipo de cobertura vegetal da área (Larcher, 2003).

O excedente Hídrico (EXC) e a Deficiência Hídrica (DEF) de uma região podem ser avaliados pelo BHC proposto por Thornthwaite e Mather (1955), no qual podemos identificar e monitorar a quantidade de água presente no solo e seu fluxo de entrada através das precipitações pluviométricas, e saídas pela ET. Além disso, o BHC

considera o solo como um reservatório que restringe a perda de água conforme vai se tornando mais seco. Este método permite entender o regime hídrico de uma região sem a necessidade de medir diretamente as características físicas e hídricas do solo (Oliveira; Oliveira, 2018).

O Produtor rural de posse do BHC poderá tomar decisões de forma mais assertivas e com embasamento mais sólido no tocante as suas atividades agrícolas, pois o BHC fornecerá as condições climáticas de sua área, possibilitando assim visualizar as fragilidades e o momento oportuno para desempenhar os manejos necessários para o bom desenvolvimento do seu cultivo, como por exemplo a irrigação da lavoura no momento de déficit hídrico (Santos; Hernandez; Rossetti, 2010).

As escalas temporais de aplicação do BHC são diversas. Originalmente, a escala mensal foi a forma utilizada por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), porém, de acordo com Lucas *et al.* (2015), o BHC pode ser calculado em escala diária, decendial (INMET, 2016; Cardoso, 2005), anual (D'angiolella *et al.*, 2005; Bandoc; Prävãlie, 2015).

2.3.1 Balanço Hídrico Sequencial

Quando aplicada a um período contínuo de dados, a metodologia do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é frequentemente referida na literatura como Balanço Hídrico Sequencial (BHS) (Lucas *et al.*, 2015; INMET, 2016; Cardoso, 2005). Esse tipo de balanço é conduzido sequencialmente, conforme a disponibilidade dos dados.

O BHS geralmente é empregado para períodos específicos e curtos, de acordo com os objetivos do estudo, embora também possa ser utilizado em grandes séries de observações. Ele não reflete necessariamente o comportamento climático de uma região, já que normalmente não é calculado com médias climáticas típicas (por exemplo, 20 anos de observações), como no BHC, mas sim para períodos específicos, como do dia 30 de junho ao dia 30 de janeiro, dia a dia ou até mesmo hora a hora. É importante destacar que, em termos de métodos de cálculo, os modelos BHC e BHS são exatamente os mesmos, diferindo apenas na entrada de dados.

Os métodos de BHC ou BHS são aplicáveis em planejamento agroflorestal e zoneamento agroclimático. Por exemplo, podem ser utilizados para determinar as melhores datas de semeadura, considerando a menor média de dias com excesso hídrico para diferentes culturas (Lucas *et al.*, 2015). Além disso, esses métodos

fornece subsídios para o planejamento agrícola de uma região, ao mapear as deficiências hídricas em relação à capacidade de armazenamento do solo (Cardoso, 2005; Freitas *et al.*, 2011). Também são empregados em estudos de viabilidade de empreendimentos agroflorestais (Orlandini *et al.*, 2011).

2.3.1 Balanço Hídrico de cultivo

O Balanço Hídrico de cultivo é realizado do mesmo modo do balanço hídrico sequencial, o qual permite identificar períodos de deficiência hídrica que poderiam afetar o desenvolvimento e produção das plantas, minimizando o impacto na produtividade das culturas, por meio do coeficiente de cultivo das culturas (K_c). O Balanço Hídrico de cultivo sequencial pode ser aplicado em diferentes culturas fomentando as decisões quanto ao manejo da irrigação (Medeiros; Holanda, 2019).

Outra aplicação do Balanço Hídrico de cultivo sequencial é a avaliação da eficiência do uso da água nos sistemas de cultivo irrigados. Possibilitando minimizar o uso indevido da água, através da avaliação dos diferentes métodos de irrigação (Santos *et al.*, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado com base em dados da estação agrometeorológica localizada no município de Ilha Solteira na região Noroeste do estado de São Paulo. A estação possui as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 20 25' 24,4" Sul e Longitude: 51 21' 13,1" Oeste, estando a uma altitude de 337 metros.

Para os cálculos do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e Evapotranspiração (ETo) foram utilizados os dados fornecidos pela Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (<http://clima.feis.unesp.br>), operada pela Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira.

3.2 Estimativas da Evapotranspiração

Com base nos dados do período de 01 de janeiro de 2012 até 31 de dezembro de 2022 (10 anos de dados) foram estimadas as evapotranspirações potenciais (ETPs) por 5 métodos indiretos em escala mensal para a avaliação do desempenho dos mesmos.

Assim, foi realizado a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) utilizando os seguintes métodos: Penman-Monteith recomendado pela FAO no Boletim 56 (Allen *et al.*, 1998) sendo este o método padrão usado para comparação com os demais; Camargo (1971); Hargreaves-Samani (1985); Jensen-Haise (1963) e Makkink (1957).

3.3 Comparação entre os métodos

A comparação das ETo estimadas pelos métodos citados anteriormente, foram em relação ao método padrão de estimativas da FAO, que é o de Penman-Monteith. Buscando avaliar o desempenho dos métodos na estimativa da ETo, com métodos menos complexos e que possam apresentar um menor custo para sua estimação.

A ETo encontrada por cada método foi avaliada pela raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE, equação 7), pelo índice de concordância de Willmott

("d", equação 8) e o coeficiente de confiança (índice "c", equação 9) sugerido por Camargo e Sentelhas (1997).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (7)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (8)$$

$$c = r \times d \quad (9)$$

Onde n é número de dados, O_i são valores estimados por Penman-Monteith, $\bar{O}$ é a média do valor estimado por Penman-Monteith, E_i é o valor estimado pelos métodos propostos, r é o Coeficiente de correlação.

O índice de desempenho "c" (equação 9) tem como critério de interpretação do desempenho dos métodos, a seguinte classificação, conforme sugerido por Camargo e Sentelhas (1997), que são estes:

- > 0,85 – Ótimo;
- 0,76 a 0,85 - Muito bom;
- 0,66 a 0,75 – Bom;
- 0,61 a 0,65 – Mediano;
- 0,51 a 0,60 – Sofrível;
- 0,41 a 0,50 – Mau
- $\leq 0,41$ – Péssimo.

3.4 Balanço Hídrico Climatológico Normal

O método padrão utilizado para obtenção do balanço hídrico climatológico foi o de Thornthwaite & Mather (1955) adaptado para o período de 01 de janeiro de 2012 até 31 de dezembro de 2022 (10 anos de dados). A partir dessa série de dados climatológicos (2012-2022) determinou-se o BHC normal na escala mensal, utilizando como base as evapotranspirações de referência calculadas pelos métodos de Camargo (1971); Hargreaves-Samani (1985); Jensen-Haise (1963) e Makkink (1957), comparando-os com o padrão de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

Os cálculos foram executados com o auxílio de uma planilha eletrônica no software Microsoft Office Excel® (Rolim; Sentelhas; Barbieri, 1998), seguindo a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), conforme apresentado por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), adaptando e substituindo os valores de ETo de cada equação empírica supracitadas.

Desta forma buscou-se identificar a implicação destes métodos de estimativa da ETo e suas implicações no BHC normal para a cidade de Ilha Solteira/SP, visando encontrar os métodos que melhor se adequem as realidades locais. Assim, os resultados foram expressos nas variáveis de armazenamento de água no solo (ARM), alteração do armazenamento de água no solo (ALT), evapotranspiração real (ETR) deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) para o período estudado.

3.5 Balanço Hídrico Climatológico Sequencial

No estudo do Balanço Hídrico Climatológico Sequencial (BHC sequencial) o intervalo de tempo analisado foi dos últimos 3 anos (2020, 2021 e 2022) com a escala de tempo dividida em decêndios, a fim de ter um maior nível de detalhamento das variáveis quando comparado ao BHC normal que geralmente é realizado na escala mensal.

O BHC sequencial ocorreu de forma semelhante ao BHC normal, comparando o uso dos cinco métodos de estimativa da ETo citados anteriormente, em busca da identificação do comportamento dessas estimativas nos resultados das variáveis de ARM, ALT, ETR, DEF e EXC; para os anos de 2020-2022 na cidade de Ilha Solteira/SP.

3.6 Balanço Hídrico Climatológico de Cultivo

O Balanço Hídrico Climatológico de Cultivo (BHC cultivo) transcorreu de forma semelhante ao BHC sequencial, em intervalos de tempo descendais para os anos 2020, 2021 e 2022, comparando o uso dos cinco métodos de estimativa da ETo citados anteriormente, com plantio do milho no primeiro decêndio de março e finalização do ciclo no primeiro decêndio julho de cada ano.

Contudo, para o BHC de cultivo, foi necessário realizar ajustes dos valores de ETo para os valores de evapotranspiração da cultura (ETc), os quais foram corrigidos pelo

coeficiente de cultivo (K_c) da cultura do milho de acordo com suas fases de desenvolvimento, distribuídas na escala decendial segundo Alfonsi *et al.* (1990).

Com base nisto, foi identificado a implicação desses diferentes métodos de estimativa da E_{To} que influenciaram na obtenção da E_{Tc} e seu BHC de cultivo, os quais buscaram evidenciar sua influência nos parâmetros de ARM, ALT, ETR, DEF e EXC para a cultura do milho cultivado em Ilha Solteira/SP.

3.7 Estimativa da produção do milho

No Brasil, o Modelo de Zona Agroecológica da FAO tem sido amplamente aplicado com diversos objetivos. Entre esses, destacam-se a estimativa de produtividade (Monteiro; Sentelhas, 2014), a semeadura nas melhores épocas do ano (Rolim; Sentelhas; Barbieri, 1998), a avaliação da tolerância de das culturas ao déficit hídrico (Battisti; Sentelhas, 2015) e a análise do manejo agrícola buscando a maior eficiência no campo (Battisti *et al.*, 2013).

Para obter a produtividade potencial de uma cultura, pode se realizar a taxa de produtividade bruta, usando a cultura de referência corrigida pelos fatores adimensionais:

$$PP = PB \times C_{IAF} \times C_R \times C_C \times C_{UM} \times ND \quad (10)$$

Onde PB é a produtividade bruta de matéria seca ($kg, MS \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), C_{IAF} é o coeficiente de correção do índice de área foliar (IAF), C_R é o coeficiente de correção da respiração, C_C é o coeficiente de correção da fração colhida (índice de colheita), C_{UM} é o coeficiente de correção da umidade da fração colhida, ND é o número de dias do ciclo.

A produtividade máxima é influenciada diretamente por fatores que afetam a produção potencial (PP) e por fatores que são devidos à disponibilidade de água no solo, como podemos ver a seguir:

$$PA = PP \times \left\{ 1 - K_y \times \left[1 - \left(\frac{E_{Tr}}{E_{Tm}} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

Onde K_y é o coeficiente adimensional de sensibilidade ao déficit hídrico, E_{Tr} é a evapotranspiração real da cultura, E_{Tm} é a evapotranspiração máxima da cultura, que

pode ser obtido pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente da cultura (Kc).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse dos dados da estação agrometeorológica localizada no município de Ilha Solteira – SP, e com auxílio de planilhas eletrônicas no Software Excel®, foram aplicadas as metodologias supracitadas para a obtenção dos seguintes resultados.

Observou-se que os dados médios de ETo mensais apresentaram comportamento semelhante quanto as metodologias propostas para calcular a ETo.

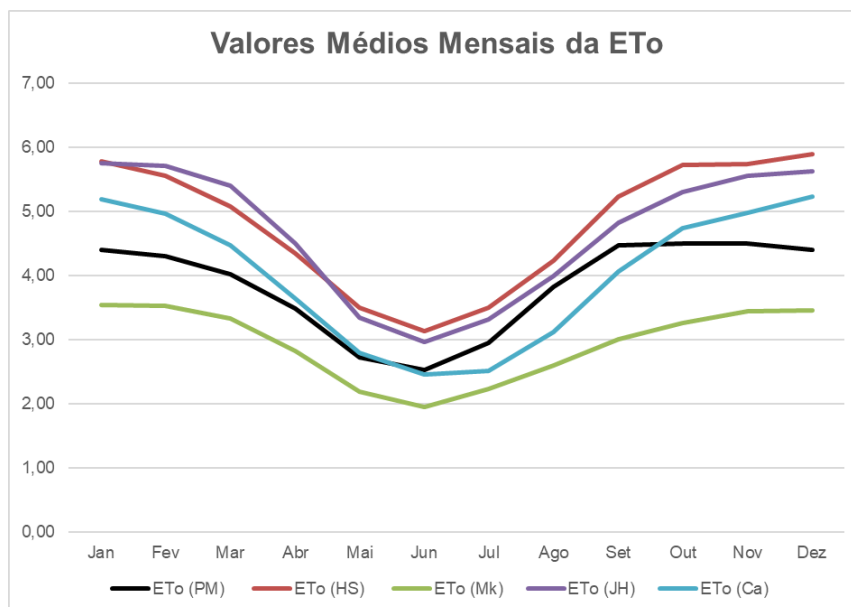
Tomando como padrão o método de Penman-Monteith (PM), pode-se verificar que o método de Makkink (MK) subestimou os valores de ETo em todos as médias mensais do período de 2012 a 2022 (Figura 1). Resultado semelhante foi encontrado por Rizo e Cicero (2022), que buscavam comparar o desempenho de alguns métodos para estimar a ETo para a o sul de Goiás, inclusive o de MK, onde o mesmo resultou na subestimação da ETo quando comparado a outros métodos inclusive ao de PM.

Para o período de setembro a abril, compreendesse que os valores médios mensais de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Haise (JH) e Camargo (CA) foram superestimados em relação ao encontrado com PM (Figura 1). Avaliando o desempenho dos métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise e outros, na estimativa da ETo para a cidade de Chapadinha – MA, foi constatado que ambos os métodos (HS e JH) superestimaram os valores de ETo quando comparados ao método padrão de PM (Passos, Raposo; Mendes, 2017a).

Segundo Ghiat, Mackey e Al-Ansari (2021), o método HS demanda menos dados de entrada e é particularmente vantajoso quando os dados meteorológicos não estão acessíveis, principalmente em relação à radiação solar líquida. No entanto, a inclusão de uma constante empírica nesse modelo pode resultar em estimativas superestimadas das taxas de ETo, comprometendo a sua precisão.

Em relação ao período de maio a agosto, podemos observar uma diminuição da ETo de modo geral, sendo ocasionada pela menor quantidade de radiação solar e consequente menor temperatura, influenciando assim nos valores calculados de ETo pelos métodos avaliados. Outro fato relevante é que o valor de ETo calculado pelo método de CA, nos evidencia que seus resultados abaixam a ponto de serem menores que os calculados por PM para o período de maio a setembro, onde este retorna a seus valores subestimados de ETo (Figura 1).

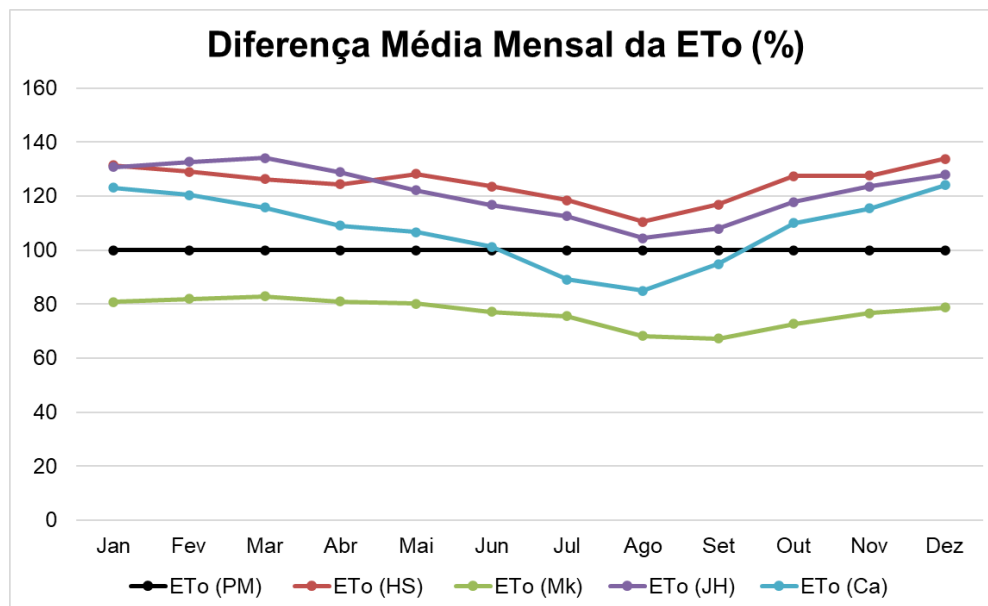
Figura 1 - Valores médios diários na escala mensal de ETo calculados pelos métodos de Penman-Monteith (PM), Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH) e Camargo (CA) para o período de janeiro 2012 a dezembro de 2022



Outra constatação desde agosto a abril são os meses com maior demanda evapotranspirométrica, partindo de 3,83 até 4,5 (PM), e como consequência, podemos observar que esse período é o que apresenta a maior discrepância entre os métodos avaliados, chegando até ao valor de 5,89 de ETo na média do mês de dezembro com o método de HS. Rizo e Cicero (2022) encontrou resultados semelhantes, onde o mesmo identificou que este método superestimou os valores de ETo.

Podemos verificar na Figura 2 a variação em porcentagem das estimativas realizadas pelos métodos empregados, comparando-os com o método padrão de PM sendo considerado 100% (Tabela 1), isso evidencia os resultados das Figuras 1 e 2, onde observa-se que na obtenção da ETo pelos métodos de HS (+25,13%) e JH (+22,1%) superestimaram os valores, já MK (-23,24%) subestimou, diferente de CA que superestimou no período chuvoso e subestimou no período seco (junho a setembro), resultando em uma estimativa média anual de 8,92% maior para as médias mensais de 2012 a 2022.

Figura 2 – Porcentagem da diferença média mensal da ETo calculados pelos métodos de Penman-Monteith (PM), Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH) e Camargo (CA) para o período de janeiro 2012 a dezembro de 2022.



Pode-se notar que os somatórios dos valores médios mensais (Tabela 1), expõe que a estimativa média total anual resultou para o método de PM um acumulado médio de $ETo = 1.402,86$ mm, sendo considerada “0,00” de variação porque assumiu-se que o método de PM é o padrão, comparando-os verificou-se que as estimativas de HS, JH e CA apresentaram incremento médio anual na estimativa da ETo na ordem de 352,48 mm, 308,71 mm e 125,18 mm, respectivamente.

Algo semelhante ocorreu com Santana *et al.* (2018), que com objetivo de estimar a ETo para a cidade de Balsas – MA, constatou que os métodos empíricos de Camargo, Linacre e Hargreaves e Samani superestimaram os resultados para aquela localidade. De acordo com Vishwakarma *et al.* (2022), os métodos baseados em temperatura, como HS, tendem a superestimar a ETo.

Já para a estimativa da ETo pelo método de MK, houve um decréscimo na média anual de 326,02 mm da estimativa encontrada pelo método de PM. Este método quando empregado na estimativa da ETo em Feira de Santana - BA, apresentou o mesmo comportamento, e pode estar relacionado aos coeficientes usados neste método, que foi elaborado em condições climáticas diferentes, originalmente para a cidade de Wageningen, na Holanda (Santos *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) mensal, para a cidade Ilha Solteira – SP, por diferentes métodos no período de janeiro 2012 a dezembro de 2022

Valores Médios Mensais de ET _o (mm)							
Meses	T _{med} (°C)	P (mm)	Penman-Monteith (PM)	Hargreaves-Samani (HS)	Makkink (MK)	Jensen-Haise (JH)	Camargo (CA)
Janeiro	27,0	195,5	136,4	179,3	110,2	178,5	167,9
Fevereiro	27,0	154,3	120,7	155,7	98,8	160,1	145,2
Março	26,8	133,8	124,8	157,7	103,6	167,5	144,7
Abril	25,6	74,9	104,7	130,3	84,9	135,0	114,3
Maio	22,9	52,8	84,8	108,8	68,0	103,7	90,5
Junho	22,3	44,9	76,1	94,1	58,7	88,9	77,1
Julho	22,0	16,1	91,6	108,5	69,2	103,1	81,7
Agosto	23,6	28,9	118,6	131,2	80,9	123,9	100,8
Setembro	26,1	64,0	134,2	156,9	90,3	144,9	127,2
Outubro	27,0	115,9	139,5	177,8	101,4	164,5	153,5
Novembro	26,7	162,9	135,0	172,3	103,4	166,8	155,9
Dezembro	27,1	166,4	136,4	182,6	107,5	174,5	169,3
TOTAL	-	1210,3	1402,9	1755,3	1076,8	1711,6	1528,0
MÉDIAS	25,4	-	116,9	146,3	89,7	142,6	127,3
Variação (mm)	-	-	0,00	352,48	-326,02	308,71	125,18
Diferença (%)	-	-	100,00	125,13	76,76	122,01	108,92

Segundo os resultados dos indicadores estatísticos, para o cálculo da estimativa da ET_o mensal, percebe-se que as equações empíricas de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH) e Camargo (CA) qual foram empregadas, apresentaram boa correlação quando comparadas ao método padrão de Penman-Monteith (Tabela 2).

Destacando-se as estimativas realizadas pelos métodos de HS e JH (Tabela 2), os quais foram consideradas ótimas segundo a classificação do coeficiente de confiança (c), com boa correlação pelo coeficiente de determinação (R²) (0,97 e 0,93 respectivamente). E segundo o índice de concordância de Willmott (d), todas equações empregadas apresentaram uma ótima correlação ao método de PM. Vishwakarma *et al.* (2022), comparando ET_o com 11 anos de dados, verificaram que o método de HS foi o melhor modelo entre os modelos baseados em temperatura estudados, em comparação com PM. Resultado este, também encontrado por outros autores (Dhakal; Gautam; Bhattarai, 2020; Djaman *et al.*, 2017, Muhammad *et al.*, 2019).

Em relação a raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE), é usualmente empregada para verificar a acurácia dos valores analisados, mantendo as

proporções do conjunto de dados avaliados, porém, elevados ao quadrado (FOX, 1981).

Estes resultados são mais favoráveis do que os encontrados por Nandorf *et al.* (2020), que avaliou a estimativa da ETo pelos métodos de Hargreaves-Samani, Radiação Solar FAO, Makkink e Jensen-Haise para o município de Piracicaba – SP, onde os autores recomendaram a utilização do método de Hargreaves-Samani, pelo custo, praticidade e simplicidade dê-se empregar em propriedades agrícolas e em pesquisas, pois utiliza apenas um termômetro.

No caso da estimativa de ETo por CA (Tabela 2), foi a estimativa que apresentou o menor valor 0,51 mm, isso pode ser verificado pelas Figuras 1 e 2, onde mostram sua proximidade com PM. Isso o torna mais sensível aos erros extremos, identificando assim quanto menor seu valor menor é a diferença entre o modelo e a estimativa (Hallak; Pereira Filho, 2011).

Tabela 2 - Indicadores estatísticos de comparação entre os métodos empregados, sendo a raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de confiança (c) para os meses de 2012 a 2022

MÊSES DE 2012 A 2022					
Métodos	RMSE	d	R ²		c
ETo (HS)	1,025790	0,984856	0,967484	0,92	Ótimo
ETo (CA)	0,511198	0,999434	0,907962	0,82	Muito bom
ETo (JH)	0,952333	0,988029	0,927700	0,85	Ótimo
ETo (MK)	0,935277	0,979966	0,930179	0,84	Muito bom

Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo): Hargreaves-Samani (HS), Camargo (CA), Jensen-Haise (JH) e Makkink (MK), comparados com Penman-Monteith (PM).

Visando minimizar os impactos ocasionados pelas mudanças climáticas ou ao menos acompanhá-los e quantificá-los, podendo-se planejar e buscar as melhores alternativas para mitigar esses efeitos na produção agrícola, o balanço hídrico (BH) tem sido utilizado, como uma ferramenta indispensável para determinar os teores de água no solo e o estresse hídrico para as plantas em função das variáveis climáticas (Ascoli *et al.*, 2017; Bispo; Hernandez; Teixeira, 2017).

Com os resultados do extrato do balanço hídrico normal (BH normal) (Figura 3) pode-se observar a distribuição da deficiência (DEF -1) e do excedente (EXC) hídrico para a média mensal para cada mês do ano, no período de dados de 01 de janeiro de 2012 a 31 de dezembro de 2022. Evidenciando as diferenças que ocorreram em função das estimativas da ETo calculadas pelos métodos empíricos, que foram a

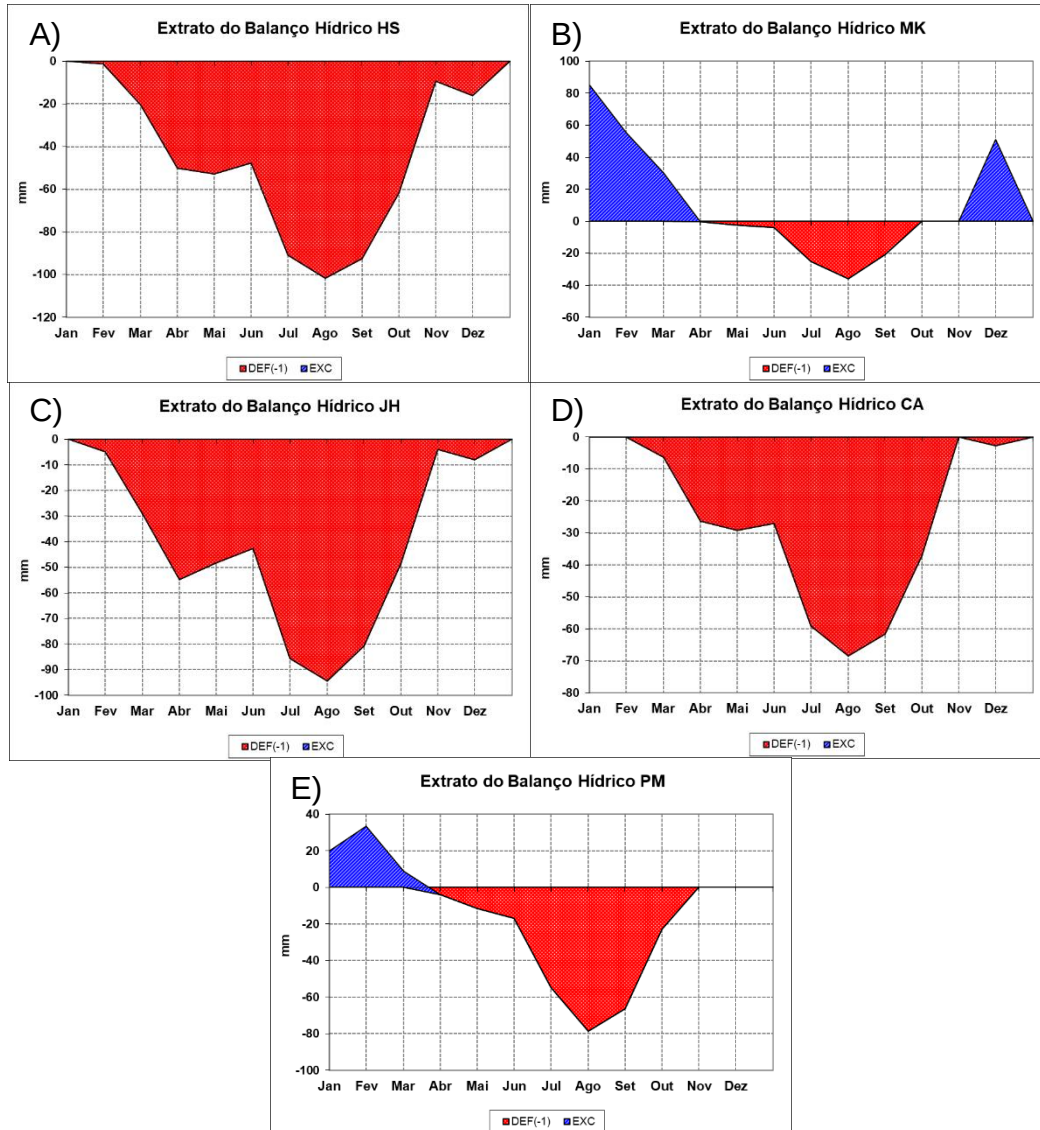
única fonte de variação para os cálculos do BH normal, a fim de expressar os impactos que estes podem ter sobre o sistema solo-água-atmosfera em cada cenário (ETo) estudado.

Ao analisar o BH Normal para o método de PM (Figura 3E), pode-se perceber que por um período do ano o solo encontra-se com deficiência hídrica, indo de meados de abril ao final de outubro, demonstrando a necessidade e importância da irrigação para o clima do município de Ilha Solteira – SP. O estresse hídrico afeta a fotossíntese das plantas, e consequentemente seu crescimento vegetativo, influenciando assim a produção de biomassa e a produção, podendo reduzir a produtividade dos cultivos agrícolas (Bergamaschi; Bergonci, 2017).

Quando comparamos o método padrão de PM (Figura 3E) com os demais, fica evidente que o método de MK (Figura 3B) apresenta a menor deficiência e os maiores índices de excedente hídrico; isso se dá devido aos valores calculados de ETo serem os menores quando comparados aos demais. Rizo e Cicero (2022) também constataram esse comportamento de subestimação da ETo pelo método de MK. Dessa forma, esse cenário apresenta uma menor retirada de água, uma vez que as entradas de água pela precipitação (P) foram mantidas com o as médias dos somatórios mensais da P dos 10 anos.

Em relação aos demais métodos de ETo (HS, JH e CA) (Figuras 3A, 3C e 3D), pode-se observar que os períodos de deficiência hídrica se tornam os maiores quando comparados ao método padrão de PM.

Figura 3 - Extrato do Balanço Hídrico Normal com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) para as médias mensais de janeiro 2012 a dezembro de 2022



DEF: deficiência hídrica; EXC: excedente hídrico; HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

Nota-se que o período de estiagem é bem definido e prolongado, chegando a durar 7 meses (Figura 4E), o que compreende os meses de abril a outubro. Essa informação é importante pois com base no balanço hídrico e acompanhamento da disponibilidade de água no solo os produtores podem organizar o seu calendário de plantio afim de que não falte água para a lavoura, e utilizar o sistema de irrigação de maneira mais eficiente, uma vez que nessas condições torna-se indispensável o emprego da irrigação para a obtenção de altas produtividades e maior segurança econômica (Aires; Hernandez, 2020).

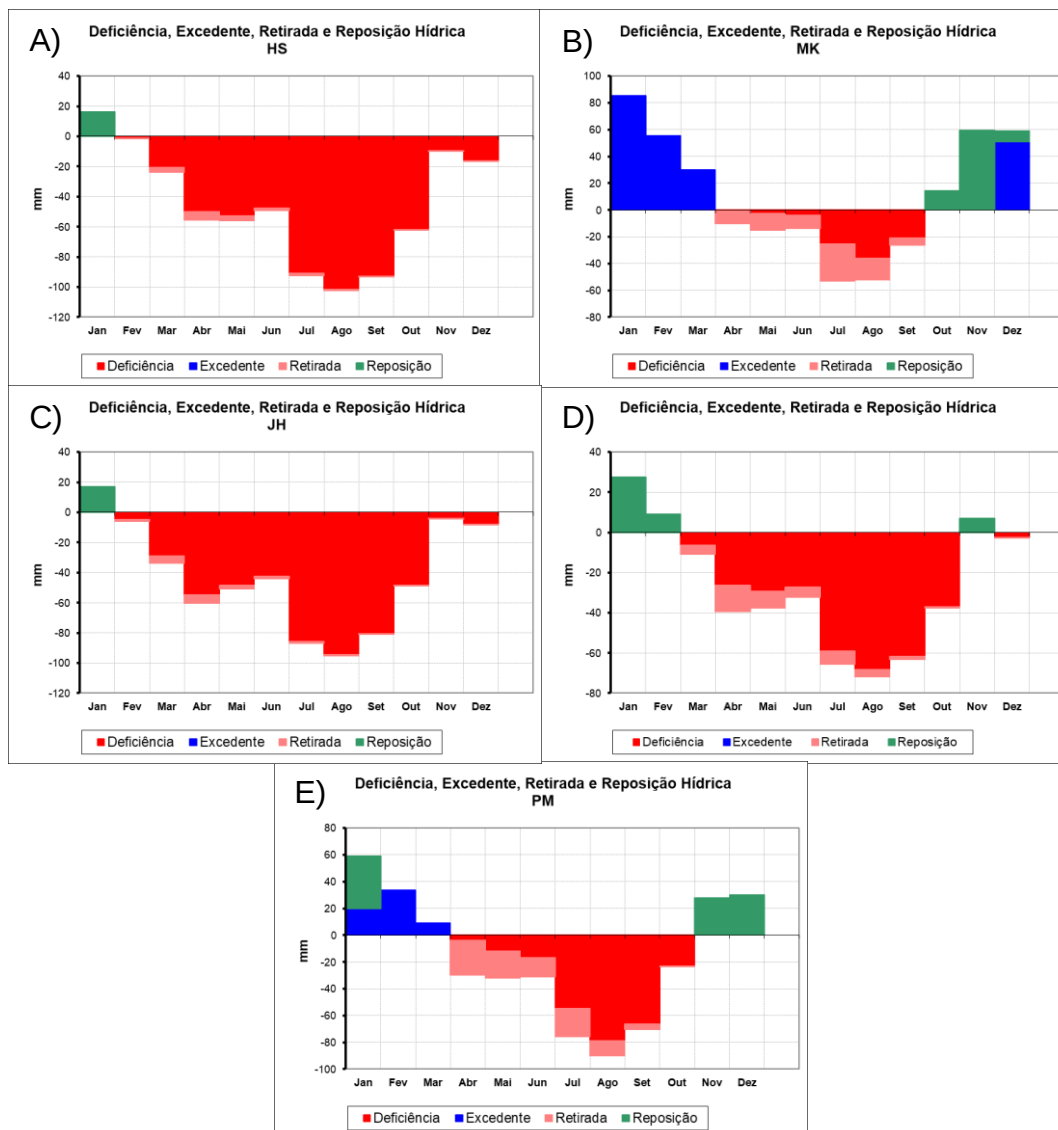
Com relação ao excedente hídrico pode-se verificar que o método de MK (Figura 4B) apresentou os maiores valores médios mensais, isso pode estar ocorrendo devido aos menores valores de deficiência e retirada quando comparado aos demais métodos.

De modo geral, o método de CA (Figura 4D) foi o que mais se aproximou do comportamento dos resultados de PM quando observados as variáveis de deficiência, excedente, retirada e reposição.

Já os métodos de HS (Figura 4A) e JH (Figura 4C), foram os que apresentaram menores valores de excedente e reposição, e conseqüentemente resultando nos maiores índices de deficiência e retirada de água quando comparados ao método de PM. Isso evidencia que estes métodos quando aplicados ao BH normal poderão causar tomadas de decisões equivocadas, devido as maiores estimativas de ETo que obtiveram.

O déficit hídrico pode ser adiantado ou prorrogado para um mês que não era comum, isso pode estar ligado as alterações nas variáveis climáticas que compõem o balanço hídrico (Oliveira; Hernandez; Teixeira, 2019). A alteração da ETo pelos métodos avaliados nesse trabalho, promoveram a antecipação e aumento no período da deficiência hídrica para o município de Ilha Solteira – SP. Os meses de fevereiro e março, novembro e dezembro entraram na zona de deficiência hídrica, aumentando de 7 para 11 meses de deficiência hídrica quando utilizasse os métodos de HS e JH, em comparação com o método de PM.

Figura 4 - Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica de acordo com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) com base nas médias mensais de janeiro 2012 a dezembro de 2022



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

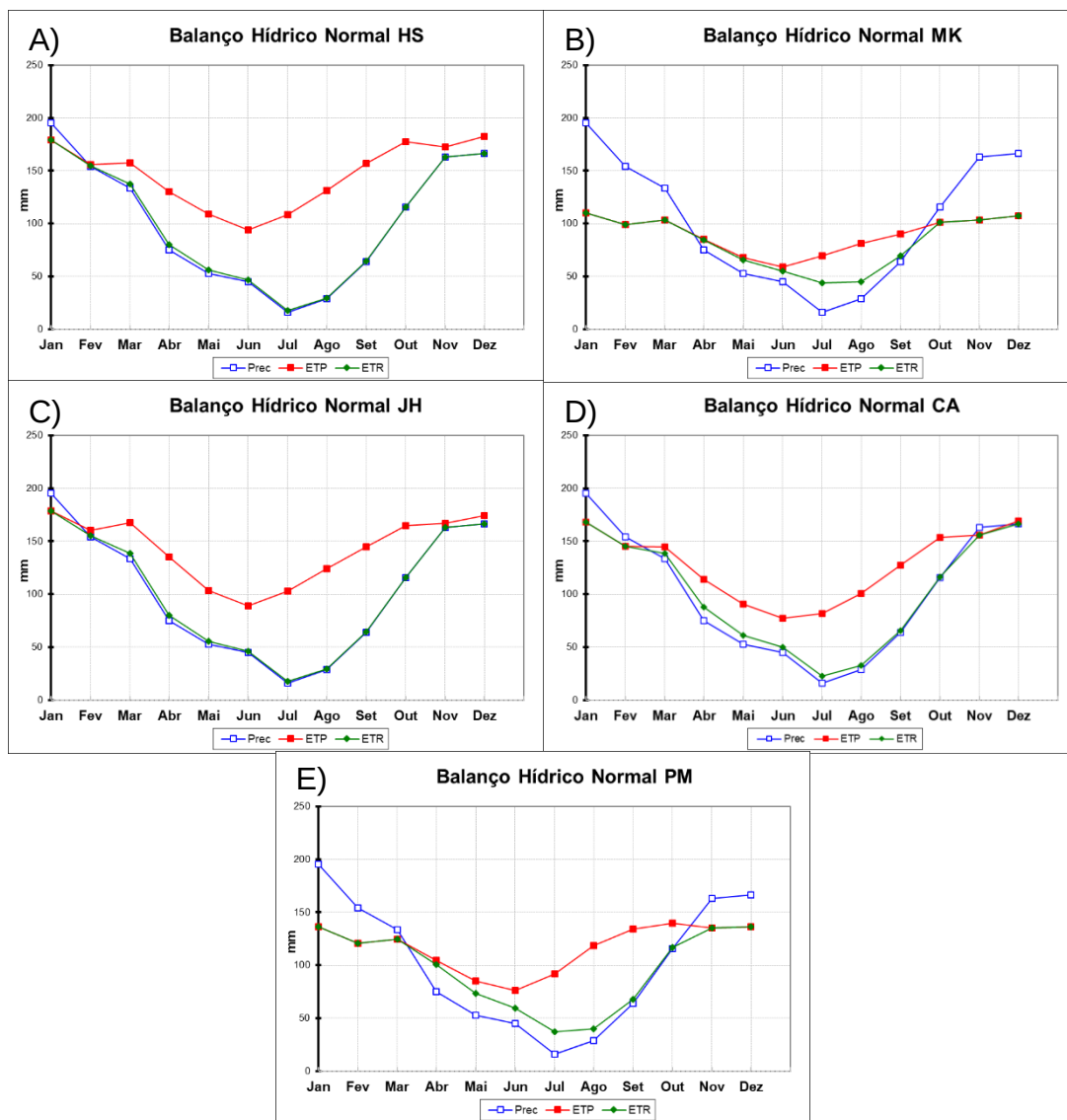
Segundo o BH normal, o mês de janeiro possui a maior disponibilidade hídrica para o município de Ilha Solteira – SP, fica evidente o maior índice médio de chuva deste mês (Figura 5E). Identificou-se que, quanto menor os índices médios de precipitação, menores serão os resultados da evapotranspiração de referência (ET_o) para todos os métodos (Figura 5).

Observando a evapotranspiração potencial (ETP) percebe-se um comportamento semelhante juntamente com a ETR entre os métodos de HS (Figura 5C) e JH (Figura 5A); tendo os valores de ETR muito próximos ao de Precipitação (P).

Comparando os métodos de HS e JH com PM (Figura 5E), foram encontrados resultados superestimados para os valores de ETP, principalmente para os meses de novembro e dezembro, estando eles acima, até mesmo da precipitação média, sendo que os mesmos apresentam médias superiores de ETP acima da P desde fevereiro até dezembro.

A má distribuição da precipitação e os altos valores de evapotranspiração, contribuem para que na região Noroeste do estado de São Paulo o mês de agosto seja o mais sensível para a agricultura da região, apresentando período de déficit de água por até 8 meses no ano (Santos *et al.*, 2010; Silva Junior *et al.*, 2018).

Figura 5 - Balanço hídrico normal para os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) com base nas médias mensais de janeiro 2012 a dezembro de 2022



PREC: precipitação; ETP: evapotranspiração potencial; ETR: evapotranspiração real; HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

Segundo Oliveira, Hernandez e Teixeira (2019), no mês de fevereiro foram encontrados deficiência hídrica e o mês mais crítico encontrado por eles era o de julho apresentando 90 mm de deficiência hídrica. Mas, podemos notar que o déficit se inicia a partir de março e com o menor valor encontrado em outubro com 2,96 mm para a estimativa por PM (Figura 6E).

Para o BH normal calculado pelo método de MK (Figura 4B), pode-se visualizar que este método apresenta os menores valores de ETP e ETR quando comparados ao método de PM (Figura 4E).

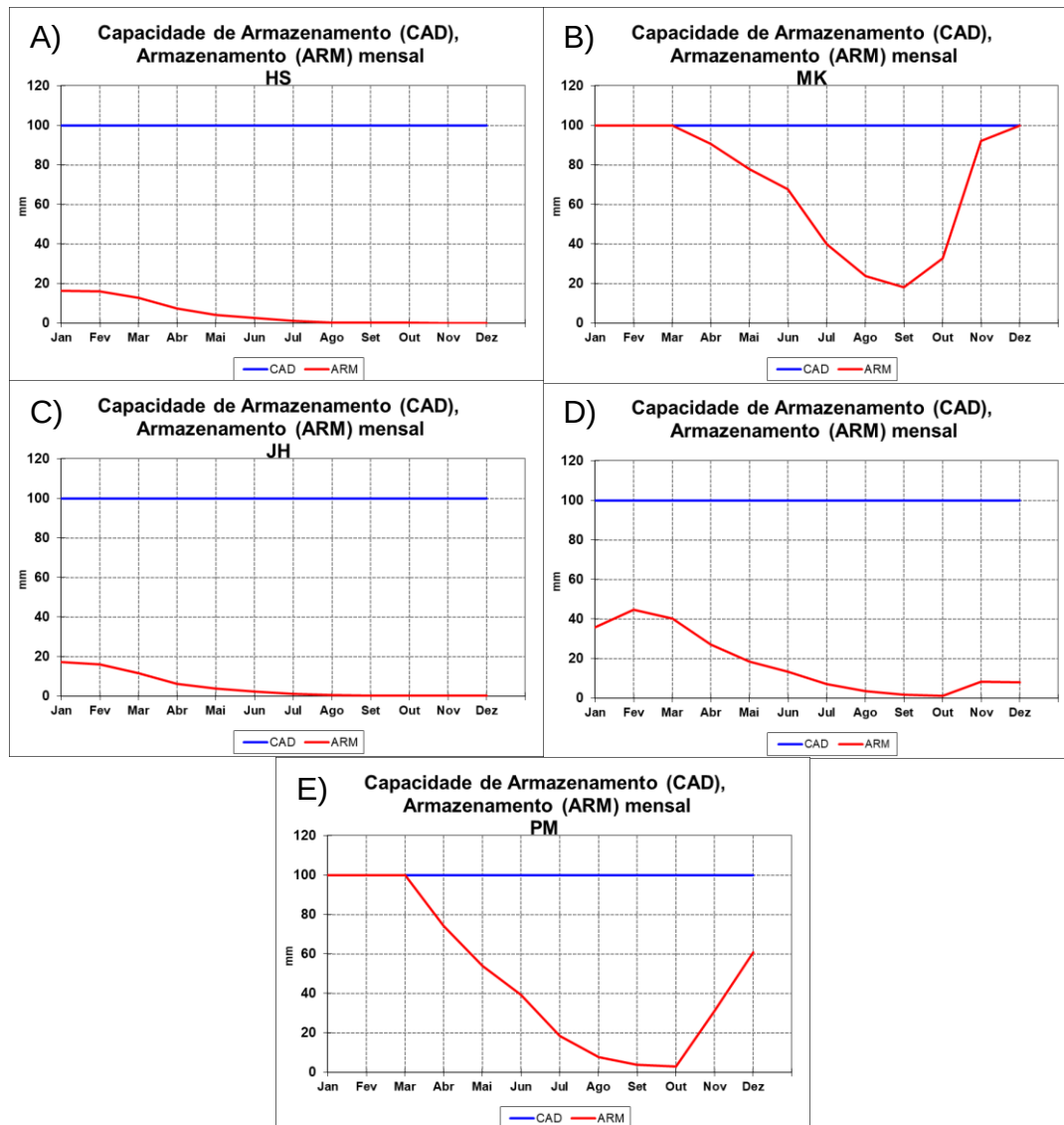
Foi considerado uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm nos cálculos do BH normal, cujo valor é comumente utilizado para culturas anuais, assim o valor aparece como um referencial estático na Figura 6. No armazenamento mensal médio (ARM) calculado, foi observado que o mesmo apresentou comportamentos bem distintos em relação aos métodos empregados. Sendo que atingiram a CAD foram o MK (Figura 6B) e o PM (Figura 6E), entre os meses de dezembro a março para o MK e janeiro e fevereiro para PM.

Segundo o ARM mensal, houve um melhor resultado aparente do MK (Figura 6B) quando analisamos o período de maior demanda hídrica, pois o mesmo foi o único que apresentou valores de CAD superiores a 20 mm neste período. Contudo, como mencionado anteriormente, isso reflete ao maior valor de excedente hídrico ocasionado pela menor ETo calculada por este método. O solo apresenta condições ideais para as plantas crescerem quando ele se encontra no período de excedente hídrico (Passos; Zambrzycki; Pereira, 2017).

Notasse que o HS (Figura 6A) e o JH (Figura 6C) apresentaram os menores valores médios de ARM obtidos na pesquisa. Isso possivelmente está ligado aos maiores valores de ETo que foram calculadas para estes métodos, corroborando com a diminuição drástica dos níveis de água do solo.

Para o método de CA (Figura 6D) pode-se verificar que o mesmo se encontra em uma posição mediana referente aos resultados obtidos. Tendo valores maiores que os de HS e JH, contudo não conseguiu atingir a CAD do solo como MK e PM.

Figura 6 - Capacidade de armazenamento (CAD) e o armazenamento mensal médio (ARM) em função dos valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) com base nas médias mensais de janeiro 2012 a dezembro de 2022



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

O planejamento na agricultura é fundamental para seu êxito, e uma das ferramentas que podem ser empregadas é o balanço hídrico, no qual busca-se conhecer e estudar as principais variáveis climáticas que interferem na produção agrícola. Com base nele identificasse os principais períodos onde a planta pode apresentar estresse, seja pela falta ou excesso de água, se há ou não necessidade de irrigação ou pelas temperaturas fora da condição térmica ideal para as plantas (Ascoli *et al.*, 2017; Blain, 2009; Bispo Teixeira, 2017).

No Balanço Hídrico Sequencial (BHSeq) realizado com as médias de cada decêndio para o período de 01 de janeiro de 2020 a 31 de dezembro de 2022 (Figuras 07 e 08), da cidade de Ilha Solteira – SP, pode-se observar que todos os métodos usados para a estimativa da ETo resultaram em excedentes hídricos (6 primeiros decêndios) nos meses de janeiro a fevereiro de 2020 (Figuras 7 e 8A).

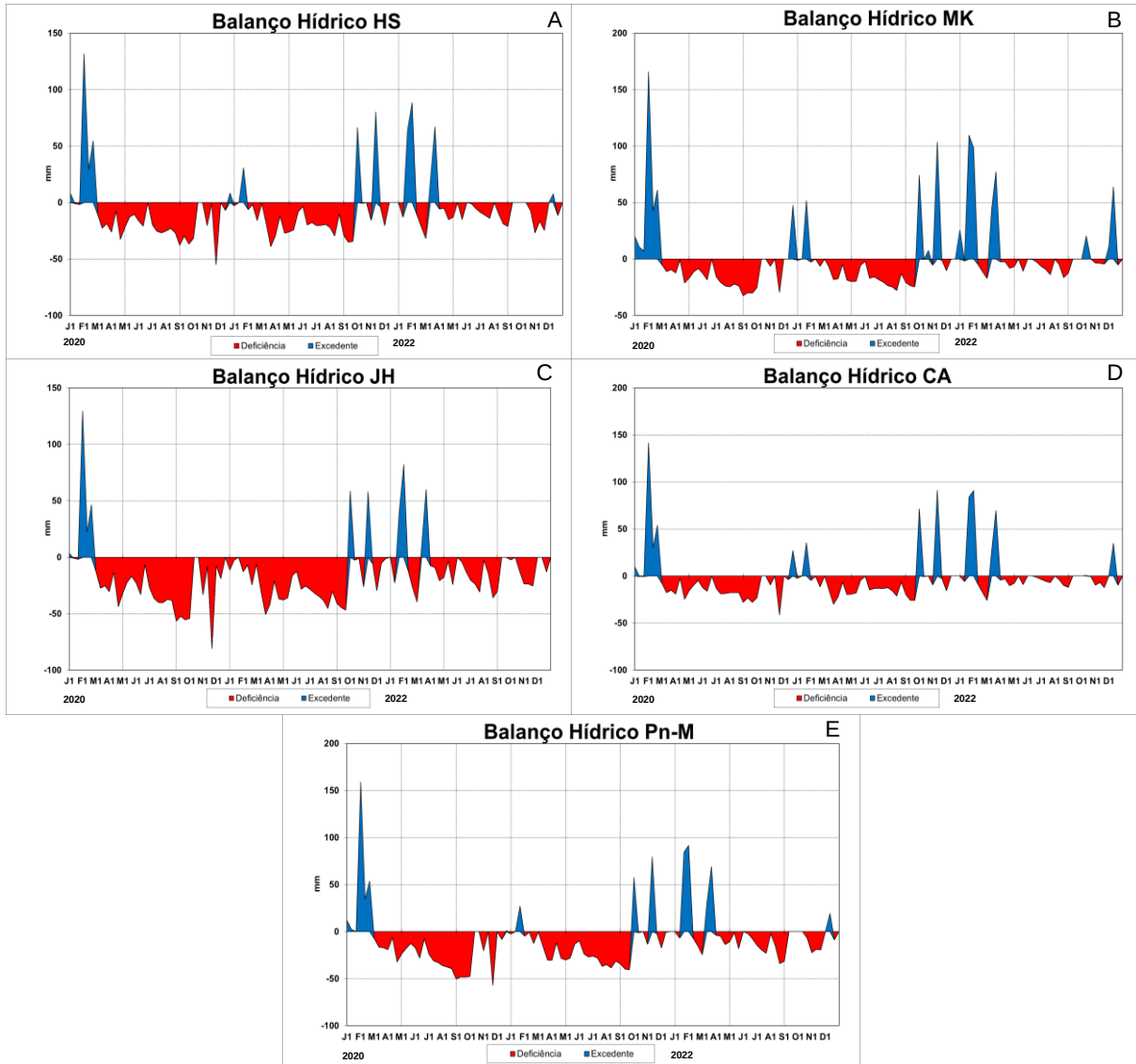
A partir de março percebe-se que iniciou o período de deficiência hídrica ocasionado pela redução da precipitação, que retomou em outubro de 2020 e foi até abril de 2021 (Figuras 7 e 8B). Contudo, observa-se na Figura 6, que todos os balanços realizados demonstraram esse efeito no resultado do excedente hídrico, menos os valores resultantes da estimativa feita por JH (Figura 7C), que superestimou a deficiência hídrica nesse período e em grande parte dos decêndios avaliados (Figura 8B).

Nos meses de março de 2020 a outubro de 2021, a estimativa feita pelo método de JH (Figura 7C) resultou em um período maior de deficiência hídrica quando comparada aos demais métodos.

As estimativas realizadas pelo método de MK, superestimaram o excedente hídrico (Figura 7B e 8A), seguida pelos métodos de CA (Figura 7D e 8A) e HS (Figura 7A e 8A).

As condições climáticas precisam ser acompanhadas e estudadas, para identificar as limitações e possibilidades da região produtora, pois a agricultura depende dos fatores climáticos, por isso, o balanço hídrico climatológico está ligado a todas as fases de desenvolvimento das culturas agrícolas (Oliveira, 2023).

Figura 7 - Extrato do balanço hídrico sequencial (BHSeq) com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) para as médias descendias de janeiro 2020 a dezembro de 2022



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

Figura 8 - Excedente e Deficiência Hídrica estimados com base nos valores de ETo, calculado pelo método de Penman-Monteith (PM) comparado com os métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH) e Camargo (CA), para as médias descendias de janeiro 2020 a dezembro de 2022



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

Para que ocorra o abastecimento popular com alimentos de forma satisfatória, é necessário que as condições climáticas e hidrológicas sejam conhecidas e favoráveis, devendo ter planejamento e estratégias para contornar as possíveis intempereis, pois a agricultura é influenciada pelo regime hídrico das chuvas e altas temperaturas de formas diferentes em cada região (Silva *et al.*, 2022; Adjovi *et al.*, 2018).

Os resultados das análises de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica (Figura 9) estimadas pelos métodos empíricos, demonstram comportamentos semelhantes, com algumas alterações.

Nos métodos de HS, JH e CA (Figuras 9A, 9C e 9D) ocorreu uma subestimação no segundo e terceiro decêndio de janeiro de 2020, apresentando uma deficiência hídrica nesse período, diferente do encontrado por MK (Figuras 9B) e PM (Figuras 9E).

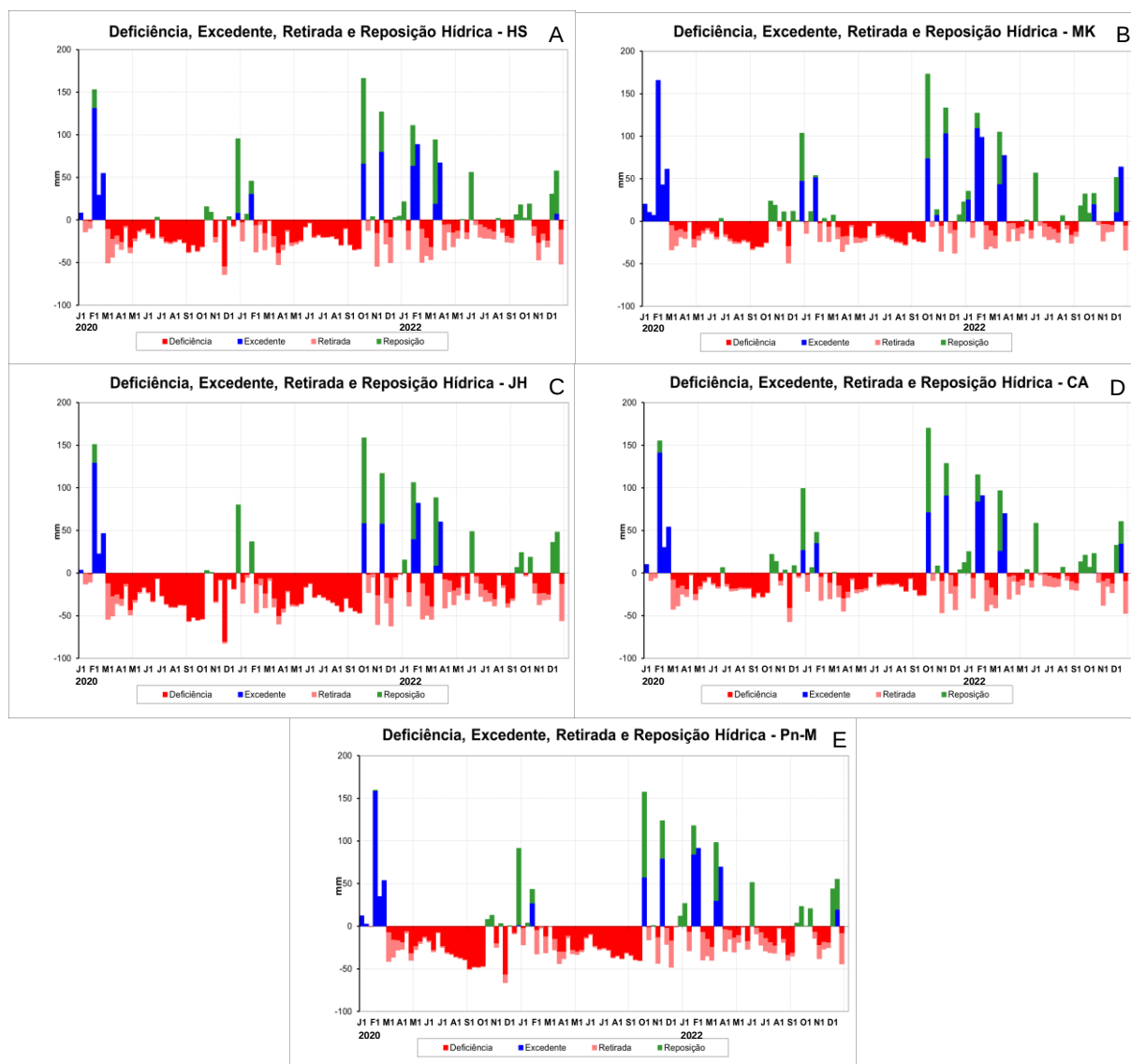
Para o ano de 2023 no balanço hídrico sequencial (Figura 9), nota-se que o mês de março não choveu, como o BH normal indica que normalmente é um mês chuvoso, dá-se o nome de veranico, onde na estação chuvosa apresenta um período onde ocorre chuvas (Silva *et al.*, 2015).

Oliveira (2023), identificou um veranico no mês de fevereiro enquanto analisava os dados do período de 1982 – 2019 no balanço hídrico de Carbonita – MG, isso acontece pela disponibilidade hídrica do solo, onde a entrada de água (precipitação) foi baixa e já a saída de água (evapotranspiração) foi alta no mesmo período, estimando assim o Deficiência Hídrica (DEF).

Observou-se que para a estimativa realizada pelo método de PM resultou em uma reposição no terceiro decêndio de dezembro, entretanto, os métodos de HS, MK e CA superestimaram essa reposição de água, sugerindo um excedente hídrico, sendo que a estimativa de PM não apresentou isso.

O resultado desta estimativa pode ser em virtude ao método de MK ter subestimado a ETo em relação a PM na cidade de Ilha Solteira. Por isso, há necessidade de verificar a acurácia destes métodos e sua influência nas estimativas da ETo são relevantes, pois, podem resultar em informações subestimadas ou sobrestimadas em uma mesma localidade.

Figura 9 - Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica estimadas por decêndios de janeiro 2020 a dezembro de 2022, com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM)



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

Os gráficos da Figura 10 expõem o comportamento da precipitação; da evapotranspiração potencial (ETP), onde está relacionada as condições ideais de disponibilidade de água e equilíbrio entre a evaporação e a transpiração; e da evapotranspiração real (ETR), que está ligada a perda d'água para a atmosfera por evaporação e transpiração, podendo alcançar no máximo o valor da ETP (Castiglio, Campagnolo; Kobiyama, 2021).

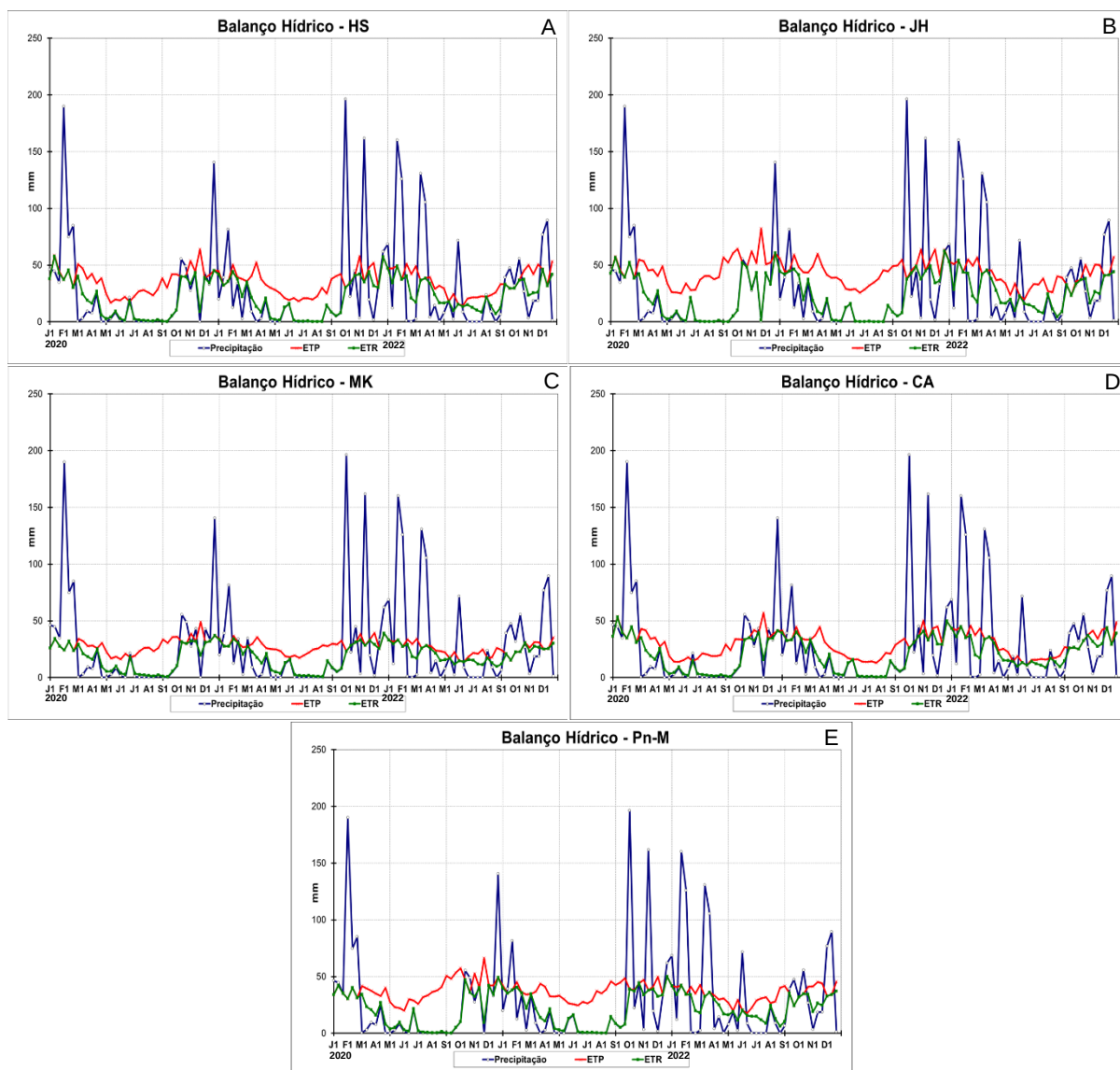
Torna-se evidente com base no resultado do balanço hídrico sequencial (BHSeq), que a precipitação natural ao longo dos 3 anos consecutivos avaliados, na cidade de Ilha Solteira - SP não é o suficiente para manter os níveis da ETR no seu máximo (ETP) nos anos de 2020 a 2022 (Figura 10). Isso só ocorreu do primeiro decêndio de janeiro ao terceiro decêndio de fevereiro no ano de 2020 e no ano de 2021 ocorreu do terceiro decêndio de dezembro (D3) ao segundo decêndio de fevereiro (F2). Já em 2023, a ETR foi mais próxima da ETP a partir do 2 decêndio de setembro (S2) até o segundo decêndio de outubro (O2).

A ETR só conseguiu atingir a ETP quando no mesmo decêndio houve precipitações superiores a ETP (Figura 10), e a estimativa realizada pelo método de JH (Figura 10B) apresentou os maiores valores de ETP, culminando nos valores mais discrepantes entre a ETP e a ETR.

Oliveira (2023), observou que de novembro a março a ETR foi igual a ETP, indicando que ocorreu a máxima evapotranspiração nestes meses, devido a disponibilidade de água no solo ocasionado pela precipitação elevada. E com a diminuição da precipitação a ETR ficou mais baixa que a ETP.

Enquanto MK e CA (Figuras 10C e 10D) subestimaram os valores de ETP resultando em valores de ETR mais próximos. Já o método de HS (Figura 10A), apresentou comportamento semelhante em relação ao método de PM (Figura E), só que subestimando a ETP no período seco e superestimando no período chuvoso, semelhante ao que ocorreu com a estimativa de JH (Figura 10B).

Figura 10 - Balanço hídrico sequencial (BHSeq) para os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) com base nas médias dos decêndios de janeiro 2020 a dezembro de 2022



ETP: evapotranspiração potencial; ETR: evapotranspiração real; HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

Na elaboração do BH climatológico pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), os dados necessários para a construção do mesmo são: temperatura, precipitação, ETP, ETR e da capacidade de água disponível no solo (CAD) máxima. A CAD é definida em função do tipo de solo, da cultura a ser implantada e pela quantidade de água do solo entre o ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de campo (CC) (Borges; Hernandez; Fauvel, 2021).

Ao analisar a capacidade de água disponível no solo (CAD) e o armazenamento de água decendial médio (ARM) nos decêndios de 2020, percebe-se que ao longo do ano o armazenamento de água no solo é menor nos dois últimos decêndios do mês de março indo até o segundo decêndio (Figura 11).

Em 2020 e 2021 houve uma estação seca bem definida, longa e severa, contudo, em 2022 observou-se que o armazenamento de água do solo regrediu, mas não tão crítico como nos anos anteriores segundo a estimativa realizada por PM (Figura 11E).

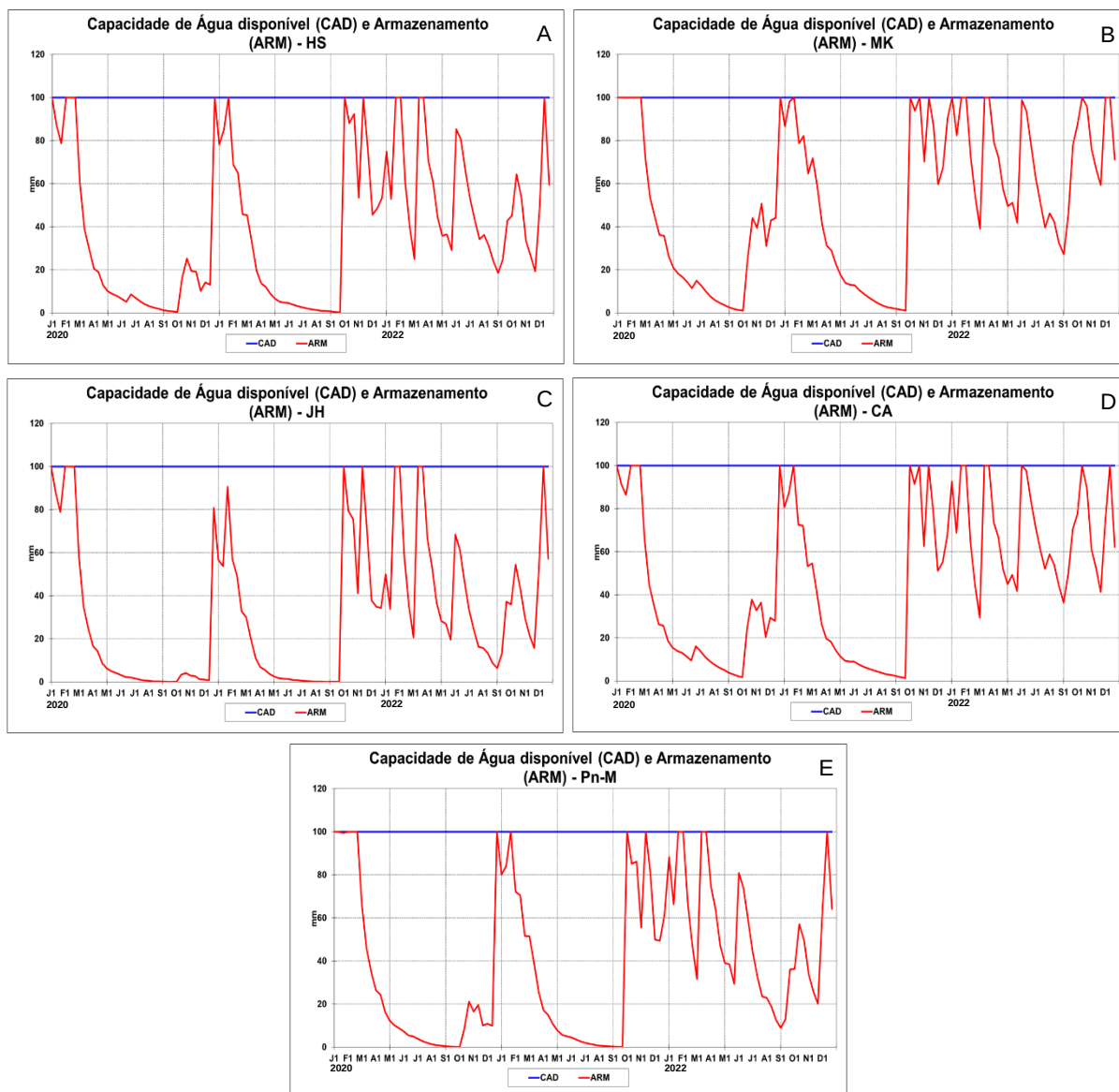
Albuquerque *et al.* (2020) encontraram resultados similares quando analisaram a CAD em diferentes profundidades na Fazenda Santa Luzia, município de Jaborandi, BA, onde o déficit hídrico foi evidente e durou sete meses, com seu ápice em setembro.

Em 2023 o ARM decendial médio foi menos intenso devido a maior ocorrência de precipitação nesse período (Figura 11E).

Em boa parte dos decêndios as estimativas feitas pelos métodos de HS e JH (Figura 11A e 11C) apresentaram comportamento semelhantes ao de PM (Figura 11E), sendo que a estimativa por HS foi a que mais se assemelhou a de PM.

As análises do BH Normal e Sequencial evidenciaram que os meses de março a outubro ocorre uma baixa precipitação, resultando em deficiência hídrica nesse período, que pode ser contornada pelos agricultores que pretendem realizar plantios nestes meses pela adoção da irrigação, trazendo assim mais segurança e renda.

Figura 11 - Capacidade de armazenamento (CAD) e o armazenamento decendial médio (ARM), em função dos valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) para o período de janeiro 2020 a dezembro de 2022



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

O balanço hídrico de cultivo é crucial para otimizar o uso da água na agricultura, garantindo eficiência e sustentabilidade. Dessa forma, a gestão adequada da água nos cultivos é fundamental para enfrentar os desafios da escassez hídrica e das mudanças climáticas. Analisar as necessidades hídricas das plantas é essencial para tomar decisões assertivas que maximizem a produtividade e minimizem os impactos ambientais.

Deste modo, é necessário determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c), que é calculada pelo produto do coeficiente de cultivo (K_c), variável para cada fase da cultura, pela evapotranspiração de referência (ET_o). Sendo assim, possível determinar a demanda hídrica da cultura.

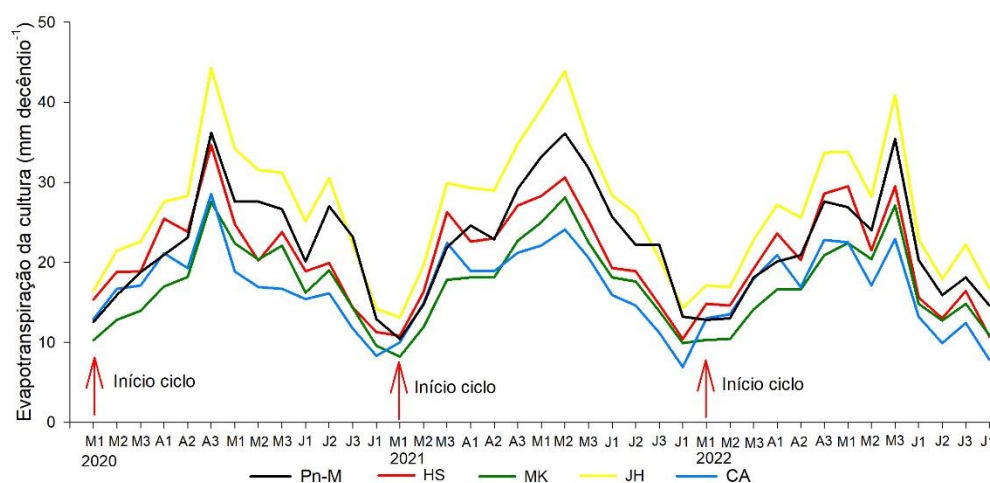
Segundo Shirmohammadi-Aliakbarkhani e Saberali (2020), a demanda hídrica da cultura são influenciadas por demandas ambientais ao longo da estação de crescimento, e cada cultura possui uma estação de crescimento única, determinada por suas necessidades específicas de cultivo e pelas condições ambientais predominantes.

A Figura 12 apresenta a evapotranspiração da cultura (ET_c), realizada pelos métodos HS, MK, JH, CA e PM, para os meses do ciclo da cultura do milho, com plantio realizado em março e finalização do ciclo no primeiro decêndio de julho.

O método de HS foi o mais similar ao PM, principalmente nas fases de menor demanda da cultura, compreendida nos meses de março e julho. O método de JH superestimou os valores de ET_c , com maior atenção para as fases de maior demanda da cultura, entre os meses de abril e maio. Já os métodos MK e CA subestimaram os valores da ET_c .

Nandorf *et al.* (2020), estudando os métodos de estimativa da ET_o para a cidade de Piracicaba, Estado de São Paulo, verificaram que os métodos mais indicados para a estimativa são de CA e HS, sendo o último recomendado, devido a simplicidade de sua estimativa, considerando que os demais métodos de estimativa exigiriam investimentos significativos em infraestrutura agrometeorológica, tornando o processo financeiramente mais caro.

Figura 12 – Evapotranspiração de cultivo estimada por decêndios de março a julho para os anos de 2020, 2021 e 2022, com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM)



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os valores da evapotranspiração da cultura (ETc) em escala decendial para os meses do ciclo da cultura do milho, com plantio no primeiro decêndio de março, para os anos de 2020, 2021 e 2022. O total de ETc para o ano de 2020 para o método padrão PM foi de 270,13 mm para o ciclo da cultura do milho. Observou-se que o método CA subestimou a ETc, seguido dos métodos MK e HS, sendo o último o que mais se assemelhou ao PM, com diferença de 22,27 mm. O método de JH superestimou a ETc em 57,26 mm (Tabela 3).

Para o ano de 2021 o total da ETc foi de 308,12 mm para o método PM. Como observado no ano de 2020, os métodos CA, MK e HS subestimaram a ETc em 86,45, 76,26 e -34,66 mm, respectivamente. O método de JH superestimou a ETc em 54,95 mm (Tabela 4).

O ano de 2022 apresentou menor variação da ETc entre os métodos estudados. O total da ETc para o método de PM foi de 267,59 mm, sendo o método de HS que mais se assemelhou ao PM, o qual subestimou a ETc em 10,26 mm. No entanto, os métodos de CA e MK apresentam decréscimo de 56,69 e 55,78 mm, em comparação ao método PM. O método de JH apresentou comportamento semelhante aos anos anteriores, o qual superestimou a ETc em 58,32 mm (Tabela 5).

Deste modo, para a região de Ilha Solteira pode-se utilizar o método de HS em substituição ao PM, o qual apresenta menor diferença em relação ao método de PM,

possuindo ainda, a vantagem de ser um método que apresenta maior facilidade de uso.

Palaretti, Mantovani e Sediyaama (2014), analisando o comportamento mensal da ETo comparando os métodos de estimativa da ETo, encontraram índice de confiança classificado em "muito bom" para o método de HS, em grande parte das regiões de São Paulo avaliadas. Os autores observaram ainda, um comportamento semelhante ao método HS nas regiões estudadas, com uma tendência à subestimação dos valores. Corroborando com os estudos anteriores, como os de Camargo e Sentelhas (1997), Conceição (2003) e Gonçalves *et al.* (2009), que demonstraram resultados semelhantes em várias localidades do estado. Esses achados sugerem que o método HS é apropriado para estimar a Evapotranspiração de Referência (ETo) nessas áreas.

Para avaliar as condições no noroeste paulista, Conceição (2003) analisou os valores mensais de ETo, calculados por diversos modelos baseados na temperatura do ar, em comparação com os valores de referência (PM). Os resultados indicaram que o modelo de Hargreaves, combinado com o de Thornthwaite ajustado por Camargo *et al.* (1999), demonstrou um desempenho superior aos outros modelos avaliados. Em estudo posterior na mesma região, utilizando dados diários de ETo, Conceição (2010a) constatou que o modelo de Hargreaves apresentou um desempenho considerado bom em relação ao PM.

Tabela 3 – Estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) em escala decendial, para a cidade Ilha Solteira – SP, calculada por diferentes métodos de estimativa de ETo para o ano de 2020, com plantio no primeiro decêndio de março e finalização do ciclo no primeiro decêndio de julho.

Decêndio	T	P	PM	HS	MK	JH	CA
	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Março 1	26,30	0,50	12,51	15,32	10,25	16,41	12,88
Março 2	28,70	3,10	15,88	18,81	12,80	21,45	16,67
Março 3	26,60	9,40	18,75	18,85	13,93	22,59	17,08
Abril 1	26,70	7,70	20,94	25,46	16,98	27,57	21,15
Abril 2	24,40	24,90	23,10	23,81	18,15	28,30	19,27
Abril 3	26,10	0,00	36,18	34,65	27,55	44,28	28,53
Maio 1	23,10	0,00	27,60	24,77	22,38	34,20	18,85
Maio 2	23,00	2,80	27,60	20,22	20,36	31,55	16,89
Maio 3	19,30	8,40	26,64	23,79	22,08	31,22	16,68
Junho 1	22,90	1,50	20,10	18,90	16,20	25,12	15,39
Junho 2	25,30	0,00	27,00	19,91	19,01	30,48	16,12
Junho 3	23,50	21,30	23,20	14,36	14,29	22,31	11,73
Julho 1	21,30	1,00	12,90	11,28	9,57	14,17	8,31
Total	317,20	80,60	292,40	270,13	223,55	349,66	219,53
Média	24,40	6,20	22,49	20,78	17,20	26,90	16,89
Variação	-	-	-	-22,27	-68,85	57,26	-72,87

T: Temperatura do ar; P: Precipitação; PM: Penman Monteith; HS: Hargreaves Samani; MK: Makkink; JH: Jansen Haise; CA: Camargo

Tabela 4 – Estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) em escala decendial, para a cidade Ilha Solteira – SP, calculada por diferentes métodos de estimativa de ETo para o ano de 2021, com plantio no primeiro decêndio de março e finalização do ciclo no primeiro decêndio de julho.

Decêndio	T	P	PM	HS	MK	JH	CA
	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Março 1	25,5	34,6	10,4	10,8	8,2	13,1	10,0
Março 2	27,4	9,1	14,7	16,3	11,9	19,6	14,9
Março 3	28,8	0,0	21,9	26,3	17,8	29,9	22,4
Abril 1	26,8	2,8	24,6	22,6	18,1	29,3	18,9
Abril 2	25,9	19,1	22,9	23,0	18,1	29,0	18,9
Abril 3	23,6	0,0	29,2	27,1	22,7	34,8	21,2
Maio 1	24,5	0,0	33,2	28,3	25,0	39,2	22,1
Maio 2	24,3	0,0	36,1	30,6	28,1	43,9	24,1
Maio 3	23,2	12,4	31,8	25,2	22,5	35,0	20,6
Junho 1	23,7	15,8	25,7	19,3	18,1	28,4	15,9
Junho 2	21,4	0,3	22,2	18,9	17,6	26,1	14,6
Junho 3	20,9	0,0	22,2	14,7	13,9	20,5	11,2
Julho 1	20,5	0,0	13,2	10,4	9,9	14,3	6,9
Total	316,50	94,10	308,12	273,46	231,86	363,07	221,67
Média	24,35	7,24	23,70	21,04	17,84	27,93	17,05
Variação	-	-	-	-34,66	-76,26	54,95	-86,45

T: Temperatura do ar; P: Precipitação; PM: Penman Monteith; HS: Hargreaves Samani; MK: Makkink; JH: Jansen Haise; CA: Camargo

Tabela 5 – Estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) em escala decendial, para a cidade Ilha Solteira – SP, calculada por diferentes métodos de estimativa de ETo para o ano de 2022, com plantio no primeiro decêndio de março e finalização do ciclo no primeiro decêndio de julho.

Decêndio	T	P	PM	HS	MK	JH	CA
	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Março 1	28,4	2,5	12,8	14,8	10,3	17,1	13,0
Março 2	26,6	130,7	13,0	14,6	10,4	16,9	13,5
Março 3	26,3	105,6	18,1	19,2	14,1	22,8	17,9
Abril 1	27,1	4,1	20,1	23,6	16,6	27,2	20,9
Abril 2	23,7	14,5	20,9	20,3	16,6	25,6	16,9
Abril 3	25,8	0,3	27,6	28,6	20,9	33,7	22,8
Maio 1	22,6	8,0	26,9	29,5	22,4	33,8	22,5
Maio 2	18,3	18,6	24,0	21,5	20,4	28,2	17,1
Maio 3	22,2	2,5	35,4	29,5	27,1	40,9	22,9
Junho 1	22,5	71,7	20,3	15,6	14,8	22,9	13,2
Junho 2	18,7	8,7	15,9	13,0	12,7	17,9	9,9
Junho 3	21,9	0,3	18,1	16,4	14,8	22,2	12,4
Julho 1	23,3	0,0	14,6	10,7	10,9	16,7	7,8
Total	307,40	367,50	267,59	257,33	211,81	325,91	210,90
Média	23,65	28,27	20,58	19,79	16,29	25,07	16,22
Variação	-	-	-	-10,26	-55,78	58,32	-56,69

T: Temperatura do ar; P: Precipitação; PM: Penman Monteith; HS: Hargreaves Samani; MK: Makkink; JH: Jansen Haise; CA: Camargo

Como observado no Balanço Hídrico Sequencial (Figura 7), observou-se no Balanço hídrico de cultivo excedente hídrico nos primeiros decêndios dos anos analisados em todos os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Figura 13). No entanto, no período de plantio e desenvolvimento da cultura do milho safrinha (maio a julho, houve deficiência, em todos os anos estudados, sendo necessário planejamento de irrigação para minimizar os efeitos da deficiência hídrica na cultura.

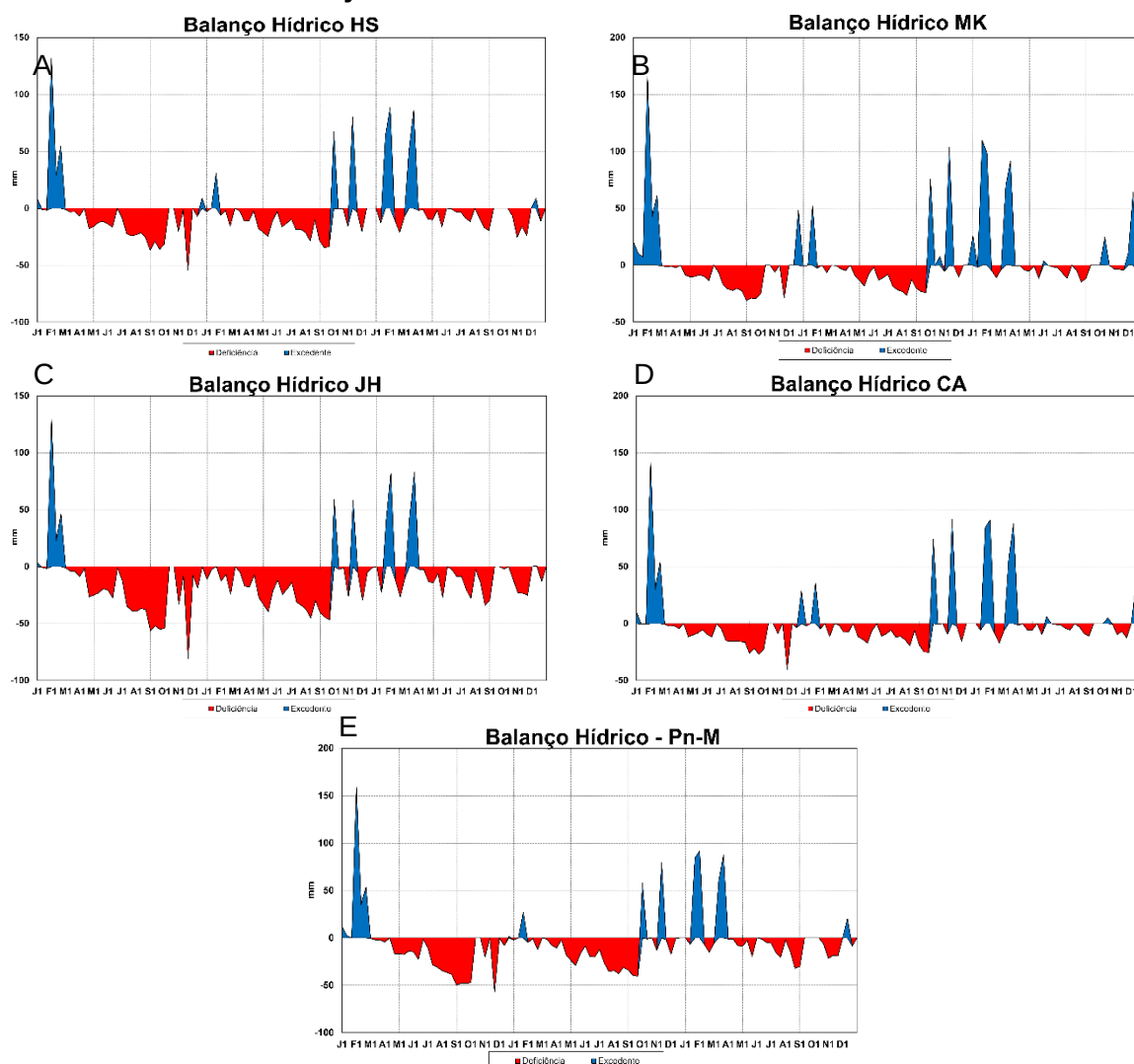
Analisando a Figura 13C, verificou-se que a estimativa realizada pelo método JH apresentou maior período de deficiência hídrica, em relação ao demais métodos analisados. A estimativa feita pelo método de CA superestimou os resultados, seguido dos métodos MK e HS, sendo este último que apresentou menor variação em relação ao método de PM. O ano de 2020 foi o ano que apresentou maior período de deficiência hídrica, em relação a 2021 e 2022.

O balanço hídrico de cultivo é uma ferramenta essencial na agricultura moderna, fornecendo uma abordagem científica para entender as necessidades de água das plantas e as condições de disponibilidade hídrica no solo. O planejamento de plantio

baseado em informações precisas do balanço hídrico é crucial para maximizar a eficiência do uso da água, otimizar a produtividade das culturas e garantir a sustentabilidade das operações agrícolas (Saputra; Zakaria; Chan, 2021).

De acordo com Lima *et al.* (2020), a análise do balanço hídrico de cultivo também permite a identificação e mitigação de riscos climáticos às culturas associados a eventos extremos, como secas ou inundações. Ao compreender as condições de disponibilidade hídrica no solo, os agricultores podem implementar medidas de adaptação, como o uso de práticas de conservação de água e sistemas de irrigação eficientes, para minimizar os impactos negativos desses eventos na produção agrícola.

Figura 13 - Extrato do balanço hídrico de cultivo com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM) para as médias descendias de janeiro 2020 a dezembro de 2022



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

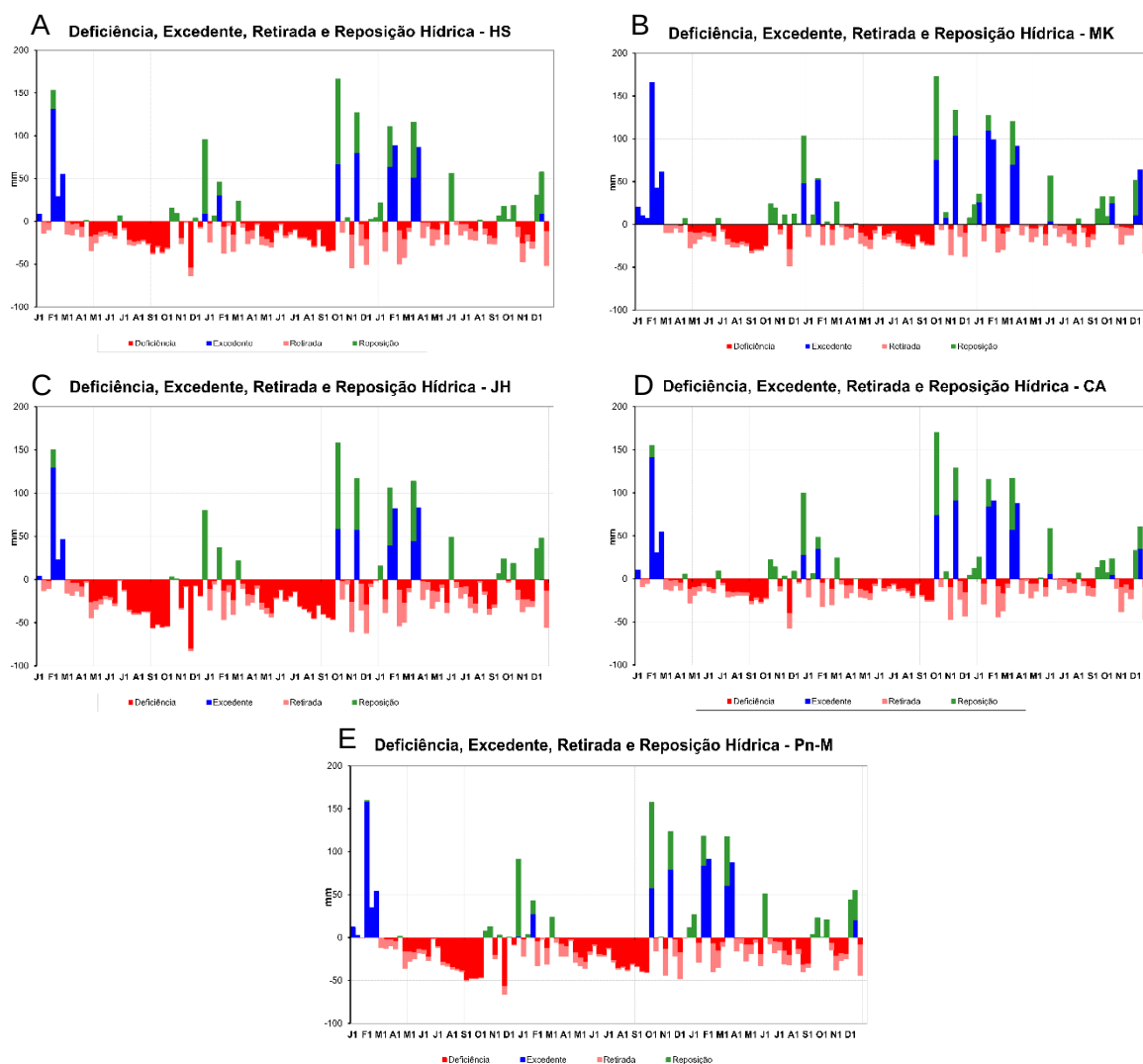
Os resultados das análises de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica estão apresentados na Figura 14. Analisando os métodos de estimativa da evapotranspiração, notou-se que os métodos JH, CA e HS superestimaram os valores de deficiência, em comparação com os métodos de MK e PM. Para o excedente, o método de CA foi o mais similar ao método de PM, seguido de HS.

A estimativa da evapotranspiração realizada pelo método padrão PM (Figura 14E), resultou em excedente nos meses de janeiro, fevereiro de 2020; terceiro decêndio de janeiro, primeiro decêndio de outubro e segundo decêndio de novembro de 2021; terceiro decêndio de janeiro, primeiro decêndio de fevereiro, segundo e terceiro de março e segundo decêndio de dezembro. Desta forma, o ano de 2022 foi mais propício para o plantio de milho no mês março.

Analisando dados históricos, a do Noroeste Paulista apresenta período de deficiência hídrica entre os meses de abril a outubro, seguido por um período chuvoso de novembro a março, resultando em quatro meses de excedente hídrico. Em contrapartida, setembro se destacou com maior período de deficiência hídrica, conforme corroborado por Silva Junior *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2010).

O milho safrinha no ano de 2020 apresentou decréscimo de produção devido à queda no volume das chuvas em diversas regiões do Brasil, como também na região Sul (CONAB, 2020). No entanto, no ano de 2021, a safrinha foi prejudicada de modo mais grave, havendo um decréscimo de produção de 22,1%, de acordo com levantamento de safra (CONAB, 2021), também devido à estiagem severa nas regiões produtoras. Este comportamento pode ser observado na Figura 13, em que se verifica menor reposição nos anos de 2020 e 2021, em comparação à 2022. O ano de 2022 apresentou maior excedente hídrico, o que impulsionou a produção do milho safrinha no Brasil, gerando um aumento de produção de 20,2%, em relação a safra passada (CONAB, 2022).

Figura 14 - Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica do balanço hídrico de cultivo estimadas por decêndios de janeiro 2020 a dezembro de 2022, com os valores de ETo calculados pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Jensen-Haise (JH), Camargo (CA) e Penman-Monteith (PM)



HS: Hargreaves-Samani; CA: Camargo; JH: Jensen-Haise; MK: Makkink; PM: Penman-Monteith.

A tabela 6 apresenta os resultados da estimativa da produtividade potencial (PP) e a produtividade atingível (PA) para os anos de 2020, 2021 e 2022, calculada a partir da ETo pelos métodos de PM, HS, MK, JH e CA (PA-PM, PA-HS, PA-MK, PA-JH e PA-CA). A PP para o ano de 2020 foi de 7318,14 kg ha⁻¹, no entanto a PA-PM foi 4374,21 kg ha⁻¹. Esse decréscimo ocorre devido às perdas causada pelos períodos de deficiência hídrica, observados nas Figuras 12 e 13.

Analisando a PA-HS, PA-MK, PA-JH e PA-CA no ano de 2020, verificou-se que os métodos JH e HS subestimaram a PA, em comparação com PM, com decréscimo de 786,61 e 255,437 kg ha⁻¹, respectivamente. Houve superestimação da PA nos

métodos MK e CA, com aumento de 744,02 e 286,69 kg ha⁻¹, em comparação com PM.

De acordo com levantamento da safra de grãos (CONAB, 2020), a produtividade nacional na segunda safra 2019/2020, foi em média 5541 kg ha⁻¹, apresentando decréscimo de aproximadamente 8%, em relação a safra 2018/2019. Segundo o levantamento, a região Sudeste, com ênfase em algumas localidades do Estado de São Paulo apresentaram volumes de chuva abaixo da média, com períodos de ausência de chuvas ao longo do desenvolvimento da cultura.

Para o ano de 2021, a PA foi de 7329,22 kg ha⁻¹, já a PA-PM foi de 3313,20 kg ha⁻¹, verificando decréscimo mais acentuado, em relação a PA-PM no ano de 2020. A redução da produtividade no ano de 2021 mais uma vez está atrelada às condições hídricas no período de desenvolvimento da cultura.

Analisando a PA-HS, PA-MK, PA-JH e PA-CA no ano de 2021, verificou-se novamente que os métodos JH e HS subestimaram a PA, em comparação com PA-PM, com decréscimo mais acentuado para o PA-JH (1213,32 kg ha⁻¹) e 243,11 kg ha⁻¹ para PA-HS, respectivamente. A PA-MK e PM-CA superestimou os resultados, com aumento mais acentuado de 1291,20 e 545,61 kg ha⁻¹, em comparação com PM.

A segunda safra brasileira de 2021 apresentou redução da produtividade, além da seca ocorrida em momentos de maior demanda pela cultura, houve a ocorrência de massas de ar frio que trouxeram geadas nos principais estados produtores. As condições climáticas adversas causaram decréscimo de produtividade, para 3982 kg ha⁻¹, redução de 27% em relação à segunda safra de 2020 (CONAB, 2021).

No ano de 2022, PP foi de 7150,03 kg ha⁻¹, sendo a PA-PM de 5641,21 kg ha⁻¹, a maior nos três anos estudados, representando um aumento de 29 e 70%, em comparação com os anos de 2020 e 2021, respectivamente. Analisando a PA-HS, PA-MK, PA-JH e PA-CA no ano de 2022, verificou-se o mesmo comportamento dos anos anteriores, sendo JH e HS, subestimando a PA e MK e CA, superestimando a PA.

A segunda safra brasileira de 2022 apresentou produtividade praticamente igual à segunda safra de 2021, com média de 3.893 kg ha⁻¹, deste modo, a estimativa da PA-PM foi maior que a média da segunda safra. De acordo com o levantamento da safra de grãos (CONAB, 2022), as regiões produtoras, como Estado de São Paulo, foram impactadas pela redução das precipitações a partir de abril. Além disso, houve forte ataque da cigarrinha do milho, inseto vetor do patógeno causador do enfezamento.

Tabela 6 – Estimativa da produtividade potencial e produtividade atingível para os anos de 2020, 2021 e 2022 para a cultura do milho em Ilha Solteira/SP.

Ciclo 2020					
Produtividade atingível (kg ha⁻¹)					
PP (kg ha ⁻¹)	PM	HS	MK	JH	CA
7318,14	4374,21	4118,77	5118,23	3587,59	4660,91
Variação	-	-255,437	744,02	-786,61	286,69
Ciclo 2021					
Produtividade atingível (kg ha⁻¹)					
PP (kg ha ⁻¹)	PM	HS	MK	JH	CA
7329,22	3313,20	3070,08	4604,40	2099,87	3858,81
Variação	-	-243,11	1291,20	-1213,32	545,61
Ciclo 2022					
Produtividade atingível (kg ha⁻¹)					
PP (kg ha ⁻¹)	PM	HS	MK	JH	CA
7150,03	5641,21	5558,02	6112,74	5080,86	5957,02
Variação	-	-83,18	471,53	-560,35	315,80

PP: produtividade potencial; PM: Penman Monteith; HS: Hargreaves Samani; MK: Makkink; JH: Jansen Haise; CA: Camargo

A influência da deficiência hídrica na produtividade das culturas é um tema crucial na agricultura, podendo ser observada em diferentes estágios de desenvolvimento das plantas e pode variar dependendo da sensibilidade das espécies vegetais envolvidas, do tipo de solo, do clima e de práticas agrícolas adotadas.

Durante a germinação e emergência das plantas, a deficiência hídrica pode retardar ou inibir o processo de germinação das sementes, reduzindo assim o estabelecimento inicial da cultura (Pokhrel, 2021). Isso pode levar a uma diminuição na densidade de plantas, afetando diretamente a produtividade final da cultura. Além disso, a deficiência hídrica durante a fase de crescimento vegetativo pode resultar em redução do crescimento das plantas, diminuição da área foliar e comprometimento da fotossíntese, levando a uma produção reduzida de biomassa e limitando o potencial de rendimento da cultura (Hunter; Kemanian; Mortensen, 2021).

A deficiência hídrica também pode afetar negativamente o desenvolvimento das estruturas reprodutivas das plantas, como flores e frutos, resultando em menor formação de órgãos de reprodução, aborto de flores, diminuição da taxa de polinização e redução na fixação de frutos. Isso pode levar a uma diminuição na quantidade e qualidade da colheita, afetando a produtividade e o rendimento econômico da cultura (Wan *et al.*, 2022).

Deste modo, o manejo adequado da irrigação desempenha um papel crucial na mitigação dos efeitos negativos da deficiência hídrica nas plantas, garantindo seu crescimento saudável, desenvolvimento adequado e máxima produtividade. Assim, o balanço hídrico se apresenta uma ferramenta que permite o monitoramento e avaliação das necessidades hídricas das culturas. Ao realizar uma análise detalhada desses parâmetros, é possível determinar o momento ideal para a aplicação de água de irrigação, como também planejamento da melhor época de plantio, evitando tanto a escassez quanto o excesso de água (Villa *et al.*, 2022).

5 CONCLUSÕES

Os métodos empíricos, especialmente Hargreaves-Samani e Camargo, mostraram-se viáveis para estimar a evapotranspiração de referência em Ilha Solteira/SP, em substituição ao método de Penman-Monteith.

Os métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise tendem a superestimar, enquanto Makkink tende a subestimar a ETo em comparação com Penman-Monteith.

O balanço hídrico sequencial revelou padrões climáticos específicos, como o veranico em março de 2022, onde Hargreaves-Samani e Camargo forneceram estimativas mais próximas de Penman-Monteith.

O balanço hídrico da cultura indicou deficiência hídrica durante o plantio e desenvolvimento do milho, destacando a necessidade de um planejamento cuidadoso de irrigação. A ETc calculada pelo método Hargreaves-Samani mostrou-se próximo às estimativas realizadas pelo método Penman-Monteith.

Os anos de 2021 e 2022 evidenciaram diferentes padrões de disponibilidade hídrica, influenciando diretamente na produtividade atingível da cultura.

Esses resultados fornecem uma base sólida para futuros estudos sobre o impacto da adoção desses métodos na produtividade e rentabilidade dos cultivos agrícolas em Ilha Solteira/SP.

REFERÊNCIAS

- ABD-ELMABOD, S. K. *et al.* Climate change impacts on agricultural suitability and yield reduction in a Mediterranean region. **Geoderma**, Amsterdam, v. 374, n. 4, p. 114453, 2020.
- ADJOVI, N. R. A. *et al.* Variation climatique et production vivrière au Sud-Bénin: cas de la commune de Bohicon. **Afrique Science**, Johannesburg, v. 15, p. 32 - 43. 2018.
- AFZAAL, H.; FAROOQUE, A.A.; ABBAS, F.; ACHARYA, B.; ESAU, T. Precision Irrigation Strategies for Sustainable Water Budgeting of Potato Crop in Prince Edward Island. **Sustainability**, London, v. 12, n. 6. p. 2419, 2020.
- AHMAD, A.; KHAN, S. Water and energy scarcity for agriculture: is irrigation modernization the answer? **Irrigation and Drainage**, Slough, v. 66, p. 34-44, 2016.
- AIRES, G. A.; HERNANDEZ, F. B. T. Disponibilidade hídrica do município de pereira barreto, região noroeste paulista, a partir do balanço hídrico climatológico normal. *In*: Inovagri International Meeting, IV. Fortaleza, CE, 2020. **Anais [...]** Fortaleza, CE: ABID, 2020. Disponível em: <http://icolibri.com.br/2020/public/__anais/TC2300323.pdf>. Acesso: 17 de setembro de 2023.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. *et al.* Caracterização do balanço hídrico climatológico decenal na Fazenda Santa Luzia, município de Jaborandi, BA. **EMBRAPA-Milho e Sorgo**, Sete Lagoas (MG), n. 1, p. 1-14, 2020.
- ALENCAR, L. P. *et al.* Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 337-343, 2011.
- ALFONSI, R. R. *et al.* **Métodos agrometeorológicos para controle da irrigação**. (Boletim técnico, 133)., Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, p. 62, 1990.
- ALI, U. *et al.* 2021. Climate change impacts on agriculture sector: A case study of Pakistan. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 51, n. 8, 2021.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO – Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998.
- ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, L. S.; PEREIRA, L. S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bull.**, v. 43 p. 1-34, 1994.
- ARAÚJO, W. R.; MEDEIROS, R. M.; FRANÇA, M. V.; Espacialização da evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE, Brasil. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 8, n. 3, p. 205-218, 2020.

ASCOLI, A. A. *et al.* Necessidade de irrigação na cultura da cana-de-açúcar em função da época de colheita. *In: Inovagri International Meeting, IV.* Fortaleza, CE, 2017. **Anais [...]** Fortaleza, CE: ABID, 2017.

BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v.13, n. 4, p. 449-466, 2008.

BANDOC, G.; PRAVALIE, R. Climatic water balance dynamics over the last five decades in Romania's most arid region, Drobeta. **Journal of Geographical Sciences**, v. 25, n. 11, p. 1307-1327.

BATTISTI, R; SENTELHAS, P.C. Drought tolerance of brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 1, n. 2, p; 285–298, 2015.
<https://doi.org/10.1017/S0014479714000283>

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; PILAU, F.G.; WOLLMANN, C.A. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, 390–396. 2013.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima: Princípios e aplicações**. Guaíba: Agrolivro, 2017.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006.

BERNARDO, S.; SOUSA, E. F.; CARVALHO, J. A. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), para as “áreas de baixada e de tabuleiros” da região Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, **UENF**, Boletim Técnico, 1996.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região noroeste paulista. **Irriga**, Botucatu, p. 94-101, 2017.

BLAIN, G.C. Considerações estatísticas relativas à oito séries de precipitação pluvial da Secretaria de Agricultura e abastecimento do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, v. 24, n. 1, p. 12-23, 2009.

BOGAWSKI, P.; BEDNORZ, E. Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe). **Water Resour. Manag.**, Netherlands, v. 28, p. 5021–5038, 2014.

BORGES, L. C.; HERNANDEZ, F. T.; FAUVEL, J. M. P. Balanço hídrico como ferramenta para planejamento da irrigação em Cassilândia-MS. *In: Inovagri International Meeting Virtual.* Fortaleza, CE, 2021. **Anais [...]** Fortaleza, CE: ABID. Disponível em:
<<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos>

715/irrigacao5868/inovagri_2021_borges_b_hidrico_cassilandia.pdf>. Acesso: 17 de setembro de 2023.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; BEZERRA, B. G. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 4, n. 1, p. 71-89, 2018.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.2, p. 251-257, 1999.

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

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1971.

CAPORUSSO, N. B.; ROLIM, G. S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, p. 1 - 9, 2015.

CARDOSO, C. T. V. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CASTIGLIO, V. S.; CAMPAGNOLO, K.; KOBIYAMA, M. Análise da evapotranspiração potencial no município de Cambará do Sul/RS. **Revista Geonorte**, Amazonas, v. 12, n. 39, p. 26-43, 2021.

CHU, R. *et al.* Changes in reference evapotranspiration and its contributing factors in Jiangsu, a major economic and agricultural province of eastern China. **Water**, Pittsburgh, v. 9, n. 486, 2017.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 9, p. 1-88, set. 2022. Safra 2021/22, Décimo Segundo levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 22 de nov. 2023.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 8, p. 1-97, set. 2021. Safra 2020/21, Décimo Segundo levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=30>. Acesso em: 22 de nov. 2023.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 7, p. 1-68, set. 2020. Safra 2019/20, Décimo Segundo levantamento. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=40>. Acesso em: 22 de nov. 2023.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. **Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 30, n. 4, p. 619-626, 2010.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande-SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.

DHAKAL, S.; GAUTAM, Y.; BHATTARAI, A. Evaluation of temperature-based empirical models and machine learning techniques to estimate daily global solar radiation at Biratnagar Airport, Nepal Adv. **Meteorol.**, 2020.

DJAMAN, K.; KOUDAHE, K.; AKINBILE, C. O.; IRMAK, S. Evaluation of eleven reference evapotranspiration models in semi-arid conditions. **J. Water Resour. Prot.**, Amsterdam, v. 09, p. 1469-1490, 2017.

D'ANGIOLELLA, G.; VASCONCELLOS, V. L. D.; ROSA, J. W. C. Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 83-90. Disponível em: <http://martes.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/@sumario.htm>. Acesso em: 10 set. 2023.

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. **Hydrological Processes**, Chichester v. 23, p. 3342-3353, 2009.

FOX, D. G. **Judging Air Quality Model Performance**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 62, p. 599-609, 1981.

FREITAS, J. C.; DANTAS, R. T.; TRINDADE, A. R. S.; PEREIRA, E. R. R. Analysis of variability of climatic indexes for the state of the Paraíba – PB. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Paraná, v. 4, n. 2, 2001.

GHIAT, I.; MACKEY, H. R.; AL-ANSARI, T. A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications. **Water**, Pittsburgh, v. 13, p. 2523, 2021

GONÇALVES, F. M.; FEITOSA, H. O.; CARVALHO, C. M.; FILHO, R. R. G.; JÚNIOR, M. V. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n. 2, p. 71-77, 2009.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. Alternative Methods of Reference Evapotranspiration for Brazilian Climate Types. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 567-578, 2018.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, p. 591-608, 2011.

HUNTER, M. C.; KEMANIAN, A. R.; MORTENSEN, D. A. Cover crop effects on maize drought stress and yield. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, London, v. 311, 2021.

HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Slough, v. 129, p. 53–63, 2003.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 1, p. 96–99, 1985.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Slough, v. 108, p. 225-230, 1982.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Mapas do Boletim Agroclimático**. 2016. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>. Acesso em: novembro de 2023.

ISLAM, S.; ALAM, R. Performance evaluation of FAO Penman-Monteith and best alternative models for estimating reference evapotranspiration in Bangladesh. **Heliyon**, Amsterdam, v. 7, n. 7, 2021.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 89, n. 4, p. 15-41, 1963.

JHAJHARIA, D.; DINPASHOH, Y. E.; KAHYA, V. P.; SINGH, A. Fakheri-Fard Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. **Hydrological processes**, Chichester, v. 26, p. 421-435, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. (eds.)). In press. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.

KIM, H-J.; CHANDRASEKARA, S.; KWON, H-H.; KIM, T-W. A novel multi-scale parameter estimation approach to the Hargreaves-Samani equation for estimation of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 275, 2023.

LAMICHHANE, J. R.; CONSTANTIN, J.; AUBERTOT, J. N.; DÜRR, C. Will climate change affect sugar beet establishment of the 21st century? Insights from a

simulation study using a crop emergence model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 238, p. 64–73, 2019.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2003

LENG, G.; ZHANG, X.; HUANG, M.; ASRAR, G. R.; LEUNG, L. R. The Role of Climate Covariability on Crop Yields in the Conterminous United States OPEN. **Nature Publishing Group**. 2016.

LIMA, C. I. S. *et al.* Método Alternativo de Zoneamento Agroclimático do Milho para o Estado de Alagoas. **Revista Brasileira De Meteorologia**, São Paulo, v. 35, p. 1057–1067, 2020.

LIU, Z.; YAO, Z.; WANG, R. Simulation and evaluation of actual evapotranspiration based on inverse hydrological modeling at a basin scale. **Catena**, Amsterdam, v. 180, p. 160-168 2019.

LUCAS, D. D. P.; HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I, C.; TRETIN, R.; HINNAH, F. D.; SILVA, J. R. Excendente hídrico em diferentes solos e épocas de semeadura do girasol no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 6, p. 431-440. 2015.

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

MANIVASAGAM, V. S.; ROZENSTEIN, O. Practices for upscaling crop simulation models from field scale to large regions. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 175, p. 105554, 2020.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 216, n. 8, p. 339–350, 2019.

MARTINS, M. A. *et al.* Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, Essex, v. 160, p. 21–30, 2018.

MAZIERO, L.; FREDERICK, S.; CREMASCO, C.; PUTTI, F.; GABRIEL FILHO, L. R. A. Modelagem neuro-fuzzy da evapotranspiração de referência baseada no método de camargo. **Irriga**, Botucatu, v. 1, p. 489-505, 2021.

MCMAHON, T.; PEEL, M.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, Amsterdam, v. 17, p. 1331-1363, 2013.

MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M. Classificação climática e balanço hídrico pelo método de Köppen e Thornthwaite do município de Barbalha, Ceará, Brasil. **Revista Equador**, v. 8, n. 03, p. 19-43, 2019.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MENDICINO, G.; SENATORE, A. Regionalization of the hargreaves coefficient for the assessment of distributed reference evapotranspiration in Southern Italy. **J. Irrig. Drain. Eng.**, New York, v. 139, p. 349-362, 2013.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 265, 2014.

MUHAMMAD, M. K. I. *et al.* Evaluation of empirical reference evapotranspiration models using compromise programming: a case study of Peninsular Malaysia. **Sustain**, p. 11, 2019.

NANDORF, R. J. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da Evapotranspiração de Referência no Oeste Baiano e Mesorregião Paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, Fortaleza, v. 14, n. 3, p. 4058-4070, 2020.

NDULUE, E.; RANJAN, R. S. Performance of the FAO Penman-Monteith equation under limiting conditions and fourteen reference evapotranspiration models in southern Manitoba. **Theor Appl Climatol.**, Wien, v. 143, p. 1285–1298, 2021.

OLIVEIRA, J. A. M. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Carbonita–MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 16, n. 2, p. 755-764, 2023.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico espacial na região Noroeste Paulista em 2018. *In: Inovagri International Meeting, IV.* Fortaleza, CE, 2019. **Anais [...]** Fortaleza, CE: ABID, 2019.

OLIVEIRA, J. Â. M.; OLIVEIRA, C. M. M. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Arinos–MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 12, n. 6, p. 3021-3027, 2018.

ONGARATTO, J. M.; BORTOLIN, T. A. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil. **Eng Sanit Ambient**, Rio de Janeiro, v. 26 n. 5, p. 979-987, 2021.

ORLANDINI, D. *et al.* Potencialidades das regiões brasileiras para instalação de uma fábrica de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35, n. 5, p. 1053-1060, 2011.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENGA, R.H. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, Sidney, v. 28, n.1, p. 1-13, 2009.

PAIVA, C. M. de S.; PINHEIRO, A. S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 39, n. 1, p. 42–51, 2016.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões citrícolas paulistas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n.1, p. 38–47, 2014.

PALOSUO, T.; HOFFMANN, M. P.; RÖTTER, R. P.; LEHTONEN, H. S. Sustainable intensification of crop production under alternative future changes in climate and technology: The case of the North Savo region. **Agricultural Systems**, Essex, v. 190, p. 103135, 2021.

PASSOS, M. L. V.; RAPOSO, A. B.; MENDES, T. J. Evapotranspiração de referência por diferentes métodos para o município de Chapadinha–MA. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, Campo Grande, v. 13, n. 2, p. 146-153, 2017.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Revista Scientia Agraria**, Paraná, v. 18, n. 1, p. 83-89, 2017.

PENG, L.; ZENG, Z.; WEI, Z.; CHEN, A.; WOOD, E. F.; SHEFFIELD, J. Determinants of the ratio of actual to potential evapotranspiration. **Glob. Change Biol.**, Oxford, v. 25, p. 1326-1343, 2019.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Editora Agropecuária, 2002.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. 1. ed. Piracicaba: FEALQ, 1997.

POKHREL, S. Effects of drought stress on the physiology and yield of the maize: a review. **Food and Agri Economics Review**, v. 1, n. 1, p. 36-40, 2021.

RIZO, A. A. I.; CICERO, C. J. Desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência na região Sul de Goiás. **Irriga**, Botucatu, v. 27, n. 2, 2022.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SANTANA, J. S.; LIMA, E. F.; SILVA, W. A.; FERNANDES, M. C.; RIBEIRO, M. I. D. Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Balsas-MA. **Enciclopédia biosfera**, Jandaia, v. 15, n. 27, 2018.

SANTOS, C. C. *et al.* Avaliação do uso da água em sistemas de irrigação utilizando o balanço hídrico climatológico sequencial. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 303-317, 2020.

SANTOS, R. A.; SANTOS, E. P.; SALES, R. A.; SANTOS, R. R. Estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Feira de Santana (BA). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 4, 2017.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 142-149, 2010.

SAPUTRA, A. W. W.; ZAKARIA, N. A.; CHAN, N. W. Assessing effects of climate change on irrigation water demand in the Lombok River Basin, Indonesia. **Earth and Environmental Science**, Edinburgh, v. 930, p. 012061, 2021.

SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. *In*: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: Funep, 2001.

SHIRMOHAMMADI-ALIAKBARKHANI, Z.; SABERALI, S. F. Evaluating of eight evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 239, 2020.

SILVA, A. D. G.; SANTOS, A. L. B.; SANTOS, J. M.; LUCENA, R. L. Balanço hídrico climatológico e classificação climática do estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Climatologia**, Paraná, v. 30, p. 798-816. 2022.

SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F.; REIS, L. S.; TEIXEIRA, A. H. C. Estabelecimento dos meses críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 12, n. 2, p. 122-131, 2018.

SILVA, F. A. *et al.* Milho para ensilagem cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional sob efeito de veranico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 1, p. 327-340, 2015.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. J.; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. C.; SILVA, C. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TASUMI, M. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. **Agr. Water Manage.**, Amsterdam, n. 226, 2019.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water budget and its use in irrigation. *In*: **The Yearbook of Agriculture - Water**. Washington, D.C., Department of Agriculture, 1955.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, New York, p. 55-94, 1948.

TOOLEY, B. E.; MALLORY, E. B.; PORTER, G. A.; HOOGENBOOM, G. Predicting the response of a potato-grain production system to climate change for a humid continental climate using DSSAT. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 307, p. 108452, 2021.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH: 2009.

VICENTE, M. R. *et al.* Evapotranspiração de referência utilizando o método FAO Penman-Monteith com dados faltantes. **Global Science Technology**, Rio Verde, v. 11, n. 03, p. 217-228, 2018.

VISHWAKARMA, D. K. *et al.* Methods to estimate evapotranspiration in humid and subtropical climate conditions, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 261, 2022.

VILLA, B. *et al.* Balanço hídrico climatológico: uma revisão. **Research, Society and Development**, Amsterdam, v. 11, n. 6, e50211626669, 2022.

WANNIARACHCHI, S.; SARUKKALIGE, R. A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future. **Hydrology**, Amsterdam, v. 9, n. 7, p. 123, 2022.

WAN, W. *et al.* Spatiotemporal patterns of maize drought stress and their effects on biomass in the Northeast and North China Plain from 2000 to 2019, **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 315, 2022.